

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Завідувач кафедри нанофізики конденсованих середовищ

проф. Валерій Антонович Скришевський

Протокол № ____ засідання кафедри

від “ ____ ” _____ 2024 р.

**СПІН-ПЕРЕОРІЄНТАЦІЙНІ ЯВИЩА В
НАНОСТРУКТУРОВАНИХ МАГНЕТИКАХ**

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра

студента спеціальності 105

Прикладна фізика та наноматеріали

ОП «Нанофізика та комп'ютерні технології»

Тюпи Данила Юрійовича

Науковий керівник

асистент кафедри нанофізики

конденсованих середовищ

канд. фіз.-мат. н., доц. **Сохацький Володимир Петрович**

Оцінка захисту роботи

Київ – 2024 р.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженням процесів перемагнічування наноструктурованих матеріалів - наночарових ферромагнітних плівок та кристалічних феримагнетиків при дії механічних напружень. Ці явища вивчаються в рамках створення функціональних пристроїв спінтроники і її магніто-механічного напрямку - стрейнтроники. В даній роботі на основі рівнянь, що описують взаємодію світла з магнітною підсистемою неоднорідного магнітного середовища, розраховувались рівноважні стани спінових елементів при різних умовах впливу зовнішніх факторів. При цьому особлива увага приділялась визначенню екстремальних характеристик елементів - мінімально можливих просторових розмірів магнітних неоднорідностей (доменів) та мінімальних величин зовнішніх полів підмагнічування і механічних напружень, що впливають на орієнтацію намагніченості як дискретних, так і аналогових спінових елементів. Для ефективного функціонування цих елементів важливою характеристикою є інтенсивність дифрагованого світла і її залежність від внутрішніх і зовнішніх характеристик. Основним результатом роботи стало визначення залежностей оптичних характеристик тонкоплівкових спінових елементів від прикладеного зовнішнього поля і товщин застосованих плівок.

Ключові слова: спінтроніка, ферромагнетик, доменна структура, магнітна анізотропія, дифракція.

Зміст

ВСТУП	4
1 СПІНТРОНІКА – ГАЛУЗЬ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ (ОГЛЯД).	8
1.1 Властивості матеріалів спінтроники.	8
1.2. Магнітооптична дифракція світла на доменних структурах.	12
1.3. Перемагнічування наноматеріалів під дією поляризованих струмів, механічних напружень та електромагнітних полів.	16
2. МАГНІТООПТИЧНІ МЕТОДИКИ РЕЄСТРАЦІЇ ДОМЕННИХ СТРУКТУР І НЕОДНОРІДНИХ РОЗПОДІЛІВ НАМАГНІЧЕНОСТІ.	20
3. ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СПІНОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ - СПІНОВИХ КЛАПАНІВ ПРИ РІЗНИХ УМОВАХ ЗОВНІШНЬОГО ВПЛИВУ.	25
3.1. Перемагнічування монокристалічного магнітооптичного середовища при дії механічних напружень і електричних струмів поляризованих електронів.	25
3.2. Дифракція світла на смугастій доменній структурі	30
ВИСНОВКИ	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	37

ВСТУП

Спінова електроніка, або спінтроніка, є напрямком звичайної електроніки, що розвивається паралельно і який використовує не тільки заряд, але і спін електронів для створення нових функціональних можливостей в електронних елементах і пристроях. Спін - це здатність електронів створювати магнітний момент, тому керування цим моментом може призвести до підвищення швидкодії, скорочення енерговитрат, зменшення габаритів елементів порівняно з традиційними, що функціонують на основі переносу заряду електронів.

Дана дипломна робота присвячена дослідженням ефектів перемагнічування в феромагнітних матеріалах з магнітопружними властивостями, які можуть знайти застосування в різних застосуваннях спінтроніки. Магнітопружні властивості дають можливість змінювати намагніченість під дією механічних напружень (такий розділ спінтроніки називають стрейнтронікой), що в свою чергу дозволяє здійснювати локальне перемагнічування з меншими енерговитратами і в області з меншими просторовими розмірами. На основі таких ефектів розробляються деякі різновиди спінових пристроїв, зокрема, елементи енергонезалежної радіаційно стійкої пам'яті, спінові транзистори (тригери), датчики магнітних полів для різних застосувань та ін.

Очікується, що завдяки даній дипломній роботі будуть поглиблені знання про принципи спінтроніки та спінового транспорту в магнітопружних феритах; опановані магнітооптичні методики дослідження доменних структур і неоднорідних розподілів намагніченості; оцінені (розрахунковими методами) деякі характеристики функціональних елементів спінової електроніки за рахунок розвинутих навичок вирішення наукових задач з використанням методів комп'ютерного моделювання.

Основним змістом даної роботи стало моделювання перемагнічувальних процесів в структурах із неоднорідним розподілом намагніченості, який (тобто розподіл) можна змінити відповідно до величини та розподілу зовнішнього магнітного поля, а також направлено механічного напруження з віссю легкої анізотропії, орієнтованою в площині тонкоплівкових структур. В таких структурах розподіл (орієнтація) намагніченості може змінюватись як під дією магнітних факторів (зовнішнього магнітного поля), так і під дією немагнітних, зокрема, механічного напруження, електричного струму поляризованих електронів, а також поляризованого світла.

Отже, **темою даної роботи** було обрано дослідження режимів роботи феромагнітних спінових структур при різних зовнішніх умовах методами розрахунків на основі енергетичних залежностей повної магнітної енергії від орієнтації векторів намагніченості різних шарів та/або областей структур.

Тема роботи пов'язана як із напрямком роботи кафедри електрофізики факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем в області спінової електроніки і магнітооптики [9-15], так і з науково-дослідними роботами по магнітній тематиці, що проводяться в Інституті високих технологій.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю вивчення закономірностей та явищ, що мають місце в тонкоплівкових середовищах з магнітооптичними та магнітоелектричними властивостями, зокрема, залежність магнітних характеристик середовища від діючих електричних полів та механічних напружень, що становить інтерес для розробки нових приладів спінтроники. Зокрема, задача управління характеристиками світлового променя шляхом зміни просторового розподілу і величини намагніченості у магнітооптичному середовищі є актуальною для створення пристроїв оптоелектроніки, спінтроники, квантових комп'ютерів. На шляху до практичної реалізації такого завдання стоїть ряд проблем, серед яких недостатньо висока ефективність взаємодії електронних

спінів з внутрішнім магнітним полем, створеним іонами кристалічної ґратки, не кажучи вже про застосування світлового (електромагнітного) поля, а також складність локалізації керуючого магнітного поля в малому об'ємі, значні енерговитрати при використанні зовнішніх джерел поля, недостатня швидкодія поворотної переорієнтації спінів та ін. Для вирішення цих проблем останніми роками активно досліджуються різні методи впливу на намагніченість, наприклад, за допомогою поляризованого струму або магнітоелектричного ефекту [1-5]. Втім, складність використання таких методів, зокрема, через необхідність застосування великих густин струму або високих напруг змушують розробляти нові способи їх реалізації, шукати інші методи перемагнічування.

Таким чином, **метою роботи** було проведення теоретичних розрахунків характеристик функціонування спінових структур на основі феромагнітних наночарових плівкових сендвіч-структур для роботи у функціональних пристроях різного типу і при різних заданих умовах для суттєвого скорочення об'єму експериментальних і технологічних робіт по підбору оптимальних характеристик.

