

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки,
загальної та прикладної фізики

Кваліфікаційна робота магістра

**ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СИСТЕМИ
ФЕРОМАГНІТНИХ НАНОЧАСТИНОК У
ПАРАМАГНІТНІЙ МАТРИЦІ**

Студент гр. ЕП.м - 92



Я.В.Біттер

Науковий керівник,
к.ф.-м.н., доцент



Н.І.Шумакова

Завідувачкафедри ЕЗПФ
д-р фіз.-мат. наук, професор



І. Ю. Проценко

Суми 2020

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 5 |
| РОЗДІЛ 1 ВЛАСТИВОСТІ ТА МЕТОДИ ОТРИМАННЯ МАГНІТНИХ МЕТАЛЕВИХ НАНОЧАСТИНОК | 6 |
| 1.1. Історія виникнення магнітних наночастинок | 6 |
| 1.2. Методи отримання і синтезу наночастинок.. | 7 |
| 1.2.1. Отримання наночастинок з перенасичених парів металів..... | 9 |
| 1.2.2. Отримання наночастинок розпиленням парів металу..... | 10 |
| 1.2.3. Методи нанодиспергування компактного матеріалу | 11 |
| 1.3. Властивості наночастинок..... | 13 |
| 1.4. Основні характеристики наночастинок та методи їх дослідження | 14 |
| РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ | 16 |
| 2.1. Опис та принцип роботи установки ВУП-5М | 16 |
| 2.2. Структура та принципи роботи електронно-променевої гармати | 17 |
| 2.3. Структура та принцип роботи кварцового резонатора | 20 |
| 2.4. Опис та принцип роботи ПЕМ 125К | 23 |
| РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ | 25 |
| 3.1. Електронографічні дослідження | 25 |
| 3.2. Електрофізичні дослідження..... | 29 |
| ВИСНОВКИ..... | 34 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ | 35 |

ВСТУП

У 1960 році Річард Фейнман зробив дуже цікаву заяву про наночастинки та про те, як мініатюризація призведе до нових біологічних та технічних змін у світі. Він переконливо сказав, що одного разу ми можемо «проковтнути хірурга» [1]. Зрозуміло, що він мав на увазі наноробота хірурга, тобто наночастинку, яка лікує всі хвороби зсередини.

Нанотехнології мають велику потенційну перевагу майже у всіх сферах розвитку, які є важливими для людини. Наноматеріали мають потенціал для покращення навколишнього середовища шляхом розробки нових рішень екологічних проблем. Магнітні наночастинки мають унікальні нанорозмірні властивості, і їх використання в різних магнітних системах представляє значний інтерес [2].

Темою даної роботи являється проаналізувати літературні данні повз'язані за наночастинками та методами їх отримання. Практичною частиною роботи є отримання зразків для системи $\text{Ag}/\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{підкладка}$, дослідження мікроснімків та дифракційних картин, розрахунок параметрів решітки. Також потрібно побудувати та проаналізувати графіки температурних залежностей питомого опору.

На основі нанотехнологій вчені розробили такі типи наноматеріалів, як консолідований НМ, нанопровідники, нанобіоматеріали, нанополімери, фулерени та нанотрубки, наночастинки та нанопорошки, нанопористі матеріали, наноструктуровані рідини (колоїди, міцели, міцели, міцели).

Здатність розумно проектувати, маніпулювати та управляти нанооб'єктами відкриває двері в інший світ - таємничий і потужний, світ важких та надлегких матеріалів, мікроскопічних ("наноскопічних") електронних пристроїв та роботів, медицини майбутнього і багато іншого.

Наночастинки (НЧ) - це найдрібніші частинки, розмір яких дозволяє виявлятися квантовим ефектам. Наночастинки або маніпуляції з ними складають основу нанотехнологій [3].

РОЗДІЛ 1

ВЛАСТИВОСТІ ТА МЕТОДИ ОТРИМАННЯ МАГНІТНИХ МЕТАЛЕВИХ НАНОЧАСТИНОК

1.1. Історія виникнення магнітних наночастинок

Магнітні матеріали і явище магнетизму давно відомі людству, і добре відомо, яку роль відіграють магнітні явища в житті сучасної людини. Внаслідок інтенсивного розвитку науки протягом останніх кількох десятиліть та швидкого поширення терміна "нано", магнетизм нанорозмірних об'єктів, можливо, став "найгарячішою" поряд з фулеренами та вуглецевими нанотрубками, темою в наукових журналах. Наночастинки магнітного матеріалу ретельно контролювались з першої половини 1990-х. Дослідники з різних галузей неорганічної та органометалевої хімії у всьому світі стикалися з тим, що зараз відоме як "наночастинка" або "наноматеріал", а в той час - кожен називав так, як йому було зручно за родом досліджень - магнітними рідинами, кластерами або активними порошками металів.

За останні три десятиліття ряд нових слів із префіксом "нано" швидко "проникли" в науковий словниковий запас: наноструктура, нанотехнології, наноматеріали, нанокластери, нанохімія, нанорозмірний матеріал, наноколоїди, нанореактори та ін. присвячені опублікованим, монографіям із префіксом "Нано" в назві, а також профільним інститутам, кафедрам та окремим лабораторіям "Нано", проведено численні конференції. У більшості випадків давно відомі предмети чи явища отримують нові назви. Але є об'єкти, яких 30 років тому не було в арсеналі дослідника і без яких вже не можна уявити сучасний розвиток науки сьогодні - це наночастинки у всьому їх різноманітті, починаючи від фулеренів, нанотрубок, нанопроводів і закінчуючи квантовими точками і квантові коралами [3].

1.2. Методи отримання і синтезу наночастинок

Наночастинки металів та утворювані ними нанокластери є одними з перших об'єктів нанотехнології, для отримання яких традиційно використовують фізичні та хімічні методи, такі як:

1. Об'єднання молекул «знизу-доверху»(1 група):
 - 1.1. фізичні методи:
 - 1.1.1. термічне випаровування;
 - 1.1.2. конденсація;
 - 1.2. хімічні методи:
 - 1.2.1. відновлення з розчинів;
 - 1.2.2. відновлення в мікроемульсіях.
2. Диспергування і конденсація «зверху-донизу»(2 група):
 - 2.1. фізичні методи:
 - 2.1.1. механосинтез;
 - 2.1.2. електричний вибух;
 - 2.1.3. ерозійно-вибухові.
3. Комбінація методів 1 і 2 груп(3 група):
 - 3.1. фізичні методи:
 - 3.1.1. лазерна;
 - 3.1.2. електро-імпульсна;
 - 3.1.3. плазменна;
 - 3.1.4. електродугова;
 - 3.1.5. електрозвукова абляція.

Ми розглянемо методи досліджень наночастинок, так як: отримання наночастинок з перенасичених парів металів, отримання наночастинок розпиленням парів металу, методи нанодиспергування компактного матеріалу [4,5].

Для більш кращого розуміння, класифікація наведена на рис.1.2.1.

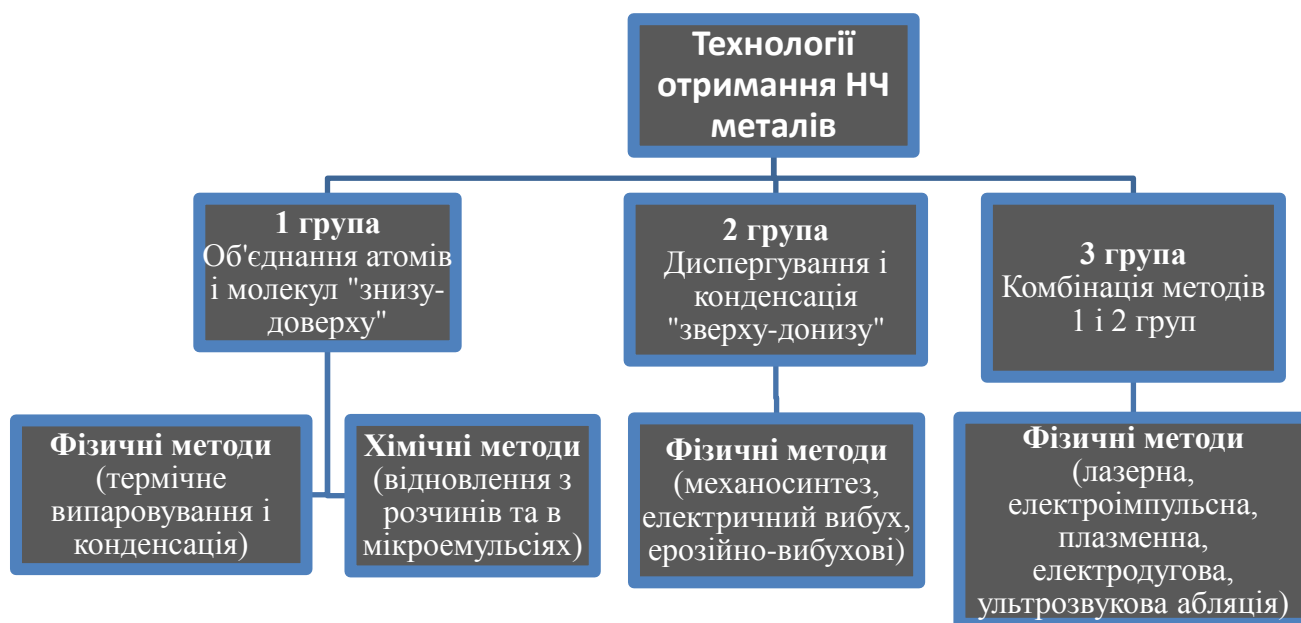


Рис.1.2.1 - Класифікація технологій отримання наночастинок металів.

