

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ
Кафедра електрофізики

До захисту допущено:

«На правах рукопису»

Завідувач кафедри _____ Сергій САВЕНКОВ

« _ » грудня 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА
на тему:
«СПІН-ПЕРЕОРІЄНТАЦІЙНІ ЕФЕКТИ В МАГНІТООПТИЧНИХ
СЕРЕДОВИЩАХ»

Виконав:

студент 2-го курсу магістратури
денної форми навчання
спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали
ОПП «Радіофізика та електроніка»
Михалевич Андрій Ігорович

Науковий керівник:

канд. фіз.-мат. н., доцент
Сохацький Володимир Петрович

Рецензент:

д. фіз.-мат.н.,
Фелінський Георгій Станіславович

Засвідчую, що у цій магістерській роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____

Робота допущена до захисту в ЕК рішенням кафедри електрофізики
від «__» грудня 2023 р., протокол № __.

Завідувач кафедри електрофізики,
доктор фіз.-мат. наук, професор
Савенков Сергій Миколайович

РЕФЕРАТ

Дипломна робота магістра:

СПІН-ПЕРЕОРІЄНТАЦІЙНІ ЕФЕКТИ В МАГНІТООПТИЧНИХ
СЕРЕДОВИЩАХ

67 стор., 13 рис., 17 джерел.

В роботі розглянуті методи моделювання перемагнічування речовин із сильною взаємодією електричної і магнітної підсистем, зокрема таких у магнітовпорядкованих середовищ, в яких перемагнічування може відбуватись під дією струму поляризованих електронів, механічних напружень та оптичного опромінювання. Визначений вплив згадани факторів на перемагнічування як при застосуванні зовнішніх магнітних полів, так і без них. Чисельні розрахунки виконувались на основі рівнянь енергетичного балансу, і виявились добре корелюючими із магнітооптичними вимірюваннями відповідних процесів у різних типах речовин. Також оцінені термодинамічні умови виникнення локальних змін намагніченості під дією вищезгаданих факторів з метою визначення оптимальних характеристик магнітних середовищ для ефективного керування їх магнітним станом.

СПІНТРОНІКА, МАГНІТООПТИКА, МАГНІТНА АНІЗОТРОПІЯ,
МАГНІТОПРУЖНИЙ ЕФЕКТ, ДОМЕННА СТРУКТУРА, ЗАЛІЗО-ІТРІЄВИЙ
ГРАНАТ.

Зміст

Назва розділу	Стор.
ВСТУП	4
1 ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ СПІНТРОНІКИ (ОГЛЯД).	11
1.1 Спінова електроніка: сутність, переваги, завдання, що може вирішувати	11
1.1.1 Загальні ідеї спінтроніки.	11
1.1.2 Основні ідеї напівпровідникової спінтроніки.	18
1.1.3. Явище гігантського магнітоопору.	24
1.2. Матеріали для спінової електроніки.	
2 МАГНІТООПТИЧНІ МЕТОДИКИ І МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ.	33
2.1. Магнітооптичні ефекти, матеріали, методики досліджень.	33
2.2. Методики моделювання процесів перемагнічування.	39
3 СПОСОБИ ПЕРЕМАГНІЧУВАННЯ ОБМІННО-ЗВ'ЯЗАНИХ МАГНІТНИХ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ	43
3.1 Дія поляризованого випромінювання на намагніченість кристалічної структури залізо-ітрієвого гранату.	43
3.2. Магнітооптична ефективність дифракції на періодичних доменних структурах.	47
3.3. Дія поляризованого струму на намагніченість металевих шарів.	51
3.4. Моделювання перемагнічування обмінно-зв'язаних магнітних неоднорідностей.	58
ВИСНОВКИ	65
Перелік посилань	66

ВСТУП

Розвиток електроніки, оснований на магнітних явищах (або спінової електроніки) обумовлений можливістю створення квантових комп'ютерів, одноелектронних транзисторів, вентильних структур, в яких керування струмом може здійснюватися не тільки за допомогою заряду електрона, але і його спіна, тобто керувати можна не тільки традиційною напругою, а і магнітним полем. Така додаткова ступінь свободи розширює функціональні можливості пристроїв спітроніки, дозволяючи розробляти нові типи пристроїв - генераторів, підсилювачів, фільтрів, світлодіодів, характеристики яких можуть змінюватися під дією магнітного поля [1-6].

Одне з явищ, на яких будується спітроніка - явище гігантського магнітоопору (зміна електричного опору під дією магнітного поля), - вже набуло широкого використання в магнітних головках зчитування комп'ютерних жорстких дисків. Незважаючи на широкі дослідження цього явища в останні десятиріччя, його природа залишається до кінця не проясненою, а постійна розробка нових матеріалів спричиняє появу якісно нових властивостей. В той же час, відомий також інтерес дослідників до структур типу феромагнетик-напівпровідник у зв'язку із можливостями створення на їх основі структур, в яких керування струмом здійснюється шляхом впливу на спін електрона. Серед явищ, що активно вивчаються в таких структурах, зокрема, вже згадуваний гігантський магнітоопір та інжекція поляризованих по спіну електронів з феромагнетика у напівпровідник. Можливість використання спінових клапанів в системах для інжекції поляризованих по спіну електронів у напівпровідник є важливою передумовою створення ряду пристроїв магнітоелектроніки, в першу чергу спінового транзистора [7-9].

Темою даної роботи було обрано дослідження магнітних, електричних, магнітооптичних та спектральних властивостей матеріалів, що можуть бути використані в інтегрально-оптичних системах і системах НВЧ обробки інформації. Основою для цих досліджень є висока магнітооптична ефективність

плівкових структур на основі кристалічного залізо-ітрієвого граната (ЗІГ) з хімічною формулою $Y_3Fe_5O_{12}$, що мають перспективу використання в якості функціональних вузлів (фільтрів, процесорів) магнітоелектронних систем [10-12]. Поведінка таких структур при безпосередньому контакті з металами і напівпровідниками представляє інтерес як з фундаментальної точки зору (зокрема, існує цілий ряд зовсім не досліджених ефектів індукованого спінового транспорту, спін-переорієнтаційних переходів, локального феромагнітного впорядкування, тощо) так і з прикладної (наприклад, для створення модуляторів, дефлекторів з оптичним та/або магнітним управлінням). Тематика роботи охоплює також дослідження прояву механізму взаємодії світла з магнітною і електричною підсистемами ЗІГ, а також умов індукованих спін-переорієнтаційних пререходів в подібних структурах.

Актуальність теми обумовлена необхідністю вивчення закономірностей та явищ, що мають місце в середовищах з діелектричними чи напівпровідниковими і феромагнітними властивостями, зокрема, залежності магнітного стану феромагнетика в залежності від впливу зовнішніх факторів для визначення можливостей розробки на основі таких матеріалів нових приладів магнітоелектроніки.

Незважаючи на дифракційні обмеження роздільної здатності, використання для досліджень властивостей спінових структур магнітооптичних методів представляється ефективним завдяки спектральній чутливості, відсутності механічного контакту з досліджуваною поверхнею, можливості паралельного зчитування та обробки інформації, тощо. Для дослідження напросвіт використовується традиційний магнітооптичний ефект Фарадея, а для досліджень непрозорих матеріалів або поверхневої магнітної структури застосовуються ефекти Керра, які дозволяють визначати як об'ємні, так і поверхневі характеристики навіть в багатошарових плівках, виявляти магнітні та оптичні неоднорідності субмікронних розмірів та їх вплив на систему енергетичних рівней і характер електронних переходів, зокрема, під дією зовнішніх полів.

В якості об'єкта досліджень використовувались магнітооптичні плівки

залізо-ітрієвого гранату (ЗІГ) - $Y_3Fe_5O_{12}$, вирощені епітаксійно в кристалографічній площині (111) на підкладинці з галій-гадолінієвого гранату ($Gd_3Ga_5O_{12}$) [13]. Період рівноважної доменної структури (тобто у відсутності зовнішнього поля) плівок різної товщини (характерний діапазон товщин плівок – від 1 до 10 мкм) знаходився в межах від 3 до 20 мкм.

Метою даної роботи було визначення ефективності застосування плівок ЗІГ як магнітооптичних модуляторів та дефлекторів оптичного випромінювання, а також дослідження впливу «немагнітних» факторів (механічного напруження, поляризованого світла, електричного струму поляризованих електронів) на перемагнічування нан шарових металевих сендвіч-структур і можливості їх взаємодії з кристалічними ферит-гранатовими структурами. Також передбачалось методами комп'ютерного моделювання визначити умови оптимального перемагнічування як шаруватих, так і об'ємних структур. Для досягнення цієї мети передбачалося часткове вдосконалення методики електричних вимірів магнітоопору і збільшення чутливості магнітооптичної методики та проведення на цій основі комплексних вимірів характеристик структур та їх залежностей від зовнішнього магнітного та електричного полів.

Розробки оптико-механічних та НВЧ пристроїв на основі об'ємних та плівкових ферит-гранатів, розвиток нових технологічних процесів вимагає вдосконалення методів магнітооптичних вимірювань, в першу чергу в напрямку підвищення роздільної здатності [14]. Так, у сфері інформаційних технологій широке розповсюдження нових матеріалів для магнітного запису з надвисокою щільністю обумовлює потребу у нанометричних вимірюваннях їх магнітних характеристик. Оптичні та магнітооптичні методи, незважаючи на обмеження по роздільній здатності, пов'язані із дифракційними ефектами, в багатьох випадках є досить ефективними завдяки спектральній чутливості, відсутності механічного контакту з досліджуваною поверхнею, можливості паралельного зчитування та обробки інформації, тощо.

Зміни характеристик деяких магнетиків, зокрема, ферит-гранатів, під дією оптичного випромінювання особливо проявляються в області критичних

температур та концентрацій, поблизу точок фазового переходу. В таких випадках сильний взаємозв'язок електричної та магнітної підсистем підвищує чутливість матеріалу до впливу зовнішніх факторів, наслідком чого стає зміна макроскопічних характеристик речовин при опромінюванні поляризованим світлом, що розглядається в даній роботі. Таким чином, недостатня зрозумілість закономірностей та механізмів цілої низки явищ, що виникають під дією світла при настійній потребі практичного використання спричиняють необхідність різнобічного вивчення фотоіндукованих процесів. Серед фундаментальних проблем взаємодії світла з твердим тілом значний інтерес становить розсіяння світла на мікромагнітних утвореннях (штучних неоднорідностях намагніченості або природних утвореннях типу ліній Блоха, вигинів доменних стінок, тощо), характер і особливості індукованих світлом спін-переорієнтаційних переходів, встановлення зв'язку магнітних, оптичних, механічних характеристик матеріалу з параметрами діючого на нього випромінювання, побудова комплексної моделі фотоіндукованих явищ в рамках уявлень зонної теорії напівпровідників. Дослідження поведінки і структури доменних стінок має значення для визначення фундаментальних властивостей оптично активних магнетиків [15].

Дослідження спектрів дифракційного розсіяння випромінювання також має як фундаментальне, так і прикладне значення. Аналіз розсіяного випромінювання дає інформацію про характеристики доменних стінок (обмінну енергію, ширину) та їх тонку структуру. Характерні розміри магнітних та механічних неоднорідностей в магнітних матеріалах, що створюються для сучасних технічних потреб, складають десятки нанометрів. Такі і менші розміри можуть мати границі між зернами, кристалічні дефекти, магнітні домени (інформаційні біти). Ефективність їх дослідження оптичними методами суттєво підвищується при збільшенні роздільної здатності. Класичне обмеження на роздільну здатність оптичних методів звичайно, долають використанням мікроскопів ближнього поля, але їх складність та обмежена сфера застосування обумовлює необхідність використання альтернативних методик, доповнюючи їх розрахунковими методами моделювання процесів індукованого перемагнічування.

Наноструктуровані плівкові матеріали відрізняються особливо широким діапазоном варіації магнітних і магнітооптичних параметрів. До того ж, низка технологічних процесів вирощування наноструктур забезпечує різноманітність плівок у широкому діапазоні зміни їх параметрів. Це обумовлює їх розповсюдження серед магнітних матеріалів і широкі можливості для практичного застосування. Так, крім вже згадуваних датчиків зовнішніх просторово-неоднорідних магнітних полів, наноструктури ефективно використовуються як магнітні головки зчитування інформації, інтегрально-оптичні модулятори та транспаранти, елементи НВЧ електроніки, тощо.

Таким чином, актуальність вибраної тематики обумовлена недостатнім вивченням явищ переносу заряду у речовинах із сильним взаємозв'язком електронної й магнітної підсистем, які є надзвичайно перспективними для використання у різних сферах магнітоелектроніки. Актуальність теми обумовлена також ефективністю оптичних методів дослідження структури матеріалів, оснований на індукованій випромінюванням зміні його макроскопічних об'ємних та поверхневих характеристик. По результатах таких змін можна досліджувати, зокрема, розподіл магнітних неоднорідностей, систему енергетичних рівней, характер перерозподілу іонів у кристалічній ґратці, тощо.

Тема роботи безпосередньо пов'язана з науково-дослідними роботами в області спінової електроніки та магнітооптики, що проводяться на кафедрі електрофізики.

Основним напрямом роботи було встановлення закономірностей прояву електричних та магнітних ефектів в наноструктурованих матеріалах із сильною взаємодією електричної і магнітної підсистем.

Для досягнення мети роботи були сформульовані і частково вирішені наступні задачі:

- проведення розрахунків для визначення характеру поведінки поляризованих струмів при різних параметрах речовин та різних зовнішніх умовах;
- характеристика сендвіч-структур, що складаються з тонкоплівкових

феромагнітних шарів, немагнітних прошарків, напівпровідникової або діелектричної підкладки з різними електричними та оптичними характеристиками;

- вибір комплексу вимірювальних методик для найбільш повної характеристики поведінки неоднорідних спінових клапанів та дослідження властивостей таких сполук;

- встановлення зв'язку між характером змін магнітних і електричних параметрів та характеристиками наночарів або наногранул, зокрема, зв'язку між змінами розподілу намагніченості в шарах плівок з параметрами діючого на кристал поляризованого випромінювання;

- встановлення кореляції між характеристиками мікронеоднорідностей, у тому числі індукованих світлом та змінами у відповідних їм спектрах дифрагованого та розсіяного на них світла.

Для досягнення поставленої мети передбачалося частково вдосконалити оптичні методики дослідження магнітних властивостей та вимірювання характеристик магнітних матеріалів із субмікронною роздільною здатністю.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що в ній:

1. Отримані залежності характеру перемагнічування спінових клапанів від напрямку поля підмагнічування для різних товщин магнітних шарів та немагнітного прошарку; з цих залежностей визначені оптимальні режими функціонування спінового клапана як складової частини спінового транзистора, датчика магнітного поля, елемента енергонезалежної магнітної пам'яті.

2. Розраховані характеристики явища впливу струму поляризованих електронів на локальний стан намагніченості, показана можливість поліпшення енергетичного балансу перемагнічування магнітом'якого шару спінового клапана при застосуванні поляризаційного струму відповідного напрямку.

3. Показано, що опромінення тонких магнітних плівок поляризованим світлом може призводити до обернених змін локального магнітного стану, що проявляється як залежний від поляризації зсув доменних стінок.

4. Показана можливість керування параметрами світла, яке проходить крізь

магнітооптичну плівку шляхом пружної її деформації зі зміною типу магнітної кристалографічної анізотропії, яка призводить до зміни орієнтації намагніченості та доменної структури плівки.

5. На основі розрахунків дифракційної ефективності визначені необхідні параметри матеріалу та технологічні режими для створення оптичних перетворювачів із різною анізотропією.

Практична цінність роботи полягає в тому, що отримані в ній результати можуть бути використані для створення пристроїв спінової електроніки, датчиків магнітних полів та електро- і магнітокерованих оптичних елементів. Так, застосування технологічних режимів нанесення тонких шарів дозволяє формувати необхідні типи анізотропії, що забезпечує їх оптимальну взаємодію для формування робочої характеристики перемагнічування високочутливого магнітом'якого шару. Використання розроблених елементів та варіантів конструкцій спінових транзисторів дозволяє створювати високочутливі пристрої із заданими властивостями.

Достовірність результатів роботи визначається використанням стандартних комп'ютерних методів на основі адаптованих прикладних програм типу *Mathcad*, *Origin*, *Excel* та ін., узгодженням експериментальних результатів і розрахунків, підтвердженням ряду результатів іншими дослідниками або при використанні інших методик.

