

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім. О.О.ГАЛКІНА

ДАДОЄНKOBA НАТАЛІЯ МИКОЛАЇВНА

УДК 537.632 + 535-7 +
535.551 + 530.182

**МАГНІТООПТИЧНІ ЯВИЩА В ПРОСТОРОВО НЕОДНОРІДНИХ
МАГНІТНИХ СРЕДОВИЩАХ**

01.04.11 — магнетизм

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора фізико-математичних наук

Донецьк – 2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Донецькому фізико-технічному інституті ім. О.О. Галкіна Національної академії наук України.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Любчанський Ігор Леонідович
Донецький фізико-технічний інститут
ім. О.О. Галкіна НАН України,
провідний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
чл.-кор. НАН України, професор
Харченко Микола Федорович
Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України,
завідувач відділу оптичних і магнітних властивостей твердих тіл

доктор фізико-математичних наук, професор
Гомонай Олена Василівна
Національний технічний університет України
"Київський Політехнічний Інститут",
Фізико-технічний інститут, професор кафедри інформаційної безпеки

доктор фізико-математичних наук, професор
Тарасенко Сергій Вадимович
Донецький фізико-технічний інститут
ім. О.О. Галкіна НАН України,
завідувач відділу теорії магнетизму і фазових переходів

Захист дисертації відбудеться "12" червня 2008 р. о _____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 11.184.01 при Донецькому фізико-технічному інституті ім. О.О. Галкіна НАН України за адресою: 83114, м. Донецьк, вул. Р. Люксембург, 72.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Донецького фізико-технічного інститута ім. О.О. Галкіна НАН України за адресою: 83114, м. Донецьк-114, вул. Р. Люксембург, 72.

Автореферат розісланий " _____ " травня 2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 11.184.01
кандидат фізико-математичних наук

Т.М. ТАРАСЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Напротязі останніх років значний інтерес приділяється всебічним дослідженням неоднорідних магнітних середовищ, які є основою при створенні модуляторів, фазообертачів, дефлекторів, магнітооптичних (МО) хвильоводів, селективних оптичних фільтрів та сенсорів, дзеркал, циркуляторів, пристроїв МО запису, збереження та відтворення інформації, оскільки вони знаходять широке застосування в квантовій електроніці, інтегральній оптиці, спінтроніці, а також у новому науковому напрямку – магнітофотоніці. Прикладом таких неоднорідних середовищ є тонкі магнітні плівки з різними типами доменних структур, надгратки та багат шарові магнітні плівки (у тому числі і надтонкі плівки товщиною у кілька атомних шарів), а також одно-, дво- та тривимірні фотонні кристали на основі різних магнітних матеріалів. Привабливість використання магнітних матеріалів при створенні таких пристроїв полягає в можливості керування їх електродинамічними характеристиками за допомогою зовнішнього магнітного поля.

Традиційно, при теоретичному описі оптичних ефектів у магнітних матеріалах для видимого діапазону електромагнітних хвиль (ЕМХ) не враховується вклад магнітної сприйнятливості [1]. Однак, існує клас магнітних речовин, у яких діелектрична та магнітна підсистеми дають порівняні за величиною вклади до МО ефектів, наприклад, в ефект Фарадея. Класичним зразком бігіротропного середовища є залізо-ітрієвий гранат (ЗІГ) $Y_3Fe_5O_{12}$, який широко використовується в інтегральній оптиці та виявляє бігіротропні властивості в близькому інфрачервоному (ІЧ) діапазоні довжин хвиль від $1 \mu m$ до $5 \mu m$ [2]. Тому для опису поширення ЕМХ в таких середовищах необхідно враховувати як гіроелектричні, так і гіромагнітні властивості відповідної речовини, обумовлені наявністю недиагональних компонент в тензорах діелектричної проникності $\hat{\epsilon}$ та магнітної сприйнятливості $\hat{\mu}$.

До найбільш ефективних методів досліджень багат шарових магнітних систем відносяться методи лінійної, та особливо, нелінійної магнітооптики. Нелінійно-оптичні методи мають високу чутливість до поверхонь та меж розподілу середовищ, яка зумовлена пониженням симетрії поблизу інтерфейсів. Завдяки цьому нелінійно-оптичні методи довели свою високу ефективність при вивченні тонких і надтонких плівок, а також шаруватих структур [3], в особливості, якщо сполуки, які їх створюють, є центросиметричними в об'ємі. Тоді пониження симетрії поблизу меж розподілу призводить до відсутності такого елемента, як інверсія в групі симетрії, що описує відповідну структуру, і, отже, до скасування симетрійної заборони на генерацію другої оптичної гармоніки (ДГ) в електродипольному наближенні [4]. У порівнянні з лінійною оптикою нелінійно-оптичні методи дозволяють одержувати якісно нову інформацію й про магнітну структуру твердих тіл [5]. Нелінійна магнітооптика довела свою чутливість до магнітних властивостей поверхонь та ефективність при візуалізації магнітних доменів (МД) та доменних стінок (ДС) у феромагнетиках, а також антиферомагнітних доменів [3]. Крім того, для нелінійної магнітооптики є характерним поєднання чутливості до меж розподілу зі значною величиною ефектів, які, як правило, на один-два порядки перевищують значення їх лінійних МО аналогів [3], що особливо

важливо в тих випадках, коли лінійні ефекти малі. Також незаперечною перевагою як лінійних, так і нелінійних оптичних методів є їх неруйнівний характер.

Лінійна та нелінійна оптика об'ємних та однорідних магнітних середовищ уявляє собою достатньо добре вивчену область [4-8]. Однак, нелінійна магнітооптика неоднорідних магнітних середовищ є практично новим науковим напрямком [9,10], в якому існує велика кількість проблем, не досліджених раніше, або вивчених не достатньо повно. Напротязі останніх п'ятнадцяти років було проведено велику кількість експериментів з нелінійної оптики неоднорідних магнітних середовищ [11,12]. Ці дослідження ініціювали нові теоретичні дослідження, результати яких подано в даній дисертації. З іншого боку, теоретичні роботи автора дисертації, зокрема, з нелінійної магнітооптичної дифракції, ініціювали постановку відповідних нових експериментів.

Зв'язок роботи з науковими програмами та темами. Тема дисертаційної роботи відповідає основним напрямкам досліджень, які проводяться в Донецькому фізико-технічному інституті ім. О.О. Галкіна НАН України. Основу дисертації складають результати, одержані при виконанні наступних держбюджетних тем: "Мікроскопічні, магнітні та транспортні властивості манганітів лантану", 1997-2000, № держреєстрації 0197U008907; "Електродинаміка та кінетика металооксидів та багатозв'язних структур, які поєднують елементи з діелектричними, металічними та магнітними властивостями", 2000-2003, № держреєстрації 0100U003853; "Коллективні явища в багатокомпонентних дискретних структурах різної вимірності", 2003-2006, № держреєстрації 0103U005974; "Нелінійні явища в низьковимірних конденсованих середовищах (поверхні, тонкі плівки, шаруваті системи)", 2006-2009, № держреєстрації 0106U006934; "Розвиток нових методів діагностики, дослідження властивостей та робочих характеристик сенсорних структур на основі магнітних матеріалів", 2007-2012, № держреєстрації 0107U002080. Також, дослідження, результати яких склали зміст дисертації, були підтримані Стипендією Президента України для молодих вчених в 1996 та 1998 роках, та грантом Міжнародної науково-освітньої програми для молодих вчених та викладачів № YSU082017 за 1998 рік (Міжнародний фонд "Відродження"). Крім того, викладені в дисертації дослідження були підтримані міжнародними грантами INTAS: № 94-2675 "Nonlinear optical effects in thin magnetic film structures" (1995-1997), № 97-0705 "Magnetization dynamics on a femtosecond time scale" (1998-2000), № 03-51-3784 "Magnetic photonic crystals as the new media for photonics" (2004-2007), а також Європейською дослідницько-освітньою програмою (EU Research and Training Network) "Exciting" (2002-2006).

Мета та завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є розвиток теорії лінійного та нелінійного оптичного відгука від неоднорідних магнітних середовищ. Об'єктами дослідження є шаруваті бігіротропні магнітні середовища, магнітні плівки з різними типами доменних структур, магнітні фотонні кристали (МФК) (як ідеальні, так і ті, що містять дефектні шари), ультратонкі феромагнітні багаточарові структури. В дисертаційній роботі розглянуто такі основні задачі:

- відбиття та заломлення світла на межі розподілу двох бігіротропних магнітних середовищ для основних магнітооптичних конфігурацій (МОК): полярної, подовжньої та поперечної;

- повне внутрішнє відбиття (ПВВ) світла на межі розподілу бігіротропних середовищ для подовжньої та поперечної МОК, а також вплив на нього магнітоіндукованих компонент тензорів діелектричної проникності та магнітної сприйнятливості;
- ефект Гуса-Хенхена (ЕГХ) на межі розподілу бігіротропних середовищ для полярної та подовжньої МОК, при яких даний ефект не був досліджений раніш;
- вплив напружень невідповідності (НН) та дислокацій невідповідності (ДН) на лінійне та нелінійне (на частоті ДГ) відбиття світла від магнітної (немагнітної) плівки на немагнітній підкладинці, а також нелінійне розсіювання світла крайовою дислокацією в магнітному кристалі;
- виникнення нелінійної (на частоті ДГ) магнітооптичної дифракції (НМОД) на одно- та двовимірних періодичних структурах, таких, як магнітна плівка з смугастою доменною структурою, квадратна ґратка магнітних точок, гексагональна ґратка циліндричних магнітних доменів (ЦМД), а також вплив зовнішнього магнітного поля на НМОД;
- дослідження спектрів заборонених фотонних зон (ЗФЗ) одновимірних МФК, створених на основі бігіротропних магнітних та немагнітних шарів, що чергуються, при різних МОК;
- вплив зовнішнього магнітного поля та напрямку поширення ЕМХ на спектри ЗФЗ в одновимірних МФК, які уявляють собою смугасті доменні структури з ДС;
- вплив одинарних та парних магнітних дефектних шарів на оптичні властивості МФК;
- розрахунки з перших принципів нелінійного МО відгука поверхні надтонких шаруватих феромагнітних структур $Ni(1ML)/Cu(1ML)_x$, $x = 1, 2, 3, 4$, що моделюють ріст надґратки для різних напрямків намагніченості, а також дослідження впливу товщини мідної підкладинки, що пошарово росте, на нелінійний МО відгук магнітної системи $Ni/[Cu(001)]_x$, $x = 1, 2, 3, 4, 5$.

Методи досліджень. Для реалізації поставлених дослідницьких задач були використані як феноменологічні, так і мікроскопічні підходи. В дисертаційній роботі було застосовано наступні методи:

- при теоретичному дослідженні одновимірних МФК був використаний метод матриці переносу розмірності (4×4) (\hat{T} – матриці), яка пов'язує амплітуди електричного та магнітного полів у точках, віддалених одна від одної на один період;
- метод функцій Гріна для розв'язання диференціальних рівнянь був використаний при дослідженні впливу напружень невідповідності на лінійне відбиття світла від тонкої магнітної плівки на підкладинці;
- при дослідженні НМОД на смугастій доменній структурі та гексагональній ґратці ЦМД, генерації ДГ від плівки на підкладинці, а також нелінійного розсіювання світла самотньою крайовою дислокацією, використано наближення амплітуд, що повільно змінюються;

- чисельні розрахунки нелінійного МО відгука від поверхні феромагнітних середовищ проведено з використанням моделі поверхневого шару (surface sheet model). При обчисленні хвильових функцій та власних значень енергії використано метод FLAPW (full-potential linearized plane wave method), який оснований на теорії функціоналу щільності. Ці обчислення зроблені з використанням пакетів програм WIEN'97 [13] та WIEN2k [14], застосування яких до шаруватих систем, що розглядаються, пов'язано з притягненням метода надкомірки.