Адаптовано з роботи[2]

Таблиця 1

Приклади хімічних реакцій с наночастинками металів, як каталізаторами [5,6]

| Наночастинки | Хімічні реакції |
|--------------|---|
| Au | Реакція окислення оксида вуглецю (II), вуглеводнів, дегідрування спиртів, хлорування хлороводнем. |
| Ag | Окислювально-відновні реакції ароматичних и нітроз'єднань, селективне окислення алкенів. |
| Pt | Відновлення NO, де циклізація вуглеводнів, конверсія CO в метан. |
| Pd | Гідрування ненасичених спиртів, гідрування алкенів, |
| Cu | Синтез водяного газу, дегідрування вуглеводнів, окислення алканів. |
| Fe, Co, Ni | Синтез вуглеводних нанотрубок. |

В даний час розроблені методи отримання наноматеріалів як у вигляді нанопорошків, так і у вигляді плівок або включень різні матриці. При цьому в якості нанофази можуть виступати феромагнетики, метали, напівпровідники, діелектрики і т.д. Найбільш важливими факторами, які необхідно враховувати в ході синтезу наночастинок, прийнято вважати такі [4]:

- нерівновага систем. Практично всі наносистеми термодинамічно нестійкі, і їх отримують в умовах, далеких від рівноважних, що дозволяє досягти спонтанного зародкоутворення і уникнути зростання і агрегації сформувалися наночастинок [5];

- висока хімічна однорідність. Однорідність наноматеріалу забезпечується, якщо в процесі синтезу не відбувається поділу компонентів як в межах однією наночастинок, так і між частинками;

- монодисперсність. Так як властивості наночастинок надзвичайно сильно залежать від їх розміру, для отримання матеріалів з хорошими функціональними характеристиками необхідно синтезувати частинки з досить вузьким розподілом за розмірами [6].

Однак виконання цих умов при синтезі наночастинок не завжди є обов'язковим. Наприклад, розчини поверхнево активних речовин (міцелярні структури, плівки Ленгмюра – Блоджетт, рідкокристалічні фази), є термодинамічно стабільними і тим не менш є основою для формування різноманітних наноструктур.

1.2.1. Отримання наночастинок з перенасичених парів металів

Метод заснований на класичній теорії нуклеації, згідно з якою передбачається, що утворені кластери нової фази (наночастинок) описуються моделлю сферичної краплі рідини. Існує кілька варіантів установок для отримання наночастинок (кластерів), які відрізняються способом випаровування металу. це може бути лазерне випаровування, термічне випаровування, дуговий розряд, плазма, сонячна енергія; Для кожного із

перерахованих методів існують варіанти систем, які відрізняються технічними рішеннями того чи іншого вузла. Крім того, для тих самих цілей можна використовувати лазерний фотоліз летючих металовмісних сполук [7].

Теплове випаровування. У класичному варіанті процесу метал або сплав нагрівають вольфрамовим човником у потоці аргону або гелію; Внаслідок міжатомних зіткнень з атомами інертного газу атоми випареного металу втрачають свою кінетичну енергію, агрегуються до наночастинок і конденсуються у вигляді надтонкого порошку на охолоджуючій підкладці. Метод дозволяє контролювати розмір частинок в діапазоні від 3 до 100 нм, змінюючи швидкість випаровування, тиск газу та його природу, температуру основи, що змінюється. Як правило, перед тим, як відкрити установку та видалити зразок, наночастинок пасивуються, пропускаючи через них інертний газ, збагачений киснем, протягом декількох хвилин [3,8].

1.2.2. Отримання наночастинок розпиленням парів металу

Метод досить старий і добре розроблений як у практичному, так і в теоретичному плані. На відміну від попереднього методу, при термічному або лазерному випаровуванні цей метод дозволяє отримати граміву кількість порошків, що складаються з наночастинок; можна диспергувати метали, сплави та оксиди [4].

Метод синтезу наночастинок з парів металів заснований на класичній теорії нуклеації, в якій ембріональні кластери нової фази описують модель сферичної краплі рідини. Для отримання наночастинок використовують різні методи випаровування металів:

- лазерне випаровування;
- термічне випаровування;
- дуговий розряд;
- випаровування в плазмі;
- випаровування під дією сонячної енергії.

Ізольовані наночастинки зазвичай отримують випаровуванням металу, сплаву або напівпровідника при контрольованій температурі в атмосфері інертного газу при низькому тиску з подальшою конденсацією пари поблизу або на холодній поверхні. Це найпростіший спосіб отримання нанокристалічних порошків. На відміну від випаровування у вакуумі, атоми речовини, що випаровуються в розрідженій інертній атмосфері, швидше втрачають кінетичну енергію через зіткнення з атомами газу і утворюють сегрегації (кластери).

Системи, що використовують принцип конденсації-випаровування, відрізняються способом введення випаровуваного матеріалу, способом подачі випарного матеріалу та способом забезпечення енергією для випаровування. робоче середовищем; організацією процесу конденсації; системою збору отриманого порошку.

Метал може випаровуватися з тигля, або метал потрапляє в зону нагрівання та випаровування у вигляді дроту, всипаючого порошку металу або в потоці рідини. Також може застосовуватися обприскування металу пучком іонів аргону. Подача енергії може відбуватися за допомогою прямого нагрівання, передачі електричного струму по дроту, електродугового розряду в плазмі, індукційного нагрівання через струми високої та середньої частоти, лазерного випромінювання та нагрівання електронним пучком. Випаровування та конденсація можуть відбуватися у вакуумі, в нерухомому інертному газі, в потоці газу, в тому числі в плазмовому потоці. [10].

1.2.3. Методи нанодиспергування компактного матеріалу

Механохімічна дисперсія - метод диспергування на млинах різного типу виглядає дуже привабливо для отримання дисперсних систем. Однак механічне подрібнення твердих речовин обмежене, що в деяких випадках перешкоджає стабільному досягненню наномасштабного подрібнення з вузьким розподілом. Крім того, великі енергетичні навантаження на подрібнючий матеріал призводять до інтенсивної взаємодії наночастинок, що утворюються з дисперсійним середовищем. Деякі приклади успішного використання

механохімічної дисперсії для отримання магнітних наночастинок наведені нижче.

Електрична ерозія - метод дозволяє нанодиспергувати метали і сплави. Процес відбувається в діелектричній рідині, продукти перетворення якої покривають утворені наночастинок. Метод не дозволяє отримати частинки з вузьким розподілом за розмірами: залежно від умов процесу, типу металу та дисперсійного середовища розподіл часток коливається в діапазоні від 2,5 до 20 нм, але є окремі частинки до 100 нм. Вважається, що дрібні частинки утворюються шляхом загартування парів металів, а великі частки утворюються з розплавлених крапель. Процес можна успішно використовувати для отримання наночастинок складних постійних магнітів. Однак у цьому процесі відбувається значна взаємодія наночастинок, що утворюються з дисперсійним середовищем; Типовими прикладами є коксування продукту (при використанні органічних розчинників як діелектрика) або утворення сульфідів (коли діелектриком є розплавлена сірка).

Електрохімічне утворення - метод отримання наночастинок виглядає дуже привабливо для отримання значних кількостей малих (1-2 нм) наночастинок з вузьким розподілом за розмірами. У стандартній електрохімічній камері, що містить розчин галоїду тетраалкіламмонію в спирті, при пропусканні струму відбувається розчинення кобальтового анода і утворення наночастинок в приелектродному шарі катода (скловуглець). У ряді прикладів вчені спостерігали за впливом параметрів електролізу на магнітні властивості утворених наночастинок. Середній розмір наночастинок обернено пропорційний щільності струму. Колоїдна суспензія наночастинок, утворена електролізом, стабільна протягом декількох місяців в атмосфері аргону під час зберігання. Випаровування розчинника призводить до утворення кристалітів, з яких легко знову приготувати колоїдну суспензію. Електрохімічним методом були отримані також наночастинок (3-8 нм) Fe_2O_3 , частинки стабільні в органічних розчинниках за рахунок адсорбції катіонних сурфактантів.

1.3 Властивості наночастинок

Найбільші зміни властивостей наноматеріалів та наночастинок відбуваються в діапазоні розмірів кристалітів порядку 10-100 нм. З наночастинками частка атомів у тонкому поверхневому шарі (~ 1 нм) значно зростає порівняно з мікрочастинками. Наприклад, виявляється, що наночастинки деяких матеріалів мають дуже хороші каталітичні та адсорбційні властивості. Інші матеріали мають дивовижні оптичні властивості, наприклад, надтонкі плівки, виготовлені з органічних матеріалів, використовуються для виготовлення сонячних панелей. Такі батареї мають відносно низький квантовий ККД, але дешевші і можуть бути механічно гнучкими. Можна досягти взаємодії штучних наночастинок з природними об'єктами нанорозмірів - білками, нуклеїновими кислотами та іншими. Ретельно очищені наночастинки можуть вирівнятися в певних структурах. Ця структура містить суворо впорядковані наночастинки і часто виявляє незвичні властивості.