1 ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ СПІНТРОНІКИ (ОГЛЯД)

1.1 Спінова електроніка: сутність, переваги, завдання, що може вирішувати

1.1.1 Загальні ідеї спітроніки.

Визначення поняття спітроніка та короткий історичний огляд її розвитку. Початкові відкриття (1980-1990-ті роки):

У цей період вчені почали вивчати спін-залежні явища в металічних структурах та магнітних матеріалах.

В 1988 році відбулося відкриття гігантського магнітосопротивлення (GMR), яке стало ключовим проривом у розвитку спітроніки.

Розвиток GMR та спітроніки (1990-2000-ті роки):

В 1997 році двома вченими, зокрема, була створена GMR-структура, що вивела спітроніку на новий рівень.

Розробка спітронічних тунельовальних структур (STS) та інших спітронічних пристроїв, які відкрили нові можливості для зберігання і обробки інформації.

Сучасний етап (2000-ті роки та пізніше):

Продовження досліджень у галузі спітроніки привело до створення нових матеріалів, таких як геїни, полімери та інші немагнітні матеріали зі спін-залежними властивостями.

Відкриття нових спін-залежних ефектів та їхній перехід в практичні застосування, зокрема, у сенсорах, пам'яті та інших пристроях.

Активні дослідження у сфері спітроніки та намагання інтегрувати спітронічні пристрої в традиційну електроніку для підвищення її продуктивності та ефективності.

З часом спітроніка стала однією з ключових галузей нанотехнологій та мікроелектроніки, завдяки своїм потенційним перевагам у порівнянні з традиційною електронікою.

Відмінності між традиційною електронікою та спінтронікою. Традиційна електроніка та спінтроніка — це дві різні галузі, кожна з яких має свої особливості, принципи та застосування. Ось основні відмінності між ними:

Основний носій інформації:

Традиційна електроніка: В основі традиційної електроніки лежать електрони з від'ємним електричним зарядом.

Спінтроніка: Спінтроніка використовує електронний спін (внутрішній магнітний момент електрона) як основний носій інформації.

Механізми передачі інформації:

Традиційна електроніка: Заснована на рухах електронів через провідник, використовуючи електричний потенціал.

Спінтроніка: Використовує спін-залежні явища, такі як магнітний тунелювання або гігантське магнітосопротивлення, для передачі та обробки інформації.

Переваги і можливості:

Традиційна електроніка: Має обмеження у швидкості, енергоспоживанні та інтеграції компонентів.

Спінтроніка: Має потенціал для створення енергоефективних, швидших та компактних пристроїв. Спінтронічні пристрої можуть працювати при нижчих енергетичних затратах та мати більшу витривалість.

Матеріали:

Традиційна електроніка: Часто використовуються напівпровідникові матеріали, такі як кремній.

Спінтроніка: Використовує широкий спектр матеріалів, включаючи магнітні, немагнітні та їх комбінації.

Застосування:

Традиційна електроніка: Застосовується в різних пристроях, від комп'ютерів до смартфонів та мікроконтролерів.

Спінтроніка: Застосовується у спеціалізованих пристроях, таких як спінтронні тунелювальні переходи, магнітні пам'яті, сенсори та інші.

Отже, традиційна електроніка та спінтроніка представляють собою дві різні концепції, але вони можуть взаємодіяти та доповнювати одна одну в різних сферах технологій.

Ефективність в контексті спінтроніки часто розглядається через призму зменшення енергоспоживання та теплових втрат порівняно з традиційною електронікою. Давайте розглянемо ці аспекти:

Енергоспоживання:

Традиційна електроніка: У традиційній електроніці багато енергії витрачається на переміщення заряджених частинок (електронів) через провідники і мікросхеми. Це призводить до значних енергетичних втрат, особливо в мікроелектронних пристроях.

Спінтроніка: В спінтроніці передача інформації здійснюється за допомогою електронного спіну, а не електричного заряду. Це може зменшити енергоспоживання, оскільки потреба в пересиланні великої кількості електронів зменшується.

Теплові втрати:

Традиційна електроніка: Електрони, які рухаються через провідники, зіштовхуються з атомами і відбувається розсіювання. Це призводить до теплових втрат, особливо при високих частотах роботи пристроїв.

Спінтроніка: Менше руху заряджених частинок означає менше теплових втрат в результаті розсіювання. Крім того, деякі спінтронічні матеріали мають потенціал знизити теплове випромінювання завдяки їхнім специфічним властивостям.

В цілому, завдяки цим факторам, спінтронічні пристрої можуть бути енергоефективнішими та менш тепловитратними, що робить їх привабливими для застосувань, де важливо економія енергії та уникнення перегріву. Швидкість: потенціал для розробки швидших пристроїв.

Термін "швидкість" у контексті спінтроніки відноситься до можливості розробки пристроїв, які можуть опрацьовувати інформацію швидше, ніж

традиційні електронні пристрої. Ось декілька аспектів, що стосуються потенціалу для створення швидших пристроїв у спінтроніці:

Матеріали спінтроніки: Деякі матеріали, використовувані в спінтроніці, можуть взаємодіяти зі спіном електронів швидше або ефективніше, ніж традиційні матеріали. Це дозволяє створювати пристрої з вищою швидкістю реакції.

Магнітна динаміка: Спінтроніка дозволяє використовувати магнітну динаміку для передачі інформації, що може бути швидше, ніж традиційна передача інформації за допомогою електричного заряду.

Менші втрати: Оскільки спінтронічні пристрої можуть мати менше теплових втрат, це також може сприяти їхній вищій ефективності і, отже, швидшій роботі.

Інтеграція: З розвитком технологій спінтроніки стає можливою інтеграція спінтронічних компонентів з традиційною мікроелектронікою, що може привести до створення гібридних систем, які об'єднують переваги обох підходів.

Потенціал для квантової спінтроніки: В деяких дослідженнях розробляються концепції квантової спінтроніки, де квантові ефекти використовуються для реалізації швидших і ефективніших пристроїв.

Враховуючи ці аспекти, можна зробити висновок, що спінтроніка має значний потенціал для розробки пристроїв, які працюють швидше та ефективніше, порівняно з традиційною електронікою.

Спінтроніка, завдяки своїм унікальним властивостям, відкриває двері до створення пристроїв зі зміненими, вдосконаленими або зовсім новими характеристиками. Ось деякі з цих нових функціональних можливостей:

Гігантське магнітосопротивлення (GMR): Одним з ключових відкриттів у спінтроніці було гігантське магнітосопротивлення. Це явище дозволило створювати сенсори, які реагують на зміни магнітного поля, такі як магнітні диски для зберігання даних.

Спін-трансферний торк (STT): Ця технологія дозволяє переключати стан спінтронічних пристроїв за допомогою струму. Вона створює можливість для

більш швидкої та ефективною переключення, що використовується у пам'яті та логічних пристроях.

Спінтронні тунелювальні переходи (STT-MRAM): Ці пристрої використовують магнітний тунелювальний ефект для зберігання інформації. Вони відрізняються високою швидкістю, низьким споживанням енергії та довговічністю порівняно з традиційними типами пам'яті.

Спінтронні транзистори: Ці пристрої можуть стати майбутнім для логічного процесингу, дозволяючи реалізувати нові архітектури та функціональні можливості для електронних систем.

Квантова спінтроніка: Використання квантових ефектів в спінтроніці може вести до створення квантових комп'ютерів та інших пристроїв, які використовують принципи квантової механіки для обробки інформації.

З урахуванням цих нових функціональних можливостей можна сказати, що спінтроніка не лише вдосконалює існуючі технології, але і відкриває двері до нових досліджень та застосувань, які можуть радикально змінити підхід до електронних пристроїв у майбутньому.

Магнітна пам'ять: розробка нових технологій зберігання інформації.

Магнітна пам'ять є однією з ключових галузей спінтроніки, де використовуються специфічні магнітні властивості для зберігання інформації. Ці технології пропонують ряд переваг порівняно з традиційними електронними методами зберігання, особливо в контексті швидкості, енергоефективності та надійності. Ось деякі аспекти розробки нових технологій магнітної пам'яті:

STT-MRAM (Spin-Transfer Torque Magnetic RAM): Це одна з передових технологій магнітної пам'яті. Вона використовує спін-трансферний торк для переключення магнітних орієнтацій в напівпровідникових структурах, що дозволяє зберігати інформацію. STT-MRAM пропонує комбінацію високої швидкості, відмінної масштабованості, довговічності та низького споживання енергії.

GMR (Giant Magnetoresistance): Хоча GMR вже знаходить застосування в деяких сенсорних пристроях, ця технологія також вивчається для можливого

використання у магнітній пам'яті. Відмінність в опорі від магнітного поля дозволяє читати інформацію, збережену у магнітних структурах.

Принципи роботи: Основною ідеєю магнітної пам'яті є зберігання інформації у вигляді магнітних бітів, які можуть бути читані та перезаписані за допомогою електричного струму, що впливає на магнітні властивості матеріалу.

Переваги: Зберігання даних у магнітній формі може забезпечити високу стійкість до впливу зовнішніх факторів, таких як електромагнітні перешкоди, та знизити ризик втрати даних в порівнянні з традиційними флеш-пам'яттю або жорсткими дисками.

Враховуючи ці аспекти, можна побачити, що магнітна пам'ять відкриває нові горизонти в технології зберігання даних, забезпечуючи високу ефективність, швидкість і надійність для майбутніх генерацій електронних пристроїв. Сенсорні пристрої: використання спінтроніки для створення чутливих датчиків.

Сенсорні пристрої, які використовують принципи спінтроніки, представляють собою перспективну галузь, яка може забезпечити високочутливі датчики для ряду застосувань. Ось деякі аспекти використання спінтроніки в сенсорних пристроях:

Гігантське магнітосопротивлення (GMR): Одним з ключових відкриттів у спінтроніці було гігантське магнітосопротивлення. Датчики на основі цього принципу можуть вимірювати надзвичайно слабкі магнітні поля, що робить їх корисними для різних застосувань, включаючи магнітні детектори.

Магнітні сенсори використання: Спінтронічні матеріали, такі як ті, які використовуються в STT-MRAM, можуть бути адаптовані для створення чутливих магнітних сенсорів. Ці сенсори можуть виявляти мікроскопічні магнітні зміни, які відбуваються через різні фізичні або хімічні процеси.

Температурні сенсори: За допомогою спінтроніки можна створювати сенсори, які реагують на температурні зміни. Зміни магнітних властивостей матеріалів при певних температурах можуть бути використані для створення чутливих температурних сенсорів.

Енергоефективність: Оскільки спінтронічні сенсори можуть працювати при низьких напругах і з меншими енергетичними витратами, вони можуть бути ефективними для застосувань, де важлива довговічність батареї або енергоефективність.

Враховуючи ці переваги та можливості, можна зробити висновок, що спінтроніка відкриває нові перспективи для створення високочутливих, ефективних та надійних сенсорних пристроїв для різних застосувань у науці, медицині, промисловості та інших галузях. Інтеграція зі стандартною електронікою: можливість створення гібридних пристроїв.

Інтеграція спінтроніки зі стандартною електронікою є ключовим напрямком досліджень, оскільки це відкриває широкі можливості для створення гібридних пристроїв з унікальними функціональними характеристиками. Ось деякі аспекти цієї інтеграції:

Гібридні сенсорно-логічні пристрої: Завдяки інтеграції спінтронічних елементів з традиційною логічною електронікою можна створювати пристрої, які одночасно виконують функції сенсоріки та обробки інформації. Наприклад, магнітні датчики можуть передавати інформацію безпосередньо до спінтронічних логічних елементів для аналізу або обробки.

Енергоефективні гібридні системи: Інтеграція спінтронічних компонентів з традиційною електронікою може призвести до створення систем зі значним зменшенням енергоспоживання. Наприклад, можливість використання спінтронічних елементів для виконання певних операцій, які в іншому випадку вимагали б великої кількості енергії, може сприяти створенню більш ефективних пристроїв.

Нові функціональні можливості: Гібридні спінтронічно-електронні системи можуть відкривати нові функціональні можливості, що не можуть бути досягнуті окремо. Наприклад, можливість комбінування властивостей спінтроніки (наприклад, висока чутливість до магнітних полів) з властивостями традиційної

електроніки (наприклад, висока швидкість операцій) може привести до створення нових пристроїв для специфічних застосувань.

Скальабельність та інтеграція: Однією з важливих переваг є можливість інтеграції спінтронічних компонентів з існуючими технологічними процесами. Це означає, що інновації в спінтроніці можуть бути легко впроваджені в сучасні виробничі лінії, що сприяє розвитку гібридних пристроїв.

Враховуючи ці аспекти, інтеграція спінтроніки зі стандартною електронікою відкриває нові горизонти для розробки високоефективних, функціональних та енергоефективних гібридних пристроїв для широкого спектру застосувань.

1.1.2 Основні ідеї напівпровідникової спінтроніки.

Спінова релаксація та довжина дифузії носіїв струму у напівпровідниках
Спінова релаксація та довжина дифузії носіїв струму є важливими параметрами, які впливають на спінтронічні властивості напівпровідникових матеріалів.

Розглянемо ці поняття більш детально:

Спінова релаксація:

Спінова релаксація відноситься до процесу, при якому спін електрона або дірки в напівпровіднику втрачає свою координовану спін-поляризацію через взаємодію з оточуючим оточенням (наприклад, з вібраційними модами решітки, домішковими атомами тощо).

Цей процес може відбуватися через різні механізми, такі як спін-орбітальна взаємодія, магнітна взаємодія з домішками або інші неідеальності у кристалічній структурі.

Спінова релаксація може бути критичною для деяких спінтронічних пристроїв, таких як транзистори, магнітні тунелювальні структури та інші, де стабільність спін-поляризації важлива.

Довжина дифузії носіїв струму:

Довжина дифузії носіїв струму вказує на середню відстань, яку носії струму, такі як електрони або дірки, можуть пройти перед тим, як бути розсіяними або збудженими.

Цей параметр є важливим для розуміння ефективності переносу спіну в напівпровідниках. Довша довжина дифузії може сприяти кращому збереженню спін-поляризації вдоволі великих відстанях у порівнянні з короткими довжинами дифузії.

Вплив довжини дифузії на спітронічні пристрої також може залежати від конкретних умов експерименту, таких як температура, тип домішок у напівпровіднику, концентрація носіїв тощо.

Врахування спінової релаксації та довжини дифузії носіїв струму є важливим для розуміння та оптимізації спітронічних властивостей напівпровідникових матеріалів, а також для розробки нових ефективних спітронічних пристроїв і систем.

Інжекція спін-поляризованих носіїв струму у напівпровідники є ключовим процесом у спітроніці і відіграє важливу роль у реалізації спітронічних пристроїв. Цей процес може відбуватися через різні механізми і техніки, зокрема:

Використання феромагнітних контактів:

Одним з популярних методів є використання феромагнітних контактів для інжекції спін-поляризованих носіїв струму в напівпровідник. Феромагнітні матеріали можуть генерувати спін-поляризований струм через процеси електронного тунелювання або термоелектронних явищ.

Спін-інжекційні контакти використовуються для ефективної інжекції спін-поляризованих електронів або дірок у напівпровідник. Ці контакти можуть бути оптимізовані за допомогою спеціальних структур та матеріалів для забезпечення високої ефективності інжекції.

В інших випадках, інжекція спін-поляризованих носіїв струму може відбуватися через процеси тунелювання, де спін-поляризовані електрони або діри проникають через бар'єри, використовуючи квантові механізми тунелювання.

Електричні та магнітні поля можуть бути використані для контролю та направлення інжекції спін-поляризованих носіїв струму в напівпровідник. Це може включати в себе використання магнітних полярних тунелювань або електричних потенціалів для стимулювання інжекції та рекомбінації спін-поляризованих струмів.

Враховуючи важливість інжекції спін-поляризованих носіїв струму для спінтроніки, розуміння та оптимізація цих процесів є критично важливим для розвитку нових спінтронічних пристроїв та систем, таких як магнітна пам'ять, логічні пристрої та сенсори.

Напівмагнітні та магніторозчинні (розчинені магнітні) напівпровідники представляють собою спеціальні класи напівпровідникових матеріалів, які виявляють магнітні властивості при відповідних умовах. Давайте розглянемо кожен з цих типів більш детально:

Напівмагнітні напівпровідники є матеріалами, які можуть бути одночасно напівпровідниковими та магнітними при кімнатних температурах.

Ці матеріали зазвичай мають специфічні магнітні властивості, такі як феромагнетизм або антиферомагнетизм, в залежності від їх хімічного складу та кристалічної структури.

