

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

**САВЧЕНКО Андрій Сергійович**



УДК 537.874; 535.2; 535.326

**МАГНІТНІ ПОЛЯРИТОНИ У ЦЕНТРОСИМЕТРИЧНИХ  
АНТИФЕРОМАГНІТНИХ СТРУКТУРАХ: ЕФЕКТИ ЕЛЕКТРИЧНОГО  
ПОЛЯ**

01.04.11- Магнетизм

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Донецьк-2008

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор  
**Тарасенко Сергій Вадимович**,  
Донецький фізико-технічний інститут ім.  
О.О. Галкіна НАН України, керівник  
відділу теорії магнетизму та фазових  
переходів.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
**Лозовський Валерій Зіновійович**,  
Київський національний університет ім.  
Тараса Шевченка, професор кафедри  
напівпровідникової електроніки;

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

Захист відбудеться «15» травня 2008 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д. 11.184.01 при Донецькому фізико-технічному інституті ім. А.А. Галкіна НАН України (вул. Р. Люксембург 72, м. Донецьк, 83114).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Донецького фізико-технічного інституту ім. О.О. Галкіна НАН України (вул. Р. Люксембург 72, м. Донецьк, 83114).

Автореферат розісланий «\_\_» квітня 2008 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д. 11.184.01,  
к. ф.-м. н., с.н.с.



Т.М. Тарасенко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність.** Одним з актуальних напрямків розвитку сучасної мікроелектроніки є використання матеріалів, електродинамічними властивостями яких можна керувати за допомогою зовнішніх полів. У зв'язку з цим особливої важливості набуває аналіз впливу магнітооптичних та магнітоелектричних взаємодій на умови формування та поширення у магнітовпорядкованих середовищах електромагнітних хвиль – магнітних поляритонів.

Проте, незважаючи на постійно зростаючий потік публікацій у цьому напрямку, значна кількість робіт традиційно пов'язана з аналізом поляритонної динаміки магнетиків, що знаходяться лише у постійному зовнішньому магнітному полі. Значно менша кількість досліджень присвячена вивченню впливу постійного зовнішнього електричного поля на умови проходження та локалізації електромагнітної хвилі у магнітовпорядкованих середовищах, незважаючи на активний розвиток електрооптики немагнітних середовищ. При цьому, як правило, розглядалися тільки випадки, коли магнітне середовище має лінійний магнітоелектричний ефект, що накладає низку істотних обмежень, щодо симетрійних властивостей магнітного матеріалу. Разом з тим, для вивчення характеру поляритонної динаміки композитного середовища, що має одночасно магнітне та електричне упорядкування, критично важливим є аналіз впливу постійного зовнішнього електричного поля на умови розповсюдження електромагнітної хвилі крізь межу розділу центросиметричного магнітного та немагнітного середовищ. До цього часу відповідний аналіз не проводився, незважаючи на те, що, як відомо, в будь-якому центросиметричному магнетикі має місце квадратична магнітооптична взаємодія (КМОВ) [1, 2]. При цьому в роботі [3] експериментально було доведено, що внесок КМОВ у поляритонну динаміку багатопідґраткових скомпенсованих антиферромагнетиків може обмінно підсилюватися, що призводить до існування значного подвійного променезаломлювання вже у колінеарній фазі легковісного (ЛВ) антиферромагнетика (АФМ). Однак аналіз впливу такої анізотропної квадратичної магнітооптичної взаємодії на поляритонну динаміку магнітовпорядкованих середовищ, що знаходяться у постійному зовнішньому електричному полі, дотепер не проводився. Таким чином, з огляду на все вищесказане можна стверджувати, що задача цілеспрямованого та ефективного впливу на поляритонну динаміку монокристалічних та композитних магнітних середовищ за допомогою постійного зовнішнього електричного поля має не тільки суто академічний, але й безсумнівний практичний інтерес.

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

Робота над темою дисертації виконувалась в рамках тематичного плану ДонФТІ НАН України за темами «Динамічні та статичні властивості складних низькорозмірних систем у зовнішніх полях», 2003-2006 №

держреєстрації 0103U005969, «Транспортні та магнітні властивості мезоскопічних гетероструктур», 2006-2009 № держреєстрації 0106U006935.

**Мета і завдання дослідження.** Мета даної дисертаційної роботи полягає в послідовному урахуванні ролі КМОВ у поляритонній динаміці скомпенсованих обмежених монокристалічних та композитних магнітних середовищ в постійному зовнішньому електричному полі. Для досягнення мети були поставлені завдання:

- з урахуванням КМОВ вивчити особливості формування та поширення поверхневих магнітних поляритонів ТМ- і ТЕ- типу на межі розділу «немагнітний діелектрик - скомпенсований центросиметричний двопідгратковий АФМ» при наявності ненульового постійного зовнішнього електричного поля;
- дослідити вплив КМОВ на умови поширення електромагнітних хвиль р- та s- поляризації в магнітних сандвіч-структурах типу «пластина центросиметричного скомпенсованого ЛВ АФМ у необмеженому немагнітному діелектрику» або «пластина немагнітного діелектрика в необмеженому скомпенсованому центросиметричному ЛВ АФМ» в постійному зовнішньому електричному полі;
- проаналізувати вплив постійного електричного поля на особливості динаміки магнітних поляритонів поблизу зовнішньої поверхні обмеженого одновимірного фотонного кристала типу «немагнітний діелектрик - скомпенсований центросиметричний АФМ»;
- дослідити спільний вплив КМОВ та ефектів просторової дисперсії на поляритонну динаміку обмеженого центросиметричного скомпенсованого АФМ в постійному зовнішньому електричному полі.

