

УДК 539.216.2; 538.9; 621.799.14; 537.622

КП

№ держреєстрації 0117U003925

Інв. №

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

40007, м.Суми, вул. Р.-Корсакова,2

e-mail: i.cheshko@aph.sumdu.edu.ua

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи,
д-р. фіз.-мат. наук, професор

_____ А. М.Чорноус

З В І Т

ПРО НАУКОВО - ДОСЛІДНУ РОБОТУ

Термостабільні металеві спіні-клапани для реалізації спінових каналів в
компонентах гнучкої сенсорної електроніки

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛЕВИХ ТЕРМО-СТАБІЛЬНИХ СПІН- КЛАПАННИХ СТРУКТУР РІЗНИХ ТИПІВ

(проміжний)

Начальник НДЧ,

канд. фіз.-мат. наук, с. н. с.

Д. І. Курбатов

Керівник НДР,

канд. фіз.-мат. наук, доцент

І. В. Чешко

2018

Рукопис закінчено 21 грудня 2018 року

Результати роботи розглянуті науковою радою СумДУ, протокол від 27 листопада
2018 р. № 5

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР, провідний науковий співробітник, к-т. фіз.-мат. наук, доцент	<u>21.12.2018 р.</u>	І. В. Чешко (підрозділ 1.3, висновки)
Старший науковий співробітник, к-т. фіз.-мат. наук	<u>21.12.2018 р.</u>	О. П. Ткач (вступ, підрозділ 3.3)
Старший науковий співробітник, к-т. фіз.-мат. наук	<u>21.12.2018 р.</u>	Ю. М. Шабельник (реферат, підрозділ 3.2.2)
Старший науковий співробітник, к-т. фіз.-мат. наук	<u>21.12.2018 р.</u>	С.І. Воробйов (підрозділ 3.1.1)
Старший науковий співробітник, к-т. фіз.-мат. наук	<u>21.12.2018 р.</u>	З.М. Макуха (підрозділ 3.2.1, перелік джерел посилань)
Молодший науковий співробітник	<u>21.12.2018 р.</u>	А.М. Логвинов (підрозділи 3.1.3, 3.1.6)
Молодший науковий співробітник	<u>21.12.2018 р.</u>	О.В. Пиlipенко (підрозділ 3.1.4)
Молодший науковий співробітник, к. ф.-м.н.	<u>21.12.2018 р.</u>	К.В. Тищенко (підрозділ 3.1.2)
Молодший науковий співробітник, аспірант	<u>21.12.2018 р.</u>	М.О. Шумакова (підрозділ 2.1)
Інженер, аспірант	<u>21.12.2018 р.</u>	О.В. Бездідько (підрозділи 2.2, 3.1.5)
Лаборант, студент	<u>21.12.2018 р.</u>	К.С. Оdnодворець (підрозділ 2.3)
Лаборант, студент	<u>21.12.2018 р.</u>	С.С. Ільїн (підрозділ 1.2)
Лаборант, студент	<u>21.12.2018 р.</u>	М.В. Васюхно (підрозділ 1.1)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 44 с., 26 рис., 4 табл., 44 джерел.

БАГАТОШАРОВА НАНОСТРУКТУРА, СПІН-КЛАПАН, МАГНІТНІ НАНОЧАСТИНКИ, ТОНКА ПЛІВКА, ПИТОМИЙ ОПІР, ТЕРМІЧНИЙ КОЕФІЦІЄН ОПОРУ.

Об'єкт досліджень – електрофізичні властивості (питомий опір та термічний коефіцієнт опору) тонкоплівкових функціональних структур спін-клапанного типу на основі металів та магнітних наночастинок.

Мета роботи полягає у створенні термостабільних функціональних структур у вигляді спін-клапанів на основі металів Fe, Co, NiFe та Ag, Au, Cu та магнітних наночастинок для реалізації каналів зв'язку у сенсорній гнучкій електроніці.

Методи дослідження – методи формування наноструктурованих плівок та упорядкованих масивів наночастинок (метод Ленгмюра-Блоджетт, спін-коатингу та вакуумної конденсації); методи дослідження електрофізичних властивостей, структурно-фазового стану тонких плівок (резистометрія, електронна просвічуюча мікроскопія, електроннографія); математичні методи обробки експериментальних даних та комп'ютерне моделювання і програмування.

В роботі за результатами дослідження електрофізичних властивостей багатошарових плівкових систем на основі Fe і Au, Co і Cu, Co і Ru, FeNi і Cu та наночастинок і нанокластерів показана можливість їх застосування як функціональних шарів металевих спін-клапанних структур із стабільними робочими характеристиками в діапазоні температур $300 \div 900$ К. Уточнені принципи та концепція методики формування спін-клапанних наноструктур із термостабільними властивостями для створення функціональних елементів гнучкої сенсорної електроніки у вигляді металевих тонкоплівкових систем спін-клапанного типу з використанням мультишарів, синтетичних антиферромагнітних функціональних шарів та впорядкованих масивів магнітних наночастинок.

ЗМІСТ

	С.
Перелік скорочень та умовних позначок.....	6
Вступ.....	7
1 Функціональні елементи гнучкої електроніки на основі тонких металевих плівок та наночастинок	9
1.1 Загальна характеристика пристроїв гнучкої електроніки	9
1.2 Елементи функціональної гнучкої електроніки на основі металевих наноструктур.....	12
1.3 Тонкоплівкові елементи пам'яті на канали з'єднання на гнучких підкладках.....	17
2 Методика і техніка експерименту.....	24
2.1 Методика формування металевих багатошарових плівкових структур на основі Co, Fe, NiFe, Cu, Au, Ru.....	24
2.2 Методика формування одно- та багатошарових упорядкованих масивів магнітних наночастинок та нанокластерів.....	28
2.3 Методика дослідження електрофізичних властивостей тонких плівок	30
3 Електрофізичні властивості тонкоплівкових металевих наноструктур спін-клапанного типу на основі Co, Fe, NiFe, Cu, Au, Ru та магнітних наночастинок і нанокластерів.....	32
3.1 Експериментальні результати дослідження електрофізичних властивостей металевих плівкових систем як фрагментів спін-клапану та їх кореляція з структурно-фазовим станом.....	32

3.1.1 Плівкові системи на основі Co і Cu.....	32
3.1.2 Плівкові системи на основі Fe і Au.....	37
3.1.3 Плівкові системи на основі Co і Ru.....	38
3.1.4 Плівкові системи на основі NiFe і Cu.....	45
3.1.5 Наноструктури упорядкованих масивів магнітних наночастинок	46
3.1.6 Наноструктури на основі нанокластерів MoS ₂	47
3.2 Теоретичні результати дослідження електрофізичних властивостей металевих плівкових систем як фрагментів спін-клапану.....	48
3.2.1 Опробація відомих теоретичних моделей електрофізичних властивостей багат шарових плівок.....	48
3.2.2 Модифікована модель питомого опору упорядкованих масивів магнітних наночастинок в провідній матриці.....	51
3.3 Уточнення методики формування металевих наноструктур спін-клапанного типу з термостабільною структурою.....	53
Висновки.....	55
Перелік джерел посилання	56

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК

НЧ – наночастинки;

УМНЧ – упорядковані масиви наночастинок;

ТПТ – тонкоплівковий транзистор;

$T_{\text{п}}$ – температура підкладки;

$T_{\text{в}}$ – температура відпалювання;

ПЕМ – просвічуючий електронний мікроскоп;

ВІМС – вторинна іонна мас-спектрометрія;

ПМ – провідна матриця;

d, d_i – товщина плівки та окремого шару в багатошаровій плівці;

R – електричний опір;

ρ – питомий опір тонкої плівки;

ρ_0 – питомий опір масивного зразка;

$\beta, \text{ТКО}$ – температурний коефіцієнт опору тонкої плівки;

β_0 – температурний коефіцієнт опору масивного зразка;

т. р. – твердий розчин;

ГЦК – гранецентрована кубічна решітка;

ГЩП – гексагональна щільнопакована решітка;

a – параметр кристалічної ґратки;

a_0 – параметр кристалічної ґратки масивного зразка;

d_{hkl} – міжплощинна відстань;

hkl – кристалографічні індекси Міллера;

$L_{\text{сер}}$ – середній розмір кристаліту, частинки або нанокластеру.

ВСТУП

Розвиток гнучкої електроніки передбачає перехід до нових електронних пристроїв та приладів. Наприклад, малогабаритні та легко вісні електронні пристрої зберігання та відображення інформації, фотогальванічні панелі і реконфігуровані антени, гнучкі біологічні електронні імплантати, друковані батареї живлення та акумулятори створюються завдяки застосуванню сучасних технологій і матеріалів гнучкої функціональної електроніки [1-5]. Суттєвим моментом є те, що застосування технологій гнучкої електроніки означає більш дешеве виробництво на відміну від технологій, які застосовуються для виготовлення традиційних твердотільних напівпровідникових елементів за складними технологічними процесами виготовлення. Гнучкі елементи можна друкувати на дешевій пластиковій плівці за відомими технологіями друку тексти на папері або пластику. Відмінними рисами пристроїв гнучкої електроніки можна назвати прозорість, стабільність, низький коефіцієнт термічного розширення, еластичність тощо. Цей напрям дуже швидко розвивається в останні роки, і знаходить все більше нових галузей застосування [3-6]. На базі гнучкої електроніки можна розробити велику кількість застосувань. Простота та сумісність із технологіями традиційної твердотільної електроніки метода друкованої електроніки отримав поширення для виготовлення гнучких і напівпрозорих пристроїв відображення інформації, тонкоплівкових транзисторів, комірок пам'яті, сонячних елементів, різноманітних сенсорів, у тому числі таких, що можуть наноситися на одяг чи шкіру, радіочастотних міток тощо. Поширення набувають гнучкі елементи живлення на основі органічних так і неорганічних матеріалів. Хоча ККД таких елементів не перевищують значень традиційних твердотільних елементів $\sim 11 \div 40 \%$, наприклад сучасних кремнієвих сонячних елементів, вони мають інші переваги: невисоку ціну, гнучкість, еластичність, легкість, підвищену стійкість до факторів навколишнього середовища. Подальший розвиток технологій гнучкої електроніки спрямований на пошук нових матеріалів підкладок з широким інтервалом робочих температур, допустимими оптичними і механічними

параметрами та розробкою нових технологій виготовлення металевих і неметалевих функціональних структур.

Основними напрямками розвитку гнучкої електроніки можна назвати пошук нових матеріалів гнучких підкладок та адаптація відомих та розробка унікальних методів створення функціональних елементів гнучкої електроніки на основі тонких плівок металів, діелектриків та напівпровідників. Найбільш успішно застосовуються відомі технології створення металевих плівок та технології друку металевими наночастинками. Матеріали із спін-залежним розсіюванням електронів на основі Fe і Au, Co і Cu, Co і Ru, FeNi і Cu та наночастинок (НЧ) CoFe_2O_4 , NiFe_2O_4 , Fe_2O_4 та нанокластерів MoS_2 у вигляді багат шарових плівкових систем спін-клапанного типу можна застосувати для створення ефективних функціональних елементів гнучкої сенсорної електроніки у вигляді спін-клапанних структур з термічно-стійкими робочими характеристиками. Для цього необхідно здійснити детальне дослідження залежності кристалічної структури та фазового складу таких плівкових металевих наносистем та упорядкованих масивів магнітних наночастинок (УМНЧ) від умов формування та умов та режимів температурної обробки.

1 ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЕЛЕМЕНТИ ГНУЧКОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ НА ОСНОВІ ТОНКИХ ПЛІВОК ТА НАНОЧАСТИНОК

1.1 Загальна характеристика пристроїв гнучкої електроніки

Гнучка електроніка – це новий напрям у галузі електронної промисловості, що виник як реакція на збільшення навантаження на мікросхеми. Це технологія для виготовлення електронних схем шляхом монтування електронних пристроїв на гнучку підкладку. Ця технологія все частіше використовується у ряді випадків, коли необхідна легка вага, сприятливі діелектричні властивості, надійність, висока щільність електричних схем. Щоб замінити звичні тверді підкладки, гнучкі підкладки повинні запропонувати властивості, такі як прозорість, стабільність, низький коефіцієнт термічного розширення, еластичність тощо. Цей напрям дуже швидко розвивається в останні роки, і знаходить все більше нових галузей застосування (табл. 1.1). На основі цієї технології можна створити принципово нові пристрої (гнучкі сонячні батареї, дисплеї тощо) та досягти значного зменшення собівартості у порівнянні з традиційною кремнієвою технологією.

Найбільш помітними виробами гнучкої електроніки є гібридні мініатюрні пристрої на основі багатошарових тонкоплівкових структур, що інтегрують сенсорні і функціональні мікросистеми з інфокомунікаційними чіпами для збору, обробки і передачі інформації, наприклад: орієнтаційно-навігаційні або біомедичні модулі [7]. Гнучка електроніка має декілька безперечних переваг в порівнянні з традиційними жорсткими платами. По перше, це стійкість до численних динамічних згинань. Насамперед це пов'язано з малою товщиною підкладок, що дає їм суттєву перевагу у створенні динамічно стійких систем. Крім того за рахунок цього значно зменшується їх маса. Другою значною перевагою являється значне зменшення часу виготовлення і вартості таких систем, так як значна частина методів пов'язана на так званій друкованій електроніці. Це область електроніки, що займається створенням електронних схем з використанням обладнання для друку, яке дозволяє наносити на поверхню пласкої підкладки спеціальні чорнила

Таблиця 1.1 – Приклади використання елементів гнучкої електроніки в різних галузях

Галузь застосування	Приклад
Автомобільна електроніка	Приладові панелі, антиблокувальні системи, схеми управління, засоби управління
Споживчі товари	Товари для розваг, цифрові та відеокамери, кишенькові калькулятори, монітори
Медична апаратури	Слухові апарати, дефібрилятори, кардіологічні пристрої, ультразвукова діагностика
Телекомунікації	Мобільні телефони, високошвидкісні лінії, базові станції, старт – карти
Комп'ютери і зовнішні пристрої	Дисководи, друкуючі головки, шлейфи
Контроллери	Індуктивності, лазерне вимірювання, катушки нагрівача, копіюючі пристрої
Прилади	Аналізатори на явищі ядерного магнітного резонансу, лічильники частинок,
Військова і космічна апаратура	Супутники, приладові панелі, плазмові дисплеї, засоби керування, радарні системи, системи нічного зору

(струмопровідні, резистивні, напівпровідникові і т.д.) і таким чином формувати на ній активні і пасивні елементи, а також міжелементні з'єднання. Наступною перевагою є можливість використовувати об'ємне компонування елементів, що дає змогу створювати нові варіанти конструкцій, які недоступні для традиційної електроніки.

Очевидним і основним недоліком являється низька максимальна робоча температура для більшості дешевих видів пластику (80 – 150 °C), що суттєво обмежує допустимі температури технологічного процесу. Це робить неможливим використання більшості технологій, доступних для звичної кремнієвої електроніки, наприклад термічне окислення, дифузія та епітаксія. Крім того вносить значні обмеження на використання процесів плазмохімічного осадження, напилення, фотолітографії та ін. [8].

Функціональні елементи у вигляді простих гнучких електронних плат різноманітні в своїх конструкціях і застосуваннях. Зараз вони стали одним із способів забезпечення міжз'єднань в сучасній електронній апаратурі. Існує багато причин використання гнучких плат як засобу міжз'єднань в електронних пристроях. Набагато більше інших областей використання гнучких плат, в яких вони допомагають вирішити проблеми ущільнення компонування апаратури [7].

Гнучкі плати використовують найтонші діелектричні основи з усіх доступних сьогодні матеріалів. У деяких випадках з цих матеріалів можна виготовити гнучкі плати, які мають повну товщину менше 50 мкм, включаючи захисний шар. Жорсткі монтажні підкладки з тією ж функціональністю виявляються в два рази товще. Мало того, що мала товщина гнучких плат приваблива сама по собі, можливість її скласти за рахунок гнучкості також дозволяє скорочувати обсяги і габарити електронних пристроїв.

Додаткова перевага малої товщини гнучких плат – мала маса. Самі по собі вони легше аналогічних жорстких плат на 75% [8]. Мала маса міжз'єднань, що реалізується гнучкими платами, виявилася настільки привабливою в аерокосмічній апаратурі, що ця область їх використання стала конкурувати за обсягами виробництва з портативною електронікою [8-10].

У той час, як провідний монтаж неминуче пов'язаний з людським фактором – джерелом помилок, гнучкі плати не мають джерел помилок людської природи. Ручний монтаж – постійний ризик виникнення помилок. Гнучкі плати проектуються в складі системи міжз'єднань і потім відтворюються машинними методами, що запобігають вплив людського фактора. В результаті, за винятком неминучих помилок виробництва, гнучкі плати не дозволяють створити з'єднання, що не відповідають спроектованій схемі. Фахівці з надійності завжди при пошуку джерел відмов електронної апаратури шукають дефекти міжз'єднань. Гнучкі плати це є ідеальний засіб для зменшення контактів. Коли вони сконструйовані належним чином і раціонально застосовуються в електронному компонуванні, вони сприяють збільшенню надійності [11].

Іншим напрямком є використання високотемпературних неорганічних матеріалів на гнучких підкладках, що зберігають стійкість при високих температурах (гнучке скло, металева фольга [12, 13]). Перевагою цього підходу є можливість використовувати існуючі технології неорганічних напівпровідників з хорошими електронними властивостями, наприклад, полікристалічний кремній з рухливістю носіїв понад $100 \text{ см}^2 / (\text{В} \cdot \text{с})$. Однак внаслідок високої вартості таких підкладок і ряду їх особливостей (наприклад, в разі металевої фольги, вбудована ємність між підкладкою і приладами, виготовленими на ній) такий підхід прийнятний лише для обмеженого числа застосувань, головним чином продуктів з високою вартістю (наприклад, гнучких дисплеїв для цифрового телебачення з високою роздільною здатністю).

1.2 Елементи функціональної гнучкої електроніки на основі металевих наноструктур

Найбільш поширене використання гнучких плат – це виготовлення міжелементних з'єднань електронних систем [14]. Це дозволяє зменшити масу готового виробу та значно підвищити стійкість до динамічних навантажень.