Напівмагнітні напівпровідники мають потенціал для застосувань у спінтроніці, включаючи магнітну пам'ять, сенсори, та інші пристрої.

Магніторозчинні напівпровідники є напівпровідниками, які можуть включати магнітні домішки або дефекти в їхній кристалічній структурі, що приводить до виникнення магнітних властивостей.

Ці матеріали можуть бути створені за допомогою імплантації домішок, алювання або інших технік обробки, що дозволяють інтродукцію магнітних іонів або атомів у напівпровідникову матрицю.

Магніторозчинні напівпровідники також мають потенціал для реалізації різних спінтронічних пристроїв та систем, включаючи магнітні сенсори, тунелювальні структури, та інші.

Враховуючи унікальні магнітні властивості цих напівпровідникових матеріалів, вони представляють великий інтерес для дослідження та розвитку нових спінтронічних технологій та пристроїв. Такі матеріали можуть відкривати нові можливості для створення ефективних, швидких та енергоефективних спінтронічних пристроїв для різних застосувань.

Електричні методи створення спінової поляризації носіїв струму в напівпровідниках є ключовими для генерації та контролю спінтронічних явищ. Ось декілька методів та ефектів, які відіграють важливу роль у цьому контексті:

Електричні методи:

Збудження за допомогою електричного струму: Спіново-поляризовані електрони можуть бути генеровані або орієнтовані за допомогою електричного струму, що протікає через спеціалізовані структури, такі як магнітно-резистивні тунелювальні контакти.

Електричне поле: Використання електричних полів може сприяти відсіву або направленню спіново-поляризованих носіїв струму, що проникають через напівпровідник.

Аномальний ефект Холла: Аномальний ефект Холла виникає при наявності зовнішнього магнітного поля, коли спін-поляризовані електрони викликають асиметрію в розподілі електронних зон. Це може призводити до появи додаткового електричного заряду на границях напівпровідника.

Спіновий ефект Холла: Спіновий ефект Холла, також відомий як ефект Холла на спін, відображає зміни у провідності напівпровідника залежно від спіну носіїв. Цей ефект використовується для вимірювання спінових характеристик та властивостей матеріалів.

Ці ефекти та методи дозволяють дослідникам створювати, контролювати та вивчати спіново-поляризовані стани носіїв струму в напівпровідникових системах. Розуміння цих процесів є важливим для розвитку нових спінтронічних технологій, таких як магнітна пам'ять, логічні пристрої та інші спінтронічні системи.

Електрична маніпуляція спіноюю поляризацією носіїв струму в напівпровідниках відіграє критичну роль у спінтроніці, яка дозволяє контролювати та використовувати спінові стани для різних застосувань. Спін-орбітальна взаємодія в умовах асиметрії напівпровідника відображає вплив кристалічної або структурної асиметрії на спінові характеристики носіїв струму.

Електрична маніпуляція спіноюю поляризацією: електричне поле може взаємодіяти зі спіново-поляризованими носіями струму, змінюючи їхні спінові стани. Це може бути досягнуто через різні механізми, включаючи ефекти декогеренції спіна, зміни в спін-залежних переносних властивостях, а також контроль над спін-орбітальною взаємодією.

Спін-орбітальна взаємодія та асиметрія:

Спін-орбітальна взаємодія: Це явище відображає взаємодію між спіновими станами носіїв та їхньою орбітальною динамікою в кристалічних структурах. У напівпровідниках, спін-орбітальна взаємодія може бути модифікована асиметричними структурними елементами, що впливають на ефективність збереження спіну та розсіювання.

Об'ємна та структурно-індукована асиметрія: Об'ємна асиметрія може виникати через властивості кристалічної решітки, такі як асиметричні параметри маси електронів або різні залежності зворотного від моменту спіну. Структурно-індукована асиметрія може бути результатом асиметричних геометричних форм, інтерфейсів або властивостей матеріалів, що впливають на розподіл спіну носіїв струму.

Враховуючи ці аспекти, розуміння та контроль електричної маніпуляції спіноюю поляризацією та спін-орбітальної взаємодії в умовах асиметрії напівпровідників є критично важливим для розвитку нових спінтронічних технологій та пристроїв.

Детектування спінової поляризації є критично важливим етапом в області спінтроніки, який дозволяє вимірювати та аналізувати спінові стани носіїв струму у різних матеріалах та пристроях. Це може бути досягнуто через різноманітні методи та техніки, зокрема:

Методи магнітно-резистивного вимірювання:

Ефект Гігса: Це один з основних механізмів детектування спінової поляризації, який базується на змінах в опорі магнітно-резистивного матеріалу залежно від спіну носіїв струму.

Тунельний ефект: Використовується у магнітно-резистивних тунелювальних структурах, де зміна тунелювального опору відображає розподіл спін-поляризованих електронів.

Керівні спінові ефекти:

Спіновий ефект Холла: Вимірювання зміни в гальмівній напрузі при наявності магнітного поля, що залежить від спіну носіїв струму, може використовуватися для детектування спінової поляризації.

Електричні методи: Використання електричних методів, таких як спінтранзистори та інші спін-залежні пристрої, може дозволити детектувати спінову поляризацію через зміни в електричних властивостях матеріалів при збереженні спінової інформації.

Оптичні методи: Деякі оптичні методи, такі як керівні фотоелектричні ефекти або магніто-оптичні явища, можуть використовуватися для неконтактного вимірювання спінової поляризації в матеріалах.

Мікроскопічні методи: Застосування спіново-резонансної мікроскопії та інших мікроскопічних методів може дозволити детектувати та візуалізувати спінові стани на нанометровому рівні.

Загалом, детектування спінової поляризації вимагає використання різноманітних технік та методів, які забезпечують точні, чутливі та надійні вимірювання спінових характеристик та властивостей матеріалів у спінтроніці.

1.1.3 Явище гігантського магнітоопору.

Гігантський магнітоопір (ГМО) є феноменом, який описує велику зміну електричного опору в залежності від магнітного поля. Цей ефект був вперше виявлений у 1988 році у тонких плівках нікелю (Ni) та хрому (Cr) у групі дослідників під керівництвом Петера Грюнбергера та Альберта Фертра.

Принцип дії: ГМО базується на магнітному розсіюванні електронів на магнітних доменних стінах. Коли спін електрона орієнтований паралельно до магнітного поля, розсіювання електронів на доменних стінах зменшується, що призводить до збільшення електричного опору. З іншого боку, коли спін електрона орієнтований антипаралельно до магнітного поля, розсіювання зростає, і опір спадає.

Основні характеристики та застосування:

Велика магнітоопірна відповідь: ГМО має здатність до зміни опору на декілька відсотків при застосуванні магнітного поля, що робить його відмінним матеріалом для спінтронічних пристроїв.

Застосування у технологіях зберігання даних: ГМО використовується у сучасних жорстких дисках для збільшення їхньої ємності та продуктивності.

Сенсорні пристрої: ГМО використовується в датчиках, які реагують на магнітне поле, що відкриває широкі можливості для створення чутливих та точних датчиків.

СВП-геометрія в контексті Гігантського магнітоопору (ГМО) описує спін-валовий профіль (СВП), який виникає в магнітних тунелювальних структурах. Ця геометрія є ключовою для розуміння та оптимізації спінтронічних пристроїв, таких як магнітно-резистивні тунелювальні діоди (МРТД) та магнітно-резистивні тунелювальні елементи (МРТЕ).

Основні аспекти СВП-геометрії ГМО включають:

Профіль електронного спіну: В магнітних тунелювальних структурах, де ГМО спостерігається, спін-валовий профіль (СВП) електронів грає критичну роль

у зміні електричного опору. СВП визначає, як електронні стани розподіляються в магнітних та немагнітних шарах тунелювальної структури.

Орієнтація спіну: СВП-геометрія описує, як спінові стани орієнтуються відносно магнітних поляризацій у магнітних та немагнітних шарах. Це впливає на магнітоопірний ефект і може бути оптимізовано для певних спінтронічних застосувань.

Товщина шарів: Геометричні параметри, такі як товщина магнітних та немагнітних шарів, впливають на СВП-геометрію та, відповідно, на величину магнітоопірного ефекту в ГМО.

Оптимізація пристроїв: Розуміння СВП-геометрії ГМО є важливим для оптимізації спінтронічних пристроїв, таких як сенсори, магнітні пам'яті та логічні елементи.

У підсумку, СВП-геометрія в контексті ГМО відіграє критичну роль у визначенні механізмів та оптимізації спінтронічних пристроїв, забезпечуючи фундаментальне розуміння спін-валового профілю та його впливу на електричні властивості матеріалів.

Залежно від геометрії, матеріалу і методу виготовлення, існує кілька типів ГМО-структур. Ось деякі з них:

Сенсори ГМО: Тонкі плівки, де ГМО використовується для вимірювання магнітних полів. Ці сенсори використовуються в різних застосуваннях, включаючи магнітну записувальну техніку, магнітні датчики, і магнітну резонансну томографію (МРТ).

Магнітно-резистивні тунельні структури (МРТС): Вони включають два магнітних електроди, розділені тонкою діелектричною бар'єрою. ГМО в таких структурах дозволяє контролювати електричний опір структури шляхом зміни магнітного поля.

Магнітно-резистивні випадково розташовані магнітні кластери: Ці структури складаються з набору магнітних частинок, розташованих випадковим чином, де ефект ГМО може бути спостережений через взаємодію між частинками при певних умовах.

Магнітно-резистивні наножорсткі диски: Ці структури використовуються в жорстких дисках для зберігання інформації. ГМО допомагає зчитувати інформацію з диска шляхом вимірювання магнітного стану плівки.

Це лише кілька прикладів ГМО-структур. З розвитком наукових досліджень в цій області можуть з'являтися нові та вдосконалені типи структур, які будуть пристосовані до конкретних застосувань у спінтроніці та інших галузях.

Проблема невідповідності опорів в контексті ГМО є важливим аспектом, який може впливати на ефективність та стабільність спінтронічних пристроїв. ГМО базується на зміні електричного опору структур при зміні їх магнітного стану. Ось деякі ключові моменти стосовно цієї проблеми:

Виникнення проблеми: Невідповідність опорів у ГМО може виникати через різницю в магнітних властивостях, неоднорідності в процесі виготовлення, дефекти в структурі, а також інші фактори, які можуть впливати на магнітний і електричний характеристики матеріалів.

Негативний вплив: Невідповідність опорів може погіршувати чутливість, стабільність та інші важливі параметри ГМО-пристроїв. Це може призвести до зниження продуктивності та надійності спінтронічних систем.

Оптимізація та вирішення: Для мінімізації проблеми невідповідності опорів у ГМО важливо проводити детальні дослідження матеріалів, процесів виготовлення, а також вдосконалювати методики контролю якості та вимірювань.

Технологічні виклики: Розв'язання проблеми невідповідності опорів у ГМО вимагає поєднання фундаментальних досліджень, інновацій в області матеріалознавства та вдосконалення технологій виробництва спінтронічних компонентів.

У підсумку, проблема невідповідності опорів у ГМО є актуальною і вимагає уваги науково-дослідних установок, промислових підприємств та спінтронічної спільноти для розробки ефективних рішень та технологій.

1.2. Матеріали для спінової електроніки.

Спінова електроніка (або спінтроніка) використовує спін електронів, а не їх заряд, для передачі, обробки та зберігання інформації. Для створення пристроїв спінтроніки потрібні спеціальні матеріали, які можуть підтримувати та контролювати спін електронів. Ось деякі ключові класи матеріалів для спінової електроніки:

Феромагнетики: Ці матеріали відіграють ключову роль у створенні магнітних областей для зберігання та передачі інформації на основі спіну електронів. Приклади включають пермаллоїд, нікелеві сплави, залізо, кобальт і їх сполуки.

Немагнітні матеріали: Ці матеріали використовуються для створення тунельних бар'єрів і інших структур, де спінова інформація може тунелювати через бар'єри. Приклади включають оксиди, такі як оксид алюмінію, та інші діелектричні матеріали.

Полупровідники: Деякі полупровідники, такі як германій та кремній, можуть бути модифіковані для спінтронічних застосувань. Наприклад, використання інжекції спін-поляризованих електронів у полупровідникових структурах.

Тонкі плівки та наноматеріали: З впровадженням нанотехнологій інтерес до тонких плівок та наноматеріалів для спінової електроніки зросло. Ці матеріали можуть мати унікальні спінтронічні властивості та можуть бути використані для створення нових типів пристроїв.

Магнітно-резистивні матеріали: Ці матеріали використовуються в магнітно-резистивних ефектах, таких як ефект ГМО, і є ключовими для спінтронічних пристроїв, таких як магнітно-резистивні тунельні структури (МРТС).

Це лише деякі приклади матеріалів, які використовуються або можуть бути використані в спіновій електроніці. Розвиток нових матеріалів та технологій продовжується, розширюючи можливості спінтроніки в різних застосуваннях.

Магнітні гетероструктури є ключовими елементами в спіновій електроніці. Ці структури включають в себе комбінацію різних шарів і матеріалів з різними магнітними, електронними і спінтронічними властивостями. Для ефективної роботи магнітних гетероструктур і створення надійних спін-електронних пристроїв, існують певні вимоги до їх компонентів:

Магнітна стабільність: Компоненти повинні мати стабільні магнітні властивості на потрібному для додатку діапазоні температур і магнітних полів.

Спін-поляризація: Одним з ключових параметрів для спінової електроніки є спін-поляризація електронів. Компоненти повинні бути здатні генерувати, передавати та виявляти спін-поляризовані електрони.

Контроль магнітних властивостей: Для створення ефективних спіновоелектронних пристроїв потрібно мати можливість контролювати магнітні властивості гетероструктур, такі як магнітна анізотропія, коерцитивна сила і магнітна спінтронічна взаємодія.

Тунельна магнітно-резистивна відповідь: Для створення Магнітно-резистивних тунельних структур (МРТС) необхідно мати тонкі плівки, що забезпечують великий ефект Гігантського магнітоопору (ГМО) та низький тунельний опір.

Ефективність передачі спіну: Компоненти повинні забезпечувати ефективний перенос спін-інформації без значущих втрат і перешкод.

Стабільність і довговічність: Гетероструктури повинні мати стабільність протягом тривалого часу роботи та в різних умовах, щоб забезпечити довговічність пристроїв.

Відсутність дефектів: Дефекти в структурах можуть впливати на їхні спінтронічні властивості. Тому важливо мати високоякісні матеріали без значущих дефектів.

Ці вимоги допомагають забезпечити ефективність, надійність та стабільність спіновоелектронних пристроїв на основі магнітних гетероструктур.

Феромагнітні метали та сплави відіграють ключову роль в спіновій електроніці та інших галузях, де потрібні матеріали з високими магнітними властивостями.

Залізо (Fe): Це один з найбільш поширених феромагнітних металів, який використовується в різних застосуваннях, включаючи магнітні записуючі пристрої, магнітні сенсори та інші спіновоелектронні пристрої.

Кобальт (Co): Кобальт також є важливим феромагнітним металом, що використовується в різних магнітних застосуваннях, зокрема в магнітних сплавах.

Нікель (Ni): Нікель є іншим феромагнітним металом, який використовується в різних галузях, включаючи спінову електроніку, магнітні матеріали та інші застосування.

Пермаллоїди: Це спеціальні магнітні сплави, які містять залізо, кобальт та нікель, а також додаткові елементи, щоб покращити їх магнітні властивості. Вони часто використовуються в магнітних та спіновоелектронних пристроях.

Гардманові сплави: Ці сплави містять комбінації феромагнітних елементів, таких як залізо, кобальт, нікель та інші, і використовуються в різних магнітних застосуваннях.

Металічні гетероструктури: Додавання інших металів до феромагнітних металів може створювати металічні гетероструктури з унікальними магнітними та спінтронічними властивостями.

Це лише деякі приклади феромагнітних металів та сплавів, які використовуються або досліджуються в контексті спінової електроніки та магнітних матеріалів. Властивості цих матеріалів можуть бути налаштовані за допомогою спеціальних технік обробки, магнітного поля та додавання домішок, що розширює їхні застосування в різних технологічних застосуваннях.

Половинні метали, також відомі як полупровідники, є матеріалами, що мають властивості, які знаходяться між металами та ізоляторами. Їхні електричні властивості залежать від числа вільних електронів, які доступні для проведення струму. Ось деякі ключові аспекти половинних металів:

Зона провідності та зона валентності: У напівпровідниках існує зона, звана зоною провідності, де електрони можуть легко рухатися, а також зона валентності, де електрони відсутні або мають відносно велику енергію.