Наночастинки - це величезні псевдомолекули зі складною внутрішньою будовою, у багатьох випадках ядром і оболонкою, часто зовнішніми функціональними групами тощо. Їх унікальні магнітні властивості проявляються при розмірах від 2-30 нм. Обмеження розміру засноване на тому, що наночастинки, які, як і всі частинки, є частиною цілого, сильно відхиляються від гірських порід цілого, коли досягають певних розмірів; Оцінки показують, що зазвичай є суттєві відмінності для розмірів частинок нижче ≈ 30 нм. Наночастинки жовтого золота та сріблянісного кремнію червоніють. Наночастинки золота плавляться при значно нижчих температурах (~ 300 ° С для частинок 2,5 нм), ніж тверді золоті пластини (1064 ° С). Наночастинки, в яких проявляється відповідне квантування, також називаються квантовими точками. Поглинання сонячного випромінювання набагато вище у матеріалах, що складаються з наночастинок, ніж у тонких плівках тієї ж речовини. Як і в сонячній фотовольтаїці, і в термічних застосуваннях сонячної енергії, можна контролювати розмір, форму і склад наночастинок для контролю

поглинання сонячного світла. У випадку наночастинок частка атомів у тонкому поверхневому шарі (~ 1 нм) помітно зростає порівняно з мікрочастинками [14].

Властивості наночастинок срібла воістину унікальні. Вони мають феноменальну бактерицидну та противірусну активність. Наночастинки срібла не тільки мають дезінфікуючі властивості, але також мають високу електропровідність, що дозволяє робити широкий спектр провідних клеїв. Такий клей можна використовувати, наприклад, у мікроелектроніці для з'єднання дрібних електронних деталей [13, 14].

1.4. Основні характеристики наночастинок та методи їх дослідження

Останні досягнення нанотехнологій стали можливими завдяки тому, що в руках дослідників з'явився ряд аналітичних методів для декодування тонкої структури наночастинок, місцевий хімічний аналіз та комп'ютерні програми для просторової трансляції спостережуваних зображень.

Спектроскопічні методи досліджень, останні досягнення надшвидких фізичних та хімічних процесів, призвели до розробки фемтосекундних спектрометрів. Основними завданнями досліджень, що проводяться цими методами, є механізми фізико-хімічних процесів, що протікають у фемто-часовій шкалі (субпікосекундах), когерентні внутрішньомолекулярні процеси та реакції, фемтосекундна нанофотоніка та фемтохімія окремих молекул. Поєднання фемтосекундної спектхронографії та атомно-силової мікроскопії дозволяє нам розшифрувати структуру наночастинок та структурні зміни під час агрегації (наприклад, під час переходів золь-гель). Фемтосекундна спектроскопія дозволяє досліджувати фазові зміни у разі нерівномірного нагрівання електронних, спінових та фонових підсистем на поверхні наноконструкцій.

Останнім часом дослідження в галузі наностатусу підтримуються аналітичними методами електронної мікроскопії з високою роздільною здатністю, за допомогою яких можна досліджувати наночастинки розміром 1-1 нм. Електронний мікроскоп високої роздільної здатності HREM TECHNAI 20 з

роздільною здатністю 1,4 А коштує 4 мільйони доларів США. До цих методів відноситься просвічуюча електронна мікроскопія - темного поля, дифракція електронів, мікродифракція. Структуру поверхні на атомному рівні, доменну структуру, поверхневі надбудови та дефекти, атомні та молекулярні переходи, хімічний аналіз тонких плівок, шарові структури досліджень дислокацій та планарні збурення можна дослідити за допомогою скануючої тунельної мікроскопії STM, скануючої електронної мікроскопії поблизу поля SNOM і магнітносилової мікроскопії MFN.

Місцевий розподіл елементів у нанокompозитах можна визначити за допомогою рентгенівських мікроаналізаторів. Хімічний склад та структурні особливості частинок на молекулярному та атомному рівні, фазові переходи та просторовий розподіл компонентів здійснюються за допомогою комбінації електронної мікроскопії та аналізаторів дисперсії енергії.

Дифракційні системи для рентгенівських дифракційних досліджень наночастинок широко використовуються в багатьох лабораторіях. Сюди входять всі сучасні методи монокристалічного та порошкового рентгенографічного дослідження, включаючи дослідження низьких та високих температур, вивчення розподілу електронної густини у молекулах та кристалах та температурні дослідження динаміки кристалів. Провідні лабораторії оснащені автоматичними чотириколірними дифрактометрами з низькотемпературними та високотемпературними з'єднаннями. Автоматичний чотириколірний дифрактометр Bruker - AXS SMART 1000 з детектором координат CCD, низькотемпературною приставкою фірми OXFORD Cryostream та і високотемпературною приставкою LT-1 є однією з найцікавіших інструментальних областей у дослідженнях наностанів.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Наночастинки оксидів металів були отримані методом хімічного синтезу. У ході проведення експерименту були отримані серії зразків системи ($\text{Ag}+\text{NiFe}_2\text{O}_4$) з різною концентрацією НЧ у розчині хлороформу. Наночастинки наносилися на ситалові підкладки методом ультразвукового розпилення в установці УЗДН-А. Провідна матриця срібла отримувалась конденсацією методом електронно-променевої гармати у вакуумі (10^{-4} Па) при $T_{\text{п}} = 300$ К зі швидкістю конденсації $\omega = 0.2-0.4$ нм/с. Для контролю фазового складу та структури зразків із використанням методу просвічуючої електронної мікроскопії. Для цього застосовувалися плівки із вуглецю товщиною 20 нм, які наносилися на спеціальні сітки для дослідження. Товщина окремих шарів контролювалась за допомогою кварцевого резонатора в процесі осадження. Для дослідження термічної стабільності фізичних властивостей зразки відпалювалися у вакуумній камері до температур $T_{\text{в}} = 800$ К. Відпалювання проводилось у вакуумній камері зі швидкістю ≈ 5 К /хв

2.1 Опис та принцип роботи установки ВУП-5М

Для дослідження зміни опору при нагріванні та охолодженні будемо використовувати вакуумну установку ВУП-5М. Нам необхідно зробити 2 цикли нагрівання/охолодження для підкладки (Ag) і для наших наночастинок Fe_2O_3 .

Принцип роботи ВУП-5М: за допомогою форвакуумного наносу (NL) створюємо попередній вакуум ($\sim 10^{-2}$ мм рт. ст.) у дифузійному насосі (ND). Одразу після цього, в дифузійному насосі (ND) вмикається нагрівач який в свою чергу дифузійне масло. Масляні пари підіймаються по паропроводу вгору і, віддзеркалюючись від зонтичного ковпака, вивіряються у вигляді струменя. На рисунку 2.1. наведена схема вакуумної установки ВУП-5М. [23]:

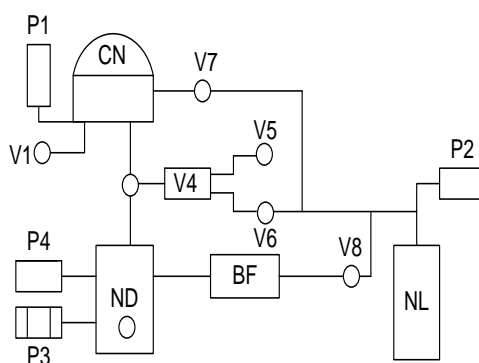


Рис. 2.1. – Схема вакуумної установки ВУП-5М: робочий об'єм (CN); дифузійний насос (ND); форвакуумний насос (NL); форвакуумний балон (BF); клапани комутації вакуумної системи (V1,...,V8); датчики термопарних ПМТ-2 (P1,P2,P4) та іонізаційний датчик ПМІ (P3) [23]

2.2. Структура та принципи роботи електронно-променевої гармати

Шар срібла ми отримували за допомогою електронно-променевої гармати. Під час бомбардування електронним пучком поверхні матеріалу, що випаровується, велика кількість кінетичної енергії електронів перетворюється на тепло, і поверхня нагрівається до такої температури, що стає джерелом пари. У потоці пари розміщують підкладку, на якій конденсується лише частина пари, тобто відбувається напилування.

Деякі труднощі виникають під час нанесення діелектричних матеріалів. Поверхневий заряд на них викликає мікропробої та руйнування суцільності. Потенціал на поверхні таких плівок може зростати до значень, близьких до прискорювальної напруги. З метою нейтралізації або зняття заряду в установках передбачаються розігрів підкладок, застосування пристроїв для видалення заряду [16].

Плівки особливо високої чистоти з низьким вмістом розчинених газів отримують в електронно-променевих установках з додатковим, квазізакритим обсягом в робочій камері. Випаровуваний матеріал і підкладка знаходяться в межах цього об'єму, який обмежений ситами з титану або ніобію. Центральна

частина потоку електронів через отвір обмеженого діаметра вводиться в квазізакритий об'єм, а його периферійна частина нагріває сита. У початковій фазі розпилення плівка конденсується на обертовому технологічному екрані. Сорбція газів зі свіжорозпиленою плівкою та нагрітими ситами хімічно активних металів може знизити об'ємний тиск залишкових газів на 2-3 параметри порівняно з тиском у технологічній камері.

