

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики

«До захисту допущено»

Завідувачка кафедри

_____ Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ

_____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

за спеціальністю 171 «Електроніка» освітньо-наукової програми «Електронні інформаційні системи»

на тему «Мемристори: фізичні принципи роботи, робочі характеристики»

Здобувача групи ЕП.м-21н Жаботинського Владислава Ігоревича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Владислав ЖАБОТИНСЬКИЙ

Науковий керівник

канд. фіз.-мат. наук, доцент

_____ Ірина ПАЗУХА

Суми 2024

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра електроніки, загальної та прикладної фізики
Спеціальність 171 – Електроніка, освітньо-професійна програма
«Електронні інформаційні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри ЕЗПФ
Лариса ОДНОДВОРЕЦЬ
«01» травня 2024 року

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Жаботинського Владислава Ігоревича

1. Тема роботи: Мемристори: фізичні принципи роботи, робочі характеристики затверджена наказом по університету від «16» квітня 2024 р., № 0394-VI

2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 16 травня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи (актуальність, мета)

Основною особливістю мемристорів є можливість перемикавання режимів високої та низької провідності під дією зовнішнього електричного поля. Даний функціональний елемент зазвичай представляє собою тришарову структуру, що складається з двох шарів металу, розділених діелектричним прошарком. Стан діелектричної матриці може змінюватися внаслідок перерозподілу активного матеріалу в ньому, що призводить до утворення або руйнування нового фазового стану, що характеризується високою провідністю. Матеріали, які використовуються для створення таких елементів, досить різноманітні. Наприклад, для виготовлення електродів часто використовують прості метали (Pt, Au, Ag та ін.), тоді як шар ізолятора може бути створений на основі різних оксидів (TiO₂, HfO₂ та ін.) або двовимірних матеріалів (MoS₂, h-BN та ін.).

Мета даної роботи полягає у вивченні принципу роботи та основних робочих характеристик мемристорів, а також у експериментальному дослідженні магніторезистивних властивостей композитних матеріалів, сформованих на основі феромагнітного металу Fe та діелектрику SiO₂ методом пошарової конденсації у вакуумі як можливих функціональних матеріалів мемристорів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить їх розробити)

1. Фізичні принципи роботи та конструкція мемристорів.
2. Галузі застосування мемристорів.

3. Методика і техніка експерименту.
4. Експериментальні результати.
5. Висновки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
 - Слайди № 1-2 – Загальна інформація
 - Слайди № 3-4 – Мемристори: фізичні принципи роботи, робочі характеристики
 - Слайди № 5-6 – Методика і техніка експерименту
 - Слайди № 7-10 – Експериментальні результати
 - Слайд № 11 – Висновки
6. Дата видачі завдання 01.05.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістрів	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз літературних даних	до 04.05.2024 р.	<i>вик.</i>
2.	Проведення експерименту, моделювання, розрахунків, обробка результатів	до 14.05.2024 р.	<i>вик.</i>
3.	Підготовка тексту магістерської роботи.	до 16.05.2024 р.	<i>вик.</i>
4.	Попередній захист роботи	17.05.2024 р., 10 ⁰⁰ (онлайн)	<i>вик.</i>
5.	Захист роботи в екзаменаційній комісії	21.05.2023 р. – 24.05.2023 р., 11 ³⁰ (онлайн)	

Здобувач вищої освіти

В.І. Жаботинський

Керівник роботи

І.М. Пазуха

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота викладена на 33 сторінках, зокрема, містить 20 рисунків, список використаних джерел із 20 найменувань.

Мемристори, що представляють собою пасивні електронні компоненти, здатні запам'ятовувати свій стан опору, знаходять широке практичне застосування в сучасній електроніці. Вони ефективно використовуються в нейроморфних обчисленнях, енергоефективній пам'яті, програмованих логічних схемах, а також у біомедичних пристроях. Правильно обраний мемристор не лише допомагає вирішити проблеми, пов'язані із зберіганням та обробкою інформації, але й спрощує архітектуру електронних схем та зменшує споживання енергії, підвищуючи загальну ефективність системи.

Мета кваліфікаційної роботи магістра полягає у вивченні принципу роботи та основних робочих характеристик мемристорів, а також в експериментальному дослідженні магніторезистивних властивостей композитних матеріалів, сформованих на основі феромагнітного металу Fe та діелектрику SiO₂ методом пошарової конденсації у вакуумі як можливих функціональних матеріалів мемристорів.

Для проведення експериментальних досліджень магніторезистивних властивостей композитних матеріалів в умовах термообробки як можливих функціональних матеріалів мемристорів була отримана серія багатошарових структур [Fe(d_{Fe})/SiO₂(3)]₁₀/П з $d_{Fe} = 2-8$ нм. Встановлено, що для свіжосконденсованих структур польові залежності магнітоопору мають анізотропний характер незалежно від товщини феромагнітних шарів. Після термообробки зразків [Fe(d_{Fe})/SiO₂(3)]₁₀/П з $d_{Fe} = 4$ та 5 нм за температури 500 К фіксується перехід до ізотропного характеру польових залежностей магнітоопору, максимальні значення якого є незначним і не перевищує 0,1 %.

Ключові слова: мемристор, анізотропний магнітоопір, ізотропні польові залежності, термообробка.

ЗМІСТ

	с.
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 МЕМРИСТОРИ: ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ, РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ	7
1.1 Фізичні принципи роботи та конструкція мемристорів.....	7
1.2 Галузі застосування мемристорів	11
1.2.1 Мемристорна логіка.....	11
1.2.2 Запам'ятовувальні пристрої на основі мемристорів	13
1.2.3 Мемристорні фільтри та осцилятори	15
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	18
2.1 Методика отримання композиційних плівкових матеріалів на основі Fe і SiO ₂	19
2.2 Методика дослідження магніторезистивних властивостей	21
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ	24
ВИСНОВКИ	31
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	32

ВСТУП

Мемристор - це двополюсний електричний компонент, який може змінювати свій опір залежно від заряду, що проходить через нього. Термін «мемристор» був запропонований Леоном Чуа в 1971 році як четвертий основний пасивний елемент в електричних колах, на рівні з резисторами, конденсаторами та індукторами. Однак перший практичний мемристор був вперше розроблений у 2008 році групою дослідників з Hewlett-Packard [1].

Типова структура мемристорів - це тришарова система, що складається з двох металевих контактів, розділених перемикаючим прошарком. Як матеріал перемикаючого шару застосовують напівпровідникові та діелектричні матеріали. Розвиток технологій формування функціональних елементів мемристорів та використання нових матеріалів дозволяє застосувати інтегровані мемристори перемикачів для створення енергонезалежній пам'яті.

Дослідження мемристорів є важливим, оскільки мемристори мають багато переваг перед іншими електронними компонентами. Мемристори можуть зберігати інформацію без постійного живлення і тому можуть бути придатними для створення енергонезалежної пам'яті. Мемристори також можуть виконувати логічні операції та моделювати функціональність нейронних мереж, відкриваючи нові можливості для обробки даних. Крім того, мемристори характеризуються високою щільністю інтеграції, низьким енергоспоживанням і великим проміжком контролю резистивних властивостей [2-4].

Мета даної роботи полягає у вивченні принципу роботи та основних робочих характеристик мемристорів, а також у в експериментальному дослідженні магніторезистивних властивостей композитних матеріалів, сформованих на основі феромагнітного металу Fe та діелектрику SiO₂ методом пошарової конденсації у вакуумі як можливих функціональних матеріалів мемристорів.

Результати даної роботи були представлені на Міжнародній науковій конференції «Фізика, електроніка, електротехніка :: ФЕЕ» (м. Суми, 2023, 2024).

РОЗДІЛ 1

МЕМРИСТОРИ: ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ, РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1 Фізичні принципи роботи та конструкція мемристорів

Мемристор (від англ. «memory» — пам'ять і англ. «resister» — електричний опір) — пасивний електричний елемент, двополюсний пристрій у мікроелектроніці, здатний змінювати свій опір залежно від заряду, що протікає через нього. Це можна описати як двополюсний пристрій з нелінійними характеристиками напруги/струму, що володіє гістерезисом. Термін «мемристор» був запропонований Леоном Чуа в 1971 році як четвертий фундаментальний пасивний елемент в електричних колах[1].

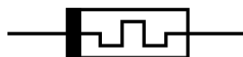


Рисунок 1.1 – Позначення мемристора на принципових електричних схемах [1]

Л. Чуа досліджував математичні залежності між чотирма основними змінними електричних кіл: струмом I , напругою V , зарядом Q і магнітним потоком Φ . Він показав, що для кожної пари змінних існує лінійне або нелінійне диференціальне рівняння, яке характеризує поведінку елементів у колі.

