

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

ШАРАЙ Ірина Вікторівна

УДК 537.621; 537.622;
537.623; 537.632; 539.211

**ВПЛИВ СТРУКТУРНИХ НЕОДНОРІДНОСТЕЙ НА ПОВЕРХНІ
МАГНІТНИХ СТРУКТУР НА ЇХ МАГНІТНІ ТА ОПТИЧНІ
ХАРАКТЕРИСТИКИ**

01.04.11 – магнетизм

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
Крупа Микола Миколайович,
ІМаг НАН України та МОН України, головний
науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
Пашенко Олексій Валентинович,
Донецький фізико-технічний інститут
імені О.О. Галкіна НАН України,
провідний науковий співробітник

доктор фізико-математичних наук, професор
Решетняк Сергій Олександрович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського», професор кафедри
загальної та експериментальної фізики

Захист відбудеться « 16 » березня 2017 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.248.01 при Інституті магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України за адресою: 03142, м. Київ, бульвар Вернадського, 36-б, конференц-зал Інституту магнетизму Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України.

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

Автореферат розіслано « 10 » лютого 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої Ради Д 26.248.01
кандидат фізико-математичних наук



Л. Є. Козлова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Дослідження нановимірних структур і матеріалів на сьогодні є одним з найбільш актуальних напрямків наукових досліджень. Теоретичні та експериментальні дослідження в області фізики наноматеріалів дозволили не тільки отримати нові фундаментальні наукові знання, але й створити новий клас матеріалів, які вже сьогодні знайшли широке застосування в мікроелектроніці, системах запису й обробки інформації, в матеріалознавстві, медицині, біології тощо. Особливе місце серед таких наноматеріалів займають магнітні наноматеріали. З'явилися нові області науки і техніки, такі як спінтроніка, магنونіка і магнітофотоніка. Магнітні наночастинки широко використовуються у різних наукоємних технологіях, наприклад при очищенні води, біологічних і технічних рідин для виділення рідкісноземельних і радіоактивних елементів. Розвиток технології отримання магнітних наночастинок дозволив започаткувати новий напрям у медицині і біології, таких як адресна доставка ліків, магнітна гіпотермія, магнітна терапія тощо.

Фізичні і хімічні властивості наноструктурованих систем багато в чому відрізняються від характеристик добре відомих монокристалічних і полікристалічних матеріалів. Суттєву роль у формуванні фізичних властивостей нанорозмірних об'єктів відіграє їх поверхня. При переході у наноструктурований стан відбувається зміна фізичних властивостей речовини, модифікується структура поверхневого шару, також можуть сильно змінюватись електричні, оптичні та магнітні характеристики речовини.

Все це обумовлює потребу в більш глибокому аналізі фізичних моделей і проведенні експериментальних досліджень характеристик і властивостей наноструктур. Ступінь неоднорідностей таких матеріалів, а також характер розподілу їх по поверхні, є важливими факторами, що впливають на параметри і надійність роботи пристроїв на їх основі.

Тому результати дисертаційної роботи щодо впливу структурних неоднорідностей на магнітні, магнітооптичні та електричні характеристики тонкоплівкових та дрібнодисперсних матеріалів мають велике значення для практичного застосування в галузі мікроелектроніки, біології та медицині.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відділі фізики мезо- та нанокристалічних магнітних структур Інституту магнетизму НАН України та МОН України в співпраці з ФТІН ім. Б.І. Веркіна та Таврійським національним університетом ім. Вернадського у рамках наступних науково-технічних та науково-дослідних робіт в рамках державних бюджетних програм: «Ефекти післядії і вплив електромагнітного поля на структурні і транспортні характеристики функціональних елементів наноелектроніки» (номер держреєстрації 0112U001914), «Розробка методики вимірювання геометричних, магнітних і

електричних характеристик нанобульбашок, які формуються в слабких електролітних парамагнітних розчинах» (номер держреєстрації 0114U00877), «Установка для вимірювання геометричних розмірів і магнітної сприйнятливості магнітних наночасток» (номер держреєстрації 0109U004877), «Розробка та дослідження нанорозмірних структур одновимірних магнітофотонних кристалів» (номер держреєстрації 0113U001198). Робота також фінансувалась в рамках проекту Українського науково-технічного центру №1575 «Розробка та оптимізація технології отримання магнітожорстких та магнітом'яких матеріалів для магнітопластів».

Мета і задачі досліджень. Метою досліджень є встановлення механізмів впливу неоднорідностей структури і складу на магнітні та оптичні параметри тонкоплівкових і високодисперсних матеріалів, а також розробка рекомендацій щодо застосування цих матеріалів у якості активних елементів оптичних і магнітооптичних пристроїв.

Для досягнення мети роботи були вирішені наступні завдання:

- встановлення основних механізмів впливу іонної обробки поверхні підкладинок на магнітні і магнітооптичні властивості ультратонких шарів вісмутного ферит-гранату, які є активними шарами магнітофотонних кристалів;
- дослідження і встановлення закономірностей впливу неоднорідностей структури поверхні на магнітні властивості плівок пермалою;
- вивчення ефективності взаємодії лазерного опромінення з цими неоднорідностями з метою поліпшення магнітних властивостей плівок для подальшого отримання двовимірних просторово періодичних магнітних структур на їх основі;
- вивчення впливу постійного магнітного поля на процеси височастотного розігріву наночастинок ферімагнітних шинелей, а також на їх височастотну магнітну сприйнятливість.

Об'єкти дослідження – тонкі плівки вісмут заміщених ферит-гранатів, одновимірні магнітофотонні кристали, плівки $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$, наночастинок ферімагнітних шинелей (Fe_3O_4 і NiFe_2O_4).

Предмет дослідження – ефекти впливу іонної обробки поверхні підкладинок на магнітні і магнітооптичні властивості ультратонких шарів магнітних плівок вісмутних ферит-гранатів та одновимірних магнітофотонних кристалів на їх основі; взаємодія лазерного опромінення з неоднорідностями структури плівок пермалою та її вплив на магнітні властивості плівок; вплив неоднорідностей структури і складу на магнітні та оптичні параметри тонкоплівкових і дрібнодисперсних матеріалів.

Методи дослідження. Основними методами дослідження властивостей тонких плівок вісмутних ферит-гранатів та одновимірних магнітофотонних кристалів на їх основі є методи магнітооптики, оптичної спектроскопії, рентгенографії та атомно-силової мікроскопії. Основними методами

вимірювання структури поверхні плівок та геометричних розмірів наночастинок є методи атомно-силової та растрової мікроскопії.

Наукова новизна одержаних результатів. На основі експериментальних досліджень та модельних розрахунків у дисертаційній роботі були отримані наукові результати, які уточнюють і розширюють знання про магнітні властивості магнітних багатшарових наноструктур, про особливості взаємодії електромагнітного випромінювання з магнітними плівками і наночастинками, а саме:

- Вперше встановлено, що з допомогою іонної обробки підкладинок в технології отримання ультратонких шарів вісмут заміщених ферит-гранатів дозволяє сформувати перехідний шару на границі підкладинка-плівка з плавною зміною складу, що дозволяє керувати величиною магнітооптичного ефекту в таких плівках.

- Визначені оптимальні режими для різних методів обробки поверхні підкладинок і розроблено новий спосіб отримання плівок вісмут заміщених феритів-гранатів із заданою шорсткістю поверхні, на основі якого виготовлені експериментальні зразки магнітофотонних кристалів з рекордними магнітооптичними характеристиками: величина питомого обертання за рахунок ефекту Фарадея $\theta_F = -66^\circ/\text{мкм}$, при максимальному значенні коефіцієнта пропускання $k_t = 44$.

