

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Логвинов Андрій Миколайович



УДК 537.621.2; 538.945; 681.586.7

**ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВКОВИХ ПРИЛАДОВИХ СТРУКТУР
НА ОСНОВІ Ru I Co**

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.

Науковий керівник – кандидат фізико-математичних наук, доцент
Чешко Ірина Володимирівна,
Сумський державний університет,
докторант кафедри електроніки, загальної та
прикладної фізики.

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, доцент
Хурсенко Світлана Миколаївна,
завідувач кафедри охорони праці та фізики
Сумського національного аграрного університету,
м. Суми.

Захист відбудеться 26 березня 2021 року о 12-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.02 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корпус Ц, ауд. Ц-219.
E-mail: d55.051.02@sumdu.edu.ua.

Із дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, а також на сайті інституційного репозитарію СумДУ. Режим доступу :
<http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/82378>

Автореферат розіслано 25 лютого 2021 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ю.О. Шкурдода

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Стрімкий розвиток елементної бази спінтроники реалізується за рахунок поєднання різних технологій створення металевих наноструктур функціональної електроніки. Зокрема формування металевих функціональних наносистем у вигляді багат шарової або модифікованої мультишарової плівкової системи спін-клапанного типу за схемою псевдо спін-клапану «магнітний шар (мультишар) / немагнітний прошарок / магнітний шар (мультишар)» дає можливість створити нанорозмірні елементи магнітної пам'яті, комірки оперативної магніторезистивної пам'яті, спінові транзистори, гнучкі структури електронної техніки та надчутливі датчики низьких магнітних полів. Забезпечення надійної роботи таких приладових структур можливе за умови чіткого розуміння особливостей кристалічної структури, фазового складу, дифузійних процесів, електрофізичних та магніторезистивних властивостей плівок, на основі яких створені вищезгадані системи. Необхідною умовою при прогнозуванні стабільності роботи функціональних приладових структур є встановлення оптимальних умов одержання синтетичних антиферомагнітних шарів (САФ) та режимів термообробки, які суттєво впливають на електрофізичні та магніторезистивні властивості спін-клапанів.

Особливий науковий інтерес викликає застосування мультишарів типу $[Ru/Co]_n$ або $[Cu/Co]_n$, оскільки в них фіксуються максимальні величини магнітоопору (МО) серед металевих наноструктур. Стабільність робочих характеристик даних приладових структур спостерігається за товщини окремих шарів в межах (2-3) нм. В сучасному приладобудуванні одним із можливих варіантів формування плівкових структур, які мають стабільні магніторезистивні характеристики є псевдо-спін-клапани, які в своєму складі містять лише два магнітні шари різної коерцитивності розділені немагнітним прошарком Ru або Cu.

Отже, наведена вище інформація вказує на доцільність комплексного дослідження особливостей кристалічної структури, фазового складу, розмірної та температурної залежностей електрофізичних, магніторезистивних властивостей функціональних плівкових приладових систем на основі магнітної складової Co та немагнітної Ru або Cu.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі електроніки, загальної та прикладної фізики Сумського державного університету в рамках держбюджетної теми: «Термостабільні металеві спін-клапани для реалізації спінових каналів в компонентах гнучкої сенсорної електроніки» (2017–2020 рр.) № 0117U003925; «Вплив фізичних процесів на властивості спін-вентильних структур на основі плівок Fe, Co та Ag, Au, Cu і магнітних наночастинок» (2016–2018 рр.) № 0116U002623.

Дисертант брав участь у виконанні НДР як виконавець наукових досліджень та під час підготовки проміжних і заключних звітів.

Мета і задачі досліджень. Основною метою даної роботи є комплексне дослідження фізичних характеристик плівкових приладових структур на основі

металів VIII групи (зокрема Co, Ru або Cu) з встановленням особливостей їх структурно-фазового стану, дифузійних процесів, електрофізичних та магніторезистивних властивостей. Виходячи з поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові задачі:

- освоїти методіку формування безоксидних тонких плівок ГЦП-Co і ГЦП-Ru з використанням електронно-променевого методу конденсації та дослідити вплив умов осадження на структурні особливості отриманих зразків;
- дослідити особливості структурно-фазового стану та морфологію поверхні одношарових зразків Ru та багатошарових структур на основі Co і Ru в широкому інтервалі ефективних товщин та температур відпалювання;
- установити наявність можливого протікання дифузійних процесів на межі поділу шарів Co і Ru методом вторинної іонної мас-спектрометрії;
- експериментально дослідити температурну залежність питомого опору і термічного коефіцієнту опору (ТКО) для одношарових плівок Ru з розрахунком енергії активації заліковування дефектів згідно теорії Венда, плівок Co та тришарових плівкових систем типу Co/Ru/Co;
- провести дослідження магніторезистивних властивостей багатошарових та мультишарових плівкових систем на основі Co і Ru з розрахунком робочих характеристик сформованих приладових структур (чутливість, робочий діапазон магнітних полів, коерцитивна сила, величина МО) у широкому діапазоні температур та ефективних товщин та порівняти їх з результатами досліджень існуючих структур на основі Co і Cu;
- проаналізувати доцільну можливість застосування структур на основі плівок Co і Ru(Cu) при формуванні термостабільних функціональних елементів спіні-кляпанних структур, датчиків магнітного поля, елементів (сенсорів) в галузях електронної техніки.

Об'єкт дослідження – процеси фазоутворення та вплив температури відпалювання, магнітного поля і умов конденсації на електрофізичні, магніторезистивні властивості, а також дифузійні процеси в багатошарових плівкових системах на основі Co і Ru (Cu) для формування приладових структур прикладної електроніки.

Предмет дослідження – структурно-фазовий стан, дифузійні процеси, електрофізичні та магніторезистивні властивості одно- та багатошарових плівкових систем і приладових плівкових структур спіні-кляпанного типу на основі Co, Ru або Cu.

Методи дослідження: експериментальні методи отримання (електронно-променеве та магнетронне вакуумне осадження металів) та дослідження тонкоплівкових зразків (просвічувальна електронна мікроскопія (ПЕМ) та електронографія, атомно-силова мікроскопія (АСМ), енергодисперсійний мікроаналіз (ЕДА), метод вторинно-іонної масспектрометрії (ВІМС), високочотна резистометрія для вимірювання магнітоопору та температурного коефіцієнту опору зразків із використанням двоточкової схеми, магніторезистивні вимірювання при поздовжній, перпендикулярній і поперечній геометріях); теоретичні методи обробки та аналізу отриманих експериментальних результатів (розрахунки за методою Венда, макроскопічно

моделлю електрофізичних властивостей тонких плівок, розрахунки ефективних коефіцієнтів дифузії атомів).

Наукова новизна отриманих результатів. Дослідження кристалічної структури, фазового складу, електрофізичних та магніторезистивних властивостей одношарових плівок Ru/Π, дво- та багатшарових плівкових систем на основі Ru та Co і мультишарів $[Ru/Co]_n/\Pi$ (n – кількість повторів фрагментів мультишару) у поєднанні з аналізом особливостей фізичних властивостей приладових плівкових систем спін-клапанного типу на їх основі дозволило одержати наступні результати:

1. Вперше на основі експериментальних даних отримані розмірні залежності значень питомого опору $\rho(d)$ та термічного коефіцієнта опору $\beta(d)$ при кімнатній температурі для одношарових плівок Ru з товщинами до 100 нм (з розрахунком параметрів електроперенесення з використанням лінеаризованої моделі та ізотропного розсіювання) та тришарових плівок Co(20 нм)/Ru(x)/Co(20 нм), де x змінюється від 0 до 20 нм.

2. Вперше за результатами експериментальних досліджень електрофізичних властивостей тонких плівок Ru в широкому інтервалі ефективних товщин (10-100) нм і температур (300-700) К та проведених розрахунків енергій активації заліковування дефектів E згідно методики Венда показано, що на графіках залежностей спектрів дефектів кристалічної ґратки спостерігаються характерні максимуми, що відповідають енергіям заліковування дефектів вакансійного типу, а значення E лежить в межах від 0,4 до 0,9 eV і є величиною обернено пропорційною товщині зразка.

3. Вперше встановлені особливості структурно-фазового стану і протікання дифузійних процесів на межі поділу окремих шарів у двошарових плівкових системах на основі Ru і Co та проаналізоване питання термічної стабільності інтерфейсів у них. Показано, що процеси дифузії атомів на інтерфейсі Ru/Co у цих плівках за температур до 700 К є незначними навіть під впливом іонної стимуляції при дослідженні методом ВІМС. Розраховані значення коефіцієнтів дифузії показують, що більш інтенсивною є термічна дифузія атомів Co в шар Ru $(0,8-1,1) \cdot 10^{19} \text{ м}^2 / \text{с}$ ніж атомів Ru в шар Co $(0,1 \cdot 10^{19} \text{ м}^2 / \text{с})$.

4. Показана доцільність застосування тонких шарів Ru у якості немагнітного прошарку для розділення магнітних шарів Co для досягнення більш вираженого магніторезистивного ефекту при кімнатній температурі вимірювання на прикладі тришарової системи Co(20)/Ru/Co(20)/Π при зміні товщини прошарку з Ru від 0 (штучна межа між шарами Co) до 20 нм.

5. Набула подальшого розвитку концепція розширення принципів формування приладових наносистем на основі тонких металевих плівок. За результатами комплексних досліджень магніторезистивних властивостей структур спін-клапанного типу та їх фрагментів на основі Co і Ru та Cu було запропоновано методику формування чутливих елементів датчиків магнітного поля у вигляді плівкової багатшарової системи з використанням мультишару типу $[Ru/Co]_n$ та $[Cu/Co]_n$. Доведено, що запропоновані моделі можуть працювати в інтервалі магнітних полів до 500 мТл та фіксувати зміну величини

магнітоопору в діапазоні 0,02-1% і є термічно стабільними за температур до 700 К.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані у ході виконання дисертаційної роботи наукові результати, можуть застосовуватися при розробці нової та вдосконалення існуючої елементної бази функціональних елементів сенсорної електроніки, робота яких базується на зміні опору металевій наноструктурі під впливом зовнішнього магнітного поля за рахунок реалізації ефективного спин-залежного розсіювання електронів. Розроблена багатофункціональна структура може бути використана для потреб гнучкої електроніки при створенні спінових діодів та транзисторів, спінових ізоляторів, комірок оперативної магніторезистивної пам'яті, чутливих елементів сенсорів магнітного поля тощо.

Результати проведених досліджень були використані при розробці патенту на корисну модель № 136613 «Функціональний металевий елемент гнучкої електроніки спин-клапанного типу», що виконаний у вигляді паралелепіпеда із багатошарової металеві плівки з магнітних і немагнітних металів. Запропонована нова структура функціонального металеві багатошарового плівкового елемента представляє собою наносистему спин-клапанного типу у поєднанні з мультишаром типу $[Cu/Co]_n$.