У процесі виготовлення тонких плівок використовують електронно-променеві випарники (ЕПВ) потужністю 2 кВт, 5 кВт, 8–10 кВт і 15 – 20 кВт. До електронної гармати діодного або тріодного типу подається напруга живлення до 10 кВ. У більшості випадків застосовують прямоканальні катоди у вигляді стрічки чи спіралі [16].

На рисунку 2.2.1 зображено електронно-променеву гармату, яку використовують у вакуумній установці ВУП-5М.

На технологічний процес суттєво впливають вторинні електрони та іони пари. Відбиваючись від розплавленої поверхні, вторинні електрони несуть матеріал із собою у вакуумі. Енергія, що виділяється при попаданні на частини камерного обладнання, призводить до збільшення виділення газу.

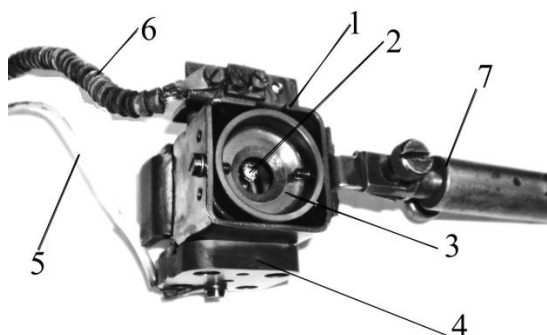


Рис. 2.2.1. – Електронно-променева гармата: 1 – корпус; 2 – вольфрамовий анод із наважкою; 3 – катод; 4 – керамічна ізоляція; 5 – живлення високовольтного джерела; 6 – живлення катода; 7 – до заземлення

Істотним недоліком термічного методу є складність отримання плівок строго стехіометричного складу зі сплавів і складних хімічних сполук, а також низька адгезія, яка значною мірою залежить від стану поверхні підкладки та методів її очищення, від умов нанесення плівки тощо [16,17].

Шар наночастинок ми отримували за допомогою ультразвукового диспергатора УЗДН-А.

Сам по собі він призначений для виготовлення предметів з волокнистих, кристалічних, порошкоподібних та інших речовин при електронно-мікроскопічних дослідженнях в біології, хімії, медицині, мінералогії, металургії та інших галузях науки.

Крім основного призначення, диспергатор можна використовувати для отримання суспензій та емульсій різних речовин, відмивання дрібних деталей від механічного забруднення

Структура та принцип роботи полягають у тому, що електричні коливання, генеровані транзисторним генератором джерела живлення з частотою 22 кГц, перетворюються п'єзострикційним перетворювачем емітера в механічні пружні коливання відповідної частоти, які впливають на дисперговане середовище.

Диспергатор виконаний у вигляді настільної установки, а конструктивно це стійка, в якій розміщена камера контролю потужності та шуму, стінки і дверцята якої посилені звукоізоляційним матеріалом. На вертикальній стінці в камері встановлений штатив для кріплення та переміщення робочого випромінювача.

Концентратор охолоджувача має різьбовий отвір, до якого можна приєднати робочі насадки різної конструкції, які оснащені диспергатором для забезпечення широкого використання [11, 13].

2.3 Структура та принцип роботи кварцового резонатора

Методи визначення товщини плівки дуже різні. Гравіметричні методи (мікрозважування, метод кварцового резонатора) засновані на вимірюванні мас тонкоплівкових покриттів, які потім використовуються для розрахунку товщини. Оптичні методи засновані на інтерференції, оскільки товщина плівки на порядок близька до довжин хвиль оптичного випромінювання

Товщину отриманих шарів ми контролювали за допомогою кварцового резонатора, зображеного на рисунку 2.3.1.. Принцип роботи кварцового резонатора цілком і повністю спирається на п'єзоелектричний ефект. Основою будь-якого кварцового резонатора є платівка з кварцу. Кварц - це одна з різновидів кремнезему SiO_2 . Для виготовлення резонаторів придатний тільки низькотемпературний кварц, який має п'єзоелектричні властивості. У природі такий кварц зустрічається у вигляді кристалів і безформною гальки.



Рис. 2.3.1. – Датчик вимірювання товщини на основі кварцового резонатору

Хімічно кварц дуже стійкий і не розчиняється ні в одній з кислот, за винятком плавикової. Також кварц дуже твердий. На шкалі твердості він займає сьоме місце з десяти.

Для отримання кварцової пластини кристал кварцу видаляють і пластину вирізують під певним кутом. Електромеханічні властивості кварцової пластини залежать від кута, під яким проводиться виріз. Тип зрізу суттєво впливає на температурну стабільність, кількість паразитних резонансів і резонансну частоту.

Далі на обидві сторони кварцової пластини наноситься металізований шар (виготовлений зі срібла, нікелю, золота або платини) і закріплюється в кварцовому тримачі за допомогою жорстких дротяних контактів. Вся ця конструкція знаходиться в герметичному корпусі.

Кварцовий резонатор - це електромеханічна коливальна система. Як відомо, кожна коливальна система має власну резонансну частоту. Кварцовий резонатор також має власну номінальну резонансну частоту. Якщо до кварцової пластини подати змінну напругу, яка збігається з резонансною частотою самої кварцової пластини, відбувається резонанс частот і амплітуда коливань різко зростає [18].

При резонансі електричний опір резонатора зменшується. В результаті виходить еквівалент послідовної коливальної системи. Оскільки втрати енергії в кварцовому резонаторі дуже малі, то він фактично являє собою електричний коливальний контур з дуже великою добротністю. На рисунку 2.3.2. зображена еквівалентна електрична схема кварцового резонатора.

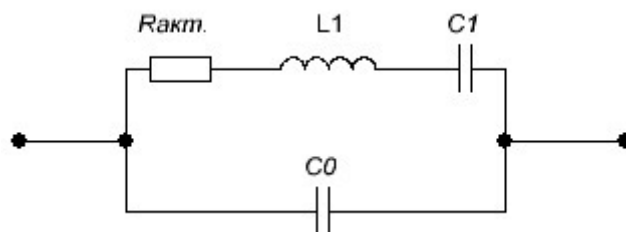


Рис. 2.3.2. – Еквівалентна електрична схема кварцового резонатора [24]

Тут C_0 – це постійна (тобто статична) ємність, яка утворюється за рахунок металевих пластин-електродів і тримача. Послідовно з'єднані індуктивність L_1 , конденсатор C_1 і активний опір $R_{акт.}$ відображають електромеханічні

властивості кварцової пластини. Як бачимо, якщо відкинути ємність монтажу і тримача C_0 , то утворюється послідовний коливальний контур.

Встановлюючи кварцовий резонатор на друкованій платі, переконайтесь, що він не перегрівається. Ця рекомендація, ймовірно, пов'язана з тим, що конструкція кварцового резонатора досить тонка. Перегрів температури може призвести до деформації тримача або електродних пластин. Все це сильно впливає на якість резонатора в ланцюзі.

Також відомо, що при нагріванні кварцу вище 573°C він перетворюється на високотемпературний кварц і втрачає свої п'єзоелектричні властивості. Звичайно, довести температуру кварцу до такої температури за допомогою паяльного обладнання неможливо [3].

Вимірювання товщини осадженої плівки методом контролю кварцу ґрунтується на зміні частоти власних коливань датчика зі збільшенням маси. Датчики в цьому методі управління являють собою монокристал, виготовлений з кварцу з провідним електродом (зазвичай тонким шаром золота), прикріпленим до обох сторін. Товщину конденсованої плівки розраховували відповідно до співвідношення:

$$d = \frac{N_a \cdot D_q}{D_f \cdot f_q^2} \cdot (f_q - f) \quad (2.3)$$

де D_q – густина кварцу;

D_f – густина сконденсованої речовини;

f_q – резонансна частота кварцу до початку конденсації;

f – резонансна частота кварцу після завершення конденсації;

$N_a = d_q \cdot f_q = \text{const} = 1,668 \cdot 10^3 \text{ Гц} \cdot \text{м}$.

На основі наявних даних використання спрощеного кристалічного контролера дає точність близько 3%. Точність управління кристалами може бути збільшена майже на порядок (приблизно до 0,2%), якщо ви підтримуєте стабільну температуру датчика, що є досить складним завданням, або якщо ви використовуєте пристрій з двома датчиками. У пристрої управління кварцом

плівка осідає лише на одному з датчиків, показання з другого є еталонними. Однак для цього пристрою дуже важливо, щоб датчики перебували в однакових температурних умовах [17].

2.4 Опис та принцип роботи ПЕМ 125К

Одним з етапів дослідження був ПЕМ 125К. Стандартний ПЕМ складається з електронної гармати - пристрою для отримання пучка швидких електронів і системи електромагнітних лінз. Електронна гармата і система електромагнітних лінз розміщені у колоні мікроскопа, в якій у процесі роботи мікроскопа підтримується вакуум $10^{-2} - 10^{-6}$ Па [25].

Електронний пучок, джерелом якого є термокатод, формується в електронній пушці і в прискорювачі високої напруги, а потім двічі фокусується першим і другим конденсаторами, створюючи електронну "точку" невеликого розміру (при регулюванні діаметра точки може варіюватися від 1 до 20 мкм). Пройшовши через об'єкт, частина електронів розсіюється і затримується апертурною діафрагмою.

