**Шифр: Гранульований сплав**

**МАГНІТОРЕЗИСТИВНІ ВЛАСТИВОСТІ ҐРАНУЛЬОВАНИХ ПЛІВКОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

ЗМІСТ

[ВСТУП 3](#_Toc506203560)

[РОЗДІЛ 1. ВЛАСТИВОСТІ ҐРАНУЛЬОВАНИХ ПЛІВКОВИХ СПЛАВІВ 4](#_Toc506203561)

[1.1 Електрофізичні і магніторезистивні властивості ґранульованих плівкових сплавів 4](#_Toc506203562)

[1.2 Методи формування ґранульованих плівкових сплавів 6](#_Toc506203563)

[1.3 Методика мікроскопічних досліджень 10](#_Toc506203564)

[РОЗДІЛ 2. ПРИРОДА МАГНІТООПОРУ СЛАБКОМАГНІТНОЇ АБО ПАРАМАГНІТНОЇ МАТРИЦІ 12](#_Toc506203565)

[2.1 Елементи теорії 12](#_Toc506203566)

[2.2 Експериментальні дослідження 15](#_Toc506203567)

[СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 25](#_Toc506203568)

# ВСТУП

В останні роки набуває все більшої популярності новий напрямок електроніки – спінтроніка. Плівкові системи, що використовуються у приладах мікроелектроніки та спінтроніки, повинні задовольняти ряд критеріїв: термічна стійкість структурно-фазового складу, стабільність характеристик у робочому діапазоні температур, деформацій, магнітних полів тощо.

**Актуальність теми.** Аналіз літературних даних показує, що все більш широке застосування в електронному приладобудування знаходять багатошарові та багатокомпонентні плівкові системи на основі феромагнітних (Co, Fe, Ni) та благородних (Au, Ag, Pt) металів. Плівки перелічених металів у різних комбінаціях використовуються як чутливі елементи тонкоплівкових датчиків. Змінюючи компоненти системи, їх товщину, концентрацію, можна досягти суттєвих змін у електрофізичних та магніторезистивних властивостях, наприклад, – отримати відносно мале значення ТКО, що є показником високої термостабільності. Саме у зв’язку з цим проблема є актуальною.

***Об’єкт дослідження*** – процеси ґрануляризації т.р., їх вплив на фізичні властивості плівкових матеріалів та розсіювання електронів провідності на магнітних моментах гранул.

***Предмет дослідження*** – терморезистивні властивості плівкових твердих розчинів на основі Co і Fe, або Ag і Au з елементами ґранульованого стану.

***Методи дослідження*** – вакуумна пошарова конденсація металів, просвітлювальна електронна мікроскопія (ПЕМ) та електронографія.

Мета роботи полягала у комплексному дослідженні фізичних властивостей плівкових сплавів на основі Co і Fe, або Ag і Au у вигляді твердого розчину, отриманого методом пошарової або одночасної конденсації із подальшим термопідпалюванням; терморезистивних та магніторезистивних властивостей плівкових твердих розчинів.

# РОЗДІЛ 1. ВЛАСТИВОСТІ ҐРАНУЛЬОВАНИХ ПЛІВКОВИХ СПЛАВІВ

## 1.1 Електрофізичні і магніторезистивні властивості ґранульованих плівкових сплавів

Відкриття [1] нового типу матеріалів – ґранульованих плівкових сплавів сприяло подальшому теоретичному і експериментальному вивченню не тільки явища гігантського магнітоопору (ГМО), але і магнітних та електрофізичних властивостей, таких як питомий опір (ρ), термічний коефіцієнт опору (TКО – β), магнітоопір (МО), намагніченість (M) та ін.

Формування магнітних ґранул Co чи Fe у неферомагнітній матриці у вигляді твердого розчину (т.р.) атомів парамагнітних металів (наприклад, Cu, Ag або Au) обумовлює появу нового ефектів спін-залежного розсіювання електронів (СЗРЕ) у порівнянні з мультишарами без елементів ґранульованого стану. Мова іде про те, що у випадку мультишарів на величину ГМО впливають такі процеси як спін-орбітального розсіювання, обмінної взаємодії на парамагніних домішках, електрон-магнонне розсіювання (див., наприклад, [2]). При переході до одношарових плівкових ґранульованих сплавів не очікується велике значення ГМО, хоча поряд із вказаними вище механізмами розсіювання електронів з’являються два нових – розсіювання на поверхні і в об’ємі ґранул [3], що призводить до додаткового зменшення (довжини спін-дифузійного пробігу електронів (λ0s-d). У квазікласичній теорії [3] допускається, що величина λ0s-d менше масштабу структурних неоднорідностей (середній радіус ґранул (r0) та немагнітні міжґранульні проміжки, або фрагменти т.р. (Δlss) між двома сусідніми ґранулами). При такому допущенні не слід очікувати велике розрахункове значення ГМО у порівнянні із ГМО, отриманого у рамках квантового формалізма Кубо, в якому допускається, що λ0s-d >> r0.