Одне із фундаментальних значень отриманих результатів полягає у подальшому розвитку уявлень про процеси фазоутворення, магніторезистивні та електрофізичні властивості нанорозмірних чутливих елементів сформованих у вигляді спин-клапанних структур на основі металів Co і Ru або Cu .

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному пошуку і аналізі літературних джерел, проведенні наукових досліджень. Автор особисто отримував зразки, проводив дослідження їх електрофізичних, магніторезистивних, структурно-фазових та дифузійних властивостей, здійснював обробку й аналіз отриманих результатів. Постановку задач досліджень, обговорення та узагальнення результатів зроблено разом із науковим керівником к. ф.-м. н., доц. Чешко І.В. Часткове отримання зразків та їх дослідження методом ЕДА були проведені к. ф.-м. н. Воробйовим С.І. в Університеті Павла Йозефа Шафарика (м. Кошице) в рамках проектів VEGA No.1/0204/18 та SK-BY-RD-19-0008. Дослідження зразків методом ВІМС були проведені к. ф.-м. н., доц. Салтиковою А.І. в СПДУ ім. А. С. Макаренка. В обговоренні результатів досліджень брали участь д. ф.-м. н., проф. Проценко С.І., д. ф.-м. н., доц. Шкурдода Ю.О та к. ф.-м. н., доц. Пазуха І.М. Усі наукові положення й висновки, винесені на захист, належать авторові дисертації.

У праці [1] здобувач провів дослідження особливостей структурно-фазового стану та дифузійних процесів у двошарових системах сформованих на основі плівок Co і Ru. Текст статті підготовлено у співавторстві.

У праці [2] здобувач провів вимірювання магнітоопору та електрофізичних властивостей спин-клапанних структур на основі Co, Cu, Fe, Au та Ru. Текст статті підготовлено у співавторстві.

Праця [3] присвячена комплексному дослідженню структурно-фазового стану та магніторезистивних властивостей спін-кляпанних структур на основі Co і Cu. Текст статті підготовлено у співавторстві.

Основні наукові результати автор доповідав особисто на наукових семінарах і конференціях [4-13]. Робота [14] представляє собою патент України на корисну модель «Функціональний металевий елемент гнучкої електроніки спін-кляпанного типу: пат. 136613 Україна, МПК(2006.01) G01R 33/09». Особистий внесок дисертанта полягає у дослідженні магніторезистивних характеристик спін-кляпанних структур. Текст роботи підготовлено у співавторстві.

Усі наукові положення і висновки, що винесені на захист, належать авторові дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові та практичні результати роботи оприлюднені та обговорені на таких конференціях: науково-технічних конференціях «Фізика, електроніка, електротехніка» (м. Суми, 2016–2019 рр.); 8-й міжнародній науково-практичній конференції «Electronics and Information Technologies» (м. Львів, 2016 р.); XII міжнародній конференції «Electronics and Applied Physics» (м. Київ, 2016 р.); міжнародній науково-практичній конференції «NANO-2017» (м. Чернівці, 2017 р.); міжнародній конференції студентів і молодих науковців із теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА» (м. Львів, 2018 рр.); міжнародних конференціях «Nanomaterials: Applications and Properties» (м. Львів, смт. Затока, 2016-2018 рр., 2020 р.); XII міжнародній конференції «ION Implantation and other Applications of ions and Electrons» (м. Казімеж-Дольний, Польща, 2018 р.); міжнародній конференції «Condensed Matter & Low Temperature Physics 2020» (м. Харків, 2020 р.).

Публікації. Результати дисертації опубліковані у 14 працях (6 у виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus), серед яких 2 статті у фахових виданнях України, 1 розділ колективної монографії, 3 статті у матеріалах конференцій, 1 патент України на корисну модель і 7 тез доповідей.

Структура і зміст роботи. Робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел із 174 найменувань на 19 сторінках. Дисертацію викладено на 169 сторінках, із них 127 сторінок основного тексту; робота містить 65 рисунки і 12 таблиць, зокрема 51 рисуноків і 4 таблиці на 35 окремих аркушах.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, відзначений зв'язок роботи з науковими програмами і темами, сформульовані мета й основні задачі дослідження, висвітлені наукова новизна і практичне значення одержаних результатів, наведена інформація про особистий внесок здобувача, апробацію одержаних результатів, структуру та зміст дисертаційної роботи.

У **першому розділі** «Фізичні властивості та галузі застосування плівок Ru (літературний огляд)» наведений огляд літературних даних щодо накопичених результатів дослідження електрофізичних властивостей, особливостей формування та структурно-фазового стану тонких плівок Ru, та магніторезистивних властивостей плівкових структур на основі Ru. Також висвітлене питання стосовно застосування нанорозмірних плівок Ru в різних галузях електроніки.

Перший підрозділ містить узагальнені дані стосовно дослідження електрофізичних властивостей тонких плівок Ru. Проведено аналіз літературних даних щодо температурної залежності питомого опору нанорозмірних зразків Ru у поєднанні з дослідженням їх структурних особливостей за різних умов формування та режимів термічної обробки.

У *другому підрозділі* розглянуто особливості формування та структурно-фазовий стан плівок Ru. Наведені результати рентгенографічних досліджень зразків Ru в залежності від умов отримання. Досконально описаний фізичний механізм росту плівок нанорозмірного Ru.

У *третьому підрозділі* розглянуто особливості магніторезистивних властивостей плівкових систем сформованих на основі Ru. Встановлено, що для реалізації відносно великих значень у величині магніторезистивного ефекту у три- та багатошарових системах чи системах спін-клапанного типу, ефективна товщина немагнітного прошарку Ru не повинна перевищувати 5 нм. Доцільним при цьому є застосування при формуванні магнітних шарів тонких плівок Co та мультишарів на його основі.

Четвертий підрозділ містить дані стосовно застосування нанорозмірних плівок Ru в різних галузях електроніки. Показано, що плівки Ru доцільно застосовувати при формуванні датчиків, які використовуються у схемах для детектування надслабких магнітних полів.

У **другому розділі** «Методика і техніка експерименту» описані методи отримання та дослідження електрофізичних і магніторезистивних властивостей тонких плівок, а також їх структурно-фазового стану, морфології поверхні та дифузійних процесів на межі поділу шарів. У *першому підрозділі* описано обладнання для конденсації плівкових зразків методом пошарового осадження. Тонкі металеві плівки Co і Ru(Cu) та системи на їх основі були отримані методом електронно-променевого випаровування у робочій камері вакуумної установки ВУП-5М (за тиску залишкових газів близько 10^{-4} Па) та магнетронного осадження у високо-вакуумній камері установки АТС Orion Series Sputtering Systems при $p \approx 10^{-7}$ Па. Для всіх зразків були дотримані однакові умови конденсації, що дає змогу більш точно провести інтерпретацію і аналіз отриманих результатів. Температура підкладки при осадженні складала 300 К, а швидкість конденсації для шарів Co і Ru змінювалася у межах від 0,4 до 1,5 нм/с у випадку електронно-променевого випаровування та від 0,05 до 0,15 нм/с при використанні методу магнетронного осадження. За таких умов конденсації всі зразки мають нанодисперсну структуру та не містять домішкових фаз. Товщину зразків контролювали в процесі осадження методом кварцового резонатора.

У *другому підрозділі* описані методи дослідження кристалічної будови та фазового складу плівкових зразків. Для проведення досліджень кристалічної структури сконденсованих зразків (наприклад, розміру кристалітів, дефектів кристалічної будови) та типу і параметрів ґратки під час експерименту були використані методи електронної мікроскопії та дифракції електронів (прилад ПЕМ-125К). Для більш точних розрахунків при розшифровці електроннограм було використане програмне забезпечення розроблене в середовищі програмування LabVIEW 2016, принцип роботи якого заснований на асинхронному багатопоточному кінцевому автоматі. При дослідженні зразків та аналізі впливу процесу термовідпалювання на морфологію поверхні (розмір кристалітів, шорсткість поверхні) був використаний метод атомно-силової мікроскопії (АСМ), який дозволяє отримати зображення поверхні у двох режимах: топографічному та профільному (3D зображення). Застосування даного методу дозволило провести аналіз зміни розмірів кристалітів при термічному відпалюванні зразків. Для проведення досліджень був використаний атомно-силовий мікроскоп Dimension Edge компанії Bruker. Задля контролю наявності домішок у зразках був використаний метод енергодисперсійного аналізу (ЕДА) із застосуванням растрового мікроскопа Tescan Vega 3 XM та ЕДА приставки X-ACT від Oxford Instruments.

У *третьому підрозділі* описано процедура дослідження особливостей протікання дифузійних процесів із застосуванням методу вторинно-іонної мас-спектрометрії. Вимірювання проводилися з використанням спектрометра MS 7201M з первинними іонами Ag⁺. Під час досліджень швидкість травлення поверхні зразків була відносно низькою (до 0,5 нм/хв). Обрання даного режиму пояснюється необхідністю максимального зниження впливу іонно-стимульованої дифузії (ІСД) та «ефекту кратера» на кінцевий вигляд побудованих дифузійних профілів.

Четвертий підрозділ присвячений опису методики дослідження електрофізичних властивостей тонких плівок Ru та систем на його основі, які були проведені для аналізу розмірних ефектів у величинах термічного коефіцієнту опору β (ТКО) та питомого опору ρ . У процесі стабілізації електрофізичних властивостей металевих плівок, з використанням методики Венда, проведені розрахунки енергії заліковування дефектів та проаналізовано вплив на її величину товщини досліджуваних зразків. Термічне відпалювання зразків проводилося у вакуумній камері установки ВУП-5М (тиск газів залишкової атмосфери $p = 10^{-4}$ Па з використанням двоточкового резистивного методу. Термовідпалювання зразків проводилося протягом двох стабілізаційних циклів «нагрівання↔охолодження» при постійній швидкості 5 К/хв. У процесі термовідпалювання фіксувалася зміна величини опору при зміні температури, що й дозволило побудувати експериментальні залежності $R(T)$. Розрахунок величини інтегрального та диференціального ТКО проводився по другому циклу охолодження.

У *п'ятому підрозділі* описано методику дослідження магніторезистивних властивостей структур на основі Co, Ru або Cu. Вимірювання проводили в автоматизованому режимі за допомогою автоматизованого комплексу. До

основних складових частин установки слід віднести: електромагніти змінного поля (від 0 до 600 мТл); програмно-керований блок живлення котушок Korad KA3005P; мультиметр Keithley 2000 Digital (вимірювання значень опору); АЦП-ЦАП перетворювач NI USB 6008; систему реле зміни полярності на входах електромагнітів та модуль повороту зразків.

У **третьому розділі** «Структурно-фазовий стан та електрофізичні властивості одношарових плівок Ru» наведені результати експериментальних досліджень структурно-фазового стану тонких плівок Ru у поєднанні з дослідженнями їх електрофізичних властивостей у діапазоні температур 300 - 900 К.

