

ІНСТИТУТ МАГНЕТИЗМУ
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ
ТА МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

САЛЮК ОЛЬГА ЮРІЇВНА



УДК 537.6, 538.9

**МАГНІТОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ
МАТЕРІАЛІВ
СПІНТРОНІКИ ТА МАГНІТОФОТОНІКИ**

01.04.11 — магнетизм

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ — 2021

Дисертацією є сукупність наукових статей за науковою тематикою.

Робота виконана у відділі теорії магнітних явищ та магнітної динаміки конденсованих середовищ Інституту магнетизму НАН України та МОН України.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Голуб Володимир Олегович
Інститут магнетизму НАН України та МОН України,
завідуючий відділом теорії магнітних явищ
та магнітної динаміки конденсованих середовищ.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Кучко Андрій Миколайович,
Університет економіки та права “Крок”,
перший проректор;
доктор фізико-математичних наук, професор
Убізський Сергій Борисович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри напівпровідникової електроніки.
доктор фізико-математичних наук, професор
Шека Денис Дмитрович,
Київський національний університет імені Тараса
Шевченка, факультет радіофізики, електроніки та
комп’ютерних систем, професор кафедри математики та
теоретичної радіофізики;

Захист відбудеться «23» квітня 2021 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.248.01 Інституту магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України за адресою: 03142, м. Київ, бульвар Вернадського, 36-б.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту металофізики ім. Г.В.Курдюмова НАН України за адресою: 03142, м. Київ, бульвар Вернадського, 36.

Автореферат розісланий «22» березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.248.01,
кандидат фізико-математичних наук



Козлова Л.Є.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Металооксидна напівпровідникова технологія домінувала в електроніці на протязі останніх 70 років. Зменшення розмірів елементів відбувалося гігантськими кроками, передбаченими знаменитим законом Мура [1*]. Однак, подальше зменшення розмірів елементної бази стикається з проблемою відведення теплоти при великій щільності компонентів у мікросхемі. Існує нагальна потреба в приладах, які будуть виділяти на два три порядки меншу кількість теплоти, ніж сучасне обладнання. Мобільні та медичні системи потребують процесорів, які б використовували настільки мало енергії, щоб практично не потребували зовнішніх джерел живлення. Це відкриває безліч можливостей для створення приладів зв'язку, медичних імплантатів для моніторингу стану пацієнтів, сенсорів для контролю стану будівель та мостів, тощо.

Для вирішення цього завдання запропоновано кілька концепцій створення нових приладів, які можуть замінити напівпровідникові, або бути доповненням напівпровідникових систем для деяких специфічних застосувань, таких як енергонезалежна пам'ять та логічні елементи. Однією із найбільш перспективних концепцій є використання наномагнітних приладів. В наномагнітних приладах ансамблі спінів поведуть себе як гігантський класичний спін, який переключається між стабільними орієнтаціями, що дозволяє зберігати інформацію не лише в двоїчному коді. Основною перевагою використання наномагнітних елементів у порівнянні з напівпровідниковими елементами є можливість переводити їх з одного стану в інший, використовуючи дуже малу енергію, а також те, що вони не потребують енергозатрат для зберігання інформації. Напівпровідниковий транзистор при розмірі 20 нм дозволяє виготовити мікросхему зі щільністю 10^{10} транзисторів на 1 см^2 . При одночасному перемиканні 10% елементів при робочій частоті в 1 ГГц така мікросхема буде виділяти теплоти від 40 до 400 Вт/см^2 . Таке тепловиділення є не тільки неприпустимим для портативної електроніки, але і робить неможливою термічну стабілізацію мікросхем [2*]. Якщо ж використовувати транзистори на наномагнітних елементах, то кількість теплоти, що виділяється в цьому разі при тих самих умовах не буде перевищувати 1 Вт/см^2 [3*]. Це відкриває можливість створення пристроїв, які можуть працювати навіть без батареї. Наприклад, для обробки сигналів людського мозку можна використовувати датчики, які працюють за рахунок руху голови [4*,5*]. Пасивні датчики авіаційної та космічної техніки працюють за рахунок вібрації [6*]. Датчики автомобілів та кораблів, акустичні датчики будівель та мостів будуть працювати за рахунок акустичних вібрацій [7*]. Наномагнітна пам'ять та логічні елементи на основі спінових вентилів і магнітних тунельних затворів дозволяють здійснювати енергоефективне зчитування інформації, однак, запис інформації не є енергоефективним. Це спричинило розробку технології запису, засновану на спіновому трансфері (переносі спіну) [8*-12*]. Однак, цей підхід не дозволяє повністю подолати

проблеми, що пов'язані з виділенням Джоулевої теплоти. Тому продовжується пошук більш ефективних методів перемикання наномагнітних елементів, які використовуються для запису та обробки інформації.

Ще одним суттєвим недоліком існуючих на сьогодні систем напівпровідникової є принципова обмеженість швидкості їх дії, яка обмежується процесами перезарядки її елементів, а також досить високі енергетичні затрати на запис-перезапис інформації. Основною альтернативою цим системам на сьогодні є системи, які працюють на магніторезистивному та магнітооптичному ефектах. Використання таких систем теоретично дає можливість збільшити швидкість запису-зчитування інформації на кілька порядків при застосуванні в якості комірок пам'яті багат шарових магнітних структур при збереженні високої щільності запису. Крім того, використання сіток магнітних елементів та магнетонних кристалів дозволяє створити генератори та фільтри терагерцового діапазону, параметрами яких можна керувати за допомогою електромагнітних полів, і які можуть бути інтегровані в сучасні мікросхеми.

При субмікронних (нанометрових) розмірах можна очікувати виникнення нових фізичних ефектів, що можуть радикально змінити властивості матеріалу. Розуміння цих ефектів зробить можливим проектування і розробку нових матеріалів із цікавими макроскопічними характеристиками, при повному контролі за їхніми електричними, оптичними, магнітними та іншими фізичними властивостями, необхідними для швидкодіючих обчислювальних приладів.

В даний час основою багатьох пристроїв оптоелектроніки, спінтроніки і фотоніки можуть стати фотонні кристали – просторово періодичні системи з модуляцією показника заломлення. Одновимірні фотонні кристали, до складу яких входять магнітооптичні шари, а керування оптичними властивостями яких здійснюється зміною їх магнітних параметрів, називаються одновимірними магнітофонними кристалами. Одновимірні магнітофотонні кристали знайшли застосування в пристроях оптоелектроніки, системах візуалізації зображень, системах обробки інформації, магнітній голографії. До них, в першу чергу, можна віднести такі МО пристрої, як модулятори, перемикачі і затвори, дефлектори, дисплеї з високою контрастністю, високодобротні оптичні резонатори, сенсори і т.д. Основною проблемою створення одновимірних магнітофотонних кристалів є досягнення оптимального співвідношення між величиною кута повороту площини поляризації світла, що поширюється через кристал, та інтенсивністю. Цим вимогам найбільшою мірою відповідають плівки вісмут-заміщеного залізо-ітрієвого гранату. Найбільше значення питомого фарадеївського обертання було зафіксовано у залізо-вісмутівому гранаті $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$. Не зважаючи на велику кількість робіт в цьому напрямку, залишається невирішеною проблема виготовлення одновимірних магнітофотонних кристалів з активними магнітооптичними шарами з високим вмістом вісмуту на негранатових шарах або підкладках.

Представлена робота присвячена комплексному дослідженню магнітодинамічних властивостей функціональних матеріалів та просторово

впорядкованих систем з модуляцією фізичних властивостей на мікро(нано) рівні. Ці дослідження відкривають нові можливості в розумінні фізики процесів, які відбуваються в складних гетерогенних магнітних системах, в тому числі обмінно та дипольно зв'язаних.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота над дисертацією була виконана в Інституті магнетизму НАН України та МОН України в рамках наступних науково-дослідних робіт (НДР):

1. "Розробка та дослідження нанорозмірних структур одновимірних магнітофотонних кристалів" (Державна цільова науково-технічна програма «Нанотехнології та наноматеріали» на 2010-2014 роки)
 Етап 1 "Синтез магнітооптичних шарів феритів-гранатів та дослідження їх фізичних характеристик " (№ державної реєстрації №0110U004801.
 Етап 2 «Синтез та дослідження фізичних властивостей нанорозмірних шарів вісмутного фериту-гранату і немагнітних шарів» №0111U006406.
 Етап 3 "Відпрацювання режимів синтезу нанорозмірних багат шарових структур одновимірних магнітофотонних кристалів на різних підкладках" №0112U005076.
 Етап 4 «Відпрацювання технологічних режимів виготовлення багат шарових нанорозмірних структур періодичного і мікрорезонаторного типів» №0113U001198.
 Етап 5 «Виготовлення і випробування експериментальних зразків багат шарових нанорозмірних структур магнітофотонних кристалів» №0114U001838.
2. "Магнітна динаміка магнітних нанoeлементів та їх ансамблів" (спільна програма наукових проєктів НАН України та Українського науково-технологічного центру (УНТЦ) «Програма цільових досліджень та розвиваючих ініціатив») № ДР 0110U004805, № 5210-УНТЦ. (2010-2011 рр).
3. "Розробка еластичних магнітопластів із заданою просторовою конфігурацією магнітного поля для біонанотехнології: Дослідження структурних та магнітних характеристик матеріалів для концентраторів магнітного поля та магнітопластів" (спільний конкурс наукових проєктів НАН України та Українського науково-технологічного центру (УНТЦ) за Програмою «Цільові дослідження та розвиваючі ініціативи») № ДР 0113U003477, № 5715- УНТЦ. (2013-2014 рр).
4. «Розробка фізичних основ новітніх систем магнітної пам'яті та систем обробки інформації» (цільова комплексна програми фундаментальних досліджень НАН України «Фундаментальні проблеми створення нових наноматеріалів і нанотехнологій»)
 Етап І «Дослідження магнітних та магнітодинамічних властивостей окремих магнітних нанoeлементів» №0115U004647.
 Етап 2 «Дослідження магнітних та магнітодинамічних властивостей дипольно зв'язаних ансамблів магнітних нанoeлементів» №0116U004892

Етап 3 «Дослідження магнітних та магнітодинамічних властивостей обмінно зв'язаних ансамблів магнітних нанoeлементів» №0117U000774

Етап 4 «Дослідження процесів перемагнічування систем магнітних нанoeлементів під дією радіочастотного, надвисокочастотного та оптичного випромінювання» №0118U004008

Етап 5 «Дослідження суцільнометалевих магнетонних кристалів» №0119U101271

Відомча тематика відділення фізики і астрономії НАН України:

- «Спінова динаміка магнітних елементів та їх ансамблів» № 0112U001008 (2012-2016).
- «Мезоскопічні та квантові ефекти в магнетиках» №0117U002273 (2017-2020)
- «Фізичні основи створення функціональних матеріалів для магнітної нанoeлектроніки» №0119U001229 (2019-2020).

Метою дисертації є розробка фізичних основ створення нових магнітних матеріалів для спінтроніки, магнетоніки та магнітофотоніки, а також встановлення основних принципів формування функціональних структур із заданими властивостями на основі метаматеріалів, з'ясування картини фізичних процесів, що відбуваються в таких структурах.

Для досягнення мети були сформульовані та розв'язані наступні **наукові задачі**:

1. Розробити модельні підходи для визначення магнітних параметрів функціональних матеріалів із аналізу експериментальних даних, а також з'ясування на їх основі характеру магнітних взаємодій в складних гетерогенних системах.
2. Вибрати експериментальні методики дослідження структурних та магнітних властивостей функціональних матеріалів та структур, які будуть доповнювати одна одну, для забезпечення достовірності отриманих результатів та їх інтерпретації.
3. Встановити вплив технологічних умов виготовлення магнітних структур на їх магнітні та структурні параметри.
4. Адаптувати магнітні методи для аналізу концентрації, об'єму і складу магнітних фаз в складних композитних нанооб'єктах, де результати стандартних методів є неоднозначними.
5. Встановити кореляцію між параметрами двійникової структури сплавів з магнітним ефектом пам'яті форми в мартенситному стані та їх магнітними властивостями.
6. Встановити особливості магнітних властивостей багатошарових магнітних структур з немагнітними прошарками, вирощених на монокристалічних, полікристалічних та аморфних підкладах.
7. Дослідити особливості виникнення стоячих спінових хвиль в ізольованих нанооб'єктах та їх ансамблях, зв'язаних магнітостатичною та/або обмінною взаємодією, в тому числі при порушенні аксіальної симетрії.
8. Дослідити еволюцію магнітних характеристик періодичних структур в залежності від типу та геометричних параметрів структури.

9. Розробити фізичні принципи створення двошарових структур на основі вісмутових феритів-гранатів, для використання в якості активних елементів одновимірних магнітофотонних кристалів з аморфними дзеркалами Брегга.

Об'єкт дослідження – магнітна динаміка та магнітні параметри гетерогенних функціональних матеріалів спітроніки та магнітофотоніки.

Предмет дослідження – є фізичні методи створення гетерогенних функціональних матеріалів із заданими магнітними параметрами та механізми впливу на магнітні, магнітодинамічні, магнітооптичні та магнітотранспортні характеристики цих матеріалів.