Нерозсіяні електрони проходять через отвір діафрагми і фокусуються об'єктивом в предметній площині проміжної електронної лінзи. Тут створено перше збільшене зображення. Наступні лінзи створюють друге, третє тощо зображення. Остання проекційна лінза створює на катодолюмінесцентному екрані зображення, яке світиться під впливом електронів. Ступінь і тип розсіювання електронів в різних точках об'єкта різні, оскільки товщина, щільність, структура та хімічний склад об'єкта різняться від точки до точки. Відповідно змінюється кількість електронів, які проходять через апертурну діафрагму, а разом із нею і щільність струму на зображенні. Існує контраст амплітуди, який перетворюється на невеликий контраст на екрані. У випадку тонких предметів переважає фазовий контраст, який зумовлений зміною фаз хвиль Де Бройля, які розсіяні в об'єкті і інтерферуючих в площині зображення [17, 18].

Недоліком ПЕМ є те, що матеріали вимагають спеціальної підготовки перед безпосереднім дослідженням, оскільки зразок повинен бути зроблений з такою товщиною, щоб електрони проходили через нього в достатній кількості. Поле зору ПЕМ обмежене, що означає, що не можна оцінити всю поверхню зразка. У нашому випадку для отримання зразків використовували підкладку КСІ з подальшим розчиненням [9, 18].

І на кінець відпал проводили в вакуумній камері при тиску залишкових газів 10^{-3} Па в температурному діапазоні 300-800 К.

На рис. 2.5. зображена схема основних структурних блоків ПЕМ-125К.

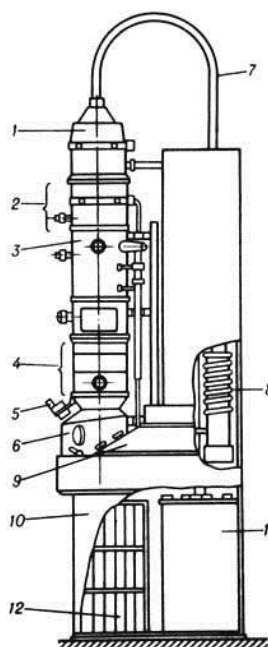


Рис. 2.5. – Схема основних структурних блоків ПЕМ-125К [24]:
 1 – електронна гармата з прискорювачем; 2 – конденсорні лінзи; 3 – об'єктивна лінза; 4 – проекційні лінзи; 5 – світловий мікроскоп, додатково збільшує зображення, спостережуване на екрані; 6 – тубус з оглядовими вікнами, через які можна спостерігати зображення; 7 – високовольтний кабель; 8 – вакуумна система; 9 – пульт управління; 10 – стелаж; 11 – високовольтний пристрій живлення; 12 – джерело живлення лінз

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСЕРИМЕНТУ

3.1 Електронографічні дослідження

Для початку розрахунків міжплощинних відстаней потрібно знайти постійну приладу. Визначаємо ми її з розрахунку електронограми еталону алюмінію(Al) , що зображений на рисунку 3.1 та запишемо в таблицю 3.1.

Міжплощинні відстані еталону нам відомі, визначаємо діаметри 3 кілець по 3 рази, знаходимо 3 середніх арифметичних і розраховуємо постійну приладу множачи міжплощинні відстані на діаметри кілець. Знову отримуємо 3 значення і серед них знаходимо середнє арифметичне. Це і є наша постійна приладу.

Таблиця 3.1

Розрахунок еталону

| Номер диф. кільця | Міжплощинна відстань d, нм | Номер виміру | Діаметр кільця D, у.о. | Стала приладу $2L\lambda$, у.о. $\cdot \text{Å}$ |
|-------------------|----------------------------|--------------|------------------------|---|
| 1 | 0,2349 | 1 | 36,8 | 8,644 |
| | | 2 | 36,9 | |
| | | 3 | 36,7 | |
| | | ср. | 36,8 | |
| 2 | 0,2035 | 1 | 42,9 | 8,669 |
| | | 2 | 42,6 | |
| | | 3 | 42,5 | |
| | | ср. | 42,6 | |
| 3 | 0,1439 | 1 | 60,3 | 8,663 |
| | | 2 | 60,2 | |
| | | 3 | 60,1 | |
| | | ср. | 60,2 | |

Отже стала приладу дорівнює 8,659 Далі ми отримали шар чистих наночастинок NiFe_2O_4 без відпалювання. На рисунку 3.1 зображені еталон алюмінію(Al) та мікрознімок NiFe_2O_4 без відпалювання та електронограма наночастинок NiFe_2O_4 без відпалювання.

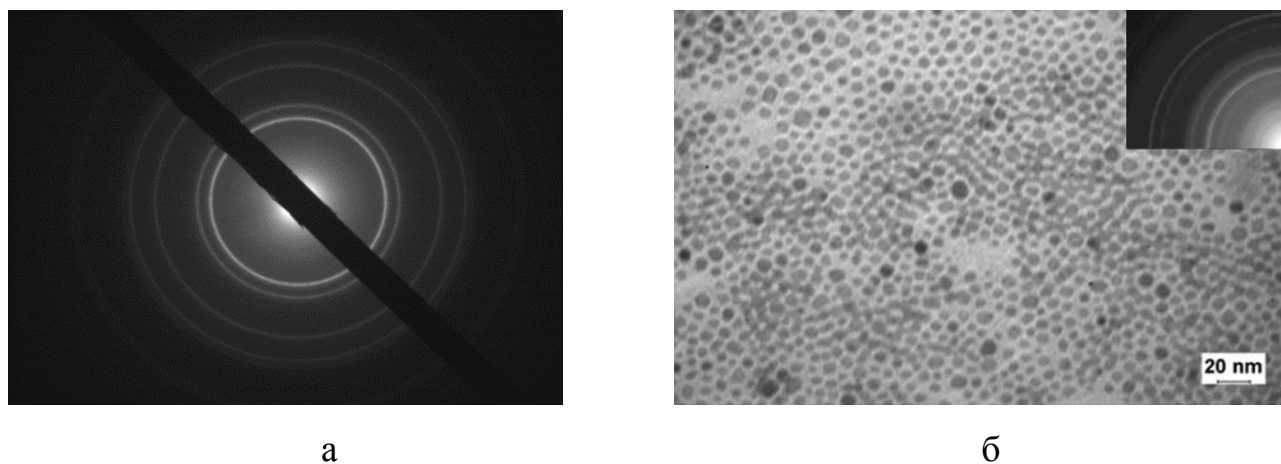


Рис. 3.1. – Еталон алюмінію(Al) (а); Мікроснімок та електронограма чистих наночастинок NiFe_2O_4 без відпалювання (б)

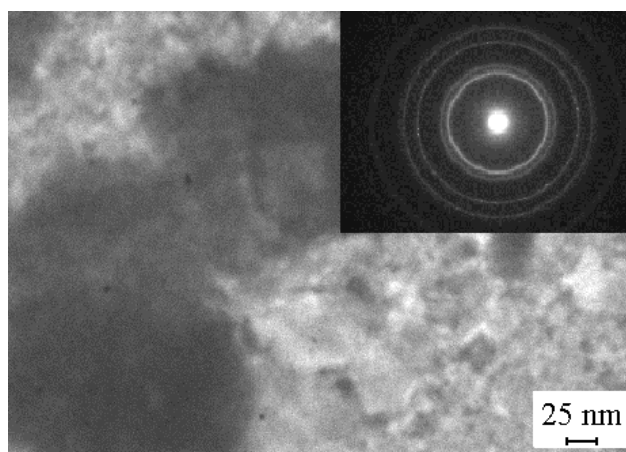


Рис. 3.2. – Мікроснімок та електронограма наночастинок $\text{NiFe}_2\text{O}_4 + \text{Ag}(30)$ до відпалювання

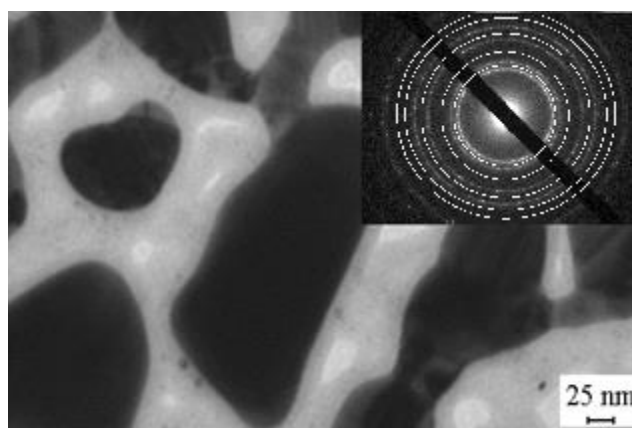


Рис. 3.3. – Мікроснімок та електронограма наночастинок $\text{NiFe}_2\text{O}_4 + \text{Ag}(30)$ після відпалювання

На рисунках 3.2 та 3.3 зображені мікрознімки та електронограми наночастинок $\text{NiFe}_2\text{O}_4 + \text{Ag}(30)$ до відпалювання та після відпалювання.

На рисунку 3.4 показані гістограми, на яких зображений приблизний розмір та кількість наночастинок до відпалювання та наночастинок після відпалювання. Після дослідження середніх розмірів наночастинок до відпалювання ми з'ясували, що більше всього наночастинок розміром 7 – 9 нм, а взагалі розмір лежить в інтервалі від 1,4 до 11,7 нм. Після відпалювання зменшилася кількість дрібних наночастинок, і розподіл змістився до НЧ більших розмірів, загальний розподіл від 2,3 до 16,5 нм.