Стимульована провідність: Електрони можуть бути "збуджені" з зони валентності до зони провідності за допомогою теплової енергії, світла або інших зовнішніх стимулів, що дозволяє їм проводити струм.

Дірки: У напівпровідниках, де відсутні вільні електрони, "дірки" можуть використовуватися як "позитивні" носії заряду, які можуть рухатися у зоні валентності.

Додавання домішок: Напівпровідники можуть бути намагніченими або модифікованими додаванням домішок, що змінюють їхні електричні властивості, що дозволяє контролювати провідність та інші характеристики.

Технологічні застосування: Половинні метали використовуються в різних технологічних застосуваннях, включаючи напівпровідникову електроніку, сонячні панелі, лазери, транзистори, діоди, сенсори та інші електронні пристрої.

Властивості залежать від температури: Електричні властивості половинних металів, таких як провідність, змінюються з температурою, що може впливати на їхні технічні застосування.

Магнітні напівметали — це специфічний клас матеріалів, які поєднують властивості магнітних та напівпровідничих матеріалів. Ці матеріали виявляють магнітні властивості, такі як ферромагнетизм, але також мають напівпровідничні властивості, такі як електронна провідність.

Електронна структура: Магнітні напівметали мають специфічну електронну структуру, яка дозволяє їм виявляти магнітні властивості та електронну провідність одночасно.

Топологічні інваріанти: Деякі магнітні напівметали відзначаються наявністю топологічних інваріантів, таких як квантові холлівські ефекти, які відрізняють їх від інших матеріалів.

Технологічні застосування: Магнітні напівметали мають потенціал для застосування в різних технологічних застосуваннях, включаючи спінову

електроніку, магнітні пам'яті, магнітні сенсори, квантову обчислювальну технологію та інші спінтронічні пристрої.

Магнітна динаміка: Магнітні напівметали можуть демонструвати різноманітні магнітні структури та динаміку в залежності від їхньої хімічної структури, температури та зовнішніх умов.

Дослідження та розвиток: Магнітні напівметали є об'єктом інтенсивного дослідження в сучасній науці та технології, оскільки вони пропонують нові можливості для створення передових та ефективних спінтронічних пристроїв.

Магнітні напівпровідники - це клас матеріалів, які об'єднують властивості магнітних та напівпровідничих матеріалів. Вони мають специфічну електронну структуру, яка дозволяє їм виявляти магнітні властивості та провідність.

Магнітна структура: Ці матеріали виявляють магнітну структуру, що може бути ферромагнітною, антиферромагнітною, феррімагнітною або іншою в залежності від хімічної структури та умов експерименту.

Електронні властивості: Вони також мають електронні властивості, характерні для напівпровідників, які дозволяють їм проводити електричний струм.

Технологічні застосування: Магнітні напівпровідники мають потенціал для застосування в різних технологічних застосуваннях, включаючи спінову електроніку, магнітні пам'яті, магнітні сенсори, квантову обчислювальну технологію та інші спінтронічні пристрої.

Дослідження та розвиток: Магнітні напівпровідники є предметом активних досліджень в сучасній науці та технології, оскільки вони відкривають нові можливості для створення передових та ефективних спінтронічних пристроїв.

Топологічні властивості: Деякі магнітні напівпровідники можуть мати топологічні властивості, такі як захищені поверхневі стани, що можуть бути корисними для реалізації різноманітних спінтронічних ефектів.

Класифікація провідних типів ферромагнетиків

Ферромагнетики є матеріалами, які виявляють спонтанну магнітну порядок при деяких температурах. Ці матеріали можна класифікувати за різними

критеріями, такими як хімічний склад, кристалічна структура, а також відповідні магнітні властивості.

За типом елементів:

Перехідні метали: Наприклад, залізо (Fe), нікель (Ni), кобальт (Co) і їх сплави.

Лантаніди та актиніди: Деякі елементи цих груп також виявляють феромагнітні властивості, такі як гадоліній (Gd), тербій (Tb), диспрозій (Dy) тощо.

За кристалічною структурою:

Біковалентні феромагнетики: Матеріали з кубічною, гексагональною, тетрагональною або іншою кристалічною структурою.

Одновалентні феромагнетики: Деякі матеріали, які мають однозначну залежність від напрямку спіну, що впливає на їхні магнітні властивості.

За температурою Кюрі:

Високотемпературні феромагнетики: Матеріали, які демонструють феромагнітні властивості при високих температурах.

Низькотемпературні феромагнетики: Матеріали, які проявляють феромагнітні властивості при низьких температурах, наближаючись до абсолютного нуля.

За магнітними властивостями:

Сильні феромагнетики: Матеріали, які виявляють високі значення магнітної сатурації та коерцитивної сили.

М'які феромагнетики: Матеріали, які легко демагнітуються, з низькими значеннями магнітної сатурації та коерцитивної сили.

2 МАГНІТООПТИЧНІ МЕТОДИКИ І МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1. Магнітооптичні ефекти, матеріали, методики досліджень

Магнітооптичні ефекти відносяться до явищ, при яких взаємодія між світлом та матеріалом відбувається під впливом магнітного поля. Ці ефекти виникають через зміни в оптичних властивостях матеріалу під дією зовнішнього магнітного поля.

Дослідження магнітних матеріалів: Магнітооптичні методи дозволяють вивчати магнітні властивості матеріалів на мікроскопічному рівні, що є важливим для розуміння магнітних структур та процесів.

Технології зберігання інформації: Магнітооптичні матеріали використовуються у дисках для зберігання даних. Взаємодія світла та магнітних доменів дозволяє читати та записувати інформацію з високою щільністю даних.

Сенсорні та датчикові системи: Магнітооптичні сенсори можуть вимірювати мікроскопічні зміни в магнітних полях, що є корисним для дослідження та застосування в наукових дослідженнях, медицині та промисловості.

Квантова електроніка: Вивчення магнітооптичних ефектів дозволяє розробляти нові пристрої для квантової електроніки, такі як квантові комп'ютери та квантові сенсори, які можуть працювати на основі унікальних магнітних властивостей матеріалів.

Магнітна спінтроніка: Магнітооптичні ефекти відіграють важливу роль у розвитку нових спінтронічних пристроїв, які використовують спін електронів для передачі та обробки інформації.

Основні магнітооптичні ефекти.

Ефект Фарадея є одним з основних магнітооптичних ефектів, який відображає взаємодію між магнітним полем та поляризованим світлом, що проходить через діелектричний матеріал. Цей ефект був відкритий в 1845 році великим британським вченим Майклом Фарадеєм.

Принцип ефекту Фарадея: Коли лінійно поляризоване світло проходить через діелектричний матеріал під впливом зовнішнього магнітного поля, площина

поляризації світла змінюється. Ця зміна в площині поляризації відбувається під впливом магнітного поля, перпендикулярного до напрямку поширення світла.

Основні характеристики та особливості ефекту Фарадея:

Залежність від довжини хвилі: ефект Фарадея залежить від довжини хвилі світла, що причиняє зміну площини поляризації для різних довжин хвиль.

Застосування в технологіях: ефект Фарадея використовується в різних технологіях, таких як магнітооптичні датчики, модулятори світла, магнітооптичні записувальні системи та інші.

Зв'язок з магнітними властивостями: ефект Фарадея є проявом взаємодії між світлом та магнітними властивостями матеріалів, що дозволяє вивчати та контролювати магнітні структури на мікроскопічному рівні.

Температурна залежність: ефект Фарадея може змінюватися з температурою, що впливає на магнітні властивості матеріалу та взаємодію зі світлом.

Керування магнітною хіральністю є важливим аспектом в сучасній фізиці конденсованих систем, особливо в контексті магнітооптики та спінтроники. Кіральність означає властивість структури або системи бути неідентичною своєму дзеркальному відображенню. У магнітних матеріалах це відноситься до асиметрії у розташуванні магнітних моментів або взаємодії між ними, що впливає на оптичні та електронні властивості.

Основні аспекти керування магнітною кіральністю:

Механізми формування: Кіральність може виникати через специфічні геометричні або кристалічні структури, що призводять до незмінності структури під дією зовнішніх умов, таких як температура, магнітне поле або напруга.

Взаємодія зі світлом: Керування магнітною кіральністю може впливати на взаємодію між магнітними матеріалами та світлом, змінюючи оптичні властивості матеріалу. Це відкриває нові можливості для створення оптичних пристроїв та технологій на основі керування кіральністю.

Потенційні застосування: Керування магнітною кіральністю може мати застосування в спінтроніці, квантовій електроніці, оптичних технологіях та інших областях, де важливі оптичні та магнітні властивості матеріалів.

Технологічні виклики: Для ефективного керування магнітною кіральністю потрібно розробляти нові матеріали, методики дослідження та технології, що можуть забезпечити стабільність та контроль над кіральними властивостями матеріалів.

Магнітно-керований еліптичний ефект (Magnetic Circular Dichroism, MCD) є основним магнітооптичним ефектом, який відображає зміни в оптичних властивостях матеріалу під впливом магнітного поля. Він є розширенням Фарадеєвого ефекту, але вміщує інформацію про різницю поглинання кіральної компоненти світла правого та лівого обертання в магнітному полі.

Основні характеристики магнітно-керованого еліптичного ефекту:

Механізм дії: Ефект полягає в тому, що магнітне поле може змінювати поглинання світла різної поляризації, що приводить до виникнення еліптичності в поляризації пройденого світла.

Спектроскопія: Магнітно-керований еліптичний ефект використовується в оптичній спектроскопії для дослідження магнітних властивостей матеріалів. Він дозволяє вивчати електронні переходи між різними станами енергії в магнітних матеріалах.

Застосування: MCD використовується в різних областях, включаючи фізику твердого тіла, біохімію, матеріалознавство та спінтроніку. Він надає важливу інформацію про магнітні властивості матеріалів на основі їхньої взаємодії з світлом.

Технічні виклики: Для вимірювання магнітно-керованого еліптичного ефекту потрібно спеціалізоване обладнання та високочутливі оптичні методики. Також важливо забезпечити стабільність магнітного поля та інших параметрів досліджуваного матеріалу.

Використання в квантовій електроніці та спіновій електроніці: Магнітно-керований еліптичний ефект (MCD) та інші магнітооптичні ефекти знайшли широке застосування в квантовій електроніці та спіновій електроніці.

Магнітна спінтроніка: В спінтроніці спін електронів використовується для передачі, зберігання та обробки інформації. Магнітооптичні методи, такі як MCD,

можуть допомагати вивчати та контролювати спін-залежні процеси в матеріалах, що є ключовими для розробки нових спінтронічних пристроїв.

Квантові точки: Магнітооптичні методи можуть використовуватися для дослідження квантових точок, які є об'єктами з квантовими властивостями. Вивчення магнітної взаємодії з квантовими точками може відкрити нові можливості для розробки квантових пристроїв та систем.

Магнітна пам'ять: Використання магнітооптичних методів, таких як MCD, може сприяти розробці нових магнітних матеріалів та структур для зберігання інформації. Вивчення магнітних властивостей на основі магнітооптичних ефектів може допомогти покращити ефективність та надійність магнітної пам'яті.

Тунельна магнітна резистивність (TMR): Магнітооптичні методи можуть використовуватися для дослідження механізмів тунельної магнітної резистивності, яка є ключовою для розробки магнітно-резистивних пристроїв, таких як тунельно-магнітні перетворювачі та детектори.

Магнітооптичні матеріали.

Феромагнітні матеріали, такі як залізо (Fe), нікель (Ni) та кобальт (Co), є основними матеріалами у сфері магнітної електроніки і матеріалознавства. Ось деякі ключові властивості цих матеріалів:

Залізо (Fe):

Кристалічна структура: Залізо має різні алотропні форми, але основна форма у вакуумі є кубічною (α -Fe) з відцентрованим кубічним (BCC) властивостями.

Магнітні властивості: Залізо є феромагнетиком при кімнатній температурі і може демонструвати спонтанну намагніченість.

Застосування: Використовується в магнітних матеріалах, а також в промисловості і будівництві.

Нікель (Ni):

Кристалічна структура: Нікель також має кубічну (FCC) кристалічну структуру у вакуумі.

Магнітні властивості: Нікель є сильним феромагнетиком і виявляє високу спонтанну намагніченість при кімнатній температурі.

Застосування: Використовується в магнітних сплавах, а також в електроніці та технологіях зберігання даних.

Кобальт (Co):

Кристалічна структура: Кобальт також має кубічну (HCP) кристалічну структуру у вакуумі.

Магнітні властивості: Кобальт є феромагнетиком і виявляє високу спонтанну намагніченість, особливо при низьких температурах.

Застосування: Використовується в магнітних сплавах, катодах, а також в спеціалізованих електронних пристроях.

Кристали гранату - це специфічний клас кристалічних матеріалів, які мають кубічну симетрію і часто використовуються у сфері магнітної електроніки та оптики. Ось деякі основні характеристики та властивості гарнетових кристалів:

Магнітні властивості: Гарнетові кристали відрізняються високою магнітною стабільністю і низькими магнітними втратами, що робить їх ідеальними для додатків, де потрібна висока магнітна чутливість.

Оптичні властивості: Деякі кристали гранату, такі як ітрій з залізний гранат (ЗІГ), мають цікаві оптичні властивості, зокрема вони можуть демонструвати магнітооптичні ефекти, такі як ферро- та ферримагнітна резонансна деполяризація.

Застосування: Кристали гранату, особливо ЗІГ, широко використовуються в різних застосуваннях, включаючи магнітно-оптичні модулятори, ізоляційні шари, активні елементи фотонних технологій та інші області магнітної електроніки.

Термічна стабільність: кристали гранату зазвичай мають високу термічну стабільність, що дозволяє їм залишатися магнітними при високих температурах без втрат магнітних властивостей.

Склад: кристали гранату часто включають елементи, такі як ітрій, залізо, галій, алюміній, які утворюють комплексну кристалічну структуру, що має специфічні магнітні та оптичні властивості.

Наноструктурні матеріали:

Основні властивості: Наноструктурні матеріали відрізняються від традиційних матеріалів завдяки їхнім унікальним механічним, електронним, оптичним та магнітним властивостям, які залежать від розмірів та форми наноструктур.

Застосування: Наноструктурні матеріали використовуються в різних галузях, включаючи електроніку, каталіз, медицину, енергетику та інші технології. Вони можуть покращувати ефективність пристроїв, забезпечувати нові функціональні можливості та відкривати нові підходи до розв'язання наукових проблем.

Метаматеріали:

Основні властивості: Метаматеріали є штучно створеними структурами, які мають негативний показник заломлення світла та інші унікальні оптичні та електромагнітні властивості, які не зустрічаються у природних матеріалах.

Застосування: Метаматеріали використовуються для створення нових оптичних пристроїв, антен, катушок, пристроїв зберігання енергії та інших технологій. Вони можуть використовуватися для контролю та маніпуляції електромагнітних хвиль у різних частотних діапазонах.

Магнітно-оптичне керування:

Принцип: Магнітно-оптичний керунок вимірює зміни в плоскості поляризації світла, що проходить через магнітний матеріал під впливом внутрішнього магнітного поля. Зміна кута або напрямку поляризації вказує на магнітну взаємодію.

Застосування: Цей метод дозволяє досліджувати магнітні властивості матеріалів, включаючи магнітні властивості, спін-залежні процеси та інші характеристики.

Аналіз магнітооптичних властивостей за допомогою спектроскопії є потужним методом для вивчення взаємодії світла з магнітними матеріалами. Цей метод дозволяє дослідникам детально аналізувати спектральні зміни та інтенсивність світла, що проходить через або відбивається від магнітного матеріалу в залежності від магнітних та оптичних параметрів.

Основні аспекти спектроскопії магнітооптичних властивостей:

Магнітооптичні резонанси: За допомогою спектроскопії можна вивчати магнітооптичні резонанси, які вказують на специфічні магнітні властивості матеріалу. Ці резонанси можуть бути пов'язані з магнітними доменами, магнітними наночастинками або іншими магнітними структурами у матеріалі.

Залежність від довжини хвилі: Спектроскопічний аналіз дозволяє вивчати залежність магнітооптичних властивостей від довжини хвилі світла. Це дозволяє визначити оптимальні діапазони довжин хвиль для конкретних додатків.

Визначення оптичних параметрів: Спектроскопія дозволяє визначити оптичні параметри матеріалу, такі як коефіцієнт пропускання, коефіцієнт відбивання та інші параметри, в залежності від магнітного поля або інших зовнішніх параметрів.