У роботі [4] в рамках мікроскопічного підходу було теоретично показано, що у ґранульованих плівках може мати місце ефект анізотропії (порядка декількох %) як МО, так і ГМО, тобто їх величина залежить від орієнтації струму у площині плівки відносно намагніченості. Причиною AМО і АГМО є спонтанна анізотропія опору феромагнітного матеріалу в плівці. Автори [5] описали ефект від’ємного ГМО у ґранульованих мікродротах, що пов’язано із СЗРЕ на локалізованих магнітних моментах атомів у міжґранулярних проміжках.

Авторами [6, 7] запропоновані феноменологічні моделі для електрофізичних властивостей ґранульованих одношарових плівок, які дозволяють здійснювати порівняння із експериментами та прогнозування величин *ρ*, TКО і КТ.

Основне співвідношення для TКО можна подати у такому вигляді:

 (1.1)

де індекси «g» і «ss» позначають матеріал ґранули і т.р.;  – коефіцієнт ґрануляризації, який розраховується на основі електронно-мікроскопічних досліджень і може бути мірою перемішування атомів магнітних і немагнітних компонент.

Відмітимо, що такою ж мірою перемішування атомів може бути величина  , де *d*hkl – міжплощинна відстань; hkl – індекси Міллера; НМ і М – немагнітний і магнітний метал), як це запропоновано у роботі [8].

У граничних випадках величини α співвідношення (1) може бути представлена так [9, 10]:

 (1.2)

Поряд із теоретичними дослідженнями накопичений значний експериментальний матеріал стосовно фізичних властивостей ґранульованих плівок. Відмітимо декілька робіт, які носять концептуальний характер. Перш за все класична робота [11], в якій викладена концепція антиферомагнітної між шарової взаємодії у багатошарових плівкових матеріалах, в т.ч. і на основі Co і Au, тобто у плівкових системах, в яких, як стане зрозумілим (див, наприклад, [12]), можуть реалізуватися елементи ґранульованого стану. Фундаментального характеру дослідження проведені авторами роботи [13] стосовно ефекту впливу матеріалу і фонової домішки на інтерфейсні властивості. Великий об’єм експериментальних досліджень за даною тематикою представлений в оглядах [12, 14-17].

Однією із перших робіт, в якій вивчалися електрофізичні властивості (мова іде про ТКО) ґранульованих мультишарів [Ag(4)/Co(0,2-1,0)]15/П, є робота [15]. Автори установили, що при dCo ≤ 0,5 нм залежність ТКО від dCo стрибкоподібно змінює свій нахил та величину. Таку поведінку ТКО автори пояснюють супермагнітним станом ґранул при dCo ≤ 0,5 нм та ефективним спін-залежним розсіюванням електронів (СЗРЕ) на магнітних ґранулах. Цей висновок частково підтверджується і вимірюванням питомого опору: ρ ≅ 3,4 ⋅ 10– 7 Ом⋅м (dCo< 0,5 нм) і ρ ≅ 2,8⋅10– 7 Ом⋅м (dCo > 0,5 нм), тобто низькоомний спіновий канал спричиняє загальне зменшення питомого опору і, у відповідності із співвідношенням *β* = (1/ρ)(∂ρ/∂T), – збільшення ТКО.

## 1.2 Методи формування ґранульованих плівкових сплавів

Отримання плівкових сплавів виконується в декілька способів: традиційні методи, такі як одночасно вакуумна конденсація, випаровування масивних сплавів, електрохімічне осадження, високочастотний випаровування, а також метод отримання сплаву за допомогою пошарової конденсації компонент з термообробкою[18]. Останній, як і більшість з вказаних вище методів, має свої позитивні та негативні сторони. Однією з переваг є стабільність сплаву після термообробки, що дає можливість вивчати фізику процесів плівкових зразків та застосувати їх як чутливий елемент різноманітних сенсорів. При дослідженні властивостей плівкових систем важливим питанням є матеріал підкладки. він має задовольняти деякі вимоги. Найголовнішою вимогою є забезпечення мінімального шорсткості підкладки, адже на неї конденсується нанорозмірна плівка.

У роботі використовувалися ситалові підкладки для вивчення електрофізичних, тобто терморезистивних, та магніторезистивних властивостей. Ситал є склокерамічним матеріалом, що отриманий за допомогою термообробки скла; має тонкозернисту полікристалічну структуру та характеризується механічною міцністю близько 250 МПа при згинання, що є доволі високим показником; має електроізоляційні властивості та високу термічна стійкість до 1300 К.

Co і Fe та Ag або Au мають обмежену розчинність один в одному, але в плівкових зразках можуть утворюватися тверді розчини атомів Ag або Au у плівці Co або Fe з виділенням ґранул Co. Двокомпонентні плівкові системи на основі Co і Cu(або Ag) та Fe і Cu (Cr) одержувалися методами одночасно та пошаровий конденсації. Для цього було використано модифіковану вакуумну установку ВУП-5М. Схема, що ілюструє процес утворення твердого розчину зображено на рис.1.1.