У *першому підрозділі* наведені результати вивчення мікроструктури та фазового складу одношарових плівок Ru у залежності від умов отримання та режимів термічної обробки. Показано, що структура одношарових тонких плівок Ru залежить не тільки від їх товщини, а й від температури підкладки. Одношарові плівки ГЦП-Ru без слідів оксиду були отримані при $d > 10$ нм з наступною термообробкою до $T_b = 900$ К. Розраховані значення параметрів решітки складають $a = (0,270 \pm 0,001)$ нм та $c = (0,430 \pm 0,001)$ нм, що близько до табличних значень для масивного Ru ($a_0 = 0,2705$ нм та $c_0 = 0,4281$ нм). При товщинах менших за 10 нм ($T_n = 300$ К) структура плівок є квазіаморфною.

На рисунку 1а зображена мікроструктура та електронограма зразка Ru(50)/П отримана за кімнатної температури без термовідпалювання. За даних умов отримання структура плівки має однорідний характер з середнім розміром зерна близько $L_{cp} = 5$ нм.

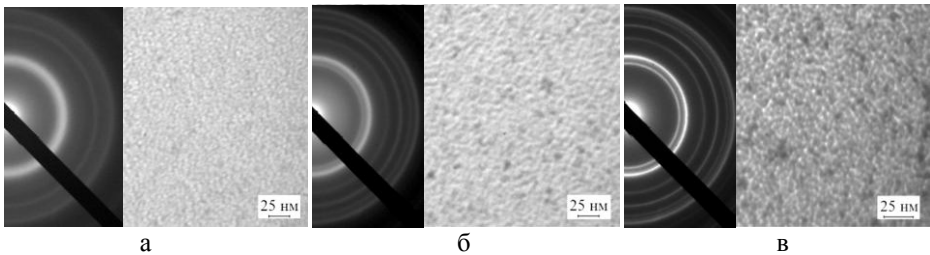


Рисунок 1 – Електронограми та кристалічна структура зразка Ru(50)/П при температурі відпалювання 300 К (а), 600 К (б) та 900 К (в)
 $L_{cp} = 5$ нм.

Дифракційна картина при цьому не є чіткою, що є результатом формування нанорозмірної структури, що знаходиться у невірноваженому стані після конденсації. Для термостабілізації плівок Ru проводився циклічний процес термообробки до 600 К (рис. 1б), а потім до 900 К (рис. 1в). Це сприяло незначному збільшенню середнього розміру зерен до $L_{cp} = (5 - 7)$ нм за рахунок процесів стабілізації та рекристалізації тонкоплівкового зразка. Процес термообробки сприяє покращенню однорідності структури зразка та

завершенню процесів стабілізації, але дифракційні кільця пр цьому все ще не є досить чіткими.

Базуючись на даних, представлених у літературному огляді, які свідчать про суттєвий вплив температури підкладки на структуру зразків, подальші дослідження структурно-фазового стану були проведені для зразків з товщиною більше 50 нм, одержаних на підігріті до 500 К підкладки з подальшим термовідпаленням до 900 К. На рисунку 2 приведена електронोगрама (а) та кристалічна структура (б) зразка Ru(50)/П після відпалювання до 900 К, а на рисунку 3 відповідний дифракційний спектр. За результатами досліджень кристалічної структури зразка Ru(50)/П при температурах $T_{\text{п}} = 500$ К та $T_{\text{в}} = 900$ К. Середній розмір зерен у даній структурі ($L_{\text{ср}}$) складає близько 20 нм.

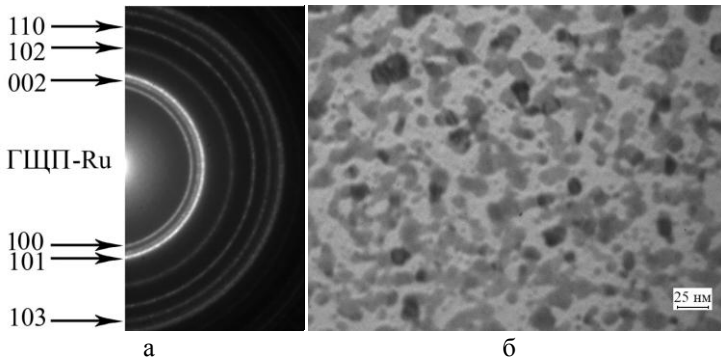


Рисунок 2 – Електронोगрама (а) та кристалічна структура (б) зразка Ru(50)/П після відпалювання до $T_{\text{в}} = 900$ К при осадженні за $T_{\text{п}} = 500$ К. У дужках вказана товщина в нм

Отже, при формуванні зразків на підігрітій до 500 К підкладці відбувається утворення дифракційної картини з чітко розділеними кільцями, чому сприяє значне збільшення розмірів зерен (у 4 рази) (рис. 2 а). За результатами електронोगрафічних досліджень зразка Ru(50)/П були проведені розрахунки параметрів a та c . Результати розшифровки електронोगрами наведені в таблиці 1, а на рисунку 3 представлені дифракційні спектри від зразка Ru(50)/П.

Досліджуваний зразок (Ru(50)/П) має однофазний склад, що відповідає ГЩП-Ru з параметрами решітки близькими до табличних значень. Оксидна фаза RuO₂ відсутня. Аналізуючи мікрознімки кристалічної структури зразків за різних товщин слід відмітити, що середній розмір зерен, майже не залежить від товщини зразка. При товщині зразків $d = (10-100)$ нм одношарові плівки Ru мають нанодисперсну структуру з $L_{\text{ср}} = (5-15)$ нм. У процесі термічного відпалювання, внаслідок процесів рекристалізації, кристалічна структура набуває лабіринтну форму. Середній розмір зерна при цьому не перебільшує 20 нм.

Фазовий склад зразка Ru(50)/П при осадженні за $T_n = 500$ К після відпалювання до $T_b = 900$ К

№ п/п	I , в.о.	d_{hkl} , нм	hkl	Фаза	a , нм	c , нм
1	Ср	0,233	100	ГЦП	0,2668	0,4286
2	Ср	0,215	002	ГЦП	0,2683	0,4281
3	ДС	0,204	101	ГЦП	0,2664	0,4288
4	Ср	0,156	102	ГЦП	0,2698	0,4301
5	Ср	0,134	110	ГЦП	0,2680	0,4305
6	Ср	0,118	103	ГЦП	0,2661	0,4280
$a_0(\text{Ru})=0,2686$ нм		$c_0(\text{Ru})=0,4272$ нм				
$\bar{a}(\text{Ru})=0,2675$ нм		$\bar{c}(\text{Ru})=0,4290$ нм				
ДС – дуже сильна, С – сильна, Ср – середня						

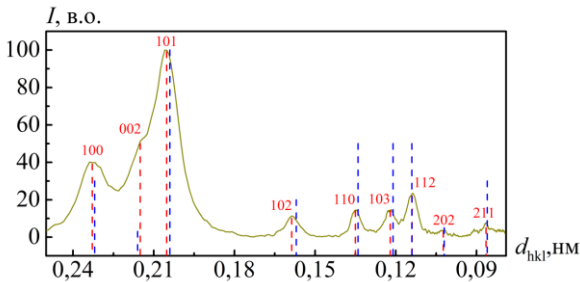


Рисунок 3 – Дифракційний спектр зразка Ru(50)/П, осадженого при $T_n = 500$ К після відпалювання до $T_b = 900$ К:
 – розрахункові дані,
 – таблицні дані

Аналіз елементного складу на наявність домішкових атомів у одношарових плівках Ru був проведений енергодисперсійним методом. Результати досліджень показали, що на спектрах фіксуються лише піки, що відповідають металу Ru, а також піки С, що належать матеріалу скловуглецевої підкладки, яка була використана при дослідженнях. Домішкові елементи на спектрах відсутні, а отже методом ЕДА було підтверджено, що сформовані одношарові плівки Ru мають хімічний склад: 100 ат. % Ru.

На рисунку 4 приведені АСМ знімки поверхні свіжосконденсованих (рис. 4 а, в) та відпалених до температури 900 К (рис. 4 б, г) одношарових плівок Ru з товщинами $d = 10$ і 40 нм у режимі топографії.

Аналізуючи отримані зображення, можна відмітити, що шорсткість поверхні збільшується при збільшенні товщини плівок. Про це свідчать результати розрахунків величини шорсткості поверхні ($h = 2$ нм для свіжосконденсованого зразка при $d = 10$ нм та $h = 4$ нм – при $d = 40$ нм).

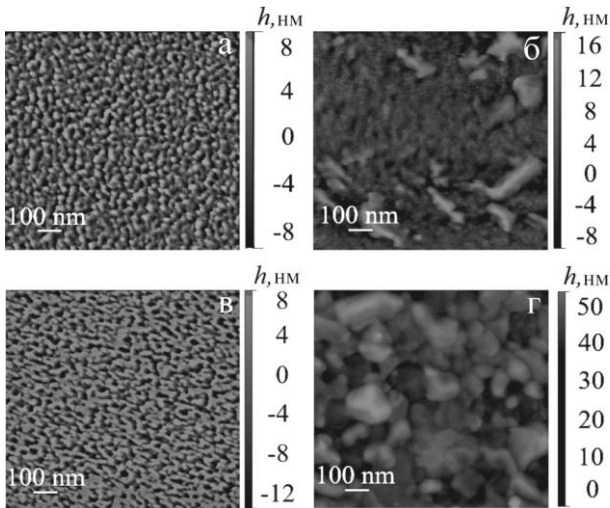


Рисунок 4 – АСМ зображення поверхні плівок Ru (10) (а, б) та Ru (40) (в, г) до (а, в) та після відпалювання до 900 К (б, г)

Порівнюючи даний результат з даними просвічуючої електронної мікроскопії, можна зробити висновок, що зростання шорсткості поверхні пов'язано із хоч і не значним, але все ж зростанням середнього розміру кристалітів при збільшенні товщини. Подальше зростання шорсткості поверхні зразків після температурної обробки пов'язано зі збільшенням середнього розміру зерен під час відпалювання ($h = 4$ нм при $d = 10$ нм та $h = 9$ нм при $d = 40$ нм).

Другий підрозділ присвячений вивченню терморезистивних властивостей одношарових плівок Ru в інтервалі товщин 10-100 нм та температур 300-900 К.

У процесі стабілізації електрофізичних властивостей плівок спостерігається незворотне зменшення їх питомого опору, що обумовлено процесами заліковуванням структурних дефектів. Це дозволило вивчити спектр дефектів кристалічної будови плівок, отриманих за однакових фізико-технологічних умов конденсації (швидкість осадження, температура підкладки, вакуумні умови), у залежності від їх товщини.

Встановлено, що процес термостабілізації плівок Ru у інтервалі товщин (10 -100) нм призводить до незворотнього зменшення величини питомого опору у порівнянні із щойносконденсованими зразками у (1,58-2,22) разів відповідно. Величина ρ має порядок 10^{-7} Ом·м, а температурний коефіцієнт опору β 10^{-3} К $^{-1}$. Узагальнені залежності $\rho(d)$ та $\beta(d)$ для інтегрального ТКО зведені на рисунку 5. Результати розрахунків енергій активації заліковування дефектів та величини F_0 , числове значення якої пропорційне концентрації дефектів у плівках, згідно з теорією Венда зведені у таблиці 2.