Порівнюючи отриманні дані приведені в таблиці 3.2 з табличними ми помітили, що в діапазоні температур 300 – 600 К зберігається фазовий стан частинок з незначним їх збільшенням розмірів. Подальше збільшення температури відпалу до 800 К призводить до значного зменшення інтенсивності деяких ліній, що свідчить про початок фазового переходу. Відпал вище цієї температури призводить до остаточного розпаду оксидів. Розмір частинок при цьому вже суттєво не змінюється. Параметри решітки: $\text{NiFe}_2\text{O}_4 = 8,354 \text{ \AA}$, $\text{Ag} = 4,08 \text{ \AA}$.

Розрахунок параметру решітки а проводився за формулою 3.1.

$$a_{hkl} = d_{hkl} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}, \quad (3.1)$$

де a_{hkl} – параметр решітки;

d_{hkl} – міжплощинна відстань;

h, k, l - індекси Міллера.

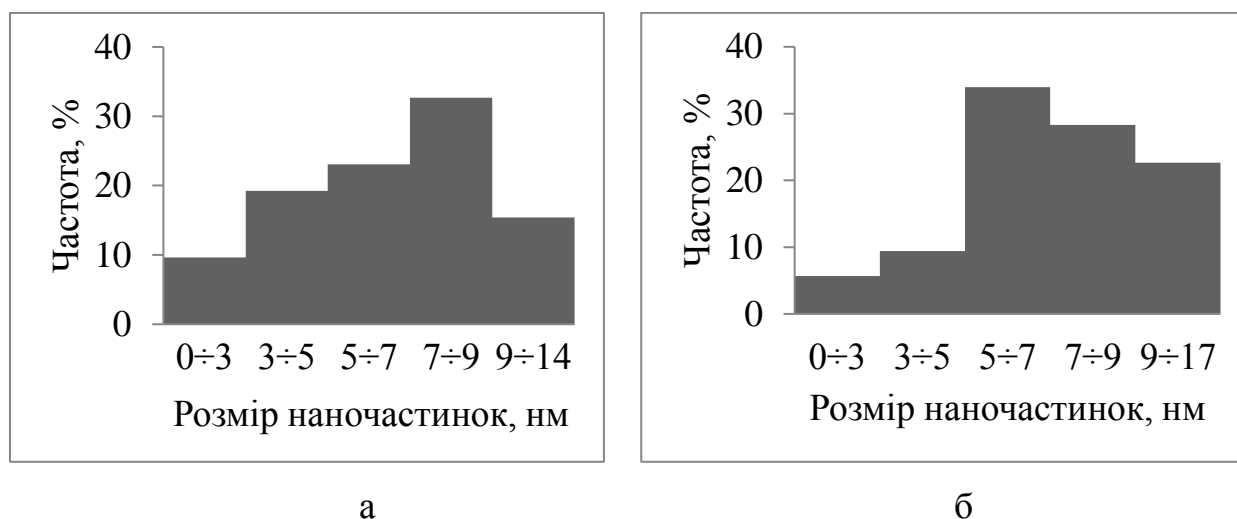


Рис. 3.4. – Діаграма розподілу за розміром: наночастинки NiFe_2O_4 до відпалювання(а); наночастинки NiFe_2O_4 після відпалювання (б)

В таблицю 3.2 ми запишемо відомі дані та дані, що ми розрахували.

Таблиця 3.2

Розшифрування отриманих електронограм

| d = 30 нм | | | | | | | | | | | |
|---|-----|-------|----------------------------------|--|-----|-------|----------------------------------|--|-----|-------|----------------------------------|
| NiFe ₂ O ₄ /П, T=300 К (без відпалювання) | | | | Ag/ NiFe ₂ O ₄ /П, T=300 К | | | | Ag/ NiFe ₂ O ₄ /П, T=800 К | | | |
| d _{hkl} | hkl | a, Å | фаза | d _{hkl} | hkl | a, Å | фаза | d _{hkl} | hkl | a, Å | фаза |
| 4,831 | 111 | 8,368 | NiFe ₂ O ₄ | 4,833 | 111 | 8,368 | NiFe ₂ O ₄ | 4,832 | 111 | 8,368 | NiFe ₂ O ₄ |
| 2,948 | 220 | 8,338 | NiFe ₂ O ₄ | 2,945 | 220 | 8,338 | NiFe ₂ O ₄ | 2,943 | 220 | 8,338 | NiFe ₂ O ₄ |
| 2,497 | 311 | 8,282 | NiFe ₂ O ₄ | 2,495 | 311 | 8,282 | NiFe ₂ O ₄ | 2,498 | 311 | 8,282 | NiFe ₂ O ₄ |
| 2,087 | 400 | 8,348 | NiFe ₂ O ₄ | 2,232 | 111 | 4,085 | Ag | 2,202 | 111 | 4,081 | Ag |
| 1,709 | 422 | 8,375 | NiFe ₂ O ₄ | 2,081 | 400 | 8,348 | NiFe ₂ O ₄ | 2,085 | 400 | 8,348 | NiFe ₂ O ₄ |
| 1,599 | 511 | 8,309 | NiFe ₂ O ₄ | 1,710 | 422 | 8,375 | NiFe ₂ O ₄ | 1,708 | 422 | 8,375 | NiFe ₂ O ₄ |
| 1,474 | 440 | 8,338 | NiFe ₂ O ₄ | 1,601 | 511 | 8,309 | NiFe ₂ O ₄ | 1,598 | 511 | 8,309 | NiFe ₂ O ₄ |
| | | | | 1,472 | 440 | 8,338 | NiFe ₂ O ₄ | 1,475 | 440 | 8,338 | NiFe ₂ O ₄ |
| | | | | 1,365 | 220 | 4,07 | Ag | 1,360 | 220 | 4,08 | Ag |
| | | | | 1,150 | 311 | 4,079 | Ag | 1,152 | 311 | 4,086 | Ag |

3.2 Електрофізичні дослідження

Для дослідження термічної стабільності фізичних властивостей зразки відпалювалися у вакуумній камері до температур $T_b = 800$ К. Відпалювання проводилось у вакуумній камері зі швидкістю ≈ 5 К /хв.. Дослід проводився в установці ВУП-5М. Нагрівання відбувалося з 300 К до 800 К, а охолодження так само але в зворотному порядку. Після дослідів були отриманні дані, щодо зміни опору при зміні температури. Маючи їх ми знаходимо питомий опір і починаємо будувати графіки залежності питомого опору від температури по двом циклам нагрівання та по двом циклам охолодження. Маємо два графіки. На рисунку 3.5 зображено залежність питомого опору від температури лише Ag, а на рисунку 3.6 представлений графік тієї ж залежності, але $NiFe_2O_4+Ag(30)$.

Дивлячись на них, ми можемо визначити температурний коефіцієнт опору(ТКО). Визначаємо його лише по другому циклу на декількох ділянках за формулою 3.2 [1]. Результати записуємо до таблиці 3.3 та 3.4 відповідно для Ag та для $NiFe_2O_4+Ag(30)$.

$$TKO = \frac{1}{\rho_n} \frac{\Delta\rho}{\Delta T} \quad (3.2)$$

де TKO – температурний коефіцієнт опору;

ρ_n – початковий питомий опір на кожній ділянці;

$\Delta\rho$ – різниця між кінцевим та початковим питомим опором на кожній ділянці;

ΔT – різниця між кінцевою та початковою температурою на кожній ділянці.

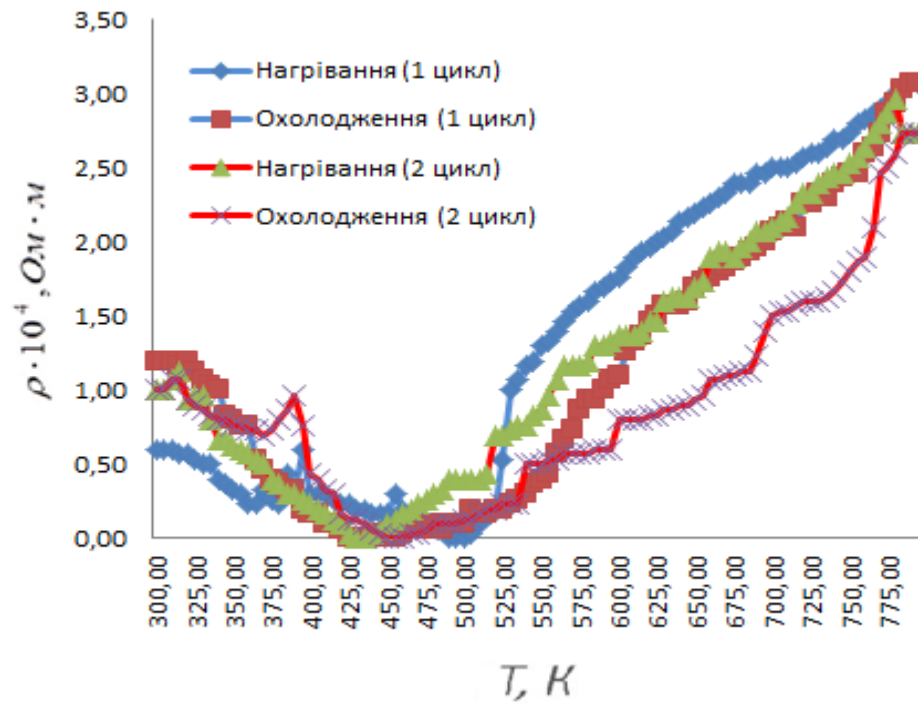


Рис. 3.5 – Графік залежності питомого опору від температури - Ag (2 цикла)

