

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
ДОНЕЦЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

УДК 535.530.182

ДАДОЄНKOBA Наталія Миколаївна

ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ  
В БАГАТОШАРОВИХ МАГНІТНИХ СТРУКТУРАХ

01.04.02 - Теоретична фізика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

ДОНЕЦЬК - 1994



00801799 (Y)

AB 29.881

Донецького фізико-технічного інституту

Наукові керівники: кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
ЛЮБЧАНСЬКИЙ І.Л.  
кандидат фізико-математичних наук  
БОРИСОВ С.Б.

Офіційні опоненти: лауреат Державної премії України,  
доктор фізико-математичних наук,  
професор СТЕФАНОВСЬКИЙ Є.П.  
(ДонФТІ АН України, м.Донецьк)  
кандидат фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
ЛОЗОВСЬКИЙ В.З.  
(ІФН АН України, м.Київ)

Провідна організація: Київський державний університет  
ім Т.Шевченка

Захист відбудеться *"27-апрель"* 1994 року о 15 годині на  
засіданні спеціалізованої ради К.068.06.01 в Донецькому держав-  
ному університеті (вул. Університетська, 24 ДонДУ, головний  
корпус)

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Донецького  
державного університету.

Авторсферат розповсюджено *"25-марта"* 1994 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради

кандидат фізико-математичних наук

*Зубанов О.Є.*

ЛННБ ім. В. Стефаніка  
АН України

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ.

На протязі останніх років дослідженню багат шарових твердотільних структур приділяється значна увага. Розвиток нових технологічних методів отримання плівок заданої товщини, таких, як напилсння, молекулярно-променева та рідиннофазова епитаксії, зробив можливим створення періодичних шаруватих структур - надграток. Технологія виготовлення тонких плівок дозволяє створювати періодичні системи на основі різноманітних з'єднань: діелектриків, напівпровідників, провідників, магнетиків та надпровідників. Завдяки широкому вибору параметрів структури (фізико-хімічних властивостей матеріалів, кількості шарів, товщини та інших), які забезпечують можливість конструювання шаруватих систем з необхідними фізичними характеристиками, багат шарові плівки та надгратки знаходять різноманітне застосування в квантовій електроніці, магнітній мікроелектроніці, інтегральній оптиці та техніці НВЧ. Для інтегральної оптики безумовний інтерес уявляють магнітні плівки та надгратки, які використовуються як незв'язні елементи оптичних схем, таких, наприклад, як вентилі, циркулятори, гіратори, фазаобертачі, фільтри, амплітудні модулятори, а також у нелінійних пристроях (подільники та помножувачі частоти). В зв'язку з цим актуальним є дослідження поширення електромагнітного випромінювання в магнітних надгратках (МНГ). Для цього необхідним є аналіз спектральних та поляризаційних характеристик нормальних електромагнітних хвиль (ЕМХ) або поляритонів, які поширюються в конденсованому середовищі. Опис поляритонних ефектів у шаруватих структурах вивискає врахування меж розподілу середовищ з різними фізичними характеристиками. Тому для дослідження оптичних властивостей таких структур потрібен аналіз специфічних особливостей у спектрах нормальних ЕМХ, які зумовлені додатковою трансляційною інваріантністю, а також вивчення поверхневих та хвильоводних мод. Хвильоводний метод широко застосовується для визначення параметрів, які характеризують тонкі плівки, наприклад, для одночасного вимірювання з високою точністю їх товщини та показника заломлення, а також при вивченні їх неоднорідностей, оптичної анізотропії та гіротропії.

Електромагнітне випромінювання, яке поширюється в магнітонеорядкованих середовищах, може взаємодіяти як з електричною, так і з магнітною підсистемами. Існує клас речовин, в яких електрична та магнітна підсистеми дають корівальний внесок до

гноптоптичних ефектів (наприклад, до ефекту Фарадея). Такі речовини називають бігіротропними. При описі поширення електромагнітного випромінювання в таких середовищах необхідно враховувати як гіроелектричні, так і гіромагнітні властивості, які характеризуються наявністю недиагональних компонент у тензорах діелектричної та магнітної проникностей. Одним з найбільш перспективних матеріалів для утворення інтегральнооптичних систем є залізо-ітрієвий гранат (ЗІГ)  $Y_3Fe_5O_{12}$ , який бігіротропний у ближньому інфрачервоному діапазоні довжин хвиль електромагнітного випромінювання.

Розповсюдженням та інформативним методом вивчення спектрів елементарних збуджень конденсованого середовища є комбінаційне озсяння світла (КРС). Використання КРС для вивчення МНГ дозволяє визначати залежність частот спінових хвиль від характеристик шаруваті структури (наприклад, від товщини шарів, констант міжшарової взаємодії спінів та інших). Інтерес уявляє вивчення нелінійних оптичних ефектів в однорідних та шаруватих магнітних середовищах. Так, наприклад, дослідження генерації другої гармоніки (ГДГ) дозволяє одержати інформацію про магнітну структуру та симетричні характеристики магнітних речовин. Експериментальні дослідження ГДГ, виконані в останні роки для об'ємних зразків різних магнетиків, тонких плівок ЗІГ, багатошарових магнітних структур вказують на перспективність використання методів нелінійної оптики при вивченні магнітних середовищ.