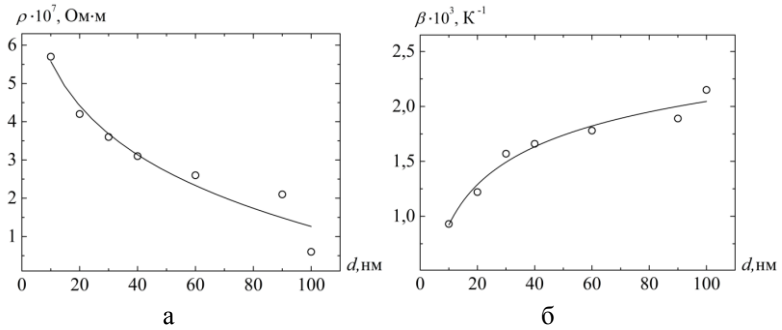


Рисунок 5 – Розмірні залежності $\rho(d)$ (а) та $\beta(d)$ (б) для інтегрального ТКО зразків Ru в діапазоні товщин від 10 до 100 нм

Таблиця 2

Зміна питомого опору та енергій активації заліковування дефектів плівки Ru після першого термостабілізуючого циклу

$d, \text{нм}$	10	20	30	40	60	90	100
ρ_1/ρ_2	1,58	1,54	1,8	1,71	1,93	1,75	2,22
$\Delta\rho, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$3,4\cdot 10^{-7}$	$2,3\cdot 10^{-7}$	$2,9\cdot 10^{-7}$	$2,3\cdot 10^{-7}$	$2,6\cdot 10^{-7}$	$2,4\cdot 10^{-7}$	$1,1\cdot 10^{-7}$
E, eV	0,77	0,78	0,87	0,68	0,59	0,54	0,43
$F_0, (\text{Ом}\cdot\text{м})/\text{eV}$	$18\cdot 10^{-12}$	$14\cdot 10^{-12}$	$9\cdot 10^{-12}$	$13\cdot 10^{-12}$	$16\cdot 10^{-12}$	$17\cdot 10^{-12}$	$21\cdot 10^{-12}$

Показано, що структурні дефекти для зразків з товщиною до 100 нм характеризуються різними значеннями енергій активації заліковування дефектів E_m і лежать у межах (0,4 - 0,9) eV, що пов'язано зі змінами внеску меж зерен в процесі заліковування дефектів під час термічної обробки. При цьому E_m є величиною обернено пропорційною товщині зразка.

Третій підрозділ присвячено розрахунку параметрів електроперенесення в тонких плівках Ru в інтервалі товщин (10-100) нм та середнім розміром зерен в межах від 5 до 20 нм. Показано, що для даних зразків характерним є збільшення коефіцієнта відбиття на межі зерен R з ростом середнього розміру зерна, в той час коли коефіцієнт проходження r зменшується. Розрахунки проводилися з використанням ліанеризованої моделі та ізотропного розсіювання за співвідношеннями (1-6).

Функція $f(\alpha)$ характеризує провідність (опір) нескінченного за розміром полікристалічного металевого зразка і виражається співвідношенням:

$$\frac{\sigma_g}{\sigma_0} = \frac{\rho_0}{\rho_g} = f(\alpha) = 1 - \frac{3}{2}\alpha + 3\alpha^2 - 3\alpha^3 \ln \left| 1 + \frac{1}{\alpha} \right| \cong \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}\alpha + 3\alpha^2, & \alpha \ll 1 \\ \frac{3}{4\alpha} - \frac{3}{5\alpha^2}, & \alpha \gg 1. \end{cases} \quad (1)$$

Значення $\alpha \ll 1$ відповідає ситуації, коли розмір кристалітів $L \gg \lambda_0$, або межі зерен є майже прозорими для електронів ($R \ll 1$). Відповідно $\alpha \gg 1$ – дрібнозернистій структурі зразка ($L \ll \lambda_0$), або значенням коефіцієнта розсіювання носіїв заряду на міжкристалічних межах, що відповідає умові $(1-R) \ll 1$.

Найбільший внесок у теоретичне вивчення внутрішнього розмірного ефекту був зроблений групою французьких вчених Тельє, Тоссе і Пішар, які запропонували та обґрунтували моделі ефективної довжини вільного пробігу, лінеаризовану, ізотропного розсіювання та тривимірну модель. Дані моделі отримали найширше застосування при визначенні параметрів електроперенесення за експериментальними даними розмірної залежності питомого опору і ТКО (рис. 5). Надалі розглянуті співвідношення моделей ТТП, які були використані для визначення параметрів електроперенесення.

У випадку виконання умови $L > d$, співвідношення для ТКО в рамках лінеаризованої моделі ТТП має вигляд:

$$\beta d \cong \beta_g d - \beta_g \lambda_0 (1-p) H(\alpha), \quad (2)$$

де β – ТКО плівки;

β_g – ТКО плівки при $d \rightarrow \infty$, або масивного зразка з таким же типом дефектів та їх концентрацією, які і у плівці;

$H(\alpha)$ – табульована функція, яка в інтервалі значень $\alpha = 0 \div 10$ змінюється від $H(0) = 0,370$ до $H(10) = 0,022$.

Основні співвідношення моделі ізотропного розсіювання носіїв заряду на межах кристалітів, що можуть бути використані при довільному відношення між d та L , мають вигляд:

$$\beta^{-1} d \cong \beta_g^{-1} \cdot d + \frac{3}{8} \beta_0^{-1} \lambda_0 \ln(p^{-1}), \quad (3)$$

$$\beta_g \beta_g^{-1} \cong \left[1 + 1,45 L^{-1} \lambda_0 \ln(r^{-1}) \right]^{-1}, \quad (4)$$

$$\frac{R}{1-R} \cong 0,97 \ln(r^{-1}), \quad (5)$$

$$\frac{R}{1-R} = \frac{2(1-r)}{1+r}, \quad (6)$$

де r – коефіцієнт проходження електроном або діркою меж зерен.

Слід відмітити, що співвідношення (5) може бути використане при $r > 0,3$, а вираз (6) є дійсним при довільних значеннях r .

Лінеаризована модель та модель ізотропного розсіювання приблизно однаково описують вплив на електрофізичні властивості розсіювання носіїв заряду на межах кристалітів, але по-різному враховують вплив розсіювання електронів на зовнішніх поверхнях.

Показано що при збільшенні d з 10 до 100 нм відбувається відповідне зростання L з 5 до 20 нм. Ці дані були використанні при розрахунках коефіцієнта проходження межі зерна r та коефіцієнта відбиття на межі зерен R . У результаті розрахунків було отримано, що $\beta_g = 2,35 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $R=0,12$; $r=0,89$ і $p=0,1$ за умови якщо $\lambda_0=27$ нм, а $L=5$ нм. Для $L = (5-20)$ нм зазначені вище параметри змінюються у межах: $R = 0,12-0,47$ і $r = 0,68-0,89$. На основі цих даних будувалися розмірні залежності r і R . Результати розрахунків наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Параметри електроперенесення для плівок Ru

d , нм	L , нм	Лінеаризована модель		Ізотропна модель		
		$\beta_\infty \times 10^3, \text{K}^{-1}$	$\lambda_0(1-p)$, нм	p	R	r
10-100	5-20	2,4	27	0,11	0,12-0,47	0,68-0,89

Застосування лінеаризованої моделі для розрахунку параметрів електроперенесення носить оцінюючий характер на відміну від ізотропної, яка може бути використана для таких зразків. Асимптотичні співвідношення ТТП є послідовними і дозволяють коректно проводити обробку експериментальних результатів.

У **четвертому розділі** «Структурно-фазовий стан, дифузійні процеси та електрофізичні властивості плівкових систем на основі Co і Ru» наведені результати експериментальних досліджень структурно-фазового стану плівкових систем сформованих на основі Co і Ru у поєднанні з дослідженнями їх електрофізичних властивостей у діапазоні температур 300-900 К.

У *першому підрозділі* наведені результати вивчення мікроструктури, фазового складу та дифузійних процесів в двошарових системах Co/Ru. На рисунку 6 представлено розшифровку електроннограм зразків Co(30)/П (а), Ru(30)/П (б) та двошарової системи Ru(30)/Co(30)/П (в) відпалених при $T_b = 600$ К. На електроннограмах від зразка Ru(30)/Co(30)/П спостерігаються дві групи ліній, що відповідають фазам ГЦП-Ru та ГЦП-Co з параметрами решітки близькими до табличних значень (рис. 6 в, таблиця 4).

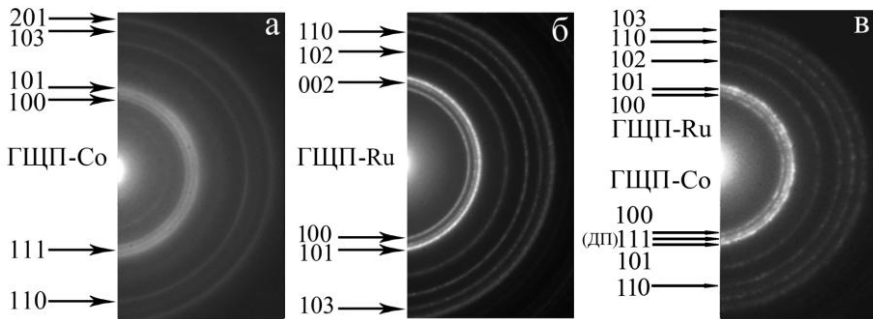


Рисунок 6 – Дифракційні картини зразків Co(30)/П (а), Ru(30)/П (б) і двошарової плівки Ru(30)/Co(30)/П (в) при $T_b = 600$ К. ДП – дефект пакування

Фазовий склад плівкової системи Ru(30)/Co(30)/П після відпалювання до $T_B = 600$ К

№ п/п	$I, \text{в.о.}$	$d_{hkl}, \text{нм}$	hkl	Фаза	$a, \text{нм}$	$c, \text{нм}$
1	Ср	0,231	100	ГЦП–Ru	0,2668	0,4286
		0,216	100	ГЦП–Co	0,2494	0,4072
2	Ср	0,206	111	ГЦК–Co	0,3568	–
			101	ГЦП–Ru	0,2664	0,4288
3	ДС	0,194	101	ГЦП–Co	0,2546	0,4157
4	Ср	0,154	102	ГЦП–Ru	0,2698	0,4301
5	Ср	0,134	110	ГЦП–Ru	0,2680	0,4305
		0,125	110	ГЦП–Co	0,2500	0,4082
6	Ср	0,118	103	ГЦП–Ru	0,2661	0,4280
$a_0(\text{Ru})=0,2686 \text{ нм}$		$c_0(\text{Ru})=0,4272 \text{ нм}$				
$a_0(\text{Co})=0,2514 \text{ нм}$		$c_0(\text{Co})=0,4105 \text{ нм}$				
$\bar{a}(\text{Ru})=0,270 \text{ нм}$		$\bar{c}(\text{Ru})=0,429 \text{ нм}$				
$\bar{a}(\text{Co})=0,251 \text{ нм}$		$\bar{c}(\text{Co})=0,407 \text{ нм}$				

Для перевірки відсутності домішкових атомів у досліджуваних зразках додатково був проведений ЕДА як двошарового зразка Ru(30)/Co(30)/П. Результати цих досліджень наведені на рисунку 7. Аналіз отриманих даних дає підстави стверджувати про повну відсутність домішкових атомів, що є вкрай важливим при формуванні структур спіно-класанного типу.