Дослідники швейцарської компанії «École Polytechnique Fédérale de Lausanne» [15] розробили новий метод виготовлення гнучкої електроніки, що здатна розтягуватися (рис. 1.1.). Прототип такої функціональної гнучкої структури може розтягуватися вчетверо в порівнянні з початковим розміром і повертатися в початковий стан без будь-яких втрат своїх робочих характеристик. За останні роки з'явилося повідомлення про інші застосування гнучких функціональних електронних елементів. Так згідно [16] компанія «Panasonic Corp» розробила склад гнучкого і еластичного полімерного ізоляційного матеріалу, що складається з гнучких, прозорих електричних провідників і спеціальної струмопровідної пасти, яка призначена для приклеювання провідників до полімерної основи (рис. 1.2). Комбінація всіх цих трьох компонентів дозволила зробити друковані плати для електронних пристроїв, які можна розтягувати, згинати і деформувати іншими способами без втрати їх функціональності. Основною перевагою нової розробки є можливість нанесення на плівку дуже вузьких смужок металу (сплав золота і галію), які можуть розтягуватися і згинатися разом з підкладкою. Нанесення цих провідників здійснюється шляхом осадження галію на наплавлену металеву плівку із золота. Ці двофазні смужки можуть бути всього кілька нанометрів шириною і використовуватися для з'єднання окремих компонентів в єдиний великий, складний і гнучкий прилад [17]. Метод нанесення на підкладку і формування певного малюнка за допомогою нанесення металу дозволяє створювати надзвичайно міцні, багатошарові і м'які інтегральні схеми, сенсори і функціональні пристрої.

Поширеним застосування гнучких металевих функціональних структур стали радіочастотні мітки. Їх історія почалась ще в 1940 році, і використовувались у військових цілях. Взагалі, це спосіб автоматичної ідентифікації об'єктів, в якому за допомогою радіосигналів зчитуються або записуються дані, що зберігаються в та званих транспондерах, або радіочастотних мітках. Лише в 1990 році, завдяки співробітництву компаній «IBM» і торгової мережі «Walmart», такі мітки стали використовуватись для ідентифікації споживчих товарів [18].

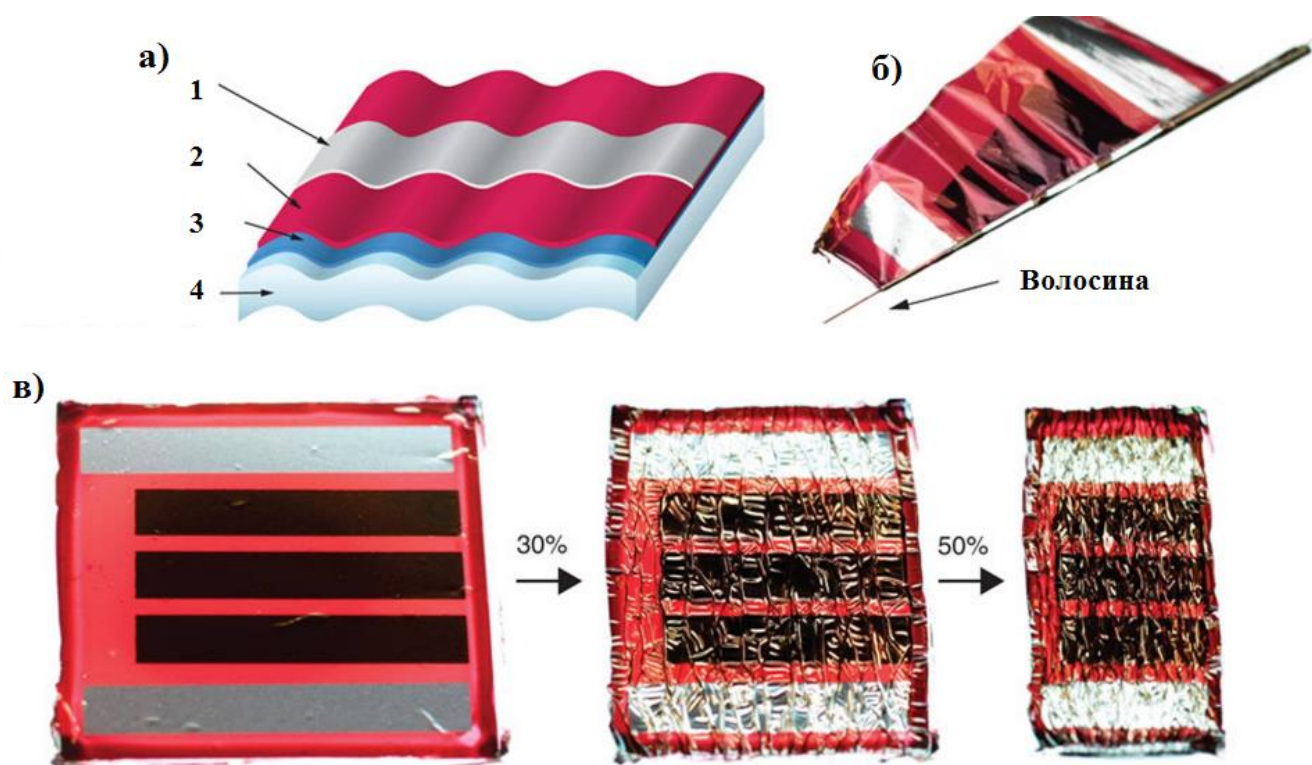


Рисунок 1.1 – Схема (а) гнучкої органічної сонячної батареї та демонстрація її надзвичайної гнучкості (б) та еластичності (в): 1 – Ca/Ag металевий електрод (товщиною 115 нм), 2 – активний шар кремнію (товщиною 200 нм), 3 – напівпрозорий прозорий електрод (товщиною 150 нм), 4 – гнучка підкладка ПЕТ (товщиною 1,4 нм). Адаптовано із роботи [15]

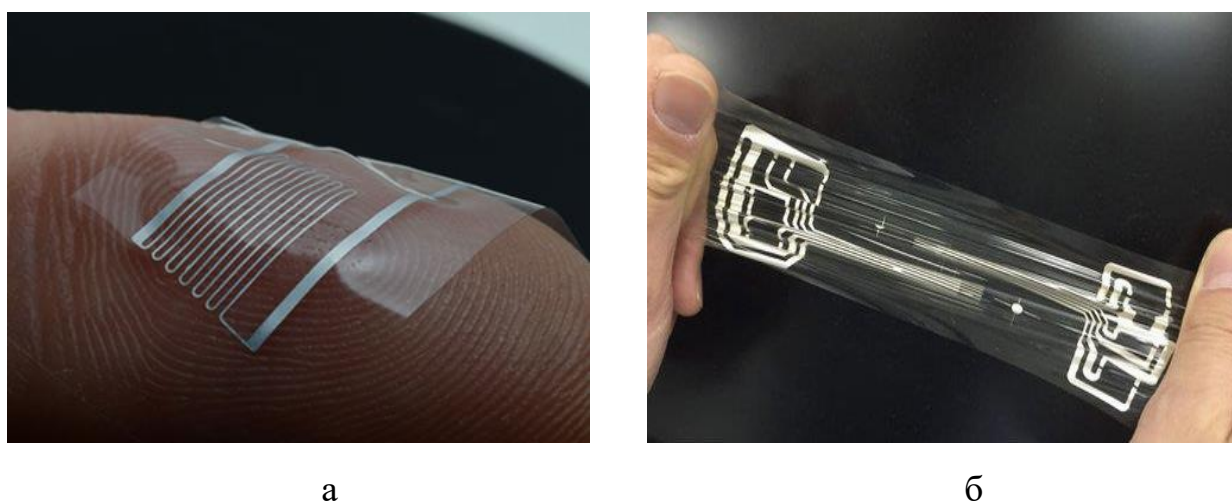


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд гнучких електронних функціональних структур з демонстрацією їх гнучкості (а) та еластичності (б). Із роботи [16]

Такі системи прийнято поділяти на активні, пасивні та напівпасивні. В активних та напівпасивних є своє джерело живлення, а пасивні використовують антену, для отримання енергії із зчитувача. Проте, в гнучкій електроніці прийнято використовувати саме пасивні радіочастотні мітки. Приклад розміщення таких елементів на гнучкій підкладці наведено на рис. 1.3.

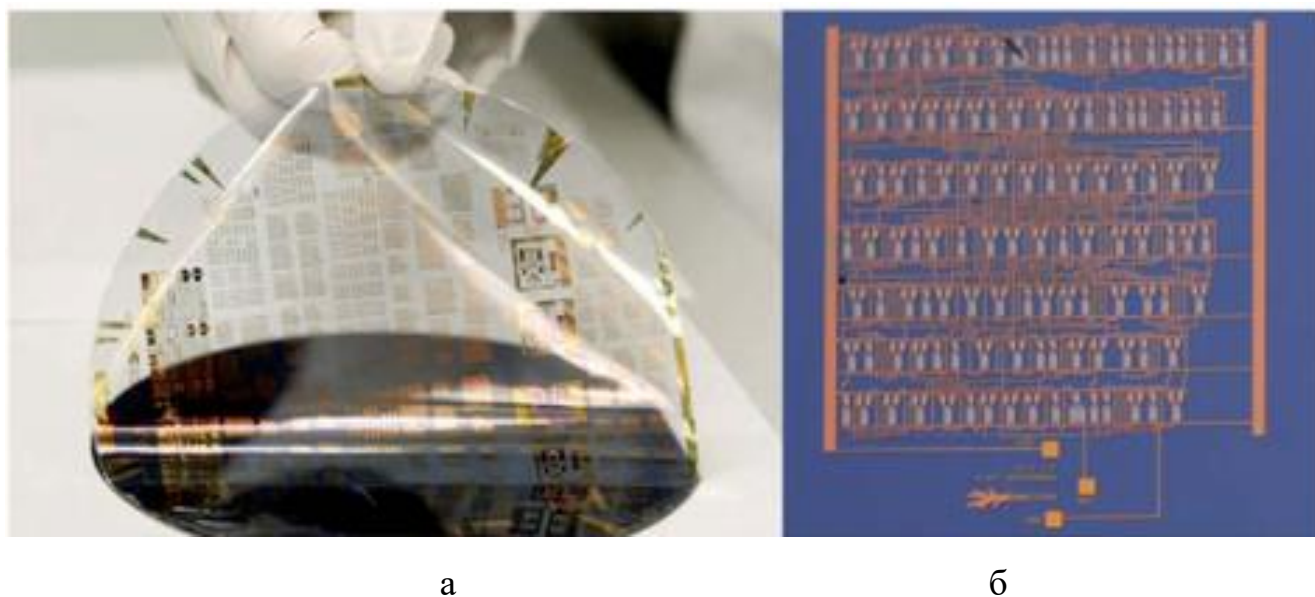


Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд функціонального елементу пасивних радіочастотних міток на гнучкій підкладці в процесі виготовлення (а) та розміщеному у гнучкий корпус готового пристрою (б). Із роботи [18]

Матеріал, з якого виготовлено основа друкованої плати, може розтягуватися на 150 % від його оригінального розміру. Цей матеріал відрізняється відсутністю клейкості його поверхні, стійкістю до дії вологи, високої температури і деяких інших чинників. Такі структури, що зберігають здатність проводити електрику при розтягуванні, вигині або скручуванні, мають високе прикладне значення: штучна шкіра для протезування або аерогелеві моноліти.

Схема технологічного процесу для тонкоплівкових транзисторів (ТПТ) на пластиковій основі з використанням аморфного кремнію ($a\text{-SiN}_x$) представлена на рис. 1.4. [19]. На рис. 1.5 а показана ідеальна перехідна характеристика ТПТ.

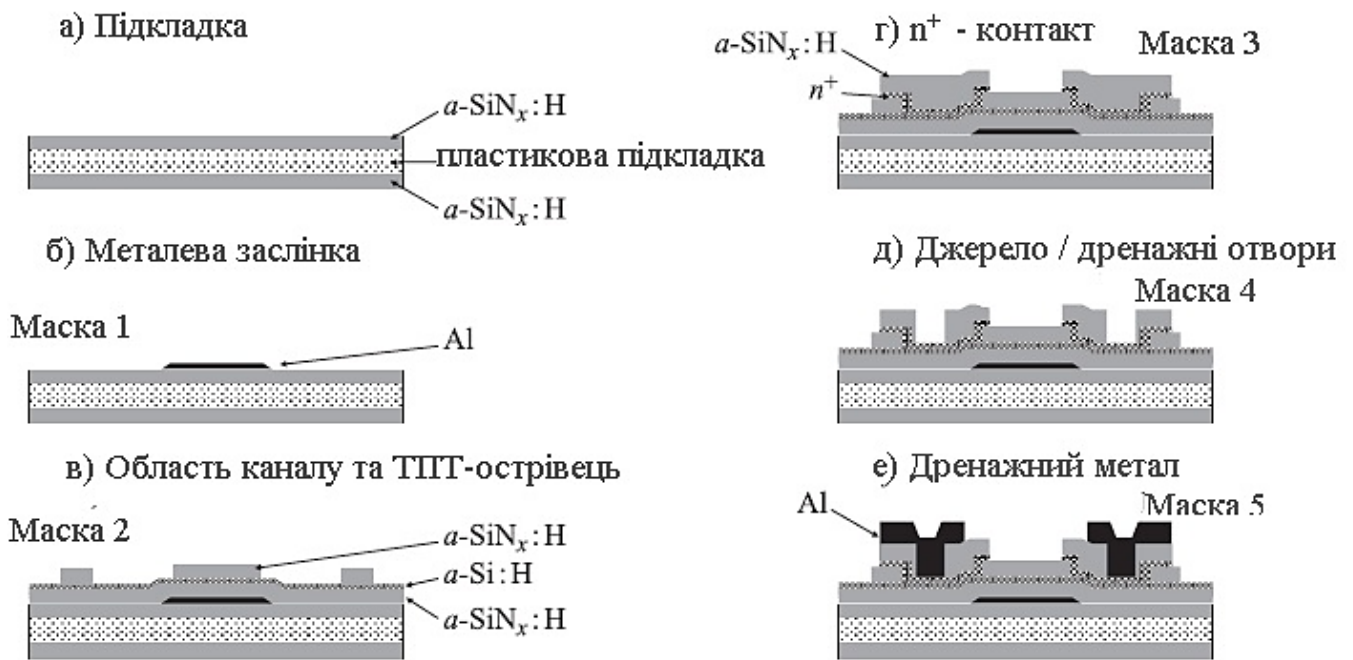


Рисунок 1.4 – Схема технологічного процесу виготовлення ТПТ на пластиковій основі. По даним роботи [19]

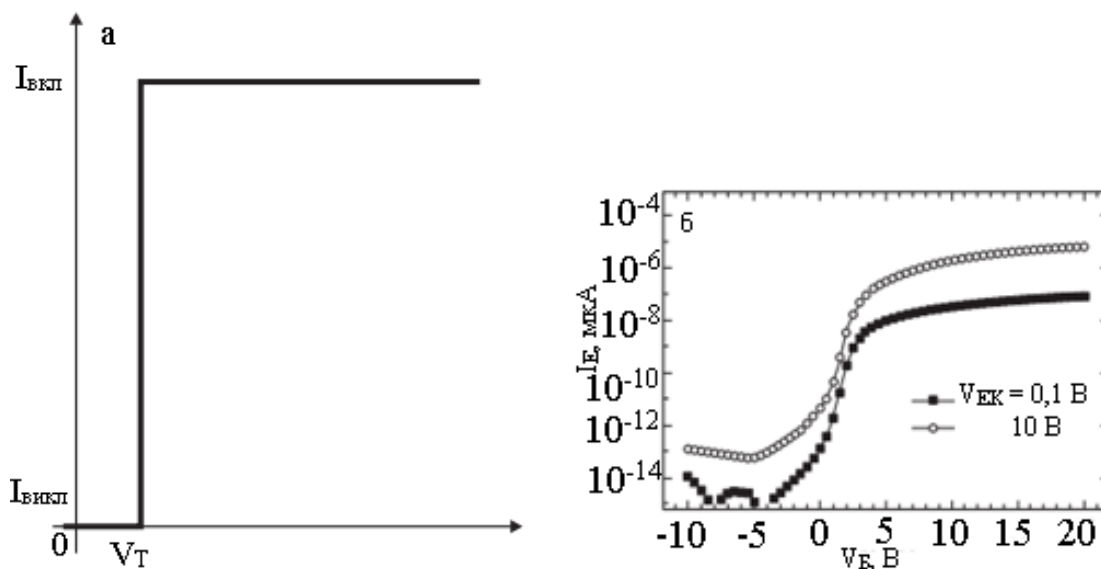


Рисунок 1.5 – Ідеальна (а) та реальна (б) перехідна характеристика ТПТ.
 Із роботи [20]

Після відмивання підкладка покривається з обох сторін напівмікронним шаром нітриду кремнію. Функція цього покриття полягає в запобіганні контакту матеріалу підкладки з хімікатами, що використовуються в технологічному процесі, а також в поліпшенні адгезії наступних шарів. Крім того, більш низький коефіцієнт термічного розширення нітриду в порівнянні з пластиком знижує величину помилки суміщення при фотолітографії. Потім наноситься плівка алюмінію завтовшки 100÷120 нм. У даному випадку осаджувалися плівки $a\text{-SiN}_x$ (250 нм) / $a\text{-Si:H}$ (50 нм) / $a\text{-SiN}_x$ (300 нм). Далі шари кремнію витравлюються навколо транзисторів, щоб електрично ізолювати їх один від одного, і в нітриді відкриваються вікна до стоку, витоку і затвору для металізації. Потім, наноситься плівка алюмінію завтовшки 500-1000 нм.

Оскільки ТПТ використовується в якості перемикача, його ідеальна перехідна характеристика (рис. 1.5 а) являє собою "сходинок". Реальні робочі характеристики (рис. 1.5 б) транзисторів аналізувалися з урахуванням основних параметрів приладу (рухливість, напруга відсічення, контактний опір). Так при напрузі на затворі нижче напруги відсічення струм через затвор відсутній, а як тільки напруга на затворі досягає напруги відсічення, через ТПТ протікає струм, що обмежується опором навантаження. У реальності, в закритому стані через ТПТ протікає струм витоку ($I_{\text{вкл}}$), струм відкритого стану ($I_{\text{вкл}}$) обмежений провідністю каналу, а перемикач відбувається в діапазоні напруг на затворі, і характеризується крутизною перехідної характеристики в підпороговому режимі.