Наукова новизна одержаних результатів. Результати, які подані у дисертації, є оригінальними та новими.

- Вперше теоретично досліджено ПВВ світла, а також пов'язаний з ним ЕГХ, на межі розподілу бігіротропних середовищ для МОК, які не були вивчені раніш. Обчислено залежності кутів ПВВ від параметрів бігіротропії, а також подовжнього зсуву відбитого променя від безрозмірного параметра $k_x c / \omega$ (k_x – компонента хвильового вектора ЕМХ), пов'язаного з кутом падіння світла, для межі розподілу залізо-ітрієвого та гадоліній-галієвого гранатів (ГГГ). Для цих матеріалів розрахунки показали, що при подовжній МОК, на відміну від поперечної, кути ПВВ для ЕМХ з різними поляризаціями можуть бути розрізнені в експерименті, а зсуви відбитих хвиль поблизу критичних кутів можуть досягати істотних значень – до кількох десятків довжин хвиль падаючого електромагнітного випромінювання.
- Вперше передбачено можливість виникнення НМОД на частоті ДГ від одновимірних та двовимірних магнітних надструктур, таких, як смугаста доменна структура, гексагональна ґратка ЦМД та квадратна ґратка магнітних точок.
- Вперше теоретично досліджено вплив механічних напружень, зумовлених як розбіжністю параметрів кристалічних ґраток плівки та підкладинки, так і дислокаціями невідповідності, що виникають при епітаксіальному рості плівок, на лінійне та нелінійне відбиття світла.
- Вперше проведено теоретичні розрахунки спектрів ЗФЗ для одновимірних МФК на основі шарів бігіротропного ЗІГ та немагнітного ГГГ для трьох основних МОК, а також досліджено зміну їх положення та ширини при переорієнтації вектора намагніченості в магнітних шарах. Також вперше показано, що плівки ЗІГ із смугастими доменними структурами з ДС як блохівського, так і неелівського типів, можуть розглядатись як одновимірні МФК, що перестроюються зовнішнім магнітним полем.
- Вперше проведено детальне дослідження оптичних характеристик проходження світла скрізь обмежений одновимірний МФК з одним та двома магнітними дефектними шарами в залежності від їх товщини та кута падіння світла. Показано, що, на відміну від однодефектного, в дводефектному МФК можливо поєднання великих значень коефіцієнта проходження та кута фарадеєвського обертання. Також показано можливість оптимізації оптичних характеристик МФК при заданих параметрах шляхом зміни кута падіння світла.
- Вперше із використанням метода FLAPW на основі теорії функціоналу щільності з врахуванням спин-орбітальної взаємодії обчислено нелінійний МО відгук

ультратонких магнітних шаруватих систем, що складаються із моношарів нікелю та міді, які чергуються, та просліджено змінення компонент тензорів нелінійної оптичної сприйнятливості (НОС) та сигналу ДГ при збільшенні числа періодів надгратки, що зростає, у випадках, коли вектор намагніченості орієнтований в площині шарів або перпендикулярно до поверхні магнітної структури.

Практичне значення дисертаційної роботи полягає в тому, що продемонстровано ефективність методів лінійної та нелінійної магнітооптики при дослідженні неоднорідних магнітних структур. Як показано в дисертації, подовжній зсув відбитого променя при ЕГХ від межі ЗІГ – ГГГ для полярної та подовжньої МОК може досягати достатньо значних величин при наближенні до кутів ПВВ – до кількох десятків довжин хвиль світла, що є порівняним, наприклад, з розмірами МД. Таким чином, врахування ЕГХ є важливим при створенні оптичних перемикачів, а також при оптичному зчитуванні інформації в пристроях на основі магнітних плівок з доменною структурою.

В дисертаційній роботі показано, що можливо керувати НМОД за допомогою зовнішнього магнітного поля, та проведено поляризаційний аналіз сигналу ДГ при НМОД, який дозволяє виділити внесок ДС до ефекту. Ці теоретичні дослідження стимулювали постановку відповідних експериментів з НМОД [15], що якісно підтвердили результати теоретичних передбачень, наведених у дисертації.

Поляризаційний аналіз сигналу ДГ при відбитті світла від епітаксимальної магнітної плівки на підкладинці дозволяє визначити внесок дислокацій невідповідності по наявності S -поляризованого сигналу на частоті ДГ, поява якого вказує на те, що товщина плівки перевищує критичну. Результати цих досліджень одержали якісне підтвердження в експериментальній роботі [16], в якій було досліджено генерацію ДГ від магнітних плівок Ni і Co на підкладинці $Rh(001)$.

В дисертаційній роботі вивчено можливість управління спектрами ЗФЗ за допомогою зовнішнього магнітного поля в МФК, які уявляють собою плівки ЗІГ із смугастою доменною структурою з ДС блохівського та неелівського типів, що може бути використано для розробки поляризаційних селективних МО фільтрів. Розрахунки автора дисертації по дослідженню ЗФЗ в магнітних фотонних кристалах на основі плівок із смугастою доменною структурою [A15, A19, A20] якісно співпадають з нещодавно опублікованими результатами російських авторів [17].

Результати, викладені в дисертації, показують, що, на відміну від однодефектного, в дводефектному МФК можливо поєднання великих значень коефіцієнта проходження та кута фарадеєвського обертання θ_F , що є важливим при створенні відповідних пристроїв. МФК з центральними дефектними модами зберігають хороші характеристики проходження навіть при достатньо великих кутах падіння світла. Таким чином, похиле падіння світла може бути використано для оптимізації параметрів відповідних магнітофотонних структур.

Особистий внесок автора роботи. Наведені в дисертації результати були одержані автором (в співробітництві з науковим консультантом та іншими співавторами) в ДонФТІ ім. О.О. Галкіна НАН України, Інституті Фізики Мікроструктур ім. М. Планка (Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik), (м. Халле, Німеччина), Корейському передовому інституті науки та технології (Korea Advanced Institute of

Science and Technology – KAIST), (м. Тайджон, Південна Корея), та Хан'янському університеті (Hanyang University), (м. Сеул, Південна Корея). У всіх публікаціях автор дисертації приймала активну участь в постановці задач, виборі методів їх розв'язання, проведенні аналітичних та чисельних розрахунків, аналізі одержаних результатів, написанні та редагуванні текстів. В статтях, які були написані у співавторстві, дисертант зробила вагомий внесок при виборі об'єктів дослідження, застосуванні наукових моделей та методів, виконала значну частину аналітичних та чисельних розрахунків, а також приймала активну участь в обговореннях результатів та написанні текстів статей. В роботах [A1-A9] дисертантом особисто виконано всі аналітичні та чисельні розрахунки, вона також приймала участь в аналізі та узагальненні результатів цих статей. В публікації [A10] автор дисертації приймала участь в інтерпретації експериментальних даних, нею також проведені відповідні аналітичні обчислення. В роботах [A11-A17] дисертант приймала активну участь у постановці задач, виконанні розрахунків, аналізі результатів та редагуванні статей. В публікаціях [A18-A28] автором дисертації були обрані методи розв'язання задач, виконані розрахунки та аналіз результатів при написанні статей. В публікаціях [A29, A30] автору належить весь об'єм робіт, пов'язаних з вибором об'єктів досліджень, чисельними розрахунками з перших принципів, аналізом одержаних результатів та написанням статей. Автором дисертації сформульовано всі наукові положення, що виносяться на захист.

Апробація роботи. Результати досліджень, наведені в дисертації, добре відомі фахівцям та неодноразово цитувались в провідних фахових виданнях (наукових журналах, монографіях та патентах). Основні результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на наступних конференціях, семінарах та симпозіумах:

міжнародних конференціях та засіданнях робочої групи з електромагнетизму складних середовищ (BIANISOTROPICS'97) (Глазго, Великобританія, 1997); (BIANISOTROPICS'98) (Брауншвейг, Німеччина, 1998); (BIANISOTROPICS'2000) (Лісабон, Португалія, 2000); (BIANISOTROPICS'2002) (Маракеш, Марокко, 2002); 17-й Європейській конференції з фізики поверхонь, (Енсхеде, Нідерланди, 1997); Міжнародній конференції з оптичної діагностики матеріалів для опто-, мікро- та квантової електроніки (OPTDIM'97) (Київ, Україна, 1997); Симпозіумі "Прогрес в електромагнітних дослідженнях" (Нант, Франція, 1998); Міжнародних симпозіумах з магнітооптичного запису (MORIS'99) (Монтеррей, США, 1999) та (MORIS'2002) (Бенде, Франція, 2002); Міжнародній конференції з магнетизму (INTERMAG'99) (Кіонджу, Південна Корея, 1999); Засіданні робочої групи з нелінійної магнітооптики (NMO'99) (Кардіфф, Великобританія, 1999); 44-й та 47-й Щорічних конференціях з магнетизму та магнітних матеріалів (MMM'99) (Сан-Хосе, США, 1999) та (MMM'2002) (Тампа, Флорида, США, 2002); 8-й Європейській конференції з магнітних матеріалів та їх застосування (EMMA'2000) (Київ, Україна, 2000); Першій та Другій Зеєхаймській конференції з магнетизму (Зеєхайм, Німеччина, 2001, 2004); Міжнародній конференції з нелінійної оптики (NOPTI'2001) (Наймеген, Нідерланди, 2001); Щорічних конференціях міжнародного товариства з оптичної інженерії (SPIE'2002) (Сіетл, США, 2002) та (SPIE'2004) (Сан-Дієго, США, 2004); Щорічній конференції німецького фізичного товариства (DFG) (Регенсбург, Німеччина, 2002); Європейському симпозіумі з фотонних кристалів (Варшава, Польща, 2002); Московському міжнародному

симпозіумі з магнетизму (MISM'2002) (Москва, Росія, 2002); Засіданні робочої групи Лазерного та електрооптичного товариства (IEEE/LEOS Benelux) (Енсхеде, Нідерланди, 2003); Міжнародних конференціях з функціональних матеріалів (ICFM'2003 і ICFM'2005) (Партеніт, Крим, Україна, 2003, 2005); Міжнародній конференції з магнітоелектричної взаємодії в кристалах (MEIPIC-5) (Судак, Крим, Україна, 2003); Літній школі "Теорія функціоналу щільності окрім основного стану" (Ріксгрєнсен, Швеція, 2003); Першому об'єднаному європейському симпозіумі з магнетизму (Дрезден, Німеччина, 2004); 10-й конференції з складних середовищ та метаматеріалів (BIANISOTROPICS'2004) (Гент, Бельгія, 2004); Школі-семінарі "Нові Магнітні Матеріали Мікроелектроніки" (Москва, Росія, 2004); Конференції Товариства з Матеріалознавства (MRS) (Бостон, США, 2004); Проблеми оптики та високо-технологічного матеріалознавства (Київ, Україна, 2004); Міжнародній конференції з оптики поверхонь та меж розподілу (OSI-VI) (Ольборг, Данія, 2005); Першому, Другому та Третньому українсько-корейських семінарах з нанофотоніки та нанофізики (Nanophotonics – Nanophysics 2005, 2006, 2007) (Київ, Україна, 2005, 2007; Сеул, Південна Корея, 2006).