*Об'єктом дослідження* дисертаційної роботи є електродинаміка скомпенсованих центросиметричних магнітних середовищ в постійному зовнішньому електричному полі.

*Предметом досліджень* виступають особливості формування і поширення магнітних поляритонів, що індуковані КМОВ, в обмеженому скомпенсованому центросиметричному АФМ, який перебуває в постійному зовнішньому електричному полі.

У роботі були застосовані такі *методи досліджень*, як метод матриці переходу (transfer матриці), метод ефективного середовища, методи інтегральних рівнянь і рівнянь математичної фізики.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що:

- на основі послідовного врахування КМОВ вперше показано, що поблизу поверхні центросиметричного скомпенсованого АФМ кристала в постійному зовнішньому електричному полі  $E_0$  має місце формування нового типу поверхневих магнітних ТМ- поляритонів та істотна (у порівнянні з  $|E_0|=0$ ) трансформація спектра поверхневих магнітних поляритонів ТЕ -типу;
- визначено необхідні умови, при виконанні яких КМОВ індукують негативну або аномальну рефракцію об'ємної електромагнітної ТМ- хвилі на межі

розділу «немагнітний діелектрик - скомпенсований центросиметричний АФМ» у постійному зовнішньому електричному полі;

- теоретично доведено, що в постійному зовнішньому електричному полі внаслідок КМОВ поблизу зовнішньої поверхні напівобмеженого фотонного кристалу типу «немагнітний діелектрик - скомпенсований центросиметричний АФМ» має місце формування нового типу колективних поверхневих магнітних ТМ- поляритонів;
- показано, що послідовне врахування КМОВ призводить до формування нового типу безобмінних об'ємних спінових хвиль, що поширюються вздовж пластини центросиметричного скомпенсованого ЛВ АФМ, яка знаходиться у постійному зовнішньому електричному полі;
- на основі спільного врахування квадратичної магнітооптичної та неоднорідної обмінної взаємодії знайдено ряд нових аномалій у спектрі як поверхневих, так і об'ємних магнітних ТМ- поляритонів, що формуються в обмеженому скомпенсованому центросиметричному АФМ у постійному зовнішньому електричному полі.

**Практична значимість отриманих результатів.** Результати дисертаційної роботи дозволяють визначити оптимальні умови, при виконанні яких за допомогою постійного зовнішнього електричного поля можна цілеспрямовано та ефективно керувати електродинамічними характеристиками центросиметричних скомпенсованих монокристалічних та композитних магнітних середовищ. Крім того, з огляду на тісну аналогію між поляритонною динамікою магнітно скомпенсованого мультифероїка та центросиметричного АФМ у постійному зовнішньому електричному полі, можна стверджувати, що всі знайдені в даній дисертаційній роботі аномалії можуть бути реалізовані також і в синтетичних мультифероїках - новому класі композитних магнетиків, які активно досліджуються зараз. Таким чином, можна розраховувати, що результати пропонованої дисертаційної роботи знайдуть своє застосування при розробці та оптимізації широкої гами пристроїв функціональної магнітоелектроніки.

**Особистий внесок здобувача.** Всі результати, що увійшли до дисертації, отримані при безпосередній участі здобувача. Дисертант брав активну участь на всіх етапах робіт за темою дисертації: виборі моделі, теоретичних розрахунках, аналізі й обговоренні результатів, підготовці та написанні статей, підготовці доповідей на міжнародних наукових конференціях.

**Апробація результатів роботи.** Основні результати роботи дисертації були представлені та опубліковані в матеріалах наступних міжнародних конференцій, шкіл та симпозіумів:

XIX Международной школе-семинаре "Новые магнитные материалы для микроэлектроники" (НМММ- XIX , Москва, Россия, 2004); 2–nd Euro-Asian Symposium "Trends in Magnetism", ( EASTMAG-2004 Krasnoyarsk, Russia);

Международной конференции студентов аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам «Ломоносов-2005», секция «физика» (Москва, Россия, 2005); Міжнародної конференції студентів і молодих вчених з теоретичної й експериментальної фізики “Еврика-2005”, (Львів, 2005); Fifth international young scientists’ conference on applied physics (Kyiv, Ukraine, 2005); Moscow International Symposium on Magnetism (MISM-2005, Moscow, Russia); International conference «Functional materials» (ICFM-2005, Partenit, Crimea, Ukraine); IV международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2005» (Санкт-Петербург, Россия, 2005); Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела - 2005» (ФТТ-2005, Минск, Беларусь); Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “Еврика-2006” (Львів, 2006); Демидовской конференции с международным участием «Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики» (Москва, Россия, 2006); XX Международной школе-семинаре "Новые магнитные материалы для микроэлектроники" (НМММ-XX, Москва, Россия, 2006); Всероссийской конференции по наноматериалам «НАНО - 2007» (Новосибирск, Россия, 2007), I международном, междисциплинарном симпозиуме "Среды со структурным и магнитным упорядочением" (MULTIFERROICS-2007, п. Лоо, Ростов-на-Дону, Россия, 2007); Euro-Asian Symposium "Magnetism on a nanoscale", (EASTMAG-2007 Kazan, Russia, 23-26 august 2007), Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела -2007» (ФТТ-2007, Минск, Беларусь).

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані в 9 статтях у наукових журналах і 16 збірниках тез та праць конференцій.