1.3 Тонкоплівкові елементи пам'яті на канали з'єднання на гнучких підкладках

З розвитком технологій попит на ультращільну пам'ять на гнучких підкладках зростає. З метою майбутньої заміни традиційних механічних жорстких дисків на твердотільні накопичувачі, для повноцінної електронної системи потрібні два основних пристрої: транзистори та енергонезалежна пам'ять. Транзистори використовуються для логічних операцій і масивів пам'яті для вбудовування, а

пристрої постійної пам'яті необхідні для зберігання інформації в основній пам'яті та кеша. Гнучкі компоненти постійної пам'яті вивчаються з точки зору їх функціональності, показників ефективності та аспектів надійності, які є критичними для технології постійної пам'яті, що є частиною основної споживчої електроніки та пристроїв охорони здоров'я.

На рис. 1.6 приведена класифікація можливих варіантів реалізації енергонезалежної електронної пам'яті на основі різних типів наноструктур: на основі тонких металевих плівок, багатошарових плівкових систем на основі магнітних та немагнітних металів, мультишарів, упорядкованих та неупорядкованих магнітних наночастинок.

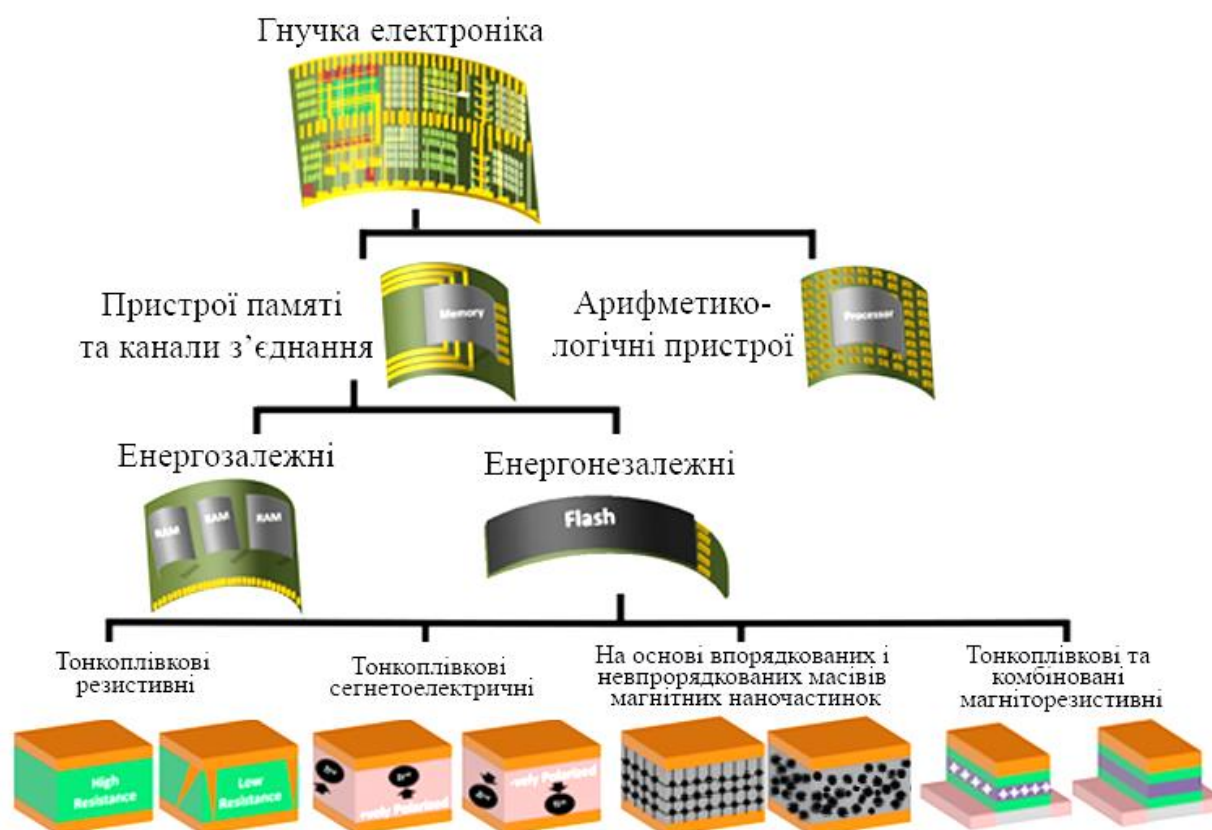


Рисунок 1.7 – Класифікація пристроїв гнучкої електроніки на основі тонких плівок металів та масивів магнітних наночастинок

Головною проблемою виробництва функціональних елементів гнучкої електроніки, особливо таких складних як елементи пам'яті, є оптимізація технологічного процесу під вимоги технології масового виробництва та експлуатації: простота і невисока ціна виготовлення та стійкість до дії температури і механічних навантажень. Ці параметри у більшості випадків визначаються властивостями та характеристиками гнучких підкладок, що застосовуються для виготовлення функціональних електронних гнучких пристроїв.

Дослідники з Університету Райса в Х'юстоні [21] розробили прозорий і гнучкий модуль пам'яті. Цей модуль пам'яті можна комбінувати з різними інтегральними схемами. Розробка відрізняється високою витривалістю. Так, вона здатна витримувати температуру в 500 С. В основу розробки лягло відкриття 2010 року, суть якого полягає у тому, що якщо через окис кремнію пропустити потужний електричний заряд, то буде сформований канал з чистих кристалів кремнію, розмір яких не перевищує 5 нм. Завдяки цим властивостям і можна створювати незалежну пам'ять. Важливим є те, що елементи отриманої пам'яті можна розташовувати в тривимірних масивах, досягаючи тим самим зменшення габаритів одержуваних пристроїв. Так, як кремній сам по собі не прозорий, то висока ступінь прозорості досягається за рахунок того, що електрична схема представленого зразка занадто розряджена.

На основі отриманих даних за попереднім етапом даного проекту стосовно температурної стабільності плівкових систем на основі системах Co і Cu або Ru та Fe і Au з урахуванням результатів роботи в наших попередніх дослідженнях, нами були вибрані різні варіанти формування функціональних елементів сенсорної гнучкої електроніки у вигляді спін-клапанних систем для роботи як елементів пам'яті та спінових каналів з'єднань в мікроелектронних елементах на основі металів та магнітних наночастинок. Серед розглянутих варіантах ми зупинилися на чотирьох основних, які на нашу думку матимуть максимально термостабільну структуру та відповідно стабільні робочі характеристики. Кожен з цих варіантів функціональних структур буде призначено для певного класу задач та певних приладових структур.

Варіантом виконання ефективною та простою псевдо спін-вентильної структури є багатошарова структура типу «сандвіч», що виконується за схемою «магнітний шар 1 / немагнітний прошарок / магнітний шар 2», схематичне зображення якої наведене на рис. 1.8. Магнітний шар 1 та 2 виконуються у вигляді тонких плівок Co, Fe, Ni або їх сплавів. Немагнітний прошарок виконується з плівок металу з високою електропровідністю, наприклад, Cu, Au, Ag та ін. Особливістю такої функціональної псевдо спін-вентильної структури, на відміну від розглянутих в попередньому розділі, із магнітними шарами з різних металів, є використання одного матеріалу для магнітного шару 1 та 2 (див., наприклад, [22-24]). Різниця коерцитивності між ними забезпечується розмірним ефектом, оскільки здатність намагнічуватися тонких плівок суттєво залежить від товщини зразка та умов його отримання. Як показано у роботах [25-27] параметри функціональних елементів спін-вентильних структур на основі робочих магнітних шарів Co, що розділені немагнітним прошарком з Cu товщиною у 5 – 6 нм, наступні: товщина верхнього “м’якого” шару повинна складати приблизно 15÷20 % від товщини нижнього “жорсткого” шару (3 - 6 та 20 нм відповідно). Таке поєднання забезпечує функціонування в магнітному полі всього вентилію. Верхній тонший шар Co більш чутливий до зміни величини індуктивності магнітного поля B і у ньому починається процес перемагнічування своєї доменної структури при менших його значеннях, тоді як нижній товстий шар має більше поле перемагнічування. Спін-вентильний ефект якраз і проявляється в інтервалі ΔB між початком перемагнічування верхнього і нижнього шарів. Причому чим більший цей проміжок, тим більше саме значення магнітоопору. Таким чином, дана система при зміні зовнішнього магнітного поля здатна давати біполярний електричний сигнал високої амплітуди.

Вибір матеріалів магнітних шарів і немагнітного прошарку обумовлюється урахуванням можливого ступеню розмиття інтерфейсів між ними. У наших дослідженнях [28, 29] були вивчені магніторезистивні та магнітооптичні властивості систем на основі плівок Co і Cu та Fe і Au. У розглянутих системах можливе максимальне значення магнітоопору (див., наприклад, [30, 31]) серед варіантів виконання псевдо спін-вентилів.

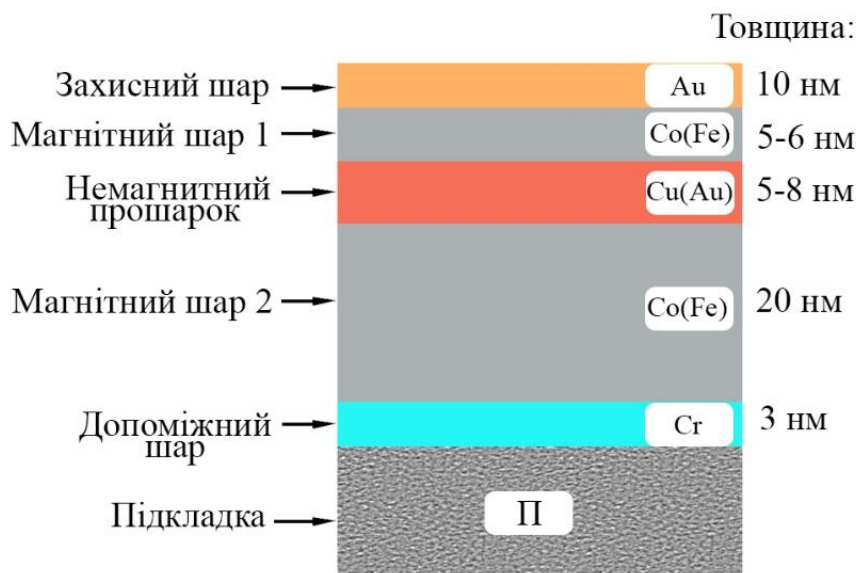


Рисунок 1.8 – Схема формування псевдо спін-вентиля на основі магнітних шарів з Co або Fe різної товщини

Плівкова система у вигляді простого псевдо-клапану з двома магнітними робочими шарами (рис. 1.8) можна застосовувати як діодну структуру в каналах зв'язку, спінових ізоляторах та при виготовленні спінових тонкоплівкових гнучких транзисторах в елементах магнітної пам'яті в блоках постійної та оперативної комп'ютерної пам'яті.

Іншим підходом до формування псевдо спін-вентильних систем на основі металів були запропоновані нами у роботі [32] по аналогії з роботами [33, 34], суть якого полягає у використанні мультишару $[\text{Co}(3) / \text{Cu}(3)]_n$ або $[\text{Fe}(3) / \text{Au}(3)]_n$, ($n = 3 \div 18$ – кількість повторів) при формуванні приладових систем спін-вентильного типу можна замість одного із магнітних шарів за умови збереження іншого як показано на рис. 1.9. Суцільний шар Co або Fe з високим значенням коерцитивності у порівнянні з мультишаром буде відігравати роль закріпленого магнітожорсткого шару для забезпечення спін-вентильного ефекту. Плівкову систему у вигляді спін-клапана у якому верхній магнітний шар замінений мільтишаром прогнозовано буде мати два робочих стани, що дозволить розширити його функціональність при створенні елементної бази гнучкої електроніки,

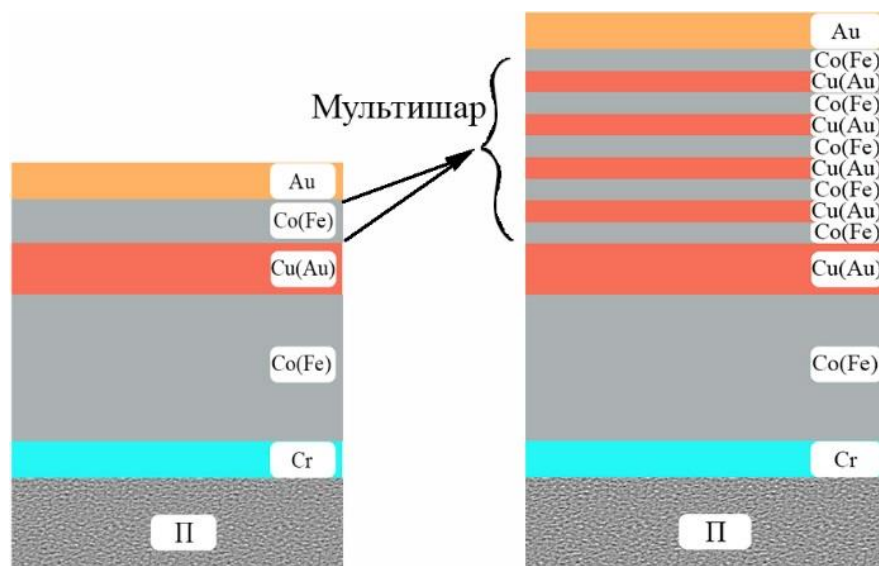


Рисунок 1.9 – Схема формування псевдо спін-вентилля на основі мультишару

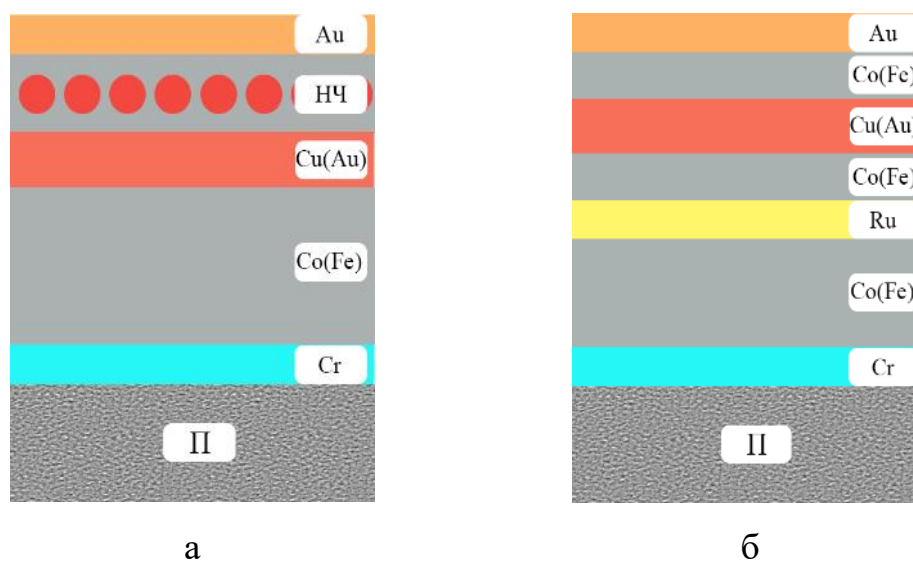


Рисунок 1.10 – Схематичне зображення будови функціонального елемента у вигляді багатошарової наноструктури спін-клапаного типу на основі:
 а – упорядкованого масиву наночастинок, б – синтетичного антиферомагнітного функціонального шару на основі Co і Ru

наприклад при створенні тригерних схем.

Використання шару у вигляді УМНЧ замість верхнього магнітного шару в спін-клапані (рис. 1.10 а) значно збільшить діапазон робочих полів та матиме лінійну ділянку залежності магнітоопру від прикладеного магнітного поля. Це сприятиме його застосуванню для виготовлення термостабільних сенсорів на гнучких підкладках на основі ефекту ГМО (наприклад, сенсора магнітного поля, сенсора обертання та положення, біосенсора і т.д.).

Застосування шару Ru для розділення нижнього функціонального магнітного шару Co як це показано на рис. 1.10 б сприятиме реалізації антиферомагнітної взаємодії між окремими його складовими. Такі системи називають синтетичними антиферомагнітними шарами і вони сприяють кращому закріпленню нижнього магнітного функціонального магнітного шару в спін-клапанній системі.

Для реалізації цих схем виготовлення необхідно провести детальне дослідження питання стабільності їх робочих характеристик. Для цього нами були проведені експериментальне та теоретичне дослідження електрофізичних властивостей багатошарових тонкоплівкових наноструктур у вигляді спін-клапанів запропонованої конфігурації та їх фрагментів на основі Fe, Co, NiFe, та Ag, Au, Cu та магнітних наночастинок і нанокластерів. За отриманими даними зроблене уточнення методик формування термостійких функціональних елементів спін-клапанного типу для реалізації елементів пам'яті та каналів з'єднання в електронних компонентах.

2 МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1 Технологія виготовлення зразків для дослідження

2.1.1 Методика формування багат шарових плівкових структур на основі Co, Fe, NiFe, Cu, Au, Ru

Були отримані зразки у вигляді одно-, дво-, три- та багат шарових плівкових систем і мультишарів на основі Co і Cu, Fe і Au, NiFe і Cu, Ru і Co.

Зразки конденсувалися електронно-променевим методом в умовах вакууму 10^4 Па за допомогою вакуумного універсального посту ВУП5-М. На рис. 2.1 представлена його конструкція. Робочий об'єм цієї установки повинен відповідати вимогам технологічного процесу і мати можливість для приєднання вакуумметричних приладів. Для отримання високого вакууму в ньому використовується комбінація механічного форвакуумного насоса та паромасляного дифузійного насоса.

Для отримання плівки методом електронно-променевого випарування використовувалась конструкція випарника, де на анод припаяна крапля металу який випаровується на підкладку (рис. 2.2). У якості анода використовується вольфрамовий стержень до кінця якого припаяний шматочок металу. Катод виконаний у вигляді кільця з вольфрамової нитки $d = 0,2$ мм. На анод подається висока напруга (декілька кВ), на катод – від'ємна напруга; за рахунок різниці потенціалів крапля розігрівається і починає випаровуватися на підкладку.