- Вперше показано, що при опроміненні поверхні потужними наносекундними лазерними імпульсами, можна отримати значне зменшення шорсткості поверхні полікристалічних плівок $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$, а також отримати суттєве покращення їх магнітних характеристик, а саме збільшити в два-три рази величину магнітної сприйнятливості і майже на порядок зменшити коерцитивну силу плівок. Встановлено, що зміна магнітних характеристик полікристалічних плівок $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ обумовлена процесом рекристалізації і збільшенням в десятки разів поперечних розмірів нанокристалітів плівки в області опромінення лазерними імпульсами, і показано, що ефективність такого процесу зростає зі збільшенням енергії кванта лазерного випромінювання.

В якості основного механізму зменшення шорсткості поверхні запропоновано розглядати збудження в полі лазерного випромінювання локальних плазмонів на голчастих неоднорідностях поверхні.

- Вперше розроблено метод керування високочастотною магнітною сприйнятливостю магнітних наночастинок за допомогою зовнішнього постійного магнітного поля для їх розігріву змінним магнітним полем. На прикладі наночастинок NiFe_2O_4 та Fe_3O_4 показано, що варіюючи величину і напрямок постійного магнітного поля, значення магнітної сприйнятливості можна змінювати в десятки разів.

- Вперше на базі тонких аморфних стрічок $\text{CoFeMo}(\text{Ni})\text{SiB}$ і $\text{CoFeCr}(\text{Mo})\text{SiB}$ створені високочутливі малогабаритні ферозондові датчики

магнітного поля з параметричним посиленням сигналів, на основі явища нелінійної залежності магнітної проникності від магнітного поля.

- Запропоновано методи створення високоградієнтних магнітних полів із заданою конфігурацією за допомогою структурованих підкладінок із магнітом'яких матеріалів (пермалой, ферум-кобальт-бор) для застосування в біології та медицині.

Практичне значення одержаних в роботі результатів полягає у наступному:

- за результатами досліджень розроблено новий спосіб отримання плівок вісмут заміщених ферит-гранатів із заданою шорсткістю поверхні (Патент України на корисну модель № 87156), що є перспективним для використання в технології виготовлення наноплівкових матеріалів із заданими властивостями;

- на підставі структурованих підкладінок із магнітом'яких матеріалів запропоновані методи створення високоградієнтних магнітних полів із заданою конфігурацією, які можуть бути використані в біології та медицині;

- результати розробки принципів і схеми побудови ферозондових датчиків магнітного поля на основі параметричного підсилення магнітних сигналів за рахунок сильної нелінійної залежності магнітної проникливості від магнітного поля, дозволили виготовити експериментальні зразки високочутливих малогабаритних ферозондових датчиків на основі тонкої аморфної фольги $\text{CoFeMo}(\text{Ni})\text{SiB}$ і $\text{CoFeCr}(\text{Mo})\text{SiB}$ з високим порогом чутливості $H_p \ll 1$ нТл;

- способи модифікації поверхні плівок NiFe і підвищенні їх магнітної сприйнятливості та зменшення коерцитивної сили під дією лазерних імпульсів, можуть використовуватися в технології обробки матеріалів і технології отримання магнітних плівок;

- результати по впливу постійного магнітного поля на величину високочастотної магнітної сприйнятливості наночасток повинні враховуватись при розігріві магнітних наночасток і є практично важливими для застосування в нанобіотехнології та медицині.

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному пошуку та аналізі літературних даних за темою дисертаційної роботи, також була ініціатором при постановці ряду задач дисертаційної роботи. Здобувачем були розроблені основні принципи і методи досліджень, провела обробку отриманих експериментальних даних і активно працювала над аналізом отриманих результатів досліджень. Автором проведено розробку структури дисертаційної роботи, побудова моделей і формулювання основних висновків роботи.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на міжнародних і всеукраїнських конференціях:

- International Conference Functional Materials ICFM'2011 (October 3-8, 2011,

Simferopol, Crimea).

- IV Международная научная конференция «Функциональная база нанoeлектроники» (30 сентября-3 октября, 2011, Кацивели, Крым).
- XIV Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (17-22 сентября, 2012, Алушта, Крым).
- V Международная научная конференция «Функциональная база нанoeлектроники» (30 сентября – 5 октября, 2012, Кацивели, Крым).
- XIV Межд. конференція «Фізика і технологія тонких плівок та наносистем» (20-25 травня, 2013, Івано-Франковськ, Україна).
- International Conference Functional Materials ICFM'2013 (September 29-October 5, 2013, Simferopol, Crimea).
- 2nd International research and practice Conference «Nanotechnology and Nanomaterials» (27– 30 August, 2014, Lviv, Ukraine).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 7 наукових статтях у провідних фахових журналах з переліку ВАК України, що входять до наукометричних баз даних: «Materials Research Bulletin», «Успехи физики металлов», «Solid State Phenomena», «American Journal of Bioscience and Bioengineering», «Наноразмерные системы и наноматериалы исследования в Украине», «Functional Materials», а також у 12 публікаціях конференцій та отримані 2 патенти України.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи складає 169 сторінок. Робота містить 95 рисунків. Список використаних джерел складається із 142 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета, представлені завдання та методи досліджень, що використовувалися в роботі. Показано зв'язок роботи із науковою тематикою інституту. Сформульована наукова новизна і практичне значення отриманих результатів. Наведена інформація про апробацію отриманих наукових досліджень і кількість наукових робіт, особистий внесок здобувача і структуру та об'єм дисертаційної роботи.

У **першому** розділі «Дослідження структурних, магнітних та магнітоелектричних характеристик шаруватих структур вісмутових феритівгранатів та одновимірних магнітофотонних кристалів на їх основі» представлені результати експериментальних досліджень по впливу режимів різних методів обробки поверхні підкладинок на магнітооптичні характеристики плівок вісмут заміщених ферит-гранатів, та можливості побудови на їх основі ефективних магнітофотонних кристалів (МФК).

Магнітофотоний кристал являє собою штучно створену періодичну структуру – дзеркала Бреґґа, між якими розташований активний шар з магнітного матеріалу. Тобто фактично це – фотонний кристал з магнітооптичним дефектом, в забороненій зоні якого виникає зона пропускання. Тому в залежності від магнітних і електричних властивостей матеріалів, з яких виготовлений магнітофотоний кристал – довжиною хвилі світла, що пропускається, можна керувати за допомогою електричних або магнітних полів.

У сучасних системах мікроелектроніки найчастіше використовуються елементи, принцип роботи яких заснований на ефектах обертання площини поляризації (ефекти Фарадея і Керра). В одновимірних магнітофотонних кристалах за рахунок багаторазового відбиття всередині активного шару, розташованого між брегівськими дзеркалами, відбувається істотне посилення магнітооптичних ефектів. В якості активного елементу МФК як правило використовуються вісмут заміщені ферит-гранати, й чим більше вміст вісмуту, тим більшим є магнітооптичний ефект. Брегівські дзеркала як правило виготовляють з аморфних матеріалів, а на аморфних матеріалах вісмут заміщені ферит-гранати з великим вмістом вісмуту не кристалізуються.

$\text{Bi}_{2.8}\text{Y}_{0.2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$
$\text{Bi}_{1.0}\text{Y}_{0.5}\text{Gd}_{1.5}\text{Fe}_{4.2}\text{Al}_{0.8}\text{O}_{12}$
$\text{SiO}_2 \text{ or } \text{TiO}_2$

Рис. 1. Схематичне зображення структури одновимірного МФК.

Тому в рамках спільної роботи з Таврійським Університетом і Харківським фізико-технічним інститутом низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України була висунута і проведена експериментальна перевірка наступної ідеї – використовувати в якості буферного шар з малим вмістом вісмуту (не більше 1 атома на структурну

одиницю), який добре кристалізується на аморфних підкладках, а на ньому вже формувати активний шар з великим вмістом вісмуту.

Для реалізації поставленої задачі необхідно було дослідити фізичні характеристики перехідних областей та їх вплив на магнітні та магнітооптичні властивості активних шарів магнітофотонних кристалів.