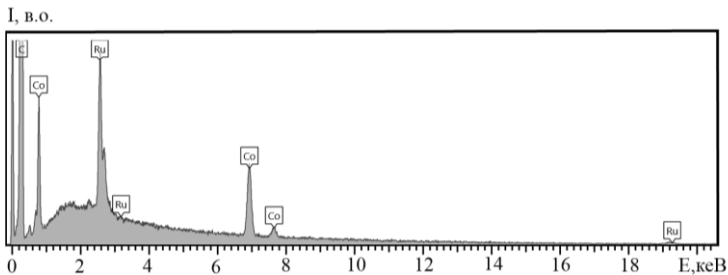


Рисунок 7 – Енергодисперсійний спектр зразка Ru(30)/Co(30)/П

Для дослідження процесів дифузії між окремими шарами методом вторинної іонної мас-спектрометрії (ВІМС) пристроєм MS-7201М метали шарів були сконденсовані на монокристалічні кремнієві пластини розміром (1 × 1) см. Для вивчення впливу термічної обробки на структурні характеристики утворених зразків проведено термовідпалювання у вакуумі (тиск залишкової атмосфери 10^{-6} Па) до 600 К із постійною швидкістю нагрівання та охолодження

(4 – 5) К / хв. На профілях дифузійних процесів, представлених на рисунку 8 і 9 спостерігається зміщення інтерфейсу між шарами (I). Цей зсув є значним і становить 20 - 24 нм у випадку плівкової системи Ru(60)/Co(60)/П (рис. 9). Для зразка Ru (30)/Co(30)/П (рис. 8) зсув інтерфейсу становить \approx (5 – 12) нм, що пояснюється концепцією ефекту Кіркендала та ефекту кратера. Аналізуючи результати досліджень структурно-фазового стану та ВІМС плівкових систем на основі Co та Ru можна стверджувати, що в сформованих структурах за умови відпалювання до 600 К зберігається двофазний склад ГЦП–Co + ГЦП–Ru та індивідуальність окремих шарів.

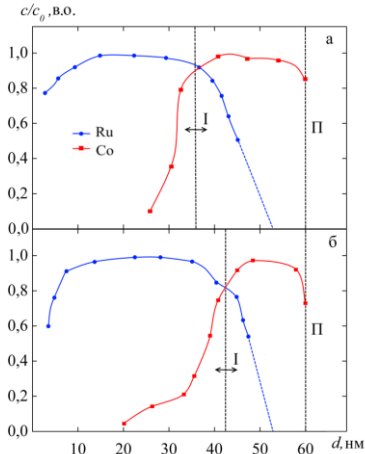


Рисунок 8 – Дифузійні профілі зразка Ru (30) / Co (30) / П до (а) та після відпалювання до 600 К (б)

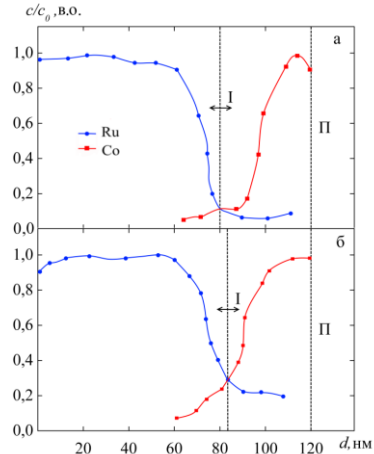


Рисунок 9 – Дифузійні профілі зразка Ru (60) / Co (60) / П до (а) та після відпалювання до 600 К (б)

У *другому підрозділі* наведені результати дослідження мікроструктури та фазового складу три- та мультишарових плівкових систем на основі Co і Ru. Результати досліджень структурно-фазового стану тришарових плівкових систем на основі Co і Ru показали, що в системі зберігається двофазний склад ГЦП–Co + ГЦП–Ru до та після термовідпалювання до 600 К, при цьому процес термообробки сприяє зростанню середнього розміру зерен з (5 – 7) нм до (25 – 30) нм. На рисунку 10 представлено типове зображення кристалічної структури для тришарових плівкових систем на прикладі зразка Co(20)/Ru(10)/Co(20)/П до (а) та після відпалювання до 600 К (б) та 900 К (в).

Зведені результати досліджень фазового складу та особливостей мікроструктури плівкових систем на основі Co і Ru наведено в таблиці 5. Нанодисперсною слід вважати структуру, середній розмір зерен якої менше 3 ÷ 5 нм. Такі системи, за своїми властивостями, можна вважати квазіаморфними, хоча вони зберігають взаємодію атомів дальнього порядку у кристалічній решітці. Слід відмітити загальну тенденцію втрати нанодисперсності після термічного відпалювання у системах, які складаються з шарів Ru товщиною більше 30 нм та шарів Co товщиною більше 20 нм.

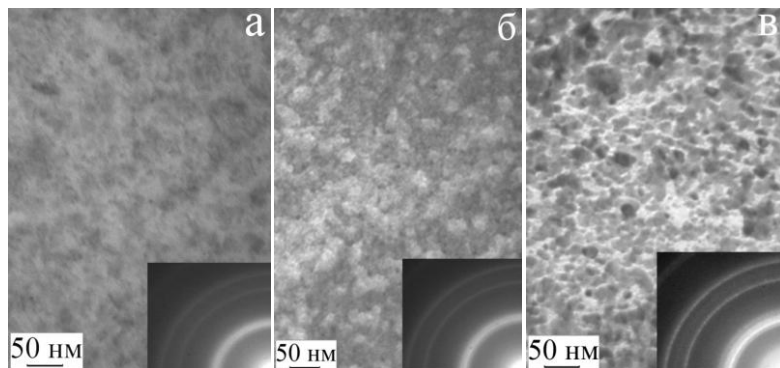


Рисунок 10 – Зображення кристалічної структури і електронограма (на вставці) зразка Co(20)/Ru(10)/Co(20)/П після відпалювання до $T_b = 300$ К (а), $T_b = 600$ К (б), $T_b = 900$ К (в)

Мультишарові плівкові системи, які сформовані на основі Co і Ru за умови $T_b = 300$ К, мають нанодисперсну однорідну структуру з нечітко вираженим контрастом і середнім розміром кристалітів близько 15 нм. Кільця на електронограмах є розмитими і мають слабку інтенсивність дифузного характеру. Чітке розділення кілець зі зростанням L_{cr} спостерігається при $T_b = 600$ К.

Таблиця 5

Особливості мікроструктури одно та двошарових систем на основі Co і Ru

Плівкова система (нм)	Структурно-фазовий стан		Середній розмір кристалітів, нм	
	$T_b = 300$ К	$T_b = 900$ К	$T_b = 300$ К	$T_b = 600$ К
Co (5) / П	Нанодисперсний ГЦП-Co	ГЦП-Co	2	5
Co (30) / П	ГЦП-Co + ГЦК-Co (ДП)	ГЦП-Co + ГЦК-Co (ДП) + ГЦК-Co	6	8
Co (60) / П			15	20
Ru (5) / П	Нанодисперсний ГЦП-Ru	Нанодисперсний ГЦП-Ru	2	3
Ru (30) / П		ГЦП-Ru	2	7
Ru (60) / П			2	8
Ru (5) / Co (20)/П	Нанодисперсний ГЦП-Ru + ГЦП-Co	ГЦП-Ru + ГЦП-Co + ГЦК-Co (ДП)	2	6
Ru (20) / Co (20)/П			2	8
Ru (30) / Co (30)/П			3	14
Ru (60) / Co (60)/П			5	16

У *третьому підрозділі* показані дослідження терморезистивних властивостей тришарових плівкових систем типу Co/Ru/Co. Для більш чіткого розуміння внеску прошарку Ru (товщина шару від 5 до 20 нм) у величину температурного коефіцієнта опору досліджуваних тришарових структур Co(20)/Ru(x)/Co(20), спочатку були проведені дослідження електрофізичних властивостей одношарових плівок Co товщиною 40 нм. Узагальнені розмірні залежності величини ρ та β від товщини проміжного шару Ru наведено на рисунку 11. Згідно даних наведених на рисунку 11 додавання проміжного шару Ru дозволяє зменшити питомий опір системи на порядок. При цьому величина ТКО має порядок 10^{-4} K^{-1} .

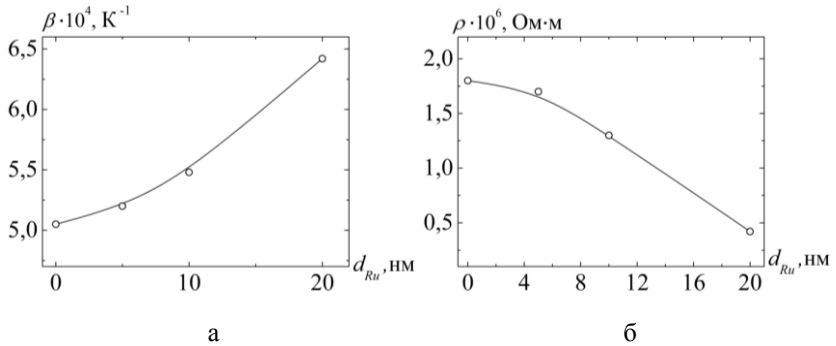


Рисунок 11 – Залежність $\beta(d)$ для інтегрального ТКО (а) та $\rho(d)$ (б) для тришарових систем Co(20)/Ru(x)/Co(20), де $x = 0, 5, 10, 20$ нм

Дослідження структурно-фазового стану та дифузійних процесів тришарових систем Co/Ru/Co дозволяють стверджувати, що в системі зберігається індивідуальність окремих шарів. У зв'язку з цим для прогнозування електрофізичних властивостей складових компонент приладових структур на основі Ru і Co може бути використано макроскопічна модель. Основне співвідношення макроскопічної моделі для ТКО тришарових плівок записується у вигляді:

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 - \frac{d_1 \rho_2 \rho_3 (\beta_2 + \beta_3)}{d_1 \rho_2 \rho_3 + d_2 \rho_1 \rho_3 + d_3 \rho_1 \rho_2} - \frac{d_2 \rho_1 \rho_3 (\beta_1 + \beta_3) + d_3 \rho_1 \rho_2 (\beta_1 + \beta_2)}{d_1 \rho_2 \rho_3 + d_2 \rho_1 \rho_3 + d_3 \rho_1 \rho_2},$$

де β_i , ρ_i та d_i – ТКО, питомий опір та товщина окремо взятого шару.