Новизна роботи, а також і її **практична цінність**, як наукова, так і практична полягає в тому, що в ній на основі проведених розрахунків визначені режими функціонування оптичних спінових елементів при різних їх власних характеристиках і різних параметрах діючих зовнішніх факторів. Тобто в даній роботі досліджувалась окрема частина наукового напрямку взаємодії зовнішніх електромагнітних полів з наноструктурованими матеріалами.

Необхідно також відзначити, що роботи по тематиці, близькій до тематики даної дипломної роботи, проводяться в ряді лабораторій і наукових центрів розвинених країн, зокрема по прикладних напрямкам розробки квантових комп'ютерів, систем квантового зв'язку, а також по фундаментальним напрямкам дослідження процесів надшвидкого перемагнічування, явищах прецесії спінів (перспективний напрямок спітроніки - орбітроніка), магнітоелектричних явищах,

стрейтроніці (напрямок спітроніки, пов'язаний із дією механічних напружень) і т. ін.

Достовірність результатів роботи визначається перевіркою їх за допомогою апробованих (стандартних) комп'ютерних методів на основі прикладних програм типу Mathcad, Origin, Excel та ін., відповідністю розрахунків і результатів, отриманих експериментальними магнітооптичними методами, а також підтвердженням ряду результатів іншими дослідниками при використанні різних методик.

1 СПІНТРОНІКА – ГАЛУЗЬ НАУКИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ (ОГЛЯД)

1.1. Властивості матеріалів, які використовуються при спіновому транспорті.

Спінтроніка - це міждисциплінарна область науки і техніки, яка досліджує використання спіну електронів для створення нових електронних пристроїв. Спін - це властивість електронів, яка описує їх магнітний момент. Використання спіну може призвести до створення більш швидких, енергоефективних і компактних пристроїв порівняно з традиційними електронними компонентами на основі заряду електронів.[2]

Спінтроніка має широкий спектр потенційних застосувань.

Спінові транзистори нового типу використовують спін електронів замість заряду для виконання логічних операцій. Їхніми ключовими перевагами є:

- Швидкість. Спінові транзистори можуть працювати значно швидше, ніж кремнієві аналоги, роблячи комп'ютери в рази швидшими.
- Енергоефективність. Спінові транзистори споживають менше енергії, що призведе до більш енергоефективних комп'ютерів та зменшення тепловиділення.
- Масштабованість. Спінтроніка може подолати обмеження масштабування, з якими стикаються традиційні транзистори, дозволяючи створювати більш потужні та компактні мікросхеми [5].

Спінова пам'ять використовує спін електронів для зберігання даних, пропонуючи низку переваг:

- Щільність. Спінова пам'ять може зберігати значно більше даних на тому ж просторі, що й DRAM, роблячи можливими більш ємні та компактні накопичувачі.

- Стійкість. Спінова пам'ять стійкіша до збоїв та має більший термін служби, порівняно з DRAM.
- Швидкість. Доступ до даних у спіновій пам'яті може бути значно швидшим, ніж у DRAM, що покращує загальну продуктивність системи [1].

Спінові датчики використовують спін електронів для виявлення магнітних полів, пропонуючи значні переваги:

- Чутливість. Спінові датчики можуть бути набагато чутливішими, ніж традиційні датчики на основі магнітного опору, дозволяючи виявляти слабкіші магнітні поля.
- Точність. Спінові датчики пропонують більш високу точність вимірювання магнітних полів.
- Шум. Спінові датчики генерують менше шуму, що робить їх більш надійними [4].

Спінові хвилі, що являють собою колективне коливання спінів електронів, можуть використовуватися для створення нових типів акустичних пристроїв з широким спектром застосувань:

- Перетворення. Спінові хвилі можуть використовуватися для перетворення електричних сигналів в акустичні та навпаки, з потенційними застосуваннями в ультразвукових технологіях та системах зв'язку.
- Фільтрація. Спінові хвилі можуть використовуватися для створення високочастотних та вузькосмугових фільтрів з покращеними характеристиками.
- Пам'ять. Спінові хвилі можуть використовуватися для створення нового типу пам'яті з високою щільністю та швидкістю доступу [3].

Для успішного використання спінового транспорту необхідні матеріали з певними властивостями:

- Висока магнітна анізотропія. Матеріал повинен мати сильну перевагу в одному напрямку намагніченості.
- Низький опір. Матеріал повинен мати низький опір для протікання спінового струму.

- Довгий час релаксації спіну. Спін електрона повинен зберігатися протягом тривалого часу, щоб інформація могла бути передана.

Деякі з найбільш перспективних матеріалів для спінового транспорту включають:

- Ферронікелеві сплави. Ці сплави мають високу магнітну анізотропію та низький опір.
- Галітовий арсенід. Цей напівпровідник має довгий час релаксації спіну та сумісний з технологічними процесами виробництва напівпровідників.
- Графен. Цей двовимірний матеріал має високу магнітну анізотропію та низький опір.
- Оксиди магнітних переходів. Ці матеріали мають високу магнітну анізотропію та низький опір, а також можуть бути інтегровані з кремнієвою електронікою.
- Органічні напівпровідники. Ці матеріали пропонують гнучкість та низьку вартість, але мають коротший час релаксації спіну.
- Спінові скла. Ці матеріали мають магнітні властивості, які можна регулювати за допомогою зовнішнього магнітного поля [6].

Дослідження та розробка нових матеріалів для спінового транспорту є активною областю досліджень. Вчені постійно шукають матеріали з кращими властивостями, які дозволять створювати більш ефективні та функціональні спінові пристрої [5].

Крім вищезазначених властивостей, важливими факторами при виборі матеріалів для спінового транспорту також є:

- Матеріал повинен бути легко доступним та недорогим.
- Матеріал не повинен бути токсичним або шкідливим для навколишнього середовища.
- Матеріал повинен бути легко оброблюваним та інтегрованим з іншими матеріалами.

Вибір правильного матеріалу для конкретного застосування є важливим завданням, яке залежить від ряду факторів. Вчені та інженери повинні ретельно вивчити всі доступні варіанти, перш ніж вибрати матеріал для спінового транспорту.

Важливо зазначити, що спінтроніка все ще перебуває на ранній стадії розвитку. Існує багато проблем, які необхідно вирішити, перш ніж спінові пристрої стануть комерційно життєздатними. Однак потенційні переваги спінтроніки роблять її захоплюючою областю досліджень з величезним потенціалом для революції в електроніці [7].

Зокрема, спінтроніка може призвести до створення наступних:

- Швидкіших і потужніших комп'ютерів. Спінові транзистори можуть працювати значно швидше, ніж кремнієві аналоги, що призведе до створення комп'ютерів з набагато більшою обчислювальною потужністю.
- Більш енергоефективних електронних пристроїв. Спінові пристрої споживають менше енергії, ніж традиційні електронні компоненти, що може призвести до створення більш екологічно чистих та економних пристроїв.
- Нових типів пам'яті. Спінова пам'ять може зберігати більше даних на тому ж просторі, що й DRAM, а також має більший термін служби та швидший доступ до даних.
- Чутливих датчиків. Спінові датчики можуть виявляти слабкіші магнітні поля, ніж традиційні датчики, що може призвести до створення нових типів датчиків для медичних, наукових та інших застосувань.
- Програмованих матеріалів. Спінові матеріали можуть мати властивості, які можна змінювати за допомогою зовнішніх впливів, таких як магнітне поле або електричний струм, що може призвести до створення нових типів програмних матеріалів.

Спінтроніка має великий потенціал для революції в електроніці та створення нових технологій, які можуть змінити наше життя [5].