**Структура та об'єм дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів та висновків. Загальний об'єм дисертації становить 161 сторінку, у тому числі 146 сторінок основного тексту, 21 рисунок, 5 таблиць та список літератури із 141 найменування.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подані актуальність обраної теми, сформульовані мета та завдання дисертації, визначені наукова новизна та практична значимість роботи, особистий внесок здобувача, викладений основний зміст роботи.

**Перший розділ** дисертації присвячений аналізу ролі КМОВ у поляритонній динаміці напівобмежених скомпенсованих антиферромагнетиків, що знаходяться у постійному зовнішньому електричному полі. У **підрозділі 1.1** подано короткий огляд досліджень магнітооптичних і магнітоелектричних ефектів у магнітних матеріалах. Наведено структуру квадратичної магнітооптичної взаємодії, щільність

енергії якої для центросиметричного скомпенсованого АФМ може бути представлена у вигляді:

$$F_{mo} = \lambda_{iklm} \mathbf{I}_i \mathbf{I}_k \mathbf{E}_l \mathbf{E}_m, \quad (1)$$

де  $\mathbf{I}$  – вектор антиферомагнетизму ( $\mathbf{I} = (\mathbf{M}_1 - \mathbf{M}_2)/2M_0$ ;  $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2$  – намагніченості підґраток,  $M_0$  – рівноважне значення намагніченості однієї підґратки),  $\mathbf{E}$  – електричне поле;  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 + \tilde{\mathbf{E}}$ ,  $\mathbf{E}_0$  – рівноважне значення вектора електричного поля,  $\tilde{\mathbf{E}}$  – змінна складова вектора електричного поля;  $\mathbf{I} = \mathbf{I}_0 + \tilde{\mathbf{I}}$ ,  $\mathbf{I}_0$  – рівноважне значення вектора антиферомагнетизму,  $\tilde{\mathbf{I}}$  – змінна складова вектора антиферомагнетизму;  $i, k, l, m \equiv x, y, z$ ,  $\lambda_{iklm}$  – тензор магнітооптичних коефіцієнтів [3]. Слід зазначити, що подібна структура інваріанта КМОВ існує, при будь-якій магнітній симетрії АФМ середовища.

Розрахунок показав, що в результаті впливу постійного зовнішнього електричного поля, з урахуванням КМОВ (1) для ЛВ центросиметричного двопідґраткового АФМ, за умови, що релятивістські взаємодії малі, порівняно з однорідним міжпідґратковим обміном, матеріальні співвідношення приймають вигляд:

для  $\mathbf{I}_0 \parallel \mathbf{E}_0 \parallel OZ$ :

$$\begin{aligned} B_x &= \mu_{xx}(\omega)H_x + \alpha_{xy}(\omega)E_y; & D_x &= \varepsilon_{xx}(\omega)E_x + \alpha_{xy}(\omega)H_y; \\ B_y &= \mu_{yy}(\omega)H_y + \alpha_{yx}(\omega)E_x; & D_y &= \varepsilon_{yy}(\omega)E_y + \alpha_{yx}(\omega)H_x; \\ B_z &= \mu_{zz}H_z; & D_z &= \varepsilon_{zz}E_z, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\mathbf{D}$  і  $\mathbf{B}$  – електрична та магнітна індукції,  $\mathbf{E}$  й  $\mathbf{H}$  – електричне та магнітне поле,  $\varepsilon_{ik}$ ,  $\mu_{ik}$ ,  $\alpha_{ik}$  – діелектрична, магнітна і магнітооптична проникності відповідно ( $i, k = x, y, z$ ),  $\mu_{xx}(\omega) = \mu_{yy}(\omega)$ ,  $\varepsilon_{xx}(\omega) = \varepsilon_{yy}(\omega)$ ,  $\alpha_{yx}(\omega) = -\alpha_{xy}(\omega) \equiv i \cdot \gamma_1(\omega)$ ;

для  $\mathbf{I}_0 \parallel OZ, \mathbf{E}_0 \parallel OY$ :

$$\begin{aligned} B_x &= \mu_{xx}(\omega)H_x + \alpha_{xz}(\omega)E_z; & D_x &= \varepsilon_{xx}E_x; \\ B_y &= \mu_{yy}(\omega)H_y; & D_y &= \varepsilon_{yy}E_y; \\ B_z &= \mu_{zz}H_z; & D_z &= \varepsilon_{zz}(\omega)E_z + \alpha_{zx}(\omega)H_x, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\mu_{xx}(\omega) \neq \mu_{yy}(\omega)$ ,  $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy}$ ,  $\alpha_{xz}(\omega) = -\alpha_{zx}(\omega) \equiv i \cdot \gamma_2(\omega)$ ;

Тут  $\gamma_1(\omega), \gamma_2(\omega) \sim |\mathbf{E}_0|/(\omega_0^2 - \omega^2)$ , де  $\omega_0$  – частота антиферомагнітного резонансу. При цьому, у випадку  $|\mathbf{E}_0| = 0$  або  $\lambda_{ijkl} = 0$ , відсутня частотна залежність у всіх компонент тензора діелектричної проникності  $\varepsilon_{ik}$ , а також має місце  $\gamma_1(\omega) = \gamma_2(\omega) = 0$ .

Рівняння Максвелла та співвідношення (2) і (3) дають можливість визначити основні магнітооптичні конфігурації, для яких у необмеженому АФМ кристалі в постійному зовнішньому електричному полі має місце незалежне поширення хвиль ТМ- та ТЕ- типу. З результатів розрахунку відповідних дисперсійних співвідношень випливає, що внаслідок КМОВ вже нескінченному центросиметричному АФМ у ненульовому постійному

зовнішньому електричному полі  $\mathbf{E}_0$  можливе поширення нормальних магнітних поляритонів р- типу.