Особливістю даної моделі є те, що вона не враховує вплив параметрів мікроскопічної моделі (зокрема довжину вільного пробігу та розмір кристалітів) у явному вигляді.

П'ятий розділ «Магніторезистивні властивості одно- та багатошарових плівкових систем на основі Co і Ru(Cu)» складається з трьох підрозділів.

Перший підрозділ присвячений дослідженням польових залежностей магнітоопору свіжосконденсованих плівкових систем сформованих на основі Co і Ru. Для кращого розуміння та коректного обворочення результатів дослідження багатошарових спін-кляпанних структур спочатку були проведені дослідження тонких плівок Co без та з штучною межею поділу.

Слід відмітити що характер польових залежностей для всіх досліджуваних плівок (Co/П, Co/Co/П, Ru/Co/П та Ru/Co/Co/П) однаковий. Наявність штучної межі поділу впливає лише на величину магнітоопору. Так для одношарових плівок Co товщиною 40 нм магнітоопір складає величину 0,01, 0,04 та 0,03 % при перпендикулярній, поперечній та поздовжній геометрія вимірювання відповідно. Для плівок зі штучною межею Co/Co спостерігається незначне зростання величини МО до 0,03, 0,06 та 0,04% відповідно, що пов'язано з появою додаткового механізму розсіювання електронів на межі поділу шарів. Більш суттєве зростання амплітуди МО отримано для плівок Ru(20)/Co(20)/П та Ru(10)/Co(10)/Co(10)/П (у 2-3 рази для перпендикулярної геометрії вимірювання, у 5-7 разів для поперечної та 1,2-2 рази для поздовжньої).

Дещо інші результати дослідження магнітоопору спостерігаються для тришарових плівок Co/Ru/Co/П, Co/Ru/Co/CoП та мультишарових [Co/Ru]₅/Ru/Co/П в інтервалі товщин немагнітного шару $d_N = (3 - 10)$ нм та магнітного $d_F = (3 - 20)$ нм. Суть формування псевдо спін-вентильних систем з використанням мультишару типу [Co(3)/Ru(3)]_n (*n* – кількість повторів фрагменту) замість одного із магнітних шарів за умови збереження іншого (рисунок 12) полягає у наступному: суцільний шар Co з високим значенням коерцитивності у порівнянні з мультишаром буде відігравати роль закріпленого магнітожорсткого шару, що і забезпечує спін-вентильний ефект. Тонка плівка Cr (до 3 нм) забезпечує кращу адгезію з поверхнею підкладки, а шар Au виконує захисну функцію.

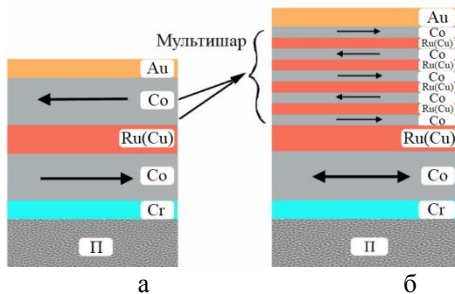


Рисунок 12 – Схема формування псевдо спін-вентильної структури на основі мультишару (б) шляхом модифікації структури типу «сендвіч» (а)

Розділення магнітних шарів Co прошарком Ru може привести до появи між ними непрямой антиферромагнітної взаємодії. При накладанні зовнішнього магнітного поля система переходить до ферромагнітної конфігурації, що супроводжується помітною зміною опору зразка. Аналізуючи польові залежності магнітоопору для тришарових зразків у порівнянні з одношаровими,

слід відмітити перехід до ізотропного характеру МО, який обумовлений реалізацією в таких системах спін-залежного розсіювання електронів провідності. Також зазначаємо, що збільшення товщини проміжного шару Ru призводить до деякого зростання амплітуди магніторезистивного ефекту.

У таблиці 6 представлені основні характеристики (величина поздовжнього та поперечного МО $(\Delta R/R_0)_{\max}$, коерцитивна сила B_C і поле насичення B_S) свіжосконденсованих плівок.

Таблиця 6

Параметри коерцитивної сили B_C і поля насичення B_S свіжосконденсованих плівок за кімнатної температури

Зразок	d_F , нм	d_N , нм	B_C , мТл	B_S , мТл	$(\Delta R/R_0)_{\max}$ (//), %	$(\Delta R/R_0)_{\max}$ (\perp), %	Примітка
Co	40	-	10	100	0,03	0,02	АМО
Co/Co	40	-	5	100	0,04	0,03	АМО
Ru/Co	20	20	30	200	0,1	0,06	АМО
Ru/Co/Co	20	10	110	70	-0,04	0,18	АМО
Co/Ru/Co	40	5	35	100	0,05	0,07	ГМО
Co/Ru/Co	40	8	10	50	0,04	0,06	ГМО
Co/Ru/Co	40	10	80	100	0,06	0,05	АМО
Co/Ru/Co/Co	40	10	20	80	0,15	0,48	АМО
[Co/Ru] ₅ /Ru/Co	35	25	20	-	0,04	0,04	ГМО

У другому підрозділі висвітлені дані стосовно впливу умов термообробки на польові залежності магнітоопору та його величину для одношарових плівок Co та плівкових систем на його основі. Для плівок Co/П, та Co/Co/П вид польових залежностей після термообробки до 600 К не змінюється. Спостерігається лише незначна зміна величини анізотропного магнітоопору, обумовлена удосконаленням кристалічної структури та збільшенням розмірів кристалітів.

У випадку зразків Co/Ru/Co/П, Co/Ru/Co/CoП та [Co/Ru]₅/Ru/Co/П після відпалювання при температурі 500 К можна відмітити наступне: залежно від товщини магнітних шарів d_F , а також товщини немагнітного прошарку d_N вплив термообробки на характер польових залежностей МО може бути різний. Так, для плівок Co/Ru/Co/П з $d_F = 20$ нм та $d_N = (5 - 8)$ нм відпалювання за температури 500 К призводить до появи анізотропного характеру МО, тобто опір розмагніченого зразка зростає при поздовжній геометрії вимірювання. При цьому відбувається і незначна зміна амплітуди ефекту та розширення магніторезистивних петель. Причиною появи анізотропного характеру магнітоопору є порушення структурної суцільності прошарку Ru.

Системи Co/Ru/Co/П з $d_N = (10 - 15)$ нм характеризуються ізотропними польовими залежностями як у вихідному стані, так і після відпалювання при температурі 500 К, що є результатом реалізації в системі механізму спін-залежного розсіювання електронів провідності (виникає ефект гігантського магнітоопору (ГМО)). Така ж картина спостерігається і для модифікованої мультишарової структури [Co/Ru]₅/Ru/Co/П з товщиною окремих шарів в межах

(2-3) нм, де верхній магнітний шар був замінений мультишаром $[\text{Co}/\text{Ru}]_n$. При цьому величина ізотропного магнітоопору збільшується у 1,2-2 рази для тришарової структури $\text{Co}/\text{Ru}/\text{Co}/\text{П}$ та у 2-3 рази для багатошарових плівок $[\text{Co}/\text{Ru}]_5/\text{Ru}/\text{Co}/\text{П}$ (рис. 13 а-в). Причинами збільшення величини магнітоопору, на нашу думку, можуть бути удосконалення кристалічної структури та оптимізація жорсткостей інтерфейсів.

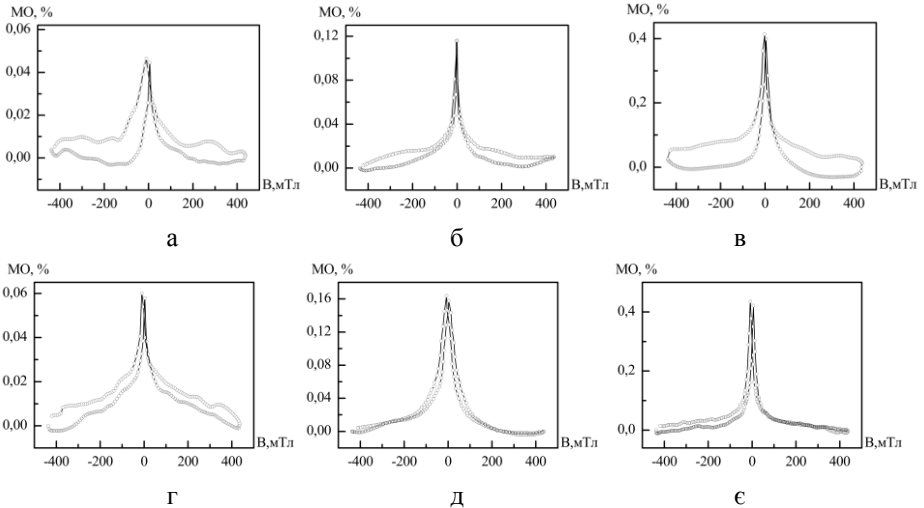


Рисунок 13 – Польові залежності магнітоопору зразків $\text{Co}(20)/\text{Ru}(10)/\text{Co}(20)/\text{П}$ (а-в) та $[\text{Co}(3)/\text{Ru}(3)]_5/\text{Ru}(10)/\text{Co}(20)/\text{П}$ (г-е) при відпалюванні до 300 (а, г), 500 (б, д) та 600 (в, е) К

Величина ізотропного МО лише збільшується при підвищенні температури відпалювання. Максимальне ж зростання амплітуди МО до 0,45% спостерігається після відпалювання при температурі 600 К для багатошарових плівок $[\text{Co}/\text{Ru}]_5/\text{Ru}/\text{Co}/\text{П}$ (рисунок 13 г-е), що у 7-10 разів більше ніж для зразків після конденсації.

У *третьому підрозділі представлені результати досліджень* магніторезистивних властивостей багатошарових спін-клапанних структур на основі плівок Co і Cu . Дослідження магніторезистивних властивостей та характеристик функціональних спін-вентильних структур на основі Co і Cu були проведені для серії зразків, у яких залишалася незмінною товщина магнітних шарів зі змінною товщиною немагнітного шару Cu . Так, в ході експерименту були отримані зразки типу $\text{Au}(3)/\text{Co}(5)/\text{Cu}(x)/\text{Co}(20)/\text{Cr}(3)/\text{П}$, де $x = (2 - 10)$ нм. Найбільші значення величини МО, що знаходяться в діапазоні 0,15 - 0,42 % і максимальні показники магнітної чутливості $S_B = (0,2 \div 2,4) \times 10^{-2} \% / (\text{мТл})$ при $T_B = 700$ К отримані у системах з товщиною немагнітного прошарку $d_{\text{Cu}} = 8$ нм (рисунок 14).