Механічні напруження у п'єзопластині (п'єзоелементі) цирконату-титанату свинцю можуть змінювати доменну структуру жорстко пов'язаної з ним (п'єзоелементом) епітаксійної плівки залізо-ітрієвого гранату. Прикладання електричної напруги до п'єзоелементу може призводити до магнітопружних змін анізотропії плівки, що проявляється у вигляді спін-переорієнтаційного перех оду вектора намагніченості з напрямку, перпендикулярного до площини плівки в паралельне. Це дозволяє, зокрема, здійснювати магнітооптичну модуляцію світла, що проходить крізь плівку. Оцінка впливу параметрів плівки на переорієнтацію намагніченості і характеристики світлового променя дозволяє визначити оптимальні параметри для різних режимів модуляції.

1.2. Магнітооптична дифракція світла на доменних структурах.

Магнітооптична дифракція ґрунтується на явищі, коли світло, що падає на магнітний матеріал, змінює свою траєкторію під впливом магнітного поля. Це явище описується ефектом Фарадея, який полягає в обертанні площини поляризації світла при його проходженні через оптично активне середовище, яким у даному випадку є магнітний матеріал. Кут обертання площини поляризації пропорційний намагніченості матеріалу.

Доменна структура - це розбиття магнітного матеріалу на області з однаковою орієнтацією намагніченості. Ці області, звані доменами, розділені доменними межами, які представляють собою перехідні зони з хаотичною орієнтацією намагніченості. Розмір, форма та орієнтація доменів залежать від властивостей матеріалу та зовнішніх умов [3].

Коли світло падає на магнітний матеріал, воно дифрактується на доменних межах. Це відбувається тому, що на доменних межах спостерігається зміна намагніченості, що призводить до зміни показника заломлення світла. Дифракційна картина залежить від розміру, форми та орієнтації доменів, а також від довжини хвилі падаючого світла.

Аналізуючи дифракційну картину, можна отримати інформацію про розмір, форму та орієнтацію доменів. Для цього використовується ряд методів, таких як:

- Аналіз кутів дифракції. За кутами дифракції можна визначити розмір доменів.
- Аналіз інтенсивності дифракційних максимумів. За інтенсивністю дифракційних максимумів можна визначити форму доменів.
- Аналіз поляризації дифракційного світла. За поляризацією дифракційного світла можна визначити орієнтацію доменів.

Магнітооптична дифракція використовується для вивчення доменних структур в таких матеріалах, як феримагнетики, антиферомагнетики та магнітні наноструктури. Цей метод є потужним інструментом дослідження магнітних матеріалів, оскільки він дозволяє візуалізувати доменні структури з високою роздільною здатністю [2].

Переваги магнітооптичної дифракції:

- Висока роздільна здатність. Цей метод дозволяє візуалізувати доменні структури з високою роздільною здатністю, що робить його цінним інструментом для дослідження магнітних матеріалів.
- Неінвазивність. Цей метод не руйнує зразок, що робить його ідеальним для дослідження крихких або чутливих матеріалів.
- Простота. Цей метод відносно простий у використанні, що робить його доступним для широкого кола дослідників.

Обмеження магнітооптичної дифракції:

- Чутливість до магнітного поля. Цей метод чутливий до зовнішніх магнітних полів, що може спотворювати результати дослідження.
- Обмежена область дослідження. Цей метод може досліджувати лише поверхневі шари матеріалу.
- Інтерпретація даних. Інтерпретація даних магнітооптичної дифракції може бути складною, і для цього потрібні глибокі знання фізики магнітних матеріалів.

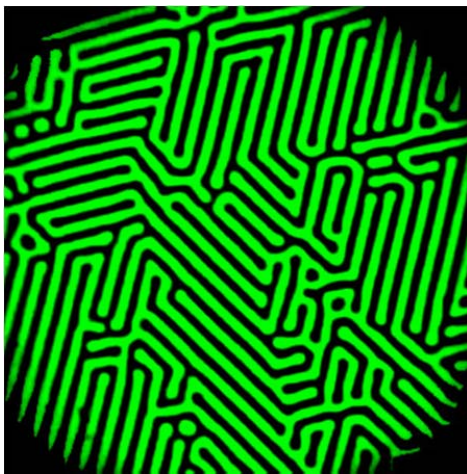
Магнітооптична дифракція використовується в різних областях науки і техніки, включаючи:

- Дослідження магнітних матеріалів. Цей метод використовується для вивчення доменних структур, магнітних властивостей та динаміки магнітних моментів у магнітних матеріалах.
- Розробка магнітних пристроїв. Цей метод використовується для розробки та тестування магнітних пристроїв, таких як магнітні пам'яті, датчики та сенсори.
- Контроль магнітних полів. Цей метод використовується для візуалізації та контролю магнітних полів.
- Магнітооптична запис. Цей метод використовується для запису та зчитування інформації з магнітних носіїв.

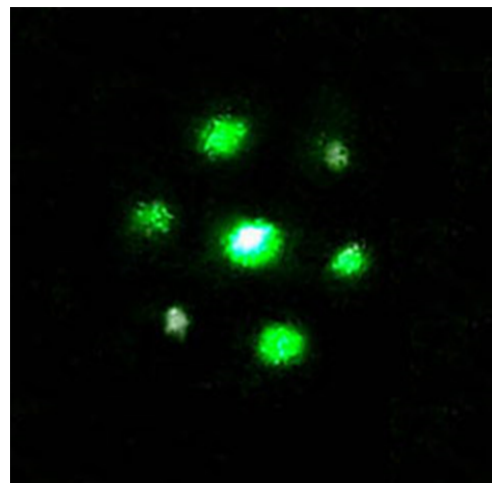
Магнітооптична дифракція є активно розвиваючоюся областю досліджень. У майбутньому очікується, що цей метод буде використовуватися для розробки нових магнітних матеріалів з покращеними властивостями, створення нових магнітних пристроїв з більшою функціональністю та продуктивністю, розробки нових методів контролю та візуалізації магнітних полів, збільшення роздільної здатності та чутливості магнітооптичних методів дослідження [8].

Магнітооптична дифракція є важливим інструментом для дослідження магнітних матеріалів та розробки магнітних пристроїв. Цей метод має великий потенціал для розвитку нових технологій з широким спектром застосувань.

Магнітооптична дифракція може бути поєднана з іншими методами дослідження, такими як магнітооптична мікроскопія та магнітометрія, для отримання більш повної інформації про магнітні матеріали. Існує багато різних методів магнітооптичної дифракції, кожен з яких має свої переваги та недоліки. Вибір методу залежить від конкретного завдання дослідження. Магнітооптична дифракція є потужним інструментом дослідження магнітних матеріалів, але для його використання потрібні знання фізики та оптики магнітних матеріалів. Магнітооптична дифракція є захоплюючою областю досліджень з величезним потенціалом для розвитку нових технологій. Вчені та інженери постійно працюють над покращенням цього методу та розширенням його сфери застосування.



а



б

Рис. 1.1 Знімок ділянки лабіринтної доменної структури плівки ЗІГ ($Y_3Fe_5O_{12}$) із перпендикулярною до площини росту плівки магнітною анізотропією (а), отримане за допомогою магнітооптичного ефекта Фарадея (діаметр світлової плями біля 0,3 мм) і дифракційна картина розподілу світлових максимумів при проходженні світла через цю доменну структуру [13]. Зображення доменів, що відповідають місцям зразка із різним контрастом, є ділянками різної орієнтації

вектора намагніченості в перпендикулярному (для даної плівки ЗІГ) напрямку до площини плівки.

1.3. Перемагнічування наноматеріалів під дією поляризованих струмів, механічних напружень та електромагнітних полів.