Дослідження магнітних переходів: Спектроскопія може бути використана для вивчення магнітних переходів у матеріалах, таких як ферромагнетики, антиферромагнетики та інші магнітні системи. Це дозволяє вивчати структурні, електронні та магнітні зміни, які відбуваються при магнітних переходах.

2.2. Методики моделювання процесів перемагнічування.

Моделювання магнітооптичних процесів на комп'ютері є важливим підходом для дослідження та розуміння магнітно-оптичних властивостей матеріалів. Цей підхід дозволяє дослідникам аналізувати та прогнозувати поведінку матеріалів в різних умовах, враховуючи комплексні взаємодії між магнітним, оптичним та структурними аспектами.

Основні етапи та аспекти моделювання:

Теоретичне моделювання: Розробка теоретичних моделей на основі основних принципів магнітооптики та фізики магнітних матеріалів. Це може включати в себе різні аналітичні та числові методи, такі як методи скінченних елементів, методи Монте-Карло та інші.

Комп'ютерне моделювання: Використання спеціалізованих програмних засобів та алгоритмів для створення та аналізу моделей магнітооптичних

процесів. Ці програмні засоби дозволяють симулювати різні умови, параметри та взаємодії, що відображають реальні експериментальні умови.

Прогнозування та оптимізація: Використання модельних результатів для прогнозування нових матеріалів, структур або умов, які можуть мати покращені магнітооптичні властивості, а також для оптимізації дизайну та характеристик магнітно-оптичних пристроїв та систем.

Перемагнічування структур, намагнічених як однорідно, так і неоднорідно, моделювалось на основі моделі Стонера-Вольфарта, яка передбачає визначення розподілу повної магнітної енергії в заданій області магнетика і знаходження просторових, часових або функціональних мінімумів цієї енергії з подальшим визначенням положення вектора намагніченості відповідно до отриманих координат мінімумів. Таким чином, магнітний стан речовини може бути визначений як такий, що має мінімальну енергію при заданих характеристиках речовини і при відомих параметрах зовнішніх факторів, що можуть впливати на намагніченість. До останніх, в першу чергу, треба віднести зовнішнє магнітне поле, а також ряд інших, «немагнітних» факторів, як наприклад, струм поляризованих електронів, механічна деформація, оптичне опромінювання, електричне поле та ін. Що ж до основних енергій, які дають внесок в повну магнітну енергію, то до них відносять: 1) енергію кристалографічної або наведеної (переважно одноосної) анізотропії; 2) магнітостатичну енергію взаємодії намагніченості матеріалу із: а) зовнішнім магнітним полем, а також із б) сусідніми областями, намагніченість яких відрізняється за напрямком від намагніченості досліджуваної області. До основних типів енергії входить, звичайно, і енергія обмінної взаємодії, але при розбитті магнітика на однорідно намагнічені домени, обмінну взаємодію важливо враховувати головним чином в межах доменних стінок. Додатковими типами енергії є магнітострикційна, що створює наведену анізотропію із віссю, положення якої визначається напрямком прикладеної деформації, а також енергія, обумовлена т. зв. коерцитивністю матеріала, що виникає через неоднорідності енергетичного потенціального

рельєфу, який в свою чергу, виникає в твердих тілах внаслідок наявності домішок, а також неоднорідної взаємодії атомів або іонів у вузлах кристалічної ґратки.

Функціонально перераховані вище енергії записуються наступним чином:

1. Енергія одноосної анізотропії E_u -

$${}^m E_u(\varphi_{mH}) = K_u \cdot \cos^2(\varphi_{mH} - \varphi_{uH}),$$

де K_u – константа одноосної анізотропії одиниці об'єму матеріалу; φ_{mH} і φ_{uH} – кути відповідно між вектором намагніченості і зовнішнім полем, та між вже згаданим полем і віссю одноосної магнітної анізотропії. Функція косинусу в квадраті використовується через рівноправність двох протилежних напрямків намагнічування вздовж сформованої осі легкого намагнічування.

2. Енергія вектора намагніченості \vec{M} у зовнішньому прикладеному полі \vec{H} , яке становить кут φ_{uH} із віссю анізотропії дорівнює:

$$E_H(\varphi_{mH}, \varphi_{MH}) = -M \cdot H \cdot \cos(\varphi_{MH})$$

3. Магнітостатична (взаємна) енергія векторів намагніченості \vec{m} - верхнього і \vec{M} - нижнього шарів наночислової структури (або сусідніх областей в гранульованій структурі) в полях розсіювання один одного:

$$E_{mM}(\varphi_m, \varphi_M) = k_{mM} \cdot m \cdot M \cdot \cos(\varphi_M - \varphi_m)$$

де коефіцієнт k_{mM} характеризує ступінь взаємодії намагніченостей m і M , пропорційної інтенсивності полів розсіювання обох намагніченостей та відстані між ними

4. Результуючі тривимірні залежності повної магнітної енергії E від азимутальних напрямків векторів намагніченості двох шарів (енергетичні діаграми) може бути розрахована як сума вищезначених енергій:

$$E(\varphi_{mH}, \varphi_{MH}) = E_u(\varphi_{mH}) + E_u(\varphi_{MH}) + E_H(\varphi_{mH}, \varphi_{MH}) + E_{mM}(\varphi_{mH}, \varphi_{MH}),$$

а з рівняння повного диференціалу сумарної енергії E

$$dE(\varphi_{mH}, \varphi_{MH}) = \sqrt{\left| \frac{dE}{d\varphi_{mH}} \right| + \left| \frac{dE}{d\varphi_{MH}} \right|}$$

координати точок екстремумів можуть бути визначені більш точно.

Таким чином, задача комп'ютерного моделювання перемагнічування наприклад, сендвіч-структури полягає у записі сумарної (повної) енергії намагніченості E як функції прикладеного зовнішнього магнітного поля H і кутів φ_m та φ_M орієнтації векторів намагніченості m та M двох основних феромагнітних шарів відносно напрямку прикладеного поля H .

Мінімум сумарної магнітної енергії E як функції двох змінних φ_m та φ_M визначатиме кутові положення векторів m та M відносно напрямку прикладеного поля H при даному його значенні. Функція кореня квадратного з модуля повного диференціалу залежності $E(\varphi_m, \varphi_M)$ буде торкатись площини нульового потенціалу в точках естремума функції E . Т.ч., можна точно визначити координати X та Y – тобто кути φ_m та φ_M , під якими орієнтуються вектори намагніченості m та M до напрямку прикладеного поля.

Косинуси кутів φ_m та φ_M пропорційні проекції відповідного вектора намагніченості на напрямок поля H , таким чином можуть бути побудовані по точках криві намагнічування - петлі гістерезису, тобто залежності $m_H(H)$ та $M_H(H)$ для різних (хоча б одну залежність для одного значення кута поля з віссю анізотропії!) вибраних значень кута напрямку прикладеного поля H відносно осей анізотропії шарів.

Таким чином, остаточною завданням всієї задачі є побудова кривої намагнічування (достатньо в один бік, від $-|H_{max}|$ до $+|H_{max}|$, $|H_{max}| \approx 50 E$, в інший бік петля гістерезису відображається простим поворотом на 180° і додаванням повернутої кривої до початкової).

3. СПОСОБИ ПЕРЕМАГНІЧУВАННЯ ОБМІННО-ЗВ'ЯЗАНИХ МАГНІТНИХ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ

3.1 Дія поляризованого випромінювання на намагніченість кристалічної структури залізо-ітрієвого гранату

Дія поляризованого випромінювання на намагніченість кристалічної структури залізо-ітрієвого гранату важлива з точки зору необхідності перемагнічування локальних областей мінімальних розмірів, в об'ємі яких неможливо сконцентрувати магнітне поле достатньо високої напруженості. Більше того, для перемагнічування з достатньо високою частотою необхідно мати джерела магнітного поля (катушки) з низькою індуктивністю, що унеможливорює створення полів високої напруженості. Тому застосування додаткових факторів, як наприклад, опромінювання поляризованим світлом, може зменшити поріг напруженості поля, що перемагнічує локальну ділянку. Тому оцінка впливу опромінювання є важливою як з теоретичної (фундаментальної) точки зору, оскільки дозволяє прояснити механізм взаємодії іонів з електромагнітною хвилею видимого діапазона, так і з практичної, оскільки дозволяє реалізувати локальне перемагнічування в області, розміри якої обмежуються дифракційними ефектами.

Для отримання впливу поляризованого світла на магнітну підсистему кристалічного ферит-гранату ітрію $Y_3Fe_5O_{12}$, необхідно в першу чергу мати світловий потік такої потужності, щоб кількість квантів у ньому була співрозмірна із кількістю магнітних іонів Fe^{2+} , що знаходяться у вузлах кристалічної ґратки ЗГ. Для оцінки інтенсивності (потужності) такого світлового потоку скористаємось співвідношенням для зв'язку потужності P світла із кількістю квантів N в промені, що попадають на кристал за час t :

$$P = N \cdot h \cdot \nu / t, \quad (1)$$

де h - стала Планка, а ν - частота квантів світла. Остання може визначатись як для усього спектрального діапазону, в якому спостерігається вплив світла на

магнітні характеристики ЗІГ (приблизно від початку видимого діапазону – фіолетового кольору з довжиною хвилі $\lambda=0,4$ мкм до ближнього інфрачервоного з $\lambda=1,2$ мкм), так і для окремих довжин хвиль, на яких працюють найбільш поширені типи лазерів ($\lambda=0,628$ мкм, $\lambda=0,532$ мкм та ін.). Зокрема, при довжині хвилі червоного лазера $\lambda=0,628$ мкм частота $\nu=c/\lambda=4,777\cdot 10^{14}$ Гц, а при $\lambda=0,532$ мкм - $\nu=5,64\cdot 10^{14}$ Гц, де $c=3\cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі. Кількість іонів Fe^{2+} та Fe^{3+} в кристалічній ґратці ЗІГ визначається на основі відомих (табличних) значень густини ЗІГ $\rho=3,6\cdot 10^3$ кг/м³ та сталої кристалічної ґратки $a=1,2$ нм.

Навіть для грубого наближення оцінки дії світла на намагніченість необхідно враховувати поглинання, яке для кристалічного ЗІГ має сильну дисперсію - залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі, представлену на рис.2.1.

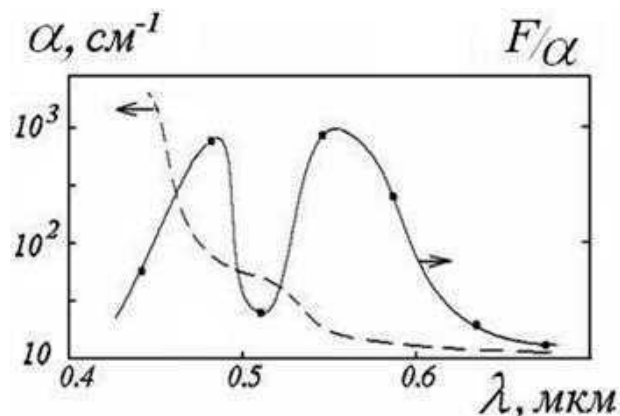


Рис. 3.1. Приклад спектральної залежності коефіцієнта поглинання світла \langle плівковою структурою ЗІГ.

Отже, при опромінюванні світло частково відбивається від передньої грані плівки, далі частково поглинається (наприклад, коефіцієнт поглинання чистого ЗІГ - $\alpha=800$ см⁻¹ на довжині хвилі $\lambda=0,628$ мкм), а частково проходить крізь загалом прозорий магнітооптичний матеріал (особливо прозорий в інфрачервоній області, поглинається же сильно світло граничного фіолету, причому поглинається майже повністю при товщинах плівки більше за 2÷3 мікрметри).

Перш, ніж робити оцінку впливу світла безпосередньо на намагніченість, визначимось із співвідношенням між кількістю квантів у світловому потоці і кількістю «магнітних» іонів. Останні величини позначені як N_1, N_2, N_3 для різних об'ємів, відповідно $V_1 = (5 \times 5 \times 5) \text{ мкм} \approx 10^{-16} \text{ м}^3$; $V_2 = (13 \times 13 \times 13) \text{ мкм} \approx 2,3 \cdot 10^{-15} \text{ м}^3$; $V_3 = (50 \times 50 \times 50) \text{ мкм} \approx 10^{13} \text{ м}^3$. Ці об'єми були визначені з об'єму елементарної комірки ЗПГ: $V_a = a^3 = (1,2 \cdot 10^{-9})^3 = 1,728 \cdot 10^{-27} \text{ м}^3$ і кількості іонів $\text{Fe}^{2+(3+)}$ в такій елементарній комірці ($8 \times 5 = 40$), зважаючи на те, що комірка вміщує 8 формульних одиниць ЗПГ, а в одній формулі вміщується 5 іонів Fe.

Кількість квантів за 1 секунду в промені потужністю 1 мВт складає: $N_\nu = 10^{-3} / 3,16 \cdot 10^{-19} = 3,16 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$, що дає можливість визначати кількість квантів, що попадають на плівку як при різному часі опромінювання, так і при різній потужності. Для прикладу на рис.2.2 наведена залежність $N(t)$ з якої видно, при яких тривалостях опромінювання кількість квантів світла досягне або перевищить кількість магнітних іонів.

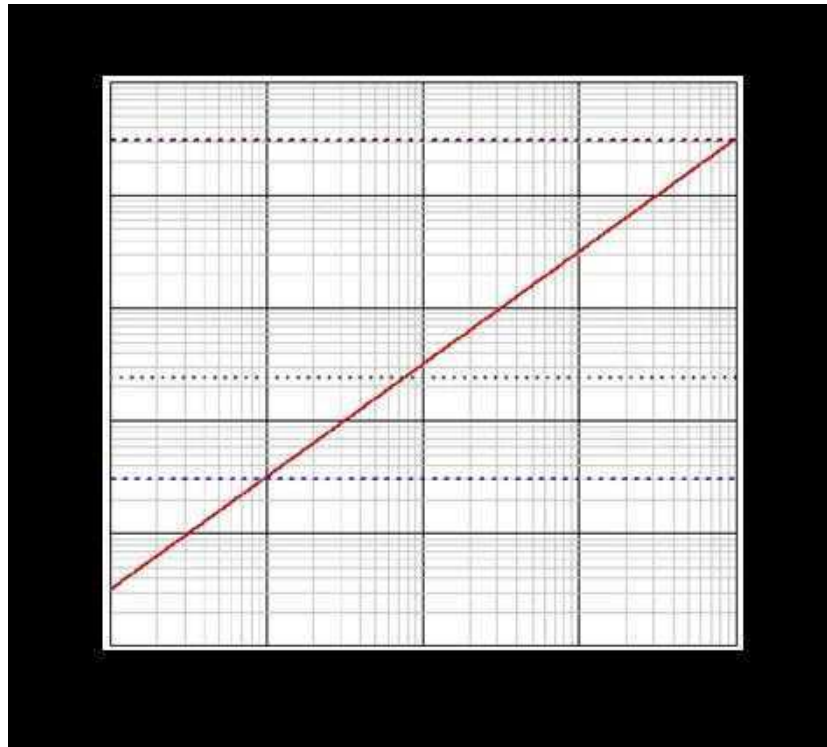


Рис. 3.2. Залежність кількості квантів, що падають на поверхню плівки при потужності променя 10 мВт в залежності від часу опромінювання t .

Далі необхідно враховувати коефіцієнт поглинання плівки на різних довжинах хвиль (а також відбиття від передньої грані, при тому, що невеликим відбиттям від задньої стінки знехтуємо для спрощення оцінки) і, відповідно, по-перше, скоректувати кількість квантів при співставленні їх кількості із кількістю магнітних іонів, а по-друге, врахувати ту частину поглинутих іонами квантів, які викликають електронні переходи між іонами, що знаходяться у вузлах різного типу. Останнє обумовлюється різним оточенням магнітних Fe-іонів, їх різними радіусами (в залежності від заряду) і, відповідно, різною величиною обмінної взаємодії із сусідніми атомами і іонами.

Користуючись графіком дисперсійної залежності коефіцієнта поглинання ЗІГ (наприклад, для довжини хвилі $\lambda = 628 \text{ нм}$ коефіцієнт поглинання дорівнює $\alpha = 800 \text{ см}^{-1}$, а для $\lambda = 1,15 \text{ нм}$ тільки $\alpha = 7 \text{ см}^{-1}$), можна отримати залежності реально поглинутої інтенсивності (в даному випадку - енергії) світла плівкою ЗІГ для різних товщин плівки, довжин хвиль світла, а також, звичайно, і інтенсивності самого поляризованого променя (ну і просторової орієнтації його площини лінійної поляризації). Величини пропускання та поглинання світла визначаються у першому наближенні відповідно до класичного закону поглинання світла Бугера-Ламберта-Бера: $I_{\text{пр}}/I_{\text{пад}} = e^{-\alpha x}$, а також формул Релея для відбиття і поглинання світла.