Для отримання чистої плівки використовують заслінку яка збирає на себе всі шкідливі залишки які могли утворитися на аноді та у камері під час її розгерметизації (рис. 2.3).

Для отримання чистої металевої плівки за допомогою методу електронно-променевого випарування під час її синтезу необхідно враховувати деякі особливості. Камеру відкачують до 10^{-3} Па. Ступінь вакууму контролюється за допомогою ламп P_1 та P_2 також можливе використання інших приладів для вимірювання ступеню вакууму у камері, наприклад вакуумметром (рис. 2.4).



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд вакуумного універсального посту ВУП- 5М



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд електронного випарника для отримання металевих плівок (а) та аноду (б)



Рисунок 2.3 – Установка для електронно-променевого випарування



Рисунок 2.4 – Система керування вакуумною установкою ВУП-5М

Перед напильням камеру прогрівають до 573 К, що сприяє додатковому очищенню підкладки, складових частин електронно-променевої гармати і камери в цілому, оскільки під дією температури “відлітають” шкідливі частинки які могли потрапити у камеру під час її розгерметизації. Прогрівання до температури 573 К та вище дає додаткову енергію на підкладку, що сприяє утворенню однорідної структури та рівномірного осадження плівки. Для прогріву камери у якості нагрівача використовується спіраль (рис. 2.5 а) яку розміщують нал столиком (рис. 2.5 б).

Температуру вимірюють за допомогою термомпари та мультиметра. В ідеальному випадку температура для прогріву камери повинна складати 1/3 температури плавлення плівки, але є обмеження в ~ 573 К, це пов’язано з тим, що всередині камери розміщується кварцевий резонатор для вимірювання товщини плівки, а його конструкція передбачає спаювання деталей оловом який розплавиться при більшій температурі.

Вимірювання товщини плівки проводиться методом кварцевого резонатора (рис. 2.6). Якщо стабілізувати кварц, то він не буде змінювати власну частоту, а при осадженні плівки його частота буде змінюватися на декілька Гц за 1нм. Розрахунок



а

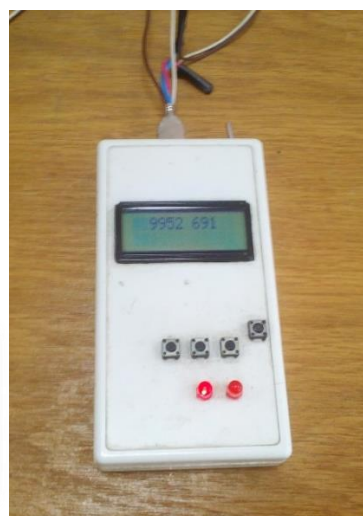


б

Рисунок 2.5 – Нагрівач у вигляді спіралі (а) та столик для тримання підкладок (б)



а



б

Рисунок 2.6 – Прилад для контролю товщини плівки: а – кварцевий резонатор;
б – частотомір

зміни частоти проводився по відповідним формулам:

$$d = \frac{N_a \cdot D_q}{D_f \cdot f_q^2} \cdot (f_q - f), \quad (2.1)$$

де D_q – густина кварцу та D_f – густина речовини, яка конденсується; f_q , – резонансна частота кварцу до конденсації металу; f – резонансна частота кварцу після конденсації металу.

Як підкладки використовувалися різні підкладки у залежності від подальших методів дослідження зразків. Для контролю фазового складу та структури зразків застосовувалися гнучкі підкладки у вигляді плівки із вуглецю товщиною 20 нм. Для дослідження електрофізичних властивостей використовувалися відшліфовані пластини сіталу (склокераміка) розміром 2×1 см.

Для дослідження термічної стабільності фізичних властивостей зразки відпалювалися у вакуумній камері до температур $T_{\text{в}} = 600$ та 900 К.

Процес отримання плівки методом електронно-променевого випарування займає близько 20 годин. В цей час входить отримання необхідного вакууму, що займає близько 10-12 годин; власне напилення плівки; охолодження вакуумного простору, плівок до кімнатної температури $\sim 8-10$ годин. Необхідність для охолодження без розгерметизації пов'язана з тим, що при потраплянні повітря на плівки одразу після напилення ми отримаємо вже оксиди.

2.2 Методика формування одно- та багат шарових упорядкованих масивів магнітних наночастинок та нанокластерів

В дослідженнях використовувалися наночастинок CoFe_2O_4 , що були отримані методом хімічного синтезу авторами роботи [35].

Отримання упорядкованих одно- та багат шарових масивів магнітних наночастинок CoFe_2O_4 на підкладках із пластин монокристалу кремнію з шаром діоксиду кремнію (Si/SiO_2 (500 нм)) розмірами 1×1 см, або гнучкі вуглецевих тонких плівках товщиною 20 нм здійснювалося методом Ленгмюра-Блоджетт автоматизованим приладом KSV NIMA TECHNOLOGY (рис. 2.7) із розділу повітря/вода (з додаванням 1 мл хлорної кислоти на 1 л) в умовах атмосфери капанням об'єму 50 мкл розчинів наночастинок у хлороформі (див. [36]). Для нанесення шарів нанокластерів MoS_2 використовується ультразвуковий диспергатор УЗДН-А в режимі розпилення (рис. 2.8) [37].

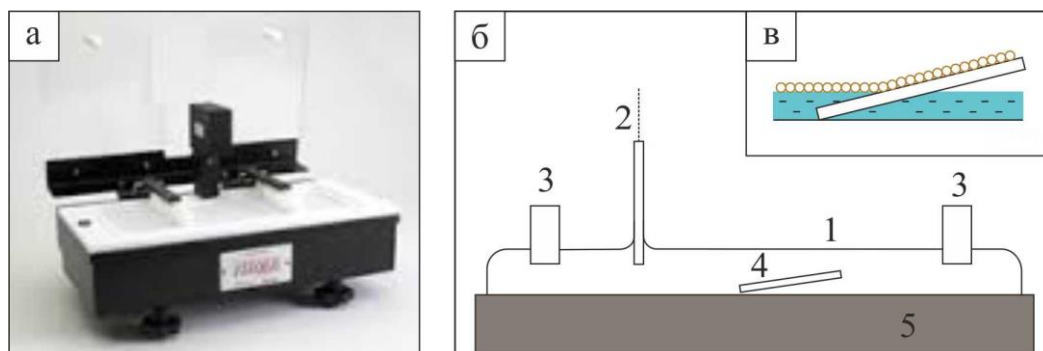


Рисунок 2.7 – Установка для нанесення наноструктурованих плівок методом Ленгмюра-Блоджетт (а). Схематичне зображення основних конструктивних елементів (б): 1 – поверхня води; 2 – датчик поверхневого натягу (ваги Вільгельмі); 3 – тефлонові барери; 4 – зразок; 5 – тефлонова ванна. Осадження сформованого шару на підкладку (в)



Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд ультразвукового диспергатора УЗДН-А (а) та його улаштування (б): 1 – блок живлення з панеллю керування; 2 – робочий випромінювач; 3 – насадка; 4 – дверцята шумозахисної камери; 5 – піддон з віброгасінням; 6 – кнопка ввімкнення живлення; 7 – індикатор таймера; 8 – кнопка ввімкнення таймера у хвилинах; 9 – кнопка ввімкнення таймера в секундах; 10 – кнопка програмування таймера; 11 – скидання таймера; 12 – кнопка ввімкнення випромінювача; 13 – зупинка випромінювача; 14 – ручка керування частотою синхронізації; 15 – ручка курування потужністю випромінювання

Для покращення гідрофільних властивостей зразків за рахунок видалення біологічних об'єктів та поверхнево-активних речовин всі підкладки опромінювались ультрафіолетовим випромінюванням ($\lambda = 254$ нм) протягом 15 хв. Час опромінення визначався експериментально згідно даних отриманих для підкладок, для яких було встановлено, що після опромінення ультрафіолетом протягом 15 хв величина контактного кута зменшилась від 47 до 10°.

Для отримання тонких шарів нанокластерів MoS₂ були взяті два розчини MoS₂ в етанолі з різною концентрацією різних фірм виробництв. Розчин білого кольору був отриманий фірмою «Alfa Aesar» (з концентрацією 12%), а розчин жовтого кольору – «Sigma» (з концентрацією 25%). Розчин MoS₂ в етанолі отриманий методом розшарування гранул MoS₂ ультразвуком (300 Вт / 6 годин / $t = +5$ C°). Сепарування проводилося центрифугою $V=21000$ об/хв. Середній розмір флейків ≈ 100 нм.

2.2 Методика дослідження електрофізичних властивостей тонких плівок

Вивчення електрофізичних властивостей (питомого опору та термічного коефіцієнту опору) зразків проводили у вакуумній камері установки ВУП-5М при тиску залишкових газів 10^{-4} Па. На підкладки із сіталу наносилися контактні майданчики як це показано на рис. 2.8. Низькоомні контактні майданчики склалися з двох шарів металів. Спершу на підігріту підкладку конденсували тонку, товщиною близько 5 нм, плівку Cr для кращої адгезії, а потім відносно товстий (до 2 мкм) шар Cu. Покращення контакту «плівка / контакт» двошарової плівки Cu/Cr відбувалося шляхом сходинкоподібного осадження шарів металів. При отриманні залежності питомого опору зразків від температури використовувався пристрій, зображений на рис. 2.9. В результаті двох стабілізаційних циклів «нагрівання \leftrightarrow охолодження» при постійній швидкості 8–10 К/хв були отримані залежності $R(T)$. Потім, використовуючи співвідношення

$\beta = \frac{1}{R_n} \frac{\Delta R}{\Delta T}$ проводився розрахунок величини ТКО. Для вимірювання електричного

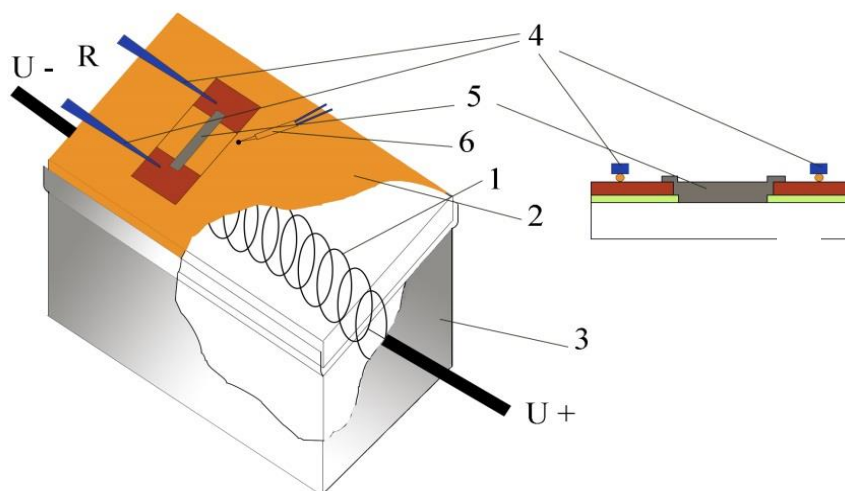


Рисунок 2.9 – Схема пристрою для дослідження електрофізичних властивостей зразків під час їх відпалювання. Зображення зверху (а) і збоку (б):

1 – вольфрамова спіраль; 2 – столик; 3 – екрануючий кожух; 4 – притискні контакти; 5 – зразок; 6 – термопара

опору застосовувався високоточний цифровий вольтметр АРРА-109 з похибкою вимірювання опору $\pm 0,06\%$. Температуру контролювали за допомогою хромель-алюмелевої термопари та цифрового вольтметра УТ-70В, що забезпечувало прийнятну точність ± 1 К. Це дало можливість безпосередньо досліджувати термовідпалені зразки до високих температур (700, 800 та 900 К), при яких, як відомо, утворюється тверді розчині (т. р.) в плівкових зразках.

3 ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОНКОПЛІВКОВИХ МЕТАЛЕВИХ НАНОСТРУКТУР СПІН-КЛАПАННОГО ТИПУ НА ОСНОВІ Co, Fe, NiFe, Cu, Au, Ru ТА МАГНІТНИХ НАНОЧАСТИНОК І КЛАСТЕРІВ

3.1 Експериментальні результати дослідження електрофізичних властивостей металевих плівкових систем як фрагментів спін-клапану та їх кореляція з структурно-фазовим станом

3.1.1 Плівкові системи на основі Co і Cu

Особлива увага при дослідженні електрофізичних властивостей запропонованих спін-вентильних структур приділялася саме системам на основі Co та Cu, оскільки це класичне поєднання металів, простих та дешевих у отриманні.

Було отримано ряд залежностей питомого опору й ТКО одно та багат шарових плівок на основі Co та Cu (рис. 3.1 – 3.3). Було встановлено, що залежність питомого опору від температури у всіх розглянутих випадках товщин шарів має вендівський характер з сильно вираженою зміною питомого опору під час нагрівання: від $(50-1.2) \cdot 10^8$ Ом·м. Вимірювання проводились при 2-х відпалювальних циклах. Залежність ТКО від температури має майже лінійний характер, при цьому залежність зменшується з ростом температури від $(4-3.5) \cdot 10^4$ К⁻¹. Найменший спад питомого опору при першому циклі нагрівання спостерігався для системи виконаної у вигляді мультишару [Cu(3)/Co(3)]₇/П (рис. 3.3). Це можна пояснити великою кількістю інтерфейсів порівняно з дво- та трьох шаровими зразками, що призводить до активації заліковування при нагріванні зовсім інших типів дефектів, що мають меншу енергію заліковування.

У загальному випадку можна прослідкувати тенденцію до утворення т.р. в цій плівковій системі з рис. 3.1 де для порівняння наведені залежності питомого опору для одношарових плівок Co різної товщини, із штучним інтерфейсом (рис. 3.1 в) та прошарками з Cu (рис. 3. г) або двошарової системи (рис. 3.1 д). Саме шар Cu призводить до значної зміни виду залежностей у результаті формування т.р. вже на стадії формування зразків.

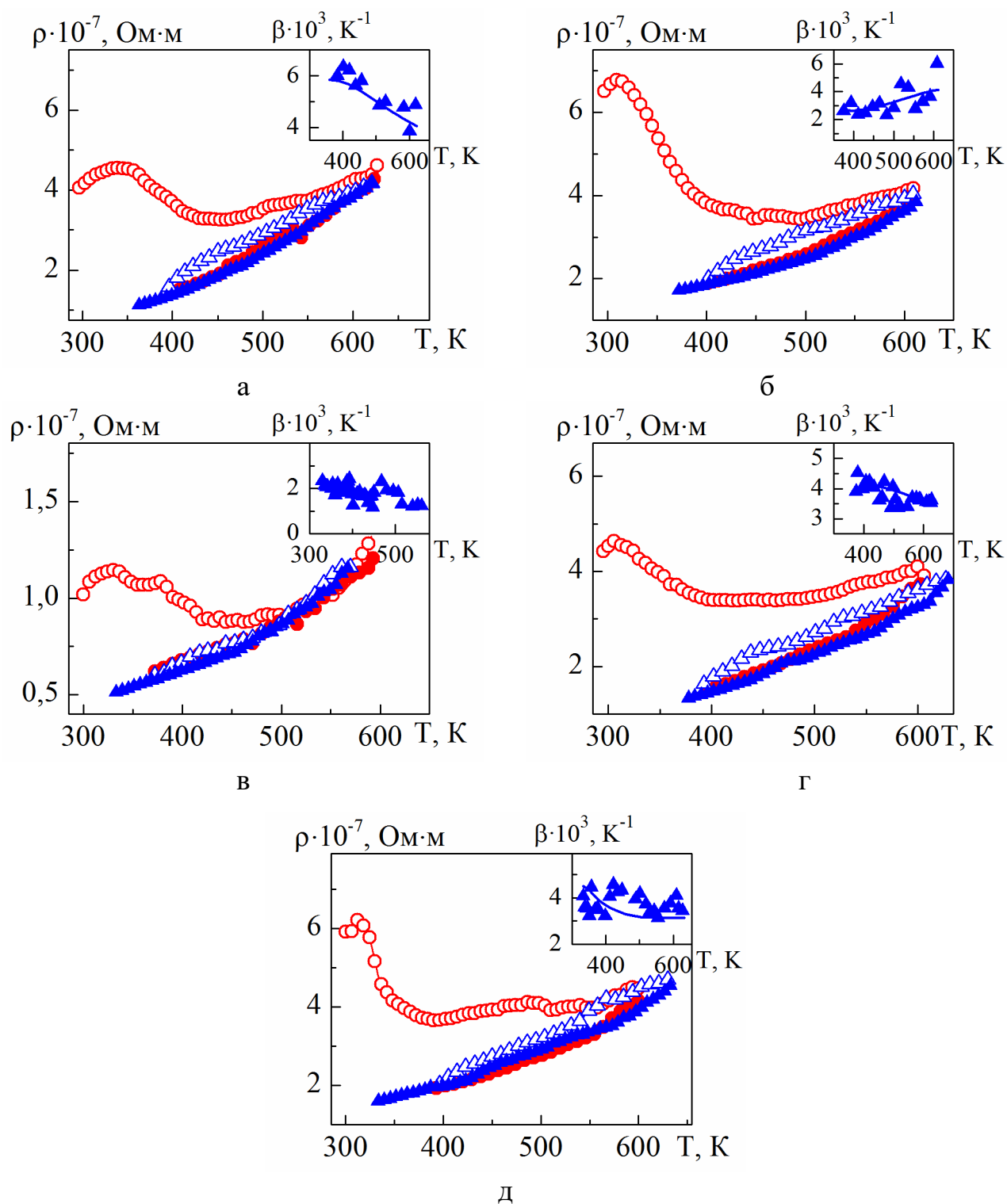


Рисунок 3.1 – Температурні залежності питомого опору та термічного коефіцієнту опору (на вставках) плівкових систем: а –Co(40)/П; б –Co(20)/П; в –Cu(20)/Co(20)/П; г –Co(20)/Cu(5)/Co(20)/П; д –Cu(5)/Co(20)/П.