Як правило поверхня підкладки є неоднорідною, що впливає на процес кристалізації плівок. Характерний розмір шорсткості підкладки повинен бути набагато меншим за довжину хвилі випромінювання, яке використовується. Для зменшення шорсткості проводиться обробка поверхні іонними пучками. Було необхідним встановлення оптимальних режимів іонного травлення, які б з одного боку, забезпечили б задану шорсткість поверхні і при цьому не сильно спотворювали кристалічну ґратку, що приводить до створення ще більш дефектної структури. Для контролю шорсткості поверхні підкладки і якості осаджених шарів використовувався метод атомної силової мікроскопії.

Попередня обробка поверхонь підкладок гадоліній-галієвого гранату (прозорого у видимій частині спектру) плазмою Ag^+ з достатньо високою енергією (1 кеВ та 4 кеВ) призводила до аморфізації і руйнування поверхні підкладки, а також до появи оксидів Ga та Gd. При осадженні магнітної плівки на таку підкладку між плівкою і підкладкою формується перехідний аморфний шар. Цей шар містить елементи як підкладки так і плівки. Було встановлено, що підкладки, попередньо оброблені низькоенергетичною (50 - 100 еВ) плазмою аргону, мали значно меншу шорсткість, ніж плівки, осаджені на підкладки, оброблені іонним пучком з енергією вище 1 кеВ. АСМ - фотографії поверхні підкладки, попередньо обробленої іонами аргону з енергією 100 еВ і 1 кеВ (А- і В-плівки, відповідно).

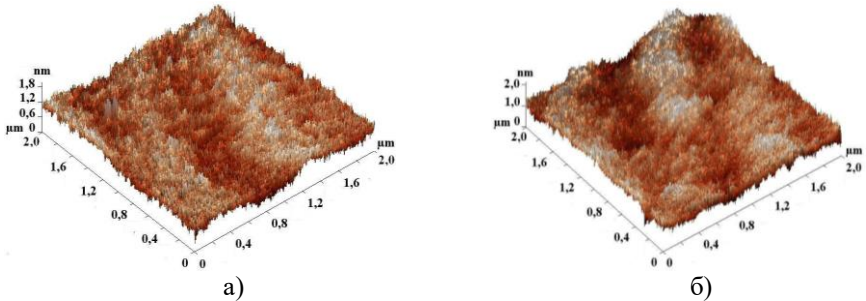


Рис. 2. АСМ фотографії поверхонь підкладок гадоліній-галієвого гранату, оброблених іонами Ag^+ з енергією 100 еВ (а) та 1 кеВ (б).

Щільність кристалітів в плівках, оброблених низько енергетичними іонами 0,1 кеВ, була значно вищою, ніж в плівках після обробки 1 кеВ. Середній розмір кристалітів в них не перевищував 100 нм, середня шорсткість становила 2 нм. У В-плівках середній розмір кристалітів склав близько 240 нм, середня шорсткість досягала 9 нм. Коефіцієнт пропускання плівок А був приблизно на 10% вище, ніж В-плівок, однак питоме фарадеевське обертання обох плівок було приблизно однаковим, наведені на рис.3.

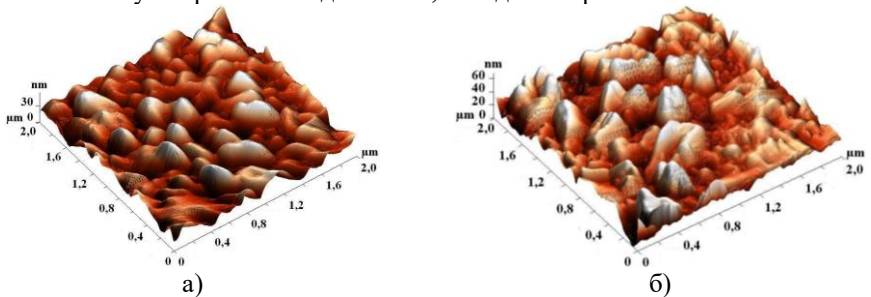


Рис. 3. АСМ фотографії поверхонь кристалізованих А- і В- плівок (а) і (б) товщиною 112 нм.

Різниця в ступені шорсткості плівок, яка спостерігалась в експерименті, пояснюється тим, що при обробці поверхні підкладки за допомогою низько енергетичних іонів основним механізмом формування плівок вісмут заміщеного фериту гранату є епітаксціальний ріст (на всій поверхні плівки), в той час як при опроміненні іонами з більш високими енергіями основним механізмом стає селективне зародкоутворення, тобто зростання на виділених (переважних) центрах кристалізації.

Дослідженням перехідного шару між плівкою і підкладкою була присвячена наступна частина роботи. Для цього на оброблену підкладку осаджувались плівки різної товщини, а їх оптичні і магнітні властивості досліджувалися методом магнітооптичного ефекту Керра - вимірювання петель гістерезису (залежності кута повороту площини поляризації від магнітного поля).

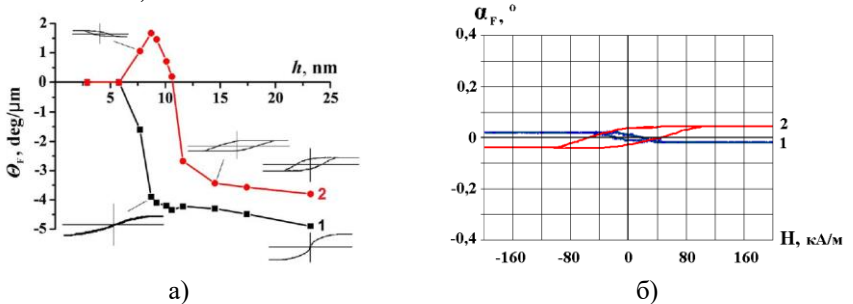


Рис. 4. (а) Залежність θ_F від товщини плівок $\text{Bi}_{2.8}\text{Y}_{0.2}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$, осаджених на підкладки, попередньо оброблені низькоенергетичною плазмою Ag^+ (А-плівки, крива 1) і іонами Ag^+ з енергією 1 кеВ при щільності струму $2,5 \text{ мА/см}^2$ (В-плівки, крива 2) і (б) - магнітооптична петля гістерезису плівок товщиною 8,4 нм (крива 1) і 14 нм (крива 2).

Для перехідного шару, що виникає при обробці поверхні підкладки високоенергетичною плазмою, характерна зворотна петля гістерезису - це відбувається за рахунок проникнення іонів Ga^{3+} і Gd^{3+} з підкладки галій-гадолінійового гранату в плівку, що призводить до зміни магнітооптичних властивостей, зміни точок компенсації, величини (а в деяких випадках і знаку) фарадєївського обертання. Аналогічні процеси відбуваються при використанні підкладок з оксидів титану і кремнію. Дослідження залежності магнітооптичних властивостей від товщини плівки дозволяє встановити товщину перехідного шару. Для всіх зразків ця товщина не перевищує 10 нм.

У випадку використання низькоенергетичної плазми для обробки поверхні не відбувається руйнування поверхневого шару підкладки, дифузія іонів з підкладки практично відсутня, тому товщина перехідного шару у таких плівках мінімальна. Зміна магнітооптичних властивостей в тонких плівках пов'язано головним чином з тим, що за рахунок розбіжності

параметрів ґраток підкладки та магнітної плівки, магнітні плівки є сильно структурно неупорядкованими (аморфними або дрібнокристалічними).

При збільшенні товщини магнітної плівки відбувається зміна знаку фарадєвського обертання, і при товщині плівки більше 20 нм, магнітооптичні параметри плівки стають близькими до параметрів масивних кристалів вісмутного фериту-гранату. Це пов'язано зі зменшенням впливу перехідного шару на магнітні і магнітооптичні властивості плівки, а також з релаксацією напруг і поліпшенням кристалічної структури зразка в порівнянні з тонкими плівками. Було показано, що при товщині активних шарів магнітофотонних кристалів близько 100 нм, зміною їх магнітооптичних характеристик за рахунок наявності перехідного шару можна знехтувати.