3.2. Магнітооптична ефективність дифракції на періодичних доменних структурах

Залізо-ітрієвий ферит-гранат є повністю прозорим в інфрачервоному діапазоні і частково прозорим у видимому, принаймі в області від зелених до червоних довжин хвиль. В діапазоні синіх хвиль коефіцієнт поглинання сильно зростає і хоч питома фарадеєвське обертання теж зростає, але через високе поглинання для роботи напросвіт можна ефективно застосовувати лише плівки товщиною 1-2 мкм. При інших довжинах хвиль магнітооптична якість матеріалу (відношення питомого фарадеєвського повороту площини поляризації світла до коефіцієнта поглинання) має складну залежність від довжини хвилі, що не описується аналітично. Незважаючи на це, за допомогою існуючих формул для магнітооптичної дифракції [4], а також експериментальних графіків дисперсійних залежностей фарадеєвського повороту і поглинання, можна оцінити дифракційну ефективність плівок ферит-гранатів в залежності від їх товщини і спектрального складу опромінюючого світла.



Рис. 3.3 Смугаста структура доменів ЗІГ, орієнтованих вздовж двох легких осей (проекцій осей $\langle 111 \rangle$ легкого намагнічування кубічного кристала на площину (111)). Період доменної структури $P=10$ мкм.

Інтенсивність світла, поляризованого вздовж доменних смуг (стінок) у випадку смугастої доменної структури в нульовому порядку дифракції визначатиметься як [3]:

$$I_{y0} = I_0 \cdot \exp(-\alpha h) \cdot \cos^2(F \cdot h), \quad (2.1)$$

а інтенсивність світла, поляризованого поперечно доменним смугам в інших порядках дифракції визначатимемо т.ч.:

$$I_{xn} = I_0 \cdot \pi^{-2} \cdot n^{-2} \cdot 4 \cdot \exp(-\alpha h) \cdot \sin^2(F \cdot h) \cdot \sin^2(\pi \cdot n \cdot w / P), \quad (2.2)$$

де n - порядок дифракційного максимуму; α - коефіцієнт поглинання плівкою ЗПГ світла деякої частоти (довжини хвилі); h - товщина плівки; w - ширина домена; P - період доменної структури.

Залежності, побудовані відповідно до формули (2.2) із записаними над графіком параметрами представлені на рис. 2.2. Моделювання виконувалось за допомогою комп'ютерної програми *Mathcad*.

З цих залежностей зручно визначати величини і характер зміни дифракційних ефективностей в залежності не тільки безпосередньо від товщини плівки, але і від довжини хвилі світла, від величини питомого фарадеєвського повороту площини поляризації, а також від несиметричності доменної структури (у випадку прикладання зовнішнього магнітного поля, коли відбувається зростання «вигідних» доменів із намагніченістю вздовж прикладеного поля або під невеликим кутом до нього і зменшення доменів, направлених проти поля, або під більшими кутами до напрямку прикладеного поля).

Користуючись побудованими таким чином залежностями, можна підбирати оптимальні характеристики плівок і параметри їх доменних структур для отримання максимальної дифракційної ефективності. Необхідно відзначити, що ці графіки зображені для чистого (тобто бездомішкового, хоч будь-який кристал ЗПГ вміщує незначну кількість неконтрольованих домішок через технологічні особливості епітаксійного вирощування) кристалічного матеріалу ЗПГ.

$$I_0 := 100 \quad n := 1 \quad a_1 := 800 \quad w := 0.5 \quad P := 1 \quad F_0 := 200 \\ a_2 := 40 \quad w_1 := 0.3$$

$$I_{xn1}(h) := I_0 \cdot \frac{0.4}{n^2} \cdot (\sin(F_0 \cdot h))^2 \cdot \left(\sin\left(\frac{3.14 \cdot w \cdot n}{P}\right) \right)^2 \cdot \frac{1}{e^{a_1 \cdot h}}$$

$$I_{xn2}(h) := I_0 \cdot \frac{0.4}{n^2} \cdot (\sin(F_0 \cdot h))^2 \cdot \left(\sin\left(\frac{3.14 \cdot w \cdot n}{P}\right) \right)^2 \cdot \frac{1}{e^{a_2 \cdot h}}$$

$$I_{xn3}(h) := I_0 \cdot \frac{0.4}{n^2} \cdot (\sin(F_0 \cdot h))^2 \cdot \left(\sin\left(\frac{3.14 \cdot w_1 \cdot n}{P}\right) \right)^2 \cdot \frac{1}{e^{a_1 \cdot h}}$$

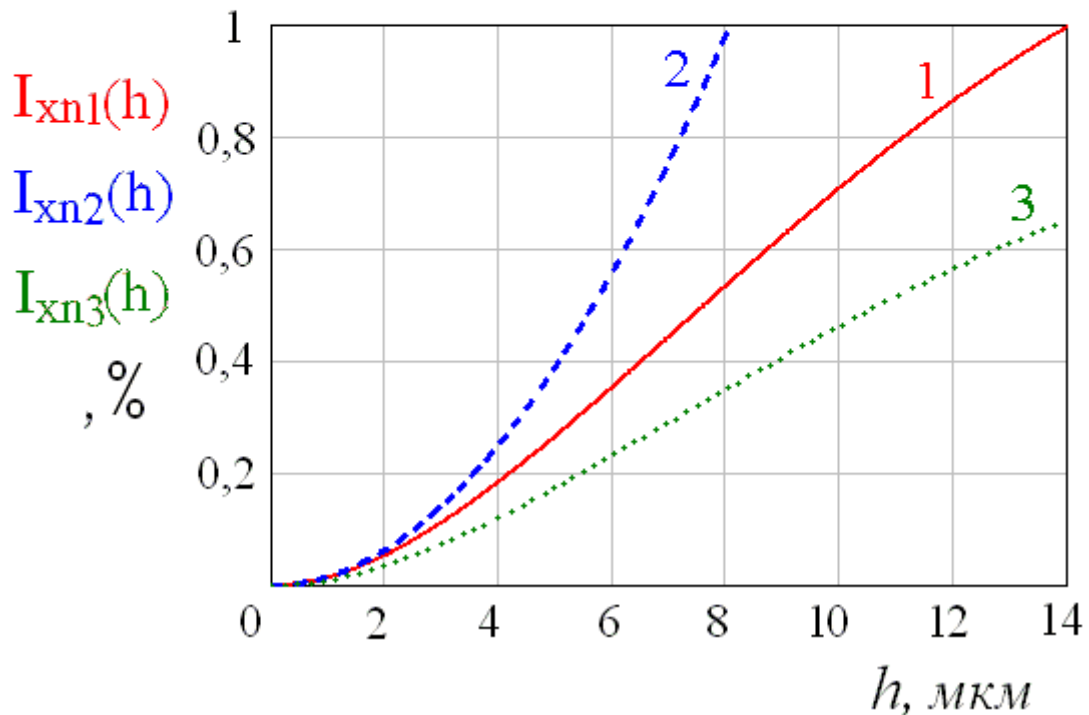


Рис.3.4. Ефективність I (у відсотках) дифракції поляризованого світла на періодичній (смугастій) доменній структурі в залежності від товщини плівки h при різних коефіцієнтах поглинання \langle (1 і 2) і співвідношеннях w/P між шириною сусідніх доменів (1 і 3).

У випадку наявності, наприклад домішок Ві (вісмута) в додекаедричних вузлах кристалічної ґратки (коли Ві частково заміщує Ітрій Y, при цьому для компенсації розширення кристалічної ґратки в октаедричні та/або в додекаедричні вузли замість Fe вводять домішки іншого радіусу, наприклад, галій Ga) плівка ЗІГ:Ві проявляє поворот площини поляризації світла на майже 2

порядки вищий за бездомішковий матеріал. У цьому випадку і значення дифракційної ефективності підвищуються приблизно на порядок, але такі плівки мають гірші характеристики перемагнічування по високій частоті. Тобто знову постає задача вибору оптимальних характеристик плівок для різних застосувань.

3.3. Дія поляризованого струму на намагніченість металевих шарів

Для визначення характеристик СК, в першу його поверхневого шару, записуються криві магнітного гістерезису за допомогою магнітооптичного ефекта Керра. Форма та параметри петлі визначають поле насичення доменної структури (ДС) шару, магнітожорсткість матеріалу, коерцитивну силу, анізотропію, характер магнітних неоднорідностей тощо. Перемагнічування структури, криві гістерезису якої зображені на рис. , визначається переважно анізотропією в площині верхнього (магнітом'якого) шару та його взаємодією з нижнім (більш магнітожорстким) шаром.

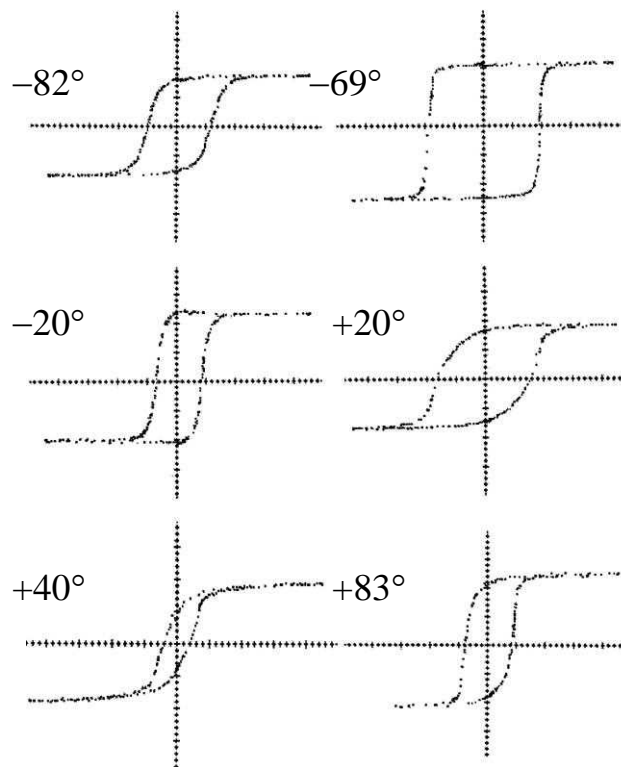


Рис. 3.5. Форма петель магнітного гістерезису при різних азимутальних напрямках зовнішнього поля.

Остання складається з обмінної та магнітостатичної частин і залежить від товщини немагнітного прошарку Cu та шорсткості міжшарових поверхонь

розділу. Для ілюстрації цього факту на рис.3 наведений приклад форми кривої гістерезису для тієї ж структури, але при меншій ніж на рис.2 товщині прошарку Cu (структура виготовлялась із рівномірно змінною товщиною по площі плівки). Збільшення міжшарової взаємодії в цьому випадку призвело до сильної кореляції перемагнічування обох шарів, що обумовило “перетягнуту” форму кривої гістерезису.

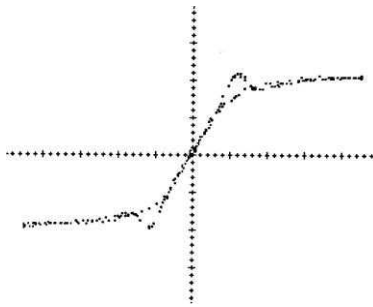


Рис.3.6. Петля гістерезису при товщині прошарку Cu $d=10$ нм.

З кривих гістерезису на рис.2 визначаються осі легкого та важкого намагнічування в площині, що направлені відповідно вздовж -69° та $+40^\circ$. Таким чином, застосування в якості спін-залежного ключового елемента найбільш енергетично вигідним напрямком підмагнічування є -20° , а для перемагнічування під дією поляризованого струму - напрямком -69° .

Вимірювання струму та магнітоопору структури здійснювалось при проходженні струму у поздовжньому та поперечному напрямках (при наявності або відсутності окисного шару SiO_2 між Si та Fe шарами. Вимірювання проводилось у полях напруженістю до 150 Ерст, оскільки цієї величини було достатньо для перемагнічування магнітом'якого шару в протилежний напрямок незалежно від азимутального кута напрямку поля.

Під дією магнітного поля всі шари СК намагнічуються в одному напрямку, в результаті відбувається збільшення струму, що проходить через структуру. В прикладі, наведеному на рис.4 максимальні зміни спостерігались при

паралельності поля та напрямку струму, що в значній мірі обумовлювалось конструктивними особливостями створених структур.

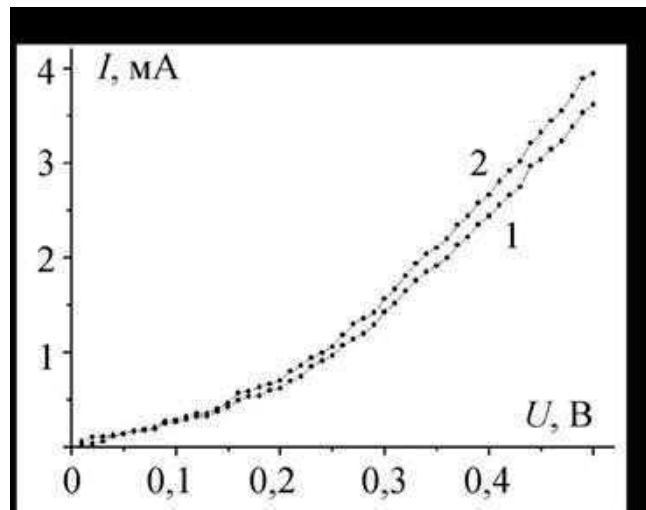


Рис. 3.7. Зміна вольт-амперної характеристики СТ в магнітному полі:
1 - $H=0$; 2 - $H=50$ Ерст (шари СК намагнічені паралельно).

Оцінку проходження струму в структурі ФМ-НП можна зробити на основі стандартного рівняння Больцмана для функції розподілу нерівноважних носіїв заряду $F(\mathbf{r}, t)$:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial F}{\partial \mathbf{r}} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \cdot \frac{\partial F}{\partial \mathbf{k}} = \int_i (F_i - F) \cdot W_i \cdot d\mathbf{k}_i, \quad (1)$$

де i - номер стану (енергетичного рівня), а W_i - імовірність переходу між i -м та основним станами. Для спрощення першим та третім доданками в лівій частині рівняння (1) можна знехтувати зважаючи на стаціонарність протікання процесів, а також характер руху електронів в провідному каналі без суттєвої зміни їх швидкості. Для подальшого спрощення вважатимемо механізмом розсіяння зарядів пружні та непружні зіткнення без використання наближення часу релаксації. В такому випадку рівняння (1) спроститься до:

$$\frac{\partial F}{\partial x} \cos(\mathbf{v}, \vec{x}) = - \left(\frac{F}{\lambda_n} + \frac{F}{\lambda_n} \right) + \frac{0,5}{\lambda_n} \int_{-1}^1 F d(\cos(\mathbf{v}, \vec{x})), \quad (2)$$

а при одновимірному наближенні: $\frac{\partial F}{\partial x} = -\left[\frac{1}{\lambda_n} - \frac{1}{\lambda_n}\right] \cdot F$, звідки функція F змінюватиметься з координатою x за оберненою експоненційною залежністю. Струм через СК може бути розрахований, наприклад, на основі наведеного нижче рівняння:

$$I_x = e \cdot \int_0^1 F[x, \cos(\mathbf{v}, \vec{x})] \cdot \cos(\mathbf{v}, \vec{x}) \cdot d[\cos(\mathbf{v}, \vec{x})]$$

Застосовуючи чисельні параметри товщин шарів та величин прикладених напруг можна порівняти експериментальні та розрахункові значення струму при різних товщинах немагнітного прошарку. Зокрема, при сумарному (ефективному) значенні довжини пробігу $\Lambda = \lambda_n \lambda_{n'} / (\lambda_n - \lambda_{n'}) = 10$ нм зменшення значення функції стану, а відповідно, і струму до 10^3 разів спостерігатиметься на довжині провідного каналу $L \sim 70$ нм. Більш жорсткі та реалістичніші оцінки $\Lambda \sim 2$ нм відповідним чином зменшать довжину каналу до нанометрового діапазону, що суттєво ускладнює керування струмом.