У **підрозділі 1.2** розраховані френелівські коефіцієнти відбиття та показано, що при проходженні об'ємної електромагнітної р- хвилі через межу розділу «центросиметричний скомпенсований антиферомагнетик - немагнітне середовище», відповідний амплітудний коефіцієнт має максимум. Проведений аналіз свідчить про те, що ця особливість пов'язана з динамікою електродипольноактивних магнітних поверхневих ТМ- поляритонів. Зокрема у випадку падіння з вакууму р- поляризованої електромагнітної хвилі на поверхню АФМ у постійному зовнішньому електричному полі, максимум амплітудного коефіцієнта проходження має місце, якщо частота та кут падіння одночасно задовольняють закону дисперсії поверхневого магнітного поляритона ТМ- типу на межі розділу «центросиметричний АФМ - ідеальний метал».

Оскільки, як добре відомо, умови відбиття та локалізації хвиль на межах розділу середовищ тісно пов'язані між собою, то в **підрозділі 1.3** досліджено вплив КМОВ на характер поширення магнітних поляритонів ТМ- типу вздовж меж розділу «ЛВ центросиметричний АФМ – вакуум» та «ЛВ центросиметричний АФМ – ідеальний метал» для ненульового постійного зовнішнього електричного поля.

Так при  $|\mathbf{E}_0| \neq 0$  КМОВ індукує новий тип однопарціального поверхневого магнітного ТМ – поляритона, що поширюється вздовж межі розділу «АФМ - ідеальний метал». Спектр цього типу поляритонної хвилі у випадку  $\mathbf{k} \in YZ$ ,  $\mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{l}_0 \parallel \mathbf{n} \parallel OZ$ , де  $\mathbf{k}$  - хвильовий вектор поляритонної хвилі, для межі розділу «центросиметричний АФМ – ідеальний метал» має вигляд:

$$k_{\perp}^2 = \varepsilon_{zz} \mu_{xx}(\omega) \frac{\omega^2}{c^2}, \quad (4)$$

тут  $k_{\perp}$  - значення тангенціальної складової хвильового вектора,  $c$  - швидкість світла у вакуумі.

Тоді як для випадку межі розділу «центросиметричний АФМ - вакуум» спектр поверхневого ТМ - поляритона приймає вигляд (див. рис. 1):

$$k_{\perp}^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \left\{ 1 + \left( \frac{\varepsilon_{zz} \gamma_1(\omega) - [\varepsilon_{zz}^2 (\gamma_1(\omega))^2 + (\mu_{xx}(\omega) \varepsilon_{zz} - 1)(1 - \varepsilon_{zz} \varepsilon_{yy}(\omega))]^{1/2}}{\varepsilon_{zz} \varepsilon_{yy}(\omega) - 1} \right)^2 \right\}. \quad (5)$$

Як видно з рис. 1 при зміні знака проекції постійного зовнішнього електричного поля на напрямок нормалі до межі розділу середовищ, змінюється локалізація спектра поверхневого магнітного ТМ- поляритона на площині зовнішніх параметрів «частота – хвильове число». Подібна ситуація для спектра поляритонної ТМ- хвилі, при зміні знаку  $(\mathbf{E}_0 \mathbf{n})$ , має місце у випадку  $\mathbf{k} \in YZ$ ,  $\mathbf{l}_0 \parallel OZ$ ,  $\mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{n} \parallel OY$ .



Поряд із цим у **підрозділі 1.4** також показано що, порівняно з випадком  $|\mathbf{E}_0|=0$ , КМОВ викликає істотну трансформацію спектра однопарціального поверхневого магнітного поляритона ТЕ -типу при  $|\mathbf{E}_0|\neq 0$ . Так, якщо у випадку  $|\mathbf{E}_0|=0$ , спектр поверхневого магнітного ТЕ- поляритона для  $\mathbf{k} \in XY$ ,  $\mathbf{l}_0 \parallel OZ$ ,  $\mathbf{n} \parallel OY$  або  $\mathbf{n} \parallel OX$  має вигляд, представлений на рис. 2 [4], то при  $|\mathbf{E}_0|\neq 0$  й  $\mathbf{E}_0 \parallel OY, \mathbf{l}_0 \parallel OZ, \mathbf{n} \parallel OY, \mathbf{k} \in XY$ , як видно з рис. 3, змінюється не тільки розташування гілок спектра на площині  $\omega$  й  $k_{\perp}$ , але і їхня кількість залежно від знака  $(\mathbf{E}_0 \mathbf{n})$ . Для обох типів поляризації поверхневих магнітних поляритонів вивчена можливість цілеспрямованого впливу за допомогою  $\mathbf{E}_0$  на величину та напрямок групової швидкості, а також на тип поляритонної