#### МЕТА РОБОТИ.

Метою цієї дисертаційної роботи є 1) теоретичне дослідження поширення об'ємних, поверхневих та хвильоводних поляритонів в бігіротропній МНГ; 2) КРС спіновими хвилями в МНГ; 3) ГДГ як в однорідних магнітоупорядкованих середовищах, так і в МНГ. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ, ЩО ВИНОСЯТЬСЯ НА ЗАХИСТ.

1. Одержано дисперсійні рівняння, які визначають спектр об'ємних поляритонів в бігіротропній МНГ; визначено компоненти матриці переносу у випадках різних взаємних орієнтацій хвильового вектора  $\mathbf{EMX}$  та намагніченості в шарі, а саме - геометрій Фарадея та Фойгта.

2. З використанням наближення ефективного середовища одержано дисперсійні рівняння для поверхневих поляритонів в напівнескінченній бігіротропній МНГ для геометрій Фарадея та Фойгта.

3. Одержано дисперсійні рівняння для хвильоводних мод в

бігіротропному магнітооптичному хвильоводі.

4. В рамках моделі ефективного середовища одержано вирази для електричного поля розсіяної хвилі та інтенсивності КРС спіновими хвилями в напівнескінченій МНГ.

5. Здійснено теоретико-груповий аналіз тензорів нелінійної оптичної сприйнятливості для деяких центросиметричних (у парафазі) сполук, які допускають магнітне впорядкування. На прикладі конкретних речовин (магнітоелектрик  $\text{CrO}$ , високотемпературні надпровідники (ВТНП)  $\text{YBaCuO}$  та  $\text{NdCuO}$  у нормальному стані) показано, що магнітне впорядкування може приводити до відміни симетричної заборони на ГДГ у дипольному наближенні.

Перелічені вище результати одержано вперше, що визначає наукову новизну роботи.

#### НАУКОВА ТА ПРАКТИЧНА ЗНАЧИМІСТЬ.

Вперше одержано дисперсійне рівняння, яке визначає спектр нормальних ЕМХ в необмеженій бігіротропній МНГ. Обчислено компоненти матриці переносу для геометрій Фарадея та Фойгта, відповідаючих певній взаємній орієнтації хвильового вектора нормальної ЕМХ та вектора намагніченості як один відносно іншого, так і відносно площин шарів надгратки. В рамках моделі ефективного середовища одержані дисперсійні рівняння для поверхневих поляритонів (ПП) у напівнескінченій надгратці. Теоретично вивчено поширення нормальних ЕМХ в бігіротропному магнітооптичному хвильоводі при різних орієнтаціях вектора намагніченості в хвильоводному шарі. З використанням довгохвильового наближення проведено теоретичний опис комбінаційного розсіяння світла коливаннями намагніченості в напівнескінченій надгратці, яка характеризується тензорами діелектричної проникності загального вигляду; визначено інтенсивність розсіяного випромінювання. Обчислено функції Гріна, які дозволяють проводити опис різних процесів, обумовлених нелінійною взаємодією поля електромагнітного випромінювання з елементарним збудженнями кристалічного середовища. Проведено теоретико-груповий аналіз тензора нелінійної оптичної сприйнятливості, який характеризує процес ГДГ у дипольному наближенні для магнітоелектрика  $\text{CrO}$ , а також високотемпературних надпровідників  $\text{YBaCuO}$  та  $\text{NdCuO}$ . Показано, що магнітне впорядкування у згаданих сполуках приводить до відміни симетричної заборони на процес ГДГ у дипольному наближенні.

## АПРОВАЦІЯ РОБОТИ.

Матеріали дисертації доповідались та обговорювались на Всесоюзній нараді з теорії напівпровідників (м. Донецьк, ДонФТІ АН УРСР, 1989 р.); Третньому Всесоюзному семінарі "Оптика анізотропних сред" (м. Звенигород, ІК АН СРСР, 1990 р.); Другому Міжнародному Симпозіумі з магнітооптики (м. Харків, 1991 р.); XIV Міжнародній конференції з когерентної та нелінійної оптики (м. Ленінград, 1991 р.); Українсько - Французькому Симпозіумі "Condensed Matter: Science & Industry" (м. Львів, 1993 р.); VI Семінарі "Фізика магнітних явлень" (м. Донецьк, ДонФТІ АН України, 1993 р.); Міжнародній школі-семінарі "Оптика конденсованого стану" (м. Київ, КДУ ім. Т.Шевченка, 1993 р.); II Міжнародній конференції "Magnetolectric interaction phenomena in crystals" (Ascona, Switzerland, 1993).

## СТРУКТУРА ТА ОБСЯГ ДИСЕРТАЦІЇ.

Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох глав, закінчення, трьох додатків та списку цитуємої літератури з 175 найменувань, вміщує один малюнок та 6 таблиць. Повний обсяг роботи - 128 сторінок друкованого тексту.

У ВСТУПІ обґрунтовується актуальність дисертаційної роботи, формулюється мета, наукова новизна і практична цінність роботи, основні наукові положення, які виносяться на захист.