Втім, одним із методів подолання значних розмірних обмежень є використання для спінової інжекції тунельних бар'єрів, а також робота СТ в режимі балістичних електронів. Внесок до вихідного струму СТ, обумовлений спіною прецесією, можна оцінити виходячи з простої моделі, застосованої в [4] для біполярної схеми:

$$I_{C_2} \approx \int_0^\infty \frac{0,5}{\sqrt{\pi D t}} e^{-\frac{(x-Vt)^2}{4Dt}} \cdot \cos \omega t \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{sf}}} dt \quad (3)$$

де D - дифузійна стала, V – дрейфова швидкість, τ_{sf} - ефективний час життя спінів. Таким чином, струм визначається головним чином дрейфом та дифузією носіїв заряду, а також прецесією та обмеженим часом життя спінів. Втім, досить значні розходження між експериментальними та розрахунковими даними в цьому

випадку обумовлюється в першу чергу неконтрольованими контактними та поверхневими явищами.

Перехідному контактному шару металу з напівпровідником притаманний вентиляльний ефект і при використанні на поверхні напівпровідника двох феромагнітних шарів із немагнітним прошарком (рис.1), така структура може додатково змінювати свій опір під дією зовнішнього магнітного поля. При цьому через малість цієї зміни порівняно із опором напівпровідника, необхідно використовувати спеціальне підключення такого елемента.

Співпадіння кривих перемагнічування (петель гістерезису) зв'язаних шарів сендвіч-структури, розрахованих на основі визначення мінімумів енергії векторів намагніченості кожного шару із кривими, отриманими експериментально, підтверджує коректність застосованого методу розрахунку стану намагніченості шарів, а їх аналіз дозволяє оптимізувати характеристики функціональних пристроїв, що застосовують спінові клапани та кристалічні магнітооптичні матеріали шляхом підбору оптимальних режимів роботи останніх. Крім того: 1) чисельні оцінки можливості інжекції та транспорту поляризованих носіїв в Si підтверджуються експериментально; зокрема, можливе збереження величини поляризації на відстанях, достатніх для керування поляризованим струмом; 2) діелектричний шар SiO₂ може створювати тунельну провідність, яка збільшує магнітоопір та обумовлює балістичний режим прольоту немагнітних частин СТ; 3) дослідження методом вимірювання локальної намагніченості характеру ДС та доменних границь у ФМ шарі, підтверджують взаємний вплив ДГ і поляризаційного струму; 4) оптимізація напрямку підмагнічування може зменшувати струм перемагнічування на порядок, але стабільність таких систем поки є недостатньою для надійного переключення СК.

$U_0 := 0.002$
Електрична напруга

$t := 10^{-8}$
Час - тривалість імпульсу

$C_{fe} := 460$
Теплоємність Fe

$p_{fe} := 7880$
Густина Fe

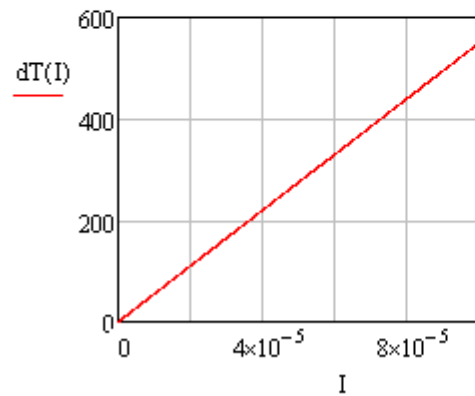
$k := 5$ $S_{fe} := 10^{-16}$
Кількість іонів Fe²⁺ у стовпчику

$h := 10^{-8}$
Товщина шару (висота стовпчика)

$K_{fe} := 74.4$

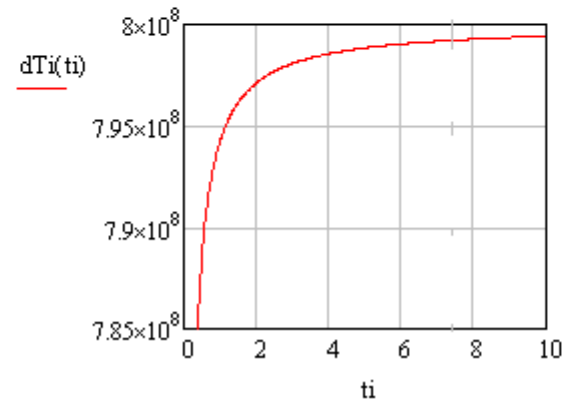
$\rho_e := 10^{-7}$
Питомий опір Fe

$$dT(I) := \frac{U_0 \cdot I \cdot t}{C_{fe} \cdot p_{fe} \cdot S_{fe} \cdot h + k \cdot S_{fe} \cdot t}$$



$I := 0.0002$

$$dTi(t_i) := \frac{U_0 \cdot I \cdot t_i}{C_{fe} \cdot p_{fe} \cdot S_{fe} \cdot h + k \cdot S_{fe} \cdot t_i}$$



$t_i := 10^{-1}$

$$dT_s(S_o) := \frac{U_0 \cdot I \cdot t_i}{C_{fe} \cdot p_{fe} \cdot S_o \cdot h + k \cdot S_o \cdot t_i}$$

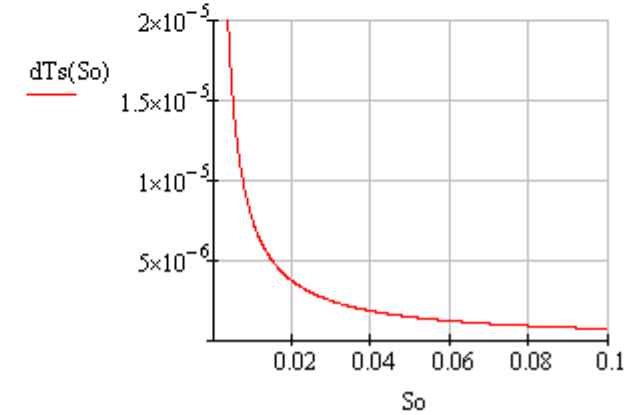
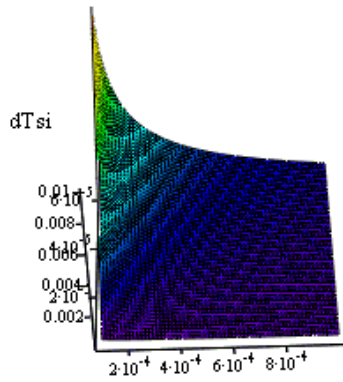


Рис. 3.8а. Моделювання характеристик нагріву магнітних елементів при проходженні поляризованого електричного струму.

$$dT_{si}(Sox, toi) := \frac{U_o \cdot I \cdot toi}{Cfe \cdot pfe \cdot Sox \cdot h + k \cdot Sox \cdot ti}$$



$$Cfe \cdot pfe \cdot Sfe = 3.625 \times 10^{-10}$$

Нагрів стовпчика, який створює 1 імпульс

$$dto := 10^{-9} \quad Sn := 10^{-16}$$

$$hn := 10^{-8} \quad el := 1.6 \cdot 10^{-19}$$

$$dr := 0.5 \cdot 10^{-8} \quad Sr := \pi \cdot 10^{-16}$$

Кількість електронів в 1 імпульсі - ne $ne1(Uo) := \frac{U_o \cdot dto \cdot Sn}{pe \cdot hn \cdot el} \quad ne1(Uo) = 1.25 \times 10^6$

Заряд, що протікатиме в 1-му імпульсі - qe $qe := \frac{U_o \cdot dto \cdot Sn}{pe \cdot hn} \quad qe = 2 \times 10^{-13}$

$$ne(U) := \frac{U \cdot dto \cdot Sn}{pe \cdot hn \cdot el}$$

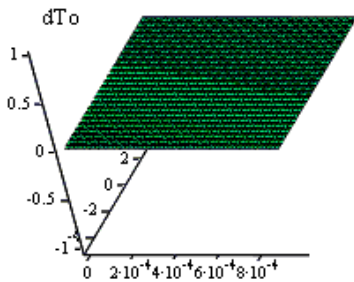
Опір омичний стовпчика Rn $Rn := \frac{pe \cdot h}{Sn} \quad Rn = 10$

Струм, що протікатиме в 1-му імпульсі - Io $Io := \frac{U_o}{Rn} \quad Io = 2 \times 10^{-4}$

Підвищення температури 1 імпульсу $dT1$ $dT1 := \frac{U_o \cdot Io \cdot dto}{Cfe \cdot pfe \cdot Sn \cdot hn} \quad dT1 = 110.351$

Густина струму - j $j := Io \cdot Sn \quad j = 2 \times 10^{12}$

$$dT_o(dt, x) := Kfe \cdot \left(\frac{d^2 T}{dx^2} \right) \cdot dt$$



Кільк. теплоти, що розсіюється стовпчиком Qp $Qp := Kfe \cdot \frac{dT1}{dr} \cdot Sr \cdot 2 \cdot dto \quad Qp = 1.032 \times 10^{-12}$

Кільк. теплоти, що виділяється в стовпчику від 1 імпульсу Q $Q := U_o \cdot Io \cdot dto \quad Q = 0,002 \times 2 \times 0,0001 \times 10^{-9} = 4 \times 10^{-16}$

Кільк. теплоти, що виділяється в стовпчику за 1 сек $P1c$ $Qn := U_o \cdot Io \quad Qn = 4 \times 10^{-7}$

Кільк. теплоти, що розсіюється стовпчиком за 1 сек $P1p$ $Qpn := Kfe \cdot \frac{dT1}{dr} \cdot Sr \quad Qpn = 5.159 \times 10^{-4}$

Підвищення температури послідовності імпульсів зі скважністю 2 за 1 с - dTc $dTn := \frac{Qn \cdot dr}{Kfe \cdot Sr} \quad dTn = 0.086$

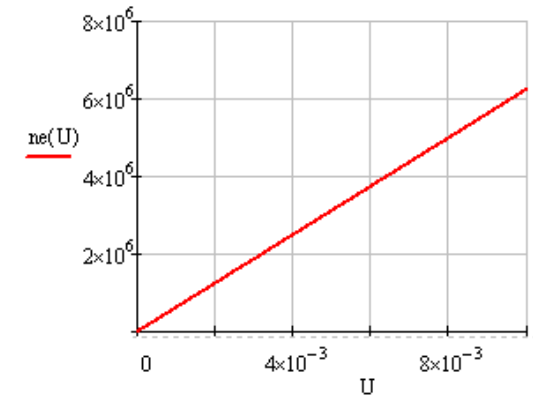


Рис.3.8б. Моделювання характеристик нагріву магнітних елементів при проходженні поляризованого електричного струму.

3.4. Моделювання перемагнічування обмінно-зв'язаних магнітних неоднорідностей

Для моделювання перемагнічування застосуємо матеріал, що може піддаватись механічному напруженню, через що в ньому виникають напрямки легкого і важкого намагнічування (внаслідок зміщення атомів зі своїх рівноважних положень і відповідної зміни величини обмінної взаємодії). Взагалі напруження в матеріалі може виникати як в процесі технологічного виготовлення (наприклад, при неузгодженості розмірних параметрів кристалічної ґратки плівки і підкладки або при періодично нерівномірному осадженні розпилюваної речовини), так і в результаті дії на матеріал зовнішніх факторів (механічного тиску, зміни температури, поглинання світла тощо).

Енергію деформації в загальному випадку можна представити формулою

$$E_p(\varphi) = -\frac{2}{3} \cdot \lambda \cdot \sigma \cdot \cos^2 \varphi,$$

де λ - магнітопружна константа ізотропного матеріалу; σ - величина прикладеного механічного напруження; φ - азимутальний кут між деяким вибраним напрямком спостереження і напрямком прикладеної сили. Ця енергія додається до суми енергій анізотропії та магнітостатичних, доповнюючи, таким чином, повну магнітну енергію ще і енергією деформації.

Крім цього, необхідно врахувати, що при кристалічній структурі речовини, вона має кристалографічну магнітну анізотропію, зокрема в кристалічному ЗІГ анізотропія носить кубічний характер, а отже, її енергія визначається за відомою загальною формулою:

$$E_a = K_1 \cdot (\cos^2 \varphi_x \cdot \cos^2 \varphi_y + \cos^2 \varphi_x \cdot \cos^2 \varphi_z + \cos^2 \varphi_y \cdot \cos^2 \varphi_z) + \\ + K_2 \cdot (\cos^2 \varphi_x \cdot \cos^2 \varphi_y \cdot \cos^2 \varphi_z),$$

де K_1 і K_2 - відповідно перша та друга константи кубічної анізотропії (для вибраної речовини - ЗІГ - $K_1 = -6100 \text{ ерг/см}^3$; $K_2 = -50 \text{ ерг/см}^3$); $\cos^2 \varphi_x$, $\cos^2 \varphi_y$, $\cos^2 \varphi_z$

- квадрати направляючих косинусів вибраного напрямку, тобто $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ - кути між даним довільно вибраним змінним напрямком в кубі і відповідними осями декартових координат (рис.3.8). За допомогою таких направляючих косинусів можна розраховувати енергії анізотропії в різних напрямках кубічного кристалу, зокрема в кристалічній площині (110) анізотропія визначатиметься за формулою:

$${}^{(110)}E_A = K_1 \cdot \left[\frac{\cos^4 \varphi}{4} + (\cos \varphi \cdot \sin \varphi)^2 \right]$$

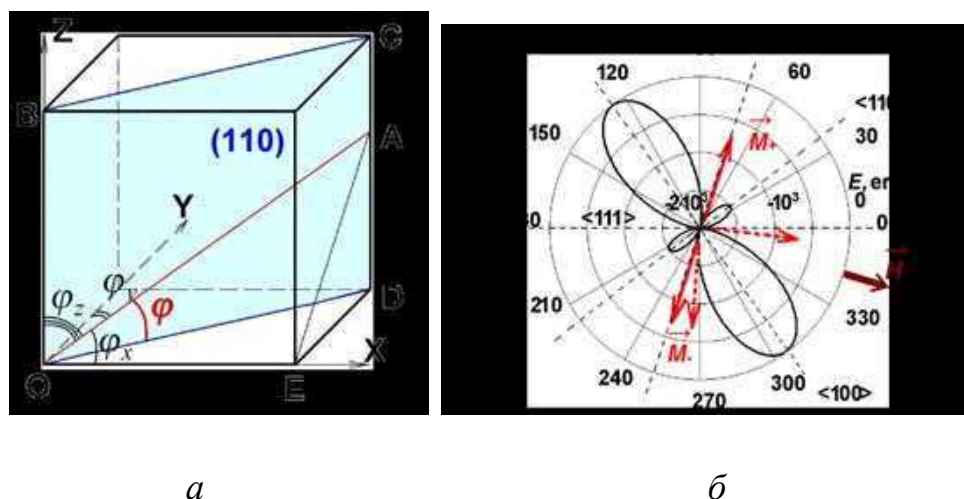


Рис. 3.9. Розташування площини (110) і кутів направляючих косинусів (а), і азимутальна залежність енергії анізотропії (б) в площині (110) кубічного кристалу.

Для визначення величини кубічної анізотропії в площині (111) можна використовувати декартову систему координат, що дозволяє розрахувати точно азимутальну залежність енергії не тільки по першій, але і по другій константі анізотропії (по першій константі енергія анізотропії в площині (111) виявляється незмінною, тобто сталою):

$${}^{(111)}E_A = \frac{K_1}{4} + K_2 \cdot \left[\frac{1}{6} - \frac{\sin^2 \phi}{2.25} + \frac{\sin^4 \phi}{3.37} \right] \cdot \left[\frac{0.75}{\sin^2(0.67\pi - \phi)} - \left(1 - \frac{\sin \phi}{\sin(0.67\pi - \phi)} \right)^2 \right]^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{2\pi}{3} - \phi \right)$$

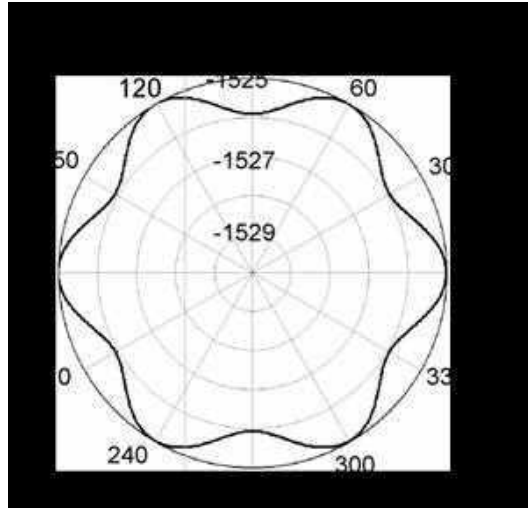


Рис. 3.10. Розподіл енергії анізотропії в площині (111) кубічного кристалу, розрахований відповідно до формули для ${}^{(111)}E_A$.