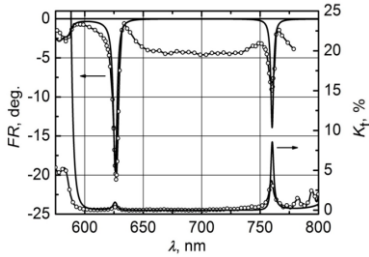


Рис.5. Експериментальні (лінія та символи) та розрахункові (лінія) спектри коефіцієнта пропускання K_t та кута FR θ_F одновимірного МФК.

В результаті проведених комплексних досліджень по відпрацюванню технології отримання магнітоактивних шарів та дослідженню їх структурних, магнітних та магнітооптичних характеристик, які виконувались спільно ІМаг, ТНУ та ФТІНТ були виготовлені та запатентовані магнітофотонні кристали з рекордними на даний момент магнітооптичними характеристиками: питоме фарадєвське обертання $\theta_F = -66^\circ/\text{мкм}$, максимальне значення коефіцієнту пропускання $k_t = 44$.

У другому розділі «Модифікація наноструктур і зміна магнітних властивостей плівок $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ за допомогою лазерного випромінювання» представлені результати досліджень особливостей взаємодії наносекндних лазерних імпульсів з полікристалічною плівкою пермалою і впливу структурних нанонеоднорідностей такої плівки на її магнітні властивості.

Просторові неоднорідності тонкопліткових та дрібнодисперсних низькорозмірних структур обумовлені, як недосконалістю поверхні підкладок, так і недосконалістю технології виготовлення плівок. Вплив нанонеоднорідностей на магнітні характеристики таких плівок впливає на гранично досяжні параметри і надійність роботи електронних елементів побудованих на їх основі. Характер взаємодії полікристалічних плівок з електромагнітним полем, як і їх магнітні характеристики, суттєво залежать від структури та властивостей поверхні. Для покращення магнітних характеристик полікристалічних плівок пермалою, як правило, використовують відпал. Проте, довготривалий відпал плівок приводить до збільшення шорсткості її поверхні.

Нами було встановлено, що використовуючи наносекундні лазерні імпульси з енергією значно меншою від енергії руйнування плівки, можна отримати значне зменшення шорсткості поверхні плівок пермалою. При цьому відбувається нагрів плівки до температури нижчої температури її плавлення. На рисунку 6 наведені результати досліджень впливу лазерних імпульсів на поверхню полікристалічних плівок $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$, отримані за допомогою скануючої електронної мікроскопії (СЕМ).

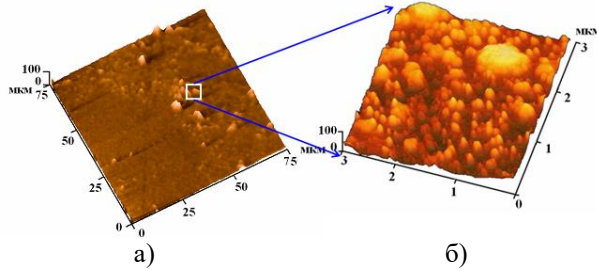


Рис. 6. Результати вимірювання шорсткості поверхні плівки $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ після опромінення поверхні імпульсами неодимового лазера ($\tau=15\text{нс}$ та $\lambda=335\text{нм}$): (а) – СЕМ зображення неопроміненої (верхня) та опроміненої (нижня) ділянки поверхні; (б) – збільшена неопромінена ділянка поверхні.

Детальні дослідження взаємодії наносекундних лазерних імпульсів з полікристалічними плівками $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ показали, що під дією навіть одного імпульсу лазерного випромінювання, суттєво змінюються їх магнітні характеристики: збільшується більш ніж вдвічі магнітна сприйнятливість і майже на порядок зменшується величина коерцитивної сили в плівці.

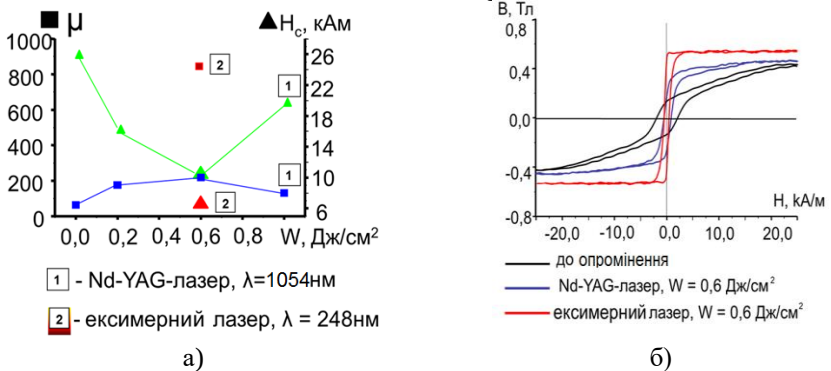


Рис. 7. Результати вимірювання магнітних характеристик μ та H_c плівки $\text{Ni}_{19}\text{Fe}_{81}$ товщиною 500 нм після опромінення наносекундними лазерними імпульсами: 1 – неодимовий лазер та 2 – ексимерний лазер (а); зміна форми петлі гістерезису плівки до та після опромінення (б).

При цьому значно змінюється і форма петлі перемагнічування, вона стає прямокутною і зменшується величина гістерезису. При обробці поверхні зразка наносекундним лазерним імпульсом з енергією (близькою до енергії руйнування) магнітні характеристики плівок $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ погіршуються. Цей факт може пояснюватись окисленням плівки та впливом термонапруження.

Нами був виявлений факт сильної залежності величини зміни магнітних характеристик полікристалічними плівками $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ від довжини хвилі, тобто від енергії кванта лазерного випромінювання. При однаковій потужності та тривалості імпульсу випромінювання магнітні характеристики плівки після дії короткохвильового імпульсу ексімерного лазера з довжиною хвилі $\lambda=248$ нм плівки змінюються набагато більше, ніж після дії імпульсу неодимового лазера з довжиною хвилі $\lambda=1054$ нм.

Після опромінення плівки потужним імпульсом ексімерного лазера, спостерігається значна зміна в структурі приповерхневого шару плівки в зоні опромінення (рис.8). Збільшується майже на порядок розмір нанокристалітів в плівці, причому глибина зміни досягає до 250 нм, що добре узгоджується з

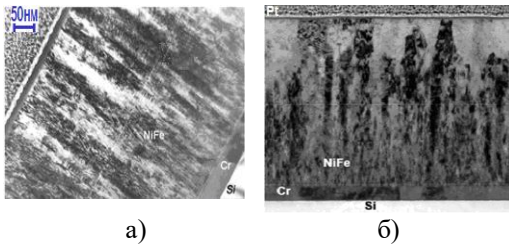


Рис. 8. Переріз плівки по товщині: плівка до опромінення (а) та після опромінення (б) ексімерним лазером.

глибиною проникнення лазерного випромінювання в плівку. Під дією лазерного імпульсу з такою ж енергією, але з довжиною хвилі $\lambda=1054$ нм, енергія кванта якого в декілька разів менша, а коефіцієнт поглинання майже на порядок більший, а відповідно глибина проникнення в плівку $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ майже на порядок менша, тому зміни поперечного розміру нанокристалітів у приповерхневому шарі слабо

виражені. Отримані результати показують, що при опроміненні плівок $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ короткими лазерними імпульсами, які викликають зміни в їх структурі та магнітних характеристиках, суттєву роль відіграють нетеплові процеси. Окрім нагріву, лазерне випромінювання сильно іонізує атоми плівки в зоні проникнення, що стимулює рекристалізацію, яка і викликає зростання розмірів нанокристалітів і покращення магнітних характеристик плівки.