Для мемристорів це рівняння виглядає так:

$$d\Phi = M dQ \quad (1.1)$$

За словами Грега Шнайдера (спеціаліста НР), мемристори будуть одними з ключових елементів нанопристроїв, які імітують роботу людського мозку (невеликі нанопристрої об'єднані в єдину мережу, а мемристори відповідні за «штучний інтелект») [4].

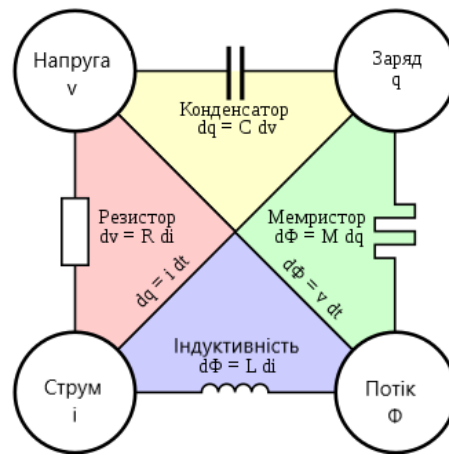


Рисунок 1.2 – Співвідношення між чотирма фундаментальними електричними змінними та двополюсниками, що зв'язують ці змінні [2]

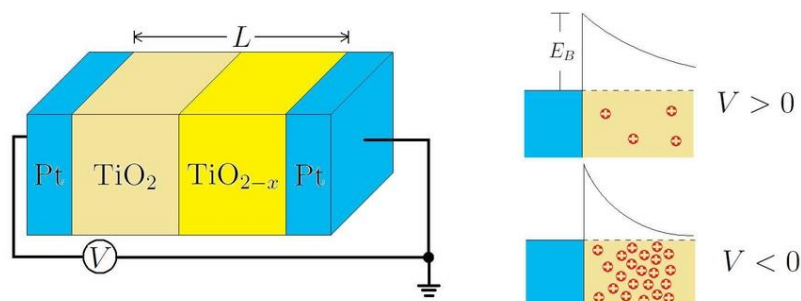


Рисунок 1.3 – Конструкція мемристора [2]

Конструкція мемристора показана нижче. Опір мемристора залежить насамперед від його розміру, прикладеної напруги та полярності. Оскільки напруги немає, опір залишається постійним, отже, мемристор нелінійна складова пам'яті.

Мемристори використовують діоксид титану (TiO_2) як матеріал опору. Він працює краще, ніж інші типи матеріалів, як той самий діоксид кремнію наприклад. Коли до платинові електрода подається напруга, атоми TiO_2 поширюються вліво і вправо в матеріалі залежно від полярності напруги, в результаті чого платиновий електрод стає тоншим або товщим, а опір змінюється.

Для моделювання властивостей і поведінки мемристорів потрібна модель, яка описує зв'язок між напругою, струмом і опором мемристора.

Однією з найбільш складних і точних моделей мемристорів є нелінійна модель Био-Флаксона, запропонована в 2012 році[5].

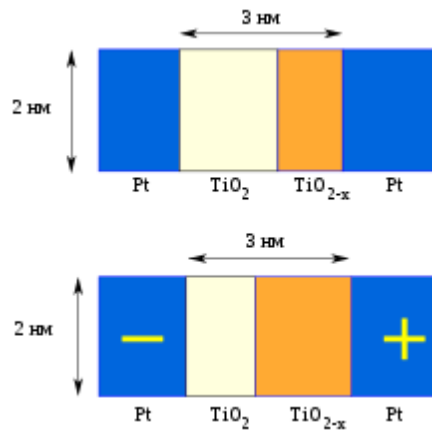


Рисунок 1.4 – Мемристор на основі двоокису титану з домішками платини за лінійною моделлю Струкова [4]

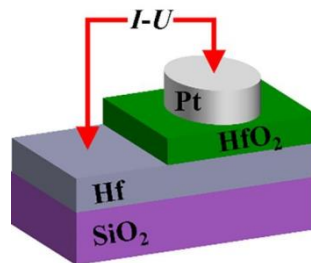


Рисунок 1.5 – Мемристор на основі оксиду гафнію з домішками платини за нелінійною моделлю Био-Флаксона [4]

Ця модель описує мемристор на основі легovanого оксиду гафнію. Ця модель може чітко демонструє петлю гістерезису та інші властивості мемристора.

Нелінійна модель Био-Флаксона виглядає так:

$$V = R_{ON} w(Q) I + R_{OFF} (1 - w(Q)) I \quad (1.2)$$

$$dw / dt = \mu V / D (1 - w) \exp(-E_A / k_B T) \quad (1.3)$$

де V - напруга на мемристорі, I - струм через мемристор, w - нормалізована ширина домішкового шару, R_{ON} і R_{OFF} - опори у станах низького і високого опору відповідно, μ - рухливість домішок, D - товщина оксиду гафнію, E_A - енергія активації домішок, k_B - стала Больцмана, T - температура[6].

На додаток до цих двох моделей існують також інші моделі мемристорів, які враховують різні фактори, такі як температура, частота, шум, дефекти та неоднорідності.

Найпоширенішим методом вимірювання робочих характеристик мемристора виступає вольт-амперна характеристика (ВАХ), яка вимірює залежність напруги мемристора від струму, що протікає через нього. ВАХ можна визначити за допомогою вольтметра, амперметра або джерела живлення, підключеного до мемристора. Змінюючи напругу джерела живлення, можна отримати діапазон точок ВАХ. Для мемристорів ВАХ приймає форму петлі гістерезису, яка описує властивості пам'яті. Форма та розмір петлі гістерезису залежить від параметрів мемристора та типу прикладеної напруги [3].

ВАХ дозволяє оцінити властивості мемристора, такі як:

1. Опір між станами низького та високого опору: Мемристори можуть мати великі відмінності в опорі між станами низького та високого опору. У стані низького опору опір дуже низький, близький до нуля. В умовах високого опору опір може бути навіть вищим, порядку кількох МОм. Значення опору залежить від історії стимуляції мемристора та може змінюватися з часом.

2. Швидкість перемикавання між станами: Мемристори можуть виконувати дуже швидке перемикавання між станами низького та високого опору. Швидкість

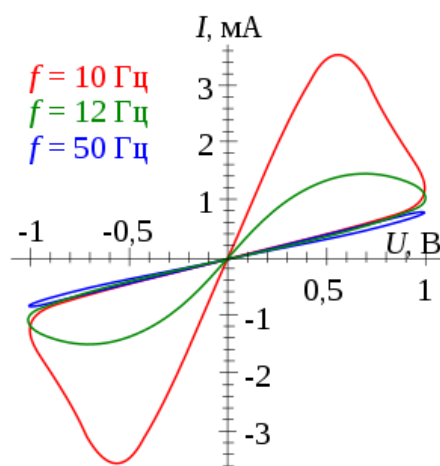


Рисунок 1.6 – Вольт-амперні характеристики зразка TiO_2 мемристора зняті при трьох різних частотах прикладеної напруги [7]

варіюється в залежності від розміру мемристора, матеріалу та технології виготовлення.

3. Енергоефективність: Мемристор відомий своєю енергоефективністю. Він може зберігати стан опору безпосередньо без використання додаткової енергії. Крім того, мемристори зазвичай споживають дуже мало енергії під час зміни станів.

4. Стабільність: Мемристори стабільні і можуть підтримувати стан опору протягом тривалого часу без будь-яких додаткових зусиль. Однак деякі типи мемристорів можуть з часом втрачати опір.

Важливо відзначити, що крім ВАХ, для дослідження мемристорів також можна використовувати методи вимірювання, наприклад: частотна характеристика, імпедансна спектроскопія та скануюча електронна мікроскопія [8].

1.2 Галузі застосування мемристорів

1.2.1 Мемристорна логіка

Мемристори можуть бути використані для реалізації логічних операцій, запам'ятовуючих пристроїв та інших функціональних елементів цифрових електронних пристроїв. Мемристори мають певні переваги у швидкості, енергоефективності та масштабованості перед транзисторами та іншими компонентами.

Одним із застосувань мемристорів для логічних операцій є мемристорна логіка, де мемристори поєднуються з іншими компонентами, такими як діоди, транзистори та резистори, для створення логічних елементів.

Мемристорна логіка — це альтернативний підхід до реалізації логічних операцій, який використовує мемристор як основний компонент для створення логічних схем. Мемристорна логіка поєднує мемристори з іншими активними компонентами для створення логічних схем, таких як І, АБО та НІ. Ці логічні вентиля можна додатково комбінувати для створення більш складних логічних функцій і логічних схем [9].