### ГЛАВА 1. ОБ'ЄМНІ ПОЛЯРИТОНИ У БІГІРОТРОПНИХ МАГНІТООПТИЧНИХ НАДГРАТКАХ.

Перша глава присвячена теоретичному опису поширення електромагнітного випромінювання в необмежених бігіротропних шаруватих структурах.

При описі нормальних ЕМХ в шаруватих конденсованих середовищах широко використовується метод Т-матриці (матриці переносу - transfer matrix). В рамках цього підходу для трансляційно-інваріантних шаруватих структур доцільно знайти зв'язок амплітуд електричного та магнітного полів в місцях, які рознесені одне від одного на відстань періоду надґратки. В першій главі дисертації цей метод був застосований для дослідження поляритонів в МНГ, утворених бігіротропними шарами. Поширення ЕМХ в шаруватих бігіротропних структурах практично не вивчалось. Тому метою цієї глави дисертації є дослідження особливостей поширення нормальних ЕМХ в бігіротропних МНГ.

В §1.1 зроблено огляд літератури, присвяченої опису поширення об'ємних поляритонів в надґратках.

В §1.2 одержано дисперсійне рівняння, яке визначає поляризаційний спектр в анізотропній бігіротропній МНГ. Досліджено необмежену анізотропну МНГ з постійним періодом  $L$ , яка складається з чергуючихся магнітних плівок двох типів товщинами  $d_1, d_2$  ( $d_1 + d_2 = L$ ). Усі шари МНГ розташовані в площині  $XOY$ , вісь  $OZ$  перпендикулярна до їх меж, а плоска  $EMX$  з частотою  $\omega$  поширюється в МНГ вздовж осі  $OY$ . Якщо середовище характеризується тензорами  $\hat{\epsilon}$  та  $\hat{\mu}$  загального вигляду, то кожному значенню  $y$ -компоненти хвильового вектора  $k$  відповідають чотири комплексні значення  $z$ -компонент хвильових векторів. Тому амплітуди електричного та магнітного полів в  $m$ -му шарі були представлені у вигляді суми чотирьох нормальних мод з відповідними хвильовими числами. Для визначення нормальних  $EMX$  з рівнянь Максвелла треба вибрати базисний набір з 4 амплітуд, значення яких по обидві сторони межі розподілу середовищ 1-2 зв'язані матрицею  $\hat{S}$ , що визначається з граничних умов. Унімодулярна матриця  $\hat{T}$ , що зв'язує базисні амплітуди полів  $n-1$  та  $(n+1)-1$  "елементарних комірок", має вигляд:

$$\hat{T} = \hat{S}^{-1} \hat{E} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix} \hat{S} \hat{E} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де діагональна блоківська матриця  $\hat{E}(d)$  зв'язує поля в різних точках  $m$ -го шару, які знаходяться на відстані  $d$  одна від одної вздовж осі  $OZ$ . В цій главі визначено умови, при яких власні значення  $\lambda_n$  ( $n = 1, 2, 3, 4$ ) матриці  $\hat{T}$ , мають вигляд:

$$\lambda_{1,2} = \exp(\pm i q_1 L), \quad \lambda_{3,4} = \exp(\pm i q_2 L),$$

що відповідає теоремі Блоха. Величини  $q$  мають значення хвильових чисел поляризонів в МНГ та визначаються з наступної системи дисперсійних рівнянь:

$$\cos(q_1 L) + \cos(q_2 L) = \frac{1}{2} \text{Sp}(\hat{T}), \quad (2)$$

$$1 + 2\cos(q_1 L)\cos(q_2 L) = \frac{1}{4} [\text{Sp}^2(\hat{T}) - \text{Sp}(\hat{T}^2)].$$

Рішення цієї системи визначається співвідношенням:

$$\cos(q_{1,2} L) = \frac{1}{4} \left\{ \text{Sp}(\hat{T}) \pm \left[ 2\text{Sp}(\hat{T}^2) - \text{Sp}^2(\hat{T}) + 8 \right]^{1/2} \right\}$$

Таким чином, для знаходження дисперсійного рівняння для  $n$ -го шару

льних ЕМХ в анізотропній МНГ необхідно знати хвильові числа в кожному середовищі та компоненти S-матриці, які визначаються через компоненти тензорів  $\hat{\epsilon}$  та  $\hat{\mu}$ . Якщо ці тензори мають недиагональну форму, то нормальні ЕМХ у МНГ, взагалі кажучи, не можуть бути представлені у вигляді ТЕ- та ТМ-мод. У випадку рівності нулю недиагональних компонент матеріальних тензорів поширення поляритонів в МНГ описується ТЕ- та ТМ-модами. При цьому матриця  $\hat{T}$  розпадається на два блоки розмірністю  $2 \times 2$ :

$$\hat{T} = \begin{pmatrix} \hat{T}_1 & 0 \\ 0 & \hat{T}_2 \end{pmatrix},$$

а система (2) визначає два рівняння, відповідальних ТЕ- та ТМ-модам:

$$\cos(q_1 L) = \frac{1}{2} \text{Sp}(\hat{T}_1), \quad \cos(q_2 L) = \frac{1}{2} \text{Sp}(\hat{T}_2).$$