Таким чином, зміна енергії анізотропії в площині (111) не перевищує 1 ерг/см^3 , тобто має місце тільки за рахунок нелінійних ефектів, зокрема, тригональних викривлень кристалічної ґратки. Такі значення підтверджуються експериментально при спостереженні переорієнтації напрямків доменних границь смугастих доменів в плівках ЗІГ, яка в площині (111) відбувається при прикладанні зовнішнього магнітного поля, що не перевищує 2 Е .

При дії додаткового механічного напруження виникає друга вісь наведеної одноосної анізотропії на додаток до існуючої ростової одноосної анізотропії, таким чином, розподіл енергії по площині (в тонкошарових плівкових структурах) або по об'єму (в кристалічних матеріалах) помітно ускладнюється. Розрахунок сумарної магнітної енергії E в цьому випадку призводить до залежності як від прикладеного зовнішнього магнітного поля, так і від величини механічного

напруження. Останнє може створюватись як просто стискаючою механічною деформацією (або деформацією вигину для плівки), так і за допомогою п'єзоелемента, жорстко зв'язаного з магнітним матеріалом. При подачі електричної напруги на п'єзоелемент, останній деформується і відповідно створює механічне напруження в жорстко зв'язаній з ним магнітній структурі.

Формула магнітострикційної енергії, застосована для п'єзодеформації, виглядала т.ч.:

$$E_U(\varphi, \theta) = k_U \cdot U_P \cdot \left[\cos^2 \theta - \frac{|U_P|}{2 \cdot U_P} - \frac{U_P}{2 \cdot U_P} \right] \cdot \cos^2(\varphi - \pi / 2).$$

Змінюючи величини напруженості зовнішнього магнітного поля (при заданих величинах деформації, що задається напругою на п'єзоелементі) і визначаючи при цьому координати точок мінімуму повної магнітної енергії E (вважаючи координати кутами (в радіанах) векторів намагніченості в 2-х типах доменів відносно заданого напрямку прикладеного поля \vec{H}), можна побудувати залежність косинусів вищезначених кутів від напруженості поля H , що і буде являтися кривою перемагнічування (магнітного гістерезису) об'єму ЗГ.

Результуючі криві, побудовані (в програмі *Origin*) по точках описаним чином, представлені на рис.3.12.

Порівняння петель гістерезису, що отримуються представленим методом мінімізації повної енергії з отриманими в лабораторії раніше експериментально (рис.3.13) методом фарадеєвського обертання площини поляризації (при спостереженні напросвіт), демонструє якісну подібність цих кривих намагнічування, що загалом підтверджує коректність застосування енергетичної методики моделювання перемагнічування із врахуванням деяких особливостей, пов'язаних із розбиттям магнітної системи на домени з різною намагніченістю.

ПОВНА ЕНЕРГІЯ ДЛЯ ВЕКТОРІВ НАМАГНІЧЕНОСТІ m та M в залежності від азимутального (X) і полярного (Z) кутів, побудована для площини півки (111)

$Ck = 20$ $Mo = 139$ $mo = 139$ $Ku = -100$ $KmH = 1$
 $Km005 = 0.05$ $Km01 = 0.1$

$Xm = 0$

$Ho = 3$

$Ko = 0.0001$

$Km = 0.05$

$Uo = -73$

$X0 = 0$

$Z1 = 0$

$X30 = -0.524$

$b = 20$

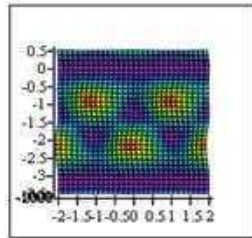
$KmH = 0$

$U1 = 10$

$$Ea(Xm, Zm) = -1334.375 - 444.79 \cos[4(-Zm)] - 254.166 \cos[2(-Zm)] - 718.783 \left[\sin[2(-Zm)] - \frac{\sin[4(-Zm)]}{2} \right] \cos(3 Xm)$$

$$EmH(Xm, Zm) = -mo \cdot Ho \cdot \left(\frac{\cos(Xm) + 1}{2} \right) \left(\frac{\sin(-Zm) + 1}{2} \right) KmH$$

$$EmM(Zm, ZM) = -Km Mo mo \left(\frac{\cos(Zm - ZM - \pi) + 1}{2} \right)$$

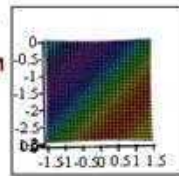


< кубична анізотропія

Ea

$$Eo(Zm, ZM) = Ko Mo mo \left(\frac{\cos(Zm - ZM - \pi) + 1}{2} \right)$$

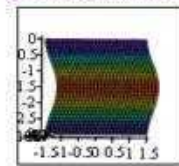
> взаємна обмінна енергія m і M



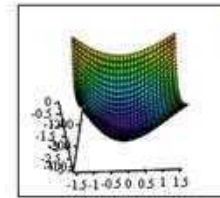
Eo

$$Eu(Xm, Zm) = Ku (\cos(Zm))^2$$

одноосна анізотропія

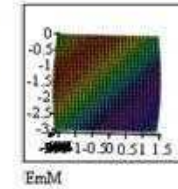


Eu



EmH

< магнітостатич. енергія в прикладеному полі

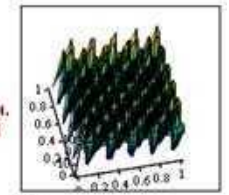


EmM

< взаємна магнітостатич. енергія m і M

Коварційність

$$Ek(Xm, Zm) = Ck \cos(30-Xm) \sin(30-Zm)$$



Ek

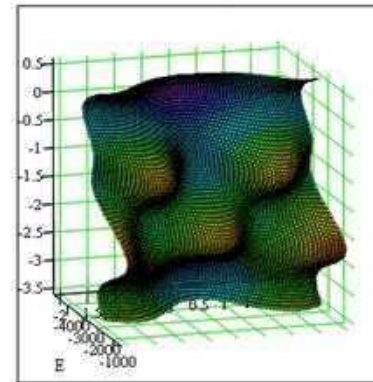
$ZM = -3.14$ $Xm = 0$

$$E(Xm, Zm) = Ea(Xm, Zm) + Eu(Xm, Zm) + EmH(Xm, Zm) + EmM(Zm, ZM) + Up(Xm, Zm) + Eo(Zm, ZM) + Ek(Xm, Zm)$$

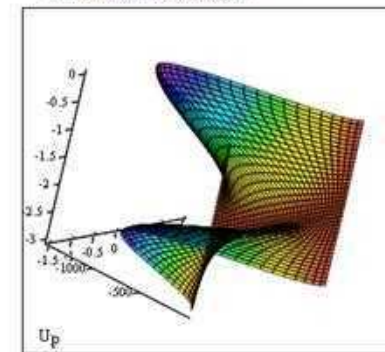


Переріз 3D графіка повної магнітної енергії (зроблений посередині по вертикалі, тобто при $Xm=0$)

повна магнітна енергія



магнітопружня анізотропія - залежність від X з механічною



Up

Рис. 3.11 Моделювання (в програмі *Mathcad*) повної енергії кристалічної структури ЗГ при механічній деформації і накладанні зовнішнього магнітного поля.

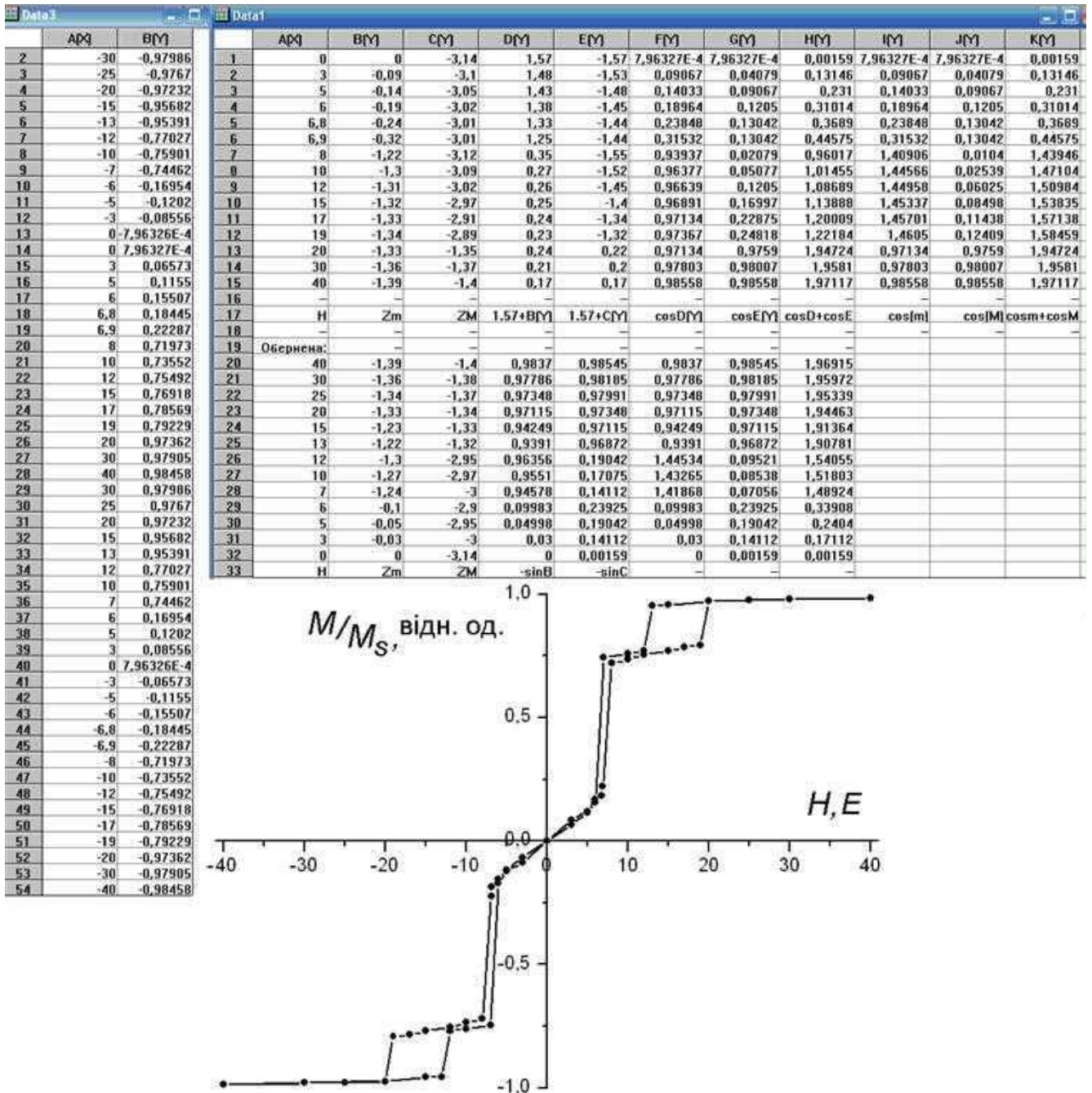


Рис. 3.12. Моделювання перемагнічування кристалічної структури ЗІГ.

При цьому у випадку стрибкоподібних переорієнтацій векторів намагніченості, необхідно вчасно вводити поправочні коефіцієнти в повну енергію через зміни співвідношення об'ємів різнонаправлених доменів.

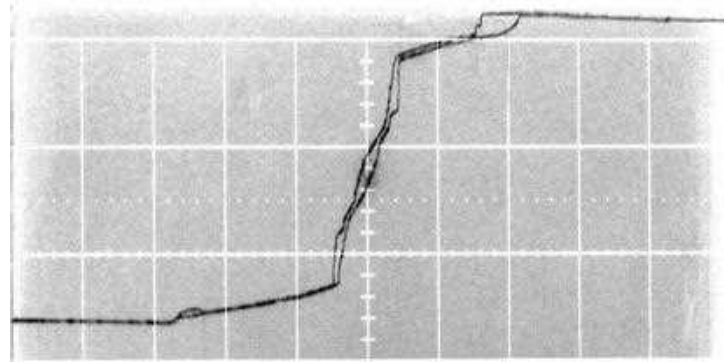


Рис.3.13 Експериментальна (магнітооптична) крива перемагнічування (петля магнітного гістерезису) плівки ЗІГ (зображення з екрана осцилографа). Немонотонність кривої пов'язана із стрибкоподібними змінами періоду доменної структури та напрямків намагніченості в доменах.

ВИСНОВКИ

1. Результати, представлені в даній роботі дозволяють прояснити ряд закономірностей дії «немагнітних» факторів на процеси перемагнічування речовин, перспективних для застосування в спіновій електроніці і чутливих до дії механічних напружень, електричних струмів, оптичного випромінювання. Вони дозволили робити чисельні оцінки впливу згаданих факторів на магнітні характеристики речовин.

2. Співпадіння кривих перемагнічування (петель магнітного гістерезису), розрахованих за методом мінімізації енергії намагніченості із кривими, отриманими експериментально, підтверджує коректність застосованого методу розрахунків на основі адаптованої моделі Стонера-Вольфарта, використаного для аналізу магнітних станів досліджених структур (зокрема, кристалічного ЗІГ).

3. Застосовані в процесі виконання дипломної роботи методики теоретичних, а також частково і експериментальних магнітооптичних досліджень, підходи до самостійного розв'язку розрахункових та експериментальних прикладних наукових задач дозволили визначити, зокрема, величини полів перемагнічування, коерцитивність, величини струмів, при яких нагрів функціональних елементів утримується в допустимих межах та ін.

4. Отримані закономірності перемагнічування дозволяють оптимізувати характеристики функціональних нанорозмірних елементів спінтроники, які працюють на основі магнітострикційних ефектів, створити концепцію реалізації функціональних пристроїв на основі цього напрямку,

Перелік посилань

1. Товстолиткін О.В., Боровий М.О., Курилюк В.В., Куницький Ю.А. Фізичні основи спітроніки. - «Нілан-ЛТД», Вінниця. - 2014. - 500 с.
2. Третяк О.В., Львов В.А., Барабанов О.В.. Фізичні основи спінової електроніки. - Київський унів-т, Київ. - 2002.-314 с.
3. Погорілий А.М., Рябченко С.М., Товстолиткін О.І. Спітроніка. Основні явища. Тенденції розвитку. Укр.фіз.журн. Огляди 2010. - Т.6, №1. - С.37-95.
4. Haskal H.M. // IEEE Trans. Magn.- 1970. - V.6.- P.542.
5. Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices / M. N. Baibich [et al.] // Physical Review Letters. — 1988. — Vol. 61, no. 21. — P. 2472—2475.
6. Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange / G. Binasch [et al.] // Physical Review B. — 1989. — Vol. 39, no. 7. — P. 4828—4830.
7. Julliere, M. Tunneling between two ferromagnetic films / M. Julliere // Physics Letters A. — 1975. — Vol. 54, no. 3. — P. 225—226.
8. 4. Slonczewski, J. Current-driven excitation of magnetic multilayers / J. Slonczewski // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 1996. — Vol. 159, no. 1/2. — P. L1—L7.
9. 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.
10. K. Szerenos, J. Kisielewski, A. Maziewski, A. Stupakiewicz. Photoinduced ultrafast magnetization dynamics in yttrium-iron garnet and ultrathin Co films. IEEE MAGNETICS LETTERS, Vol.6 (2015). DOI: 0.1109/LMAG.2015.2514081
11. Dovbak M.V., Sohatsky V.P. Reconstruction of domain structure in ferrite-garnet under applied mechanical strain. Proc. of Intern. Young Scient. Confer. on Appl. Phys. - Kyiv, Ukraine, p.37, 2018.

12. Shmatlay S., Sohatsky V. Increasing of discreteness in magnetic spin cells. Proc. of Intern. Scient. Confer. on Electronics & Appl. Phys. - Kyiv, Ukraine, p.24-25, 2021.
13. В.Ф.Коваленко, В.П.Сохацький. Дифракційні дослідження магнітооптичних плівок ферит-гранату. // Вісник КУ. Сер. Радіофізика та електроніка. - 2000. - №1. - С. 41-47.
14. 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.
15. Sohatsky V.P., Zubenko I.A., Pokutnii O.Y. Stress sensitivity of nanolayered magnetic sensors. Abstr. of Intern. Confer. "Nanotechnology and Nanomaterials" (NANO-2018). - Kyiv, Ukraine. - P.258-259.