Матеріали дисертації також доповідались та обговорювались на наукових семінарах в ДонФТІ ім. О.О. Галкіна та в Технічному університеті м. Кайзерслаутерн (Німеччина).

Основні результати дисертаційної роботи викладені в 30 наукових публікаціях [A1-A30], серед яких одна глава в колективній монографії (Frontiers in Optical Technology: Materials & Devices, Nova Science Publisher, 2007) [A27], 2 розділи в реферованих збірках доповідей натовських передових дослідницьких семінарів (NATO Advanced Research Workshop, 2003, 2004) [A17,A20], 19 статей в реферованих наукових журналах відповідно до списку ВАК [A1-A3, A6-A8, A10-A14, A18, A19, A22, A24, A26, A28-A30] та 8 статей в збірках праць решти вищенаведених міжнародних конференцій [A4, A5, A9, A15, A10, A21, A23, A25].

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, семи розділів, висновків, додатків та списку літератури, який містить 318 найменувань, включаючи публікації, результати яких складають зміст дисертації. На початку кожного розділу приведено огляд літератури, яка стосується відповідних наукових проблем, а у кінці розділів надані короткі висновки за отриманими результатами.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність тематики дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, які проводились, вказана їх наукова новизна та практична цінність, наведено дані про апробацію роботи та особистий внесок автора, а також коротко описано структуру дисертації.

Перший розділ дисертації має методичний характер, і одержані в ньому результати використовуються далі при вивченні ЕГХ: В першому розділі теоретично досліджено явища відбиття та проходження світла на межі двох напівнескінчених

бігіротропних середовищ. Поширення світла в бігіротропних середовищах описується рішеннями рівнянь Максвелла, які доповнені матеріальними співвідношеннями, де в тензорах діелектричної проникності $\hat{\varepsilon}$ та магнітної сприйнятливості $\hat{\mu}$ враховані не-діагональні компоненти ε' , μ' , індуковані магнітним упорядкуванням.

При поширенні світла скрізь межу розподілу двох бігіротропних середовищ, у випадках подовжньої та полярної МОК амплітуди електричного та магнітного полів падаючих та відбитих хвиль, а також хвиль, що пройшли, пов'язані між собою недиагональними матрицями відбиття \hat{R} та проходження \hat{T} :

$$\begin{pmatrix} E_y^{(r,+)} \\ H_y^{(r,-)} \end{pmatrix} = \hat{R}_{(y)} \begin{pmatrix} E_y^{(I,+)} \\ H_y^{(I,-)} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} E_y^{(t,+)} \\ H_y^{(t,-)} \end{pmatrix} = \hat{T}_{(y)} \begin{pmatrix} E_y^{(I,+)} \\ H_y^{(I,-)} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\hat{R}_{(y)} = \begin{pmatrix} R_{(y)}^{(+,+)} & R_{(y)}^{(+,-)} \\ R_{(y)}^{(-,+)} & R_{(y)}^{(-,-)} \end{pmatrix}, \quad \hat{T}_{(y)} = \begin{pmatrix} T_{(y)}^{(+,+)} & T_{(y)}^{(+,-)} \\ T_{(y)}^{(-,+)} & T_{(y)}^{(-,-)} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

які пов'язують амплітуди $E_y^{(r,+)}$ та $H_y^{(r,-)}$ еліптично поляризованих відбитих ЕМХ в першому середовищі (або амплітуди $E_y^{(t,+)}$ та $H_y^{(t,-)}$ ЕМХ, що пройшли до другого середовища), з амплітудами падаючих еліптично поляризованих хвиль $E_y^{(I,+)}$ та $H_y^{(I,-)}$. В граничному випадку двох немагнітних середовищ, коли недиагональні компоненти тензорів $\hat{\varepsilon}$ та $\hat{\mu}$ дорівнюють нулю, в обох середовищах поширюються дві плоскі ЕМХ, а матриці $\hat{R}_{(y)}$ і $\hat{T}_{(y)}$ стають діагональними, а їх елементи приймають відомий вигляд амплітудних коефіцієнтів Френеля [18]. При поперечній МОК в бігіротропних середовищах електромагнітне випромінювання розділяється на дві незалежні ТЕ- та ТМ- моди, і матриці (2) в цьому випадку стають діагональними.

Одержано аналітичні вирази для компонент матриць відбиття та проходження (2) для трьох основних МОК (подовжньої, полярної та поперечної), обчислено залежності коефіцієнтів відбиття від безрозмірного параметру $k_x c / \omega$ при падінні світла із бігіротропного середовища (ЗП) на межу з ізотропним середовищем (ГТГ), а також у зворотньому напрямку. Показано, що параметри гіротропії ε' та μ' можуть приводити до помітного впливу на діагональні коефіцієнти матриці відбиття (до 1.5% при подовжній МОК та кількох відсотків при полярній МОК). При поперечній МОК вплив ε' та μ' на відбиття світла менш виражений. При переорієнтації вектора намагніченості з напрямку вздовж осі **X** (подовжня МОК) до напрямку вздовж осі **Z** (полярна МОК) зміни діагональних компонент матриці відбиття складають величини порядку 10^{-2} . При переході від полярної МОК (**M** вздовж осі **X**) до поперечної МОК (**M** вздовж осі **Y**) зміна коефіцієнтів матриці відбиття на порядок менше, а саме $\propto 10^{-3}$.

Результати першого розділу дисертації частково опубліковані в статті [A3].

Другий розділ дисертації присвячений теоретичному дослідженню явища ПБВ при відбитті світла від межі розподілу двох бігіротропних середовищ, а також супутнього до нього ЕГХ, який полягає в подовжньому зсуві відбитого променя в напрямку поширення хвилі відносно його положення, що походить з геометричної оптики. При цьому зсув відбитого променя може бути як позитивним (в напрямку поширення відбитої хвилі), так і негативним (в зворотньому напрямку). Розглянуто випадки, що не були досліджені раніш: ПБВ для подовжньої та поперечної МОК та ЕГХ для подовжньої та полярної МОК. Як відомо, на межі двох середовищ для падаючого та заломленого світла виконується закон Снеліуса [18]

$$\frac{\sin \theta_I}{\sin \theta_t} = \frac{n_{2\pm}(\theta_t)}{n_{1\pm}(\theta_I)}, \quad (3)$$

де θ_I та θ_t – кути падіння та заломлення, а $n_{1\pm}(\theta_I)$ та $n_{2\pm}(\theta_t)$ – показники заломлення першого та другого середовища, які в загальному випадку залежать від напрямку поширення ЕМХ; знаки \pm відповідають двом нормальним ЕМХ. Ефект ПБВ віникає тоді, коли для заломленої ЕМХ кут $\theta_t = \pi/2$, що відповідає ситуації $k_{z2} = 0$. При цьому кут θ_I приймає значення кута ПБВ θ_{TIR} і може бути знайденим з рівняння (3):

$$\sin \theta_{TIR}^{\pm(\pm)} = \frac{n_{2\pm}(\pi/2)}{n_{1\pm}(\theta_{TIR})}. \quad (4)$$

В підрозділі 2.2 одержано аналітичні вирази для кутів ПБВ $\theta_{TIR}^{\pm(\pm)}$, які при граничному переході до випадку негіротропних немагнітних середовищ дають відомі вирази $\theta_{TIR} = \arcsin\left[\left(\varepsilon^{(1)}/\varepsilon^{(2)}\right)^{1/2}\right]$ [18]. Чисельні розрахунки кутів ПБВ проведено для межі розподілу бігіротропного та негіротропного середовищ (ЗІГ – ГГГ). Явище ПБВ можливо тільки у випадку падіння світла з оптично більш щільного середовища в оптично менш щільне. Така ситуація реалізується при поширенні світла із ЗІГ в ГГГ, оскільки $n_{YIG} = 2.14$, $n_{GGG} = 1.94$ для $\lambda = 1.15 \mu m$. Згідно з чисельними оцінками, для подовжньої МОК кути ПБВ в ближньому ІЧ діапазоні приймають значення $\theta_{TIR}^+ = 65.025^\circ$, $\theta_{TIR}^- = 65.028^\circ$, а різниця між ними складає $0.18''$, і може бути зафіксованою в експерименті, тоді як при подовжній МОК кути ПБВ для хвиль різних поляризацій практично співпадають ($\theta_{TIR}^+ = \theta_{TIR}^- \approx 65.026^\circ$). Також досліджено залежність кутів θ_{TIR}^+ та θ_{TIR}^- для межі ЗІГ – ГГГ від параметрів гіротропії ε' та μ' магнітного середовища.

Відомо, що ЕГХ є пов'язаним із зміною фази комплексного коефіцієнта відбиття при зміні кута падіння світла, близького до кутів ПБВ [19]:

$$\Delta\hat{X} = \frac{\partial\hat{\phi}}{\partial k_x}, \quad \hat{\phi} = \arctan \left[\frac{\text{Im}(\hat{R}_{(y)})}{\text{Re}(\hat{R}_{(y)})} \right], \quad (5)$$

де $\hat{\phi} = (\arg \hat{R}_{(y)})$ – фаза коефіцієнта відбиття при ПВВ. Таким чином, ЕГХ найбільш ефективно проявляється при значеннях кутів падіння, близьких до критичних, тобто, до кутів ПВВ. Оскільки коефіцієнти відбиття утворюють матрицю розмірності (2×2) (2), то набір зсувів $\Delta\hat{X}$ (5) також уявляє собою матрицю тієї ж вимірності, компоненти якої інтерпретуються як зсув однієї з відбитих хвиль відносно однієї з падаючих.

В підрозділі 2.3 одержано вирази для компонент матриці подовжніх зсувів відбитих променей $\Delta\hat{X}$ та розраховано ЕГХ у випадках полярної та подовжньої МОК для межі розподілу напівнескінченних ЗІГ та ГГГ. Відповідно розрахункам, при наближенні до кутів ПВВ для даних матеріалів зсув Гуса-Хенхена може досягати достатньо великих значень: $\Delta X^{(+,+)} \approx \Delta X^{(-,-)} \approx \Delta X^{(+,-)} \approx (10 \div 120)\lambda_0$ – до кількох десятків довжин хвиль. Вдалині від критичних кутів $\Delta X^{(+,+)} \approx \Delta X^{(-,-)} \approx \Delta X^{(+,-)} \approx (9 \div 1.5)\lambda_0$, що за порядком величини погоджується з відомими теоретичними та експериментальними даними.

Результати, викладені в другому розділі, опубліковані в роботах [A1-A4].