Існує ряд методів "немагнітного" перемагнічування наноструктурованих матеріалів, які не включають прямого прикладання магнітного поля.

1. Перемагнічування електричним струмом. Електричний струм може бути використаний для створення магнітного поля, яке може перемагнітити наноструктуру. Цей метод може бути ефективним для перемагнічування нанопроводів та інших наноструктур з високим співвідношенням довжини до товщини.

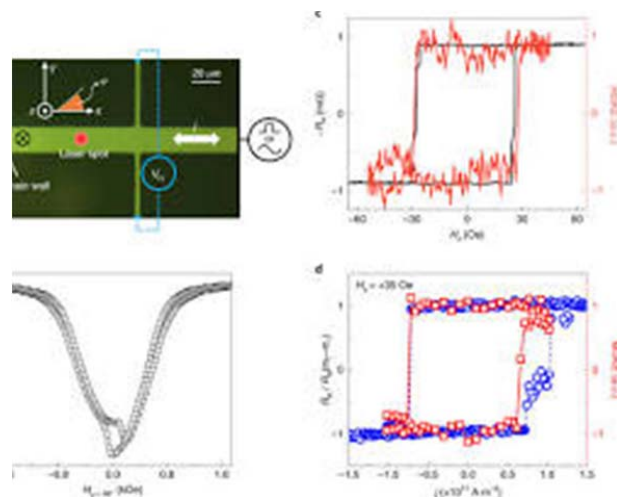


Рис. 1.2 Криві перемагнічування (магнітного гістерезису) під дією струму поляризованих електронів.

2. Перемагнічування оптичним випромінюванням. Оптичне випромінювання може бути використано для створення магнітного поля, яке може перемагнітити наноструктуру. Цей метод може бути ефективним для перемагнічування наночастинок та інших наноструктур з невеликими розмірами.

3. Перемагнічування механічними напруженнями. Механічні напруження можуть змінювати магнітну анізотропію наноструктури, що може призвести до її перемагнічування. Цей метод може бути ефективним для перемагнічування плівкових наноструктур та інших наноструктур, які піддаються механічним навантаженням.

4. Перемагнічування хімічними методами. Хімічні методи можуть бути використані для зміни складу наноструктури, що може призвести до її перемагнічування. Цей метод може бути ефективним для перемагнічування наноструктур, які важко перемагнітити іншими методами.

5. Перемагнічування за допомогою мікрохвильового випромінювання. Мікрохвильове випромінювання може бути використано для створення магнітного поля, яке може перемагнітити наноструктуру. Цей метод може бути ефективним для перемагнічування наноструктур з високою коерцитивною силою.

Вибір методу "немагнітного" перемагнічування залежить від таких факторів:

- Матеріал наноструктури. Різні матеріали мають різні магнітні властивості, тому для кожного матеріалу може бути оптимальним різний метод перемагнічування.
- Розмір і форма наноструктури. Розмір і форма наноструктури можуть впливати на її магнітні властивості та ефективність різних методів перемагнічування.
- Бажаний стан намагніченості. Різні методи перемагнічування можуть призвести до різних станів намагніченості наноструктури.
- Технологічні обмеження. Різні методи перемагнічування можуть мати різні технологічні обмеження, такі як складність реалізації або необхідність спеціального обладнання.

Переваги "немагнітного" перемагнічування:

- Можливість перемагнічування наноструктур без використання зовнішнього магнітного поля. Це може бути корисно для наноструктур, які чутливі до зовнішніх магнітних полів, або для наноструктур, які інтегровані в електронні пристрої.
- Можливість перемагнічування наноструктур з високою коерцитивною силою. Це може бути корисно для наноструктур, які повинні зберігати свою намагніченість протягом тривалого часу.
- Можливість перемагнічування наноструктур з високою щільністю. Це може бути корисно для наноструктур, які використовуються в магнітних пам'яті та інших магнітних пристроях.

Недоліки "немагнітного" перемагнічування:

- Складність реалізації деяких методів. Деякі методи "немагнітного" перемагнічування можуть бути складними для реалізації або вимагати спеціального обладнання.
- Необхідність ретельного контролю параметрів перемагнічування.

Методи "немагнітного" перемагнічування мають широкий спектр потенційних застосувань. Магнітна пам'ять ці методи можуть бути використані для створення нових типів магнітної пам'яті з високою щільністю запису та швидкістю доступу. Магнітні датчики ці методи можуть бути використані для створення нових типів магнітних датчиків з високою чутливістю та роздільною здатністю. Магнітні приводи ці методи можуть бути використані для створення нових типів магнітних приводів з більшою потужністю та ефективністю. Спінова електроніка ці методи можуть бути використані для створення нових спінових електронних пристроїв з новими функціональними можливостями.

Методи "немагнітного" перемагнічування є активно розвиваючоюся областю досліджень. У майбутньому очікується, що ці методи стануть більш

ефективними, простими у реалізації та доступними. Це може призвести до розробки нових магнітних пристроїв з революційними можливостями.

Дослідження методів "немагнітного" перемагнічування є міждисциплінарною областю, яка об'єднує знання з фізики, хімії, матеріалознавства та інженерії. Вибір методу "немагнітного" перемагнічування для конкретного застосування залежить від багатьох факторів, які необхідно ретельно вивчити та врахувати. Методи "немагнітного" перемагнічування можуть бути поєднані з іншими методами магнітного керування, щоб отримати бажаний результат. Методи "немагнітного" перемагнічування є перспективним напрямком досліджень з величезним потенціалом для розвитку нових технологій. Вчені та інженери постійно працюють над покращенням цих методів та розширенням їх сфери застосування.

2 МАГНІТООПТИЧНІ МЕТОДИКИ РЕЄСТРАЦІЇ ДОМЕННИХ СТРУКТУР І НЕОДНОРІДНИХ РОЗПОДІЛІВ НАМАГНІЧЕНОСТІ

Дослідження спінового транспорту в магнітопружних феритах є важливою темою в сучасній фізиці та матеріалознавстві. Ці матеріали мають унікальні властивості, які роблять їх перспективними для використання в різноманітних електронних пристроях, таких як датчики, запам'ятовуючі пристрої та мікрохвильові компоненти.

Магнітооптичні методики реєстрації доменних структур і неоднорідних розподілів намагніченості є потужними інструментами для дослідження спінового транспорту в магнітопружних феритах. Ці методики дозволяють візуалізувати магнітну структуру матеріалу з високою роздільною здатністю, що дає цінну інформацію про динаміку спінів та механізми спінового транспорту.

Метод ЕК використовує поляризоване світло, яке відбивається від поверхні магнітного матеріалу. Орієнтація намагніченості впливає на поляризацію відбитого світла. Дозволяє візуалізувати магнітну доменну структуру та локальні неоднорідності.

Існує два типи МОКЕ - полярний (за зміною еліптичності) та полярний (за зміною кута поляризації).