Наприклад, для реалізації логічної операції "АБО" можна використати схему з двох мемристорів і одного діода, як показано на рисунку. Для реалізації логічної операції "І" можна використати схему з двох мемристорів і одного транзистора, як показано на рисунку 1.6. Для реалізації логічної операції "НЕ" можна використати схему з одного мемристора і одного резистора, як показано на рисунку. Основними перевагами мемристорної логіки є її низьке енергоспоживання, швидке перемикання, легка інтеграція та енергонезалежність.

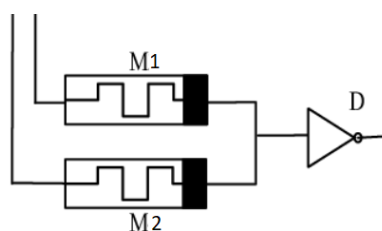


Рисунок 1.7 – Схема з двох мемристорів і одного діода для реалізації логічної операції "АБО" [10]

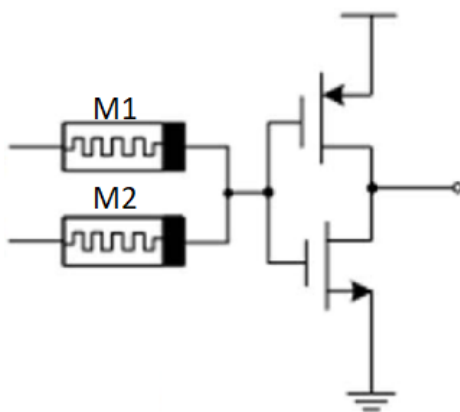


Рисунок 1.8 – схему з двох мемристорів і одного транзистора для реалізації логічної операції "І" [10]

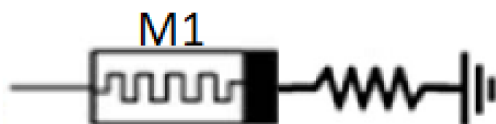


Рисунок 1.9 – схему з одного мемристора і одного резистора для реалізації логічної операції "НЕ"[10]

1.2.2 Запам'ятовувальні пристрої на основі мемристорів

Мемристори також можна використовувати для створення запам'ятовуючих пристроїв, таких як RAM (оперативна пам'ять), флеш-пам'ять і магнітна пам'ять.

Memristive Random Access Memory (ReRAM) — це спосіб створення запам'ятовуючих пристроїв за допомогою мемристора. У таких запам'ятовувачах мемристори розташовані у формі матриці, і опір можна змінювати між станами низького та високого опору шляхом застосування імпульсів напруги.

Ця техніка дозволяє зберігати інформацію в мемристорі шляхом введення або видалення заряду у вигляді станів низького або високого опору. Стан мемристора змінюється за допомогою імпульсів напруги, забезпечуючи швидке перемикання між різними станами.

Кожен мемристор у матриці представляє біт інформації, або 0, або 1. Для читання та запису даних використовуються спеціальні схеми, які можуть звертатися до окремих мемристорів або їх груп. Мемристивна пам'ять пропонує такі переваги, як велика ємність, швидкість і енергоефективність [7-9].

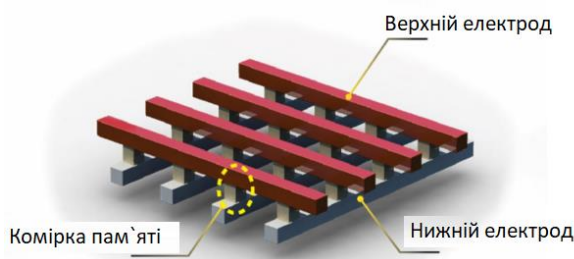


Рисунок 1.10 – схему матриці з мемристорів в мемристивній пам'яті з довільним доступом [11]

Memristive Random Access Memory (ReRAM) пропонує кілька переваг. По-перше, мемристори можуть бути організовані в матричну структуру, що забезпечує високу щільність зберігання даних.

По-друге, швидкість доступу до даних висока, оскільки імпульси напруги можна використовувати для швидкого та ефективного виконання операцій читання та запису[11].

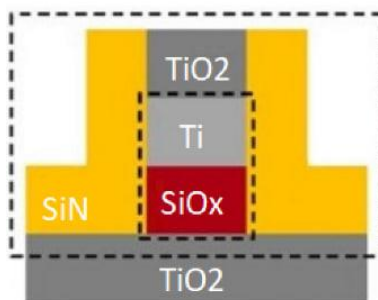


Рисунок 1.11 – комірка пам'яті ReFLASH [[11]]

По-третє, цю технологію можна легко інтегрувати з іншими елементами для створення компактних накопичувачів. Мемристивна пам'ять може зберігати дані в енергонезалежному режимі, дозволяючи користувачу зберігати інформацію навіть при вимкненому живленні [8].

Іншим способом використання мемристорів для реалізації запам'ятовуючих пристроїв є мемристивна флеш-пам'ять (ReFLASH). Він поєднує в собі мемристор із традиційною флеш-елементом, який складається з плаваючого та керуючого електродів, розділених тонким шаром діелектрика.

Мемристор використовується для керування напругою на керуючому електроді, а прикладений імпульс напруги можна використовувати для зміни стану флеш-комірки.

Різниця між мемристивною флеш-пам'яттю (ReFLASH) і оперативною пам'яттю (ReRAM) полягає в наступному: Мемристивна флеш-пам'ять має фіксовану структуру, у якій мемристори організовані в матриці, і доступ до них здійснюється за допомогою адресації рядків і стовпців. Оскільки дані записуються та зчитуються блоками або сторінками, для зміни окремих бітів може знадобитися додаткове стирання.

Мемристивна пам'ять з довільним доступом (ReRAM), з іншого боку, має більш гнучку структуру та може мати прямий доступ до кожного мемристора в матриці. Кожен мемристор адресується окремо, що дозволяє читати та записувати дані в будь-якій точці пам'яті без виконання додаткових стирань або читання цілих блоків. Це підвищує гнучкість і швидкість доступу до даних, особливо для випадкового читання та запису адрес [12].

1.2.3 Мемристорні фільтри та осцилятори

Мемристори можна використовувати для реалізації фільтрів, генераторів, підсилювачів та інших функціональних елементів аналогових електронних пристроїв. Мемристори пропонують переваги перед традиційними резисторами, конденсаторами та котушками індуктивності щодо нелінійності, частотної залежності та динамічного налаштування.

Одним із способів використання мемристорів для реалізації фільтрів є мемристивні фільтри. Це передбачає створення схем із мемристорами та іншими елементами, які пропускають сигнали в певних діапазонах частот і пригнічують сигнали в інших діапазонах частот.

Мемристивні фільтри — це електричні фільтри, які використовують мемристори як основні елементи обробки сигналу. Мемристор - це запам'ятовуючий елемент зі змінним опором, який може змінювати частотні характеристики фільтра в залежності від електричного сигналу, що проходить через фільтр.

Принцип роботи мемристивних фільтрів заснований на залежності опору мемристора від прикладеної напруги або струму. Зміна опору мемристора може змінити передаточну функцію фільтра, яка визначає частоту і спектральні характеристики сигналу, що проходить через фільтр.

Мемристивні фільтри мають ряд переваг перед традиційними фільтрами на основі резисторів, конденсаторів і індукторів. Він має потенціал бути більш енергоефективним, компактним і гнучким у налаштуванні частотної характеристики [13].

Для реалізації фільтра низьких частот можна використовувати схему мемристора і конденсатора, як показано на малюнку 1.12а. Щоб реалізувати високочастотний фільтр, ви можете використовувати схеми з того самого набору елементів, просто змінивши спосіб їх інтеграції, як показано на малюнку 1.12б. Проте слід зазначити, що мемристивні фільтри є предметом активних досліджень і їх розробка ще триває.