Методи дослідження. Основним експериментальним методом, що використовувався при проведенні всіх досліджень є електронний спіновий резонанс. Для уточнення та верифікації даних, отриманих з електронного спінового резонансу, використовувались також стандартні методи магнітометрії в постійних та змінних магнітних полях: вібраційна магнітометрія, SQUID-магнітометрія, тощо. Склад матеріалів визначався за результатами рентгенівської дисперсійної або індуктивно зв'язаної плазменної спектроскопії. Структурні дані отримувались з рентгеноструктурного аналізу, атомної силової, скануючої та просвічуючої електронної мікроскопії. Також проводились оптичні, магнітооптичні, транспортні та магнітотранспортні дослідження. Для аналізу даних та визначення магнітних параметрів широко використовувалось комп'ютерне моделювання та проводилось порівняння з результатами існуючих теоретичних моделей.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

Вперше показано, що суттєва нелінійність залежності температури Кюрі від концентрації в плівках розбавлених феромагнітних сплавів $\text{Ni}_x\text{Cu}_{1-x}$ пов'язана з частковим розшаруванням сплаву за рахунок обмінної взаємодії.

Вперше систематично досліджено вплив параметрів нанодвійникової структури епітаксіальних плівок Гейслерівських сплавів з ефектом пам'яті форми на константи анізотропії другого та четвертого порядку при наявності феромагнітного та антиферомагнітного обміну на границях двійників.

Вперше експериментально продемонстровано, що нанодвійникування може приводити до появи неколінеарної магнітної структури та спін-залежного розсіяння електронів на такій структурі, що обумовлює появу значного від'ємного магнітоопору у широкому діапазоні температур.

Вперше експериментально продемонстровано формування самоузгодженої періодичної структури на поверхні епітаксіальних плівок Гейслерівських сплавів в результаті релаксації напружень, що виникають за рахунок невідповідностей параметрів кристалічних ґраток плівки та монокристалічної підкладки.

Вперше показано, що відпал наночастинок $\text{Co}_{10}\text{Cu}_{90}$ приводить до утворення метастабільної магнітної фази CoCu , яку практично неможливо отримати в масивних матеріалах.

Вперше експериментально досліджено вплив монокристалічності прошарку MgO в багатошарових гранулярних плівках Fe/MgO на величину

тунельного магнітоопору в цих структурах.

Вперше експериментально продемонстровано підсилення анізотропії четвертого порядку у впорядкованих масивах магнітних дисків, нанесених на суцільну плівку магнітного матеріалу.

Вперше досліджено формування стоячих спінових хвиль в ізольованих дисках при відхиленні намагніченості від осі симетрії та порушенні внаслідок цього аксіальної симетрії.

Вперше досліджено залежність площинної анізотропії основних квазіоднорідних резонансних мод в гексагональній ґратці антидисків від товщини структури.

Вперше досліджено модифікацію магнітних та магнітооптичних параметрів активного елементу одновимірних магнітофотонних кристалів при переході від одношарової до двошарової структури з урахуванням формування адаптивних прошарків на границях між магнітними шарами вісмут заміщеного залізо ітрієвого гранату з різним вмістом вісмуту і між магнітними та немагнітними шарами.

Практичне значення одержаних результатів. Згідно до поставлених наукових задач основним напрямом досліджень була розробка фізичних основ створення магнітних матеріалів та структур для застосування в пристроях спітроніки та магнітофотоніки. Зокрема, результати, отримані при дослідженні розбавлених феромагнітних сплавів $\text{Ni}_x\text{Cu}_{1-x}$ є важливими при створенні спінових вентилів, де ці сплави використовуються в якості температурно керованого прошарку. Сплави Гейслера завдяки високому ступеню поляризації електронів і вузьким резонансним лініям мають широку перспективу застосування в пристроях магнітоніки та спітроніки, а також для створення малогабаритних пасивних датчиків механічних напружень та магнітних полів. Результати, отримані при дослідженні двійникової структури в плівках магнітних сплавів з ефектом пам'яті форми в мартеситному стані, показують достатньо простий (без застосування літографії або іонної імплантації) спосіб отримання нанорозмірних просторово-періодичних структур з чіткими міжфазними границями, а також можливість в широкому діапазоні змінювати магнітні характеристики цих матеріалів, контролюючи технологічні параметри їх отримання.

Результати, отримані при дослідженні масивів дисків та антидисків є необхідними для розробки новітніх систем запису та обробки інформації.

Результати, отримані при дослідженні двошарових структур вісмутного ферит-гранату із різним вмістом вісмуту, є основою створення магнітофотонних кристалів з високим значенням питомого фарадеївського обертання, які розташовані між полікриталічними чи аморфними дзеркалами Брегга, для використання в магнітооптичних затворах та розгалужувачах.

Особистий внесок здобувача. Наукові статті, в яких представлені основні результати дисертаційної роботи, написані у співавторстві. Всі основні результати одержані автором особисто або за його безпосередньої участі в співпраці із колегами із Інституту магнетизму НАН України та МОН України,

ФТІНТ ім. Б.Веркіна НАН України, Таврійського національного університету м. Сімферополь, Університету країни Басків (Більбао, Іспанія), Університету Порто (Порто, Португалія), технічного Університету м. Кайзерслаутерн (Німеччина). Дисертант приймав активну участь у виборі та обґрунтуванні напрямів досліджень, постановці конкретних завдань, йому належить провідна роль в проведенні експериментальних досліджень методом феромагнітного резонансу, Дисертант брав активну участь у постановці всіх задач, інтерпретації всіх отриманих результатів, у плануванні, підготовці та проведенні експериментів; побудові моделей та проведенні теоретичних розрахунків; у підготовці й написанні всіх опублікованих статей, тез та доповідей конференцій. Таким чином, особистий внесок дисертанта в даній роботі є визначальним.

Апробація результатів дисертації. Основні результати, викладені в дисертації, доповідались та обговорювались на наступних міжнародних конференціях:

- Nanospain Conference, 11-13 April 2011 (Bilbao, Spain);
- 5th International Conference "Functional Materials - 2011", 3 – 8 October, 2011 (Crimea, Ukraine);
- I Міжнародна конференція «Актуальні проблеми прикладної фізики», 24 - 28 вересня (м Севастополь, Україна);
- 12th Joint MMM/Intermag Conference , January 14-18, 2013 (Chicago, Illinois, USA);
- XIV Міжнародна конференція з фізики і технології тонких плівок і наноструктур, 20-25 травня 2013 (Львів, Буковель, Україна);
- 7th International Conference ICFM-2013 (Crimea, Ukraine);
- American Physical Society APS March Meeting, March 3–7, 2014 (Denver, Colorado, USA);
- Summer School and International Research and Practice Conference «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO-2014), August 27-30, 2014 (Lviv, Ukraine);
- 2015 IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG) (Beijing, China, 11-15 May 2015);
- Summer School and International Research and Practice Conference «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO-2015), August 26-29, 2015 (Lviv, Ukraine);
- International Workshop on Topological Structures in Ferroic Materials, 2015 (Sidney, Australia);
- 4th Summer School and International Research and Practice Conference «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO-2016), August 24-27, 2016 (Lviv, Ukraine);
- 5th Summer School and International Research and Practice Conference «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO-2017), August 23-26, 2017 (Chernivtsy, Ukraine);
- 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 6-10 November

2017 (Pittsburgh, PA, USA,);

— 8th IEEE International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2018), September 9-14, 2018 (Zatoka, Ukraine);

— International conference “Modern Problems of Solid State and Statistical Physics”, September 14-15, 2020, Kyiv, Ukraine.

Публікації. Основні результати відображені в 22 статтях у наукових фахових журналах, з яких 16 опубліковані у журналах, які входять до кuartилів Q1 та Q2 відповідно до Scimago Scientific Journal Rankings (SJR), та 18 тезах та працях конференцій. Відповідно до восьмого абзацу підпункту 1 пункту 2 Наказу МОН України “Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук” від 23.09.2019р. № 1220 та враховуючи наявність двох публікацій в одному номері журналу ([18] та [19]), кількість публікацій, у яких відображені основні наукові результати, прирівнюється до 53 публікацій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація підготована у вигляді наукової доповіді. До основної частини дисертації включено 22 статті у фахових наукових журналах, які згруповані у 4 розділи. Загальний обсяг дисертації - 196 сторінок, з яких основна частина складає 130 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Дисертацією є сукупність наукових статей за науковою тематикою із детальним аналізом сучасного стану наукової проблеми та запропонованими шляхами формування функціональних структур із заданими властивостями на основі метаматеріалів, а також детальним описом фізичних процесів, що відбуваються в таких структурах.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, вказано зв'язок роботи з науковими програмами та темами, сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну та практичну цінність роботи, відображено апробацію результатів роботи та вказано кількість публікацій за темою дисертації.

Перший розділ “Магнітні властивості деяких перспективних металевих магнітних матеріалів для застосування в пристроях спінтроники та магноніки” присвячено вирішенню проблеми створення новітніх функціональних матеріалів, задавати необхідні для даного пристрою магнітні параметри яких можна, змінюючи технологічні умови отримання. Основна увага приділяється з'ясуванню картини фізичних процесів, що відбуваються в таких матеріалах.

Перший частина присвячена дослідженню магнітних характеристик розбавлених феромагнітних сплавів $\text{Ni}_x\text{Cu}_{1-x}$. Ці матеріали є перспективними для застосування в якості температурно керованого прошарку спінових вентилів. Відомо, що температурою Кюрі таких сплавів можна керувати, змінюючи їх склад. Оскільки такі сплави утворюють неперервні тверді розчини, в масивних матеріалах таких розчинів температура Кюрі практично лінійно зростає зі збільшенням вмісту Ni (x). Аналіз даних температурних залежностей резонансних полів, форми лінії та амплітуди сигналу феромагнітного резонансу показали, що в плівках відбувається часткове фазове розшарування з утворенням фаз, збіднених чи збагачених Ni , що обумовлює суттєву нелінійність залежності температури Кюрі від складу (див. Рис.1). Подальші розрахунки фазової діаграми з перших принципів показали, що таке розшарування відбувається за рахунок обмінної взаємодії між іонами нікелю, і ефект розшарування має бути найбільш вираженим у тонких плівках. Цей механізм фазового розшарування є досить загальним для двокомпонентних систем, що складаються з магнітних та немагнітних атомів, які без наявності обмінної взаємодії були б повністю однорідними.

Більша частина цього розділу присвячена дослідженню магнітних та магнітодинамічних властивостей сплавів Гейслера. Основну увагу було зосереджено на дослідженні цих матеріалів у плівковому стані, зокрема, на дослідженні епітаксціальних плівок, які використовуються зараз або використання яких планується у пристроях спінтроники і магноніки. Сплави Гейслера можуть мати дуже високий ступінь спінової поляризації (за розрахунками до 100%). Крім того, як показали наші дослідження, ширина резонансної лінії в деяких Гейслерівських сплавах може бути в 2-3 рази вужчою за ширину резонансної лінії в пермалой, що робить ці сплави дуже привабливими для застосування в пристроях магноніки, зокрема, для створення

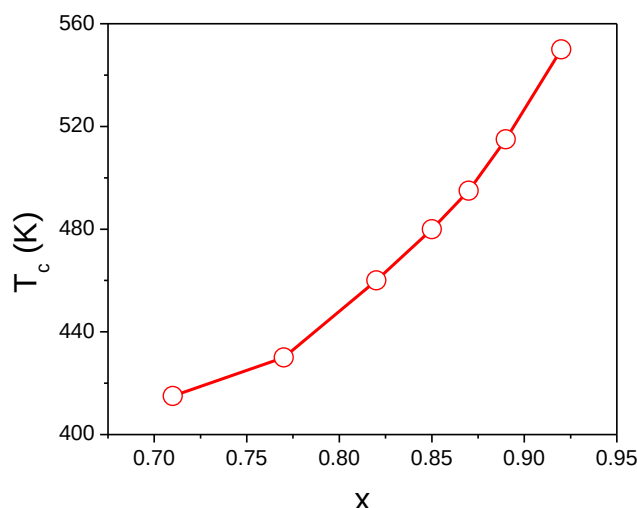


Рис.1. Залежність температури Кюрі плівок $\text{Ni}_x\text{Cu}_{1-x}$ від їх складу

суцільнометалевих магнетонних кристалів. Однак, можливість їх застосування обмежується тим, що через складний характер спин-обмінної взаємодії в Гейслерівських сплавах, намагніченість насичення та температура Кюрі сильно залежать від кристалічної та атомної структури.

Магнітні властивості сплавів Гейслера в аустенітному стані.

В більшості випадків поведінку намагніченості насичення Гейслерівських сплавів можна задовільно описати стандартним

рівнянням $M(T) = M(0) \tanh \left[\frac{T_c M(T)}{TM(0)} \right]$, де $M(0)$ - низькотемпературна границя

намагніченості насичення, T_c - температура Кюрі, T - температура. Константа магнітокристалічної анізотропії для Гейслерівських сплавів в аустенітному стані є досить малою. Типові значення для NiMnGa становлять $K = 2-3 \cdot 10^4$ ерг/см³. Основний вклад в магнітну анізотропію сплавів Гейслера вносять внутрішні напруження. Цей вклад є найбільш значним для тонких плівок у випадку, коли коефіцієнти об'ємного розширення α плівки та підкладки є різними. За рахунок магнітопружної взаємодії механічні напруження в плівці приводять до формування анізотропії типу «легка вісь» або «легка площина». Максимальне значення такої анізотропії можна оцінити, виходячи з наступного: температурна деформація плівки призводить до тетрагонального спотворення кубічної елементарної комірки, тоді поле магнітної анізотропії можна розрахувати з наступного рівняння $H_{me}(T) = 2K_{me}(T)/M(T) = -36\delta M(T)\Delta\alpha\Delta T$, де K_{me} - константа магнітопружної анізотропії, δ - безрозмірна магнітопружна константа.