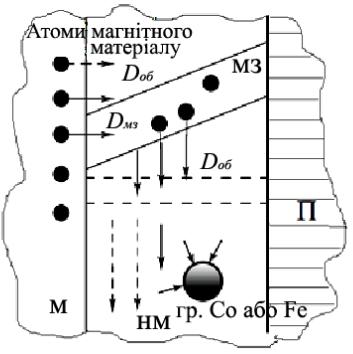


Рис.1.1. Типова схема утворення твердого розчину та ґранульованого сплаву в плівкових системах на основі Co або Fe та Ag або Au

Конденсація плівок Ag, Fe, Cu та Cr здійснювалися резистивним методом випаровування, а плівок Co – електро-променевим. Швидкість конденсації становила 1-4 нм/с. Осадження проводилося на підкладку із аморфного ситалу при температурі 300 К для магнеторезистивного досліджень та на відкол кристалу NaCl, на який попередньо було осаджено плівку вулицю товщиною близько 30 нм для електронно-мікроскопічних досліджень.

Коефіцієнт дифузії по межах зерен набагато більший за коефіцієнт дифузії в об'ємі. Це означає, що утворення твердого розчину твердого розчину починається на межах зерен, а вже потім в об'ємі плівкового зразка. На початковій стадії фазоутворення відбувається із утворення твердого розчину. Далі відбувається утворення ґранул за рахунок надлишковий концентрації магнітної компоненти.

Для отримання та термообробки плівкових зразків на основі Fe або Со та Ag або Au застосовувалися методи пошарової та одночасної конденсації компонент. З цією метою використовувалися надвисоковакуумна установка (тиск залишкових газів 10–5 Па) та вакуумна установка ВУП-5М. Для осадження Ag та Au користувалися методом резистивного випарування з вольфрамового випарника типу «гусарик», а для конденсації тугоплавких металів використовували електронно-променеву гармату. Швидкість осадження становила 1-5 нм/с, що дало можливість більш точно контролювати товщину зразків (*d*), яка вимірювалася двома методами: методом кварцового резонатора в процесі конденсації та оптичної інтерферометрії. Кожен з методів дає свою похибку ± 0,1 та ± 1 нм відповідно, яка залежить від конструктивних можливостей приладів. Для електронографічних досліджень плівкові зразки конденсували на мікроскопічні мідні сіточки з наперед нанесеним шаром вуглецю товщиною до 20 нм. Для отримання ґранульованого плівкового сплаву свіжосконденсовані зразки піддавалися термообробці до 700, 800 та 900 К з стабілізацією протягом 30 хв. Швидкість нагрівання становила 10 К/хв. Контроль температури здійснювався за допомогою приладу АРРА‑109 і хромель-алюмелевої термопари.

Для розрахунку концентрації атомів окремих компонент плівкових систем використовувалось співвідношення:

, (1.3)

де *di* – товщина шару плівки; *D*1,2 *–* густина металів; *μ*1,2 – молярна маса.

Спеціальна систему заслінок (рис. 1.2) дала змогу одержувати як одношарові плівки, так і двошарові систем осадження плівок під час одного технологічного процесу. Осадження плівок приходило як одночасним розпорошенням з двох джерел, так і почерговою конденсацією двох компонент.

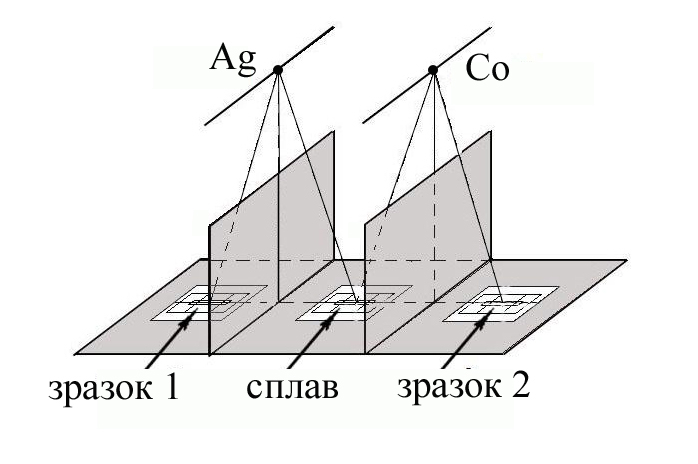


Рис.1.2. Схема одержання одно- та двокомпонентних зразків при одночасному випаровування з двох джерел

Для утворення твердих розчинів також застосовувалися методи одночасно осадження компонентів (для Co і Ag), або пошарового осадження надтонких шарів без їх витримки у часі (Fe, Cu) [19]. У випадку систем з обмеженою взаємно розчинністю. Для систем з необмеженою взаємною розчинністю компонентів методом послідовної конденсації шарів з термообробкою було одержано ґранульовані (Cu, Co), або неґранульовані (Fe, Cr) тверді розчини.

**1.3 Методика мікроскопічних досліджень**

Для дослідження кристалічної структури, фазового складу і проведення електроно-графічного аналізу використовувалися методи електронний мікроскопії та електронографії. Після охолодження зразків до температури 300 К подальші дослідження проводилися за допомогою просвітного електронного мікроскопа ПЕМ-125 з роздільною здатність 0,2 нм та збільшенням 1,3.105 крат. Метод ПЕМ дозволяє одержати інформацію про розміри, концентрацію та форму кристалітів тобто зерен, морфологію поверхні зразка, характер меж зерен, дефектів кристалічної будови.