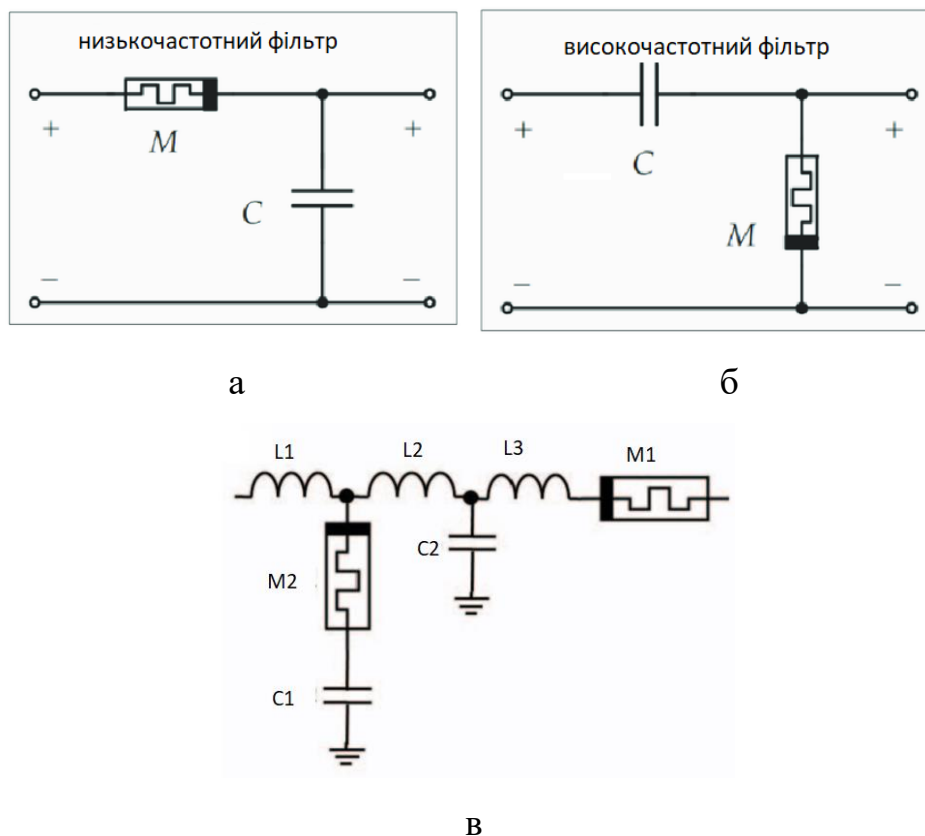


Рисунок 1.12 – Низькочастотний фільтр з одного мемристора і одного конденсатора (а), високочастотний фільтр з одного мемристора і одного конденсатора (б) та хаотичний осцилятор з двох мемристорів і двох конденсаторів, а також трьох індуктивностей [14]

Вони стикаються з такими викликами, як: нерівномірність і ненадійність.

Іншим способом реалізації осцилятора з використанням мемристорів є мемристивний осцилятор. Це передбачає створення схеми з використанням мемристорів та інших елементів, які можуть генерувати періодичний сигнал певної частоти та форми.

Мемристивний осцилятор - це електричне коло, яке використовує мемристор як один із основних елементів для генерації коливань. Як елемент із змінним опором, мемристор змінює електричний стан і змушує осцилятор коливатися.

Робота мемристивних осциляторів заснована на зміні опору мемристора у відповідь на протікання через нього електричного збудження. Це створює змінну напругу або змінний струм залежно від опору мемристора. Це може викликати коливання через взаємодію з іншими компонентами схеми.

Мемристивні осцилятори мають потенційне застосування в електроніці, системах зв'язку та, його можна використовувати для генерації сигналу, модуляції, генератора шуму. Наприклад, для реалізації хаотичного генератора можна використати схему двох мемристивів, двох конденсаторів і трьох котушок індуктивності, як показано на рисунку. Мемристори зазвичай підключаються до ланцюга RC (резистор/конденсатор) або ланцюга генератора LC (індуктор/конденсатор), що дозволяє контролювати частоту коливань.

Основними характеристиками мемристивних осциляторів є:

1. Частота коливань: це частота, на якій система створює коливання. Вона залежить від параметрів мемристивів, RC або LC елементів та інших компонентів системи.
2. Амплітуда сигналу: це максимальне значення сигналу, створеного осцилятором. Керування може відбуватися через омичні або ємнісні ділянки напруги.
3. Стабільність: це здатність генератора підтримувати стабільне коливання з мінімальними збуреннями частоти та дрейфами.
4. Швидкість перемикавання: це швидкість зміни опору мемристива, яка впливає на частоту коливань і стабільність системи.
5. Енергоефективність: це відношення споживання енергії до потужності випромінюваної вібрації. Мемристив є енергоефективним, оскільки при зміні опору використовується лише невелика кількість енергії.
6. Діапазон робочих частот: це діапазон частот, в якому генератор може ефективно генерувати коливання [13, 14].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Властивості наноелектронних або спінтронних елементів, сформованих на основі феромагнітних метало-діелектричних композитів, сильно залежать не тільки від об'ємної концентрації та розміру форми магнітних частинок, але й від типу розподілу в об'ємі провідних частинок. або діелектрична матриця.

Магніторезистивні властивості магнітно-неоднорідних плівок, виготовлених з феромагнітних металів (сплавів) та діелектричних матеріалів, можуть значно відрізнятися від властивостей гранульованих плівок через різноманітні механізми магнітоопору. Ці механізми є складними і ще не до кінця вивченими. Встановлено, що механізми переносу заряду та спіну відіграють важливу роль в острівних плівках та феромагнітних метало-діелектричних композитах. Аналіз результатів експериментальних досліджень магнітотранспортних властивостей таких систем [8-10] показує, що острівні плівки та феромагнітні метало-діелектричні композити є перспективними для дослідження різних механізмів їх магнітоопору. Металокерамічні плівки, отримані методом одночасної конденсації феромагнітного металу та діелектрика, мають багато структурних особливостей, що також заслуговує на подальше вивчення.

Спочатку формуються структури з широким розподілом зерен за розмірами, що включають дрібні кристалічні області приблизно 1 нм у діаметрі, середньокристалічні області розміром 3–5 нм та їх агрегати. Низька рухливість кластерів оксидів сповільнює процес коалесценції та рекристалізації металевих частинок, що призводить до формування композитного матеріалу з діелектричною аморфною матрицею, в якій міститься значна кількість атомів феромагнітного металу. Ці структурні особливості істотно впливають на магніторезистивні властивості матеріалів. Процес тунелювання відбувається через кілька перколяційних проходів, кожен з яких характеризується розміром частинок і своїм внеском у магнітоопір, що ускладнює аналітичний опис магнітоопору. Зміна розміру магнітних частинок усередині металокерамічної плівки є дуже складним

процесом, що робить аналіз внеску тунельних ефектів вищого порядку важким. Тому наразі відсутня чітка теорія, яка б могла кількісно пояснити спін-зберігаючий перенос електронів під час тунелювання вищого порядку при високих температурах.

У цьому дослідженні структура формується за допомогою методу пошарової конденсації, а потім піддається термічній обробці. Цей процес призводить до отримання композитного матеріалу, що складається з діелектричної аморфної матриці з магнітними частинками, розмір яких може бути регульованим за потребою. У результаті такої обробки, матеріал не містить атомів феромагнітного металу, але має діелектричну аморфну матрицю приблизно однакового розміру[15].

2.1 Методика отримання композиційних плівкових матеріалів на основі Fe і SiO₂

Композитний матеріал, що містить у собі феромагнетик Fe та діелектрик SiO₂, був нанесений на листову підкладку шляхом пошарової електронно-променевої конденсації у вакуумі ВУП-5М при залишковому атмосферному тиску 10⁴ Па та температурі 300К.

Товщина шару Fe варіювалася від 2 до 8 нм, тоді як товщина шару SiO₂ залишалася постійною і дорівнювала 3 нм за допомогою кристала кварцу. Контроль здійснювався за допомогою кварцового резонатора з точністю до 10%. Вибір товщини шару базувався на складності отримання шаруватої структури при формуванні зразка, схематично зображеної на рисунку 2.2.

Підкладкотримач був створений за допомогою спеціальної форми, яка дозволяла осаджувати до 10 зразків різної товщини за один технічний цикл і мала вбудований нагрівач для підігріву зразків. Температуру підкладки під час осадження контролювали за допомогою термопари.



Рисунок 2.1 - Робоча камера установки ВУП-5М: 1 – електронно-променеві гармати, 2 – кварцеві резонатори, 3 – ситалова підкладка, 4 – мікроскопічна сіточка

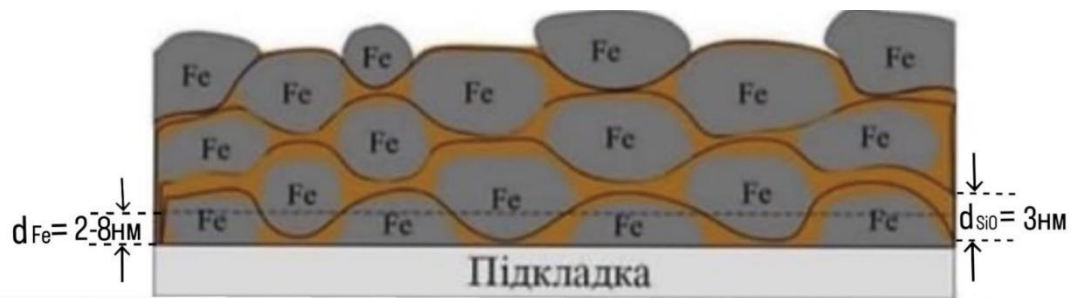


Рисунок 2.2 - Схематичне зображення структури шаруватих плівкових зразків $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_2(3)]_{10}/\text{П}$. Із роботи [16]

Для визначення ефективної товщини утворених зразків використовувалася формула:

$$d = \frac{N_q \cdot \rho_q}{\rho_f \cdot f^2} \cdot (f_q - f), \quad (2.1)$$

де $N_q = 1,668 \cdot 10^5$ Гц·см, частотна стала для сколу кварцового кристалу;

$\rho_q = 2,65$ г/см³, густина кварцу;

ρ_f – густина матеріалу, що конденсувався;

f_q – резонансна частота кварцової пластини до осадження на неї відповідного матеріалу;

f – резонансні частоти кварцової пластини після осадження на відповідного матеріалу.