Наші дослідження показали, що поле магнітопружної анізотропії в плівках сплавів Гейслера може досягати кількох кілоерстед, при цьому знак такої анізотропії залежить від типу підкладки. Так, в плівках на підкладках з кремнію, оксиду алюмінію, молібдену та скла формується анізотропія типу «легка вісь», перпендикулярна до площини плівки, оскільки $\Delta\alpha$ в них є додатною, а константа магнітострікції є від'ємною. В той же час в плівках, осаджених на підкладку NaCl , для якої коефіцієнт теплового розширення набагато більший за такий у сплавах Гейслера, формується

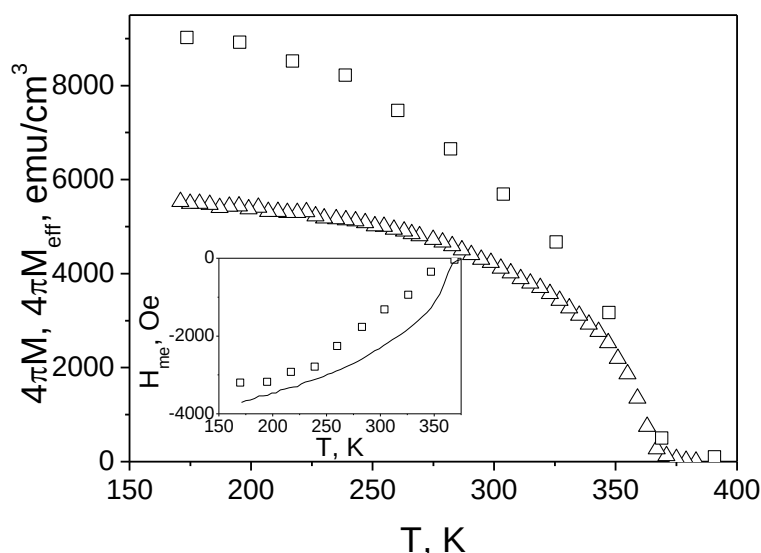


Рис.2. Температурна залежність ефективної анізотропії, визначеної з величини резонансного поля, направленного перпендикулярно до площини плівки (верхня крива) та намагніченість насичення за даними SQUID (нижня крива). На вставці температурна залежність перпендикулярного поля анізотропії.

анізотропія типу «легка площа». На Рис.2 представлена температурна залежність цієї анізотропії $H_{me} = 4\pi M_s - 4\pi M_{eff}$ в плівках NiMnGa, отримана з температурних залежностей намагніченості насичення M_s (стандартні магнітні вимірювання) та ефективної намагніченості M_{eff} (дані феромагнітного резонансу для магнітного поля, прикладеного перпендикулярно до площини плівки).

Ще одним яскравим проявом наявності та релаксації внутрішніх

напружень в епітаксialних плівках Гейслерівських сплавів є утворення самоузгоджених періодичних структур на поверхні плівок. Дослідження спектрів феромагнітного резонансу епітаксialних плівок NiMnGa товщиною

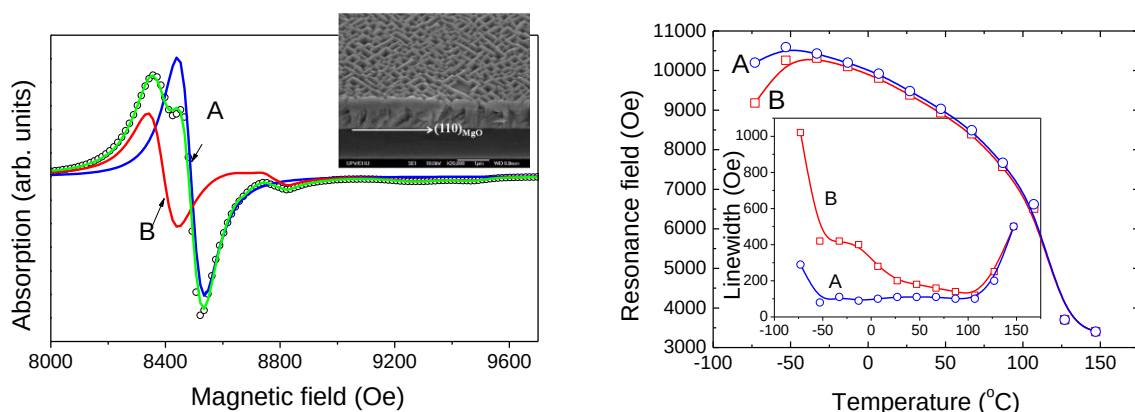


Рис.3. Ліворуч: спектр феромагнітного резонансу плівки $\text{Ni}_{45.9}\text{Mn}_{31.4}\text{Ga}_{22.7}$, записаний при 340 K в аустенітному стані (зелена лінія). Зовнішнє магнітне поле - перпендикулярно до площини плівки. Спектр складається з двох ліній: A і B. На вставці - зображення поверхні плівки, отримане за допомогою скануючої електронної мікроскопії. Праворуч: температурна залежність резонансного поля для ліній A та B. На вставці показана температурна залежність ширини цих ліній.

1 мкм на монокристалічній підкладинці MgO показало наявність двох резонансних ліній, температурна поведінка яких суттєво відрізняється (Рис. 3). В аустенітному стані поведінка ширини лінії А є характерною для плівки феромагнетика з гладкою поверхнею (практично не залежить від температури). Лінія В є типовою для плівок, осаджених на структуровану поверхню (ширина лінії пропорційна до намагніченості). Ці результати стимулювали проведення додаткових структурних досліджень, які показали, що плівка складається з двох шарів. Нижній шар товщиною 900 нм є епітаксіальною плівкою (001) на підкладинці MgO, а верхній шар товщиною порядку 100 нм складається з нанодротів, що орієнтовані вздовж напрямків [110] монокристалічної підкладинки і мають строгу кристалічну орієнтацію.

Магнітні властивості сплавів Гейслера в мартенситному стані.

Перехід з аустенітної фази в мартенсит супроводжується спонтанною деформацією кубічної ґратки. В Гейслерівських сплавах це приводить до формування досить великої магнітної анізотропії другого порядку, величина якої може досягати кількох кілоерстед. В масивних матеріалах при мартенситному перетворенні значення констант анізотропії четвертого порядку хоча і збільшується, але не сильно. Нами було показано, що в плівках NiMnGa, осаджених на монокристалічні підкладки, значення констант анізотропії четвертого порядку можуть бути на порядок вищими ніж ті, що спостерігаються у масивному матеріалі. Ця значна різниця між масивним матеріалом та плівками може бути пояснена, виходячи з наступного: в масивних кристалах при мартенситному перетворенні об'єм елементарної

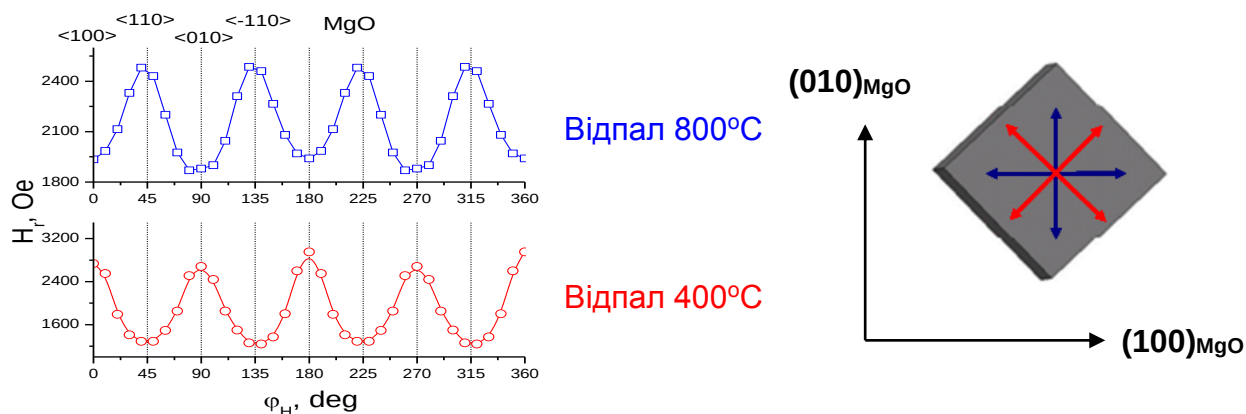


Рис.4. Кутові залежності резонансного поля в площині плівки для двох плівок $\text{Ni}_{51.4}\text{Mn}_{28.3}\text{Ga}_{20.3}$, осаджених на холодну та гарячу підкладинки. Орієнтація магнітного поля відрховується від напрямку [100] підкладинки MgO. Мінімуми резонансного поля відповідають напрямкам легкого намагнічування. Справа показано взаємну орієнтацію кристалічної ґратки плівки та напрямів легкого намагнічування (двосторонні стрілочки) в системі координат $\text{MgO}(001)$.

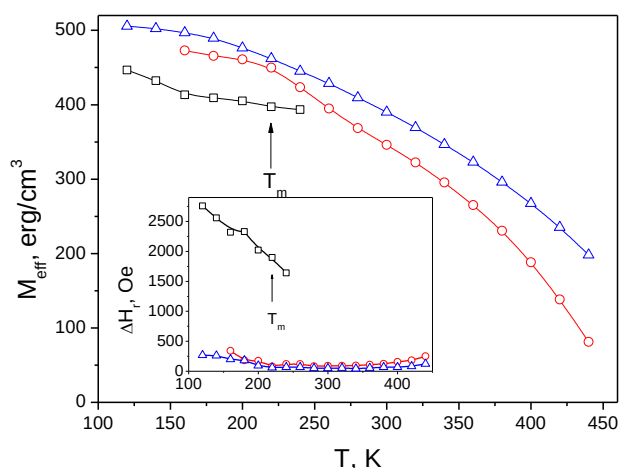


Рис.5. Температурні залежності ефективної намагніченості для магнітних фаз, що спостерігаються в плівці Ni-Fe(Co)-Ga/MgO, отримані з даних ФМР. Температурні залежності ширини відповідних резонансних піків показані на вставці. Температура прямого мартенситного перетворення T_m , отримана із температурної залежності магнітної сприйнятливості, показана стрілкою.

температурну динаміку фазового перетворення навіть у випадку багатокомпонентних систем. В якості прикладу на Рис. 5 наведено температурну залежність резонансних полів для трьох фаз, що співіснують в сплаві Ni-Fe(Co)-Ga/MgO. В області високих температур існує дві високо симетричні кубічні фази (аустенітна та γ – фаза) з вузькими лініями ФМР. При низьких температурах наявні γ – фаза і менш симетрична мартенситна фаза з набагато ширшими лініями ФМР. В діапазоні температур 150 К – 250 К співіснують всі три фази. Дані ФМР разом з структурними та стандартними магнітними вимірюваннями дають можливість з'ясувати температурну поведінку всіх магнітних параметрів фаз, що співіснують в даному матеріалі, і визначити концентрацію кожної з фаз в усьому температурному діапазоні їх існування (співіснування).

Вплив двійникової структури на магнітні та магнітотранспортні властивості сплавів Гейслера.

На відміну від масивних матеріалів, де мартенситне перетворення може відбуватися як з утворенням, так і без утворення двійникових варіантів, в плівках сплавів Гейслера мартенситне перетворення завжди відбувається з двійникуванням, яке обумовлене вимогою збереження площі поверхні плівки,

комірки кристалічної ґратки практично не змінюється, в той час як в плівках можуть спостерігатись досить значні зміни об'єму (як збільшення, так і зменшення) елементарної комірки при мартенситному перетворенні. Цей факт, зокрема, дозволив пояснити різницю у знаках констант анізотропії четвертого порядку (Рис.4) для двох епітаксialьних плівок з однаковим складом та товщиною, отриманих в різних технологічних умовах.

Показано, що феромагнітний резонанс є потужним методом дослідження процесів, що відбуваються при мартенситному фазовому перетворенні. Оскільки магнітні параметри (намагніченість насичення, магнітна анізотропія тощо) аустеніту і мартенситу суттєво відрізняються, то спектри феромагнітного резонансу цих фаз у більшості випадків добре розділяються. Це дозволяє прослідити

яка закріплюється на підкладинці. Найбільш вираженим цей ефект є в епітаксіальних плівках Гейслерівських сплавів, де при мартенситному перетворенні формується періодична двійникова структура характерним періодом, що становить десятки – сотні нанометрів. У цьому випадку ширина двійникових варіантів стає співрозмірною з довжиною обмінної кореляції, що має суттєво впливати на ефективні магнітні параметри та магнітну структуру таких плівок.

До цього часу не проводились систематичні дослідження магнітних властивостей таких систем, хоча вони є дуже цікавими як з фундаментальної точки зору, так і для застосування в пристроях магنونіки та спінтроніки. Границі двійників є практично ідеальними інтерфейсами, а порушення симетрії ґратки на границях двійників при наявності конкуренції обмінної взаємодії між магнітними іонами в сплавах Гейслера дозволяє отримати різні типи обмінного зв'язку між двійниковими варіантами. Тобто такі системи є як ідеальним полігоном перевірки існуючих теорій для опису обмінно зв'язаних магнітних систем, так і матеріалами для створення різних типів датчиків, а також суцільнометалевих магنونних кристалів.