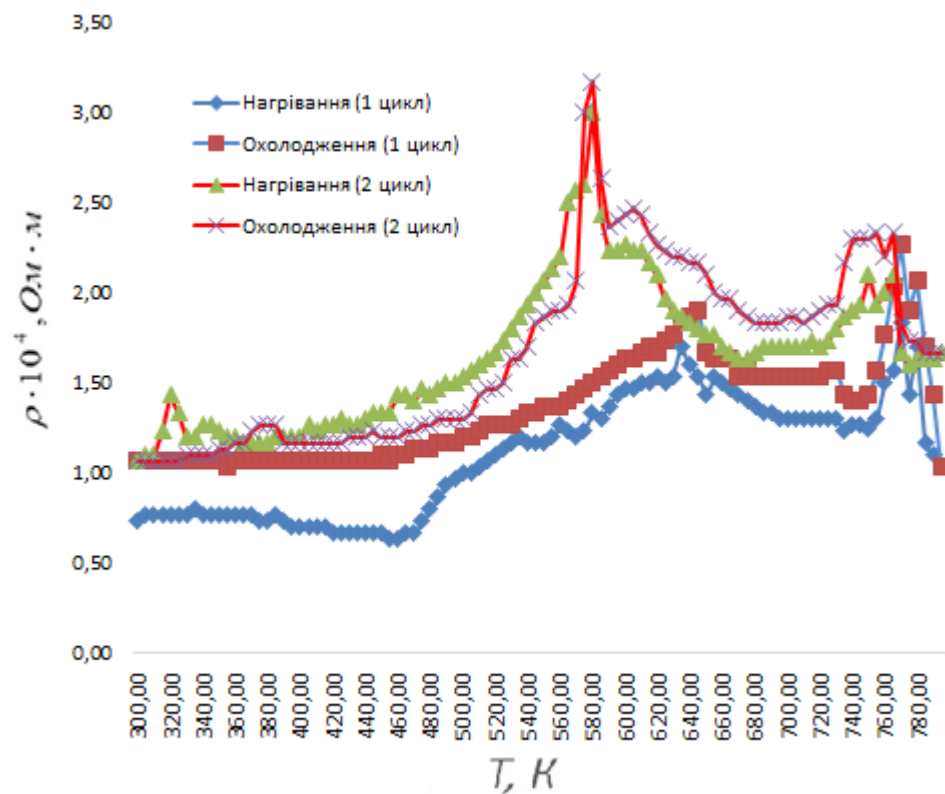


Рис. 3.6 – Графік залежності питомого опору від температури - $\text{NiFe}_2\text{O}_4 + \text{Ag}(30)$ (2 цикла)

Таблиця 3.3

Розрахунок ТКО для Ag

| Параметри | Нагрівання | | | Охолодження | | |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Ділянка 1 | Ділянка 2 | Ділянка 3 | Ділянка 1 | Ділянка 2 | Ділянка 3 |
| $\rho_p \cdot 10^4 (\text{Ом} \cdot \text{м})$ | 1,0 | 1,13 | 2,97 | 1,0 | 1,07 | 2,6 |
| $\Delta\rho \cdot 10^4 (\text{Ом} \cdot \text{м})$ | 0,13 | 1,84 | -0,24 | 0,07 | 1,53 | 0,13 |
| ΔT (К) | 15 | 465 | 15 | 15 | 465 | 15 |
| ТКО (К^{-1}) | 0,0089 | 0,0035 | -0,0052 | 0,0044 | 0,0031 | 0,0034 |

Таблиця 3.4

Розрахунок ТКО для наночастинок $\text{NiFe}_2\text{O}_4 + \text{Ag}(30)$

| Параметри | Нагрівання | | | Охолодження | | |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | Ділянка 1 | Ділянка 2 | Ділянка 3 | Ділянка 1 | Ділянка 2 | Ділянка 3 |
| $\rho_p \cdot 10^4 (\text{Ом} \cdot \text{м})$ | 1,07 | 2,43 | 2,1 | 1,07 | 2,63 | 2,33 |
| $\Delta\rho \cdot 10^4 (\text{Ом} \cdot \text{м})$ | 1,36 | -0,33 | -0,66 | 1,56 | -0,3 | -0,66 |
| ΔT (К) | 285 | 180 | 30 | 285 | 180 | 30 |
| ТКО (К^{-1}) | 0,0045 | -0,0008 | -0,0069 | 0,0052 | -0,0006 | -0,0095 |

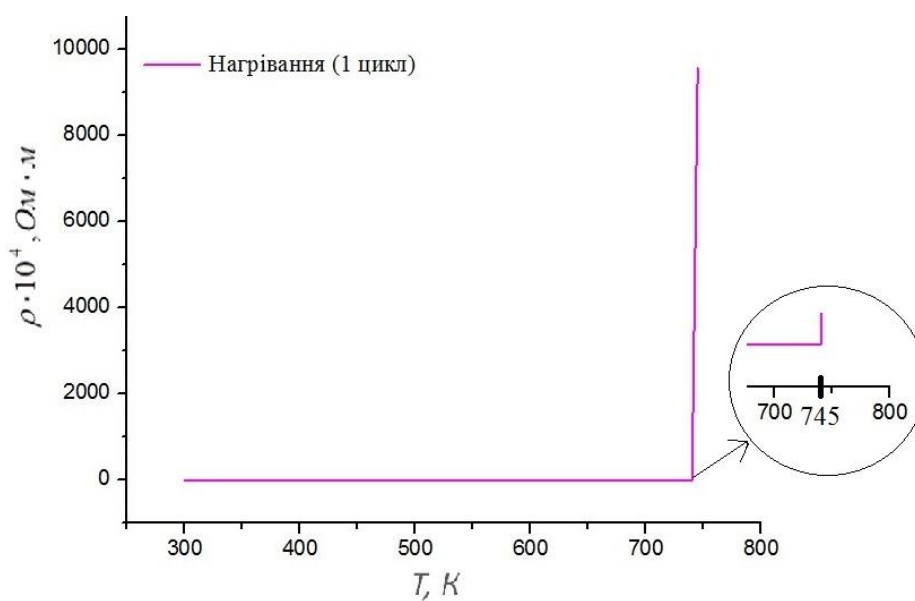


Рис. 3.7 – Графік залежності питомого опору від температури - $\text{NiFe}_2\text{O}_4(1:4) + \text{Ag}(30)$ після відпалювання(після стрибка опору)

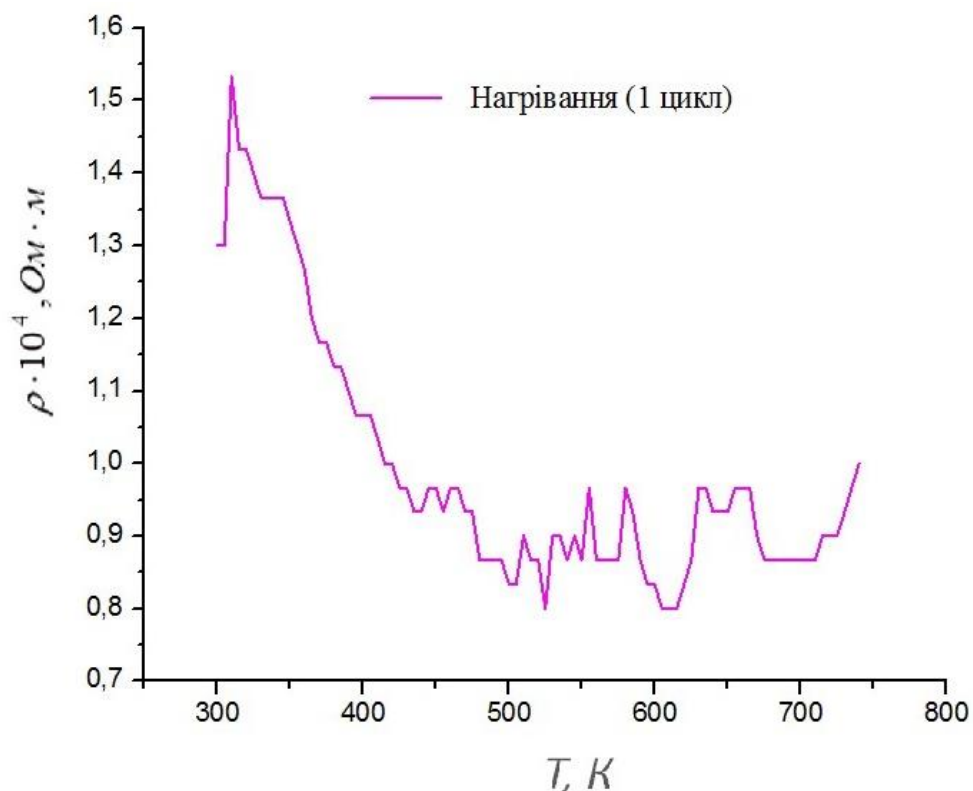


Рис. 3.8 – Графік залежності питомого опору від температури - $\text{NiFe}_2\text{O}_4(1:4) + \text{Ag}(30)$ після відпалювання(до стрибка опору)

Піки, що зображені на рисунку 3.6 з'являються через те, що наші наночастинки отримують досить велику кількість енергії для того, щоб стати рухливими. Внаслідок цього, ми бачимо стрімкий стрибок опору.