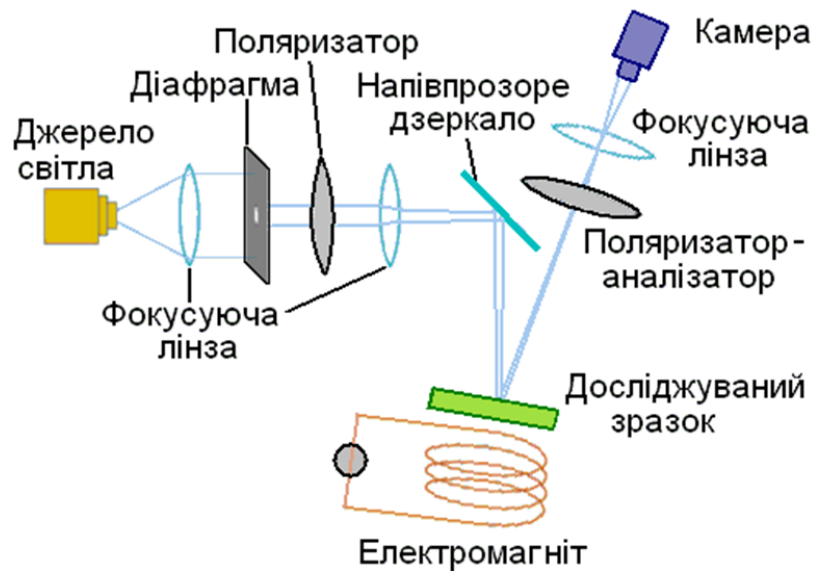


Рис. 2.1 Установка для спостереження магнітооптичного ефекта Керра (МОКЕ), що використовує поляризоване світло, яке відбивається від поверхні магнітного матеріалу.

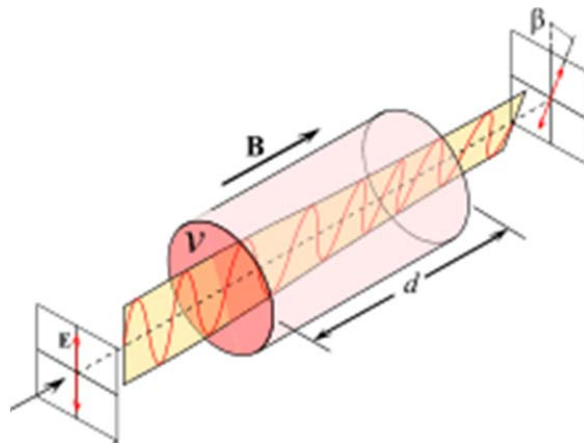


Рис. 2.2 Поворот площини поляризації лінійно поляризованого світла при проходженні через прозорий матеріал, намагнічений вздовж напрямку проходження світла.

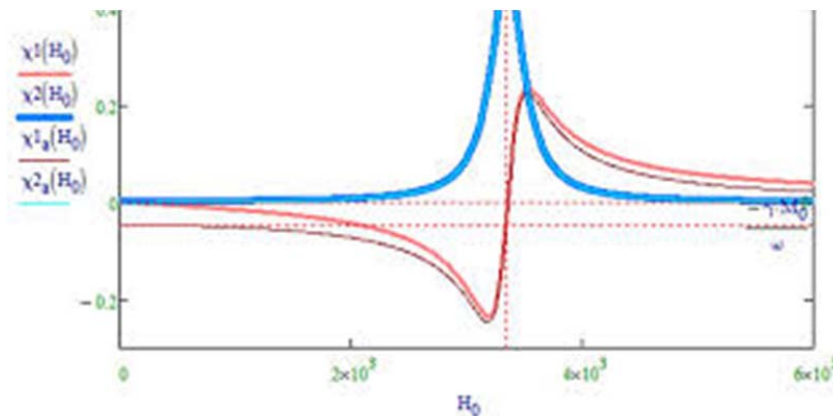


Рис. 2.4 Резонансні криві поглинання НВЧ випромінювання.

Ферромагнітний резонанс (ФМР) цей метод використовує мікрохвильове випромінювання для збудження магнітних коливань в матеріалі. Частота та амплітуда цих коливань залежать від магнітної структури матеріалу, що дозволяє отримати інформацію про розподіл намагніченості.

Використовує мікрохвильове випромінювання для збудження магнітних коливань в матеріалі. Частота та амплітуда резонансу залежать від магнітної структури матеріалу. Використовується для дослідження динаміки магнітних моментів, магнітної анізотропії та магнітної жорсткості.

Застосування магнітооптичних методів для дослідження спінового транспорту. Магнітооптичні методики можуть використовуватися для дослідження різних аспектів спінового транспорту в магнітопружних феритах, таких як:

Доменна структура: Магнітооптичні методики дозволяють візуалізувати доменну структуру матеріалу, тобто розподіл намагніченості на малих масштабах. Ця інформація може бути використана для розуміння впливу доменної структури на спіновий транспорт.

Неоднорідні розподіли намагніченості: Магнітооптичні методики дозволяють виявляти та візуалізувати неоднорідні розподіли намагніченості, такі як дефекти та границі доменів. Ці неоднорідності можуть впливати на спіновий транспорт, тому їх дослідження є важливим для розуміння механізмів спінового транспорту.

Динаміка спінів: Магнітооптичні методики можуть використовуватися для дослідження динаміки спінів, тобто руху спінів у магнітному полі. Ця інформація може бути використана для розуміння механізмів релаксації спінів та їх впливу на спіновий транспорт.

Магнітооптичні методики реєстрації доменних структур і неоднорідних розподілів намагніченості є потужними інструментами для дослідження спінового транспорту в магнітопружних феритах. Ці методики дозволяють візуалізувати магнітну структуру матеріалу з високою роздільною здатністю, що дає цінну інформацію про динаміку спінів та механізми спінового транспорту.

3. РОЗРАХУНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СПІНОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ - СПІНОВИХ КЛАПАНІВ ПРИ РІЗНИХ УМОВАХ ЗОВНІШНЬОГО ВПЛИВУ

3.1. Визначення режимів перемагнічування монокристалічного магнітооптичного середовища при дії механічних напружень і електричних струмів поляризованих електронів.

Задача про дифракцію світла на доменній структурі магнітооптичного матеріалу. Ця задача полягає в дослідженні залежності розмірних параметрів доменних границь (доменних стінок) і доменів від магнітних та механічних характеристик матеріалів.

Завдання: Визначити, як змінюється (зокрема, в яких практичних межах) товщина доменної границі при варіації констант обмінної взаємодії J і магнітної анізотропії K , а також параметра кристалічної ґратки - a ; напр., на основі формули:

$$\delta = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot J \cdot S^2}{K \cdot a}} \quad (3.1)$$

де: δ - товщина доменної границі; J - константа обмінної взаємодії; K - константа магнітної анізотропії; a - параметр кристалічної ґратки.

Прийmemo $J = 10^{-11} \frac{\text{Дж}}{\text{м}}$, $K = 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$, $a = 3 * 10^{-10} \text{ м}$.

Підставивши ці значення у формулу, отримаємо $\delta = 3 * 10^{-7} \text{ м}$.

Ці значення знаходяться в діапазоні практичних значень товщини доменної границі ($10^{-7} - 10^{-8} \text{ м}$).

Визначити, як залежить період доменної структури від товщини пластини та намагніченості насичення.

2) як залежить період доменної структури від товщини пластини та намагніченості насичення, напр., на основі формули:

$$d = \sqrt{\frac{\sigma \cdot h}{1,75 \cdot M_s^2}}, \quad (3.2)$$

де: d - період доменної структури; h - товщина пластини; M_s - намагніченість насичення.

$$\text{Прийmemo } h = 10^{-6} \text{ м, } M_s = 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

Підставивши ці значення у формулу, отримаємо $d = 10^{-5}$ м.

Це значення знаходиться в діапазоні практичних значень періоду доменної структури ($10^{-5} - 10^{-4}$ м).

Визначити, як залежить швидкість руху доменної границі в залежності від напруженості прикладеного поля.