В третьому розділі дисертації розглянуто вплив механічних напружень, які виникають на межі магнітної (немагнітної) плівки, вирощеної на немагнітній підкладинці, на лінійне та нелінійне відбиття світла. Відомо, що при епітаксiальному вирощуванні плівок поблизу меж розподілу локалізуються деформації, зумовлені неспівпадінням параметрів кристалічних ґраток плівки та підкладинки [20]. Товщина напруженого шару може варіюватися в широких межах (від кількох нанометрів до десятків та сотен нанометрів) та визначається параметром невідповідності $f_{(m)} = (a_f - a_s) / a_s$, де a_f та a_s – сталі ґратки плівки та підкладинки, а також пружними параметрами середовищ. Плівка росте псевдоморфним чином до деякої критичної товщини h_c , що залежить від матеріалів плівки та підкладинки. Якщо $f_{(m)}$ та товщина плівки h_f малі, то невідповідність сталих ґраток плівки та підкладинки адаптується тетрагональними напруженнями стиску в плівці (при $a_f > a_s$), або розтягу (при $a_f < a_s$). Ці напруження, що зветься напруженнями невідповідності [20], є однорідними. У випадку, коли товщина плівки перевищує критичне значення h_c , поблизу межі розподілу виникають дислокації невідповідності, наявність яких стає енергетично вигідною, оскільки вони призводять до релаксації напружень деформації в системі плівка-підкладинка [20].

В підрозділі 3.2 з врахуванням пружньо-оптичної взаємодії розглянуто вплив двовісних тетрагональних напружень невідповідності на межі магнітної плівки та немагнітної підкладинки кінцевих розмірів на лінійне відбиття світла у випадку поперечної МОК. Чисельні оцінки параметру невідповідності $f_{(m)}$, критичної товщини

h_c та відносного внеска напружень в коефіцієнт відбиття світла з довжиною хвилі $\lambda_0 = 0.63 \mu m$ проведені для плівки ЗІГ ($a_s = 12.376 \text{ \AA}$) на підкладинці з ГГГ ($a_s = 12.380 \text{ \AA}$) за допомогою рівняння $h_{cf} = b(1 - \nu \cos^2 \beta)(8\pi(1 + \pi)f_m)^{-1} \ln(2h_c/b)$ [20], де ν – коефіцієнт Пуасона, b – модуль вектора Бюргерса. Згідно оцінкам, параметр невідповідності $f_{(m)} = 3.23 \cdot 10^{-4}$, а критична товщина $h_c = 692a_f = 0.857 \mu m$. Методом функцій Гріна отримано аналітичні вирази для електричного поля відбитої ЕМХ та проведено оцінки величини коефіцієнтів відбиття хвиль s - та p -поляризацій $R_{s(p)} = R_{s(p)}^0 + R_{s(p)}^{str}$, де $R_{s(p)}^0$ – амплітудні коефіцієнти відбиття [18] при відсутності напружень, а $R_{s(p)}^{str}$ – індуквані напруженнями добавки. Згідно з чисельними оцінками, для світла видимого діапазону ($\lambda_0 = 0.63 \mu m$) при товщинах шарів ЗІГ та ГГГ $d_f \cong 1 \mu m$ та $d_s \cong 10 \mu m$, відповідно, індукований деформацією внесок у відбиття світла $R_{s(p)}^{str}$ від двошарової структури ЗІГ – ГГГ може досягати 10%.

В підрозділах 3.3 та 3.4 запропоновано феноменологічний опис нелінійного відбиття світла від реальної (при врахуванні напружень та дислокацій невідповідності) межі розподілу плівки та підкладинки за допомогою нелінійного фотопружнього тензора. Такий підхід дозволяє розрізнити внески напружень та дислокацій невідповідності в генерацію ДГ шляхом поляризаційного аналізу розсіяного світла. Тензор напружень може бути поданий у вигляді: $u_{lm}(\mathbf{r}) = u_{lm}^{misfit} \theta(h_c - z) + u_{lm}^{disl} \theta(z - h_c)$, ($\theta(z)$ – функція Хевісайда), де перший доданок описує внесок напружень невідповідності $u_{lm}^{misfit} = f_{(m)} \delta_{lm}$, а другий відповідає дислокаційним напруженням u_{xx}^{disl} , u_{yy}^{disl} , u_{zz}^{disl} , u_{yz}^{disl} . В підрозділах 3.3 та 3.4, відповідно, розглянуті випадки немагнітної та магнітної (при поперечній МОК) плівок на немагнітній підкладинці. Був розглянутий ряд еквідистантних дислокацій невідповідності, розташований вздовж осі \mathbf{Y} , перпендикулярно до площини падіння світла. Магнітний внесок (у випадку магнітної плівки) та внески напружень в генерацію ДГ описані з допомогою нелінійного МО f_{ijkL} та нелінійного фотопружнього p_{ijklm} тензорів, відповідно. В присутності пружних деформацій та намагніченості \mathbf{M} тензор НОС другого порядку може бути поданий у вигляді суми кристалографічної частини тензора НОС $\chi_{ijk}^{(2,0)}$ та доданків, індукованих намагніченістю та деформаціями: $\chi_{ijk}^{(2)} = \chi_{ijk}^{(2,0)} + if_{ijkL} M_L + p_{ijklm} u_{lm}(\mathbf{r})$. Електричне поле на частоті ДГ визначається рішенням хвильового рівняння у наближенні повільно змінюючихся амплітуд:

$$2ik_{2\omega, i} \nabla_l E_l(2\omega, \mathbf{q}) = -\frac{\omega^2}{c^2} \chi_{ijk}^{(2)}(\mathbf{r}) E_j(\omega) E_k(\omega) \exp(i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}), \quad (6)$$

де $q = 2k_\omega - k_{2\omega}$, а k_ω та $k_{2\omega}$ – хвильові вектори світла на фундаментальній частоті та на частоті ДГ, відповідно. Поляризаційний аналіз електромагнітного випромінювання на частоті ДГ дозволяє виділити внесок дислокацій невідповідності як у випадку магнітної, так і немагнітної плівок. Незалежно від поляризації падаючого променя (s - або p -) на фундаментальній частоті ω , сигнал на частоті ДГ $S(2\omega)$ обумовлений тільки дислокаційними напруженнями, що погоджується з експериментальними результатами [16]. Для випадків розсіювання $s(\omega) \rightarrow P(2\omega)$ та $p(\omega) \rightarrow P(2\omega)$ сигнал ДГ визначається як кристалографічним внеском, так і напруженнями невідповідності та дислокаціями невідповідності, а у випадку магнітної плівки – ще й магнітоіндукованим внеском. Інтенсивність сигналу ДГ при геометрії розсіяння $s(\omega) \rightarrow P(2\omega)$ визначається як немагнітним доданком, так і доданком, квадратичним з намагніченості. Для геометрії $p(\omega) \rightarrow P(2\omega)$, окрім вказаних вище двох, з'являється лінійний з намагніченості інтерференційний внесок, що спостерігалось в експериментах з магнітоіндукованої генерації ДГ в плівках ЗГ на підкладинці з ГГГ [21]. Згідно з оцінками, з врахуванням значень деформацій невідповідності та дислокаційних деформацій, індукований напруженнями внесок в генерацію ДГ може досягати 10% від незалежного від напружень сигналу ДГ.

В підрозділі 3.5 досліджено нелінійне пружне розсіювання світла самотньою крайовою дислокацією, орієнтованою вздовж осі \mathbf{Z} , в кубічному магнітному кристалі, намагніченому вздовж осі \mathbf{Y} . Проведено поляризаційний аналіз розсіяного випромінювання на частоті ДГ в магнітному кристалі з дислокацією, та показано можливість спостереження додаткових компонент намагніченості, зумовлених магнітопружною взаємодією, по сигналу $S(2\omega)$.

В підрозділі 3.6 досліджено генерацію ДГ в шаруватій структурі $\text{Pd}/\text{Co}_{0.25}\text{Pd}_{0.75}/\text{Pd}$ на підкладинці з сегнетоелектрика – цирконату титанату свинця (PZT). Сигнал ДГ від такої системи складається з трьох внесків: кристалографічного, а також внесків, обумовлених механічними напруженнями та зворотнім п'єзоелектричним ефектом. Таким чином, тензор НОС має вигляд $\chi_{ijk}^{(2)} = \chi_{ijk}^{(2,0)} + p_{ijklm}u_{lm} + \chi_{ijkl}^{(3,0)}\mathcal{P}_l$, де $\chi_{ijk}^{(2,0)}$ – кристалографічна складова тензору НОС, p_{ijklm} – нелінійний пружньооптичний тензор, u_{lm} – тензор деформації, $\chi_{ijkl}^{(3,0)}$ – тензор НОС третього порядку, відповідаючий за внесок, обумовлений електричним полем, \mathcal{P} – електрична поляризація. Показано, що прикладенням до даної системи відповідної електричної напруги, завдяки зворотньому п'єзоелектричному ефекту, можна добитися виділення в сигналі ДГ внеску, індукованого механічними напруженнями. В експерименті вимірено залежності інтенсивності сигналу ДГ від прикладеної електричної напруги для основних експериментальних геометрій, а також індуковану механічними напруженнями асиметрію сигналу ДГ

$$A_{SHG} = \frac{I^\uparrow(2\omega) - I^\downarrow(2\omega)}{I^\uparrow(2\omega) + I^\downarrow(2\omega)}, \quad (7)$$

де інтенсивності сигналу ДГ $I^\uparrow(2\omega)$ та $I^\downarrow(2\omega)$ відповідають двом протилежним напрямкам внутрішнього електричного поля E^{int} ("догори" та "донизу"). З використанням даних експерименту з виміру індукованого напруженнями сигналу ДГ у шаруватій структурі $\text{Pd}/\text{Co}_{0.25}\text{Pd}_{0.75}/\text{Pd}$ на підкладинці PZT, проведено оцінки величин компонент ефективного нелінійного фотопружнього тензору, які узгоджуються з результатами попередніх обчислень, виконаних на підставі експериментів із ЗІГ.

Основні результати третього розділу дисертації опубліковані в роботах [A5-A10].

В четвертому розділі дисертації досліджено явище НМОД (на частоті ДГ) на одновимірних та двовимірних магнітних структурах. В підрозділі 4.2 розглянуто можливість спостереження НМОД в тонких магнітних плівках із смугастою доменною структурою з періодом $D = d_+ + d_- + 2d_{DW}$ вздовж осі \mathbf{Y} , де d_+ та d_- – товщини МД, намагнічених вздовж осі \mathbf{Z} як в позитивному, так і в негативному напрямках, відповідно, а d_{DW} – товщина ДС, де вектор намагніченості розвертається в площині \mathbf{XOZ} (Рис. 1).

Рис. 1. (а): Фрагмент смугастої доменної структури. Темним тоном виділені доменні стінки, всередині яких стрілками показано напрямок розвороту вектора намагніченості \mathbf{M} ; (б): схематичне зображення нелінійної магнітооптичної дифракції.