В якості механізму, який викликає зменшення шорсткості плівки, була висунута гіпотеза про збудження електромагнітною хвилею локалізованих плазмонів на голкоподібних нанонеоднорідностях поверхні плівки. При співпаданні частоти зовнішнього поля з частотою локалізованого поверхневого плазмону виникає резонанс, що приводить до підсилення поля і сильного поглинання випромінювання на поверхні нанонеоднорідностей [1, 2].

Однак, для перевірки цієї гіпотези потрібні додаткові експериментальні і теоретичні дослідження.

Результати наших досліджень з модифікації структури і фізичних характеристик плівок $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ лазерним випромінюванням дозволяє зробити висновок, що використовуючи лазерне випромінювання можна формувати задану просторову структуру магнітних наностріпків на великій площі.

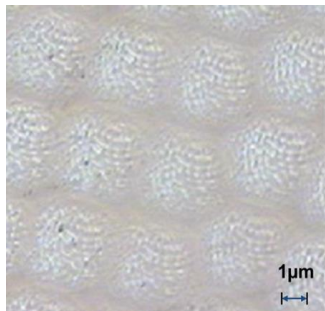


Рис. 9. Структура поверхні плівки $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ після опромінення лазерними імпульсами неодимового лазера.

Практична реалізація процесу формування регулярного розподілу нанокристалів (наностріпків) однакового розміру проводилася за допомогою випромінювання неодимового лазера на спеціальній станції розмітки. На рисунку представлена картина, яка виникає під дією одного наносекундного імпульсу з однорідним (гаусовським) розподілом в поперечному перерізі гранатового лазера з потужним випромінюванням $\lambda=355$ нм на порозі руйнування. Лазерне випромінювання розщеплювалося на два ортогонально поляризовані пучки і модулювалося акустооптичними модуляторами, фокусування лазерного випромінювання здійснювалося

мікрооб'єктивом з апертурою 0,65. Після кожного імпульсу плівка переміщувалась із заданим кроком. Отримана просторово-періодична магнітна структура представлена на рис.9. Швидше за все, така структура утворюється при рекристалізації.

У **третьому** розділі «Вплив постійного магнітного поля на високочастотні магнітні і магнітооптичні характеристики наночастинок NiFe_2O_3 і Fe_3O_4 » досліджувались наночастинок магнітних оксидів заліза (магеміт – NiFe_2O_3 та магнетит – Fe_3O_4), застосовування яких в багатьох областях науки, в тому числі в медицині, привертає все більше уваги. Для ефективного керування переміщенням наночастинок та їх локалізації у певних областях, необхідно створювати наночастинок із заданими магнітними та структурними характеристиками. На магнітні властивості наночастинок суттєво впливають їх форма та розміри. Для цього методами атомно-силової мікроскопії були встановлені геометричні розміри для наночастинок Fe_3O_4 – 20-100 нм з максимальною густиною функції розподілу в околі 20-40 нм, для наночастинок NiFe_2O_3 – 30-150 нм з максимальною густиною функції розподілу в околі 40-60 нм.

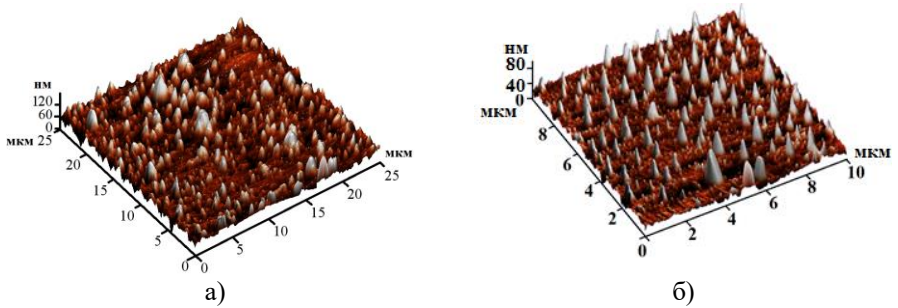


Рис. 10. ACM 3d-зображення магнітних наночастинок NiFe_2O_4 (а) та Fe_3O_4 (б).

Були проведені дослідження впливу постійного магнітного поля на високочастотну магнітну сприйнятливості магнітних наночастинок Fe_3O_4 та NiFe_2O_4 . Важливість таких досліджень обумовлена тим, що дані магнітні частинки використовуються в медицині для адресної доставки ліків та для гіпотермії (локального розігріву). Порівняно із здоровими, ракові клітини мають підвищену чутливість до тепла, нагрівання до $42\div 45^\circ\text{C}$ руйнує їх, але необхідно контролювати нагрів, щоб уникнути руйнування здорової тканини. Відомо, що ефективність розігріву залежить від величини магнітної сприйнятливості і пропорційна квадрату магнітної індукції змінного магнітного поля. З іншої сторони для локалізації магнітних наночастинок з ліками в районі хворого органу використовують локальне постійне поле, внесок у розігрів якого не враховують при розрахунку.

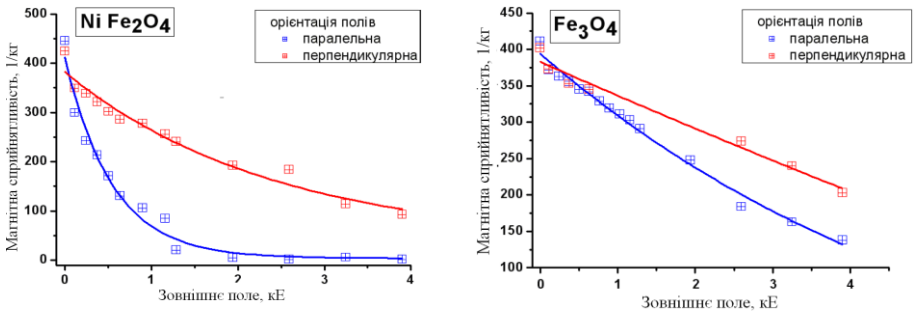


Рис. 11. Результати вимірювання магнітної сприйнятливості наночастинок NiFe_2O_4 та Fe_3O_4 залежно від напрямку та напруженості прикладеного постійного магнітного поля.

Проведені вимірювання показали, що в зовнішньому сильному $H = 5\text{-}10$ кЕ постійному магнітному полі величина магнітної сприйнятливості χ

наночастинок змінюється, причому коли напрям постійного магнітного поля співпадає з напрямом змінного високочастотного поля величина χ зростає, коли напрям постійного магнітного поля перпендикулярний до напрямку змінного вимірювального поля величина χ зменшується.

Така поведінка магнітної сприйнятливості в постійному зовнішньому магнітному полі свідчить про те, що на характеристики впливає магнітна взаємодія між частинками. Цей вплив можливо пов'язаний з об'ємним розподілом та неоднорідністю магнітної структури наночастинок, а також хаотичною орієнтацією осей легкої намагніченості. Зовнішнє магнітне поле впливає на магнітний порядок та впорядковує магнітні моменти наночастинок як за рахунок намагнічування наночастинок, так й за рахунок повороту магнітних моментів в одному напрямку. При чому величина такої зміни залежить від коерцитивної сили наночастинок а також від орієнтації постійного і змінного магнітного поля. Цей вплив пов'язаний з різницею величини поздовжнього і поперечного коефіцієнтах релаксації магнітного моменту.

Отримані результати необхідно враховувати при застосуванні в медицині при розігріві магнітних наночастинок змінним магнітним полем.

У **четвертому** розділі «Розробка концентраторів і датчиків магнітного поля» наведені декілька прикладів практичного застосування модифікації поверхневого шару для створення градієнтних полів із заданою конфігурацією для застосування у біотехнології та медицині.

Створення таких джерел градієнтних магнітних полів (концентраторів магнітного поля) потрібно, наприклад, для управління наночастинками за допомогою магнітного поля. В якості такого джерела магнітного поля можна застосовувати потужні постійні магніти або магнітопласти на їх основі. У якості концентраторів можна використовувати плівки з магнітом'якого матеріалу із заданим рельєфом поверхні.