Перший цикл нагрівання (○) та охолодження (●); другий цикл нагрівання (△) та охолодження (▲)

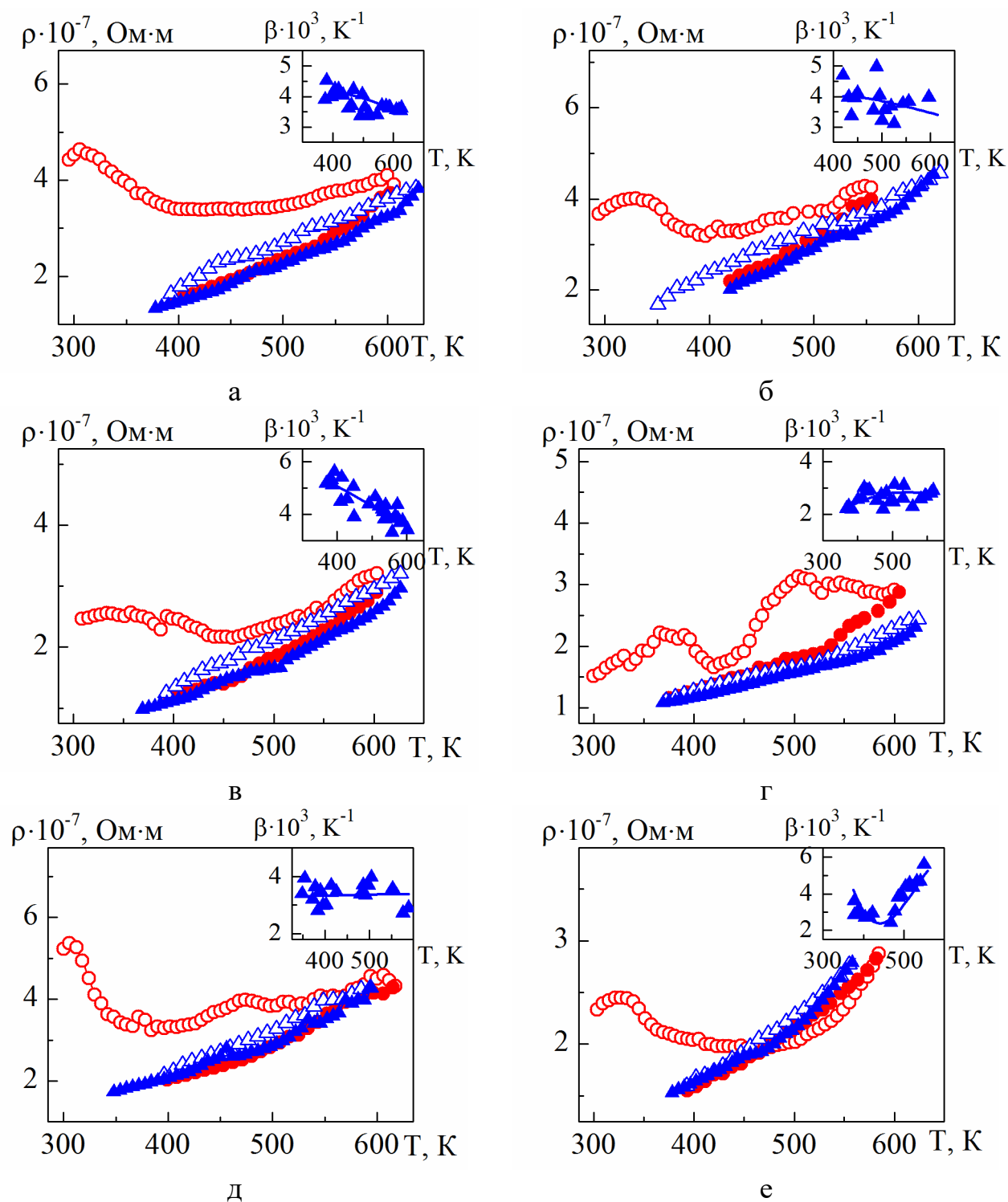


Рисунок 3.2 – Температурні залежності питомого опору та термічного коефіцієнту опору (на вставках) плівкових систем: а – Co(20)/Cu(5)/Co(20)/Pi; б – Co(20)/Cu(8)/Co(20)/Pi; в – Co(20)/Cu(10)/Co(20)/Pi; г – Co(20)/Cu(20)/Co(20)/Pi; д – Cu(8)/Co(20)/Pi; е – Cu(10)/Co(20)/Pi. Перший цикл нагрівання (\circ) та охолодження (\bullet); другий цикл нагрівання (Δ) та охолодження (\blacktriangle)

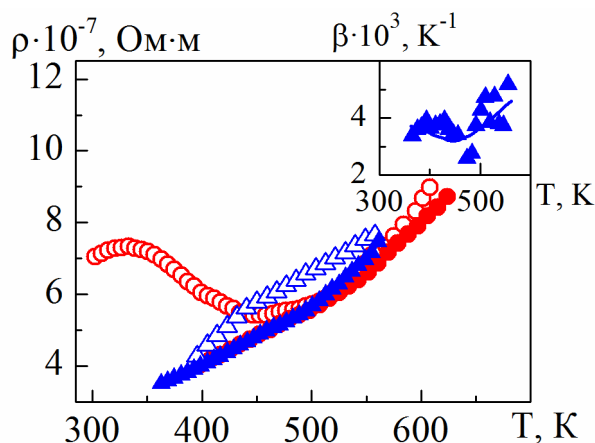


Рисунок 3.3 – Температурні залежності питомого опору та термічного коефіцієнту опору (на вставці) плівкової системи $[\text{Cu}(3)/\text{Co}(3)]_7/\text{P}$. Перший цикл нагрівання (\circ) та охолодження (\bullet); другий цикл нагрівання (Δ) та охолодження (\blacktriangle)

Результати дослідження електрофізичних властивостей повністю відповідають результатам дослідження фазового складу та структурних характеристик багат шарових плівкових систем на основі Co і Cu вказують на утворення в них т. р. атомів Co в матриці ГЦК-Cu. Як було показано в наших роботах [38-40] процес утворення т. р. Cu (Co) на межах поділу між шарами відбувається у процесі формування зразків при кімнатній температурі в результаті конденсаційно-стимульованої дифузії та подальшій термообробці до $T_b = 400 \div 700$ К. При $T_b \geq 900$ К спостерігається частковий розпад т. р. з утворенням гранульованого стану Co. На рис. 3.3 представлені типова кристалічна структура та відповідна електронограма плівкових систем на основі Co і Cu у вигляді спін-вентильних структур або мультишарів на прикладі спін-вентилію Au (10) / Co (5) / Cu (10) / Co (20) / П при $T_b = 300$ К. На електронограмі відмічені дві групи ліній, що відповідають фазам ГЦП-Co + ГЦК-Co (дефекти пакування) та т. р. Cu (Co) (параметр $a_{\text{т.р.}} = 0,3588$ нм). Після відпалювання зразка до $T_b = 700$ К параметр $a_{\text{т.р.}}$ зменшується до 0,3575 нм у результаті подальшого перемішування шарів Co і Cu.

Дослідження фазового складу багат шарових плівок у вигляді псевдо спін-вентилію Au (10) / Co (3) / Cu (6) / Co (20) / Cr (3) / П ускладнене (табл. 3.1).

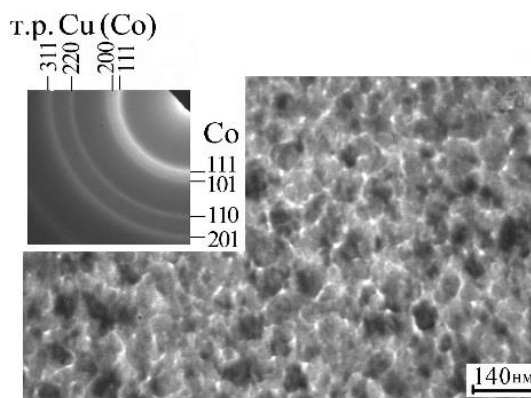


Рисунок 3.4 – Кристалічна структура та електронограма (на вставці) плівкової системи спін-вентильного типу Co (5) / Cu (10) / Co (20) / П при $T_B = 300$ К

Таблиця 3.1 – Розшифрування електронограм від плівкової системи спін-клапанного типу Au (10) / Co (5) / Cu (6) / Co (20) / Cr (3) / П

№ П/П	$T_B = 300$ К					$T_B = 700$ К				
	I , в.о.	d_{hkl} , нм	hkl	фаза	a , нм	I , в.о.	d_{hkl} , нм	hkl	фаза	a , нм
1	Д.с.	0,2353	111	ГЦК-Au	0,4079	ср.	0,2351	111	т. р. Au (Co)	0,4073
2	с.	0,2037	200	т. р. Cu (Co)	0,3593	с.	0,2079	111	т. р. Cu (Co)	0,3601
3	ср.	0,2029	111	ГЦК-Au	0,4079	ср.	0,2036	200	т.р.(Au, Co)	0,4072
4	ср.	0,1441	111	ГЦК-Co	-	сл.	0,1943	111	ГЦК-Co	-
5	д.сл.	0,1230	200	т. р. Cu (Co)	0,3601	сл.	0,1793	200	т. р. Cu (Co)	0,3587
6	сл.	0,1177	222	ГЦК-Au	0,4080	сл.	0,1440	220	т. р. Au (Co)	0,4072
7						сл.	0,1239	220	т. р. Cu (Co)	0,3590
$a_{\text{т.р. Cu (Co)}} = 0,3593 \pm 0,0005$ нм; $a_{\text{Au}} = 0,4079 \pm 0,0005$ нм;					$a_{\text{т.р. Cu (Co)}} = 0,3594 \pm 0,0005$ нм; $a_{\text{т.р. Au (Co)}} = 0,4072 \pm 0,0005$ нм.					

Позначення інтенсивності (I , в.о.): Д.с. – дуже сильна; сл. – слабка; д.сл. – дуже слабка; с. – сильна; ср. – середня.

Електронограми від таких структур носять складний характер. Однак, згідно наших даних в спін-вентильних структурах тенденція утворення т. р. зберігається. Система у невідпаленому стані складається з фаз ГЦК-Au, ГЦП-Co + ГЦК-Co (дефекти пакування) та т. р. Cu (Co). У відпаленій плівці додатково утворюється т. р. Au (Co). До і після відпалювання багатошарові плівки мають мілкодисперсну структуру.

3.1.2 Плівкові системи на основі Fe і Au

На рис. 3.4 представлені температурні залежності для плівкових систем: Fe(10)/Au(20)/П та Au(10)/Fe(20)/Au(10)/П. Для даних систем, як і для всіх металів, характерне зменшення опору з ростом температури під час нагрівання при першому циклі дослідження температурної залежності питомого опору. Це можна пояснити заліковуванням дефектів типу «вакансія-домішковий атом» кристалічної будови у свіжосконденсованих зразках. При нагріванні протягом першого циклу в інтервалі температур 300 – 600 К має місце незначне збільшення питомого опору з його зменшенням на проміжку 600 – 700 К, що може бути пов'язано із залікуванням дефектної структури і процесами рекристалізації, які супроводжуються зниженням внеску зерномежового розсіювання носіїв струму у загальний опір системи. При охолодженні питомий опір монотонно зменшується, що пояснюється завершенням релаксаційних процесів вже на першому циклі термообробки.

Такі залежності питомого опору корелюють з даними, що були отримані за результатами дослідження фазового складу та кристалічної структури плівкових систем на основі Fe і Au. Як показано в роботі [41], після конденсації таких зразків шари зберігають свою індивідуальність і лише після відпалювання починає поступово утворюватися т. р. Au (Fe) та при високих температурах відбувається часткове окислення Fe. На рис. 3.6 показані електронограми та мікроструктура системи Fe (5) / Au (25) / Fe (5) / П до і після відпалювання до різних температур.

На електронограмах від невідпалених зразків спостерігається дві системи кілець, що відповідають фазам ГЦК-Au та ОЦК-Fe з відповідними параметрами решітки

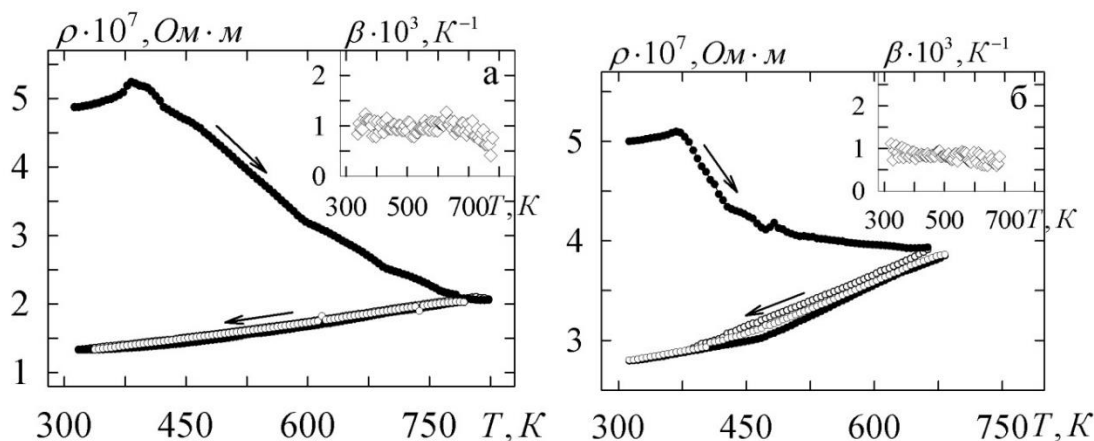


Рисунок 3.5 – Температурні залежності питомого опору та термічного коефіцієнту опору (на вставці) плівкових систем: а – Fe(10)/Au(20)/П;
б – Au(10)/Fe(20)/Au(10)/П

0,4074 та 0,2875 нм. Ці значення дуже близькі до табличних значень для масивних зразків Au $a_0 = 0,4078$ нм та Fe $a_0 = 0,2870$ нм [42]. Після відпалювання до 700 К відбувається утворення т. р. Au (Fe) та на електроннограмах від таких зразків простежуються дві групи ліній що відповідають т. р. Au (Fe) та ОЦК-Fe. Параметр решітки т. р. має значення $\bar{a} = 0,4065$ нм. Після відпалювання зразків до температур 800 та 900 К на електроннограмах додатково фіксуються лінії $d_{220} = 0,2961$ нм та $d_{311} = 0,2524$ нм, що відповідають оксиду Fe_3O_4 .

3.1.3 Плівкові системи на основі Co і Ru

Ще одним важливим поєднанням є системи на основі Co і Ru як системи в яких шари зберігають свою індивідуальність на всьому діапазоні розглянутих температур. А це гарантує високу термічну стабільність робочих характеристик функціональних структур виконаних на їх основі.

Були отримані температурні залежності питомого опору одношарових зразків товщиною 20 нм та 40 нм, що сконденсовані на непідігріту підкладку (рис. 3.7). Як бачимо, залежності є неметалічними. Це пояснюється тим, що температури

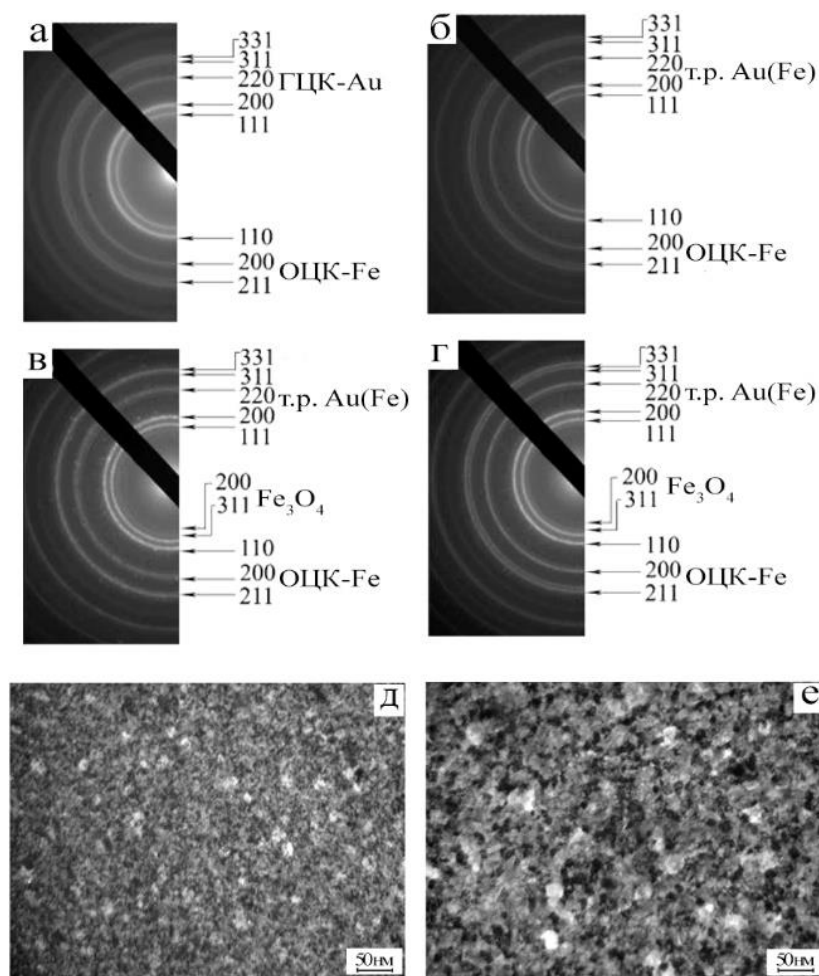


Рисунок 3.6 – Електронограми (а-г) та кристалічна структура (д, е) плівкової системи Fe (5) / Au (25) / Fe (5) / П до (а, д) та після відпалювання до 700 (б), 800 (в) та 900 (г, е) К

підкладки і товщини плівок недостатньо, щоб почали працювати механізми притаманні металевим плівкам. При прогріванні підкладки на неї надходить додаткова енергія яка сприяє утворенню однорідної структури та рівномірному осадженню плівки, а під час відпалювання відбуваються термостабілізаційні процеси в зернах і доменах, заліковуються структурні дефекти кристалічної будови (вакансії, дефекти пакування). Скоріш за все, в даному випадку ми маємо справу з оксидом рутенію, що по своїй суті є напівпровідником. Було встановлено, що

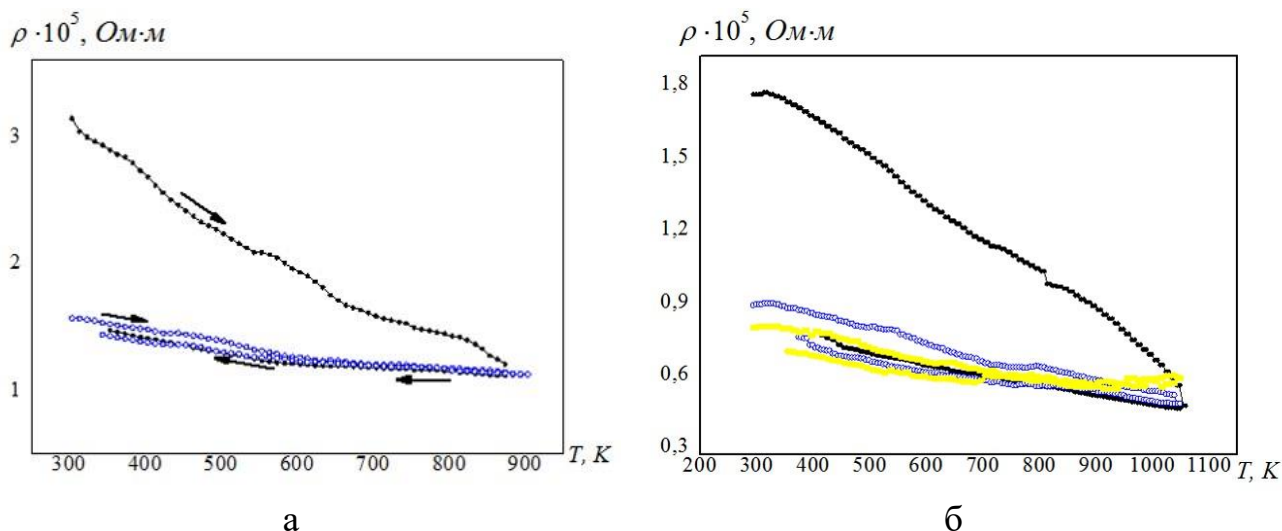


Рисунок 3.7 – Температурні залежності питомого опору одношарових плівок Ru(20)/П (а) та Ru(40)/П (б). Перший цикл нагрівання (●) та охолодження (○); другий цикл нагрівання (○) та охолодження (●); третій цикл нагрівання (○) та охолодження (●)

отримання безоксидних одношарових плівок Ru можливо лише на підігріту підкладу до $T_{\text{п}} = 400 - 700$ К при товщинах $d_{\text{Ru}} > 40$ нм.