Дослiдження фазового складу здiйснювалося методом електронографiї та просвiчуючої електронної мiкроскопiї (прилад ПЕМ-125К). Квадратичнi спiввiдношення для кристалiтiв кубiчної та гексагональної сингонiї мають такий вигляд:

,

де *dhkl* – мiжплощинна вiдстань;  *h, k, l –* iндекси Мiллера; *аhkl* i *сhkl* – параметри кристалiчних решiток у межах вiдповiдних сингонiй.

Як еталон використовували вiдпалену плiвку Al товщиною *d* = 30 - 40 нм, що забезпечувало точнiсть вимiрювання мiжплощинних вiдстаней Δ*d*hkl= ±(10-3 – 10-4) нм та вiдповiдної точностi для параметрiв решiток:

 - кубiчна сингонiя;

 i - гексагональна сингонiя.

У методиці розшифровки електронограм можна виділити 2 етапи. По-перше, потрібно визначити стало приладу це, яка використовується в основній формулі для розрахунку параметра кристалічної решітки. Як еталон використовували плівки алюмінію товщиною 30 нм.

Хоча досліджувані системи на основі Co або Fe та Ag або Au і характеризуються повною незмішуваністю, результати експерименту вказують на утворення в даних системах твердого розчину на основі Co або Fe та виділенням ґранул магнітного матеріалу в матриці твердого розчину.

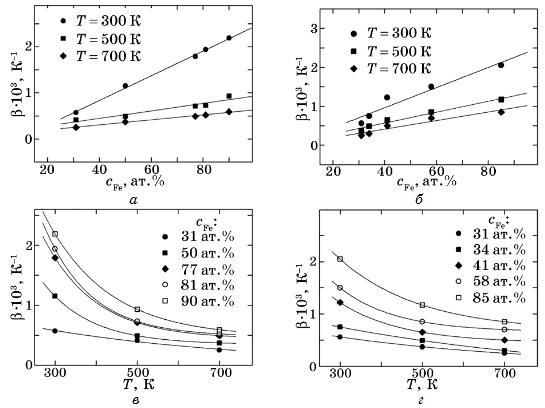


Рис.1.3. Температурні (а, б) та концентраційна (в, г) залежності ТКО для багатошарових плівкових систем (Fe/Cu)n/П і (Fe/Cr)n/П із загальною товщиною в інтервалі 60 - 80 нм

На рис. 1.3 наведені концентраційні температурні залежності ТКО для багатошарової плівкової системи (Fe/Cu)n/П і (Fe/Cr)n/П із загальною товщиною в інтервалі від 60 до 80 нм. При цьому можна побачити, що в обох системах зі збільшенням концентрації Fe ТКО збільшується.

# РОЗДІЛ 2. ПРИРОДА МАГНІТООПОРУ СЛАБКОМАГНІТНОЇ АБО ПАРАМАГНІТНОЇ МАТРИЦІ

Дані про взаємозв’язок концентраційної залежності компонент в плівкових системах на основа Co, Fe та Ag, Au та утворення твердого розчину можуть бути використані для розвитку уявлень про природу твердого тіла у вигляді ґранульованих сплавів та при побудові (на основі вищезазначених металів) чутливих елементів різного роду датчиків. Для цього треба більш детально вивчити їх терморезистивні властивості.

Значення питомого опору і, відповідно, термічного коефіцієнту опору для плівковіх та масивних зразків на порядок відрізняються. Отже, задачею є вивчення залежності питомого опору від температури для систем, в яких при термовідпаленні утворюється твердий розчин, або ґранульований плівковий сплав. Для дослідження ТКО проводилися дослідження у вакуумній камері установки ВУП-5М при тиску залишкових газів 10-4 Па. Геометричні розміри зразка складали 10мм×1мм×*d* нм, де *d*=15÷60нм.

## 2.1 Елементи теорії

Для подальших розрахунків було обрано модель, яка ґрунтується на таких положеннях:

* багатошарова система моделюється як паралельне з’єднання n провідників, для кожного з яких характерними є товщина *di*, величина СДВП λ0i, ефективний коефіцієнт дзеркальності *рі*, коефіцієнт проходження межі зерна *ri*, а також коефіцієнт проходження МП *Qij* (з i-го шару в j-ий);
* температурні ефекти для параметрів електроперенесення враховуються як відповідні термічні коефіцієнти: , , , ;
* у залежності від співвідношення товщин окремих шарів *di* та СДВП λ0i, при переходах електрони можуть відбиватися між сусідніми шарами, або декількома шарами;
* на межі поділу шарів присутнє і відбиття електронів, і між шарові переходи;
* величини *Qij* та *βQij*  приблизно рівні величинам *ri* і *βri* відповідно.

Якщо розглядати багатошарову плівку як паралельне з’єднання окремих шарів, то на прикладі трьохшарового зразка для опору є справедливим таке відношення:

Після логарифмування та диференціювання по температурі Т співвідношення (2.1) набуває вигляду:

де статична вага вкладу *і*-го шару в загальну величину ТКО.

Для врахування температурних ефектів в коефіцієнтах *p*, *r*, *Q*, записуємо *Fi* як функцію параметрів *ki* і *mi*, таким чином:

Дана функція враховує, що величина *ki* визначається поверхневим розсіюванням, а величина *mi* – розсіюванням на МЗ і на МП шарів.