В §1.3 викладений метод застосовано до ряду частинних випадків орієнтації вектора намагніченості  $M$  відносно хвильового вектора ЕМХ  $k$  та площин шарів (геометрії Фойгта та Фарадея). Для кожної з указаних геометрій визначено компоненти S-матриці та хвильові числа поляритонів. Показано, що в розглянутих ситуаціях коефіцієнти дисперсійного рівняння та хвильові числа поляритонів у надгратці є дійсними. У випадку геометрій Фарадея ( $M \parallel k \parallel OY$ ) та Фойгта 1 ( $M \perp k$ ,  $M \parallel OZ$ ,  $k \parallel OY$ ) поляризація нормальних ЕМХ має достатньо складний вигляд, та вони не можуть бути представлені як ТЕ- та ТМ-моди. При геометрії Фойгта 2 ( $M \perp k$ ,  $M \parallel OX$ ,  $k \parallel OY$ ) поляритони в бігіротропній МНГ є ТЕ- та ТМ-модами, які описуються гіротропними тензорами  $\hat{\mu}$  та  $\hat{\epsilon}$  відповідно.

## ГЛАВА 2. ПОВЕРХНЕВІ ТА ХВИЛЬОВОДНІ ПОЛЯРИТОНИ В БІГІРОТРОПНИХ ШАРУВАТИХ СТРУКТУРАХ.

Друга глава дисертації присвячена дослідженню поверхневих поляритонів, які поширюються вздовж межі напівнескінченної бігіротропної МНГ, а також нормальних ЕМХ в бігіротропному хвильоводі.

В §2.1 приведено огляд літератури, присвяченої дослідженню поверхневих та хвильоводних поляритонів.

В §2.2 розглянуто МНГ, що займає півпростір  $z < 0$  із шарами, які розташовані в площині XOY. Ця МНГ прилягає до ізотропного середовища з діелектричною та магнітною проникностями  $\epsilon_0$  та  $\mu_0$ . При розрахунку спектрів ПП в бігіротропній МНГ допускалося, що  $a \ll L \ll \lambda$ , де  $a$ -стала кристалічної ґратки,  $\lambda$  - дов-

жина ЕМХ. У цьому випадку можна використовувати поняття ефективних матеріальних тензорів  $\bar{\epsilon}_{ik}$  та  $\bar{\mu}_{ik}$ , дозволяючих описувати МНГ як ефективне однорідне середовище. Розглянуто геометрію Фарадея та дві геометрії Фойгта. Для геометрії Фарадея ( $k \parallel M$ ,  $M \parallel OX$ ) дисперсійне рівняння для ПП має вигляд:

$$Q(\epsilon_0 \gamma_- + \bar{\epsilon}_{kk} q)(\mu_0 \gamma_+ + \bar{\mu}_{kk} q) + R(\mu_0 \gamma_- + \bar{\mu}_{kk} q)(\epsilon_0 \gamma_+ + \bar{\epsilon}_{kk} q) = 0, \quad (3)$$

де коефіцієнти  $Q, R \in$  функціями  $k, \omega$ .  $\bar{\epsilon}_{ik}$  та  $\bar{\mu}_{ik}$ ;  $\gamma_{\pm}$  та  $q$ - параметри згасання для ефективного середовища та діелектрика відповідно. Парамстрами, визначаючими відхилення поляризаційних характеристик ПП від  $TE_{-}$  та  $TM$ - мод, є недиагональні компоненти ефективних тензорів  $\bar{\epsilon}$  та  $\bar{\mu}$ . При переході до випадку негіротропної МНГ дисперсійне рівняння (3) розпадається на два, які відповідають  $TM$ - та  $TE$ - модам:

$$\epsilon_0 \gamma_- + q \bar{\epsilon}_{kk} = 0 \quad (TE); \quad \mu_0 \gamma_+ + q \bar{\mu}_{kk} = 0 \quad (TM) \quad (4)$$

Аналогічна ситуація має місце для геометрії Фойгта 1 ( $k \perp M$ ,  $M \parallel OX$ ). При геометрії Фойгта 2 ( $k \perp M$ ,  $M \parallel OZ$ ), коли ЕМХ поширюється вздовж осі  $OX$ , система рівнянь Максвелла розпадається на дві підсистеми, відповідаючі  $TE$ - та  $TM$ - модам.

$$(k \bar{\mu}_{xy} - \bar{\mu}_{yy} \gamma_-) \mu_0 = q(\bar{\mu}_{zz}^2 - \bar{\mu}_{xy}^2) \quad (TE),$$

$$(k \bar{\epsilon}_{xy} - \bar{\epsilon}_{yy} \gamma_+) \epsilon_0 = q(\bar{\epsilon}_{zz}^2 - \bar{\epsilon}_{xy}^2) \quad (TM).$$