Для одношарових плівок на основі Ru у всьому діапазоні товщин величина питомого опору на порядок більше від табличного значення для масивних зразків ($\rho_0 = 7,15 \cdot 10^{-7}$ Ом·м). Найбільш близьке значення спостерігалось для Ru (40 нм)/П, що у щойносконденсованому при кімнатній температурі стані зразка становило $\rho = 1,79 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, а після відпалювання до 1058 К – $\rho = 7,28 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. Середнє значення температурного коефіцієнту опору для даного зразка складає $\beta = 4 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹, що також відрізняється від табличного ($\beta_0 = 4,2 \cdot 10^{-5}$ К⁻¹).

Для дво- та багатошарових плівкових зразків на основі Co і Ru (рис. 3.8) характерна металева температурна залежність, що має типовий вендівський характер. Такій результат підтверджують висновки зроблені за результатами дослідження кристалічної будови одно- та багатошарових плівкових систем на основі Co і Ru. Узагальнення цих результатів представлено на рис. 3.9 у вигляді порівняння мікроструктур таких зразків до і після відпалювання, табл. 3.2, де зведена інформація про особливості фазового стану зразків у залежності від

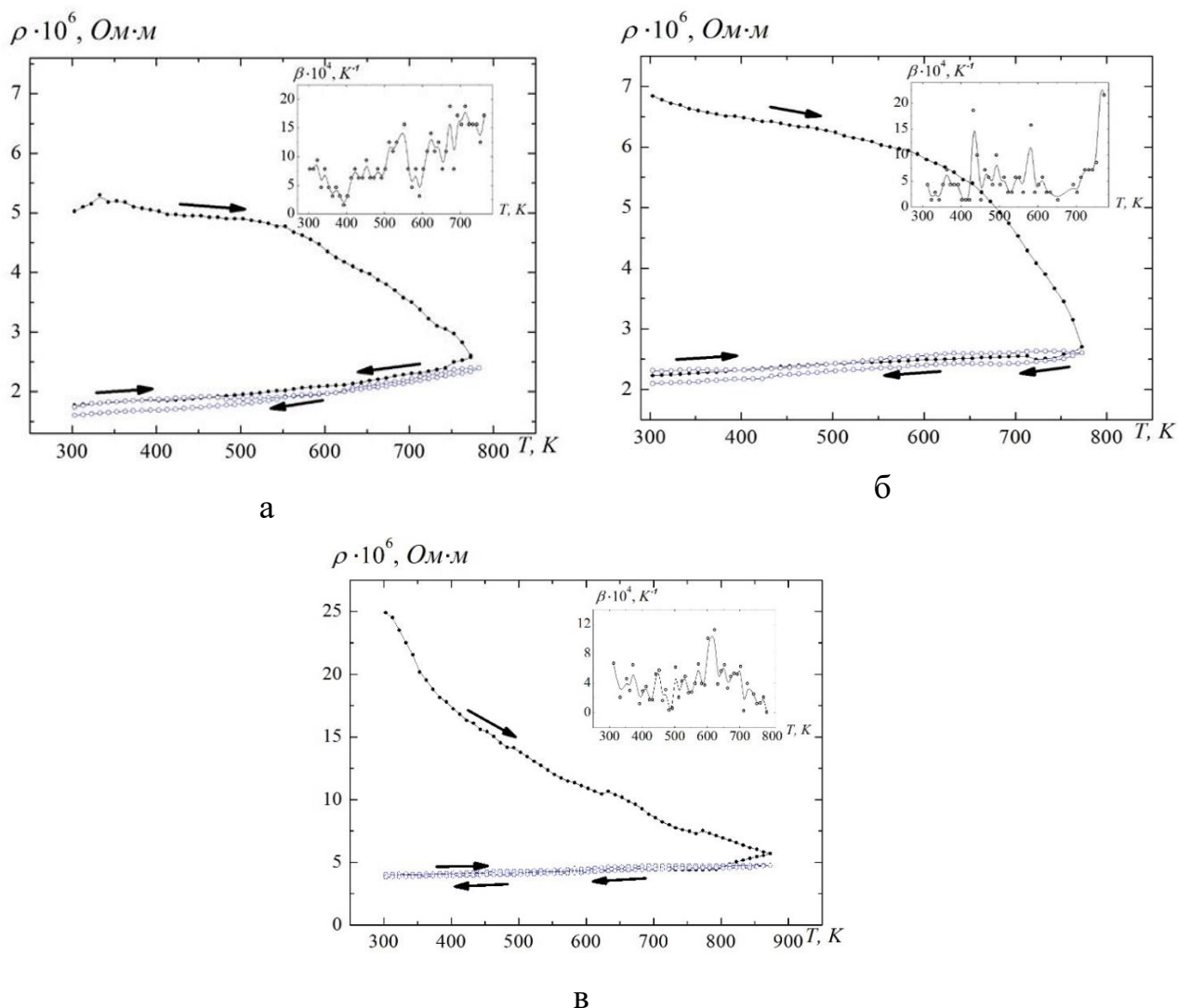


Рисунок 3.8 – Температурні залежності питомого опору та термічного коефіцієнту опору (на вставках) плівкових систем: а –Co(20)/Ru(5)/П; б –Co(20)/Ru(10)/П; в –Co(20)/Ru(20)/П. Перший цикл нагрівання та охолодження (●); другий цикл нагрівання та охолодження (○). Стрілочками вказано напрям зміни температури

товщини шарів та температури відпалювання, та рис. 3.10, де приведені дифузійні профілі отримані методом ВІМС для двошарового зразка Ru(60) / Co(60)/П до і після відпалювання. Як видно з наведених даних, майже у всіх розглянутих випадках системи на основі Co і Ru зберігають індивідуальність шарів в діапазоні температур 300 – 900 К при всіх розглянутих товщинах. В таблиці словом «нанодисперсний» були названі структури, середній розмір кристалітів яких не

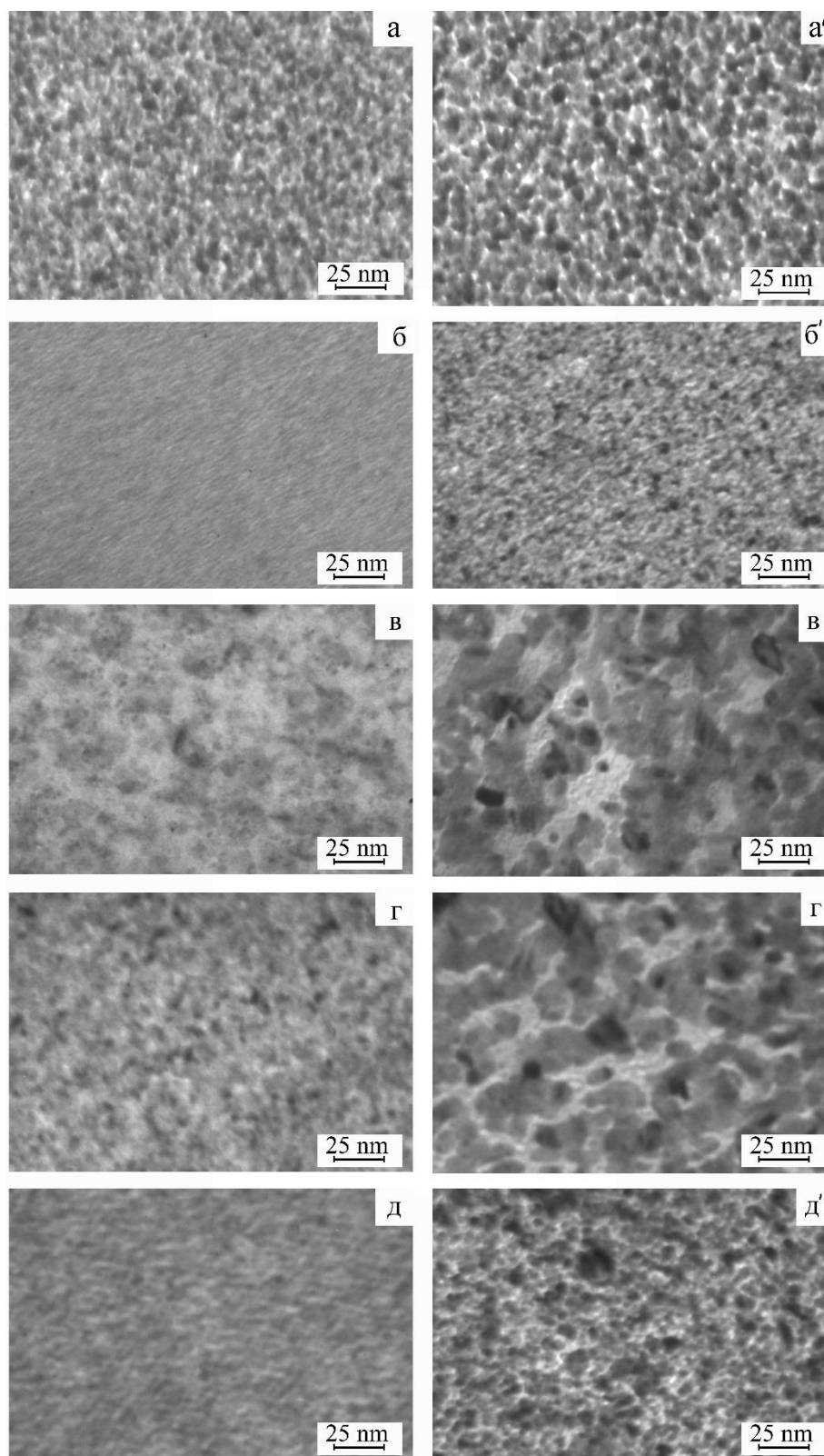
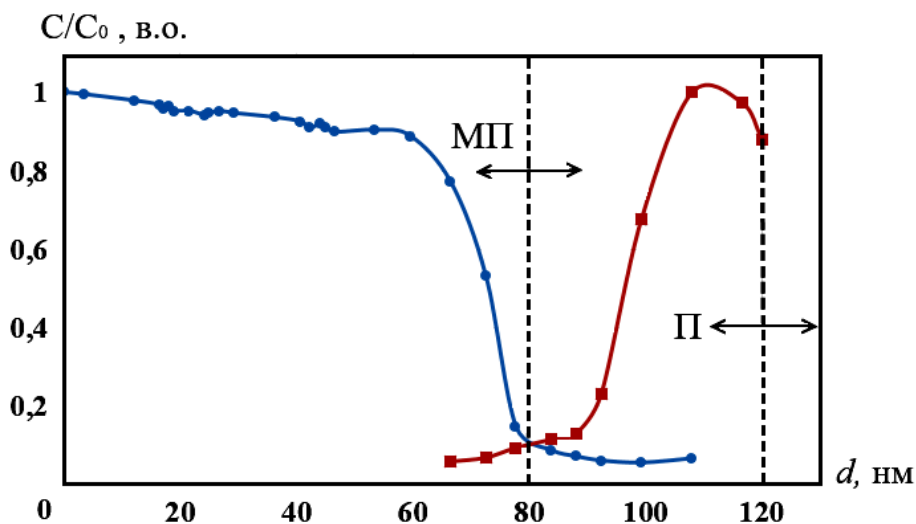


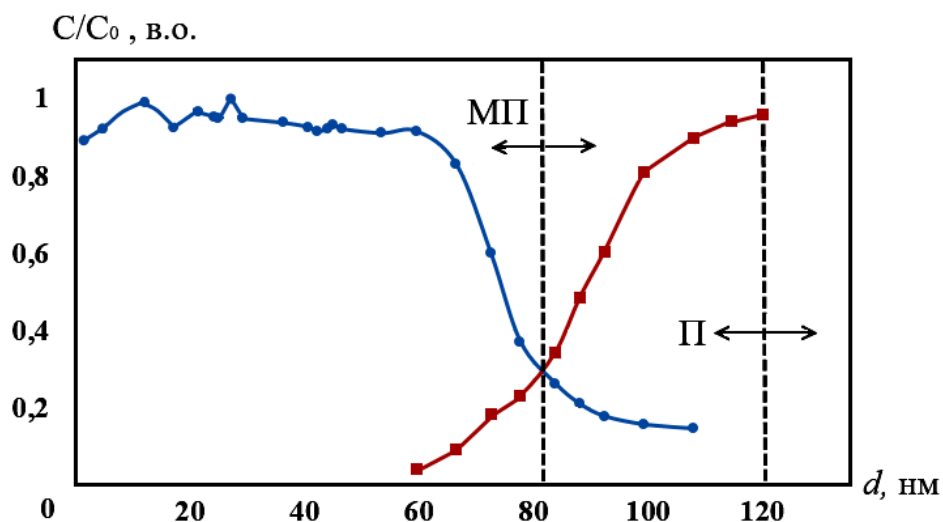
Рисунок 3.9 – Мікроструктура плівок $\text{Co (30) / П (а, а')}$, $\text{Ru (30) / П (б, б')}$,
 $\text{Ru (30) / Co (30) / П (в, в')}$, $\text{Co (30) / Ru (30) / Co (30) / П (г, г')}$ та
 $[\text{Ru (2) / Co (2)}]_5 / П (д, д')$ при $T_b = 300 \text{ K (а, б, в, г, д)}$ та $600 \text{ K (а', б', в', г', д')}$

Таблиця 3.2 – Узагальнення результатів дослідження структурно-фазового стану плівкових систем на основі Co і Ru

Плівкова система (нм)	Структура		Середній розмір кристалітів, нм	
	$T_B = 300$ К	$T_B = 900$ К	$T_B = 300$ К	$T_B = 600$ К
Co(5)/П	Нано-дисперсний ГЦП-Co	ГЦП-Co	2	5
Co(30)/П	ГЦП-Co + ГЦК-Co(ДП)	ГЦП -Co +	6	8
Co(60)/П		ГЦК -Co(ДП) + ГЦК-Co	15	20
Ru(5)/П	Нано-дисперсний ГЦП -Ru	Нано-дисперсний ГЦП -Ru	2	3
Ru(30)/П		ГЦП -Ru	2	7
Ru(60)/П		ГЦП -Ru	2	8
Ru(10) / Co(20)/П	Нано-дисперсний ГЦП -Ru + ГЦП -Co	ГЦП -Ru +	2	8
Ru(30) / Co(30)/П		ГЦП -Co +	3	14
Ru(60) / Co(60)/П		ГЦК -Co(ДП)	5	16
Co(30) / Ru(5) / Co(30)/П		ГЦП -Ru+	3	11
Co(30) / Ru(30) / Co(30)/П		ГЦП -Co + ГЦК -Co(ДП)	3	14
[Ru (2) / Co (2)] ₅ /П		Нано-дисперсний ГЦП -Ru+	2	4
		ГЦП -Co		



а



б

Рисунок 3.10 – Дифузійні профілі ВІМС плівкової системи Ru(60) / Co(60)/П до (а) і після відпалювання до 600 К (б). МП – межа поділу, П – підкладка

перевищує значень 3-5 нм. А позначка «ДП» означає скорочення від «дефекти пакування». Такі дефекти характерні як для одношарових плівок Со так і для окремих шарів у складі багатошарових.

Дифузійні профілі (рис.3. 10) показують, що до відпалювання двошарові системи на основі Ru і Со мають чітку межу поділу між окремими шарами, що незначно зміщується в бік підкладки ймовірно внаслідок іонно-стимульованої дифузії в

процесі дослідження. Після відпалювання така тенденція також зберігається і окремо не можна робити висновки про значну термічностимульовану дифузію.