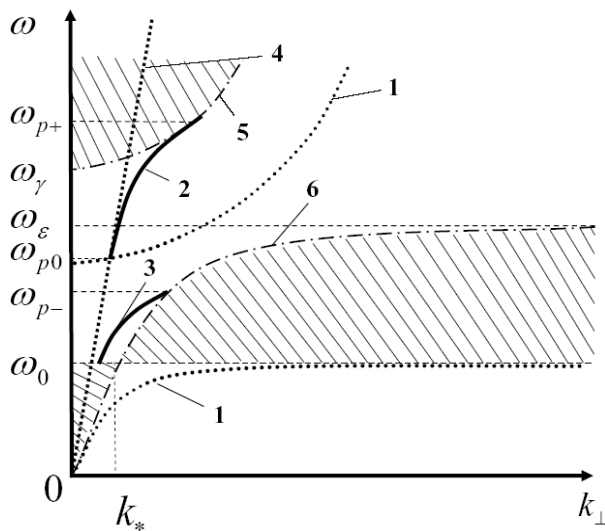


Рис. 1. Области можливого існування поверхневих та об'ємних (заштриховані ділянки) ТМ-поляритонів у випадку напівнескінченного ЛВ АФМ при  $\mathbf{k} \in YZ$ ,  $\mathbf{l}_0 \parallel \mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{n} \parallel OZ$ . Криві: 1-закон дисперсії поверхневого магнітного ТМ- поляритона на межі розділу «АФМ - ідеальний метал» ( $\omega < \omega_0$  при  $(\mathbf{E}_0 \mathbf{n}) > 0$  і  $\omega > \omega_0$  при  $(\mathbf{E}_0 \mathbf{n}) < 0$ ); 2 і 3 –закон дисперсії поверхневого магнітного ТМ-поляритона на межі розділу «АФМ – вакуум» при  $(\mathbf{E}_0 \mathbf{n}) < 0$  і  $(\mathbf{E}_0 \mathbf{n}) > 0$  відповідно; лінія 4 – закон  $\omega = ck_{\perp}$ ; криві 5 і 6 – закон дисперсії нормального магнітного поляритона необмеженого ЛВ АФМ.

хвилі (поляритон першого або другого типу за класифікацією [5]).

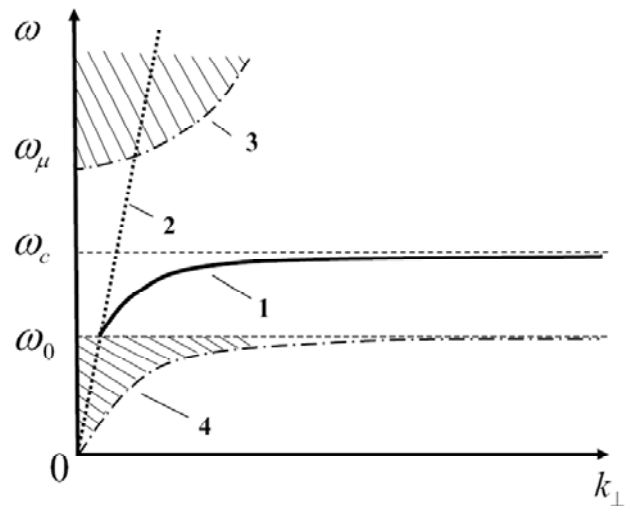


Рис. 2. Области можливого існування поверхневих та об'ємних (заштриховані ділянки) ТЕ-поляритонів на межі розділу «АФМ- вакуум» при  $|\mathbf{E}_0|=0$ ,  $\mathbf{l}_0 \parallel OZ$ ,  $\mathbf{n} \parallel OX$  (або  $\mathbf{n} \parallel OY$ ),  $\mathbf{k} \in XY$ , 1 - спектр поверхневого магнітного ТЕ- поляритона [4], лінія 2 – відповідає рівнянню  $\omega = ck_{\perp}$ ; криві 3 і 4 – закон дисперсії нормального магнітного поляритона необмеженого центросиметричного ЛВ АФМ;  $\omega_{\mu}$  - відповідає частоті, при якій  $\mu_{xx}(\omega) = \mu_{yy}(\omega) = 0$ .

**Підрозділ 1.5** присвячений аналізу умов формування та поширення поверхневих магнітних поляритонів ТМ- і ТЕ- типу поблизу зовнішньої поверхні напівобмеженого магнітно скомпенсованого центросиметричного мультифероїка. Розрахунок проведено для моделі центросиметричного сегнетоантиферомагнетика із квадратичною магнітоелектричною взаємодією. Для межі розділу «сегнетоантиферомагнетик – вакуум» знайдено та проаналізовано дисперсійні співвідношення для поверхневих магнітних s- та р-поляритонів. Продемонстрована можливість впливу на електродинаміку магнітних поверхневих поляритонних хвиль шляхом зміни величини та напрямку рівноважного вектора спонтанної електричної поляризації і вектора антиферомагнетизму відносно нормалі до межі розділу середовищ.

У **другому розділі** дисертації досліджено динаміку магнітних поляритонів у магнітних сандвіч-структурах типу «пластина центросиметричного АФМ в необмеженому немагнітному середовищі» та «центросиметричний скомпенсований АФМ- немагнітний діелектрик – центросиметричний скомпенсований АФМ». **Підрозділ 2.1** присвячений аналізу впливу КМОВ на характер рефракції поляритонних хвиль р- типу та зв'язку наявних особливостей рефракції з формою перетину поверхні хвильових векторів площиною падіння електромагнітної хвилі. Як приклад розглянуто межу розділу «центросиметричний антиферомагнетик – вакуум» у ненульовому постійному зовнішньому електричному полі. Теоретично доказано, що завдяки впливу КМОВ, під дією  $|\mathbf{E}_0| \neq 0$  для об'ємної р- поляризованої хвилі