В §2.3 розглянуто бігіротропний хвильовод, уявляючий собою магнітооптичну півку товщини  $L$ , розташовану в площині  $XOY$  між обкладниками з негіротропного матеріалу. Досліджено хвильоводну структуру із середовищ, які мають кубічну симетрію. Тому для обкладників тензори діелектричної та магнітної проникностей є діагональними ( $\epsilon_0$  та  $\mu_0$ ), а для півки вигляд відповідних тензорів  $\bar{\epsilon}$  та  $\bar{\mu}$  залежить від орієнтації вектора  $M$ . Як і в §2.2, розглянуто геометрії Фарадея та Фойгта. Дисперсійне рівняння, що визначає спектр хвильоводних мод, має таку структуру:

$$U_{CC} \cos(k_1 L) \cos(k_2 L) + U_{SS} \sin(k_1 L) \sin(k_2 L) + U_{SC} \sin(k_1 L) \cos(k_2 L) + U_{CS} \cos(k_1 L) \sin(k_2 L) + U_0 = 0. \quad (5)$$

Коефіцієнти рівняння (5) та хвильові числа  $k_1, k_2 \in$  функціями

$k$ ,  $\omega$ ,  $\epsilon$  та  $\mu$ . У випадку негізотропного середовища дисперсійне рівняння (5) розпадається на два, які відповідають TE- та TM- модам :

$$\operatorname{tg}(kL) = 2\epsilon_0 \epsilon q k / (\epsilon^2 k^2 - \epsilon^2 q^2) \quad (\text{TM}),$$

$$\operatorname{tg}(kL) = 2\mu_0 \mu q k / (\mu^2 k^2 - \mu^2 q^2) \quad (\text{TE}).$$

При геометрії Фойгта 2, як і в аналогічному випадку для ПП, нормальними ЕМХ в бігізотропному хвильоводі є TE та TM- моди. З одержаних рівнянь для трьох геометрій видно, що спектр нормальних ЕМХ в бігізотропному хвильоводі не може бути представленим у вигляді суперпозиції TE- та TM- мод, якщо вектор  $M$  має одну з складових: 1) яка знаходиться в площині магнітної плівки та паралельну вектору  $k$ ; 2) перпендикулярну як межі розподілу магнітного та немагнітного шарів, так і хвильовому вектору  $k$ . Розділення нормальних ЕМХ на TE- та TM- моди можливо у випадку, коли вектор  $M$ , який лежить в площині магнітного шару, перпендикулярний хвильовому вектору  $k$ .

### ГЛАВА 3. КОМБІНАЦІЙНЕ РОЗСІЯННЯ СВІТЛА СПІНОВИМИ ЗБУДЖЕННЯМИ В МАГНІТНИХ НАДГРАТКАХ

Третя глава присвячена теоретичному опису непружного розсіяння електромагнітного випромінювання коливаннями намагніченості в магнітній шаруватій структурі з використанням наближення ефективного середовища.

В §3.1 приведено огляд робіт, присвячених КРС у МНГ.

В §3.2 розглянуто напівобмежену МНГ, яка займає область простору  $z < 0$ , усі шари якої розташовані в площині XOY. Вектор статичної намагніченості для шарів, утворюючих МНГ, орієнтований довільним чином, і тензори діелектричної проникності матеріалів, складаючих МНГ, є тензорами загального вигляду. На поверхню надгратки ( $z = 0$ ) із вакуума падає плоска ЕМХ з хвильовим вектором  $k$  та частотою  $\omega$ . В експериментальних роботах з КРС описані МНГ, товщини шарів яких знаходяться в межах від кількох десятків до сотен ангстремів, в той час як довжина хвилі випромінювання, що розсіюється, сягає кількох тисяч ангстремів. Тому опис процесів поширення і розсіяння ЕМХ видимого та інфрачервоного діапазонів стосовно до таких МНГ доцільно проводити у рамках наближення ефективного середовища, використаного в главі 2. Для знаходження поля розсіяної хвилі були визначені функції Гріна відповідного хвильового рівняння, які з врахуванням граничних умов на нескінченності мають вигляд:

$$\hat{G}(\vec{k}_{\parallel}, \omega, z, z') = \begin{cases} \hat{A} \exp(i k_{\parallel} z), & z > 0, \\ \sum_{Q>0} \hat{B}^{(Q)} \exp(-i Q z) + \hat{G}(z, z'), & z < 0. \end{cases} \quad (6)$$

де  $Q$  -  $z$ -компоненти хвильових векторів нормальних ЕМХ в ефективному середовищі, а частинне рішення  $\hat{G}(z, z')$  рівнянь для функцій Грина в (6) визначається формулою:

$$\hat{G}(z, z') = \sum_{j=1}^4 \hat{\Phi}_j^{(-1)^j} \exp[-i Q_j (z - z')] \theta[(-1)^j (z - z')], \quad (7)$$

Тут  $\hat{\Phi}_j$  - є функціями  $Q_j, \omega, k_{\parallel}$ , а також компонент статичної частини тензора діелектричної проникності ефективного середовища  $\hat{\epsilon}$ . Для однозначного визначення функції Грина  $\hat{G}$  (6) необхідно використовувати систему граничних умов при  $z = 0$ , яка еквівалентна рівнянням Френеля, описуючим проходження ЕМХ з середовища із діелектричною проникністю  $\hat{\epsilon}$  у вакуум. При цьому коефіцієнти  $\hat{A}$  та  $\hat{B}^{(Q)}$  в (6) аналогічні напруженостям електричних полів заломленої та відбитої ЕМХ відповідно. Для описування КРС необхідно знайти явний вигляд величин  $\hat{A}$ :  $A_{\alpha\beta} = \Gamma_{\alpha\beta} G_{T\beta}(0, z')$ , де  $\Gamma$  - матриця коефіцієнтів Френеля, характеризуючих перехід ЕМХ з ефективного середовища у вакуум.