Оскільки характерні товщини МД в плівках ЗІГ порядку кількох мікрон, а товщини ДС досягають значень $0.1 \mu\text{m}$, то період структури є порівняним з довжиною ЕМХ як на фундаментальній, так і на подвоєній частоті, то поряд з лінійною МО дифракцією можлива поява НМОД на частоті ДГ. Напрямки спостереження НМОД визначаються з закону Брега для нелінійної дифракції:

$$k_{2\omega} \sin \phi_{2\omega, N} = 2k_{\omega} \sin \phi_{\omega} + NQ, \quad (8)$$

де $k_{2\omega}$ та k_ω – хвильові вектори ЕМХ на частоті ДГ та падаючого випромінювання, ϕ_ω та $\phi_{2\omega}$ – кути падіння та нелінійної дифракції N -го порядку, відповідно. Чисельні оцінки дифракційних порядків та кутів НМОД були зроблені для плівок ЗІГ, середній розмір МД та ДС яких складає $d_+ \approx d_- \approx 2 \mu m$, $d_{DW} \approx 0.1 \mu m$. Показано, що для світла з довжиною хвилі $\lambda_\omega = 0.775 \mu m$, падаючого під кутом $\phi_\omega = 45^\circ$ на плівку ЗІГ із смугастою доменною структурою, можливо спостереження трьох дифракційних порядків НМОД під кутами:

$$\begin{aligned} \phi_{2\omega, 3} = 79.67^\circ, \quad \phi_{2\omega, -3} = 25.48^\circ, \quad \phi_{2\omega, 2} = 63.06^\circ, \\ \phi_{2\omega, -2} = 31.50^\circ, \quad \phi_{2\omega, 1} = 53.06^\circ, \quad \phi_{2\omega, -1} = 37.93^\circ. \end{aligned} \quad (9)$$

Поляризаційний аналіз сигналу на частоті ДГ при НМОД на смугастій доменній структурі дозволяє віділити внесок ДС блохівського типу в геометрії $s(\omega) \rightarrow S(2\omega)$. В геометрії $p(\omega) \rightarrow S(2\omega)$ сигнал ДГ обумовлений сумарним внеском МД та ДС, тоді як в P -складовій сигналу на частоті ДГ ненульові компоненти кристалографічної складової тензора НОС також дають внесок. Приведені в дисертації теоретичні дослідження з НМОД стимулювали постановку відповідних експериментів [15], в яких це явище спостерігалось на одновимірних надструктурах на основі шарів нікелю та кобальту.

В підрозділі 4.3 теоретично досліджено явище НМОД на двовимірних магнітних структурах: гексагональній ґратці ЦМД в плівці ЗІГ, а також на квадратній ґратці пермалоевих магнітних точок субмікронних розмірів. Зроблено оцінки порядків нелінійної дифракції та показано, що НМОД на ґратці ЦМД можлива тільки в геометрії $p(\omega) \rightarrow S(2\omega)$. В підрозділі 4.3 розглянуто розсіювання ДГ самотньою однорідно намагніченою магнітною точкою, а також магнітною точкою з вихровим розподіленням намагніченості. Поляризаційний аналіз сигналу ДГ дозволяє відокремити внесок нормальної та тангенціальної складових вектора намагніченості в магнітній точці.

Відомо, що зовнішнє магнітне поле, прикладене перпендикулярно до плівки, може змінювати період ґратки ЦМД, а також радіус МД. В підрозділі 4.4 вивчено вплив зовнішнього магнітного поля на НМОД від гексагональної ґратки ЦМД та знайдено залежність відносної інтенсивності сигналу ДГ для різних значень зовнішнього магнітного поля. На Рис. 2 показано азимутальні залежності сигналу ДГ для різних значень безрозмірного зовнішнього магнітного поля $\tilde{H} = H_0 / 4\pi M_s$.

Результати четвертого розділу дисертації опубліковані в роботах [A11-A18]. П'ятий розділ дисертації присвячений дослідженню ЗФЗ в одновимірних МФК. В підрозділі 5.2 досліджено МФК на основі шарів бігіротропного ЗІГ та немагнітного ГГГ, що чергуються, і період яких є порівняним з довжиною ЕМХ. Розглянуто різні напрямки намагніченості в шарах ЗІГ, які відповідають полярній, подовжній та поперечній МОК. При розв'язанні задач про знаходження спектрів ЗФЗ в таких МФК

Рис. 2. Азимутальна залежність сигналу ДГ при НМОД для різних значень безрозмірного зовнішнього магнітного поля $\tilde{H} = H_0/4\pi M_s$ та параметрів ґратки ЦМД: (а) $\tilde{H} = 0$, $D/h = 5.08$, $2R/h = 3.75$; (б) $\tilde{H} = 0.08$; $D/h = 4.75$, $2R/h = 3.02$; (с) $\tilde{H} = 0.18$, $D/h = 4.98$, $2R/h = 2.46$; (д) $\tilde{H} = 0.25$, $D/h = 6.92$, $2R/h = 2.17$; (е) $\tilde{H} = 0.275$, $D/h = 16.90$, $2R/h = 2.11$; (ф) – однорідно намагнічена плівка. Радіус лазерної плями складає $R_L = 20h$. Тут h – товщина магнітної плівки. R – радіус магнітного домена, D – період ґратки ЦМД.

було застосовано метод матриці переносу \hat{T} розмірності (4×4) , який приводить у випадках подовжньої та полярної МОК до наступних дисперсійних рівнянь:

$$\cos(q_{1,2}D) = \frac{1}{4} \left[\mathbf{Sp}(\hat{T}) \pm \sqrt{2\mathbf{Sp}(\hat{T}^2) - \mathbf{Sp}^2(\hat{T}) + 8} \right], \quad (10)$$

де q_1 та q_2 – хвильові числа ЕМХ в МФК. Матриця переносу \hat{T} для МФК на основі шарів ЗІГ – ГГГ, що відповідає двокомпонентній елементарній комірниці, має вигляд

$$\hat{T} = \hat{E}_2 \hat{S}_{12}^{-1} \hat{E}_1 \hat{S}_{12}, \quad (11)$$

де \hat{E}_1 та \hat{E}_2 – діагональні матриці, які характеризують зміну фази ЕМХ в межах шарів 1 та 2, а матриці \hat{S}_{12} пов'язують амплітуди електричного та магнітного полів по різні сторони межі суміжних шарів ЗІГ та ГГГ. Для поперечної МОК рівняння (10) спрощуються та приймають вигляд:

$$\cos(q_{TE, TM} D) = \frac{1}{2} \left[\text{Sp} \left(\hat{T}^{(TE, TM)} \right) \right], \quad (12)$$

для TE- та ТМ- мод, відповідно. Показано, що положення та товщини ЗФЗ суттєво залежать як від МОК, так і від напрямку поширення ЕМХ в МФК. У спектрах ЗФЗ для мод правої та лівої еліптичних поляризацій спостерігається асиметрія (Рис. 3), яка найбільш виразно проявляється із зростанням кута падіння світла на МФК.

Рис. 3. Полярна МОК. Залежність безрозмірної частоти ЕМХ $\Omega^\pm D/(2\pi)$ від безрозмірного хвильового числа $k_z D/(2\pi)$ власних мод в МФК за умови $k_y D/(2\pi) = 0.5$ (відповідає куту падіння $\theta \approx \pi/6$). ЕМХ поширюється в площині \mathbf{YZ} . Ліва (а) та права (б) частини рисунка відповідають модам лівої та правої еліптичної поляризації, як показано на вставках. Три найнижчі за частотою ЗФЗ означені номерами 1, 2 та 3.

Також досліджено плівки ЗІГ із смугастою доменною структурою з ДС блохівського та неелівського типів, що перестроюються зовнішнім магнітним полем, які можна розглядати як МФК. В підрозділі 5.3 вивчено можливість управління спектрами ЗФЗ в таких структурах за допомогою зовнішнього магнітного поля, яке змінює відношення товщин МД d_1 та d_2 , що може бути використано для розробки поляризаційно-селективних МО фільтрів, які перестроюються. В даному підрозділі розраховано залежності безрозмірних частот $\Omega^\pm D/(2\pi)$ від безрозмірної компоненти хвильового вектора $k_x D/(2\pi)$ (або $k_y D/(2\pi)$) для смугастої доменної структури з ДС блохівського та неелівського типів при різних відношеннях d_1/d_2 . Ці спектри виразно демонструють зміни числа ЗФЗ, їх положення, товщини та розщеплення при зміні відношення d_1/d_2 , а також, при зміні напрямку поширення ЕМХ. Треба відзначити, що результати, наведені в цьому підрозділі, якісно співпадають з результатами нещодавно опублікованої роботи [17].

Результати п'ятого розділу дисертації опубліковані в роботах [A19-A27].

В шостому розділі дисертації розглянуто одновимірні МФК обмежених розмірів, які містять один або два дефектних магнітних шара, і які відрізняються товщиною від інших магнітних шарів, що призводить до порушення періодичності. Наявність дефектів в МФК зумовлює появу всередині ЗФЗ дефектних мод, які характеризуються піками зі значними величинами коефіцієнтів пропускання.

В підрозділі 6.2 досліджено вплив товщини дефекту на фарадеєвське обертання (ФО) та коефіцієнти проходження ЕМХ з різними поляризаціями скрізь однодефектний МФК із структурою $(NM)^a D_M (MN)^a$, намагніченість якого є перпендикулярною до меж розподілу (полярна МОК). Тут a – число періодів $D = d_1 + d_2$, N – немагнітний шар з ГГГ товщиною d_2 ($n_2 = 1.94$ при $\lambda_0 = 1.15 \mu m$), M – магнітний шар $Bi_{1.43}Y_{1.57}Fe_5O_{12}$ товщиною d_1 ($n_1 = 2.4$ при $\lambda_0 = 1.15 \mu m$), та D_M – додатковий магнітний шар товщиною $d_M = 2md_1 + \delta$, $m = 1, 2, 3, \dots$, δ – магнітна вставка. Таким чином, всередині МФК існує один комплексний магнітний дефектний шар товщиною $2d_1 + d_M$. Було обчислено коефіцієнти проходження світла для МФК такої структури при $\lambda_0 = 1.15 \mu m$ у випадках нормального та похилого падіння. Показано, що у випадку, коли $\delta = 0$, дефектні моди розташовані в центрі ЗФЗ (центральні дефектні моди). З відхиленням δ від нуля дефектні моди зміщуються до країв ЗФЗ (зміщені дефектні моди). Для полярної МОК у випадку похилого падіння ЕМХ правої E_{in}^+ та лівої E_{in}^- циркулярних поляризацій (ПЦП та ЛЦП) не є більш власними модами, і з'являються також недіагональні компоненти матриці проходження:

$$T'^{\pm} = |t'^{\pm}|^2 = \left| \frac{E_{out}^{\mp}}{E_{in}^{\pm}} \right|^2. \quad (13)$$

Показано, що для центральної дефектної моди хвилі ПЦП та ЛЦП є хорошим наближенням власних мод, а недіагональні компоненти $t'^+ \approx t'^-$ малі. Це приводить до того, що відгук на лінійно поляризовану падаючу ЕМХ є близьким до випадку нормального падіння. Для зміщеної дефектної моди величини недіагональних компонент $t'^+ \approx t'^-$ мають значення, порівняні з діагональними t^+ , t^- . В результаті у відгуку на лінійно поляризовану падаючу ЕМХ мінімум ФО не відповідає максимуму коефіцієнта проходження.

В підрозділі 6.3 досліджено характеристики пропускання дводефектного МФК із структурою $(NM)^a D_M (MN)^b MD_M (MN)^a$ для полярної МОК при похилому падінні світла з лінійною або циркулярною поляризацією. Показано, що коефіцієнт пропускання, кут ФО та еліптичність ЕМХ, що пройшла, чутливі до зміни товщини дефектного шару, особливо при похилому падінні світла. В роботі показано, що, на відміну від однодефектного МФК, в дводефектному МФК можливо поєднання великих значень коефіцієнта проходження T та кута ФО. Наслідком цього є той факт, що МФК з центральними дефектними модами зберігають хороші характеристики проходження

навіть при достатньо великих значеннях кутів падіння. Таким чином, похиле падіння може бути використано для точної настройки кута Φ_0 у фарадеевських обертачах. У випадку похилого падіння світла, на відміну від центральних дефектних мод, зміщені дефектні моди суттєво спотворені, тому при використанні похилого падіння ЕМХ товщину дефектного шару треба вибирати з високою точністю.