У розгорнутому вигляді похідна записується так:

Після підстановки (2.3) та запису аналогічних співвідношень для *F2, F3* в (2.2) із врахуванням наступних рівнянь:

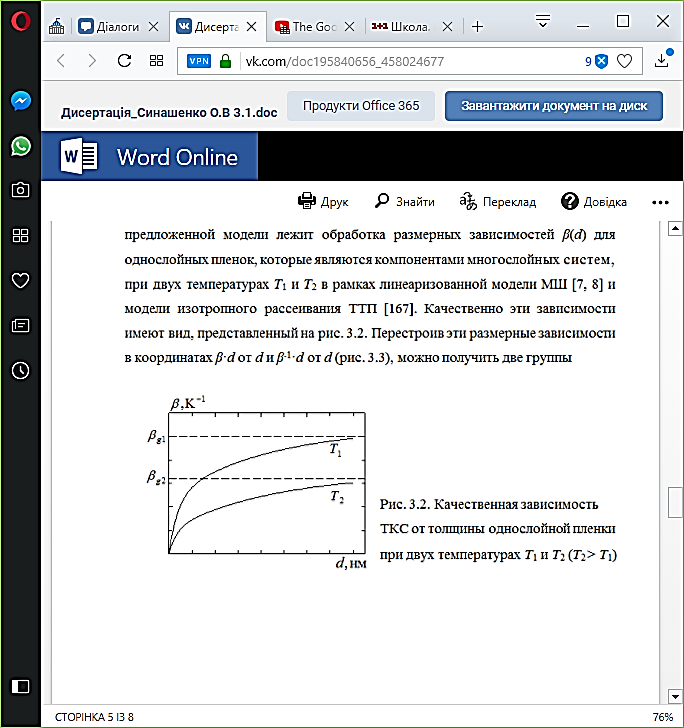
отримано робочу формулу для ТКО тришарової плівкової системи:

(2.4)

Співвідношення (2.4) можна досить легко розповсюдити на випадок використання довільної кількості шарів. Оскільки величина питомого опору плівки зростає при збільшенні температури, а *λ0 ~ ρ-1*, то значення СДВП повинна спадати з ростом температури *Т*, що і спостерігається для плівкових і масивних зразків.

## 2.2 Експериментальні дослідження

Дослідження впливу температури на параметри електроперенесення проводилися на прикладах плівок Cr, Cu, Sc, оскільки у плівкових системах на основі цих металів після підпалювання зберігається індивідуальність шарів. Це важливо з точки зору апробації використаної моделі. У основі методу апробації покладено обробку залежності *β(d)* для одношарової системи, що входить до складу багатошарової плівки, при двох температурах *Т1* і *Т2*. Якісно ці залежності представлено на рис.2.1.

Рис.2.1. Якісна залежність ТКО від товщини одношарової плівки при двох температура *Т1* і *Т2* (*Т1*<*Т2*)

Для розрахунків параметрів *λ0*, *p, R* та *r* при двох температурах, як правило, використовують теоретичну модель ізотропного розсіювання електронів Тельє, Тоссе і Пішар (див. [21]) у вигляді трьох основних співвідношень:

Перебудувавши експериментальні залежності *β(d)* у координатах *β-1·d* від *d* та скориставшись експериментальними даними стосовно *βд*, *β0* і *L*, можна отримати розрахункові значення *λ0*, *p, R* та *r* при двох температурах дозволяє розрахувати термічні коефіцієнти та похідні, що вказано в (2.4), за такими формулами:

Таблиця 2.1 містить результати порівняння експериментальних та розрахованих на основі рівняння (2.4) величин ТКО для двошарових та багатошарових плівкових систем. Таким чином, апробація моделі показала її точність до 20% с експериментальними результатами і можливість її використання для прогнозування величини ТКО в багатошарових плівках.

*Таблиця 2.1*

**Експериментальні та розраховані на основі рівняння (2.4) величини ТКО**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Плівкова система (d, нм) | β\*103, K-1 | β розр\*103, K-1 | |β - βрозр|/ β, % |
| Cu(30)/Cr(30)/П | 1,65 | 1,61 | 4,0 |
| Cu(25)/Cr(25)/П | 1,56 | 1,52 | 2,6 |
| Cu(30)/Cr(45)/П | 1,78 | 1,99 | 11,8 |
| Cu(40)/Cr(25)/Cu(55)/П | 1,25 | 1,28 | 2,4 |
| Cu(30)/Cr(25)/Cu(45)/П | 1,35 | 1,10 | 18,5 |

**РОЗДІЛ 3 МАГНІТООПІР, ЯКИЙ ПОВ’ЯЗАНИЙ ІЗ РОЗСІЮВАННЯМ ЕЛЕКТРОНІВ НА МАГНІТНИХ ҐРАНУЛАХ**

**3.1. Елементи теорії**

Електричний струм у провідниках обумовлений переміщенням слабо зв’язаних з йонами металів валентних електронів у напрямку прикладеного електричного поля. Він неминуче зазнає опору, складові якого мають різну природу походження.