В §3.3 одержано співвідношення, які застосовані для описування КРС магнітними збудженнями в ефективному середовищі, на магнітисному вздовж осі  $OZ$ . Визначено функції Грина та коефіцієнти Френеля для випадку, коли падаюча та розсіяна ЕМХ поширюються в площині  $XOZ$ .

В §3.4 визначено електричне поле розсіяної ЕМХ та інтенсивність КРС. Як приклад розглянуто випадок, у якому хвильовий вектор  $k$  падаючої хвилі розміщений в площині  $XOZ$ . Динамічна частина тензору діелектричної проникності  $\delta\epsilon(\vec{r}, t)$  представлена у вигляді розкладу по нормальним модам коливань спінової підсистеми кристалу з частотами  $\omega_n$  та хвильовими векторами  $q_n$ :

$$\delta\epsilon_{kl}(\vec{r}, t) = \sum_{klp} f_{klp}^{(n)}(n) \exp[i(\vec{q}_n \vec{r} - \omega_n t)] + \text{с.с.}, \quad (8)$$

де  $f_{klp}^{(n)}$  - лінійний магнітооптичний тензор,  $w(n)$  - амплітуда коливань  $n$ -ї моди спінової хвилі; підсумовування в (8) проводиться по всім нормальним модам. Усреднюючи по часу вираз для інтенсивності розсіяного випромінювання, одержимо:

$$I^{(s)} = I_0 \Omega_0^4 (n^{(s)})^{-1} \sum_n n^{(s)}(h) e^{(s)} e^{(s)*} \times \\ \times \langle \langle m_r(h) m_r^*(h) \rangle \rangle \sum_{k,l,p,q=1}^4 A_{zrc}^{(kl)} A_{zrc}^{(pq)*} T^{(kl;pq)}(h). \quad (9)$$

Тут  $I_0$ ,  $e^{(s)}$  - інтенсивність та вектор поляризації падаючого світла. Величина  $A_{zrc}^{(kl)}$  містить, крім функцій Френеля, які описують проходження світла як із вакуума в ефективне середовище, так і зворотню. Множник  $T^{(kl;pq)}(h)$  в (9) враховує, що падаюче на зразок світло після проходження межі розподілу трансформується у дві нормальні ЕМХ. Кожна з цих хвиль при розсіянні  $h$ -ю магнітною модою, в свою чергу, може перетворитись у дві інші нормальні ЕМХ. Таким чином, після елементарного акту розсіяння біля межі розподілу ефективного середовища із вакуумом буде чотири хвилі із однаковими частотами, які і будуть визначати розсіяне випромінювання. Корелятор в (9) дорівнює:

$$\langle \langle m_r(h) m_r^*(h) \rangle \rangle = k T \chi_{\alpha\beta}(h),$$

де  $k$  - стала Больцмана,  $T$  - температура,  $\chi_{\alpha\beta}(h)$  - тензор магнітної сприйнятливості.

Одержані в роботі формули визначають інтенсивність КРС спіновою підсистемою ефективного середовища. Для їх подальшого вживання необхідно конкретизувати тип спінових збуджень, на яких розсіюється світло. До останніх можуть належати, наприклад, магнітостатичні, магнітодипольні та обмінні хвилі, уявляючи собою як об'ємні, так і поверхневі моди. При описі взаємодії світла із спіновою підсистемою конкретного кристалу необхідно враховувати форму лінійного магнітооптичного тензору  $f_{ijkl}$ . Формули для функцій Гріна дозволяють визначити залежність інтенсивності розсіяного випромінювання від напрямку хвильового вектора падаючого світла. Зокрема, вони дозволяють досліджувати ситуації, при яких стається повне внутрішнє відбиття однієї або декількох нормальних мод ЕМХ, розсіяних від межі розподілу ефективного середовища з вакуумом. Формули для електричного поля розсіяного випромінювання дозволяють також визначити умови, при яких можливо розсіяння однієї з нормальних мод в моду іншого типу.

ГЛАВА 4. ГЕНЕРАЦІЯ ДРУГОЇ ОПТИЧНОЇ ГАРМОНІКИ В  
МАГНІТОВПОРЯДКОВАНИХ СЕРЕДОВИЩАХ.

В четвертій главі дисертації проведено дослідження впливу магнітного впорядкування на нелінійну оптичну сприйнятливість (НОС) магнітвовпорядкованих кристалів та шаруватих магнітних структур (в наближенні ефективного середовища).

В §4.1 приведено огляд робіт, присвячених дослідженню ГДГ у магнітвовпорядкованих речовинах.