На рисунку 3.7 зображений графік залежності питомого опору від температури $\text{NiFe}_2\text{O}_4(1:4) + \text{Ag}(30)$ після відпалювання

Після відпалювання утворюються порожні області(не заповнені ні наночастинками, не сріблом), тому електрону становиться важко тунелювати, внаслідок чого відбувається різкий стрибок, який ми можемо спостерігати на рисунку 3.7 при температурі $T = 745 \text{ К}$.

На рисунку 3.8 зображений той же графік залежності питомого опору від температури $\text{NiFe}_2\text{O}_4(1:4) + \text{Ag}(30)$ після відпалювання, але до стрибка

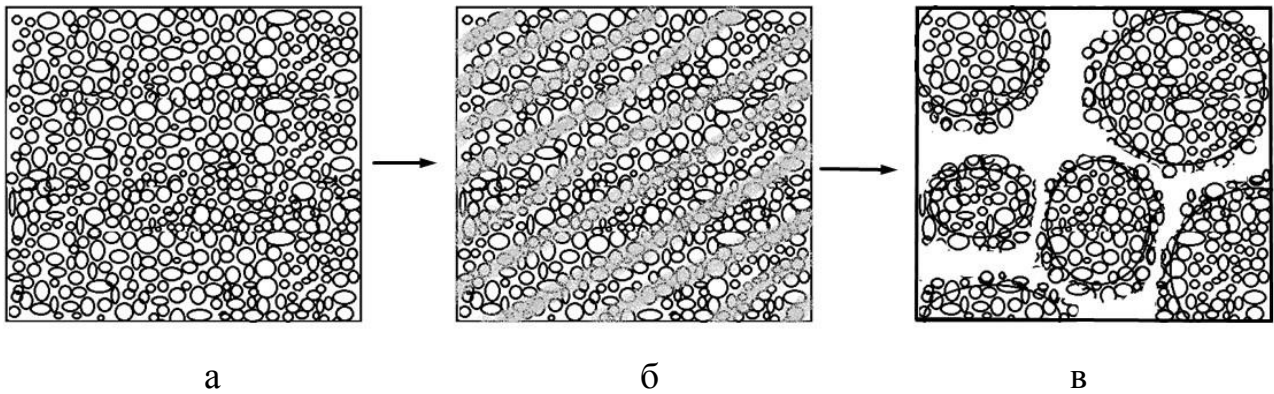


Рис. 3.9 – Схема нанесення: чисті наночастинки NiFe_2O_4 (а); наночастинки NiFe_2O_4 з нанесеним шаром Ag (б); розміщення наночастинок NiFe_2O_4 після відпалювання (в)

На рисунку 3.9 показано схематичний процес нанесення Ag на підкладку з наночастинками та їхнє розміщення після відпалювання. Спочатку наносимо наночастинки NiFe_2O_4 , далі наносимо шар Ag, і відпалюємо, внаслідок чого і з'являються порожні області.

ВИСНОВКИ

1. Проаналізовано літературні дані пов'язані з тематикою методів та технологій отримання та дослідження магнітних металевих наночастинок.
2. Було отримано серії зразків для системи Ag/ NiFe₂O₄/підкладка з різними концентраціями наночастинок та шаром Ag товщинами 10 та 30 нм.
3. Досліджено мікроснімки та дифракційні картини Ag/ NiFe₂O₄/підкладка з шаром Ag товщиною 30 нм. Розраховані постійна решітки, міжплощинні відстані. Дивлячись на результати розрахунку з'ясовано параметри решітки для кожної фази: NiFe₂O₄ = 8,354 Å, Ag = 4,08 Å.
4. З рисунків і розшифровки електронограм, в діапазоні температур 300 – 600 К зберігається фазовий стан частинок з незначним їх збільшенням розмірів. Подальше збільшення температури відпалу до 800 К призводить до значного зменшення інтенсивності деяких ліній, що свідчить про початок фазового переходу. Відпал вище цієї температури призводить до остаточного розпаду оксидів. Розмір частинок при цьому вже суттєво не змінюється.
5. Побудовано температурну залежність питомого опору. З аналізу отриманого графіку видно, що на ньому є 3 основні ділянки для яких було розраховано ТКО: нагрівання – ТКО₁ = 0,0045; ТКО₂ = – 0.0008; ТКО₃ = – 0.0069; охолодження – ТКО₁ = 0,0052; ТКО₂ = – 0.0006; ТКО₃ = – 0.0095.
6. Виявлено, що внаслідок того, що плівка срібла надто тонка, відпал за високих температур призводить до утворення значних пустот у структурі, саме тому відпал такої структури варто проводити у 2 етапи, спочатку відпалюючи шар наночастинок до високих температур, після чого вже відпалювати всю структуру. Для зразків з великою концентрацією частинок, розділення на 2 етапи не обов'язкове.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Технологічні основи електроніки (практикуми): навчальний посібник / Н.М.Опанасюк, Л.В.Однодворець, А. О. Степаненко, С.І. Проценко. – Суми: Вид-во СумДУ, 2013.– 105 с.
2. Магніторезистивні властивості масиву наночастинок оксиду заліза у провідній матриці / Д.М. Костюк, С.І. Проценко, Л.В. Однодворець та ін. // Журнал нано- та електронної фізики.-2015.-Том 4, номер 4.- 7 с.
3. Наночастинки металів, методи отримання, сфери застосування, фізико-хімічні та токсичні властивості / Трахтенберг І. М., Дмитруха Н. М. // Український журнал з проблем медицини праці.-2013.-4,37. – С. 62-74.
4. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисциплін «Практичні методи електронної мікроскопії», «Плазмово-дугові технології» і «Нанотехнології селективної конденсації»/Укладач В.І.Перекрестов. –Суми: Вид-во СумДУ, 2008.-120 с.
5. Timothy, J.J.; Meschke, G. A cascade continuum micromechanics model for the effective elastic properties of porous materials. *Int. J. Solids Struct.* 2016, 83, 1–12.
6. B. Y. Balagurov, *Electrophysical properties of composites: Macroscopic Theory*, Moscow: LENAND, 2015, p. 752.
7. A. M. Menzel, "Tuned, driven, and active soft matter," *Phys. Rep.*, vol. 554, pp. 1-45, 2015.
8. Ubaidiallah, J. Sutrisno, A. Purwanto und S. A. Mazlan, „Recent progress on magnetorheological solids: materials, fabrication, testing, and applications,“ *Adv. Eng. Mater.*, vol. 17, no. 5, pp. 563-597, 2015.
9. A. Rao, M. Snarskii, A.; Bezsudnov, I.V.; Sevryukov, V.A.; Morozovskiy, A.; Malinsky, J. *Transport Processes in Macroscopically Disordered Media. From Mean Field Theory to Percolation*, Springer: New York, NY, USA, 2016.

10. Беднов С. С. Высокора разрешающая рентгеновская дифрактометрия и рефлектометрия / С. С. Беднов. – Санкт-Петербург: ЦКП \ "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" при ФТИ им. А.Ф. Иоффе, 2010. – 18с.
11. Preparation of cobalt thin films by Sputtering systems and its magnetic characterization / Mustafa Erkovan // *Technology*. – 2015. – Vol. 17.– P. 74-81.
12. Investigation of nanocrystalline thin cobalt films thermally evaporated on Si(100) substrates / W. Kozłowski, J. Balcerski, W. Szmaja // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2016. – P. 3-4.
13. Ruthenium and ruthenium dioxide thin films deposited by atomic layer deposition using a novel zero-valent metalorganic precursor, (ethylbenzene)(1,3-butadiene)Ru(0), and molecular oxygen / Seungmin Yeo, Ji-Yoon Park, Seung-Joon Lee // *Microelectronic Engineering*. – 2015. – №137. – P. 16–22.
14. Kasim Ocakoglu. The Effect of Annealing Temperature on the Optical Properties of a Ruthenium Complex Thin Film / Kasim Ocakoglu, Salih Okur, Hasan Aydin, Fatih Mehmet Emen // *Thin Solid Films*. – 2016. – 25 p.
15. Чешко І.В. Фізичні процеси в функціональних елементах на основі плівкових систем Co/Cu(Ag, Au) зі спін/залежним розсіюванням: дис. кандидата фіз-мат. Наук: 01.04.01/ Чешко Ірина Володимирівна. – Суми, 2009. – 159 с.
16. Готра З.Ю. Технологія електронної техніки: Навч. Посібник: у 2 т. – Львів: видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2010. – Т.2 – 884с.
17. S. Odenbach, "Microstructure and rheology of magnetic hybrid materials," *Arch. Appl. Mech.*, vol. 86, no. 1-2, pp. 269-279, 2016.
18. I. A. Belyaeva, E. Y. Kramarenko and M. Shamonin, "Magnetodielectric effect in magnetoactive elastomers: Transient response and hysteresis," *Polymer*, vol. 127, pp. 119-128, 2017.