Осадження зразків проводилося разом із спеціально розробленим підкладкотримачем, який може одночасно утримувати до 10 підкладок, розміщених між кристалічними порожнинами.

Програма контролю швидкості осадження використовувала дві кварцові пластини з двох джерел одночасно для контролю швидкості конденсації та підтримки стехіометрії по всій товщині системи осадження. Ефективну товщину плівки кожного компонента в кожній точці на підкладці розраховували за допомогою наступного рівняння для точкового випарника.

$$d_1 = d_{01} \cdot \left[1 + \left(\frac{l_1}{h} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}}, \quad d_2 = d_{02} \cdot \left[1 + \left(\frac{l_2}{h} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}}, \quad (2.2)$$

де d_0 – товщина плівки в точці над випарником.

2.2 Методика дослідження магніторезистивних властивостей

Щоб дослідити магніторезистивні властивості щойно конденсованої та термічно обробленої структури плівкового шару, були проведені експерименти при кімнатній температурі ($T = 300$ К) за допомогою чотириточкової схеми вимірювання електричного опору в присутності змінного магнітного поля. Магнітне поле створювалося електромагнітом і максимальне значення магнітної індукції B становило 600 мТл. Зразок, що досліджується, закріплюють на рухомому столику, розміщеному між сердечниками магнітів. Конструкція столика дозволяє обертати зразок для зміни кута між площиною зразка та напрямком ліній магнітної індукції [17].

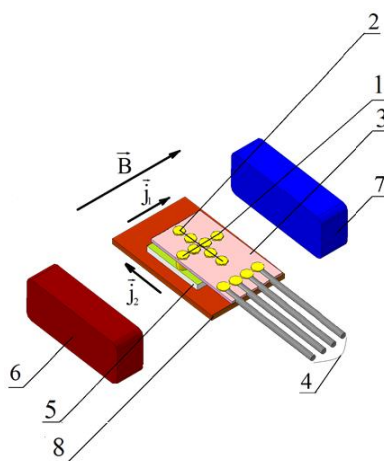


Рисунок 2.3 – Схематичне підключення контактів та розташування зразка по відношенню до полюсів магніту при вимірюванні магнітоопору у поздовжній та поперечній геометріях вимірювання: 1, 2 – притискні контакти; 3 – підкладка з притискними контактами; 4 – виводи для підключення омметра; 5 – досліджуваний зразок; 6, 7 – електромагніти; 8 – підкладкотримач [16]

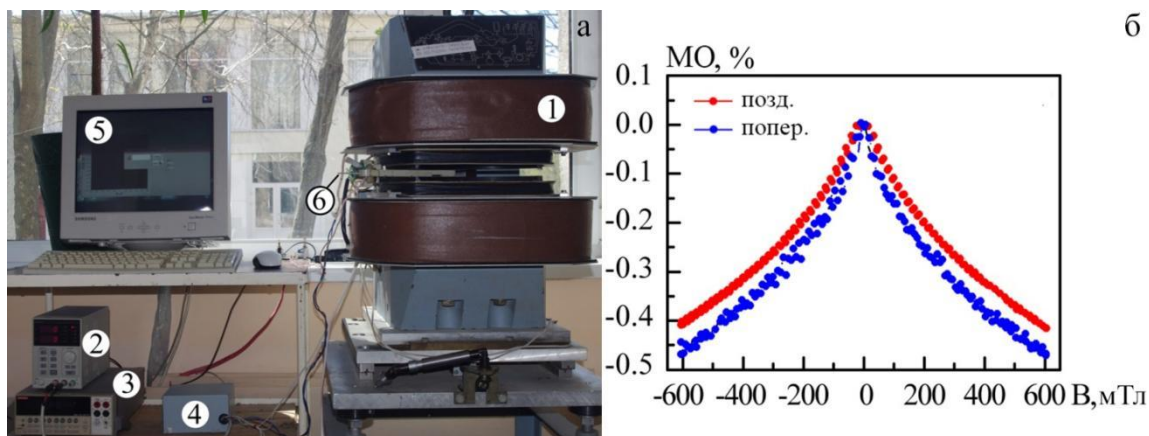


Рисунок 2.4 – Автоматизований комплекс для дослідження магніторезистивних властивостей (а): 1 – електромагніти; 2 – блок живлення Korad KA3005P; 3 – мультиметр Keithley 2000D; 4 – блок реле-перемикачів; 5 – програмне середовище LabVIEW; 6 – модуль повороту зразка; приклад залежностей $MO(B)$ (б) [16]

Ця конфігурація дозволяла вимірювати в двох геометріях: вертикальній і горизонтальній. Для цього контакти, до яких подається струм (зазвичай $I = 1$ мА) і вимірюється напруга, розташовуються під прямим кутом один до одного.

Для автоматизації процесу вимірювань розроблені спеціальні програми та відповідне обладнання. До складу автоматичного комплексу входили електромагніт, джерело живлення електромагніту, мультиметр для вимірювання опору, аналого-цифровий перетворювач, релейна система зміни полярності магнітного поля і модуль обертання зразка. Процес вимірювання проводився в автоматичному режимі, що забезпечувало точність і достовірність дослідження. Детальну інформацію про принцип функціонування та метод вимірювання можна знайти у відповідній публікації [18].

Розрахунки величини магнітоопору проводилися за співвідношенням:

$$MO = \frac{\Delta R}{R(0)} = \frac{R(B) - R(0)}{R(0)}, \quad (2.3)$$

де $R(B)$ – опір плівки при заданому полі; $R(0)$ – опір плівки за відсутності зовнішнього магнітного поля.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Розглянемо результати експериментальних досліджень магніторезистивних властивостей свіжосконденсованих $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_2(3)]_{10}/\text{П}$ в інтервалі товщин шарів $d_{\text{Fe}} = 2-8$ нм. На рисунках 3.1-3.4 наведені польові залежності магнітоопору для системи $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_2(3)]_{10}/\text{S}$ за $d_{\text{Fe}} = 4-8$ нм після конденсації (рис. 3.1) та термообробки за температур 400 К (рис. 3.2), 500 К (рис. 3.3.) та 600 К. Як видно з рисунку 3.1 для всіх зразків, незалежно від ефективної товщини шарів Fe, фіксується анізотропний магнітоопір, характерний для однорідних феромагнітних матеріалів, причиною якого є спін-орбітальна взаємодія. Такі свіжосконденсовані структури складаються з електрично-суцільних шарів Fe. Також при $d_{\text{SiO}_2} = 3$ нм діелектричні шари можуть бути структурно несучільними, що приводить до формування «нескінченного» феромагнітного кластера. Магнітоопір при кімнатній температурі для таких зразків зростає з 0,10% до 0,20% для поперечної геометрії вимірювання та з 0,03 до 0,07% для поздовжньої геометрії вимірювання при збільшенні товщини феромагнітного шару з 4 до 8 нм[18]. Відносно малі значення магнітоопору можна пояснити великою дефектністю свіжосконденсованих шарів заліза, що може приводити до зменшення їх намагніченості. До зменшення намагніченості, порівняно з масивним Fe, приводять і малі ефективні товщини феромагнітних шарів. Зменшення намагніченості у даному випадку і визначає малі значення магнітоопору.

Розглянемо тепер вплив умов вакуумної термообробки на магніторезистивні властивості досліджуваних структур.

Після термомагнітної обробки зразків $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_2(3)]_{10}/\text{П}$ з $d_{\text{Fe}} = 4-8$ нм та за температури 400 К (рис. 3.2) фіксуються анізотропні польові залежності МО. Як видно з даного рисунка, низькотемпературне відпалювання ($T = 400$ К) приводить до незначного зростання МО як у поздовжній, так і поперечній геометріях вимірювання. Це обумовлено удосконаленням кристалічної структури шарів Fe внаслідок «заліковування» дефектів [19].