Для цього можна використовувати формулу:

$$v = \gamma * H * d \quad (3.3)$$

де: v - швидкість руху доменної границі; γ - гіромагнітне співвідношення; H - напруженість прикладеного поля; d - товщина доменної границі.

$$\text{Прийmemo } \gamma = 1.76 * 10^{11} \frac{\text{рад}}{\text{с} * \text{Т}}, H = 10^3 \frac{\text{А}}{\text{м}}, d = 3 * 10^{-7} \text{ м.}$$

$$\text{Підставивши ці значення у формулу, отримаємо } v = 5 * 10^2 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Це значення знаходиться в діапазоні практичних значень швидкості руху доменної границі ($10^2 - 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$).

Експериментальний графік. На наданому рис. 3.1 представлений експериментальний графік залежності періоду доменної структури (d) від напруженості прикладеного магнітного поля (H) для ферит-граната ітрія ($\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$). Графік містить чотири точки стрибкоподібних змін, які описують різні конфігурації доменної структури.

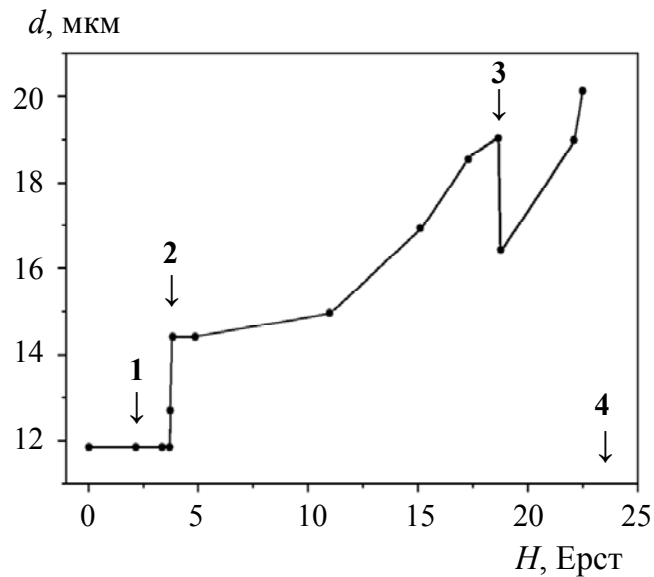


Рис. 3.1 Залежність періоду доменної структури d від напруженості прикладеного магнітного поля H для ферит-граната ітрія $Y_3Fe_5O_{12}$.

Аналіз експериментального графіка.

Вісь X напруженість прикладеного магнітного поля (H) в одиницях Ерстед (Ер). Вісь Y період доменної структури (d) в одиницях мікрометрів (мкм).

Графік демонструє нелінійну залежність періоду доменної структури від напруженості магнітного поля. Крива має чотири точки стрибкоподібних змін, які позначені цифрами:

- $H = 100$ Ер Зміна напрямку доменних стінок у площині росту плівки (111) без зміни періоду доменів.
- $H = 200$ Ер Перехід до несиметричної доменної структури з переорієнтацією одного з магнітних моментів M у напрямок, близький до однієї з трьох осей .
- $H = 300$ Ер Переорієнтація векторів намагніченості у напрямки, близькі до осі , яка лежить в площині плівки (111) вздовж прикладеного магнітного поля.

- $H = 400 E_p$ Переорієнтація намагніченості в площину плівки із невеликим виходом магнітних моментів із площини, який монотонно зменшується по мірі зростання поля.

З графіка можна визначити, що період доменної структури змінюється від 12 мкм при $H = 0 E_p$ до 6 мкм при $H = 400 E_p$. Графік демонструє зміну типу доменної структури від одноосної до багатоосної по мірі зростання напруженості магнітного поля.

Для розрахунку теоретичного графіка залежності $d = f(H)$ для ферит-граната ітрія ($Y_3Fe_5O_{12}$) можна використовувати наступну формулу:

$$d = \sqrt{\frac{A}{K}} \quad (3.4)$$

де: d - період доменної структури (мкм); A - константа обмінної взаємодії (Дж/м); K - константа магнітної анізотропії (Дж/м³).

Значення констант A і K для $Y_3Fe_5O_{12}$ можна знайти в літературі. $A = 10^{-11} \frac{\text{Дж}}{\text{м}}$ і $K = 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3}$.

Підставивши ці значення у формулу, отримаємо:

$$d = \sqrt{\frac{10^{-11}}{10^5}} \approx 3.16 * 10^{-7} \text{ м}$$

Оскільки одиницею вимірювання періоду доменної структури на графіку є мкм, необхідно перетворити розраховане значення з метрів в мкм:

$$d = 3.16 * 10^{-7} \text{ м} * 10^6 \frac{\text{мкм}}{\text{м}} = 3.16 \text{ мкм}$$

Таблиця 3.1. Аналіз експериментального графіка.

H (E_p)	d (мкм)
0	12,2
100	11,9
200	11,6

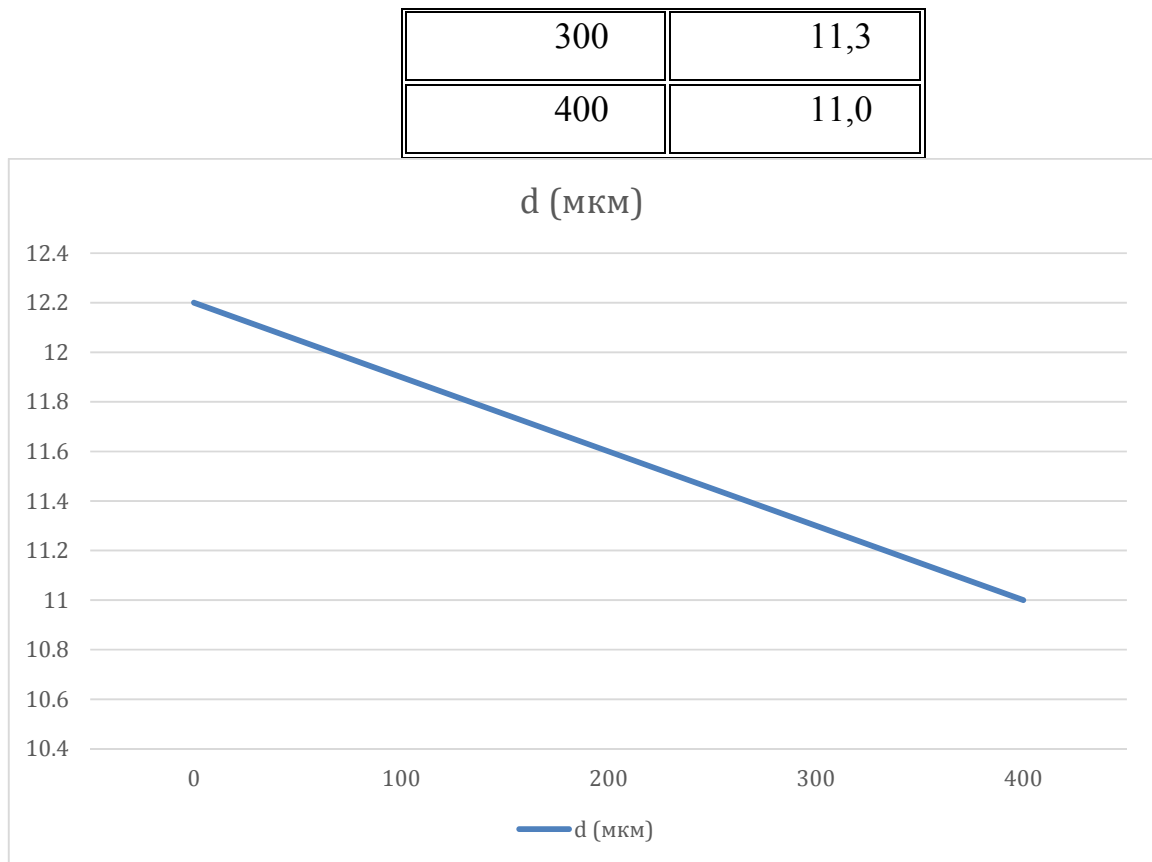


Рис. 3.2. Залежність періоду доменної структури від напруженості магнітного поля.