Ще однією відмінністю епітаксіальних плівок Гейслерівських сплавів від масивних матеріалів є те, що в плівках можуть реалізовуватись не всі можливі двійникові варіанти. На Рис.6 схематично зображено можливі способи двійникування епітаксіальних плівок Гейслерівських сплавів на підкладинці $\text{MgO}(100)$, при перетворенні з кубічного аустеніту на тетрагональний або орторомбічний мартенсит. Для орторомбічних кристалів з границями типу А кристалографічна ось b лежить в площині плівки, в той час як осі a або c є перпендикулярними до площини плівки. У випадку реалізації границь типу В ось b завжди перпендикулярна до площини плівки, а осі a та c лежать в площині плівки. Для тетрагональних плівок ось c лежить в площині плівки і

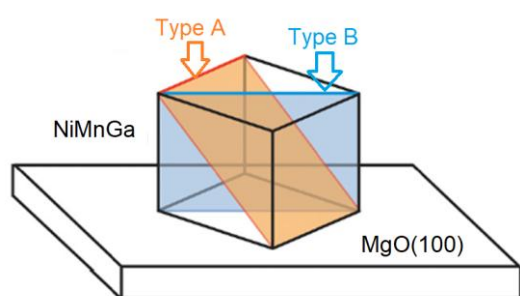


Рис.6 Схема, що демонструє два типи двійникових границь, що можуть існувати в плівці NiMnGa , осадженій на підкладинку $\text{MgO}(100)$. Різні орієнтації двійникових границь показано по відношенню до елементарної комірки аустенітної фази.

реалізуються лише границі типу В. Було показано, що у випадку сильного обмінного зв'язку (феромагнітного або антиферомагнітного) між двійниковими варіантами, в двійникованій орторомбічній плівці ефективна магнітна анізотропія має тетрагональну симетрію. У випадку тетрагональної плівки ефективна магнітна анізотропія буде мати тетрагональну симетрію, але магнітні тетрагональні осі не співпадають з кристалографічними осями двійникових варіантів. В якості прикладу на Рис. 7 представлені кутові залежності резонансного поля нанодвійникової плівки NiMnGa (ширина двійників порядку 60 нм),

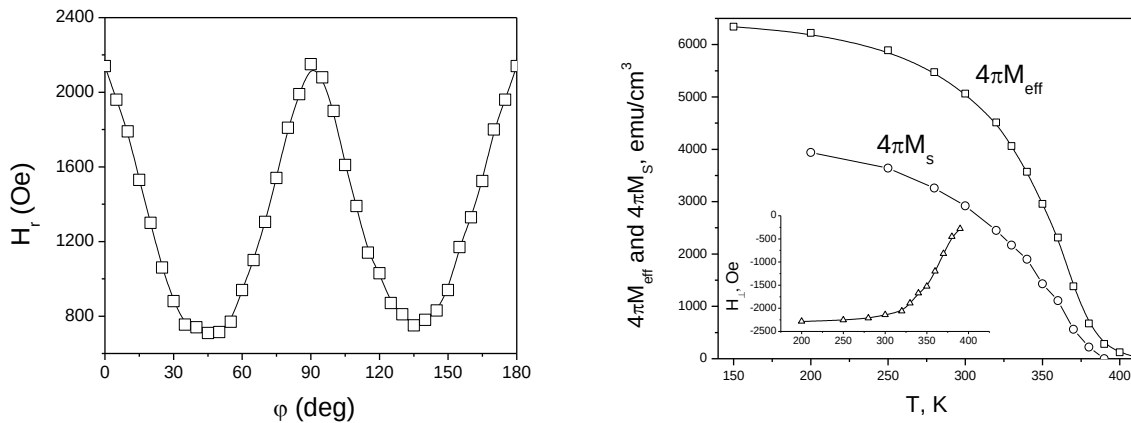


Рис.7 Ліворуч: площинна кутова залежності резонансного поля нанодвійникової плівки NiMnGa, осадженої на підкладинку MgO(100). Праворуч: температурна залежність ефективної намагніченості цієї плівки, отримана з даних ФМР, та намагніченості насичення отримана з даних магнітометрії, на вставці – температурна залежність поля перпендикулярної магнітної анізотропії.

осадженої на підкладинку MgO(100). За даними рентгеноструктурного аналізу ця плівка в мартенситному стані має орторомбічну кристалічну ґратку. Аналіз площинних та позаплощинних залежностей спектрів ФМР явно вказує на тетрагональну магнітну симетрію. Аналогічна тетрагоналізація магнітної анізотропії спостерігалась і в плівках NiMnSn, де, на відміну від NiMnGa, обмін на границі двійників є антиферомагнітним.

Магнітна структура двійникованих плівок суттєво залежить від співвідношення між шириною двійників та довжиною обмінної кореляції. На Рис.8 схематично зображені різні типи магнітної структури, що можуть виникати в двійникованих магнітних матеріалах в залежності від цього співвідношення. Виникнення неколінеарної магнітної структури було підтверджено даними ФМР. Наявність спин-залежного магнітотранспорту приводить до появи значного від'ємного магнітоопору в широкому



Рис.8. Схематичне зображення магнітної структури, що утворюється в нанодвійникованому мартенситі в залежності від співвідношення між шириною двійникового варіанту l та довжини обмінної кореляції δ .

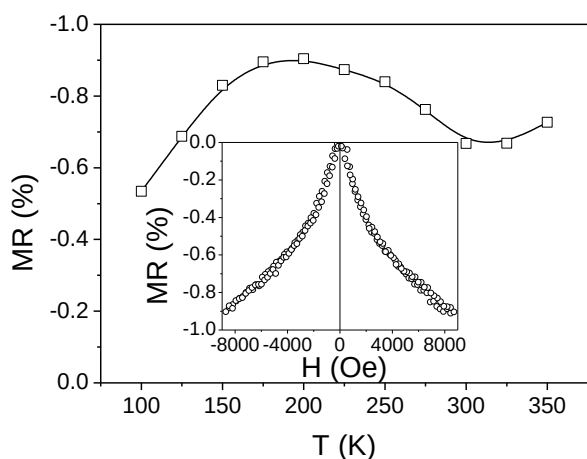


Рис.9 Температурна залежність величини від'ємного магнітоопору в нанодвійникованій плівці NiMnGa в магнітному полі 9 кЕ, прикладеному в площині плівки вздовж напрямку струму. На вставці показана залежність магнітоопору від магнітного поля при температурі 200 К.

температурному діапазоні (Рис.9). Складний характер залежності магнітоопору від температури обумовлений температурними залежностями констант магнітокристалічної анізотропії та довжини вільного пробігу електрона.

Другий розділ “Магнітні та магнітотransпортні властивості гранулярних та багатошарових систем на основі заліза та кобальту” присвячено дослідженню гетерогенних магнітних структур, які використовуються зараз для створення магнітних датчиків та пристроїв спінтроніки. Технологія виробництва таких систем є достатньо простою, а їх властивості майже невичерпними. Незважаючи на те, що такі системи є добре дослідженими, досі не з'ясовані деякі аспекти впливу особливостей

кристалічної та фазової структури на їх магнітні, магнітотransпортні та магнітодинамічні властивості, а також модифікація цих властивостей при переході до нанометрових розмірів.

Гранулярні структури CoCu та CoAg зараз активно використовуються в датчиках магнітного поля. Фізичні властивості об'єктів кардинально змінюються при наближенні їх розмірів до нанометрових. В даній роботі було показано, процеси фазового розшарування в наночастинках Co₁₀Cu₉₀ суттєво відрізняються від тих, що спостерігаються в масивних матеріалах та гранулярних плівках. Зокрема, встановлено, що відпал наночастинок при температурі вище 300°C не призводить до подальшого розшарування системи, як це відбувається в масивних матеріалах, а, навпаки, веде до утворення метастабільної фази CoCu з низькою намагніченістю насичення. Відпал при високих температурах дає можливість отримати метастабільні фази, які практично неможливо отримати в масивних матеріалах.

Багатошарові гранулярні плівки Fe/MgO зараз широко використовуються в якості магніторезистивних датчиків, наприклад, в системах фіксації руху об'єктів, сенсорів магнітного поля, тощо. Однак, не проводилось систематичних досліджень впливу монокристалічності матриці MgO на формування металічних шарів та магнітотransпортні властивості цих структур. Було показано, що незважаючи на те, що монокристалічність матриці MgO практично не впливає морфологію металічних магнітних шарів, вона суттєво впливає на магнітотransпортні характеристики: магнітоопір структур з монокристалічними прошарками MgO є значно більшим. На Рис. 10 показано,

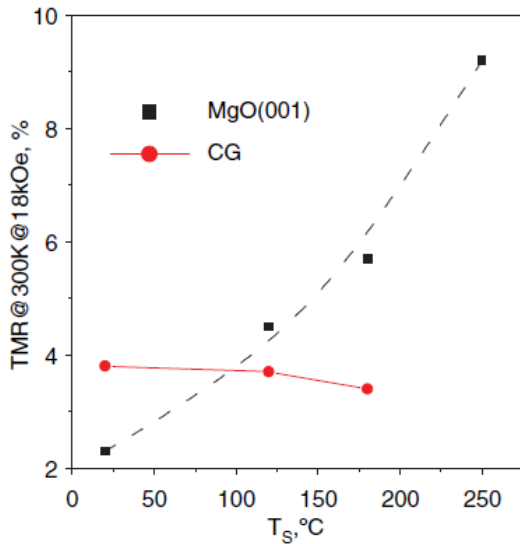


Рис. 10 Залежність тунельного магнітоопору від температури осадження T_s в багатошарових гранулярних структурах Fe/MgO, осаджених на монокристалічну підкладку MgO та скляну підкладку.

що зростання температури осадження для багатошарових структур, осаджених на монокристалічні підкладки MgO, приводить до суттєвого зростання тунельного магнітоопору, в той час як для багатошарових структур, осаджених на аморфні підкладки, магнітоопір практично не змінюється. Ця відмінність пов'язана з наявністю ефекту спінової фільтрації в епітаксialних тунельних бар'єрах MgO. В багатошарових структурах, осаджених на монокристалічні підкладки MgO, при збільшенні температури осадження покращується монокристалічність матриці MgO, на аморфних підкладках при всіх температурах осадження матриця залишається полікристалічною.

Досліджено спектри феромагнітного резонансу в тришарових та багатошарових структурах $(\text{Co}_{0,74}\text{Si}_{0,26})/\text{Si}/(\text{Co}_{0,74}\text{Si}_{0,26})$ зі

слабкою антиферомагнітною взаємодією між шарами. Проаналізовано спектри тришарових структур з різною товщиною немагнітного прошарку та багатошарових структур з різною кількістю періодів структури при фіксованій товщині немагнітного прошарку. Порівняння з даними магнітооптичних вимірювань показало, що наявність слабого антиферомагнітного обміну приводить до суттєвого зміщення резонансного поля по відношенню до резонансного поля в одношаровій плівці $\text{Co}_{0,74}\text{Si}_{0,26}$. При цьому величина цієї

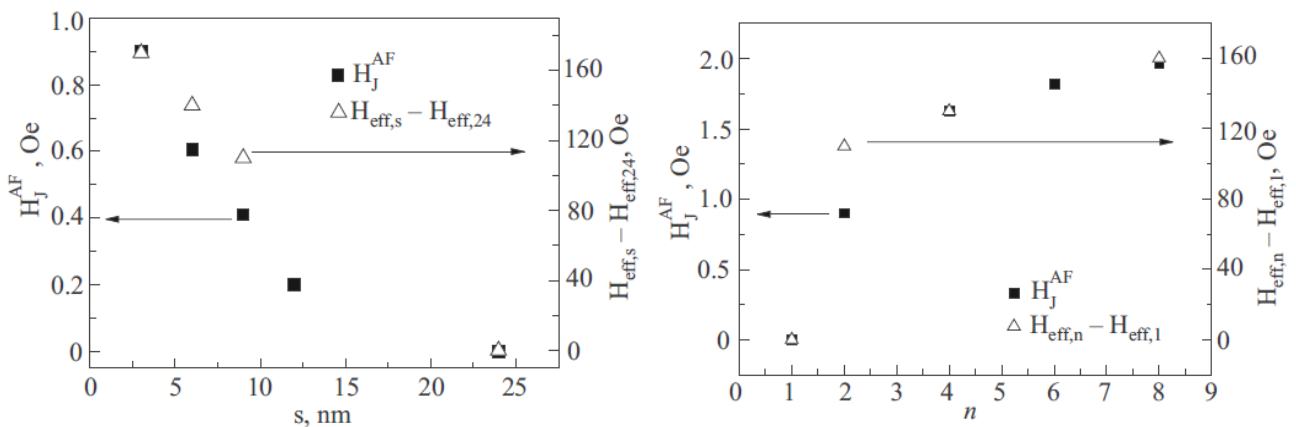


Рис.11 Порівняння поля антиферомагнітного обміну, отриманого з магнітооптичних петель гістерезису, та ефективного поля анізотропії, отриманого з даних ФМР для тришарової структури $(\text{Co}_{0,74}\text{Si}_{0,26})/\text{Si}/(\text{Co}_{0,74}\text{Si}_{0,26})$ в залежності від товщини немагнітного прошарку (ліворуч) та для багатошарової структури $(\text{Co}_{0,74}\text{Si}_{0,26}/\text{Si})_n$ в залежності від кількості періодів структури (праворуч).

зміни пропорційна полю обмінної взаємодії (Рис.11). Найбільш імовірним поясненням цього ефекту є зміна температури магнітного фазового перетворення багатошарової структури за рахунок обмінної взаємодії між шарами.