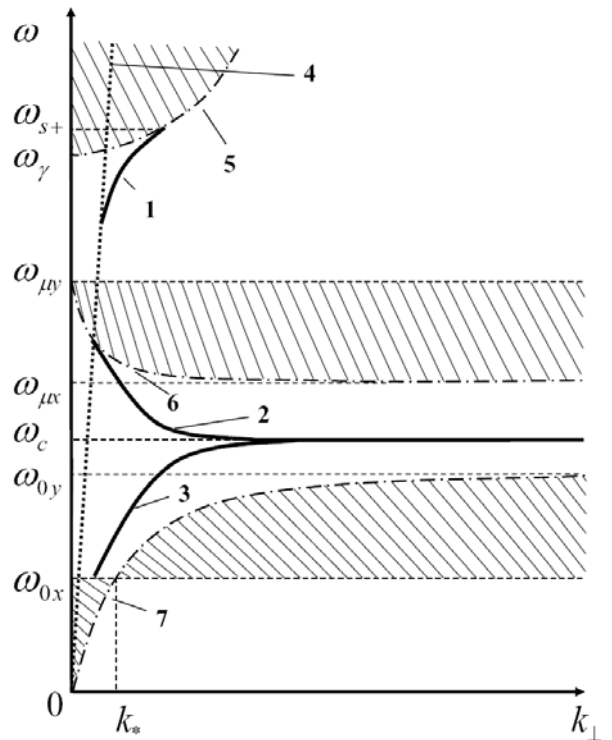


Рис. 3. Области існування поверхневих та об'ємних (заштриховані ділянки) ТЕ-поляритонів на межі розділу «АФМ – вакуум» при  $\mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{n} \parallel OY$ ,  $\mathbf{k} \in XY$ ,  $(\mathbf{I}_0 \parallel OZ)$ . 1, 2- закон дисперсії поверхневого ТЕ поляритона при  $(\mathbf{E}_0 \mathbf{n}) > 0$ , 3 - при  $(\mathbf{E}_0 \mathbf{n}) < 0$ ,  $\omega_\gamma$  – корінь рівняння  $\gamma^2 = \mu_{xx} \varepsilon_{zz}$ ; 4 – відповідає рівнянню  $\omega = ck_\perp$ ; 5, 6, і 7 – закони дисперсії нормального магнітного поляритона необмеженого центросиметричного ЛВ АФМ;  $\omega_{\mu x}$  і  $\omega_{\mu y}$  - відповідають частотам, при яких  $\mu_{xx}(\omega) = 0$  та  $\mu_{yy}(\omega) = 0$ , відповідно, а  $\omega_{0x}$  та  $\omega_{0y}$  - полюсам  $\mu_{xx}(\omega)$  та  $\mu_{yy}(\omega)$ .

на межі «центросиметричний АФМ – немагнітний діелектрик» за умови, що хвильовий вектор  $\mathbf{k} \in YZ$  та  $\mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{l}_0 \parallel \mathbf{n}$ , спостерігається аномальна рефракція, а у випадку  $\mathbf{E}_0 \perp \mathbf{l}_0 \parallel \mathbf{n}$  - негативна рефракція. Оскільки хвилеводні ТМ- поляритони у пластині являють собою результат багаторазового відбиття плоскої хвилі відповідного типу від поверхонь меж розділу середовищ [6], то в цьому ж розділі показано, що знайдені вище аномалії рефракції призводять також до додаткових особливостей у спектрі хвилеводних магнітних ТМ- поляритонів, що розповсюджуються вздовж пластини центросиметричного АФМ при  $|\mathbf{E}_0| \neq 0$ . Так вже у електростатичному наближенні вплив КМОВ індукує формування електродипольноактивної об'ємної спінової хвилі (магнона Е-типу). При цьому при  $\mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{l}_0 \parallel \mathbf{n}$  - всі моди Е- магнона мають позитивну групову швидкість (відносяться до прямих хвиль), а при  $\mathbf{E}_0 \perp \mathbf{l}_0 \parallel \mathbf{n}$  - від'ємну (відносяться до зворотних хвиль). Таким чином, для заданої відносної орієнтації нормалі до поверхні півки та напрямку поширення об'ємної спінової хвилі можна за допомогою зміни напрямку  $\mathbf{E}_0$  змінювати тип хвилі з прямого на зворотний та навпаки.

У наступному підрозділі (**підрозділ 2.2**) проаналізована роль КМОВ у формуванні спектра поверхневих (антихвилеводних) магнітних поляритонів ТМ- та ТЕ- типу, що поширюються вздовж пластини центросиметричного ЛВ АФМ у постійному зовнішньому електричному полі. Зокрема, показано, що для заданих величин хвильового числа  $k_{\perp}$  та електричного поля  $\mathbf{E}_0$  є можливість зміни кількості мод спектру поляритонної хвилі в залежності від товщини пластини від двох до нуля.

Аналіз впливу КМОВ на поляритонну динаміку необмеженого центросиметричного скомпенсованого АФМ, що має плоский немагнітний дефект кінцевої товщини в ненульовому зовнішньому електричному полі проведений у **підрозділі 2.3**. Розрахунок зокрема показав, що у випадку, якщо постійне зовнішнє електричне поле ортогональне до площини дефекту, то як при  $\mathbf{l}_0 \parallel \mathbf{E}_0$ , так і при  $\mathbf{l}_0 \perp \mathbf{E}_0$ , поблизу його поверхні можливе формування зв'язаного стану двох поверхневих магнітних поляритонів ТМ-типу (щільного магнітного ТМ- поляритона). При цьому кількість мод у спектрі даного збудження залежить зокрема від товщини немагнітного дефекту. Слід зазначити, що даний тип хвилі відсутній при  $|\mathbf{E}_0| = 0$ .

У **третьому розділі** досліджені особливості електродинаміки негіротропного напівобмеженого одновимірного магнітного фотонного кристала типу «центросиметричний скомпенсований АФМ – немагнітний діелектрик» у постійному зовнішньому електричному полі. Аналіз проводився двома методами: як за допомогою матриці переходу, так і за допомогою методу ефективного середовища.