В рамках роботи, що виконувалась спільно з ННУ «ХФТІ», були проведені розрахунки для створення оптимальної конфігурації магнітних полів для декількох типів просторово-періодичних магнітних структур, з метою досягнення максимальних значень локальних градієнтів і максимального значення середнього по поверхні градієнта магнітного поля. На підставі проведених розрахунків були виготовлені зразки концентраторів магнітного поля. Як джерела використовувалися постійні магніти NdFeB і магнітопласти на їх основі. У якості концентраторів - плівки, з нанесеними на їх поверхню сітки магнітних елементів з магнітом'яких матеріалів (пермалой, ферум-кобальт-бор).

Після обробки отриманих зображень (рис.12) встановлено геометричні розміри виступів на поверхні зразка: діаметр виступу $d=40$ мкм, відстань між сусідніми виступами $a=80$ мкм, висота виступу $h=2$ мкм.

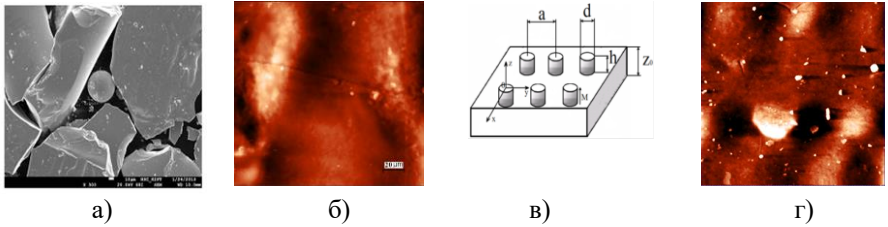


Рис. 12. Зображення поверхні підкладки, отримані за допомогою РЕМ (а) та АСМ (б), модель рельєфу (в) та АСМ зображення (г) просторово-періодичних магнітних структур.

Розподіл магнітного поля у просторі над плівкою досліджувався різними методами, зокрема методом магніто-силової мікроскопії (МСМ), а також вимірюванням магнітного поля традиційними методами за допомогою датчику Холла. Порівняння зображень АСМ та МСМ свідчить про те, що розподіл магнітного потенціалу задається геометрією поверхні зразка. В результаті вдалося отримати експериментальні значення магнітних полів і розподіл градієнтів, близьких до розрахункових.

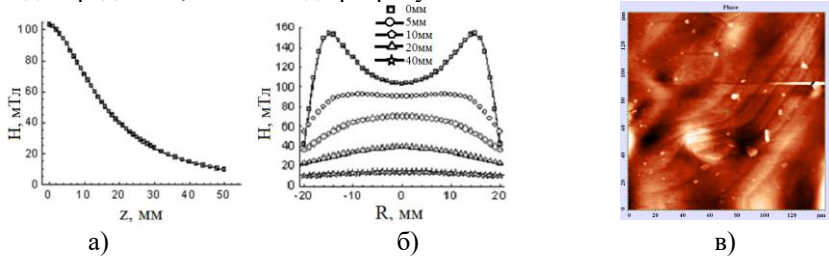


Рис. 13. Розподіл магнітного поля в залежності від висоти над підкладкою (а) та над одним елементом сітки (б); МСМ зображення розподілу магнітного поля у просторі над плівкою на відстані 3мкм (в).

Для вимірювання розподілу магнітних полів були створені малогабартні високочутливі датчики магнітного поля, що працюють в широкому діапазоні частот і амплітуд вимірюваних полів, а також мають вузьку діаграму спрямованості і малий коефіцієнт температурного дрейфу. Особливістю розроблених нами ферозондових датчиків магнітного поля було те, що для вимірювання малих магнітних полів використовується нелінійна залежність магнітної проникності від величини магнітного поля. В якості магнітного сердечника в них використовувалася тонка 20-30 мкм аморфна стрічка кобальтового сплаву $\text{CoFeMo}(\text{Ni})\text{SiB}$ або $\text{CoFeCr}(\text{Mo})\text{SiB}$.

Такі аморфні матеріали мають високі значення магнітної проникності при малій коерцитивній силі. Крім того для них характерно високе значення нелінійності зміни магнітної проникності в області дуже низьких полів.

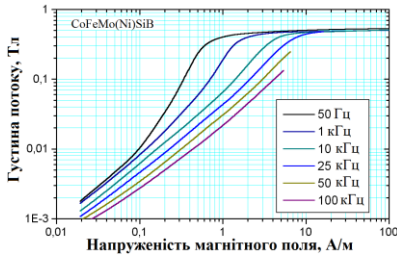


Рис. 14. Залежності $B(H)$ для різних частот для сплаву CoFeMo(Ni)SiB.

Оцінка порогу чутливості датчика:

$$H_p = \frac{2\sqrt{kTRF}}{k_{EH}},$$

де R – активний опір котушки реєстрації сигналу, F – ширина смуги робочої частоти датчика, T – температура, k_{EH} – коефіцієнт магнітоелектричного перетворення, k – стала Больцмана, демонструє що при $R \approx 1$ Ом, $F = 200$ кГц та $k_{EH} \approx 1$ В/Е, поріг чутливості датчика $H_p \ll 1$ нТл.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі приведені нові наукові результати, які уточнюють і розширюють уявлення про магнітні властивості магнітних багатошарових та гранульованих наноструктур. Згідно з експериментальними та аналітичними дослідженнями отримані наступні наукові результати:

1. Встановлено, що попередня обробка підкладнок ультратонких шарів магнітних плівок вісмут заміщених ферит-гранатів та одномірних магнітофотонних кристалів за допомогою іонів з енергією більше 1 кеВ призводить до формування перехідного шару на границі підкладки і плівки з плавною зміною складу за рахунок часткового руйнування поверхні підкладки і аморфізації її поверхневого шару. Зміна складу в перехідному шарі, зокрема, призводить до зміни точки компенсації магнітного зразка, а також до зміни величини магнітооптичного ефекту. Показано, що при малій товщині (до 10 нм) магнітної плівки магнітооптичний ефект може навіть змінювати знак. На підставі проведених досліджень визначено товщину перехідного шару при різних методах обробки поверхні підкладки. Розроблено новий спосіб отримання плівок вісмут заміщених феритів-гранатів із заданою шорсткістю поверхні; отриманий Патент України на корисну модель № 87156.

2. Експериментально доведено, що опромінення полікристалічних плівок $Ni_{81}Fe_{19}$ наносекундними лазерними імпульсами призводить до зменшення шорсткості поверхні, а також до рекристалізації і збільшення розмірів кристалітів у при поверхневому шарі. Вперше продемонстровано, що ефективність рекристалізації плівок $Ni_{81}Fe_{19}$ залежить від довжини хвилі лазерного випромінювання. В якості механізму цього ефекту пропонується розглядати збудження локальних плазмонів на голчастих неоднорідностях поверхні.

3. Вперше показано, що зовнішнє постійне магнітне поле впливає на величину високочастотної магнітної сприйнятливості магнітних наночастинок. При цьому обґрунтовано, що отримані результати необхідно враховувати в

області медицини при розігріві магнітних наночастинок змінним магнітним полем.

4. Запропоновано методи створення високоградієнтних магнітних полів із заданою конфігурацією за допомогою структурованих підкладок із магнітотвірних матеріалів для застосування в біології та медицині.

5. Вперше запропоновано використовувати явище нелінійної залежності магнітної проникності аморфних стрічок кобальту від магнітного поля для створення високочутливих малогабаритних ферозондових датчиків магнітного поля з параметричним посиленням сигналів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1*. Jeanmaire D. L. Surface Raman spectroelectrochemistry part I. Heterocyclic, aromatic, and aliphatic amines adsorbed on the anodized silver electrode / D. L. Jeanmaire, R. P. van Duyne. // J. Electroanal. Chem. – 1977. – V. 84. – P. 1-20.