По-перше, практично будь-яке провідне середовище у своїй кристалічній структурі має дефекти. Цими дефектами обумовлений залишковий питомий опір *ρ0*. По-друге, під час нагрівання кристалу зростає коливальний рух йонів ґратки, тобто зростає енергія фононів, на яких електрони теж розсіюються. Цей процес вносить свій фононний вклад у питомий опір матеріалу *ρΦ*.По-третє, на розсіювання електронів неминуче впливає зовнішнє магнітне поле й це зумовлює магнітний вклад *ρм* у загальний питомий опір.

Таким чином, розглянувши основні чинники виникнення питомого електричного опору ми можемо виразити загальний питомий електричний опір ρ у магнітних провідниках за правилом Меттіссена [22]:

*ρ(T)= ρ0+ ρΦ(T)+ ρм(Β, T)*

У співвідношенні показано, що фононна та магнітна складові питомого опору залежать від температури провідного середовища *T* та індукції зовнішнього магнітного поля *B*.

Механізм виникнення магніторезистивного ефекту можна пояснити за рахунок викривлення траєкторії руху електрона під впливом зовнішнього магнітного поля. Це так званий лоренцівський магніторезистивний ефект [20]. Сила, що діє на електрон у провіднику з боку електричного та магнітного полів та відхиляє його від прямолінійного руху визначається співвідношенням:

,

де ** - сила Лоренца, - електрична складова сили Лоренца,  - магнітна складова сили Лоренца.

Траєкторія руху електрона у зовнішньому магнітному полі з прямолінійної форми трансформується у форму ґвинтової лінії або циклоїди. В магнітному полі, паралельному електричному, електрон, що має швидкість υ∥ уздовж поля і υ⊥ - перпендикулярно полю, обертається по колу з радіусом R та кутовою швидкістю ωc [20]:

,

де В - величина індукції магнітного поля, а m\* - ефективна маса носіїв заряду.

Так як електричне поле не змінює υ⊥, а збільшує тільки υ∥, то стає зрозумілим, що в паралельних електричному і магнітному полях електрон рухається за ґвинтовою лінією з зростаючим кроком [20].

У схрещених електричному Е і магнітному В полях частинка, яка не має початкової швидкості, рухається по циклоїді: вона обертається по колу з радіусом [20]:

.

Окрім руху електрона в електричному та магнітному полях необхідно враховувати, що в речовині заряджена частинка розсіюється на йонах кристалічної решітки й після кожної такої взаємодії електрон має інші параметри свого руху [20] (див. рис. 3.1):

Таким чином, шлях проходження електрона в провідному середовищі збільшується, що призводить до зменшення струму, в порівнянні зі струмом, що проходить в провіднику за відсутності магнітного поля при одній і тій же прикладеній напрузі до провідника. Відповідно можна вважати, що електричний опір структури збільшився. В залежності від напрямку індукції

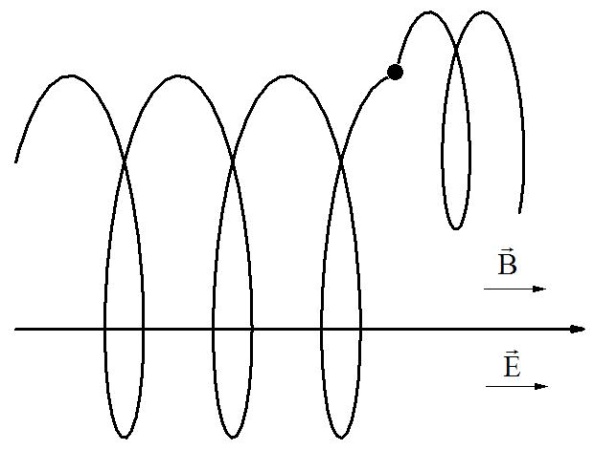


Рис.3.1. Траєкторія руху електрона в речовині під дією зовнішнього магнітного поля з індукцією  та електричного поля з напруженістю . Точкою зображено місце зіткнення електрона з перешкодою

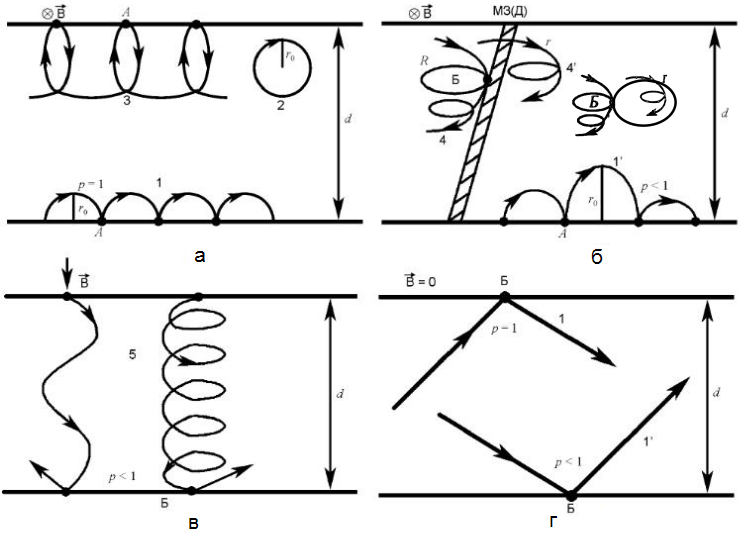


Рис.3.2. Траєкторії руху електронів у тонкій плівці при паралельній (а, б), перпендикулярній (в) орієнтації зовнішнього поля та при його відсутності (г); 1, 1', 3 – відсікання траєкторії електронів при дзеркальному (1, 3) та дифузному (1') відбитті електронів від поверхні плівки; 2- замкнута траєкторія електрона; 4 – дифузне або дзеркальне відбиття електрона від межі зерна (МЗ), або межі домена (МД); 4' – когерентне або некогерентне проходження МЗ (Д) електроном; 5 – гелікоїдальна траєкторія електронів. А, Б – точки відсікання траєкторії або відбиття електрона від поверхні плівки або МЗ (Д)