Матриця переходу, що зв'язує тангенціальні компоненти полів елементарного періоду магнітної надгратки (МНГ), яка отримана в **підрозділі**

**3.1** дисертації, для всіх геометрій незалежного поширення магнітних поляритонів ТМ- і ТЕ- типу, має вигляд:

$$\begin{pmatrix} H_\rho(d) \\ E_\tau(d) \\ E_\rho(d) \\ H_\tau(d) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T^p_{11} & T^p_{12} & 0 & 0 \\ T^p_{21} & T^p_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T^s_{11} & T^s_{12} \\ 0 & 0 & T^s_{21} & T^s_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_\rho(0) \\ E_\tau(0) \\ E_\rho(0) \\ H_\tau(0) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

де  $d$  - ширина елементарного періоду МНГ;  $\rho, \tau = x, y, z$ ;  $\tau$  - координата вздовж напрямку поширення поверхневої хвилі,  $\rho$  - координата вздовж перпендикуляра до площини падіння об'ємної електромагнітної хвилі, верхній індекс  $p$  або  $s$  відповідає типу поляризації падаючої електромагнітної хвилі,

$$T_{ik}^\alpha = N_{il}^\alpha M_{lk}^\alpha; \quad \alpha = p, s; \quad i, l, k = 1, 2; \quad (7)$$

$$M_{11}^\alpha = ch(q_1^\alpha d_1) + sh(q_1^\alpha d_1) \frac{Z_1^\alpha - Z_{1*}^\alpha}{Z_1^\alpha + Z_{1*}^\alpha}; \quad M_{12}^\alpha = -\frac{2sh(q_1^\alpha d_1)}{Z_1^\alpha + Z_{1*}^\alpha};$$

$$M_{21}^\alpha = -2sh(q_1^\alpha d_1) \frac{Z_1^\alpha Z_{1*}^\alpha}{Z_1^\alpha + Z_{1*}^\alpha};$$

$$M_{22}^\alpha = ch(q_1^\alpha d_1) - sh(q_1^\alpha d_1) \frac{Z_1^\alpha - Z_{1*}^\alpha}{Z_1^\alpha + Z_{1*}^\alpha}; \quad (8)$$

$$N_{11}^\alpha = ch(q_2^\alpha d_2); \quad N_{12}^\alpha = -\frac{sh(q_2^\alpha d_2)}{Z_2};$$

$$N_{21}^\alpha = -Z_2 sh(q_2^\alpha d_2); \quad N_{22}^\alpha = ch(q_2^\alpha d_2).$$

Тут  $d_1, d_2$  - товщина магнітного й немагнітного шарів МНГ ( $d = d_1 + d_2$ );  $q_1^\alpha, q_2^\alpha$  - зворотна глибина проникнення магнітної поляритонної хвилі ТМ- або ТЕ- типу ( $p$ - або  $s$ - поляризації) у відповідний шар;  $Z_2^\alpha$  поверхневий імпеданс електромагнітної хвилі для діелектричного шару, а  $Z_1^\alpha$  і  $Z_{1*}^\alpha$  не рівні лише при  $\mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{n}$  та відповідають поверхневому імпедансу електромагнітної хвилі на протилежних поверхнях АФМ шару. Якщо  $|\mathbf{E}_0| = 0$  то  $Z_1^\alpha = Z_{1*}^\alpha$ .

У **підрозділі 3.2** за допомогою матриці переходу отримано співвідношення для амплітудного коефіцієнта проходження та відбиття об'ємної електромагнітної хвилі від поверхні напівнескінченної МНГ. Знайдений коефіцієнт проходження може мати максимум, що обумовлено наявністю поверхневих магнітних поляритонів.

На поверхні розглянутого одновимірного магнітного фотонного кристалу можливе існування трьох типів колективних поверхневих поляритонних збуджень, що відрізняються характером взаємодіючих поляритонних хвиль (тригонометричний або гіперболічний тип хвилі) на елементарному періоді МНГ. Дисперсійне співвідношення для поверхневої поляритонної хвилі, що формується на межі розділу «МНГ - немагнітний діелектрик» вдається одержати у неявному вигляді. Однак, припущення про ідентичність електродинамічних властивостей зовнішнього, відносно МНГ, діелектричного середовища та немагнітних шарів розглянутої надгратки дає можливість знайти необхідні умови існування та явний вигляд дисперсійних співвідношень поверхневих магнітних поляритонів. З аналізу цих співвідношень випливає, що новою обставиною, у порівнянні з випадком  $|\mathbf{E}_0| = 0$ , є те, що при  $|\mathbf{E}_0| \neq 0$  в спектрі колективних поверхневих ТЕ-поляритонів напівобмеженої МНГ, утворюються додаткові моди, існування яких обумовлене впливом КМОВ. Крім того, формування поверхневої поляритонної хвилі ТМ типу, що є результатом інтерференції двох гіперболічних поляритонних хвиль одного елементарного періоду МНГ, є винятково результатом впливу КМОВ та  $|\mathbf{E}_0| \neq 0$ . Зазначений тип поверхневої хвилі існує лише при  $q_1^\alpha d_1 > q_2^\alpha d_2$ . Показано, що кількість мод у спектрі колективних магнітних поляритонів та ступінь локалізації цих поляритонних збуджень поблизу поверхні надгратки залежить, як від величини і напрямку зовнішнього електричного поля, так і від відносної товщини магнітного та немагнітного шарів надгратки.