Результати шостого розділу опубліковано в роботах [A27, A28].

В цьому розділі дисертації наведено результати обчислень з перших принципів нелінійного МО відгуку багат шарових феромагнітних структур $[Ni(1ML)/Cu(1ML)]_x$ із зростаючим числом періодів $x=1, 2, 3, 4$ при напрямках вектора намагніченості вздовж шарів ($\mathbf{M} \parallel \mathbf{X}$) та перпендикулярно до поверхні ($\mathbf{M} \parallel \mathbf{Z}$). Також досліджено вплив мідної підкладки (товщиною від 1 до 5 моношарів), що пошарово росте, на нелінійний МО відгук структури $Ni/[Cu(001)]_x$. Розрахунки проведено з використанням методу FLAPW, застосованого у програмних пакетах *WIEN'97* [13] та *WIEN2k* [14]. В підрозділі 7.2 викладено теоретичні основи та методи розрахунку спектрів тензора НОС, інтенсивності сигналу ДГ, його азимутальної залежності, а також нелінійного ефекту Кера. Відомо, що нелінійний МО ефект Кера є комбінованим результатом спіно-орбітальної та обмінної взаємодій. Таким чином, в методах розрахунку нелінійного МО відгуку дуже важливим є як коректне врахування спіно-орбітальної взаємодії, так і обчислення з високою точністю хвильових функцій станів $|\mathbf{k}, l\rangle$ (\mathbf{k} – хвильовий вектор електрона, l – орбітальне квантове число). Ці хвильові функції служать для подальшого обчислення матричних елементів дипольних переходів $\langle \mathbf{k}, l | \mathbf{r}_j | \mathbf{k} + \mathbf{q}, l' \rangle$ (\mathbf{q} – хвильовий вектор фотона, l, l' – орбітальні квантові числа, \mathbf{r} – оператор координати), які входять у вирази для компонент тензора НОС $\chi_{ijk}^{(2)}$ у вигляді добутків. Спіно-орбітальна взаємодія враховувалась при обчисленнях двома різними способами: по-перше, методом теорії збурень, та по-друге, варіаційним методом (second variational treatment), в межах самоузгодженої процедури знаходження хвильових функцій та власних енергій систем [14, 22]. При першому способі спочатку проводились обчислення зонної структури за допомогою пакета програм *WIEN'97* без врахування спіно-орбітальної взаємодії в самоузгодженій процедурі обчислення хвильових функцій (тому що *WIEN'97* не дозволяє зробити це коректним чином), та далі врахування спіно-орбітальної взаємодії проводилось методом теорії збурень. Другий спосіб був застосований з появою нової, удосконаленої, версії *WIEN*-кода – *WIEN2k*, і обчислення хвильових функцій та власних енергій було зроблено з включенням спіно-орбітальної взаємодії в самоузгоджений процес знаходження основного стану даних систем [14, 22]. В рамках наближення надкомірки за допомогою пакетів програм *WIEN'97* та *WIEN2k* було розраховано хвильові функції та зонну структуру для подальшого обчислення спектрів НОС $\chi_{ijk}^{(2)}$. Поле відбитої ЕМХ на частоті 2ω обчислено на основі моделі поверхневого шару (surface-sheet model) [23], а результуючі інтенсивності ДГ, їхні азимутальні залежності, спектри тензора НОС та кути нелінійного керо-обертання приведено для випадків подовжньої та полярної МОК. В підрозділі 7.3 приведено результати чисельних розрахунків шаруватих структур

$[Ni(1ML)/Cu(1ML)]_x$ та $Ni/[Cu(001)]_x$. Результати демонструють виразну відміну нелінійного відгуку структур $[Ni(1ML)/Cu(1ML)]_x$, моделюючих зро стання надгратки, із зростанням числа двошарових комірок x від 1 до 4, також, як і в випадку моношару нікелю на зростаючій підкладинці. Проведено порівняння цих результатів з даними для $Ni/Cu(001)$, одержаними у попередній роботі [A29] на основі програми WIEN'97. Показано, що магнітоіндуковані компоненти тензорів $\chi_{ijk}^{(2)}$ у випадку намагнічування, перпендикулярного до поверхні шарів, менше немагнітних компонент всього на один порядок (Рис. 4).

Рис. 4. Спектральна залежність $\text{Im}(\chi_{ijk}^{(2)})$ для структури $[Ni(1ML)/Cu(1ML)]_x$, $x=1, 2, 3, 4$ у випадку $\mathbf{M} \parallel \mathbf{Z}$.

У випадку намагнічування у площині шарів деякі з магнітоіндукованих компонент тензора $\chi_{ijk}^{(2)}$ в певних інтервалах спектру ЕМХ можуть приймати значення, порівняні із значеннями немагнітних компонент, що свідчить про вагомий внесок магнітної підсистеми в нелінійний оптичний відгук. Одержані результати підтверджують високу

чутливість методів нелінійної оптики до поверхонь, меж розподілу та магнітних властивостей середовищ на рівні моношарів.

Результати сьомого розділу опубліковано в роботах [A29, A30].

В Додатки винесено найбільш громіздкі результати розрахунків з першої та третьої глав дисертації.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі проведено цілеспрямовані дослідження лінійних та нелінійних магнітооптичних (МО) явищ в неоднорідних магнітних середовищах (тонких плівках з надструктурами, шаруватих середовищах та магнітофотонних структурах, на реалістичних межах розподілу плівки та підкладинки). Основні результати дисертації полягають в наступному:

1. Вперше проведено дослідження повного внутрішнього відбиття (ПВВ) світла на межі розподілу двох бііротропних середовищ у випадках подовжньої та поперечної магнітооптичних конфігурацій (МОК). Обчислені значення кутів ПВВ для межі розподілу бііротропного залізо-ітрієвого (ЗІГ) та немагнітного гадоліній-галієвого гранатів (ГГГ) показують, що в подовжній МОК, на відміну від поперечної, кути ПВВ можуть бути розрізнені в експерименті.
2. Вперше проведено дослідження ефекта Гуса-Хенхена (ЕГХ) на межі бііротропних середовищ для полярної та подовжньої МОК. Чисельні оцінки ЕГХ для межі ЗІГ та ГГГ показують, що подовжній зсув відбитого променя може досягати кількох десятків довжин хвиль падаючого світла.
3. Вперше теоретично досліджено нелінійну магнітооптичну дифракцію (НМОД) на частоті другої оптичної гармоніки (ДГ) та наведено оцінки кутів та параметрів дифракції на одновимірних та двовимірних магнітних надструктурах: смугастій доменній структурі, квадратній ґратці магнітних точок та гексагональній ґратці циліндричних магнітних доменів (ЦМД). Поляризаційний аналіз сигналу ДГ дозволяє: виділити внесок нормальних та тангенціальних складових вектора намагніченості в магнітних точках; виділити внесок доменних стінок (геометрія $s(\omega) \rightarrow S(2\omega)$) та магнітоіндукований внесок в сигнал ДГ при НМОД (геометрія $p(\omega) \rightarrow S(2\omega)$) на смугастій доменній структурі; виділити магнітоіндукований внесок в сигнал ДГ при НМОД на гексагональній ґратці ЦМД; а також визначити тип магнітного упорядкування в плівці. Висока чутливість сигналу випромінювання на частоті 2ω при НМОД на гексагональній ґратці ЦМД, її азимутальної залежності та кутів дифракції до зовнішнього магнітного поля свідчать про можливість управління НМОД.
4. Вперше з врахуванням пружньооптичної взаємодії досліджено внесок напружень невідповідності (НН) на межі магнітної плівки на немагнітній підкладинці в лінійне відбиття світла, а також вплив НН та дислокацій невідповідності (ДН) на генерацію ДГ магнітною (немагнітною) плівкою на немагнітній підкладинці. Поляризаційний аналіз сигналу ДГ дозволяє виділити внесок ДН на межі плівки та підкладинки. Згідно з оцінками, внесок НН та ДН в сигнал ДГ досягає 10%.

Показано, що S -поляризований сигнал ДГ $S(2\omega)$ в геометрії $s(\omega) \rightarrow S(2\omega)$ зумовлений тільки ДН та може бути критерієм їх присутності, що вказує на перевищення плівкою критичної товщини.

5. Вперше проведено теоретичне вивчення спектрів заборонених фотонних зон (ЗФЗ) для одновимірних магнітних фотонних кристалів (МФК) на основі шарів ЗІГ та ГГГ для трьох основних МОК, і продемонстрована можливість управління ЗФЗ при переорієнтації вектора намагніченості в магнітних шарах. Також вперше показано, що плівки ЗІГ із смугастими доменними структурами можуть використовуватись як одновимірні МФК, що перестроюються зовнішнім магнітним полем.
6. Вперше досліджено вплив кута падіння електромагнітної хвилі та товщини дефектних шарів на МО характеристики проходження для одновимірних МФК з одним та двома дефектними шарами. Проведений аналіз поведінки дефектних мод дозволяє зробити висновок про те, що у дводефектному МФК, на відміну від однодефектного, можливо поєднання великого коефіцієнта проходження та кута фарадеевського обертання, що робить такі МФК перспективними для застосування у магнітофотонних пристроях. Оптимізація характеристик МФК може також досягатись за рахунок змінювання кута падіння світла.
7. Вперше проведено розрахунки з перших принципів нелінійного МО відгуку від поверхонь надтонких феромагнітних надструктур: зростаючої надгратки $[Ni(1ML)/Cu(1ML)]_x$, намагніченої як в площині шарів, так і нормально до поверхонь. Також досліджено вплив товщини мідної підкладки на нелінійний відгук системи $Ni/[Cu(001)]_x$. Одержані чисельні результати для всіх вищезгаданих структур показують, що магнітоіндуковані компоненти тензора НОС $\chi_{ijk}^{(2)}$ можуть досягати 10% від величин немагнітних компонент, а в деяких випадках мати порівняні з ними значення, що підкреслює важливу роль магнітних властивостей в нелінійній оптиці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т.8. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 624 с.
2. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений. – М.: Издательство МГУ, 1985. – 336 с.
3. Nonlinear Optics in Metals, edited by K.H. Bennemann. Oxford: Clarendon Press, 1998. – 486 p.
4. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. – М.: Мир. 1989. – 560 с.
5. Любчанский И.Л. Поляритоны и нелинейные оптические эффекты в магнитоупорядоченных кристаллах: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук // Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины. – Донецк, 1996. – 25 с.
6. Zvezdin A.K., Kotov V.A. Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials. – Bristol: Institute of Physics Publishing. 1997. – 385 p.