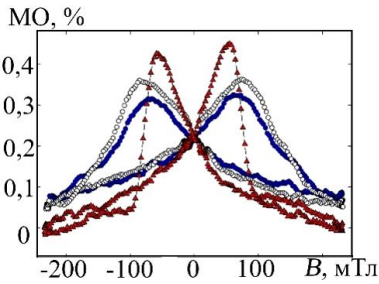


Рисунок 14 – Польові залежності магнітоопору плівкової системи спін-вентильного типу Au(3)/Co(5)/Cu(8)/Co(20)/Cr(3)/П при різних T_b , К: ○ – 300; ● – 600; ▲ – 700

Аналізуючи результати магніторезистивних досліджень мультишарів типу $[\text{Co}/\text{Cu}]_n/\text{П}$ та спін-вентильних структур на їх основі, слід відмітити, що польові залежності можуть мати гістерезисний або без гістерезисний характер. Найбільше значення величини $\text{MO} = 0,25\%$ зафіксовано у зразках, де кількість повторів фрагменту мультишару складає $n = 10$. Слід зазначити, що у випадку збільшення T_b до 700 К форма польових залежностей магнітоопору приймає порівняно більш лінійний вигляд, проте істотних змін їх характеру і величин значень MO не спостерігається.

Аналізуючи результати магніторезистивних досліджень системи спін-клапанного типу $\text{Au}(3)/\text{Co}(5)/\text{Cu}(6)/[\text{Co}(3)/\text{Cu}(3)]_8/\text{П}$, де нижній магнітний шар Co замінений мультишаром $[\text{Co}/\text{Cu}]_n$, слід відмітити переміщення максимумів на польових залежностях при зміні T_b . Цей процес чітко спостерігається в перпендикулярній геометрії вимірювання, що в свою чергу пов'язано зі зміною коерцитивної сили B_c верхнього шару $\text{Co}(5)$ та його магнітною анізотропією, що виникає через зміну ефективної товщини шару у процесі термодифузії та рекристалізації, а також зміни доменної структури. Магніторезистивні властивості даної системи до $T_b = 600$ К є стабільними у випадку поперечної та поздовжньої геометрії вимірювання. При подальшій термообробці до 900 К фіксується істотне зменшення значень величини MO у поздовжній геометрії, що пов'язано з процесами руйнування межі поділу магнітного верхнього шару Co з немагнітною складовою Cu у результаті утворення т.р. (Co, Cu) .

У випадку використання мультишару $[\text{Co}/\text{Cu}]_n$ замість верхнього магнітного шару у шойносконденсованих системах фіксуються ознаки анізотропного характеру MO , які в процесі подальшої термічної обробки до $T_b = 600$ К поступово зникають і залишаються незмінними до $T_b = 700$ К.

Порівняно малі значення показників чутливості S_B у наносистемах спін-клапанного типу сформованих на основі мультишарів Co і Cu за більших значень величини MO можна пояснити високою швидкістю перемикавання з одного магнітного стану в інший. Дана властивість дозволяє використовувати такі наносистеми при виготовленні цифрових функціональних елементів спінтроники. Системи виконані у вигляді мультишару, який має високі показники магнітної чутливості, задовольняють технічні характеристики необхідні при створенні тонкоплівкових магнітних чутливих елементів сенсорів магнітного поля у робочому діапазоні полів до 500 мТл.

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена задача комплексних досліджень фізичних властивостей кристалічної структури, фазового складу, електрофізичних (зокрема, питомого опору і термічного коефіцієнту опору, енергій заліковування дефектів) та магніторезистивних властивостей, а також дифузійних процесів на інтерфейсах в дво- і багатошарових плівкових систем на основі Ru і Co, мультишарах $[Ru/Co]_n/P$ та приладових плівкових систем спін-клапанного типу на їх основі. Науково-практичні результати роботи можна сформулювати наступним чином:

1. Показано, що фізичні властивості плівок Ru мають розмірну залежність, а їх структура визначається умовами формування зразків:

- тонкі плівки Ru, осаджені за температури підкладки 300 та 450 K, для всього досліджуваного діапазону товщин ($d = 10-100$ nm), мають однорідну нанодисперсну кристалічну структуру з середнім розміром кристалітів $L_{cp} = (5-15)$ nm, а фазовий склад відповідає ГЦП-Ru $a = (0,270 \pm 0,001)$ nm та $c = (0,430 \pm 0,001)$ nm. Процес високотемпературного відпалювання до $T_b = 900$ K сприяє зростанню середнього розміру кристалітів, яке, однак є незначним, і величина L_{cp} не перевищує 20 nm. При цьому відбувається помітне зростання шорсткості поверхні плівок Ru;

- при ефективних товщинах $d \leq 10$ nm одношарові плівки Ru до і після термообробки мають несущільну квазіаморфну лабіринтну структуру;

- отримані розмірні залежності питомого опору ρ та термічного коефіцієнту опору β для одношарових плівок Ru/P свідчать про те, що при збільшенні товщини зразків відбувається зменшення величини ρ з $6 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^{-7}$ Ом·м зростання коефіцієнту β з $1 \cdot 10^{-3}$ до $2.2 \cdot 10^{-3}$ K⁻¹, що узгоджується з уявленням про розмірний ефект в тонких металевих плівках;

- з ростом товщини зразків в межах від 10 до 100 nm відбувається зменшення енергій активації заліковування дефектів E_m , розрахованою за теорією Венда, з 0,9 до 0,4 eV, що пов'язано зі змінами внеску меж зерен в процесі заліковування дефектів при термовідпалюванні.

2. Дво- та багатошарові плівкові системи на основі Ru та Co, у тому числі і мультишари $[Ru/Co]_n/P$, після отримання та термічної обробки зразків до температур 600 K мають двофазний склад: ГЦП-Ru + ГЦП-Co. Незалежно від товщини окремих шарів та кількості повторів бішару у багатошаровій структурі, значення середнього розміру кристалітів L_{cp} зразків до відпалювання не перевищують 15 nm. Помітне зростання L_{cp} до 30 nm відбувається лише в процесі високотемпературної термообробки до 900 K. Додаковий аналіз дифузійних процесів на межах поділу шарів в системі Ru/Co/P свідчить про збереження індивідуальності кожного з шарів навіть під впливом іонно-стимульованої дифузії, яка виникає під час дослідження методом ВІМС.

3. Проведене комплексне дослідження особливостей структурно-фазового стану, електрофізичних та магніторезистивних властивостей в діапазоні температур відпалювання 300 – 600 K на прикладі плівкової системи Co(20)/Ru(x)/Co(20)/P, де $x = 5-20$ nm, а також на випадок коли шар Ru був замінений штучною межею за рахунок зупинки процесу конденсації зразка ($x = 0$), дозволило встановити, що

використання проміжного шару Ru для розділення магнітних шарів Co є ефективним для формування непрямой антиферромагнітної взаємодії між ферромагнітними шарами.

4. Показано, що перехід від анізотропного до ізотропного магніторезистивного ефектів, який обумовлений реалізацією спін-залежного розсіювання електронів провідності, для структур типу Co/Ru/Co/Π та приладових структур спін-клапанного типу з використанням мультишару $[\text{Ru}/\text{Co}]_n/\text{Ru}/\text{Co}/\Pi$ є можливим лише за умови термічної обробки до 600 К. Найбільші значення величини МО фіксуються у тришарових системах Co/Ru/Co з товщиною проміжного шару Ru до 10 нм та модифікованих мультишарових і складають близько (0,5-0,7) %.

5. Виходячи із відомих даних стосовно класичної системи Cu/Co, за результатами комплексних експериментальних досліджень структурно-фазового стану, електрофізичних (аналіз даних результатів проводився з урахуванням апробації відомих теоретичних моделей розмірного ефекту для багатошарових систем) та магніторезистивних властивостей плівкових систем на основі Co та Ru, була запропонована методика модифікації простих псевдо-спін-клапанних приладових систем Co/Cu(Ru)/Co/Π шляхом заміни верхнього ферромагнітного шару на мультишар $[\text{Co}/\text{Cu}]_n$ або $[\text{Ru}/\text{Co}]_n$. Показано, що така модифікація є ефективною, оскільки при відносно не змінному значенні величини МО призводить до підвищення швидкості перемикання з одного магнітного стану в інший всієї системи, хоча при цьому й фіксується зменшення магнітної чутливості системи до $S_B = (0,1 - 0,2) \times 10^{-2} \% / \text{мТл}$.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати

1. The Structural-Phase State and Diffusion Process in Film Structures Based on Co and Ru / I.V. Cheshko, **A.M. Lohvynov**, A.I. Saltykova, S.I. Protsenko // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2018. – V.10. – P.06016-1-4.

2. Flexible Thermostable Metal Spin-Valves Based on Co, Cu, Fe, Au, Ru Thin Films / **A.M. Lohvynov**, I.V. Cheshko, O.P. Tkach, Yu.M. Shabelnyk, S.I. Protsenko // Springer Proceedings in Physics. International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties (NAP 2019). – 2020. – V.240. – P.249-260.

3. Formation of the Spin-valve Device Nanostructures Based on Co and Cu / I.V. Cheshko M.V. Kostenko, V.I. Hrebynakha, **A.M. Lohvynov**, S.I. Protsenko // J. Nano- Electron. Phys. – 2016. – V.8. – P.03041-1-4.

4. Structural-phase state and electrophysical properties of Ru thin films / **A.M. Lohvynov**, M.V. Kostenko, I.V. Cheshko, S.I. Protsenko // Proc. NAP. – 2016. – V. 5. – P. 01NTF22-1-3.

5. **Lohvynov A.M.** Structural Phase State of Thin Film Systems Based on Ru and Co /**A.M. Lohvynov**, I.V. Cheshko, S.I. Protsenko // Proc. NAP. – 2017. – V. 2. – P. 02NTF42-1-4.

6. Thermostability of Spin-valve Type Functional Elements Based on Co, Cu and Ru / **A.M. Lohvynov**, I.V. Cheshko, K.S. Odnodvoretz, S.I. Protsenko // Proc. NAP. – 2018. – V. 2. – P. 02PN31-1-3.

7. Size effects in structural and electrophysical properties of Ru thin films / **A.M. Lohvynov**, M.V. Kostenko, I.V. Cheshko, S.I. Protsenko // Proceedings of the XII International conference «Electronics and Applied Physics», Kyiv. – 2016. – P. 67.

8. The structure and phase composition of nanocrystalline Ru films/ **A.M. Lohvynov**, I.V. Cheshko, S.I. Protsenko, O.V. Kovalenko // International research and practice conference «Nanotechnology and Nanomaterials», Chernivtsi. – 2017. – P. 20.

9. Magnetoresistive properties of synthetic antiferromagnetic spin valves structures on the basis Co and Ru / **A.M. Lohvynov**, I.V. Cheshko, S.I. Protsenko, A. Swic, H. Komsta, M. Opielak // XII-th international conference on ion implantation and other applications of ions and electrons. – Kazimierz Dolny, Poland. – 2018. – P.94.

10. **Lohvynov A.M.** Magnetoresistive properties of synthetic antiferromagnetic spin-valve structures base on Co and Ru / **A.M. Lohvynov**, I.V. Cheshko, S.I. Protsenko // International Advanced Study Conference «Condensed Matter & Low Temperature Physics 2020». – Kharkiv. –2020. – P.113.