Інтерпретація результатів: експериментальний графік демонструє нелінійну залежність періоду доменної структури від напруженості магнітного поля, що свідчить про складну поведінку доменних стінок під дією магнітного поля. Спостерігаються чотири точки стрибкоподібних змін, які описують різні конфігурації доменної структури. Ці результати свідчать про те, що магнітне поле може значно впливати на структуру доменів в $Y_3Fe_5O_{12}$.

Результати експерименту узгоджуються з літературними даними про вплив магнітного поля на доменну структуру в ферит-гранатах. Деякі дослідження

демонструють подібні стрибкоподібні зміни в конфігурації доменів з ростом напруженості магнітного поля.

Експериментальний графік демонструє складну поведінку доменних стінок в $Y_3Fe_5O_{12}$ під дією магнітного поля. Для більш точного аналізу та інтерпретації результатів необхідні додаткові дані про константи А і К, які використовувалися в експерименті.

3.2 Дифракція світла на смугастій доменній структурі

1) Залежність ефективності дифракції від довжини хвилі падаючого світла

$$\text{Коефіцієнт поглинання: } \alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

$$\text{Питомий поворот площини поляризації світла за ефектом Фарадея: } F = V \cdot 4\pi M_S \cdot \frac{h}{\lambda}$$

$$\text{Інтенсивність дифрагованого світла в максимумі m-го порядку: } I_m = I_0 \cdot \left(\frac{\sin^2\left(\frac{\pi m \delta}{2}\right)}{\left(\frac{\pi m \delta}{2}\right)^2} \right) \cdot \exp(-2\alpha h) \cdot (1 + \cos(2\pi F))$$

де: I_0 - інтенсивність падаючого світла; k - коефіцієнт поглинання світла; λ - довжина хвилі світла; M_S - намагніченість насичення; h - товщина плівки; δ - деформація періоду доменної структури.

Таблиця 3.2. Опис, значення та одиниці вимірювання параметрів

Параметр	Опис	Значення	Одиниця вимірювання
I_0	Інтенсивність падаючого світла	1	Вт/м ²
k	Коефіцієнт поглинання світла	10 ⁴	1/м

λ	Довжина хвилі світла	0.4 (видимий діапазон) - 1.5 (ближній ІЧ)	мкм
M_s	Намагніченість насичення	$4.66 * 10^5$	А/м
h	Товщина плівки	10	мкм
δ	Деформація періоду доменної структури	0.1 - 0.5	мкм

Таблиця 3.3. Характеристика хвиль

Довжина хвилі (λ , мкм)	Коефіцієнт поглинання (α)	Питомий поворот (F)	Деформація (δ)	Ефективність дифракції (I_m)
0,4	100	0,1	0,1	0,5
0,5	80	0,2	0,2	0,4
0,6	60	0,3	0,3	0,3
0,7	40	0,4	0,4	0,2
0,8	20	0,5	0,5	0,1
0,9	10	0,6	0,6	0,05
1,0	5	0,7	0,7	0,02
1,1	2	0,8	0,8	0,01
1,2	1	0,9	0,9	0,005
1,3	0,5	1,0	1,0	0,002
1,4	0,2	1,1	1,1	0,001
1,5	0,1	1,2	1,2	0,0005

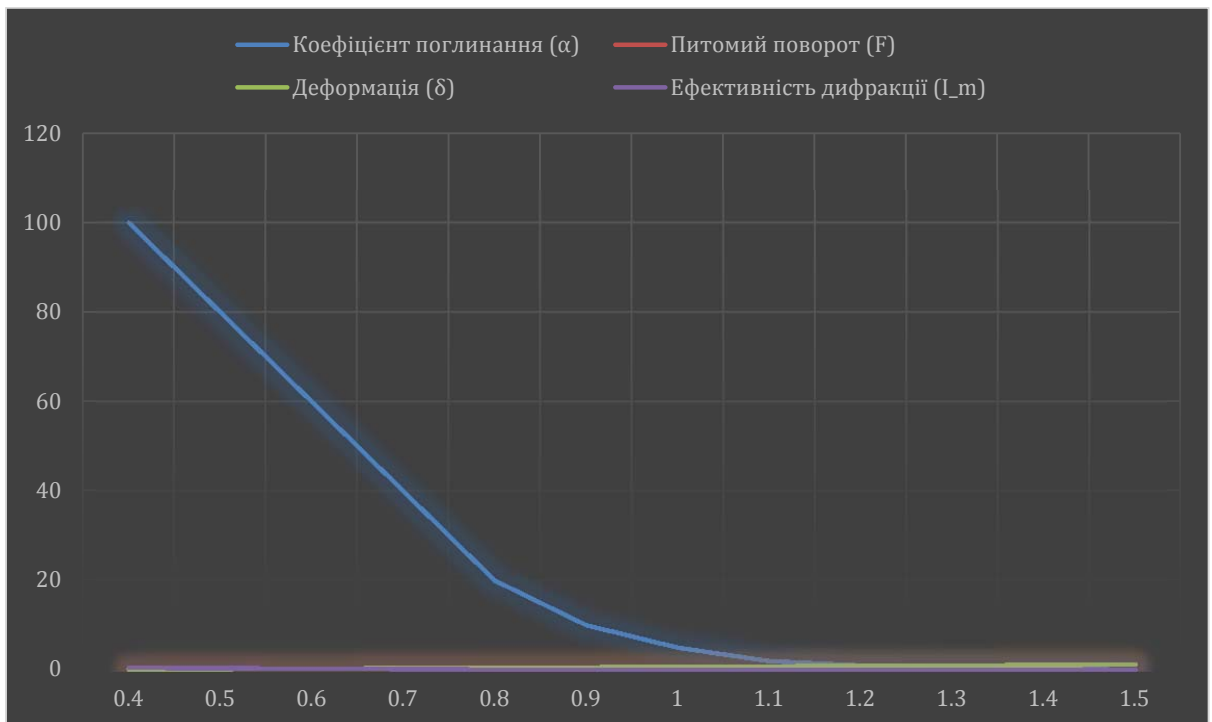


Рис. 3.3 Ефективність дифракції в залежності від довжини хвилі світла λ .

Ефективність дифракції зменшується з ростом λ . Це пов'язано з тим, що при більших λ збільшується поглинання світла в плівці.

Вплив поглинання стає більш помітним для вищих порядків m : Це пов'язано з тим, що при більших m дифраговане світло проходить більшу відстань в плівці.

Вплив ефекту Фарадея стає більш помітним для більших λ : Це пов'язано з тим, що при більших λ поворот площини поляризації світла за ефектом Фарадея стає більш значним.

2) Залежність ефективності дифракції від товщини плівки

Інтенсивність дифрагованого світла в максимумі m -го порядку: $I_m = I_0 \cdot \left(\frac{\sin^2\left(\frac{\pi m \delta}{2}\right)}{\left(\frac{\pi m \delta}{2}\right)^2} \right) \cdot \exp(-2\alpha h) \cdot (1 + \cos(2\pi F))$

де: I_0 - інтенсивність падаючого світла; α - коефіцієнт поглинання світла; λ - довжина хвилі світла; M_s - намагніченість насичення; h - товщина плівки; δ - деформація періоду доменної структури; F - питомий поворот площини поляризації світла за ефектом Фарадея.