2*. Bohren C. F. Absorption and scattering of light by small particles / C. F. Bohren and D. R. Huffman // New York: John Wiley & Sons. – 1998. – 530 p.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Крупа Н.Н. Изменение магнитных характеристик магнитных нанопленок и управление спиновым током с помощью лазерного излучения / Н.Н. Крупа, **И.В. Шарай** // Успехи физики металлов. – 2013. – т.14. – №1. – с. 1–32.

2. Krupa M.M. Magnetic and magneto-optical properties of Fe_3O_4 and NiFe_2O_4 nanoparticles / M.M. Krupa, **I.V. Sharay** // Functional Materials. – 2014. – vol.21. – №1. – P. 15–20.

3. Shaposhnikov A.N. Modification of Bi:YIG film properties by substrate surface ion pre-treatment / A.N.Shaposhnikov, A.R. Prokopov, A.V. Karavainikov, V.N. Berzhansky, T.V. Mikhailova, V.A. Kotov, D.E. Balabanov, **I.V. Sharay**, O.Y. Salyuk, M. Vasiliev, V.O. Golub // Materials Research Bulletin. – 2014. – vol.55. – P. 19–25.

4. Крупа М.М. Малогабаритные датчики магнитного поля на основе тонкой фольги из аморфного кобальтового сплава ММ-5Со и мартенситных кристаллов NiMnGa / М.М. Крупа, Ю.Б. Скирта, **И.В. Шарай** // Успехи физики металлов. – 2014. – т.3. – С. 1001-1019.

5. Ignatyeva T.A. Perspectives of constant gradient magnetic fields applications in biotechnology / T.A. Ignatyeva, V.N. Voyevodin, A.N. Goltsev, V.V. Kiroshka, A.M. Bovda, V.V. Kalynovskii, A.N. Velikodny, P.A. Kutsenko, V.O. Golub, Yu.I. Dzhedzheria, **I.V. Sharai** // American Journal of Bioscience and Bioengineering. – 2014. – vol.2. – №6. – P. 72-77.

6. Шапошников А.Н. Наноразмерные структуры одномерных магнитофотонных кристаллов / В.Г. Баряхтар, **И.В. Шарай**, О.Ю. Салюк,

В.О. Голуб, В.Н. Бержанский, А.В. Каравайников, Т.В. Михайлова, Е.Т. Милокова, А.Р. Прокопов, А.Н. Шапошников, Н.Ф. Харченко, И.М. Лукиенко, О.В. Милославская, Ю.Н. Харченко // «Наноразмерные системы и наноматериалы: исследования в Украине». Академперіодика. – декабрь 2014. – С. 82-87.

7. Shaposhnikov A.N. Surface Properties of Nanoscale Iron Garnet Films / T.B. Kosykh, A.S. Prosyakov, A.P. Pyatakov, A.N. Shaposhnikov, A.R. Prokopov, **I.V. Sharay** // Solid State Phenomena. – 2015. – Vols. 233-234. – P. 678-681.

8. Крупа М.М., Скирта Ю.Б., **Шарай І.В.** Магнітоелектриний датчик магнітного поля: Патент України №106286. МПК G01R 33/00; заявл. 26.11.2012 (Оприлюднено 11 серпня 2014. Бюл. №15).

9. Прокопов А.Р., Шапошников О.М., Каравайников А.В., **Шарай І.В.**, Бар'яхтар В.Г. Спосіб отримання плівок ферит-гранату, що містить Ві, із заданою шорсткістю поверхні: Патент на корисну модель 87156 Україна, МПК С 30 В 30/00.ТНУ. – №u201309479; заявл. 29.07.2013 (Оприлюднен. 27 січня 2014, Бюл. №2).

10. **Sharay I.V.** Geometric and magnetic properties of nanoparticles Fe_3O_4 and NiFe_2O_4 / M.M. Krupa, **I.V. Sharay** // Abstracts of International Conference Functional Materials ICFM'2011, October 3-8, 2011. – Simferopol, DIP, 2011. – P. 338.

11. Shaposhnikov A.N. Bi: YIG films properties modification by substrate surface ion pretreatment / V.N. Berzhanskiy, A.N. Shaposhnikov, A.R. Prokopov, V.G. Baryakhtar, **I.V. Sharay**, A.V. Karavainikov // Abstracts of International Conference Functional Materials ICFM'2011, October 3-8, 2011. – Simferopol, DIP, 2011. – P. 178.

12. Шапошников А.Н. Влияние ионной обработки поверхности подложек ГТГ на магнитооптические свойства ультратонких слоев Bi:YIG / **И.В. Шарай**, А.Н. Шапошников, А.Р. Прокопов, А.В. Каравайников, В.Н. Бержанский, В.А. Котов, В.И. Бурков, В.Г. Барьяхтар // IV Международная научная конференция «Функциональная база нанoeлектроники», 30 сентября-3 октября, 2011, Кацивели. – Материаы конференции. – С. 218–221.

13. Шапошников А.Н. Особенности кристаллизации Bi – содержащих пленок ферритов – гранатов на негранатовых подложках / **И.В. Шарай**, В.Н. Бержанский, А.Н. Шапошников, А.Р. Прокопов, А.В. Каравайников, Е.Т. Милокова, А.Г. Нестерук, Н.Ф. Харченко, Ю.Н. Харченко, И.Н. Лукиенко, О.В. Милославская // Труды XIV Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (МКЭЭЭ-2012), Алушта, Крым, 17-22 сентября, 2012, с. 33-35.

14. **Шарай І.В.** Исследование магнитных и магнитооптических характеристик наночастиц Fe_3O_4 и NiFe_2O_4 / Н.Н. Крупа, Ю.Б. Скирта, Д.Й. Подьяловский, **И.В. Шарай** // V Международная научная конференция

«Функциональная база нанoeлектроники», Кацивели. – 30 сентября – 5 октября, 2012. – С. 89.

15. Krupa M.M. Change of magnetic characteristics of magnetic nanofilms and control spin current under laser radiation / M.M. Krupa, **I.V. Sharay** // XIV Межд. конф. «Фізика і технологія тонких плівок та наносистем», Івано-Франковськ. – 20-25 травня, 2013. – с. 38.

16. **Sharay I.V.** Magnetic and magneto-optical properties of Fe_3O_4 and NiFe_2O_4 nanoparticles. **I.V. Sharay**, M.M. Krupa, V.G. Kostishin, V.V. Nureyev // Functional Materials–2013: Abstracts of International Conference Functional Materials ICFM'2013, September 29- October 5, 2013 / Edit by Berzhanskiy V.N. – Simferopol, DIP, 2013. – p. 410.

17. Shaposhnikov A.N. Magnetic anisotropy of iron garnets nanofilms / Ye.Yu. Semuk, V.N. Berzhanskiy, V.O. Golub, A.N. Shaposhnikov, A.R. Prokopov, A.V. Karavainikov, **I.V. Sharay** // Functional Materials–2013: Abstracts of International Conference Functional Materials ICFM'2013, September 29- October 5, 2013 / Edit by Berzhanskiy V.N. – Simferopol, DIP, 2013. – p. 84.

18. Ignateva T.A. Magnetic substrates with determined 3D geometry of magnetic field for the biotechnology applications / T.A. Ignateva, V.N. Voevodin, A.N. Goltsev, P.A. Kutsenko, V.V. Kalinovskiy, **I.V. Sharai**, Yu.I. Dzhezherya, V.O. Golub, V.V. Kiroshka, T.A. Urchyk // Functional Materials–2013: Abstracts of International Conference Functional Materials ICFM'2013, September 29- October 5, 2013 / Edit by Berzhanskiy V.N. – Simferopol, DIP, 2013. – p. 461.