3.1.4 Плівкові системи на основі NiFe і Cu

Іншим прикладом плівкових систем в яких відбувається утворення твердих розчинів після процесу відпалювання є структури на основі NiFe і Cu. Тришарові плівкові системи спін-кляпанного типу $\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}/\text{Cu}/\text{Fe}_x\text{Ni}_{100-x}/\text{П}$ де $x = 40 - 80$ після конденсації залишаються двофазними як це показано на рис. 3.11 а, а саме з ГЦК фази Ni_3Fe і ГЦК – Cu. На користь присутності в таких структурах фази ГЦК – Cu свідчать характерний вид температурної залежності питомого опору, яке у тришарових структурах не можливе без наявності структурно суцільного прошарку міді.

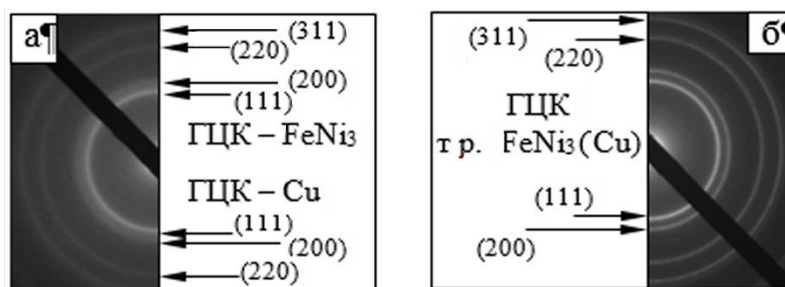


Рисунок 3.11 – Електроннограми тришарової плівкової системи

$\text{Fe}_{35}\text{Ni}_{65}(30)/\text{Cu}(30)/\text{Fe}_{35}\text{Ni}_{65}(30)/\text{П}$ до (а) та після відпалювання до 700 К (б)

Після відпалювання плівок до температури 700 К (рис. 3.11 б) на електроннограмах фіксується однофазний стан, що відповідає т.р. $\text{Ni}_3\text{Fe}(\text{Cu})$ із параметром решітки $a = 0,355-0,359$ нм. Причому можна відмітити, що процес утворення т. р. починається за нижчої температури ніж у випадку систем на основі Fe і Au але інтенсивність його утворення значно менша ніж у випадку систем на основі Co і Cu.

3.1.5 Наноструктури упорядкованих масивів магнітних наночастинок

Електрофізичні властивості структур на основі масивів наночастинок як і інших систем на основі нанорозмірних матеріалів сильно залежить від їх розмірів та структурно-фазового стану. Це обумовлено високим відношенням площі поверхні до об'єму нанооб'єктів. Результати дослідження структури та морфології поверхні зразків показує високу ефективність використаної методики для отримання упорядкованих масивів магнітних наночастинок CoFe_2O_4 , NiFe_2O_4 та Fe_2O_4 .

Багатошарові упорядковані масиви наночастинок формувалися по черговим нанесенням моношарів на підкладку. У даному випадку масиви наночастинок можна представити як суцільну плівку товщиною рівною товщині певної кількості моношарів. У наших дослідженнях товщина моношару наночастинок визначалась за даними атомно-силової мікроскопії і складала ≈ 10 нм. На рис. 3.12 приведені мікростарути та електроннограми сформованих масивів наночастинок Fe_3O_4 до та після відпалювання до 900 К. До відпалювання формується рівномірний масив наночастинок з однакових за розмірами наночастинок. Після відпалювання наночастинок втрачають свої розміри. Така поведінка пояснюється видаленням сурфактантів та утворенням більш суцільного шару за рахунок коалесценції наночастинок під дією температури. За таких умов подібну наноструктуру можна називати суцільною нанодисперсною плівкою із наночастинок.

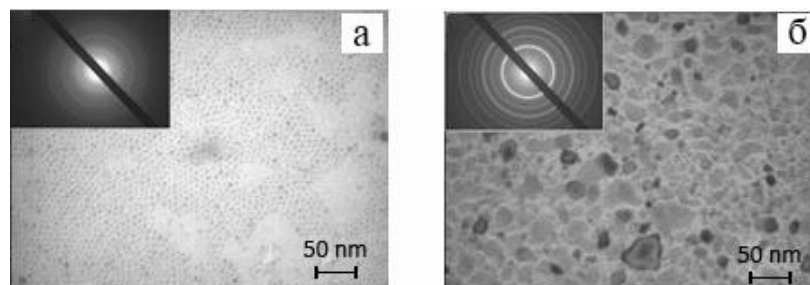


Рисунок 3.12 – Мікроструктура та відповідна електроннограма (на вставках) упорядкованого масиву наночастинок Fe_3O_4 до (а) та після відпалювання до температури 900 К (б)

3.1.6 Наноструктури на основі нанокластерів MoS₂

Експериментальні дослідження структурних характеристик та електрофізичних властивостей нанокластерів MoS₂ проводилися у вигляді сформованих шарів на вуглецевих плівках з подальшим нанесенням провідної срібної матриці товщиною 20 нм. За результатами дослідження структурних характеристик можна стверджувати наступне. Найбільш чітка електроннограма була отримана від зразків з розчину “Sigma” за умови подальшого термовідпалювання до $T_B = 600$ К, що були отримані шляхом ультразвукового розпилення, розведений з водою у пропорції 1/1. Електроннограма від зразка MoS₂ (при $T_B = 600$ К) зображена на рис. 3.13 (табл. 3.3) та мікроструктуру і відповідну її гістограму $N=f(d)$ наведено на рис. 3.14. За гістограмою визначився найбільш ймовірний розмір нанокластерів (L_H), який відповідає максимуму на залежності $N=f(L)$. Проаналізувавши побудовану гістограму було визначено, що найбільш ймовірний розмір нанокластерів приблизно дорівнює $L_H \approx 12$ нм. А середнє значення розміру нанокластерів для даного зразка становить $L_{сер} = 14,55 \cdot 10^{-9}$ м.

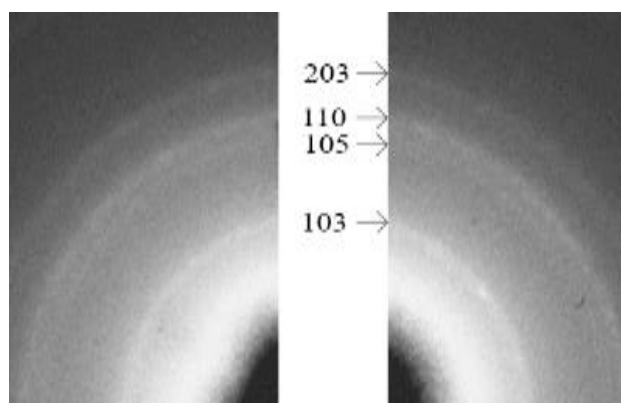


Рисунок 3.13 –Електроннограма тонкого шару нанокластерів MoS₂ після відпалювання при температурі 800 К

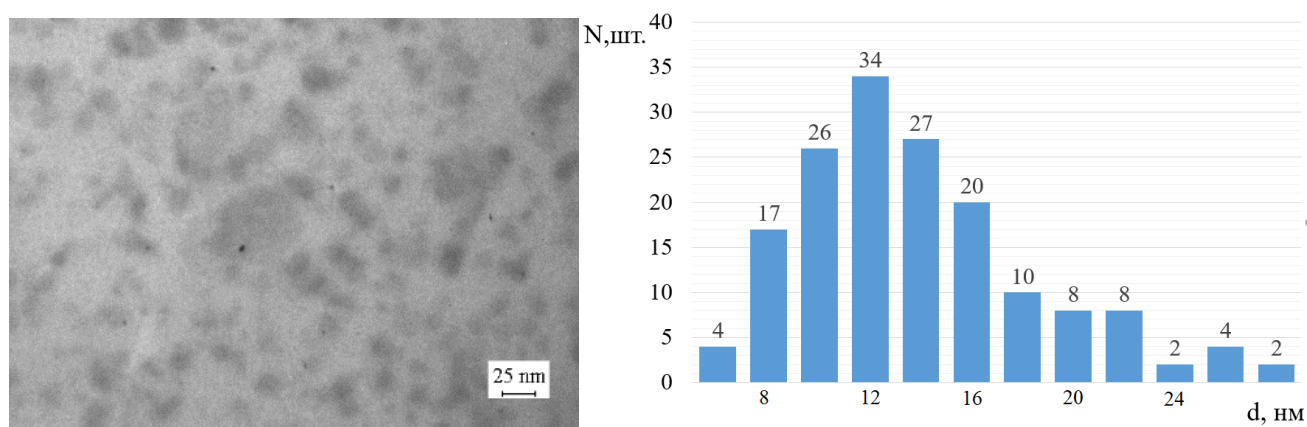


Рисунок 3.14 – Мікроструктура тонкого шару нанокластерів MoS_2 після відпалювання при температурі 800 К та відповідна їй гістограма залежності кількості нанокластерів від їх середнього розміру

Таблиця 3.3 – Розшифрування електронोगрама тонкого шару нанокластерів MoS_2 після відпалювання при температурі 800 К

№ п/п	$d_{hkl}, \text{Å}$	hkl	$d_{0hkl}, \text{Å}$	$\Delta d_{hkl}, \text{Å}$	I, в.о.
1	2,314	103	2,275	0,039	Д. С.
2	1,654	105	1,828	0,174	Сл.
3	1,539	110	1,580	0,041	Д. С.
4	1,337	203	1,297	0,040	Ср.

3.2 Теоретичні результати дослідження електрофізичних властивостей металевих плівкових систем як фрагментів спин-клапану

3.2.1 Опробація відомих теоретичних моделей електрофізичних властивостей багат шарових плівок

Теоретичне дослідження електрофізичних властивостей багат шарових плівкових систем на основі плівок металів направлено в першу чергу на встановлення закономірностей змін видів інтерфейсів між окремими шарами на різних стадіях теремообробки. Це дасть змогу прогнозування термостабільності робочих характеристик функціональних структур спин-клапанного типу. По

аналогії з дослідженнями при вивченні плівкових систем на основі Fe і Au, Co і Cu, Co і Ru, FeNi і Cu були використані відомі теоретичні моделі [43] для випадків двошарової плівкової системи, в якій зберігається індивідуальність окремих шарів (модель біпластини), гомогенної системи у вигляді плівкового сплаву по всій товщині вихідної двошарової системи та двошарової системи з проміжним біля інтерфейсу шаром плівкового сплаву. У розглянутих випадках зразки можна представити як паралельне з'єднання двох чи трьох шарів.

У третьому останньому розглянутому випадку, коли утворюються проміжні шари твердих розчинів між шарами, плівкову систему після відпалювання можна приставити у вигляді паралельного з'єднання трьох шарів як показано на рис. 3.15. Відповідно до цієї моделі вираз для розрахунків буде мати вигляді:

$$\beta \cong \beta_1 + \beta_c + \beta_2 - \frac{(d_1 - d_1'')(\beta_c \rho_c \rho_2 + \beta_2 \rho_c \rho_2) + (d_2 - d_2'')(\beta_c \rho_c \rho_1 + \beta_1 \rho_c \rho_1)}{(d_1 - d_1'') \rho_c \rho_2 + (d_2 - d_2'') \rho_c \rho_1 + (d_1'' + d_2'') \rho_1 \rho_2} + , \quad (3.1)$$

$$+ \frac{(d_1'' + d_2'')(\beta_1 \rho_1 \rho_2 + \beta_2 \rho_1 \rho_2)}{(d_1 - d_1'') \rho_c \rho_2 + (d_2 - d_2'') \rho_c \rho_1 + (d_1'' + d_2'') \rho_1 \rho_2}$$

де ρ_1, β_1 – питомий опір та ТКО першого шару; ρ_2, β_2 – питомий опір та ТКО другого шару; ρ_c, β_c – питомий опір та ТКО сплаву біля інтерфейсу; d_1'', d_2'' –

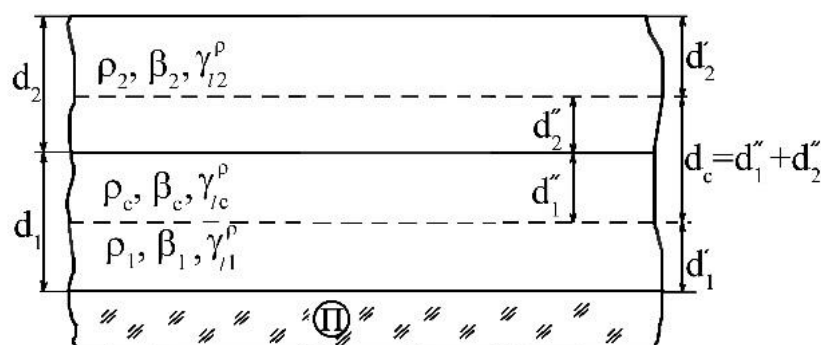


Рисунок 3.15. – Геометрична модель двошарової плівкової системи із проміжним шаром сплаву (т. р.) біля інтерфейсу

товщина шарів 1 і 2 після утворення проміжного шару сплаву біля інтерфейсу.

Розрахунки за виразом (3.1) здійснювалися шляхом розрахунку тривимірної діаграми в координатах $\beta - d_1'' - d_2''$ для різних варіантів поєднання металів. На рис. 3.16 приведені результати розрахунків діаграм для систем на основі Cu і Co.

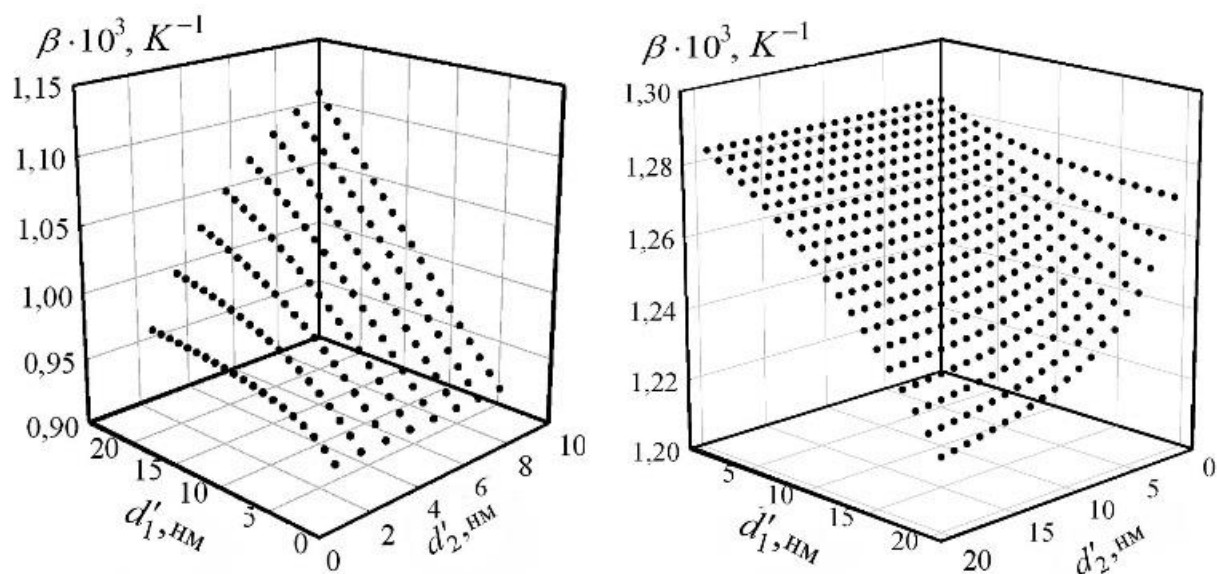


Рисунок 3.16 – Тривимірна діаграма залежності ТКО від товщини проміжного шару сплаву для плівкових систем Cu(8)/Co(20)/П (а), Cu(35)/Co(25)/П (б).

Експериментальне значення β , K^{-1} : $0,90 \cdot 10^{-3}$ (а); $0,95 \cdot 10^{-3}$ (б)

Результати розрахунків корелюють з даними отриманими по вивченню особливостей структурно-фазового стану плівкових систем. Найкращою відповідністю моделі проміжного шару біля інтерфейсу як до так і після відпалювання показала система на основі Co і Cu. Для систем на основі Fe і Au та Ru і Co розрахунки показали найкраще співпадіння розрахункових та експериментальних значень питомого опору при малих товщина d_c , тобто коли товщина проміжного шару $d_c \rightarrow 0$. Це говорить на користь висновку про те, що в цих система тенденція до утворення т. р. дуже мала або взагалі відсутня.

3.2.2 Модифікована модель питомого опору упорядкованих масивів магнітних наночастинок в провідній матриці

Для теоретичного дослідження електрофізичних властивостей упорядкованих масивів магнітних наночастинок було використано феноменологічну модель електрофізичних властивостей гранульованих плівкових сплавів [44], що передбачає присутність твердого розчину як проміжного матеріалу між магнітними гранулами як це показано на рис. 3.17 а. Але в наших дослідженнях тверді розчини в провідній матриці не були зафіксовані, тому в розрахунках використовувався питомий опір чистої провідної матриці срібла.

У даній теоретичній моделі товщина провідної матриці срібла була співрозмірна із висотою магнітних частинок, що суттєво може впливати на протікання електричного опору по зразку (рис. 3. 17 б).