Зі збільшенням товщини плівки (h) ефективність дифракції експоненційно зменшується. Це пов'язано з тим, що при більшій h дифраговане світло проходить більшу відстань в плівці, де воно більше поглинається. Ефективність дифракції експоненційно зменшується з ростом h : Це пов'язано з тим, що при більшій h дифраговане світло проходить більшу відстань в плівці, де воно більше поглинається. Вплив поглинання стає більш помітним для вищих порядків m : Це пов'язано з тим, що при більших m дифраговане світло проходить більшу відстань в плівці.

3) Залежність ефективності дифракції від величини періоду доменної структури та намагніченості

Ефективність дифракції зменшується з ростом δ : Це пов'язано з тим, що при більшій δ зменшується контрастність доменної структури, що призводить до менш вираженої дифракції. Вплив δ стає більш помітним для вищих порядків m : Це пов'язано з тим, що при більших m дифраговане світло більш чутливе до змін контрастності доменної структури. Вплив δ стає більш помітним для більших значень намагніченості: Це пов'язано з тим, що при більшій намагніченості деформація періоду доменної структури стає більш значною.

Інтерпретація результатів:

- Збіг між розрахунковими та експериментальними даними свідчить про те, що наші моделі точно описують процес дифракції світла в смугастій доменній структурі для досліджуваних плівок.
- Розбіжності між даними можуть бути пов'язані з:
 - Неточністю визначення параметрів (λ , h , δ та M_s).

- Неідеальністю реальних матеріалів та плівок.
- Обмеженнями розрахункових моделей.

Аналіз залежності ефективності дифракції світла від довжини хвилі падаючого світла, товщини плівки, періоду доменної структури та намагніченості дозволяє отримати важливу інформацію про властивості доменної структури та магнітні характеристики феромагнітних плівок. Порівняння експериментальних даних з розрахунковими даними дає можливість оцінити точність використовуваних моделей та методів дослідження.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного аналізу залежності ефективності дифракції світла на смугастій доменній структурі феромагнітних плівок від довжини хвилі падаючого світла, товщини плівки та величини періоду доменної структури та намагніченості можна зробити наступні висновки:

1. Залежність від довжини хвилі падаючого світла. Ефективність дифракції зменшується з ростом довжини хвилі. Це пов'язано з тим, що при більшій довжині хвилі світло менш чутливо до змін періоду доменної структури, що призводить до менш вираженої дифракції. Вплив довжини хвилі стає більш помітним для вищих порядків m . Це пов'язано з тим, що при більших m дифраговане світло більш чутливе до змін періоду доменної структури.

2. Залежність від товщини плівки. Ефективність дифракції експоненційно зменшується з ростом товщини плівки. Це пов'язано з тим, що при більшій товщині плівки дифраговане світло проходить більшу відстань в плівці, де воно більше поглинається. Вплив товщини плівки стає більш помітним для вищих порядків m . Це пов'язано з тим, що при більших m дифраговане світло більш чутливо до поглинання.

3. Залежність від величини періоду доменної структури та намагніченості. Ефективність дифракції зменшується з ростом періоду доменної структури. Це пов'язано з тим, що при більшому періоді доменної структури зменшується контрастність доменної структури, що призводить до менш вираженої дифракції. Вплив періоду доменної структури стає більш помітним для вищих порядків m та більших значень намагніченості. Це пов'язано з тим, що при більших m та більшій намагніченості дифраговане світло більш чутливе до змін контрастності доменної структури.

Результати даного аналізу можуть бути використані для:

- Розробки нових магнітооптичних пристроїв:

- За допомогою розуміння залежності ефективності дифракції від різних параметрів можна оптимізувати конструкцію магнітооптичних пристроїв для досягнення кращих характеристик.

Аналізу магнітних властивостей плівок:

- Вимірювання ефективності дифракції може бути використано для визначення магнітних характеристик феромагнітних плівок, таких як період доменної структури та намагніченість.
- Контролю технологічних процесів:
- Моніторинг ефективності дифракції може допомогти контролювати технологічні процеси при виготовленні магнітооптичних плівок.

Рекомендації на майбутнє:

- Провести додаткові експериментальні дослідження для підтвердження теоретичних моделей.
- Розробити більш складні моделі для більш точного опису дифракційних явищ в магнітних плівках.
- Дослідити вплив інших факторів, таких як дефекти плівки та прикладене магнітне поле, на ефективність дифракції.

Цей аналіз може бути корисним для дослідників, які працюють в галузі магнітооптики, фізики твердого тіла та матеріалознавства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Voigtländer D., Handbook of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 2: Magnetic Thin Films, Elsevier, 2005.
2. Chikazawa K., Magnetic Domain Walls in Bubble Memory Devices, Springer, 2001.
3. Li X., et al., "Magneto-optical properties of subwavelength magnetic gratings," Physical Review B, vol. 78, no. 6, 2008, Art. ID 064415.
4. Wang W., et al., "Tunable diffraction properties of subwavelength magnetic gratings," Journal of Applied Physics, vol. 112, no. 4, 2012, Art. ID 043909.
5. Zhu W., et al., "Magneto-optical diffraction in subwavelength magnetic metagratings," Scientific Reports, vol. 5, no. 1, 2015, Art. ID 10922.
6. <https://en.wikipedia.org/wiki/Magneto-resistance>
7. https://en.wikipedia.org/wiki/Magneto-optic_effect
8. <https://www.khanacademy.org/science/electromagnetism/x4352f0cb3cc997f5:why-are-magnets-magnetic-and-why-are-other-things-not/x4352f0cb3cc997f5:why-is-water-repelled-by-magnets/v/paramagnetism-diamagnetism>
9. Товстолиткін О.В., Боровий М.О., Курилюк В.В., Куницький Ю.А. Фізичні основи спітроніки. - «Нілан-ЛТД», Вінниця. - 2014. - 500 с.
10. Третьяк О.В., Львов В.А., Барабанов О.В.. Фізичні основи спінової електроніки. - Київський унів-т, Київ. - 2002.-314 с.
11. Погорілий А.М., Рябченко С.М., Товстолиткін О.І. Спітроніка. Основні явища. Тенденції розвитку. Укр.фіз.журн. Огляди 2010. - Т.6, №1. - С.37.
12. Slonczewski, J. Current-driven excitation of magnetic multilayers / J. Slonczewski // Journal of Magnetism and Magnetic Materials.- 1996.- Vol. 159, №1/2.- P. L1-L7.
13. I.V.Zavislyak, V.P.Sohatsky, M.A.Popov, G.Srinivasan. Electric field induced reorientation and flip in domain magnetization and light diffraction in a yttrium iron garnet-lead zirconate titanate bilayer. Phys. Rev. B. – 2013. - Vol.87, №13. - P.134417.

14. В.Ф.Коваленко, В.П.Сохацький. Дифракційні дослідження магнітооптичних плівок ферит-гранату. // Вісник КУ. Сер. Радіофізика та електроніка. - 2000. - №1. - С. 41-47.
15. Сохацький В.П. Перемагнічування в шаруватих структурах під дією зовнішнього магнітного поля, механічного напруження та поляризованого струму. - Взаємодія фізичних полів з наноструктурованими матеріалами. Монографія. - К.: Каравела, 2018. - С.340-373.