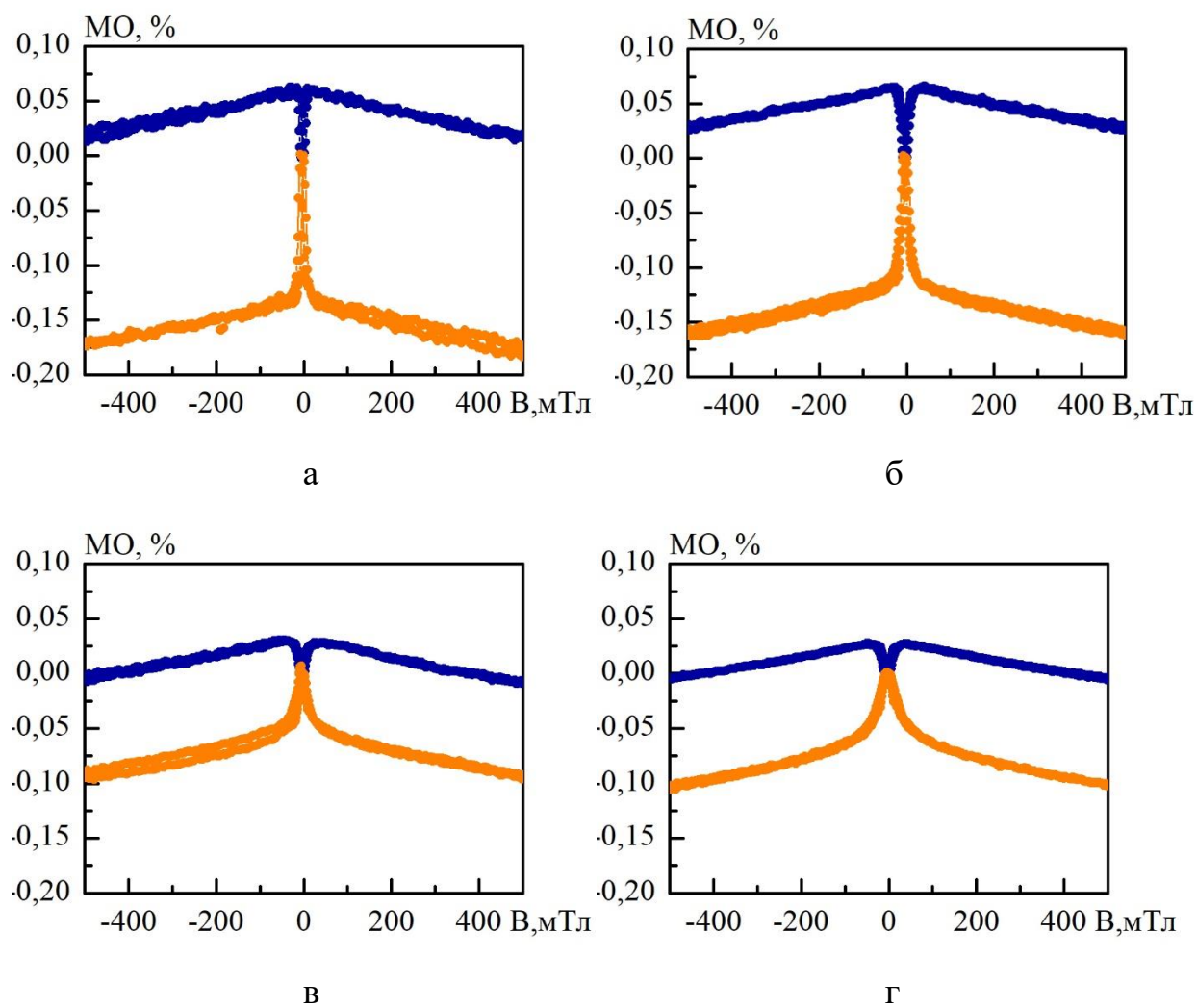


Рисунок 3.1 – Польові залежності магнітоопору для шаруватої системи $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_2(3)]_{10}/\Pi$ за $d = 8$ нм (а), 6 нм (б), 5 нм (в), 4 нм (г) після конденсації

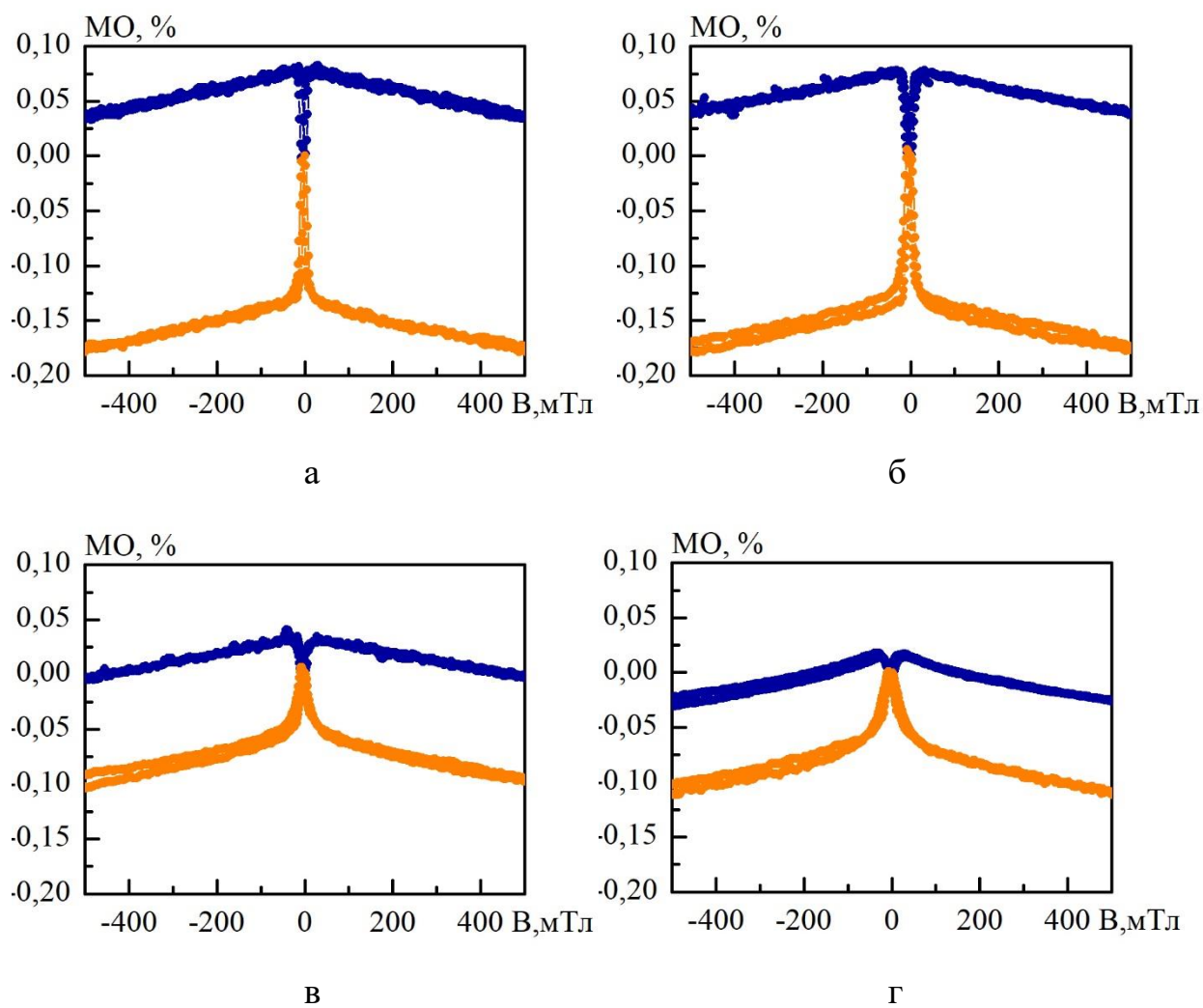


Рисунок 3.2 – Польові залежності магнітоопору для шаруватої системи $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_2(3)]_{10}/\text{Pi}$ за $d = 8$ нм (а), 6 нм (б), 5 нм (в), 4 нм (г) після відпалювання до 400 К