У загальному вигляді, враховуючи особливості сформованих наноструктур на основі наночастинок, вираз для питомого опору можна записати у вигляді виразу:

$$\begin{aligned} \rho &= R_{\text{ш}} \frac{S}{l} = R_{\text{ш}} \frac{ad}{l} = \\ &= \left(\frac{\rho_z}{\pi r_0} + \frac{\rho_{\text{ПМ}} \cdot \Delta l_{\text{ПМ}} \cdot n_f^l \cdot \left(\rho_z + \rho_{\text{ПМ}} \frac{\Delta l_{\text{НЧ}}}{r_0} \right)}{2d_{\text{нш}} \pi r_0 \cdot \left(\rho_{\text{ПМ}} \frac{\Delta l_{\text{ПМ}}}{2d_{\text{нш}}} + \frac{n_f^l}{\pi} \cdot \left(\rho_z + \rho_{\text{ПМ}} \frac{\Delta l_{\text{НЧ}}}{r_0} \right) \right)} \right) \cdot 2a^{-1} \cdot \frac{ad}{l} = \\ &= d \cdot \left(\frac{\rho_z}{\pi r_0} + \frac{\rho_{\text{ПМ}} \cdot \Delta l_{\text{ПМ}} \cdot n_f^l \cdot \left(\rho_z + \rho_{\text{ПМ}} \frac{\Delta l_{\text{НЧ}}}{r_0} \right)}{2d_{\text{нш}} \pi r_0 \cdot \left(\rho_{\text{ПМ}} \frac{\Delta l_{\text{ПМ}}}{2d_{\text{нш}}} + \frac{n_f^l}{\pi} \cdot \left(\rho_z + \rho_{\text{ПМ}} \frac{\Delta l_{\text{НЧ}}}{r_0} \right) \right)} \right) \cdot 2l^{-1}, \end{aligned} \quad (3.2)$$

де R – експериментально виміряний опір зразка; S – площа перерізу плівки; $\alpha = \Delta l_{\text{ПМ}}/r_0$ – ступінь гранулярності зразка; $\Delta l_{\text{ПМ}}$ – середня довжина проміжків між

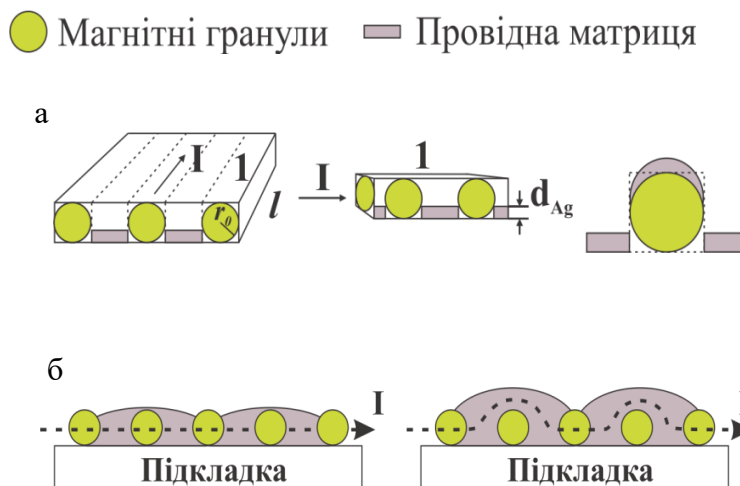


Рисунок 3.17 – Схематичне предствлене модифікованої моделі питомого опору наночастинок в провідній металевій матриці: а – геометричні параметри моделі; б – повняння протікання електричного струму в залежності від товщини провідної матриці

наночастинками у провідній матриці срібла; r_0 – радіус наночастинок; a – ширина зразка; l – відстань між вимірювальними контактами; n_f^l – середнє число фрагментів проміжної матриці; $\Delta l_{\text{НЧ}}$ – відстань між наночастинками; $d_{\text{нш}}$ – товщина надлишкового шару ПМ; $\rho_{\text{ПМ}}$ – питомий опір провідної матриці; ρ_{Γ} – питомий опір наночастинки; $\rho_{\text{НШ}}$ – питомий опір шару надлишкового матеріалу провідної матриці сформованого після її термообробки.

Розрахунки за цим виразом показали, що електрофізичні властивості наноструктур із магнітних наночастинок у провідній матриці повністю залежить від її товщини провідної матриці та в меншій мірі від параметрів термообробки. Найбільш близькі розрахункові значення питомого опору до експериментальних були отримані для системи з товщиною провідної матриці 15 нм і становило відповідно до термообробки $\rho_{\text{роз,}} = 5,6 \cdot 10^{-6}$ Ом·м та $\rho_{\text{експ,}} = 4,0 \cdot 10^{-6} \pm 3,2 \cdot 10^{-10}$ Ом·м і після термообробки до 700 К – $\rho_{\text{роз,}} = 2,9 \cdot 10^{-5}$ Ом·м та $\rho_{\text{експ,}} = 2,9 \cdot 10^{-5} \pm 2,3 \cdot 10^{-9}$ Ом·м. При збільшенні товщини провідної матриці різниця між експериментальними та розрахунковими значеннями зростає.

3.3 Уточнення методики формування металевих наноструктур спіно-класного типу з термостабільною структурою

Аналіз експериментальних результатів було здійснено на основі порівняльної характеристики утворення твердих розчинів в різних плівкових системах. Такий аналіз дає встановити факт утворення твердого розчину в різних матеріалах і при різних температурах. А саме для плівкових систем був проведений аналіз в свіжосконденсованому стані ($T=300$ К) та при відпалюванні ($T=700$ К).

При аналізі електрофізичних властивостей та структурно-фазового стану плівкових систем на основі Au і Fe було показано, що до відпалювання в них на електронограмах фіксується дві групи кілець, перша із яких – відносяться до ОЦК-Fe, а інша група ліній відповідає ГЦК-Au. Після відпалювання плівки до 700 К в системі відбувається певні фазові зміни. На електронограмі також спостерігаються дві групи кілець. Першу групу можна віднести до ОЦК-Fe, а ось інша – інтерпретується нами як твердий розчин (т.р.) (Fe, Au) на основі ГЦК-решітки Au.

При аналізі електрофізичних властивостей та структурно-фазового стану плівкових систем на основі Co і Cu було встановлено, що до відпалювання плівок, на електронограмі фіксуються дві групи кілець, перша із яких відносяться до ГЦП-Co. Інша група ліній інтерпретується як твердий розчин т.р. Cu (Co) на основі ГЦК-решітки Cu. Тому можна прийти до висновку, що в невідпаленому стані в плівковій системі Cu/Co утворюється твердий розчин заміщення атомів Co в матрицю ГЦК-Cu. Після відпалювання плівок до 700 К в системі Cu/Co істотних змін не відбувається. Лише можна сказати, що т.р. Cu (Co) має ще менший параметр решітки внаслідок подальшого перемішування шарів в процесі протікання термостимульованої дифузії.

Для систем на основі Co і Ru стало очевидним, що шари зберігають свою індивідуальність як до так і після відпалювання до температур 700-900 К. Хоча для них характерним є залежність фізичних властивостей та їх термостабільність від товщини шару Ru.

З проведеного аналізу можна зробити висновок про вплив температури на факт утворення твердого розчину в плівкових системах. В плівках з Au і Fe та NiFe і Cu можливість утворення твердого розчину починається після відпалювання, що не є характерним для плівкових систем на основі Co і Cu, в яких твердий розчин можна помітити в ранніх стадіях конденсації плівки. Це можна пояснити тим що решітки Fe та Au та NiFe і Cu менш сприятливіші до утворення твердого розчину, тобто вони щільніші ніж ґратки Co та Cu.

Наведені особливості порядку утворення т.р. повністю визначають термостабільність розглянутих наностистем, у тому числі структур спіно-класанного типу з різною комбінацією робочих шарів. Термостабілізацію таких структур цілком можна забезпечити використавши шари Ru, мультишари та шари на основі впорядкованих масивів наночастинок.

ВИСНОВКИ

В роботі за результатами дослідження температурної стабільності кристалічної структури та фазового складу багат шарових плівкових систем на основі Fe і Au, Co і Cu, NiFe і Cu, Co і Ru та наночастинок і нанокластерів показана можливість їх застосування як функціональних шарів металевих спін-кляпанних структур із стабільними властивостями в діапазоні температур 300 ÷ 900 К. Крім того були отримані нові наукові результати:

1. Отримані нові експериментальні дані стосовно електрофізичних властивостей (питомого опору та термічного коефіцієнту опору) багат шарових плівкових систем спін-кляпанного типу та їх фрагментів на основі Fe, Co, NiFe та Au, Cu, Ru і магнітних наночастинок CoFe_2O_4 , NiFe_2O_4 , MoS_2 та Fe_2O_4 .
2. Встановлені концентраційні та розмірні залежності питомого опору та термічного коефіцієнту опору за результатами експерименту, встановленою кореляцією з їх структурно-фазовим станом та особливостями протікання дифузії та їх моделювання за відомими теоретичними моделями для систем з різним ступенем збереження інтерфейсу між окремими шарами Co і Cu (або Au) та Co і Ru (або Ag); показано, що для забезпечення термічної стабільності в інтервалі температур 300÷900 К ефективним є використання товщин 10÷30 нм для шарів Co та більше 30 нм для шарів Ru.
3. Показана можливість створення ефективних функціональних шарів спін-кляпанних структур із стабільними робочими характеристиками в інтервалі робочих температур 300÷900 К на основі впорядкованих масивів магнітних наночастинок CoFe_2O_4 , NiFe_2O_4 , MoS_2 та Fe_2O_4 з використанням методики їх впровадження в провідну металеву матрицю з послідуною термообробкою; за результатами апробації модифікованої теоретичної моделі було показано, що вирішальний вплив на величину питомого опору зразків відіграє товщина провідної матриці.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Лучинин В. Гибкая электроника / В. Лучинин // Наноиндустрия. – 2013. – № 8 (46). – С. 1-13.
2. Substrates for flexible electronics: A practical investigation on the electrical, film flexibility, optical, temperature, and solvent resistance properties / V. Zardetto, T. M. Brown, A. Reale et al. // Polymer Sci. Polymer Phys. – 2011. – V. 49. – P. 638-648.
3. Лукашин А. В. Физические методы синтеза наноматериалов / А. В. Лукашин, А. А. Елисеев. – Москва: Наука, 2007. – 232 с.
4. Khan S. Technologies for Printing Sensors and Electronics Over Large Flexible Substrates / S. Khan, L. Lorenzelli, R. S. Dahiya // Sensors Journal. – 2015. – V. 15, № 6. – P. 3164–3185.
5. Fabrication of flexible copper-based electronics with high-resolution and high-conductivity on paper via inkjet printing / T. Zhang, X. Wang, T. Li et al. // J. Mater. Chem. – 2014. – V. 2. – P. 286-294.
6. High-performance magnetic sensorics for printable and flexible electronics / D. Karnaushenko, D. Makarov, M. Stöber et al. // Adv. Mater. – 2015. – V. 27, № 5. – P. 880-885.
7. Афанасьев П. Научно-технологический комплекс экспресс- прототипирования изделий гибкой электроники и фотоники / П. Афанасьев, О. Бохов, В. Лучинин // Наноиндустрия. – 2013. – № 6 (44). – С. 94-104.
8. Принципы создания гибридных миниатюрных приборов для выращивания колоний микробных клеток на основе пористого анодного оксида алюминия // Т.М. Зими́на, А.В. Соловьёв, В.В. Лучинин и др. // Нано- и микросистемная техника. – 2013. – № 3. – С. 19-34.
9. Bottom-Contact Pentacene Thin-Film Transistors on Silicon Nitride / J. Stott, A. Kumatani, T. Minari et al. // Electron Device Letters. – 2011. – V. 32. – P. 1305-1307.
10. Jin Z. Bio-friction / Z. Jin, D. Dowson // Friction. – 2013. – V. 1, № 2. – P. 100–113.

11. Aprotic and aqueous Li-O₂ batteries / J. Lu, L. Li, J. B. Park et al. // *Chem. Rev.* – V. 114. – P. 5611–5640.
12. Низкотемпературные материалы и тонкопленочные транзисторы для электроники на гибких подложках / А. Сазонов, М. Мейтин, Д. Стряхилев и др. // *Физика и техника полупроводников.* – 2006. – № 3. – С. 34-51.
13. [<https://www.intel.com/content/www/us/en/products/processors.html>] – Processors. – Дата доступа 13.12.2018.
14. Sun Y. Inorganic semiconductors for flexible electronics / Y. Sun, J. A. Rogers // *Adv. Mater.* – 2007. – V. 19. – P. 1897-1916.
15. Flexible Electronics / Y. Kishi, H. Inoue, K. Murata et al. // *Sol. Energy Mater.* – 2009. – №. 23. – P. 312-318.
16. [<http://docplayer.ru/Gibkie-pechatnye-platy>]. – Гибкие печатные платы. – Дата доступа 13.12.2018.
17. [http://ko.com.ua/prozrachnaya_jelektronika_33889]. – Прозрачная электроника. – Дата доступа 13.12.2018.
18. Zhan Y. Materials capability and device performance in flexible electronics for the Internet of Things / Y. Zhan, Y. Mei, L. Zheng // *J. Mater. Chem. C.* – 2014. – V. 2. – P. 1220–1232.
19. Hu A. Low temperature sintering of Ag nanoparticles for flexible electronics packaging / A. Hu, J. Y. Guo, H. Alarifi et al // *Applied Physics Letters.* – 2010. – V. 97. – P. 153117 (4).
20. Низкотемпературные материалы и тонкопленочные транзисторы для электроники на гибких подложках / А. Сазонов, М. Мейтин, Д. Стряхилев и др. // *Физика и техника полупроводников.* – 2006. – № 3. – С. 34-51.
21. Guenther T. Bionic vision: system architectures: a review / T. Guenther, N. H. Lovell, G. J. Suaning // *Expert Rev Med Devices.* – 2012. – V. 10. – P. 33–48.
22. Superconducting spin-valve effect and triplet superconductivity in CoO_x/Fe₁/Cu/Fe₂/Cu/Pb multilayer / P. V. Leksin, N. N. Garif'yanov, A. A. Kamashev et al. // *Physical Review B.* – 2015. – V. 91. – P. 214508(4).

23. Co/Cu/Co Pseudo Spin-Valve System Prepared by Magnetron Sputtering with Different Argon Pressure. / A. V. Svalov, A. N. Sorokin, P. A. Savin et al. // *Key Engineering Materials*. – 2015. – V. 644. – P. 211-214.
24. Svalov A. V. Thermo-sensitive spin valve based on layered artificial ferrimagnet / A. V. Svalov, G. V. Kurlyandskaya, V. O. Vas'kovskiy // *Applied Physics Letters* – 2016. – V. 108. – P. 063504(5).
25. Luby S. Tailoring of multilayer interfaces by pulsed laser irradiation / S. Luby, E. Majkova // *Applied Surface Science*. – 2005. – V. 248. – P. 316-322.
26. Butler W. H. First-principles calculations of electrical conductivity and giant magnetoresistance of Co/Cu/Co spin valves / W. H. Butler, X.-G. Zhang, D. M. C. Nicholson // *Physical Review A* – 1995. – V. 52, № 18. – P. 13399- 13410.
27. Theoretical evaluation of magnetotransport properties in Co/Cu/Co-based spin valves / C. Blaas, L. Szunyogh, P. Weinberger et al. // *Physical Review B*. – 2002. – V.65. – P.134427-1-134427-8.
28. Чешко І. В. Магнітооптичні та магніторезистивні властивості плівкових функціональних елементів на основі Co і Cu та Au / І. В. Чешко, С. І. Проценко, П. Шифалович // *Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка*. – 2008. – № 2 – С. 3-7.
29. Cheshko I. Magneto-optical and magnetoresistive properties of Co/Cu(Au)-based spin-valve structures / I. Cheshko, S. Protsenko, L. Odnodvoretz // *Technical Physics Letters*. – 2009. – V.35, №10. – P. 903 – 905.
30. Magnetic and magnetoresistance studies of nanometric electrodeposited Co films and Co/Cu layered structures: Influence of magnetic layer thickness / S. Zsuzsa, L. Péter, L. F. Kiss et al. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2016. – V. 421. – P. 194-206.
31. Matthesab P. Pseudo spin valve thin films with crossed magnetic anisotropies / P. Matthesab, M. Albrecht // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2015. – V. 233. – P. 275-278.

32. Формування приладових наноструктур спін-клапанного типу на основі Co і Cu / І. В. Чешко, М. В. Костенко, В. І. Гребинаха та ін. // Журнал нано-та електронної фізики. – 2016. – Т. 8, № 3. – С. 03041(4).
33. Zhang F. Magnetoresistance and Anomalous Hall Effect with Pt Spacer Thickness in the Spin-Valve Co/Pt/[Co/Pt]₂Multilayers / F. Zhang, Z. Liu, F. Wen // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – 2017. – V. 30, No. 2. – P. 533–538.
34. Magnetization reversal signatures in the magnetoresistance of magnetic multilayers / P. Perna, C. Rodrigo, M. Muñoz et al. // Physical Review B – 2012. – V. 86. – P. 024421(6).
35. Nitric dioxide and acetone sensors based on iron oxide nanoparticles / J. Ivanco, S. Luby, M. Jergel et al. // Sensor Lett. – 2013. – V. 11. – P. 2322.
36. Lane J. M. D. Assembly of responsive-shape coated nanoparticles at water surfaces / J. M. D. Lane, G. S. Grest, S. Cheng // Nanoscale. – 2014. – V. 6. – P. 5132.
37. Проценко І. Ю. Технологія одержання і застосування плівкових матеріалів: Навчальний посібник/ І. Ю. Проценко, Н. І. Шумакова. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 198 с.
38. Структурно-фазовий стан, стабільність інтерфейсів та електрофізичні властивості двошарових плівкових систем / С.І. Проценко, І.В. Чешко, Д. В. Великодний та ін. // Успехи фізики металлов. – 2007. – Т.8, №4 – С.247-278.
39. Protsenko I. Solid solution formation in Cu/Co ultrathin film systems / I. Protsenko, I. Cheshko, Ja. Javorsky // Functional Materials. – 2006. – V. 13, № 2. – P. 219-222.
40. Чешко І.В. Утворення твердих розчинів в плівкових системах на основі Co, Cu, Ag та Au / І. В. Чешко, І. Ю. Проценко // Металлофізика, новейшие технологии. – 2009. – Т. 31, № 7. – С. 921-923.
41. Magnetoresistive and Magneto-optical Properties Nanosize Film Systems Based on Fe and Au / Yu. M. Shabelnyk, I. M. Pazukha, S. I. Protsenko et al. // Proceedings of the International Conference “NAP-2013” – 2013. – V. 2, № 1. – P. 01NTF39(4).
42. Горелик С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. Приложения / С. С. Горелик, Л. Н. Расторгуев, Ю. А. Скаков. – Москва: Металлургия, 1970. – 107 с.

43. Дехтярук Л.В. Транспортні розмірні ефекти в двошарових полікристалічних плівках / Л.В. Дехтярук, І.Ю. Проценко, А.М. Черноус //Успехи физ. мет. – 2007. – Т.8, №1. – С. 21-28.
44. Проценко С.І. Феноменологічна модель електрофізичних властивостей гранульованих плівкових сплавів / С.І. Проценко, Л.В. Однодворець, І.В. Чешко // Вісник СумДУ. Серія «Фізика, математика, механіка». – 2008. – №1. – С.22 – 27.