Третій розділ “Магнітна динаміка в структурованих магнітних плівках” присвячено дослідженню магнітодинамічних характеристик масивів ізолюваних магнітних елементів та елементів, зв’язаних дипольною та/або обмінною взаємодією. Ці дослідження є необхідними для розуміння процесів перемикавання та збудження спінових хвиль в елементах спінтроники та магنونіки. Структуровані магнітні плівки зараз розглядаються в якості найбільш перспективних технологій, використання яких дозволить подолати принципові обмеження на швидкість обробки інформації, притаманні напівпровідниковій електроніці.

Перші дослідження, які проводились авторами на масивах невзаємодіючих субмікронних та нанометрових дисках, дозволили перевірити сучасні теоретичні моделі збудження стоячих спінових хвиль в широкому діапазоні частот (від 1 ГГц до 100 ГГц) і температур (4 К – 400 К). Подальші дослідження стосувались нових ефектів і були присвячені збудженню стоячих спінових хвиль в ізолюваних нанодисках при відхиленні намагніченості від осі симетрії та порушенні внаслідок цього аксіальної симетрії.

Отримані результати дають можливість передбачити трансформацію спін-хвильового спектру в залежності від орієнтації намагніченості, що є важливим для керування частотними характеристиками приладів спінтроники і магنونіки.

На рис. 12 наведено еволюцію спектрів ФМР невзаємодіючих пермалоєвих дисків (радіус 250 нм, товщина 40 нм) для різних кутів θ між напрямком зовнішнього магнітного поля та нормаллю до площини диска.

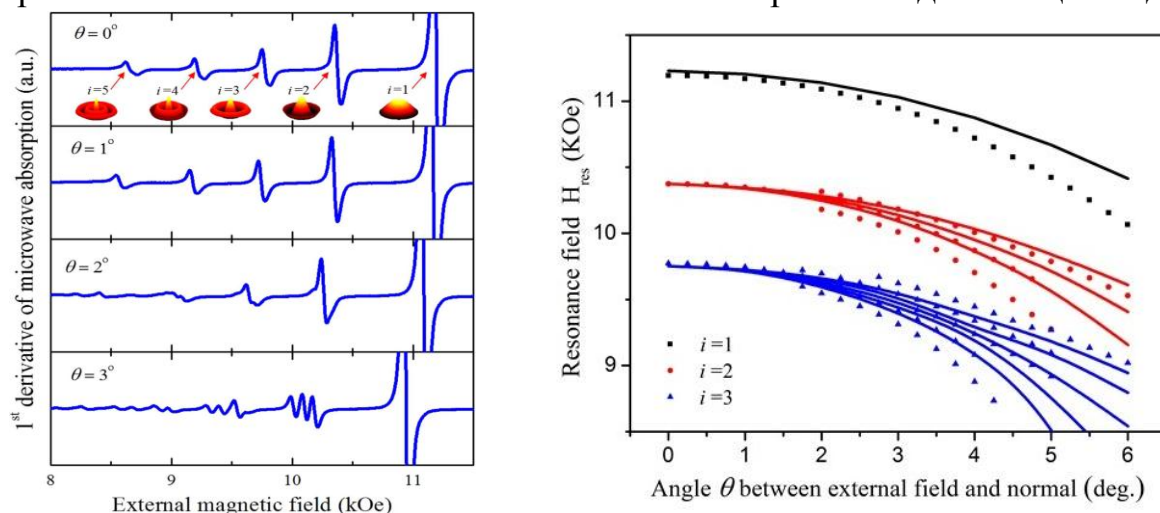


Рис.12 Спектри ФМР невзаємодіючих пермалоєвих дисків (радіус 250 нм, товщина 40 нм) для різних кутів θ між напрямком зовнішнього магнітного поля та нормаллю до площини диска (ліворуч). Залежність резонансних полів різних мод від кута θ (символи – експеримент, суцільні лінії – теоретичний розрахунок).

Порушення аксіальної симетрії приводить до розщеплення спін-хвильових мод, а кількість піків залежить від номера моди. Спін-хвильовий спектр був описаний Тартаківською О.В. за допомогою феноменологічної теорії у наближенні повного закріплення спінів на бічних границях дисків. Ця теорія дозволяє досить точно описати поведінку спін-хвильових мод при малих кутах відхилення магнітного поля від осі диску ($\theta < 5^\circ$). Розходження експериментальних та теоретичних даних при більших кутах відхилення, найбільш імовірно, пов'язано з тим фактом, що закріплення спінів не є повним і залежить від θ .

Досліджено еволюцію спектру феромагнітного резонансу в гексагональній ґратці антидисків в залежності від товщини структури. Гексагональна структура антидисків була отримана напиленням плівки пермалою на пористу мембрану із анодованого оксиду алюмінію. Діаметр пор мембрани складав 100 нм, відстань між порами 100 нм. Плівка пермалою осаджувалась методом магнетронного розсіювання. Були отримані структури з різною товщиною плівки (2,5 нм, 5 нм, 10 нм та 20 нм). Експериментально показано, що зростання товщини структури призводить до збільшення площинної анізотропії. Резонансний спектр складається з трьох квазіоднорідних резонансних мод, виникнення яких пов'язано з наявністю трьох квазіоднорідних областей в елементарній комірці ґратки антидисків, що підтверджено за допомогою мікромагнітного моделювання (Рис.13).

Методом феромагнітного резонансу досліджено магнітну анізотропію в періодичних квадратних невзаємодіючих та обмінно зв'язаних ґратках пермалоєвих дисків. Період ґратки для всіх структур становив 620 нм, товщина дисків 60 нм, а діаметр дисків становив 300 нм, 425 нм та 550 нм. Обмінний зв'язок між дисками забезпечувався напиленням на поверхню ґратки дисків суцільної пермалоєвої плівки, товщина якої становила 15 нм або 30 нм.

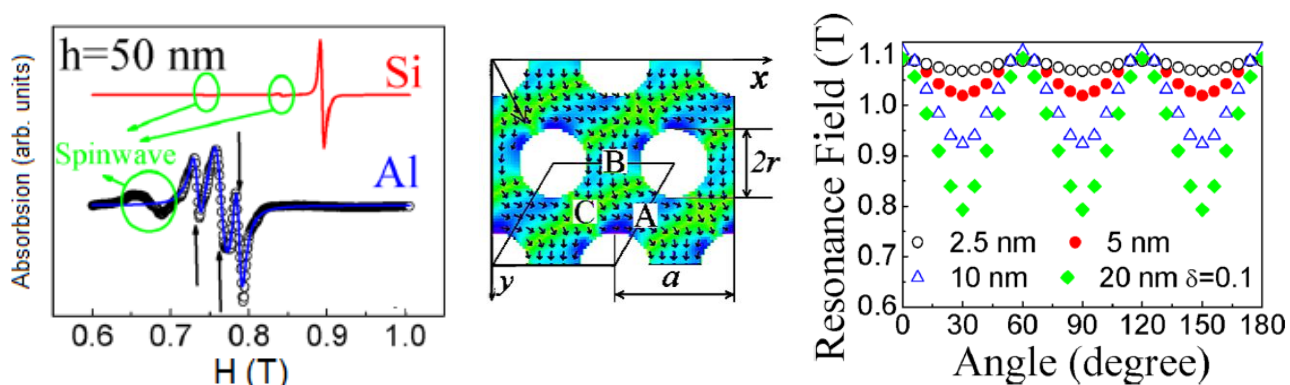


Рис.13. (Ліворуч) спектр ФМР плівки пермалою товщиною 50 нм, осадженої на мембрану з анодованого алюмінію. Поле перпендикулярно до площини плівки. Зверху для порівняння наведено спектр суцільної плівки пермалою на підкладці з кремнію. (В центрі) розподіл намагніченості в гексагональній ґратці антидисків, отриманий з мікромагнітних розрахунків. (Праворуч) кутові залежності резонансного поля для гексагональної ґратки антидисків при різній товщині шару пермалою. Поле в площині плівки.

Величина магнітної анізотропії була отримана з площинних кутових залежностей резонансного поля основних піків спектру ФМР. У випадку невзаємодіючих елементів магнітна анізотропія четвертого порядку монотонно зменшується при збільшенні відстані між краями дисків.

Як було показано раніше, дипольна взаємодія в щільних ґратках приводить до неоднорідності статичної намагніченості диску, яка залежить від орієнтації магнітного поля по відношенню до осей ґратки. Це обумовлює той факт, що напрямок осей легкого намагнічування для основної моди відповідає діагоналям квадратної ґратки. В той же час напрямок осей легкого намагнічування для крайової моди співпадає з осями квадратної ґратки, оскільки при орієнтації магнітного поля вздовж осей ґратки, динамічний дипольний зв'язок між крайовими модами сусідніх елементів є максимальним. При наявності обмінного зв'язку через магнітний шар величина анізотропії збільшується у декілька разів, і її залежність від відстані між краями дисків стає немонотонною (Рис 14). Таке збільшення анізотропії обумовлене коливаннями намагніченості як на дисках так і в плівці за рахунок обмінного зв'язку між ними. Як показало комп'ютерне моделювання, наявність обміну між дисками та

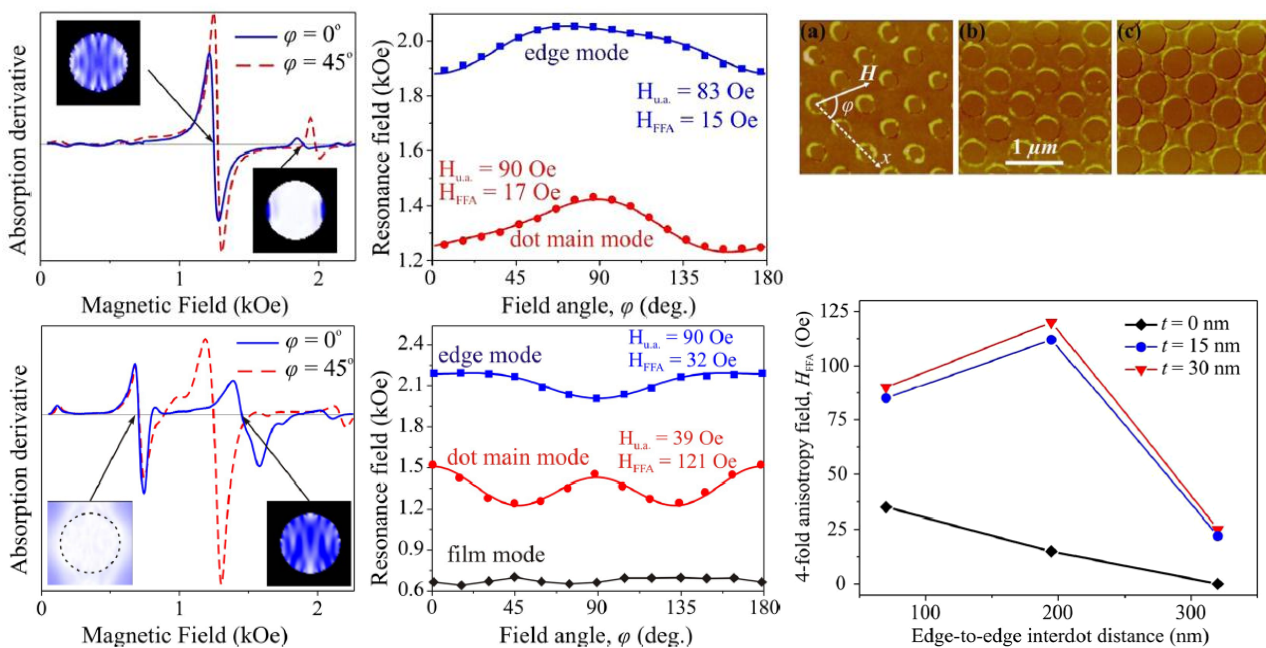


Рис.14. (Праворуч, зверху) зображення ґратки дисків пермалою з діаметром 300 нм (а), 425 нм (b) та 550 нм (c), вкритих суцільною плівкою пермалою, отримане за допомогою атомної силової мікроскопії. Також наведена система координат, що використовується в наведених кутових залежностях. Спектри ФМР ґратки дисків діаметром 425 нм (ліворуч, зверху) та такої ж ґратки, вкритої шаром пермалою 30 нм (ліворуч, знизу). Магнітне поле в площині плівки. На вставках - розраховані профілі основної та крайової моди. Поруч, правіше - відповідні кутові залежності для різних мод. (Праворуч, знизу) залежність поля двовісної анізотропії ґратки дисків від товщини нанесеної суцільної плівки пермалою.

плівкою призводить з одного боку до суттєвого збільшення анізотропії на середніх відстанях між дисками і до ізотропності основної моди для щільних ґраток з другого. На відміну від дипольно взаємодіючих елементів, в яких анізотропія тим більша, чим менша відстань між елементами, максимальна анізотропія основної моди диску у випадку обмінного зв'язку між дисками через магнітний підшар досягається при середніх відстанях між елементами, коли ця мода вже є суттєво локалізованою, але все ще відчуває вплив локальних статичних полів.

Четвертий розділ “Наноструктури одновимірних магнітофотонних кристалів на основі вісмут заміщеного фериту-гранату з двошаровим магнітоактивним елементом” присвячено вирішенню проблеми виготовлення магнітофотонних кристалів з негранатовими шарами дзеркал Брегга на основі феритів-гранатів з високим вмістом вісмуту, які забезпечують велике питоме фарадеївське обертання.