11. Распутько Ю.В. Структура і фазовий склад нанокристалічних плівок Ru / Ю.В. Распутько, **А.М. Логвинов** // Фізика, електроніка, електротехніка, «ФЕЕ-2017». Матеріали та програма науково-технічної конференції. – Суми: СумДУ. – 2017. – С. 97.

12. Коваленко О.В. Формування функціональних синтетичних антиферомагнітних шарів спін-клапанних структур на основі Ru та Co / О.В. Коваленко, **А.М. Логвинов** // Фізика, електроніка, електротехніка «ФЕЕ-2018». Матеріали та програма науково-технічної конференції. – Суми: СумДУ. – 2018. – С. 63.

13. Магніторезистивні властивості синтетичних антиферомагнітних спін клапанних структур на основі Co та Ru / **А.М. Логвинов**, О.В. Коваленко, І.В. Чешко, Проценко С.І. // Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА-2018». – Львів. – 2018. – С.Д6.

14. Функціональний металевий елемент гнучкої електроніки спін-клапанного типу: пат. 136613 Україна, МПК(2006.01) G01R 33/09 / Шабельник Ю.М., Чешко І.В., **Логвинов А.М.**, Ткач О.П., Проценко С.І.; Сумський державний університет. – № у 2019 02456 ; заявл. 13.03.2019 ; опубл. 27.08.2019, Бюл. № 16. – 4 с.

АНОТАЦІЯ

Логвинов А.М. Фізичні властивості плівкових приладових структур на основі Ru і Co. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук (доктора філософії) за спеціальністю 01.04.01 «фізика приладів, елементів і систем». Сумський державний університет, Суми, 2021.

Дисертаційна робота присвячена комплексному дослідженню фізичних властивостей приладових структур сформованих на основі тонких плівок Ru і Co та взаємозв'язку особливостей структурно-фазового стану та розмірних ефектів в електрофізичних і магніторезистивних властивостях як одношарових плівок Ru та Co, так і плівкових систем на їх основі, отриманих методами магнетронного та електронно-променевого осадження. Додатково пояснюються фізичні процеси, що виникають при заліковуванні дефектів у одношарових плівок під час термічної обробки при дослідженні їх електрофізичних властивостей.

Встановлено, що для отримання однофазних тонких плівок ГЦП-Ru без слідів оксиду однією з необхідних умов є значення товщини зразка $d > 10$ нм та додаткова послідовна термічна обробка до 900 К. За даних умов параметри решітки складають $a = (0,270 \pm 0,001)$ нм та $c = (0,430 \pm 0,001)$ нм і є близькими до табличних значень для Ru у масивному стані.

Уперше були проведені дослідження електрофізичних властивостей тонких плівок Ru у широкому інтервалі ефективних товщин та температур та розраховані значення енергії активації заліковування дефектів E_m згідно методики Венда. Встановлено, що піки на графіках залежностей спектрів дефектів кристалічної ґратки відповідають енергіям заліковування дефектів вакансійного типу. Значення E_m лежать у межах (0,4 - 0,9) еВ і є величиною обернено пропорційною товщині зразка d . Показано, що явище протікання процесів термостабілізації у плівках Ru за товщин 10 - 100 нм призводить до незворотнього зменшення величини питомого опору у порівнянні із шойносконденсованими зразками у 1,58-2,22 разів відповідно. Величина питомого опору ρ має порядок 10^{-7} Ом·м, а температурний коефіцієнт опору $\beta - 10^{-3}$ К⁻¹. Уперше на основі експериментальних даних були побудовані розмірні залежності $\rho(d)$ та $\beta(d)$ для інтегрального ТКО плівок Ru в діапазоні товщин від 10 до 100 нм.

У структурах сформованих на основі Ru і Co було встановлено, що розділення двох магнітних шарів Co прошарком Ru викликає появу між ними непрямої антиферомагнітної взаємодії. Особливістю даних структур є те, що за умови послідовної термічної обробки до 600 К, фіксується перехід до ізотропного характеру МО, який ґрунтується на реалізації спін-залежного розсіювання електронів провідності. Проведений комплекс досліджень магніторезистивних властивостей спін-клапанних структур сформованих на основі тонких плівок Co і Ru або ж Co і Cu дозволив створити температурно-стабільні чутливі елементи датчиків магнітних полів, які виконані у вигляді модифікованої структури з використанням мультишару типу [Ru/Co]_n та [Cu/Co]_n замість одного з магнітних шарів. Представлені у роботі моделі можуть слугувати для фіксації зміни величини магнітоопору в діапазоні (0,02-1) % та працювати в інтервалі магнітних полів до 500 мТл.

Ключові слова: структурно-фазовий стан, електрофізичні властивості, температурний коефіцієнт опору, дифузійні процеси, магнітоопір, спін-залежне розсіювання електронів.

АННОТАЦИЯ

Логвинов А.М. Физические свойства пленочных приборных структур на основе Ru и Co. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (доктора философии) по специальности 01.04.01 «физика приборов, элементов и систем». Сумской государственной университете, Сумы, 2021.

Диссертация посвящена комплексному исследованию физических свойств приборных структур сформированных на основе тонких пленок Ru и Co и взаимосвязи особенностей структурно-фазового состояния и размерных эффектов в электрофизических и магниторезистивных свойствах как однослойных пленок Ru и Co, так и пленочных систем на их основе, полученных методами магнетронного и электронно-лучевого осаждения. Дополнительно объясняются физические процессы, возникающие при залечивании дефектов в однослойных пленках при термической обработке при исследовании их электрофизических свойств.

Установлено, что для получения однофазных тонких пленок ГЦП-Ru без следов оксида одним из необходимых условий является значение толщины образца $d > 10$ нм и дополнительная последующая термическая обработка до 900 К. При данных условиях параметры решетки составляют $a = (0,270 \pm 0,001)$ нм и $c = (0,430 \pm 0,001)$ нм и близки к табличным значений для Ru в массивном состоянии.

Впервые были проведены исследования электрофизических свойств тонких пленок Ru в широком интервале эффективных толщин и температур и рассчитанные значения энергии активации залечивания дефектов E_m согласно методике Венда. Установлено, что пики на графиках зависимостей спектров дефектов кристаллической решетки соответствуют энергиям залечивания дефектов вакансионного типа. Значения E_m лежат в пределах (0,4 - 0,9) эВ и является величиной обратно пропорциональной толщине образца d . Показано, что явление протекания процессов термостабилизации в пленках Ru за толщин (10 – 100) нм приводит к необратимому уменьшению величины удельного сопротивления по сравнению с свежесконденсированными образцами в 1,58-2,22 раз соответственно. Величина удельного сопротивления ρ имеет порядок 10^{-7} Ом·м, а температурный коэффициент сопротивления $\beta - 10^{-3}$ K⁻¹. Впервые на основе экспериментальных данных были построены размерные зависимости $\rho(d)$ и $\beta(d)$ для интегрального ТКО пленок Ru в диапазоне толщин от 10 до 100 нм.

В структурах созданных на основе Ru и Co установлено, что разделение двух магнитных слоев Co прослойкой Ru вызывает появление между ними косвенной антиферромагнитной связи. Особенность данных структур заключается в том, что при последующей термообработке до 600 К фиксируется переход к изотропному характеру МС, основанный на реализации спин-зависимого рассеяния электронов проводимости. Комплекс исследований магниторезистивных свойств спин-клапанных структур сформированных на основе тонких пленок Co и Ru или Co и Cu позволил создать температурно-стабильные чувствительные элементы датчиков магнитных полей, которые выполнены в виде модифицированной структуры с использованием мультислов типа [Ru/Co]_n и [Cu/Co]_n вместо одного из магнитных слоев. Представленные в работе модели могут служить для фиксации изменения величины МС в диапазоне (0,02-1)% и работать в интервале магнитных полей до 500 мТл.

Ключевые слова: структурно-фазовое состояние, электрофизические свойства, температурный коэффициент сопротивления, диффузные процессы, магнитосопротивление, спин-зависимое рассеяние электронов.

SUMMARY

Lohvynov A.M. Physical properties of film instrument structures based on Ru and Co. 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.

PhD is devoted to the complex study of physical properties of instrument structures formed on the basis of Ru and Co thin films and interrelation of features of structural-phase state and dimensional effects in electrophysical and magnetoresistive properties of both single-layer Ru and Co films and their film systems by methods of magnetron and electron beam deposition. Additionally, the physical processes that occur during the healing of defects in single-layer films during heat treatment in the study of their electrophysical properties are explained.

It was found that to obtain single-phase thin films of HCP-Ru without traces of oxide, one of the necessary conditions is the value of the sample thickness $d > 10$ nm and additional subsequent heat treatment up to 900 K. Under these conditions, the lattice parameters are $a = (0.270 \pm 0.001)$ nm and $c = (0.430 \pm 0.001)$ nm and are close to the tabular values for Ru in the massive state.

For the first time, the electrophysical properties of Ru thin films in a wide range of effective thicknesses and temperatures were studied, and the values of the activation energy for the healing of E_m defects were calculated according to the Wend method. It is established that the peaks on the graphs of the dependences of the spectra of crystal lattice defects correspond to the healing energies of defects of the vacancy type. The values of E_m are in the range of (0.4 - 0.9) eV and are a value inversely proportional to the thickness of the sample d . It is shown that the phenomenon of thermal stabilization processes in Ru films at thicknesses of 10 - 100 nm leads to an irreversible decrease in the resistivity in comparison with the newly condensed samples by 1.58-2.22 times, respectively. The value of resistivity ρ is of the order of 10^{-7} Ohm·m, and the temperature coefficient of resistance β is 10^{-3} K⁻¹. For the first time, the dimensional dependences $\rho(d)$ and $\beta(d)$ for the integral TCR of Ru films in the thickness range from 10 to 100 nm were constructed on the basis of experimental data.

In the structures formed on the basis of Ru and Co, it was found that the separation of two magnetic layers of Co by the Ru layer causes the appearance of indirect antiferromagnetic interaction between them. The peculiarity of these structures is that under the condition of subsequent heat treatment up to 600 K, the transition to the isotropic nature of MR is fixed, which is based on the realization of spin-dependent scattering of conduction electrons. The complex of researches of magnetoresistive properties of spin-valve structures formed on the basis of thin films Co and Ru or Co and Cu allowed to create temperature-stable sensitive elements of magnetic field sensors, which are made in the form of a modified structure using multilayer type $[\text{Ru}/\text{Co}]_n$ and $[\text{Cu}/\text{Co}]_n$ instead of one of the magnetic layers. The models presented in the work can be used to record changes in the value of the magnetic resistance in the range of (0.02-1)% and work in the range of magnetic fields up to 500 mT.

Keywords: structural-phase state, electrophysical properties, temperature coefficient of resistance, diffusion processes, magnetoresistance, spin-dependent electron scattering.

Підписано до друку 22.02.2021.
Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 1,1. Обл.-вид. арк. 1. Тираж 100 пр. Зам. № 140.

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