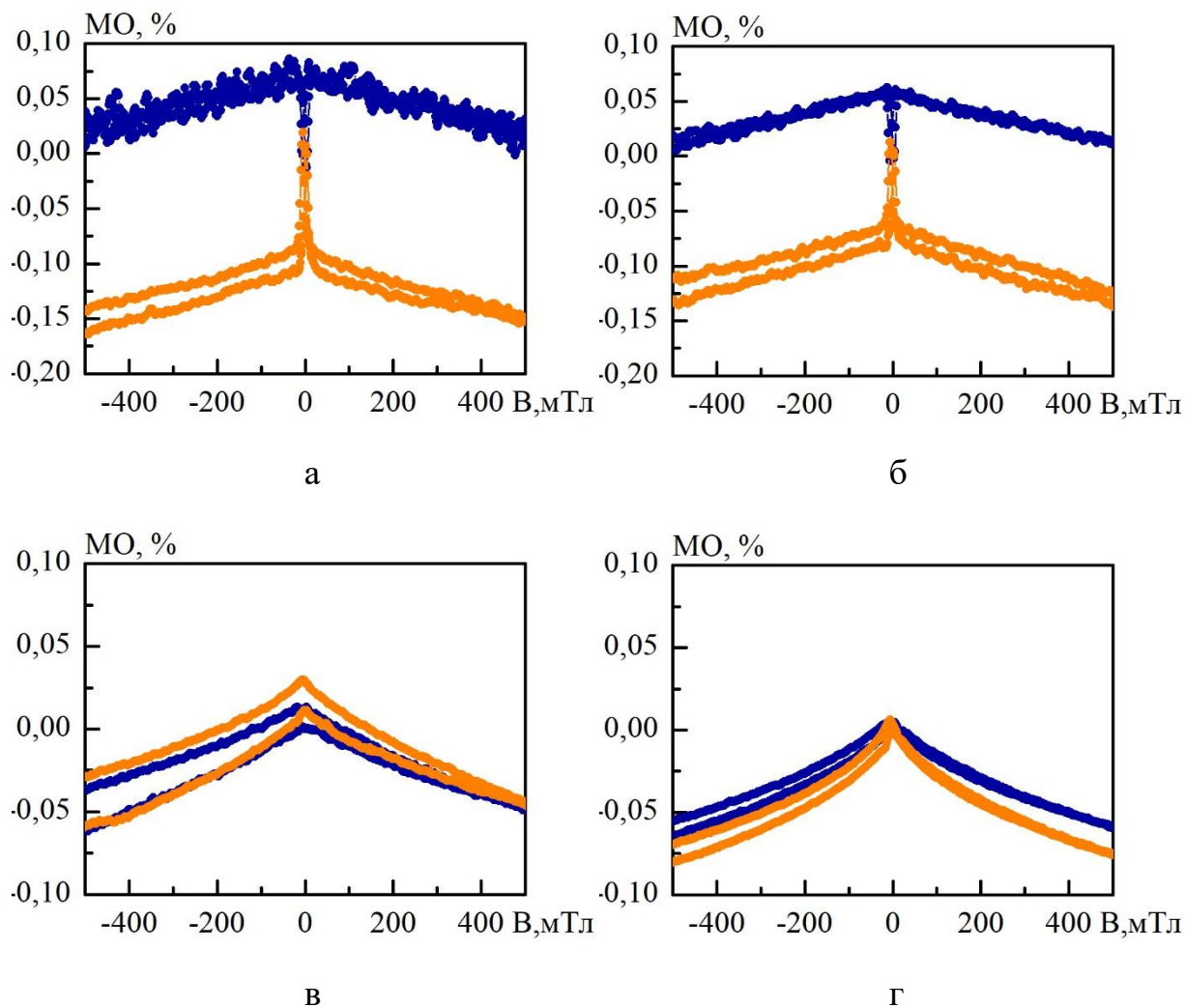


Рисунок 3.3 – Польові залежності магнітоопору для шаруватої системи $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_2(3)]_{10}/\Pi$ за $d = 8$ нм (а), 6 нм (б), 5 нм (в), 4 нм (г) після відпалювання до 500 К

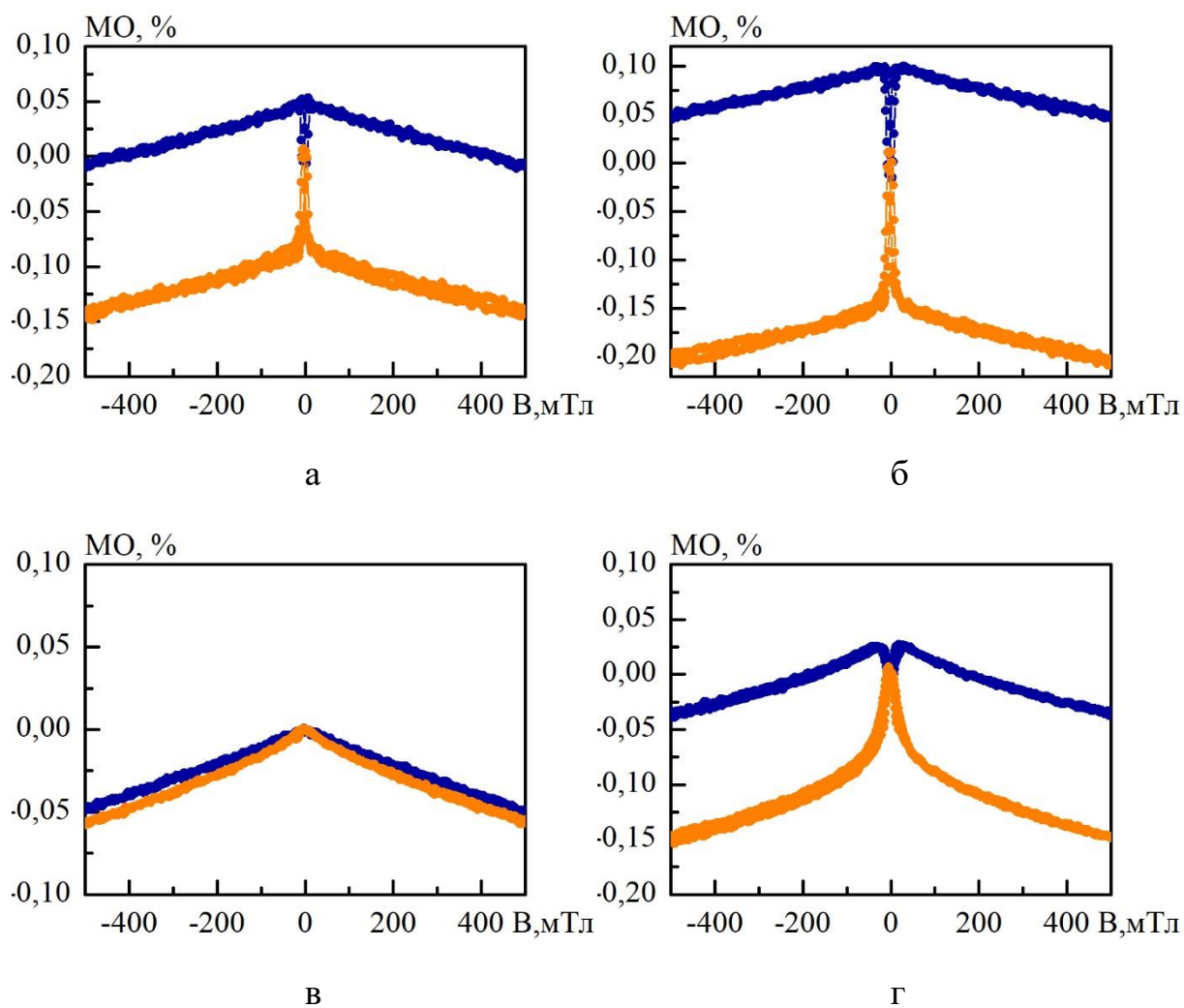


Рисунок 3.4 – Польові залежності магнітоопору для шаруватої системи $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_2(3)]_{10}/\Pi$ за $d = 8$ нм (а), 6 нм (б), 5 нм (в), 4 нм (г) після відпалювання до 600 К

Зміни у характері польових залежностей магнітоопору починають проявлятися вже після термообробки за температури 500 К (рис. 3.3). Зокрема, зразків $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_2(3)]_{10}/\text{П}$ з $d_{\text{Fe}} = 4$ та 5 нм, були отримані ізотропні польові залежності в поздовжній і поперечній геометріях вимірювання. При цьому на польових залежностях МО відсутній гістерезис. Величина негативного ізотропного МО при кімнатній температурі вимірювання складала 0,05-0,1%. Вказані особливості свідчать про те, що домінуючий ефект, який спостерігається, може бути зумовлений спін-залежним тунелюванням електронів між феромагнітними гранулами, оскільки для такого механізму взаємна орієнтація струму і поля не важлива. При таких ефективних товщинах формується структура з частинок Fe розділених діелектричними прошарками. Це приводить до суперпозиції спін-орбітального розсіювання та спін-залежного тунелювання електронів. У таких плівках діелектричні прошарки перешкоджають прямому феромагнітному обміну між сусідніми гранулами, але допускають тунелювання електронів між ними. Ймовірність тунелювання залежить від взаємної орієнтації магнітних моментів у сусідніх гранулах і чутлива до прикладеного зовнішнього магнітного поля. Вона є максимальною, коли магнітні моменти сусідніх гранул зорієнтовані паралельно, і мінімальною – у випадку антипаралельної орієнтації. Макроскопічно такий зв'язок може бути представлений у вигляді співвідношення:

$$\Delta R = -P^2 \cdot (M/M_s),$$

де ΔR – зміна опору зразка,

P – коефіцієнт поляризації електронів,

M – намагніченість плівки в зовнішньому полі,

M_s – намагніченість насичення

(азначимо, що така кореляція характерна лише за умови негативного ізотропного магнітоопору).