7. Sugano S., Kojima N. *Magneto-optics*. – Berlin: Springer. 2000. – 352 p.
8. Еременко В.В., Харченко Н.Ф., Литвиненко Ю.Г., Науменко В.М. *Магнитооптика и спектроскопия антиферромагнетиков*. – К.: Наукова думка, 1989. – 262 с.
9. Kleeman W. *Magneto-optical Materials*, In: *Handbook on Magnetism and Magnetic Materials* (H. Kronmuller, S. Parkin eds.), J. Wiley & Sons, – 2007. – P. 2327-2362.
10. Visnovsky S. *Optics in Magnetic Multilayers and Nanostructures*. – CRC Press, 2007. – 560 p.
11. Aktsipetrov O.A., Braginskii O.V., and Esikov D.A. Nonlinear optics of gyrotropic media: second harmonic generation in rare-earth iron garnets // *Sov. J. Quantum Electron.* – 1990. – Vol. 20, № 3. – P. 259-263.
12. Павлов В.В. *Нелинейные магнитооптические явления в кристаллах и пленках: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук // Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской Академии Наук*. – Санкт-Петербург. 2007. – 33 с.
13. Blaha P., Schwarz K. and Luitz J., WIEN97, A Full Potential Linearized Augmented Plane Wave Package for Calculating Crystal Properties. (Karlheinz Schwarz, Vienna, 1999).
14. Blaha P., Schwarz K., Madsen G.K.H., Kvasnicka D. and Luitz J. WIEN2k, An Augmented Plane Wave + Local Orbitals Program for Calculating Crystal Properties. (Karlheinz Schwarz, Wien. 2001).
15. Lazarenko S.V., Kirilyuk A., Rasing Th., and Lodder J.C. Linear and nonlinear magneto-optical diffraction from one-dimensional periodic structures // *J. Appl. Phys.* – 2003. – Vol. 93, № 10. – P. 7903-7905.
16. Jänke V., Gütde J., Matthias E. Growth and magnetic ordering of Ni and Co films on Rh(001) investigated with second-harmonic generation // *J. of Magn. Magn. Mater.* – 2001. – Vol. 232, № 1-2. – P. 27-35.
17. Семенцов Д.И., Степанов М.М. Фотонный спектр магнитогиротропных плоскостных структур // *ФТТ*. – 2008. – Vol. 50, № 3. – P. 431-435.
18. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* М.:Наука, 1970, – 856 с.
19. *Волноводная оптоэлектроника: Пер. с англ. / Под ред. Т.М. Тамира* – М.:Мир, 1991. – 557 с.
20. Jain S.C, Harker A.H., Cowley R.A. Misfit strain and misfit dislocations in lattice mismatched epitaxial layers and other systems // *Phil. Mag. A*. – 1997. – Vol. 75, № 6. – P. 1461-1515.
21. Pavlov V.V., Pisarev R.V., Kirilyuk A. and Rasing Th. Observation of a Transversal Nonlinear Magneto-Optical Effect in Thin Magnetic Garnet Films // *Phys. Rev. Lett.* – 1997. – Vol. 78, № 10. – P. 2004-2007.
22. Singh D.J. *Planewaves, Pseudopotentials and The LAPW Method*. – Boston: Kluwer Academic Publisher, 1994. – 115 p.
23. Sipe J.E., Moss D.J., and van Driel H.M. Phenomenological theory of optical second- and third-harmonic generation from cubic centrosymmetric crystals // *Phys. Rev. B*. – 1987. – Vol. 35, № 3. – P. 1129-1141.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- A1. Borisov S.B., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii I.L., Lyubchanskii M.I. Total internal reflection of light from the interface of bigyrotropic magnetic media // J. Magn. Soc. Jpn. – 1996. – Vol. 20, Supplement № SI. – P. 109-111.
- A2. Борисов С.Б., Дадоевкова Н.Н., Любчанский И.Л., Любчанский М.И. Полное внутреннее отражение света от границы раздела кубических бигиротропных сред, намагнитенных в плоскости границы раздела // Опт. и Спектр. – 1997. – Т. 82, № 2. С. 310-315.
- A3. Борисов С.Б., Дадоевкова Н.Н., Любчанский И.Л., Любчанский М.И. Эффект Гуса-Хенхена при отражении света от границы раздела бигиротропной и негиротропной сред // Опт. и Спектр. – 1998. – Т. 85, № 2. – С. 246-252.
- A4. Borisov S.B., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii I.L., Lyubchanskii M.I. Theory of Goos-Haenchen effect at the reflection of light from bigyrotropic interface // Proceedings of BIANISOTROPICS'97 International conference and Workshop on Electromagnetics and Complex Media, (Ed. by W. S. Weinglhofer). – University of Glasgow, Great Britain. – 5-7 June 1997. – P. 97-100.
- A5. Dadoenkova N.N., Lyubchanskii I.L., Lyubchanskii M.I., Poymanov V.D. Reflection of light from real magnetic-nonmagnetic (chiral-achiral) interface // Proceedings of BIANISOTROPICS'98, 7th International Conference on Complex Media, (Ed. by A. F. Jacob and J. Reinert). – Technische Universität of Braunschweig, Germany. – 3-6 June 1998. – P. 101-104.
- A6. Dadoenkova N.N., Lyubchanskii I.L., Lyubchanskii M.I., Rasing Th. and Shin S.-Ch. Misfit Strain Induced Reflection of Light from Magnetic-Nonmagnetic Interfaces // J. of Magnetism. – 2000 – Vol. 5, № 1. – P. 1-3.
- A7. Lyubchanskii I.L., Jeong J.-W., Shin S.-Ch., Dadoenkova N.N. and Lyubchanskii M.I. Influence of lattice mismatch on magnetization-induced optical second harmonic generation from a magnetic film on a nonmagnetic substrate // J. Appl. Phys. – 2000. – Vol. 87, № 9. – P. 6794-6796.
- A8. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.I., Rasing Th., Jeong J.-W., and Shin S.-Ch. Second-harmonic generation from realistic film-substrate interfaces: The effect of strain // Appl. Phys. Lett. – 2000. – Vol. 76, № 14. – P. 1848-1850.
- A9. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.I. Second Harmonic Light Scattering by the Edge Dislocation in Magnetic Crystal // Proceedings of BIANISOTROPICS'2000, 8th International Conference on Electromagnetics and Complex Media, (Ed. by A.M. Barbosa and A.L. Topa). – Lisbon, Portugal. – 27-29 September 2000. – P. 99-102.
- A10. Jeong J.-W. and Shin S.-Ch., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii I.L., Valev V.K. and Rasing Th. Direct observation of controlled strain-induced second harmonic generation in $Co_{0.25}Pd_{0.75}$ thin film on $Pb(ZrTi)O_3$ substrate // Appl. Phys. Lett. – 2007. – Vol. 90, № 4. – 044108.
- A11. Dadoenkova N.N., Lyubchanskii I.L., Lyubchanskii M.I., and Rasing Th. Nonlinear Optical Diffraction from Periodic Domain Structures in Magnetic Films // J. Magn. Soc. Jpn. – 1999. – Vol. 23, Supplement №S1. – P. 137-138.

- A12. Dadoenkova N.N., Lyubchanskii I.L., Lyubchanskii M.I., and Rasing Th. Nonlinear magneto-optical diffraction from periodic domain structures in magnetic films // *Appl. Phys. Lett.* – 1999. – Vol. 74, №13. – P. 1880-1882.
- A13. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.L., Shapovalov E.A., Zabolotin A.E., Guslienko K.Y., Rasing Th. Nonlinear Magneto-optical Diffraction by Two-dimensional Magnetic Superstructures // *Appl. Phys. B.* – 2002. – Vol. 74, № 7-8. – P. 711-714.
- A14. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.I., Guslienko K.Y., and Rasing Th. Second Harmonic Light Scattering by Magnetic Dots // *Phys. Stat. Sol. (A)* – 2002. – Vol. 189, № 3. – P. 989-994.
- A15. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.L., Shapovalov E.A., Rasing Th., and Lakhtakia A. Magnetic films with periodically striped-domains as tunable photonic crystals // *Proceedings of SPIE 2002 – The International Society for Optical Engineering. Complex Mediums III: Beyond Linear Isotropic Dielectrics.* 8-12 July 2002. Siettle, USA. – Vol. 4806. – P. 302-306.
- A16. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.I., Shapovalov E.A., and Rasing Th. Nonlinear magneto-optical diffraction by periodic domain structures // *Proceedings of 8th Annual Symposium of the IEEE/LEOS Benelux Chapter – 2003*, (Ed. by Ridder R. M. et al.) – University of Twente: Twente, The Netherlands, 2003. – P. 229-232.
- A17. Dadoenkova N.N., Lyubchanskii I.L., Lyubchanskii M.I., Shapovalov E.A., Zabolotin A.E., and Rasing Th. Nonlinear Magneto-optical Diffraction by Periodic Magnetic Domain Structure: Effect of Magnetic Field // *In: Magnetolectric Interaction Phenomena in Crystals.* (Ed. by M. Fiebig et al.) – Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 2004 – P. 181-191.
- A18. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.I., Shapovalov E.A., Zabolotin A.E., and Rasing Th. Nonlinear Diffraction by Two-Dimensional Magnetic Photonic Crystal (Magnetic Bubble Lattice) // *Trans. Magn. Soc. Japan.* – 2002. – Vol. 2, № 4. – P. 160-162.
- A19. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.I., Shapovalov E.A., and Rasing Th. Magnetic photonic crystals // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2003. – Vol. 36, № 18. – P. R277-R287.
- A20. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.I., Shapovalov E.A., Rasing Th., and Lakhtakia A. Photonic band gap effects in magnetic film with periodically striped domain structure // *In: Advances in Electromagnetics of Complex Media and Metamaterials.* (Ed. by S. Zouhdi et al.) – 2003. – P. 157-174.
- A21. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.I., Shapovalov E.A., and Rasing Th. Bigyrotropic magnetic photonic crystals // *Proceedings of 8th Annual Symposium of the IEEE/LEOS Benelux Chapter – 2003*, (Ed. by Ridder R.M. et al.) – University of Twente: Twente, The Netherlands, 2003. – P. 261-264.
- A22. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.I., Shapovalov E.A., Lakhtakia A., and Rasing Th. One-dimensional bigyrotropic magnetic photonic crystals // *Appl. Phys. Lett.* – 2004. – Vol. 85, №24. – P. 5932-5934.

- A23. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.I., Shapovalov E.A., Lakhtakia A., and Rasing Th. Bigyrotropic photonic crystals. // Proceedings of SPIE 2004 – The International Society for Optical Engineering. Complex Mediums V: Light and Complexity. Colorado, USA. – Vol. 5508. – P. 184-191.
- A24. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.I., Shapovalov E.A., Lakhtakia A., and Rasing Th. Spectra of bigyrotropic magnetic photonic crystals // Phys. Stat. Sol. (A). – 2004. – Vol. 201, № 15. – P. 3338-3344.
- A25. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.I., Shapovalov E.A., Lakhtakia A., and Rasing Th. One-dimensional bigyrotropic magnetic photonic crystals // Proceedings of the 10th Conference on Complex Media and Metamaterials (BIANISOTROPICS'2004), – Ghent University: Ghent, Belgium, 2004. – P. 114-117.
- A26. Dadoenkova N.N., Lyubchanskii I.L., Lyubchanskii M.I., Shapovalov E.A., Zabolotin A.E., Rasing Th. Influence of magnetic field on nonlinear magneto-optical diffraction by two-dimensional hexagonal magnetic bubble lattice // J. Opt. Soc. Am. B. – 2005. – Vol. 22, № 1. – P. 215-218.
- A27. Dadoenkova N.N., Lyubchanskii I.L., Lyubchanskii M.I., Shapovalov E.A., and Lee Y.P. One-Dimensional Bigyrotropic Magnetic Photonic Crystals: Non-Defect and Defect Structures // In: Frontiers in Optical Technology: Materials & Devices. – Nova Science Publisher, 2007. – P. 22-72.
- A28. Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.I., Shapovalov E.A., and Zabolotin A.E., Lee Y.P., Rasing Th. Response of two-defect magnetic photonic crystals to oblique incidence of light: Effect of defect layer variation // J. Appl. Phys. – 2006. – Vol. 100, № 9. – 096110.
- A29. Dadoenkova N.N., Andersen T., Hubner W. Nonlinear surface magneto-optics of ferromagnetic *Ni/Cu(001)* from first principles // Appl. Phys. B. – 2002. – Vol. 74, № 7-8. – P. 705-709.
- A30. Dadoenkova N.N., Andersen T., Hubner W. First-Principles Calculation of Nonlinear Surface Magneto-Optical Response of a Ferromagnetic Multilayer // Phys. Scripta – 2004. – Vol. T 109. – P. 174-179.