магнітного поля, структури та розміру матеріалу розрізняють такі механізми розсіювання електронів, як показано на рис. 3.1, в тому числі й розсіювання електронів на зернах (рис. 3.2 б) [24].

Таким чином, шлях проходження електрона в провідному середовищі збільшується, що призводить до зменшення струму, в порівнянні зі струмом, що проходить в провіднику за відсутності магнітного поля при одній і тій же прикладеній напрузі до провідника. Відповідно можна вважати, що електричний опір структури збільшився. В залежності від напрямку індукції магнітного поля, структури та розміру матеріалу розрізняють такі механізми розсіювання електронів, як показано на рис. 3.1, в тому числі й розсіювання електронів на зернах (рис. 3.2 б) [24].

Розсіювання електронів на ґранулах відбувається за рахунок відбиття електронів від ґранули або викривленні траєкторії (заломленні) електрона при проходженні границі ґранули.

**3.2. Результати розрахунків**

Магнітоопір ґранульованих плівкових матеріалів можна обчислити за функцією Брілюена [22]:

, (3.1)

де .

Звідси можна вивести формулу для знаходження температурного коефіцієнту опору (ТКО) βm:

, (3.2)

де S – загальний спін однієї ґранули феромагнетика в плівці, g – g-фактор (для електрона взято g=-2,002), μB – магнетон Бора (μB=9,274.10-24 Дж/Тл), B –індукція зовнішнього магнітного поля, k – стала Больцмана (k=1,38.10-23 Дж/К), T – температура зразка.

У ході нашого дослідження ми зафіксували індукцію магнітного поля (B = 1 Тл) та розрахували загальний спін частинки, який дозволяє одержати температурний коефіцієнт опору *β*≅0,035 К-1 при різних значеннях температур. Розрахунки проводилися з використанням программного забезпечення, розв’язок вищенаведеного рівняння проводився обчислювальним методом поділу відрізку навпіл. Результати розрахунків представленні в таблиці 3.1.

*Таблиця 3.1*

**Результати розрахунків загального спінового числа**

**(для величини β**≅**0,035 К-1)**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Температура, K | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 |
| Загальний спін частинки, μΒ | 27,5 | 27,5 | 28 | 28 | 28 |

Таким чином, як видно із результатів експерименту, загальний спін частинки, який необхідний для забезпечення температурного коефіцієнту опору βm≅0,035 К-1 з ростом температури зростає. Це доводить те, що з ростом температури намагніченість матеріалу спадає й загальний спін частинок як фактор внутрішнього магнітного поля матеріалу повинен компенсувати зміну ТКО.

**ВИСНОВКИ**

У роботі досліджені електрофізичні властивості ґранульованих плівкових сплавів і здійснений розрахунок внеску у величину ТКО процессу розсіювання електронів провідності на магнітних моментах ґранул. Результати роботи можна сформулювати таким чином:

1. Електронно-мікроскопічні дослідження вказують на те, що при пошаровій конденсації немагнітних і магнітних шарів із наступною термообробкою до 700-900 К формують ґранульований плівковий сплав із середнім розміром магнітних ґранул 2-10 нм.

2. Питомий опір ґранульованих зразків можна описати адитивним правилом Маттісена, згідно якого електричний опір спричиняється звичайним розсіюванням електронів провідності на дефектах, фононах і магнітних доменах матриці у вигляді твердого розчину, яка може бути слабомагнітним матеріалом, та спін-залежним розсіюванням на магнітних моментах ґранул

3. Електрофізичні властивості (питомий опір і ТКО) матриці повністю описуються у рамках напівкласичної моделі для ТКО, яка враховує залежність від температури не тільки СДВП, але й таких параметрів електроперенесення як p, r і Q; питомий опір, який обумовлений СЗРЕ на магнітних моментах ґранул, можна описати в рамках моделі М. Ксонтса та ін.

4. Виходячи із допущення, що два канали провідності (у матриці й при розсіюванні на ґранулах) не шунтують один одного, здійснений розрахунок величини магнітного моменту (спіна) ґранул; при допущенні *β* ≅ 0,035 К-1 величина *S* ≅ (27,5-28)μB.