19. Shaposhnikov A.N. Morfology of Bi:YIG films crystallized at different heating rates // V.N. Berzhanskiy, A.N. Shaposhnikov, A.R. Prokopov, A.V. Karavainikov, T.V. Mikhailova, V.G. Baryakhtar, **I.V. Sharay**, V.O. Golub, O.Y. Salyuk // Functional Materials–2013: Abstracts of International Conference Functional Materials ICFM'2013, September 29- October 5, 2013 / Edit by Berzhanskiy V.N. – Simferopol, DIP, 2013. – p. 215.

20. **Sharai I.V.** Evaluation of the nanoparticles Fe_3O_4 and NiFe_2O_4 size by means of atomic force microscopy / **I.V. Sharai** // Abstracts of 2nd International research and practice Conference «Nanotechnology and Nanomaterials». – 27– 30 August, 2014. – Lviv. – p. 109.

21. **Sharai I.V.** SEM and AFM investigations of surface morphology of Bi:YIG films and one dimensional magneto-phonic crystals / **Sharai I.V.**, Berzhanskiy V.N., Golub V.O., Shaposhnikov A.N., Prokopov A.R., Karavainikov A.V., Milyukova E.T. // Abstracts of 2nd International research and practice Conference «Nanotechnology and Nanomaterials». – 27– 30 August, 2014. – Lviv. – p. 477.

АНОТАЦІЯ

Шарай І. В. Вплив структурних неоднорідностей на поверхні магнітних плівок на їх магнітні та оптичні характеристики. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм. – Інститут магнетизму НАН України та МОН України, Київ, 2017.

Дисертація присвячена з'ясуванню впливу структурних неоднорідностей на поверхні магнітних плівок на їх магнітні та оптичні характеристики. Зокрема, проведено дослідження ультратонких шарів магнітних плівок вісмут заміщених ферит-гранатів та одновимірних магнітофотонних кристалів. Встановлено, що високоенергетична іонна обробка поверхні підкладки призводить до формування перехідного шару на границі підкладки і плівки зі плавною зміною складу, що дозволяє керувати величиною магнітооптичного ефекту в таких плівках. Це призводить до зміни точки компенсації магнітного зразка, а також до зміни величини і знаку магнітооптичного ефекту. Експериментально продемонстровано, що ефективність рекристалізації та шорсткості поверхні плівок NiFe при опроміненні наносекундними лазерними імпульсами залежить від довжини хвилі лазерного випромінювання. Вперше розроблено метод керування високочастотною магнітною сприйнятливістю магнітних наночастинок за допомогою зовнішнього постійного магнітного поля для їх розігріву змінним магнітним полем. Показано, що варіюючи величину і напрямок постійного магнітного поля значення високочастотної магнітної сприйнятливості можна змінювати в десятки разів. Запропоновано використовувати явище нелінійної залежності магнітної проникності від магнітного поля для створення високочутливих малогабаритних ферозондових датчиків магнітного поля з параметричним посиленням сигналів. Запропоновано методи створення високоградієнтних магнітних полів із заданою конфігурацією за допомогою структурованих підкладок.

Ключові слова: магнітофотонний кристал, періодичні магнітні структури, феррімагнітні шпінелі, наночастинок, структурні неоднорідності.

АННОТАЦИЯ

Шарай И. В. Влияние структурных неоднородностей на поверхности магнитных пленок на их магнитные и оптические характеристики. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – магнетизм. – Институт магнетизма НАН Украины и МОН Украины, Киев, 2017.

Диссертационная работа посвящена выяснению влияния структурных неоднородностей на поверхности магнитных пленок на их магнитные и

оптические характеристики. Степень магнитных неоднородностей таких структур, а также характер распределения их по поверхности, являются важными факторами, влияющими на предельно достижимые параметры и надежность работы многих устройств на их основе.

Проведено исследование ультратонких слоев магнитных пленок висмут замещенных феррит-гранатов и одномерных магнитofотонных кристаллов. Установлено, что предварительная обработка подложек с помощью ионов с энергией более 1 кэВ приводит к формированию переходного слоя на границе подложки и пленки с плавным изменением состава, что позволяет управлять величиной магнитооптического эффекта в таких пленках. Изменение состава в переходном слое, в частности, приводит к изменению точки компенсации магнитного образца, а также к изменению величины магнитооптического эффекта. Показано, что при малой толщине (до 10 нм) магнитной пленки магнитооптический эффект может даже менять знак. На основании проведенных исследований определены толщины переходного слоя при различных методах обработки поверхности подложки. Экспериментальным путем показано, что облучение поликристаллических пленок $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ наносекундными лазерными импульсами приводит к уменьшению шероховатости поверхности, а также к рекристаллизации и увеличению размеров кристаллитов в приповерхностном слое. Показано, что эффективность рекристаллизации пленок $\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$ зависит от длины волны лазерного излучения. В качестве механизма этого эффекта предлагается рассматривать возбуждения локальных плазмонов на игольчатых неоднородностях поверхности. Предложено использовать явление нелинейной зависимости магнитной проницаемости от магнитного поля аморфных лент кобальта для создания высокочувствительных малогабаритных феррозондовых датчиков магнитного поля с параметрическим усилением сигналов. Предложены методы создания высокоградиентных магнитных полей с заданной конфигурацией с помощью структурированных подложек из магнитомягких материалов для применения в биологии и медицине. Впервые разработан метод управления высокочастотной магнитной восприимчивостью магнитных наночастиц с помощью внешнего постоянного магнитного поля для их разогрева переменным магнитным полем. Показано, что варьируя величину и направление постоянного магнитного поля значение магнитной восприимчивости можно изменять в десятки раз. При этом обосновано, что полученные результаты необходимо учитывать в области медицины при разогреве магнитных наночастиц переменным магнитным полем.

Ключевые слова: магнитофотонный кристалл, периодические магнитные структуры, ферромагнитные шпинели, наночастицы, структурные неоднородности.

ABSTRACT

Sharai I.V. Influence of structural inhomogeneities on the surface of the magnetic films on their magnetic and optical properties. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Philosophy degree (Ph. D.) in Physics and Mathematics on specialty 01.04.11 – Magnetism. – Institute of Magnetism, the National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to the study of influence of structural inhomogeneities on the surface of the magnetic films on their magnetic and optical properties. In particular, the investigations of ultra-thin magnetic films layers of bismuth-substituted ferrite garnets and one-dimensional magnetophotonic crystals were performed. It was found that a high-energy ion treatment of substrates surface leads to the formation of a transitional layer on the boundary between substrate and film with a smooth change of composition that enables to control the magnitude of magneto-optical effects in such films. This changes the compensation point of the magnetic sample, as well as magnitude and sign of magneto-optical effect. It was experimentally demonstrated that the effectiveness of recrystallization and the roughness of NiFe films surface when irradiated by nanosecond laser pulses depends on the laser radiation wavelength. For the first time, the method of managing of high-frequency magnetic susceptibility of magnetic nanoparticles by using an external constant magnetic field for their heating by an alternating magnetic field was developed. It was shown that varying the magnitude and direction of the constant magnetic field, we can change the values of high-frequency magnetic susceptibility by dozen times. The phenomenon of nonlinear dependence of magnetic permeability on the magnetic field was proposed to use for the creation of high-sensitive compact flux-gate magnetic field sensors with parametric amplification of signals. The methods of creation of high-gradient magnetic fields with a given configuration using structured substrates were proposed.

Keywords: magnetophotonic crystal, periodic magnetic structures, ferrimagnetic spinels, nanoparticles, structural inhomogeneities.

Підписано до друку 07.02.2017. Формат 60*80/16. Гарн. Times New Roman.
Пап. офс. №1. Друк цифровий. Ум. друк. арк. 1,63.
Тираж 100 прим. Зам. №17258.

Друк: ПФ "Хімджест", 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 150, к. 4, тел.: (044)
457-92-52, 453-17-62.