Зараз добре відомі періодичні та мікрорезонаторні одновимірних магнітофотонних кристалів, що ґрунтуються на використанні вісмут-заміщеного фериту-гранату ітрію (Bi: YIG) і окислів з максимальним контрастом оптичних показників (Ta_2O_5 або TiO_2 і SiO_2). Однак, ряд проблем, зв'язаних з одержанням як окремих шарів, так і кристалів в цілому, залишаються невирішеними. Зокрема, однією з проблем виготовлення кристалів є осадження шарів феритів-гранатів з високим вмістом вісмуту на негранатові підкладки або шари. Це обмежує можливість одержання магнітофотонних кристалів з великим питомим фарадеївським обертанням. Заміна дорогих підкладок немагнітних гранатів дешевими кварцовими є важливим для серійного виробництва пристроїв на основі одновимірних магнітофотонних кристалів.

Робота, проведена дисертантом, є частиною комплексного дослідження впливу технологічних параметрів на магнітні та магнітодинамічні властивості активних елементів магнітофотонних кристалів. На першому етапі досліджувався вплив відпалу на фазову та кристалічну структуру плівок вісмут заміщеного фериту гранату, осаджених на різні типи підкладок з різною попередньою обробкою поверхні. Підвищення температури відпалу приводить до поліпшення кристалічності магнітооптичних шарів, однак, відпал при дуже високих температурах (більше 750°C) приводить до часткового або повного розпаду гранатової фази, що суттєво погіршує магнітооптичні характеристики шарів. Плівки вісмут заміщеного фериту-гранату в залежності від режиму кристалізаційного відпалу можуть мати підвищену шорсткість, що негативно впливає на їх магнітооптичні властивості. Зниження шорсткості поверхні можна досягти, зменшуючи швидкість нагріву. Ще більш ефективним методом зменшення шорсткості поверхні є поліровка підкладки та плівок вісмутного фериту-гранату іонами аргону або за допомогою низькоенергетичної плазми. При цьому середня шорсткість поверхні може бути знижена до 2 нм. Однак, використання низькоенергетичної плазми або іонів аргону з енергією 4 кеВ, приводить до суттєвої аморфізації поверхневого шару. Крім того, збільшується

взаємна дифузія при напиленні наступних шарів. Комплексні дослідження за допомогою магнітооптичних та магніторезонансних методів показали, що дифузійний прошарок має суттєво інші магнітооптичні характеристики (намагніченість, точку компенсації, температуру Кюрі, анізотропію, тощо). Дослідження магнітних та магнітооптичних характеристик шарів різної товщини показали, що ширина дифузійного прошарку в залежності від типу обробки поверхні може змінюватись від 10 до 40 нм. Було показано, що для виготовлення магнітооптичних шарів оптимальною обробкою поверхні є обробка поверхні пучком іонів аргону з енергією порядку 1 кеВ, що забезпечує низьку шорсткість поверхні (порядку 2 нм), а також мінімальну товщину дифузійного прошарку (порядку 10 нм), який практично не впливає на магнітні та магнітооптичні властивості магнітоактивного елементу.

Однією з проблем виготовлення магнітофотонних кристалів на основі вісмут заміщених феритів гранатів з великим вмістом вісмуту, який забезпечує високі показники фарадеївського обертання кристалів є те, що ці матеріали не кристалізуються на негранатових та аморфних підкладках. Нашими співавторами із Таврійського національного університету для вирішення цієї проблеми було реалізовано метод, який дозволяє здійснити кристалізацію шарів з високим вмістом вісмуту при їх осадженні на прошарок з малим вмістом вісмуту, який добре кристалізується на будь-яких підкладках. Проведені нами дослідження в двошарових плівках $\text{Bi}_{1.0}\text{Y}_{0.5}\text{Gd}_{1.5}\text{Fe}_{4.2}\text{Al}_{0.8}\text{O}_{12}/\text{Bi}_{2.8}\text{Y}_{0.2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, $\text{Bi}_{1.0}\text{Y}_{0.5}\text{Gd}_{1.5}\text{Fe}_{4.2}\text{Al}_{0.8}\text{O}_{12}/\text{Bi}_{1.5}\text{Gd}_{1.5}\text{Fe}_{4.5}\text{Al}_{0.5}\text{O}_{12}$, $\text{Bi}_{1.5}\text{Gd}_{1.5}\text{Fe}_{4.5}\text{Al}_{0.5}\text{O}_{12}/\text{Bi}_{2.8}\text{Y}_{0.2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ показали наявність сильної обмінної взаємодії між магнітними шарами. Це означає, що з магнітної точки зору ці двошарові структури можна вважати одношаровою магнітною плівкою з деякими ефективними параметрами. Це також підтверджують і дослідження магнітооптичних петель гістерезису цих структур. Було також показано, що варіюючи склад шарів можна отримати структури з ефективною анізотропією типу легка вісь, легка площина або кутова фаза. Це дозволяє використовувати такі структури в магнітофотонних

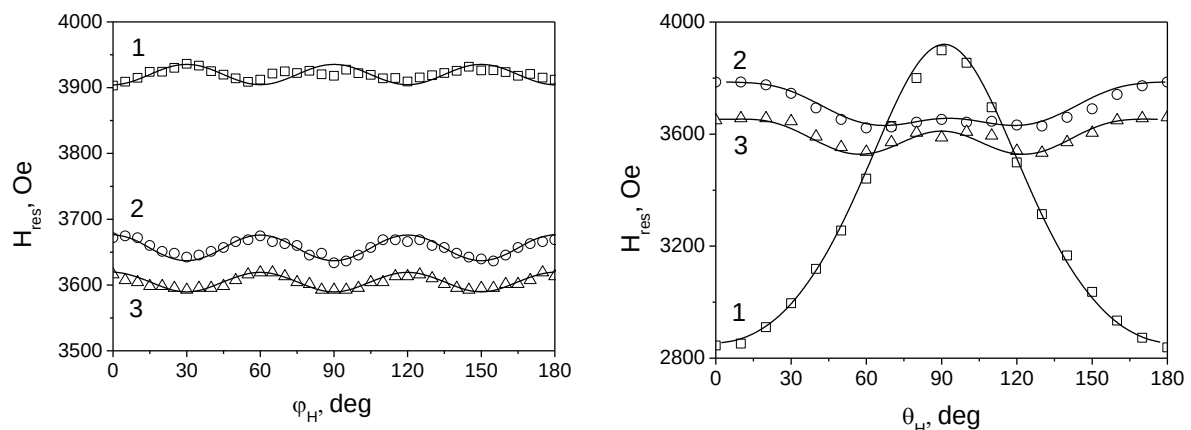


Рис.15 Азимутальна (площинна; ліворуч) та полярна залежність резонансного поля (праворуч) для одношарових плівок $\text{Bi}_{1.5}\text{Gd}_{1.5}\text{Fe}_{4.5}\text{Al}_{0.5}\text{O}_{12}$ (1) і $\text{Bi}_{2.8}\text{Y}_{0.2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (2) та двошарової структури $\text{Bi}_{1.5}\text{Gd}_{1.5}\text{Fe}_{4.5}\text{Al}_{0.5}\text{O}_{12}/\text{Bi}_{2.8}\text{Y}_{0.2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ (3).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано та обґрунтовано шляхи формування функціональних структур із заданими властивостями для спінтроніки, магنونіки та магнітофотоніки на основі магнітних метаматеріалів, з'ясовано картину фізичних процесів, що відбуваються в таких структурах та одержані наступні наукові результати:

1. Показано, що феромагнітний резонанс є потужним методом дослідження фазового розшарування, в тому числі при мартенситному перетворенні.

2. Показано, що в тонких плівках розбавлених феромагнітних сплавів $\text{Ni}_x\text{Cu}_{1-x}$ ($0.7 < x < 0.9$), осаджених методом магнетронного розпилення, спостерігається часткове фазове розшарування за рахунок обмінної взаємодії між іонами нікелю, яке сприяє утворенню кластерів з високою концентрацією нікелю. Це обумовлює суттєву нелінійність залежності температури Кюрі від концентрації. Цей механізм фазового розшарування є досить загальним для двокомпонентних систем, що складаються з магнітних та немагнітних атомів, які без наявності обмінної взаємодії були б повністю однорідними. Сплави NiCu , як і сплави Гейслера, розглядаються в якості кандидатів для створення на їх базі магنونних кристалів з перпендикулярною анізотропією, оскільки лінії феромагнітного резонансу в них досить вузькі.

3. Показано, що в епітаксialьних плівках Гейслерівських сплавів величина перпендикулярної магнітопружної анізотропії завдяки великій магнітострікції може досягати декількох кілоерстед. В залежності від типу підкладки, константа цієї анізотропії може бути як додатною, так і від'ємною.

4. Показано, що на відміну від масивних матеріалів, в плівках з магнітним ефектом пам'яті форми може спостерігатись досить значна зміна об'єму при мартенситному перетворенні (як позитивна, так і негативна). Це призводить до значної відмінності між значеннями констант магнітної анізотропії четвертого порядку в плівках та масивних монокристалах. Продемонстровано, що параметри кристалічної ґратки тонких плівок в мартенситній фазі настільки сильно залежать від умов отримання плівок, що для плівок одного складу на однакових підкладках в залежності від умов їх отримання, константа анізотропії четвертого порядку може відрізнятися не тільки за величиною, але і за знаком.

5. Досліджено зв'язок між нанодвійниковою структурою та магнітними властивостями в Гейслерівських сплавах з ефектом пам'яті форми. Показано, що обмінний зв'язок між субмікронними двійниковими компонентами призводить до модифікації ефективної магнітної анізотропії аналогічно тому, що спостерігається в магнітних багатошарових системах. Показано, що нанодвійникування суттєво впливає на значення ефективної магнітної анізотропії другого порядку і практично не впливає на значення константи анізотропії четвертого порядку.

6. Показано, що нанодвійникування може призводити до формування неколінеарної магнітної структури, якщо розміри двійників співрозмірні з

довжиною обмінної кореляції. Розсіяння електронів на такій структурі обумовлює появу значного від'ємного магнітоопору в широкому діапазоні температур.

7. Вперше продемонстровано можливість формування самоузгодженої періодичної структури на поверхні епітаксialьних плівок NiMnGa , що складається з монокристалічних брусків. Формування такої структури пов'язано з релаксацією напружень, що виникають за рахунок невідповідності параметрів кристалічних ґраток плівки та монокристалічної підкладки.

8. Показано, що наночастинках $\text{Co}_{10}\text{Cu}_{90}$, отриманих методом “мокрої хімії”, як і у випадку гранулярних плівок того ж складу, спостерігається розділення системи CoCu з виділенням гранул Co . Однак, суттєвою відмінністю від гранулярних плівок є те, що відпал наночастинок не призводить до подальшого розшарування системи, а, навпаки, веде до утворення метастабільної фази CoCu з низькою намагніченістю насичення. Відпал при високих температурах дає можливість отримати метастабільні фази, які практично неможливо отримати в масивних матеріалах.

9. Дослідження магнітних та транспортних властивостей багат шарових гранулярних плівок Fe/MgO , осаджених на монокристалічні та аморфні підкладки, показали, що збільшення температури напilenня призводить до поліпшення кристалічної структури та зменшення розмірів наночастинок заліза. Плівки на монокристалічних підкладках MgO є епітаксialьними, в той час як плівки, осаджені на аморфні підкладки, є полікристалічними. І хоча розмір і форма частинок заліза в обох структурах є практично однаковою, магнітоопір для плівок, осаджених на монокристалічні підкладки MgO є значно більшим. Ця відмінність пов'язана з наявністю ефекту спінової фільтрації в епітаксialьних тунельних бар'єрах MgO .

10. Експериментально показано, що відносне зростання ефективного поля анізотропії для тришарових структур $(\text{Co}_{0,74}\text{Si}_{0,26})/\text{Si}/(\text{Co}_{0,74}\text{Si}_{0,26})$ при зменшенні товщини немагнітного прошарку та багат шарових структур $(\text{Co}_{0,74}\text{Si}_{0,26}/\text{Si})_n$ по відношенню до одношарової структури є пропорційним до поля антиферомагнітного обміну між шарами.

11. Експериментально продемонстровано суттєве підсилення анізотропії четвертого порядку для основних резонансних мод у впорядкованих сітках магнітних нанодисків, нанесених на тонку плівку з магнітного матеріалу. Показано, що така динамічна анізотропія виникає за рахунок магнітного зв'язку між дисками та плівкою, а також за рахунок того, що різні моди мають при різних кутах намагніченості різний ступінь індукованої магнітним полем локалізації у потенціальних ямах. Доведено, що, на відміну від дипольно взаємодіючих елементів, в яких анізотропія тим більша, чим менша відстань між елементами, максимальна анізотропія головної моди диску у випадку обмінного зв'язку між дисками через магнітний підшар досягається при середніх відстанях між елементами, коли ця мода вже є суттєво локалізованою, але все ще відчуває вплив локальних статичних полів.

12. Експериментально досліджено виникнення стоячих спінових хвиль в перпендикулярно намагнічених магнітом'яких дисках та при відхиленні намагніченості диску від нормалі. Показано, що порушення аксіальної симетрії призводить до розщеплення спінових мод. При цьому найнижча мода не розщеплюється, друга мода розщеплюється на три рівня, третя – на п'ять і т.д. Профіль кожної моди добре описується комбінацією функцій Бесселя непарного порядку. Показано, що для малих кутів відхилення намагніченості від нормалі, закріплення на краях дисків можна вважати повним., в той час, як для великих кутів відхилення граничні умови суттєво залежать від кута між змінною намагніченістю та границею диску.