АННОТАЦИЯ

Дадоеенкова Н.Н. Магнитооптические явления в пространственно неоднородных магнитных средах. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.11 – магнетизм. – Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины, Донецк, 2008.

В диссертации представлены результаты теоретических исследований пространственно неоднородных магнитных сред методами линейной и нелинейной магнитооптики. На границах раздела магнитных бигиротропных сред проведено исследование таких эффектов, как полное внутреннее отражение света и эффект Гуса-Хенхена, при различных магнитооптических конфигурациях (МОК). Рассчитаны матрицы коэффициентов отражения и прохождения электромагнитных волн для границы раздела двух бигиротропных сред при продольной, полярной и поперечной МОК. Расчеты продоль-

ного смещения отраженного луча и углов полного внутреннего отражения выполнены для границы железо-иттриевого (ЖИГ) и гадолиний-галлиевого гранатов (ГГГ).

Исследовано линейное и нелинейное (на частоте второй оптической гармоники (ВГ)) отражение света от магнитных и немагнитных пленок на немагнитных подложках с учетом механических напряжений несоответствия (НН), а также дислокаций несоответствия (ДН) вблизи границы пленки и подложки. Численные оценки параметра несоответствия, критической толщины пленки и относительного вклада напряжений в линейный коэффициент отражения света видимого диапазона проведены для пленки ЖИГ на подложке из ГГГ. Предложено феноменологическое описание нелинейного отражения света от реалистической (при учете НН и ДН) границы раздела пленки и подложки с помощью нелинейного фотоупругого тензора. Такой подход позволяет различить вклады НН и ДН в генерацию ВГ посредством поляризационного анализа сигнала на удвоенной частоте. Поляризационный анализ электромагнитного излучения на частоте ВГ позволяет выделить вклад ДН как в случае магнитной, так и немагнитной пленок. Независимо от поляризации падающего луча (s - или p -) на фундаментальной частоте ω сигнал на частоте ВГ $S(2\omega)$ обусловлен только ДН, что согласуется с экспериментальными результатами.

Предсказано и исследовано явление нелинейной магнитооптической дифракции (НМОД) на частоте ВГ на одномерных и двумерных периодических магнитных структурах, а именно: на полосовой доменной структуре, гексагональной решетке цилиндрических магнитных доменов (ЦМД), квадратной решетке магнитных точек. Проведены расчеты углов НМОД на полосовой доменной структуре и сделаны оценки порядков НМОД при дифракции на двумерных магнитных структурах. Также исследовано влияние внешнего магнитного поля на НМОД от гексагональной решетки ЦМД. Результаты теоретических работ по НМОД на одномерных магнитных структурах, представленные в диссертации, получили экспериментальное подтверждение. Поляризационный анализ сигнала ВГ при НМОД позволяет выделить вклад доменных стенок (в геометрии $s(\omega) \rightarrow S(2\omega)$) и суммарный магнитоиндуцированный вклад в сигнал ВГ (геометрия $p(\omega) \rightarrow S(2\omega)$) на полосовой доменной структуре и гексагональной решетке ЦМД, а также указать тип магнитного упорядочения в пленке. Высокая чувствительность сигнала ВГ при НМОД на гексагональной решетке ЦМД, ее азимутальной зависимости и углов дифракции от внешнего магнитного поля свидетельствует о возможности управления НМОД.

В диссертации проведено подробное исследование спектров запрещенных фотонных зон (ЗФЗ) одномерных магнитных фотонных кристаллов (МФК) на основе чередующихся слоев бигиротропного ЖИГ и немагнитного ГГГ. Для указанного вида МФК при разных МОК изучена зависимость положения и ширины ЗФЗ от направления распространения электромагнитного излучения. Показано, что полосовые доменные структуры с доменными стенками как блоховского, так и неелевского типов, могут рассматриваться как перестраиваемые внешним магнитным полем МФК.

Исследовано влияние угла падения электромагнитной волны и толщины дефектных слоев на магнитооптические характеристики прохождения (коэффициент прохождения, угол фарадеевского вращения и эллиптичность) для одномерных МФК конеч-

них размеров с одним и двумя дефектными магнитными слоями. Проведенный анализ поведения дефектных мод позволяет сделать вывод о том, что в двухдефектном МФК, в отличие от однодефектного, возможно сочетание больших значений коэффициента прохождения и угла фарадеевского вращения.

Проведены расчеты из первых принципов нелинейного магнитооптического отклика от поверхностей следующих ультратонких ферромагнитных сверхструктур: монослоя никеля на монослое меди $Ni/Cu(001)$ и растущей сверхрешетки $[Ni(1ML)/Cu(1ML)]_x$, намагниченных в плоскости слоев и нормально к слоям. Также изучено влияние толщины медной подложки на нелинейный магнитооптический отклик системы $Ni/[Cu(001)]_x$. Полученные численные результаты для всех перечисленных структур показывают, что магнитоиндуцированные компоненты тензора нелинейной оптической восприимчивости $\chi_{ijk}^{(2)}$ могут достигать до 10% величины немагнитных компонент, а в некоторых случаях иметь сравнимые с ними значения, что подчеркивает важную роль магнитных свойств в нелинейной оптике.

Ключевые слова: магнитооптика, нелинейная оптика, генерация второй оптической гармоники, неоднородные магнитные среды, полосовые доменные структуры, сверхрешетки, нелинейная магнитооптическая дифракция, магнитные фотонные кристаллы.

АНОТАЦІЯ

Дадосенкова Н. М. Магнітооптичні явища в просторово неоднорідних магнітних середовищах. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізикоматематичних наук за спеціальністю 01.04.11 – магнетизм. – Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна НАН України, Донецьк, 2008.

В дисертації наведені результати теоретичних досліджень просторово неоднорідних магнітних середовищ методами лінійної та нелінійної магнітооптики. Проведено дослідження повного внутрішнього відбиття світла та ефекту Гуса-Хенхена для межі розподілу залізо-ітрієвого (ЗІГ) та гадоліній-галієвого гранатів (ГГГ) при різних магнітооптичних конфігураціях (МОК). Досліджено лінійне та нелінійне відбиття електромагнітної хвилі (ЕМХ) від магнітних та немагнітних плівок на підкладках з врахуванням механічних напружень невідповідності, а також дислокацій невідповідності поблизу межі плівки та підкладки. Запропоновано феноменологічний опис нелінійного відбиття ЕМХ від реалістичної межі розподілу плівки на підкладці за допомогою нелінійного фотопружнього тензора. Передбачено та досліджено явище нелінійної магнітооптичної дифракції (НМОД) на одновимірних та двовимірних періодичних магнітних структурах. Досліджено вплив зовнішнього магнітного поля на НМОД від гексагональної ґратки циліндричних магнітних доменів. Проведено детальне дослідження спектрів заборонених фотонних зон (ЗФЗ) одновимірних магнітних фотонних кристалів (МФК) на основі шарів бігіротропного ЗІГ та немагнітного ГГГ. Доведено, що смугасті доменні структури можуть розглядатись як одновимірні МФК, що перестроюються зовнішнім магнітним полем. Досліджено вплив кута падіння ЕМХ та товщини дефектних шарів на оптичні характеристики проходження ЕМХ для одно-

вимірних МФК з одним та двома дефектними магнітними шарами. З перших принципів розраховано нелінійний магнітооптичний відгук від поверхонь надтонких ферромагнітних надструктур: зростаючої надгратки $[Ni(1ML)/Cu(1ML)]_x$, намагніченої як в площині шарів, так і нормально до поверхонь. Також досліджено вплив товщини мідної підкладки на нелінійний магнітооптичний відгук системи $Ni/[Cu(001)]_x$.

Ключові слова: магнітооптика, нелінійна оптика, генерація другої оптичної гармоніки, неоднорідні магнітні середовища, смугасті доменні структури, надгратки, нелінійна магнітооптична дифракція, магнітні фотонні кристали.

SUMMARY

Dadoenkova N.N. Magneto-optical Effects in Space-Inhomogeneous Magnetic Media. – Manuscript. Thesis for a competition of doctor science degree in physics and mathematics, 01.04.11 speciality – magnetism. – Donetsk Institute for Physics and Technology named after A.A. Galkin of NAS of Ukraine, Donetsk, 2008.

In the thesis the results of theoretical investigations of space-inhomogeneous magnetic media by the methods of linear and nonlinear magneto-optics are presented. The total internal reflection and Goos-Hänchen effect are studied at the boundary of iron-yttrium (YIG) and gadolinium-gallium (GGG) garnets for different magneto-optical configurations (MOC). Linear and nonlinear light reflection from magnetic and nonmagnetic films on nonmagnetic substrates is presented taking into account both misfit strains and misfit dislocations at the film and substrate interface. The phenomenological description of nonlinear light scattering from the realistic boundary is proposed using the nonlinear photoelastic tensor. The effect of nonlinear magneto-optical diffraction (NMOD) from one-dimensional and two-dimensional magnetic structures, namely, from the laminar domain structure, hexagonal bubble lattice and square lattice of magnetic dots, is predicted and investigated. The influence of the external magnetic field on NMOD from the hexagonal bubble lattice is investigated as well. The high sensitivity of NMOD to the external magnetic field gives possibility of its magnetic control. The detailed investigation of the photonic band gap PBG spectra of one-dimensional magnetic photonic crystals (MPCs) created on basis of the alternating bigyrotropic magnetic YIG and nonmagnetic GGG layers is performed. It is shown that the striped domain structures with the domain walls can be considered as magnetically tunable MPCs. The influence of the incidence angle of the electromagnetic wave and the defect layer thickness on the magneto-optical transition characteristics for the limited one-dimensional MPCs with one and two defect magnetic layers is investigated. The ab-initio calculations of the nonlinear surface magneto-optical response from the ultrathin ferromagnetic structures, such as the growing superlattice $[Ni(1ML)/Cu(1ML)]_x$ with in-plane and out-of-plane magnetization, is performed using the full-potential linearized plane wave (FLAPW) method. This method is also employed for studying of influence of the growing Cu-substrate on the nonlinear magneto-optical response of the Ni-monolayer in system $Ni/[Cu(001)]_x$.

Key words: magneto-optics, nonlinear optics, second harmonic generation, inhomogeneous magnetic media, striped domain structures, superlattices, nonlinear magneto-optical diffraction, magnetic photonic crystals.

Підписано до друку 9.04.2008. Формат 29,7x42 1/4.
Ум. друк. арк. 1,617. Друк лазерний. Зам. № 579. Наклад 100 прим.

Віддруковано у друкарні «Норд Комп'ютер» на цифрових лазерних
видавничих комплексах Rank Xerox DocuTech 135 і DocuColor 2060.

Україна, м. Донецьк, 83003, вул. Разенкова, 6,

Тел.: (062) 389-73-82, 389-73-86