Враховуючи, що при ефективних товщинах 4 та 5 нм шари Fe є острівцевими, то вони можуть знаходитися у суперпарамагнітному стані. Підтвердженням цього є відсутність гістерезису на ізотропних польових залежностях та їх нелінійність,

що є наслідком відсутності магнітного гістерезису, та нелінійної залежності магнітного моменту від магнітного поля.

Подальше збільшення температури відпалювання викликає немонотонну зміну величини МО, яка ймовірно, обумовлена зміною розмірів кристалітів та ширини діелектричних прошарків. Причиною зміни ширини діелектричних прошарків може бути поява оксидної фази. Слід зазначити, що максимальні значення магнітоопору реалізуються в тому випадку, коли ширина діелектричного бар'єру між сусідніми гранулами мінімальна (ймовірність тунелювання максимальна), але ефективної обмінної взаємодії між спінами електронів, що належать різним гранулам, ще немає. При цьому плівки знаходяться в суперпарамагнітному стані. Виникнення суперпарамагнетизму є типовим для плівок такого типу. Ізотропний же характер польових залежностей зберігається лише для системи $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_2(3)]_{10}/\text{П}$ з $d_{\text{Fe}} = 5$ нм, величина якого, однак, залежає незначною і становить лише 0,05% [20].

ВИСНОВКИ

1. Мемристор - четвертий основний пасивний елемент в електричних колах, на рівні з резисторами, конденсаторами та індукторами, основною особливістю якого є можливість перемикання режимів високої та низької провідності під дією зовнішнього електричного поля. Конструктивно представляє собою тришарову тонкоплівкову структуру, що складається з двох шарів металу, розділених діелектричним прошарком.

2. Мемристори можуть бути використані для реалізації логічних операцій, запам'ятовуючих пристроїв та інших функціональних елементів цифрових електронних пристроїв, оскільки мають певні переваги у швидкості, енергоефективності та масштабованості перед транзисторами та іншими компонентами.

3. Для проведення експериментальних досліджень магніторезистивних властивостей композитних матеріалів в умовах термообробки як можливих функціональних матеріалів мемристорів була отримана серія багатошарових структур $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_2(3)]_{10}/\text{П}$ з $d_{\text{Fe}} = 2-8$ нм.

4. Встановлено, що для свіжосконденсованих структур $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_2(3)]_{10}/\text{П}$ польові залежності магнітоопору мають анізотропний характер для всіх досліджуваних зразків, незалежно від товщини феромагнітних шарів. Максимальна величина анізотропного магнітоопору спостерігається для структур з $d_{\text{Fe}} = 10$ нм $d_{\text{SiO}} = 1$ нм і складає 0,1 %. Величина МО зростає з 0,10% до 0,20% для поперечної геометрії вимірювання та з 0,03 до 0,07% для поздовжньої геометрії вимірювання при збільшенні товщини феромагнітного шару з 4 до 8 нм.

5. Після термообробки зразків $[\text{Fe}(d_{\text{Fe}})/\text{SiO}_2(3)]_{10}/\text{П}$ з $d_{\text{Fe}} = 4$ та 5 нм за температури 500 К фіксується перехід до ізотропного характеру польових залежностей магнітоопору, максимальні значення якого є незначним і не перевищує 0,1 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chua L.O. Memristor - the missing circuit element // IEEE Transactions on Circuit Theory. - 1971. - Vol. 18, No. 5. - P. 507-519.
2. P.E. L'vov , R.T. Sibatov , R.M. Ryazanov, D.V. Novikov Phase-field model of filament formation and growth in percolating memristive systems of nanoparticles // Materials Today Communications. 2024. Т. 38. С. 108464. .
3. Yibo Li, Zhongrui Wang, Rivu Midya et al. Review of Memristor Devices in Neuromorphic Computing: Materials Science and Device Challenges // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018.
4. Wen Sun, Bin Gao, Miaofang Chie et al. Understanding memristive switching via in situ characterization and device modeling // Nature Communications. 2019. Т. 10.
5. Долгов-Гордійчук С.Р., Пилипенко О.В., Жаботинський В.І. та ін. Вплив температури термообробки на магнітні властивості композитних матеріалів на основі Fe та SiO₂ / Матеріали та програма Міжнародної наукової конференції молодих учених «Фізика, електроніка, електротехніка» ФЕЕ::2024 (Суми, 22–26 квітня 2024 року). Суми : Сумський державний університет, 2024. С. 90.
6. Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. The missing memristor found // Nature. - 2008. - Vol. 453, No. 7191. - P. 80-83.
7. M. Chadha, V. Ng, Sequential sputtered Co-HfO₂ granular films // J. Magn. Magn. Mater. – V. 426. – P. 302–309.
8. Tuning transport and magnetic properties of Co_xFe_{3-x}O₄ thin films by Co content / Van Quang Nguyen et al. // J. Alloys Compnd. 2019. Vol. 772. P. 1095-1099.
9. Interacting ferromagnetic nanoparticles in discontinuous Co₈₀Fe₂₀/Al₂O₃ multilayers: From superspin glass to reentrant superferromagnetism / W. Kleemann et al. // Phys. Rev. B 2001. Vol. 63, No 13. P. 134423-1-134423-5.
10. Wang F.Z, Diode-free magnetic random access memory using spin-dependent tunneling effect // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 77, No. 13. P. 2036-2038.
11. Room temperature tunneling magnetoresistance of electron beam deposited

- (Co₅₀Fe₅₀)_x(Al₂O₃)_{1-x} cermet granular films / A.Ya Vovk et al. // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91, No 12. P. 10017–10021.
12. Biolek Z., Biolek D., Biolkova V. SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift // Radioengineering. - 2009. - Vol. 18, No. 2. - P. 210-214.
13. Effect of high temperature annealing on resistivity and temperature coefficient of resistance of sputtered platinum thin films of SiO₂/Pt/SiO_x interfaces / Timo Schössler et al. // Thin Solid Films. 2020. Vol. 698. P. 137877.
14. Biolek Z., Biolek D., Biolkova V., Kolka Z. Memristor models for SPICE simulation of extremely large memristive networks// International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields.-2013.-Vol. 26,No.1-2-P.88-99.
15. Prodromakis T., Toumazou C., Chua L.O. Two centuries of memristors // Nature Materials. - 2012. - Vol. 11, No. 6. - P. 478-481.
16. Петренко Р. М. Електрофізичні і магніторезистивні властивості шаруватих структур на основі металевих наночастинок та діелектричних матеріалів: дис. на здобуття наукового ступеня доктора філософії: 105 – Прикладна фізика та наноматеріали. Суми, 2023. 132 с.
17. Петренко Р.М., Пінчук А.С., Шкурдода Ю.О., Пазуха І.М. Магніторезистивні властивості шаруватих структур [Fe/SiO]₅// Матеріали науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка ФЕЕ :: 2020». Суми: Сумський державний університет, Суми, 2020. С. 57.
18. Петренко Р.М., Логвинов А.М., Пилипенко О.В. та ін. Магніторезистивні властивості шаруватих структур на основі FeNi та SiO / Матеріали та програма Міжнародної наукової конференції молодих учених «Фізика, електроніка, електротехніка» ФЕЕ::2023 (Суми, 24–28 квітня 2023 року). Суми : Сумський державний університет, 2023. С.40.
19. Yang J.J., Strukov D.B., Stewart D.R. Memristive devices for computing // Nature Nanotechnology. - 2013. - Vol. 8, No. 1. - P. 13-24.
20. Wang Z., Joshi S., Savel'ev S.E. et al. Memristors with diffusive dynamics as synaptic emulators for neuromorphic computing // Nature Materials . - 2017 . - Vol . 16 , No . 1. - P . 101-108 .