13. Досліджено еволюцію спектру феромагнітного резонансу в гексагональній ґратці антидисків в залежності від товщини структури. Показано, що зростання товщини структури призводить до збільшення площинної анізотропії. Також продемонстровано, що резонансний спектр складається з трьох квазіоднорідних резонансних мод, виникнення яких пов'язано з наявністю трьох квазіоднорідних областей в елементарній комірці ґратки антидотів.

14. Розроблено метод отримання кристалічних плівок вісмут заміщеного залізо ітрієвого гранату з великим вмістом вісмуту (до 2,8 атомів на формульну одиницю) з великим значенням фарадеївського обертання на полікристалічних та аморфних підкладках. Кристалізацію шарів з високим вмістом вісмуту було досягнуто за рахунок їх осадження на прошарок з малим вмістом вісмуту, який добре кристалізується на різних підкладках.

15. Було показано, що невідповідність параметрів ґратки між магнітними шарами та підкладкою призводить до формування адаптивних прошарків, що впливають на константи анізотропії високих порядків, однак практично не впливають на одновісну перпендикулярну анізотропію. Магнітні властивості двошарової структури були пояснені в наближенні сильного обміну між магнітними шарами, з урахуванням пружної взаємодії між магнітними шарами та магнітними шарами та підкладкою.

16. Наші експерименти показали, що шари феритів-гранатів з низьким вмістом вісмуту створюють сприйнятливі умови для кристалізації магнітоактивних шарів з високим вмістом вісмуту та утворення в них перпендикулярної намагніченості за рахунок сильної обмінної взаємодії. Продемонстровано також, що магнітні параметри для шарів двошарової структури є аналогічними до параметрів окремих шарів, і ці структури можуть успішно використовуватись для створення магнітофотонних кристалів.

17. На основі розробленої технології створено модуль магнітофотонного кристалу мікрорезонаторного типу. Максимальні значення питомого фарадеївського обертання $\theta_F = -66$ °/мкм і добротності $Q = 8,05$ були отримані для кристалів з двошаровою магнітооптичною плівкою товщини $\lambda/4 + 3\lambda/4$ з кількістю пар шарів в дзеркалах Брега $m=7$. Максимальне значення коефіцієнту підсилення, що було отримано для цих кристалів, становило $t = 44$. Питоме фарадеївське обертання створеної структури є більш ніж у два рази

вищим, а технологія створення таких структур є у декілька разів дешевшою ніж у всіх відомих аналогів оскільки в якості підкладинок та дзеркал Бреґґа не використовувались монокристалічні матеріали.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1*. Gordon E. Moore, “Cramming More Components onto Integrated Circuits,” Electronics, pp. 114–117, (1965).
- 2*. Nikonov D.E., Young I.A., Overview of Beyond-CMOS Devices and a Uniform Methodology for Their Benchmarking, Proc. IEEE 101, 2498 (2013).
- 3*. Anton S.R. and Sodano H.A. (2007) A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006). Smart Materials and Structures, 16, R1-R21.
- 4*. Sackellares J.C., Shiau D., Kammerdiner A.R., and Pardalos P.M. Seizure monitoring and alert system for brain monitoring in an intensive care unit. Computational Neuroscience Optimization and Its Applications, 38 (3), 357, (2010).
- 5*. Sackellares, J. Seizure prediction and monitoring. Epilepsy Behavior, 18 (1-2), 106-109, (2010).
- 6*. Fan B., Du Y., Zhu L., and Tang, Y. The registration of UAV down-looking aerial images to satellite images with image entropy and edges. Intelligent Robotics and Applications, Lecture Notes in Computer Science, 6424, 609-617, (2010).
- 7*. Zaurin R. and Catbas F.N. Integration of computer imaging and sensor data for structural health monitoring of bridges. Smart Materials and Structures, 19, 015019, (2010).
- 8*. Slonczewski J.C. Current-driven excitation of magnetic multilayers. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 159, L1-L7 (1996).
- 9*. Sun J.Z. Spin-current interaction with a monodomain magnetic body: A model study. Physical Reviews B, 62, 570 (2000).
- 10*. Chappert C, Fert A. and Dau, F.N.V. The emergence of spin electronics in data storage. Nature Materials, 6, 813-823 (2007).
- 11*. Kubota H., et al. Quantitative measurement of voltage dependence of spin-transfer torque in MgO-based magnetic tunnel junctions. Nature Physics, 4, 37-41 (2008).
- 12*. Sankey J., Cui Y., Sun J.Z., et al. Measurement of the spin-transfer-torque vector in magnetic tunnel junctions. Nature Physics, 4, 67-71 (2008).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті (фахові видання, **віднесені** до першого і другого квартилів (**Q1** і **Q2**) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports)

1. Chernenko V. A., Golub V., Barandiaran J. M., **Salyuk O.Y.**, Albertini F., Righi L., Fabbri S., Ohtsuka M. Magnetic anisotropies in Ni-Mn-Ga films on MgO(001) substrates. *Applied Physics Letters*. 2010. V. 96. N 4. Article number 042502. *(Особисто дисертантом проведено частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).*
2. Shaposhnikov A.N., Karavainikov A.V., Prokopov A.R., Berzhansky V.N., **Salyuk O.Y.** Bi-substituted iron garnet films for one-dimensional magneto-phonic crystals: synthesis and properties. *Material Research Bulletin*. 2012. V.47, N. 6, P.1407–1411. *(Особисто дисертантом проведено частину магнітних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).*
3. Kravets A.F., Timoshevskii A.N., Yanchitsky B.Z., **Salyuk O.Yu.**, Yablonovskii S.O., Andersson S., Korenivski V. Exchange-induced phase separation in Ni–Cu films, *J. Magn. Magn. Mater.* 2012. V.324, N. 13, P.2131–2135. *(Особисто дисертантом проведено частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).*
4. Nedukh S.V., Tarapov S.I., Belozorov D.P., Kharchenko A.A., Golub V.O., Kilimchuk I.V., **Salyuk O.Y.**, Tartakovskaya E.V., Bunyaev S.A., Kakazei G.N. Standing spin waves in perpendicularly magnetized circular dots at millimeter waves. *Journal of Applied Physics*. 2013. V.113, Article number 17B521. *(Особисто дисертантом проведено частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).*
5. Aseguinolaza I.R., Golub V., Barandiaran J.M., Ohtsuka M., Mullner P., **Salyuk O.Y.**, Chernenko V.A. Martensitic transformation and magnetic anisotropy in Ni-Mn-Ga/NaCl(001) thin films probed by ferromagnetic resonance. *Applied Physics Letters*. 2013. V.102. Article number 182401. *(Особисто дисертантом проведено частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).*
6. Shaposhnikov A.N., Prokopov A.R., Karavainikov A.V., Berzhansky V.N., Mikhailova T.V., Kotov V.A., Balabanov D.E., Sharay I.V., **Salyuk O.Y.**, Vasiliev M., Golub V.O. Modification of Bi:YIG film properties by substrate surface ion pre-treatment. *Material Research Bulletin*. 2014. V.55, P.19–25. *(Особисто дисертантом проведено частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).*
7. L'vov V. A., Golub V., **Salyuk O.**, Barandiarán J. M., Chernenko V. A.

- Transformation volume effect on the magnetic anisotropy of Ni-Mn-Ga thin films. J. Appl. Phys. 2015. V.117. Article number 033901. *(Особисто дисертантом проведено частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).*
8. Vovk A., Golub V., **Salyuk O.**, Krivoruchko V. N. and Marchenko A. I. Evolution of the ferromagnetic resonance spectrum of a hexagonal antidot lattice with film thickness: Experiment and numerical simulations. J. Appl. Phys. 2015. V.117, Article number 073903. *(Особисто дисертантом проведено частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).*
 9. Semuk E.Yu., Berzhansky V.N., Prokopov A.R., Shaposhnikov A.N., Karavainikov A.V., **Salyuk O.Yu.**, Golub V.O. Magnetic properties of epitaxial bismuth ferrite-garnet mono- and bilayers. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2015.V. 394. Article number 60320. *(Дисертант особисто приймав участь у постановці задачі, проводив частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретацію отриманих результатів).*
 10. Bunyaev S. A., Golub V. O., **Salyuk O. Yu.**, Tartakovskaya E. V., Santos N. M., Timopheev A. A., Sobolev N. A., Serga A. A., Chumak A. V., Hillebrands B., Kakazei G. N. Splitting of standing spin-wave modes in circular submicron ferromagnetic dot under axial symmetry violation. Scientific Reports. 2015. V.5. Article number 18480. *(Особисто дисертантом проведено частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).*
 11. Kakazei G.N., Liu X.M., Ding J., Golub V.O., **Salyuk O.Y.**, Verba R.V., Bunyaev S. A., Adeyeye A. O. Large four-fold magnetic anisotropy in two-dimensional modulated $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ films. Applied Physics Letters. 2015. V.107 (23), Article number 232402. *(Особисто дисертантом проведено частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).*
 12. Aseguinolaza I.R., Golub V., **Salyuk O.Y.**, Muntifering B., Knowlton W.B., Müllner P., Barandiarán J.M., Chernenko V.A. Self-patterning of epitaxial Ni-Mn-Ga/MgO(001) thin films. Acta Materialia. 2016. V. 111, P.194-201. *(Дисертант особисто приймав участь у постановці задачі, проводив частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретацію отриманих результатів).*
 13. Berzhansky V.N., Shaposhnikov A.N., Prokopov A.R., Karavainikov A.V., Mikhailova T.V., Lukienko I.N., Kharchenko Yu.N., Golub V.O., Salyuk O.Yu., Belotelov V.I.. One-dimensional magnetophotonic crystals with magneto-optical double layers. 2016. Journal of Experimental and Theoretical Physics, V.123, pages 744–75. *(Дисертант особисто приймав участь у постановці задачі, проводив частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретацію отриманих результатів).*

14. Chernenko V.A., Aseguinolaza I.R., Golub V., **Salyuk O.Y.**, Barandiaran J.M. Magnetic phases in thin films of Ni-Fe(Co)-Ga ferromagnetic shape memory alloy. Journal of Physics D: Applied Physics. 2017.V. 50, N 26, Article number 455006. *(Дисертант особисто приймав участь у постановці задачі, проводив частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретацію отриманих результатів).*
 15. Golub V. O., Chernenko V. A., Apolinario A., Aseguinolaza I. R., Araujo J. P., **Salyuk O.**, Barandiaran J. M., Kakazei G. N. Negative Magnetoresistance in Nanotwinned NiMnGa Epitaxial Films. Scientific Reports. 2018.V. 8, Article number: 15730. *(Особисто дисертантом проведено частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).*
 16. Golub V., L'vov V. A., **Salyuk O.**, Barandiaran J. M., Chernenko V. A. Magnetism of nanotwinned martensite in magnetic shape memory alloys. Topical Review. Journal of Physics: Condensed Matter. 2020. V.32. Article number: 313001. *(Особисто дисертантом проведено систематизацію даних, їх аналіз та інтерпретацію, написання статті).*
- Інші статті** (фахові видання, **не віднесені** до першого і другого квартилів (**Q1 і Q2**) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports)
17. Kakazei G. N, Santos N. M., Quiros C., Velez M., Martin J. I., Alameda J. M., Golub V. O., **Saliuk O. Y.**, Pogorelov, Yu. G., Sousa J. B., Carmo M. C., Sobolev N. A. Magnetic properties of amorphous $\text{Co}_{0.74}\text{Si}_{0.26}/\text{Si}$ multilayers with different numbers of periods. Low Temperature Physics. 2010. V. 36, N 8-9. P. 821-825. *(Особисто дисертантом проведено частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).*
 18. García-García A., Pardo J.A., Štrichovanec P., Magén C., Vovk A., De Teresa J.M., Kakazei G.N., Pogorelov Yu.G., Golub V., **Salyuk O.**, Morellón L., Algarabel P.A., Ibarra M.R. Magnetic properties of epitaxial discontinuous Fe/MgO multilayers. J.Nanosci. Nanotechnol. 2012. V.12, N. 9, P.7505-7509. *(Особисто дисертантом проведено частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).*
 19. García I., Echeberria J., Kakazei G.N., Golub V.O., **Saliuk O.Y.**, Ilyn M., Gusliencko K.Y., González J.M. Evolution of the Magnetic Properties of $\text{Co}_{10}\text{Cu}_{90}$ nanoparticles prepared by wet chemistry with thermal annealing. J. Nanosci. Nanotechnol. 2012. V.12, N. 9, P.7529-7534. *(Особисто дисертантом проведено частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).*
 20. García-García A., Vovk A., Štrichovanec P., Pardo J. A., Golub V., **Salyuk O.**, Algarabel P. A., Ibarra M. R. Morphology, magnetic and resonance properties of Fe/MgO multilayers. Journal of Physics: Conference Series. 2011.V.303, Article number: 012052. *(Особисто дисертантом проведено частину*

магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).