В §4.2 досліджено магнітоелектрик  $\text{CrO}$ . Кристал  $\text{CrO}$  характеризується просторовою групою симетрії  $D_{3d}^6$ , яка містить інверсію; тому усі компоненти тензора НОС  $\chi_{ijk}^{(2)}$ , які не залежать від магнітної підсистеми, дорівнюють нулю. При  $T < T_c = 306 \text{ K}$  іони  $\text{Cr}^{3+}$  утворюють антиферомагнітну конфігурацію, що перетворюється по неспарному незвідному зображенню (НЗ, А). Відмінні від нуля компоненти тензорів НОС  $\chi_{ijk}^{(2)}$  знайдені в цьому параграфі.

В §4.3 досліджено тензори НОС, які характеризують ГДГ у різних магнітвовпорядкованих фазах  $\text{YBaCuO}$  та  $\text{NdCuO}$ . В  $\text{Y-Ba-Cu-O}$  при температурі Нєсля  $T = 400 \text{ K}$  можлива реалізація двох антиферомагнітних структур АФ-1 та АФ-2. Показано, що для структури АФ-1 (якій відповідає неспарне НЗ, В) відмінними від нуля будуть сім компонент тензора НОС. Для структури АФ-2 (якій відповідає парне НЗ, В) усі компоненти тензора НОС дорівнюють нулю.

В сполуді  $\text{NdCuO}$  при різних температурах можлива реалізація трьох антиферомагнітних структур: АФ-1, АФ-2, АФ-3. Для структури АФ-1 (якій відповідає НЗ, А групи D) відмінними від нуля будуть чотири компоненти тензора НОС. Для структури АФ-2 (якій відповідає НЗ, В групи D) відмінними від нуля будуть шість компонент тензора НОС. Для структури АФ-3 (якій відповідає НЗ, А групи D) відмінними від нуля будуть сім компонент тензора НОС.

Оскільки різні магнітні фази  $\text{YBaCuO}$  та  $\text{NdCuO}$  характеризуються різними компонентами  $\chi_{ijk}^{(2)}$ , то поляризаційні дослідження ГДГ дозволять одержати інформацію про ту або іншу магнітну структуру, яка реалізується у відповідних ВТНП.

В §4.4 знайдено явний вигляд ефективних тензорів НОС для МНГ, утворених шарами, які допускають дипольно-активну ГДГ. Дослідження тензора НОС в МНГ проведено в довгохвильовому наближенні, яке використовувалось у попередніх главах дисертації. Одержано вирази для ненульових компонент ефективних тензорів

НОС для різних антиферромагнітних конфігурацій. При усередненні по періоду МНГ електричної індукції в квадратичному нелінійному середовищі нарівні із квадратичними доданками можуть з'явитись і кубічні. Величина  $\eta$ , яка характеризує кубічну сприйнятливість ефективного середовища, нарівні з кубічним тензором НОС, в нелінійній поляризації кожного з середовищ, може описувати такі процеси, як генерація третьої гармоніки, оптичний ефект Керра та нелінійний ефект Фарадея в магнітопорядкованій речовині. Поява  $\eta$  зумовлена різницею компонент тензорів квадратичної НОС  $\chi^{(1)}$  та  $\chi^{(2)}$  в шарах НГ. Для однорідного середовища  $\eta = 0$ .

У ЗАКІНЧЕННІ подано основні результати, одержані в дисертації:

1. Метод матриці переносу  $4 \times 4$  застосовано для дослідження поширення електромагнітного випромінювання в необмеженій бігіротропній МНГ. Одержано дисперсійне рівняння, яке визначає спектр нормальних ЕМХ (об'ємних поляритонів) у вказаній шаруватій структурі. Обчислено компоненти Т-матриці для геометрій Фарадея та Фойгта, відповідаючих певним взаємним орієнтаціям хвильового вектора нормальної ЕМХ та вектора намагніченості як один відносно одного, так і відносно площин магнітних шарів. Показано, що розділення нормальних ЕМХ на ТМ- та ТЕ- моди можливо у випадку, коли вектор намагніченості, лежить в площині шарів МНГ, та перпендикулярний хвильовому вектору.

2. В рамках моделі ефективного середовища одержано дисперсійні рівняння для ПП в напівобмеженій бігіротропній МНГ для геометрій Фарадея та Фойгта. Теоретично вивчено поширення нормальних ЕМХ в бігіротропному магнітооптичному хвильоводі. Одержано та проаналізовано дисперсійні рівняння для хвильоводних мод при різних орієнтаціях вектора намагніченості у хвильоводному шарі.

3. З використанням довгохвильового наближення проведено теоретичний опис КРС коливаннями намагніченості в напівобмеженій МНГ, яка характеризується тензорами діелектричної проникності загального вигляду. Знайдено компоненти функцій Гріна, за допомогою яких можливо описувати різні процеси, обумовлені нелінійною взаємодією електромагнітного випромінювання з елементарними кристалічними збудженнями (зокрема, із спіновими хвилями). Знайдені формули для функцій Гріна застосовані для ефективного середовища, яке намагнічене перпендикулярно до поверхні. Визначено інтенсивність електромагнітного випромінювання на

змщеної частоти, яка враховує наявність чотирьох каналів розсіяння (відповідаючих взаємним перетворенням нормальних хвиль різних типів). У виразах для інтенсивності розсіяного випромінювання виділено мультиплікативні коефіцієнти Френеля, які описують проходження світла скрізь межу розподілу середовищ.