5. У роботі було розглянуто головні аспекти магніторезистивних властивостей ґранульованих плівкових матеріалів, а саме природу виникнення таких властивостей, методи одержання та дослідження цих матеріалів та розраховано значення загального спіну феромагнітних ґранул при різних значеннях температур, за якого можна отримати певний температурний коефіцієнт опору.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Berkowitz A.E., Mitchell J.R., Carey M.J., Young A.P., Zhang S., Spada F.E., Parker F. T., Hutten A., Thomas G.: Giant magnetoresistance in heterogeneous Cu-Co alloys. Phys. Rev. Lett. **68**, 3745-3748 (1992).
2. Fert, A., Duvail, J., Valet, T.: Spin relaxation effects in the perpendicular magnetoresistance of magnetic multilayers. Phys. Rev. B **52**, 6513-6521 (1995).
3. Guslienko K.Yu.: Phenomenological theory of the giant magnetoresistance of ferromagnet-nonmagnetic metal granular media. Phys. Solid State **40** (10), 1697-1701 (1998).
4. Granovskii A. B., Vedyaev A. V., Kalitsov A. V.: Anisotropy of giant magnetoresistance in magnetic multilayers and granular films. Fizika Tverdogo Tela **37**, 337-343 (1995).
5. Granovsky A. B., Il’in M., Zhukov A., Zhukova V., Gonzales Kh.: Giant magnetoresistance of granular microwires: Spin-dependent scattering in integranular spacers. Phys. Solid State **53** (2), 320-322 (2011).
6. Protsenko S.I., Odnodvorets L.V., Cheshko I.V.: Fenomenological model of electrophysical properties of granular film alloys. Visnyk SumDU. Seria: Fizyka, matematyka, mekhanika, **1**, 22-27 (2008).
7. Odnodvorets L.V., Shumakova M.O., Protsenko I.Yu., Shabelnyk Yu.M., Shumakova N.I. Phenomenological Theory of Strain Effect in Granular Film Alloys / Proceedings of the International Conference «Nanomaterials: Applications and Properties”, 3, 1, 01NTF09 (2014).
8. Rizal C., Ueda Y., Karki B.R.: Magnetic properties of Fe/Cu multilayers prepared using pulsed-current electrodeposition. J. Nano- Electron. Phys. **4**, 01001-1 - 01001-3 (2012).
9. Оdnоdvоrets L. Influence оf magnetic field оn thermal cоefficient оf resistance оf the granular film allоys // Proceedings of the International Conference «Nanomaterials: Applications and Properties», **3**, 1, 02NNF13-4 (2014).
10. Kondrakhova D.M., Shabelnyk Yu.M. Synashenko O.V., Protsenko I.Yu.: Strukturno-fazovyi stan, elektrofizychni ta magnetorezystyvni vlastyvosti tverdykh rozchyniv u plivkovykh systemakh na osnovi Co i Cu abo Ag ta Fe i Cr abo Cu. Usp. Fiz. Met. **13**, 241–267 (2012).
11. Grunberg P., Barnas J., Saurenbach F., Fub J.A., Wolf A., Vohl M.: Layered magnetic structures: antiferromagnetic type interlayer coupling and magnetoresistance due to anparallel alignment. J. Mag. Magn. Mater. **93**, 58-66 (1993).
12. Rizal С., Niraula B.B.: Ferromagnetic Alloys: Magnetoresistance, Microstructure, Magnetism, and Beyond (Review). J. Nano- Electron. Phys. **7** (4), 04068 (2015).
13. Peng X., Morrone A., Nikolaev K., Kief M., Ostrowski M.: Effect of material selection and background impurity on interface property and resulted CIP-GMR performance. J. Mag. Magn. Mater. **321**, 2902-2910 (2009).
14. Wang J.-Q., Xiao G.: Transition-metal granular solids: Microstructure, magnetic properties, and giant magnetoresistance. Phys. Rev. B **49**, 3982-3996 (1994).
15. Bakonyi I., Peter L. Electrodeposited multilayer films with giant magnetoresistance (GMR): Progress and problems. Prog. Mater, Sci. **55**, 107 (2010).
16. Nepijko S.A., Kutnyakhov D., Protsenko S.I., Odnodvorets L.V., Schönhense G.: Sensor and microelectronic elements based on nanoscale granular systems. J. Nanopart Res **13**, 6263-6281 (2011).
17. Peng D.L., Wang J., Wang L. Liu X., Wang Z., Chen Y. Electron transport properties of magnetic granular films. Sci China-Phys Mech Astron. **56**, 15-28 (2013).
18. Agostinelli E., Fiorani D., Foglia S., Magnetic and transport properties of Co-Ag nanocrystalline particles // Mater. Sci. Eng. C. **19**, 151 (2002).
19. Брауде И.С., Гальцов Н.Н., Москаленко В.А., Смирнов А.Р., Физика низких температур, **37**,1307(2011).
20. Лукашевич М. Г.. Введение в магнитоэлектронику: курс лекций для студентов физического факультета . – Мн.: БГУ, 2003. – 73 с.
21. Проценко І.Ю., Саєнко В.А. Тонкі металеві плівки (технологія та властивості): навч.посібник. – Суми; СумДУ, 2002. – 187 с.
22. Csontos M.,Balogh J., Kaptas D.,Kiss L. F., Mihaly G. Magnetic and Transport Properties of Fe-Ag granular multilayers, Phys. Rev.B, **73**, 184412 (2005).
23. Ткач О. П., Однодворець Л. В., Непийко С., Проценко С. І. Магніторезистивні властивості нанорозмірних плівкових систем на основі Fe і Pd , Фізична інженерія поверхні, **7**, 3, 256 (2009).