21. Nedukh S., Tarapov S., Belozorov D., Kharchenko Anna, **Salyuk O. Yu.**, Kakazei G. N. Low temperature FMR in the system of non-interacting magnetic nanodisks. Solid State Phenomena. 2012. V.190, P.365-368. *(Особисто дисертантом проведено частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).*
22. Баряхтар В. Г., Шарай И. В., **Салюк О. Ю.**, Голуб В. О., Бержанский В. Н., Каравайников А. В., Михайлова Т. В., Милюкова Е. Т., Прокопов А. Р., Шапошников А. Н., Харченко Н. Ф., Лукиенко И. М., Милославская О. В., Харченко Ю. Н. Наноразмерные структуры одномерных магнитофотонных кристаллов. Монография «Наноразмерные системы и наноматериалы: исследования в Украине». Академперіодика, 2014, Р. 82-87. *(Особисто дисертантом проведено частину магнітних та магніторезонансних досліджень, аналіз та інтерпретація отриманих результатів, написання статті).*

Тези доповідей на конференціях

1. García-García A., Pardo J. A., Štrichovanec P., Magén C., Vovk A., De Teresa J. M., Kakazei G. N., Pogorelov Yu.G., Golub V., Salyuk O., Morellón L., Algarabel P. A., Ibarra M. R. Magnetic properties of epitaxial discontinuous Fe/MgO multilayers. // *Nanospain Conference, 11-13 April 2011. Bilbao (Spain).*
2. García I., Echeberria J., Kakazei G.N., Golub V.O., Saliuk O.Y., Ilyn M., Gusliencko K.Y., González J.M. Evolution of the magnetic properties of Co₁₀Cu₉₀ nanoparticles prepared by wet chemistry with thermal annealing. // *Nanospain Conference -2011, 11-13 April 2011. Bilbao (Spain).*
3. Chernenko V.A., Golub V., Lvov V. A., Salyuk O. Y., Barandiarán J.M. Magnetic anisotropy of ferromagnetic shape memory alloys (Invited) // *5th International Conference "Functional Materials - 2011", October 3 - 8, 2011. Crimea, Ukraine.*
4. Golub V., Lvov V.A., Chernenko V.A., Salyuk O.Yu., Bylo O. Magnetic anisotropy of mesoscale-twinned Ni-Mn-Ga thin films // *I Міжнародна конференція «Актуальні проблеми прикладної фізики», 24 - 28 вересня 2012 року, м Севастополь, Україна.*
5. Nedukh S.V., Tarapov S.I., Belozorov D.P., Kharchenko A.A., Golub V.O., Kilimchuk I.V., Salyuk O.Y., Tartakovskaya E.V., Bunyaev S.A., Kakazei G. N. Standing spin waves in perpendicularly magnetized circular dots at millimeter waves // *12th Joint MMM/Intermag Conference, Yanuary 14-18,2013, Chicago, Illinois, USA.*
6. Salyuk O.Y., Golub V.O., Tartakovskaya E.V., Kakazei G.N., Östman E.3, Hjärvarsson B. Spin-wave spectra of perpendicularly magnetized FePd thin films and circular dot arrays // *XIV Міжнародна конференція з фізики і технології*

тонких плівок і наноструктур, 20-25 травня 2013р., Львів, Буковель, Україна.

7. Berzhansky V.N., Shaposhnikov A.N., Prokopov A.R., Karavainikov A.V., Bar'yakhtar V.G., Sharay I.V., Golub V.O., Salyuk O.Y. Morphology of Bi: YIG Films Crystallized at Different Heating Rates // 7th International Conference ICFM-2013, Crimea, Ukraine.
8. Berzhansky V.N., Karavainikov A.V.1, Prokopov A.R., Shaposhnikov A.N., Mikhailova T.V., Kharchenko Yu.M., Lukienko I.M., Miloslavskaya O.V., Kharchenko M.F., Salyuk O.Y. Microcavity 1D-MPC: Making the Best Structures //7 International Conference ICFM-2013, Crimea, Ukraine.
9. Pardavi-Horvath Martha. Tartakivska Olena, Salyuk Olga. Splitting of spin-wave modes in magnetic nanostructures under axial symmetry violation // American Physical Society APS March Meeting, March 3–7, 2014, Denver, Colorado, USA.
10. Berzhansky V.N., Karavainikov A.V., Milyukova E.T., Prokopov A.R., Shaposhnikov A.N., Sharay I.V., Salyuk O.Y., Golub V.O. Investigations of surface morphology of Bi:YIG films and one-dimensional magneto-photonic crystals on their base // Summer School and International Research and Practice Conference «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO-2014), August 27-30, 2014, Lviv, Ukraine.
11. Golub V., Aseguinolaza I.R., Salyuk O.Y., Mokriy I.O., Müllner P., Barandiarán J.M., Chernenko V.A. Self-patterning of epitaxial Ni-Mn-Ga/MgO (001) thin films // Summer School and International Research and Practice Conference «Nanotechnology and nanomaterials» (NANO-2015), August 26-29, 2015, Lviv, Ukraine.
12. Kakazei, G.N., Liu, X., Ding, J., Golub, V., Salyuk, O., Bunyaev, S., Adeyeye, A. Tuning four-fold magnetic anisotropy in two-dimensional modulated Ni₈₀Fe₂₀ films // 2015 IEEE International Magnetism Conference, INTERMAG 2015; 11 - 15 May 2015, Beijing, China
13. Kosogor A., Chernenko V., Salyuk O., Kakazei G., Golub V.O. Effect of film thickness on twin structure and functional properties of ferromagnetic shape memory alloy epitaxial films / International Workshop on Topological Structures in Ferroic Materials, 2015, Sidney, Australia.
14. Tartakovskaya E.V., Salyuk O.Y., Kakazei G.N., Yanevich O., Golub V.O. Magnetic Dynamics of Fe₂₀Pd₈₀ Thin Films and Circular Dot Arrays // Четверта Міжнародна науково-практична конференція “Нанотехнології та наноматеріали», 24 - 27 серпня 2016 р., Львів, Україна.
15. Golub V.O., Salyuk O., Kakazei G.N., Araujo J.P., Barandiaran J.M., Chernenko V.A. Antiferromagnetic coupling between martensitic twin variants in epitaxial Ni-Mn-Sn-Co film // 62nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, November 6-10, 2017, Pittsburgh, USA.
16. Golub V.O., Salyuk O., Popadiuk D., Kharlan Y. Ferromagnetic resonance in epitaxial films of magnetic shape memory alloys // Міжнародна науково-

практична конференція “Нанотехнології та наноматеріали», 23 - 26 серпня 2017 р., Чернівці, Україна.

17. Golub V., Apolinario A., Aseguinolaza I.R., Kakazei G.N., Araujo J.P., Salyuk O., Barandiaran J.M., Chernenko V.A. Negative Magnetoresistance in Nanotwined NiMnGa Epitaxial Films // Nanomaterials: Application & Properties, 2018 IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties, 9-14 вересня, 2018 року, Затока, Україна.
18. Golub V., L'vov V.A., Salyuk O., Barandiaran J.M., Chernenko V.A. Magnetic properties of nanotwinned magnetic shape memory alloys // International conference “Modern Problems of Solid State and Statistical Physics”, September 14-15, 2020, Kyiv, Ukraine.

АНОТАЦІЯ

Салюк О.Ю. Магнітодинамічні властивості функціональних матеріалів спінтроники та магнітофотоники.— Наукова доповідь. Сукупність наукових статей.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм. – Інститут магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, Київ, 2021.

Дисертація присвячена розробці фізичних принципів створення функціональних магнітних наноматеріалів та структур із заданими властивостями для спінтроники та магнітофотоники, які дозволять зменшити енергозатрати та підвищити швидкість обробки інформації, а також з'ясуванню особливостей фізичних процесів в таких системах.

В роботі проаналізовані магнітні та магнітодинамічні властивості деяких перспективних металевих матеріалів, зокрема, досліджено стимульоване обміном фазове розшарування. Продemonстровано вплив внутрішніх напружень на магнітоанізотропні властивості та формування періодичних наноструктур в сплавах Гейслера. З'ясовано вплив нанодвойнікування на магнітні, магнітодинамічні та магнітотранспортні властивості сплавів з магнітним ефектом пам'яті форми. Проаналізовано магнітні та магнітотранспортні властивості гранулярних і багатошарових структур на основі заліза і кобальту. Розглянуто магнітну динаміку в структурованих магнітних плівках, в тому числі при наявності дипольної та обмінної взаємодії між магнітними елементами. Встановлено механізми формування магнітокрісталічної анізотропії в двошаровій структурі на основі вісмут заміщеного фериту-гранату і проаналізовано вплив магнітних параметрів таких систем на їх магнітооптичні властивості при використанні їх в якості активних елементів одновимірних магнітофотонних кристалів.

Ключові слова: магнітні наноструктури, електронний спіновий резонанс, спінтроніка, магнітофотоніка, магнітна анізотропія, двійникова структура, магнітостатична та обмінна взаємодія.

АННОТАЦИЯ

Салюк О.Ю. Магнитодинамические свойства функциональных материалов спинтроники и магнитофотоники – Научный доклад. Совокупность научных статей.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – магнетизм. – Институт магнетизма Национальной академии наук Украины и Министерства образования и науки Украины, Киев, 2021.

Диссертация посвящена разработке физических принципов создания функциональных магнитных наноматериалов и структур с заданными свойствами для спинтроники и магнитофотоники, которые позволят уменьшить

энергозатраты и повысить скорость обработки информации, а также выяснению особенностей физических процессов в таких системах.

В работе проанализированы магнитные и магнитодинамические свойства некоторых перспективных металлических материалов, в частности, исследовано стимулированное обменом фазовое расслоение. Продемонстрировано влияние внутренних напряжений на магнитоанизотропные свойства и формирование периодических наноструктур в сплавах Гейслера. Выяснено влияние нанодвойникового на магнитные, магнитодинамические и магнитотранспортные свойства сплавов с магнитным эффектом памяти формы. Проанализированы магнитные и магнитотранспортные свойства гранулярных и многослойных структур на основе железа и кобальта. Рассмотрена магнитная динамика в структурированных магнитных пленках, в том числе при наличии дипольного и обменного взаимодействия между магнитными элементами. Установлены механизмы формирования магнитокристаллической анизотропии в двухслойной структуре на основе висмут замещенного феррита-граната и проанализировано влияние магнитных параметров таких систем на их магнитооптические свойства при использовании их в качестве активных элементов одномерных магнитофотонных кристаллов.

Ключевые слова: магнитные наноструктуры, электронный спиновый резонанс, спинтроника, магнитофотоника, магнитная анизотропия, двойниковая структура, магнитостатическое и обменное взаимодействие.

ABSTRACT

Salyuk O.Y. Magnetodynamic properties of functional materials for spintronics and magnetophotonics applications – Scientific report. Collection of scientific manuscripts.

Thesis for a scientific degree of Doctor of Science in Physics and Mathematics, specialty 01.04.11 – Magnetism. – Institute of Magnetism of National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to the development of physical backgrounds for the creation of magnetic nanomaterials and structures with desired properties for spintronics and magnetophotonics applications, which will allow reducing energy consumption and increasing an information processing speed, as well as to figure out the peculiarities of physical processes taking place in such systems.

The possibility of partial phase separation due to the exchange interaction in two-component systems consisting of magnetic and non-magnetic atoms has been shown. The influence of strains arising in epitaxial films of Heusler alloys in austenitic and martensitic state on the second and the forth anisotropy constants has been analyzed. It was also established that relaxation of stresses which arise on film-single crystal interface can result in self-patterning of the epitaxial films. The interrelation between nanotwin structure parameters and magnetic properties of Heusler magnetic shape memory alloys has been studied. It was shown that

nanotwinning can lead to non-collinear magnetic structure formation and electron scattering on such structure results in the appearance of considerable negative magnetoresistance in a wide temperature range. It has been shown experimentally the possibility to get metastable weakly magnetic phases of CoCu system in nanoparticles of this material. The influence of crystalline structure perfection of MgO tunnel junctions on magnetoresistance value in Fe/MgO discontinuous multilayers has been investigated. It has been established that weak antiferromagnetic coupling between magnetic layers in $(\text{Co}_{0.74}\text{Si}_{0.26}/\text{Si})_n$ multilayers results in effective anisotropy modification. It has been experimentally shown and theoretically explained the substantial enlargement of forth order anisotropy for main resonance modes in magnetic dots arrays covered by thin film of magnetic material. The formation of spin wave spectrum formation in perpendicular magnetized soft magnetic dots and when the magnetization is inclined with respect to the disc normal has been investigated and analyzed. The evolution of ferromagnetic resonance spectrum of hexagonal antidots arrays with the system thickness has been studied. The method of a preparation of crystalline films of bismuth substituted iron yttrium garnet with high bismuth content (up to 2.8 atoms per formula unit) having large value of Faraday rotation on polycrystalline and amorphous substrates, which is based on introduction of bismuth substituted iron yttrium garnet with low bismuth content sublayer has been developed. This sublayer provides proper conditions for the crystallization of magnetoactive layer with high bismuth content and a formation of perpendicular magnetization due to the strong exchange interaction between magnetic layers. It has been shown that the mismatch of lattices parameters of magnetic layers and non-magnetic layers (substrate) leads to adaptive interlayers formation, which affect on high order anisotropy constants but do not practically influence on uniaxial perpendicular anisotropy. A module of magnetophotonic ctystals of microresonator type has been created based on the developed technology. The maximal values of specific Faraday rotation $\theta_F = -66^\circ/\mu\text{m}$ and quality factor $Q = 8.05$ have been reached for the crystals with two-layer magneto-optical film of the thickness $\lambda/4 + 3\lambda/4$ and $m=7$ pairs of layers in Bragg mirror. The maximal value of the amplification coefficient was $t = 44$. The specific Faraday rotation was two times higher while the cost of the production of such structure was several times cheaper than for known analogous systems because no single crystals were used for Bragg layers and substrates.

Keywords: magnetic nanostructures, electron spin resonance, spintronics, magnetophotonics, magnetic anisotropy, twin structure, magnetostatic and exchange interaction.