4. Теоретично вивчено процес ГДГ у центросиметричних магнетиках. Проведено теоретико-груповий аналіз тензора НОС, який описує вказаний ефект у дипольному наближенні. Показано, що при магнітному впорядкуванні в підсистемі іонів  $\text{Cr}^{3+}$  (в  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) та  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Nd}^{2+}$  (у ВТНД-сполуках  $\text{YBaCuO}$  та  $\text{NdCuO}$ ) для спінових конфігурацій, яким відповідають непарні  $\text{H}_3^2$  групи симетрії речовини, ГДГ у дипольному наближенні дозволена. Вказано умови, при яких можливо виявлення таких ефектів. В рамках наближення ефективного середовища проведено аналогічний аналіз процесу ГДГ у МНГ.

#### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНО В РОБОТАХ:

1. Борисов С.Б., Дадоевкова Н.Н., Любчанский И.Л., Соболев В.Л. Генерация второй гармоники в магнитоэлектрике  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  //ФТТ, 1990, т. 32, в.12, с.3668-3671.
2. Borisov S.B., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii I.L. Polaritons in bigyrotropic magneto-optical layered structures. In: 2-nd Int. Symposium on Magneto-Optics. Abstracts. Kharkov. 1991. P.20.
3. Borisov S.B., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii I.L. Sobolev V.L. Optical second harmonic generation in multisublattice magnets. In: 2-nd Int. Symp. on Magneto-optics. Abstr. Kharkov. 1991. P.89.
4. Борисов С.Б., Дадоевкова Н.Н., Любчанский И.Л. Генерация второй гармоники в магнитных сверхрешетках. В кн.: XVI Международная конференция по когерентной и нелинейной оптике. Тез. Докл., г. Ленинград, 1991 г., с. 24.
5. Борисов С.Б., Дадоевкова Н.Н., Любчанский И.Л., Соболев В.Л. Индуцированная магнитным упорядочением генерация второй оптической гармоники в высокотемпературных сверхпроводниках  $\text{YBaCuO}$  и  $\text{NdCuO}$  //ФТТ, 1991, т.33, в.6, с.1887-1889.
6. Борисов С.Б., Дадоевкова Н.Н., Любчанский И.Л. Электромагнитное излучение в бигиротропном магнитооптическом волноводе // Опт. и спектр., 1991, т.71, в.5, с.861-865.
7. Борисов С.Б., Дадоевкова Н.Н., Любчанский И.Л. Поляритоны в бигиротропных сверхрешетках //Кристаллография, 1991, т.35,

в.6, с.1358-1361.

8. Борисов С.Б., Дадоевкова Н.Н., Любчанский И.Л. Поверхностные электромагнитные волны в бигиротронных слоистых структурах//В кн.: Ковариантные методы в теоретической физике. Оптика и акустика. Минск, 1991, с.93-98.
9. Борисов С.Б., Дадоевкова Н.Н., Любчанский И.Л., Соболев В.Л. Генерация второй оптической гармоники в магнитных сверхрешетках//Известия РАН. Сер. физ., 1992, т.56, в.8, с.62-65.
10. Borisov S.B., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii I.L. Raman light scattering by spin excitations in magnetic superlattices. In: XIII-th ICORS Add. Poster Abstr. (Incl. Post-Dead. Pap.) Germany. Wurzburg. Sept. 1992. P.148-149.
11. Борисов С.Б., Дадоевкова Н.Н., Любчанский И.Л. Нормальные электромагнитные волны в бигиротронных слоистых структурах// Опт. и спектр., 1993, т. 74, в.6, с.1127-1136.
12. Борисов С.Б., Дадоевкова Н.Н., Любчанский И.Л. Рассеяние света спиновыми возбуждениями в магнитных сверхрешетках. В кн.: "VI Семинар "Физика магнитных явлений". Тез. докл., Донецк, 1993, с.32.
13. Borisov S.B., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii I.L. Surface polaritons in bigyrotropic magnetic superlattices. In: Abstracts of 38-th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, USA. 1993. P.171-172.
14. Borisov S.B., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii I.L. Theory of Polaritons in Bigyrotropic Magneto-optical Superlattices (4x4 Transfer Matrix Method). In: Ukrainian-French Symposium "Condensed Matter: Science & Industry". Abstracts. Ukraine. Lviv. 1993. P.197.
15. Borisov S.B., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii I.L., Sobolev V.L. Three-photon effects in magnetoelectric crystals. 2-nd Int. Conf. "Magnetoelectric interaction phenomena in crystals". Abstr. Ascona (Switzerland). 1993. P.87.

Зідвижено до друку 21.03.94

Формат 60\*84/16. Папір писальний. Обсяг друку.

Умови друку: акр.1.0. Замовлення 190 прим. Бескоштовно.

Р-т ІВП АН України, 340048, м.Донецьк, вул. Університетська, 77.

ЛНБ ім. В. Стефанишина  
АН України







AB 29.881