Якщо ж немагнітне середовище, що входить до складу одновимірної напівобмеженої надгратки, та немагнітне середовище, що заповнює зовнішній відносно МНГ півпростір, не ідентичні за своїми електродинамічними параметрами, то аналіз умов формування та дисперсійних властивостей ТМ- та ТЕ- поляритонів може бути проведений лише чисельно. Однак у довгохвильовому наближенні задача може бути вирішена за допомогою метода ефективного середовища. Суть даного методу полягає в тому, що за умови малості ширини елементарного періоду МНГ у порівнянні з довжиною падаючої електромагнітної хвилі міжшарові граничні умови можна вважати виконаними по всій ширині періоду надгратки.

Проведений аналіз дисперсійних властивостей поверхневих магнітних поляритонів у довгохвильовому наближенні у **підрозділі 3.3** на прикладі геометрії  $\mathbf{k} \in YZ, \mathbf{I}_0 \parallel \mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{n} \parallel OZ$  показав, що на межі розділу МНГ із ідеальним металом або немагнітним діелектриком у постійному зовнішньому електричному полі формується однопарціальний поверхневий магнітний ТМ – поляритон. Причому, для межі «ідеальний метал - МНГ» - це поляритон першого типу, а для межі «немагнітний діелектрик - МНГ» - віртуальний поверхневий поляритон [5]. Крім того, істотної трансформації при  $|\mathbf{E}_0| \neq 0$  зазнає спектр поверхневого магнітного ТЕ- поляритону на межі «немагнітний діелектрик - МНГ». Для обох типів поляризації поверхневих магнітних

поляритонів частотна область локалізації хвилі залежить від знака  $(\mathbf{E}_0 \mathbf{n})$ , а її існування можливе при  $q_1^\alpha d_1 > q_2^\alpha d_2$ . Глибина проникнення об'ємної електромагнітної хвилі у надгратку в зазначеному випадку змінюється зворотно пропорційно товщині антиферомагнітних шарів надгратки та величині постійного зовнішнього електричного поля.

У **четвертому розділі** дисертаційної роботи проведено дослідження динаміки магнітних ТМ- поляритонів центросиметричного скомпенсованого АФМ із одночасним врахуванням ефектів просторової дисперсії та КМОВ при  $|\mathbf{E}_0| \neq 0$ . Як механізм, що формує просторову дисперсію, була обрана неоднорідна обмінна взаємодія.

У **підрозділі 4.1** аналіз динаміки поверхневого магнітного ТМ-поляритона проводився в кулонівському наближенні (тобто при  $\omega/c \rightarrow 0$ ) для випадків  $\mathbf{n} \parallel \mathbf{l}_0 \parallel \mathbf{E}_0 \parallel OZ$ ,  $\mathbf{k} \in YZ$  і  $\mathbf{n} \parallel \mathbf{E}_0 \parallel OY$ ,  $\mathbf{l}_0 \parallel OZ$ ,  $\mathbf{k} \in YZ$ . Розрахунок показав, що вплив ефекту просторової дисперсії поряд з неоднорідною обмінною взаємодією призводить до того, що розглянутий ТМ- поляритон є двопарціальним. Остання обставина призводить до збільшення кількості можливих варіантів локалізації досліджуваної хвилі (рис. 4) поблизу поверхні АФМ.

На основі одночасного врахування електродинамічних граничних умов та обмінних граничних умов Радо - Уіртмена отримано спектр двопарціального магнітного поверхневого кулонівського ТМ – поляритона (див. рис. 4). Розрахунок показав, що залежно від величини хвильового числа  $k_\perp$  характер локалізації даної хвилі поблизу поверхні АФМ кристалу істотно змінюється. За мірою зростання величини тангенціальної компоненти хвильового вектора поляритона  $k_\perp$  хвиля переходить із узагальненого поверхневого поляритона р-типу  $(\text{Re} q_{1,2} \neq 0; \text{Im} q_{1,2} \neq 0,$

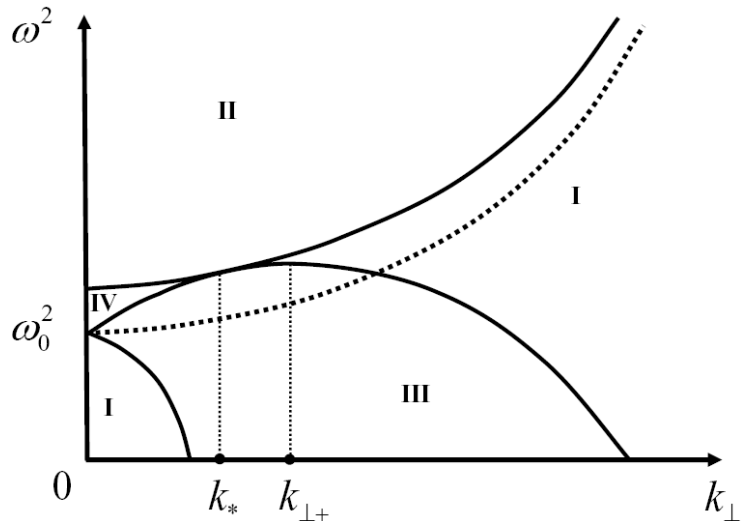


Рис. 4. Можливі типи та спектр (крапкова лінія) двопарціальних кулонівських ТМ-поляритонів з  $\mathbf{k} \in YZ$ , що формуються під впливом зовнішнього електричного поля  $\mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{l}_0 \parallel \mathbf{n} \parallel OZ$  поблизу поверхні однорідного АФМ. Область I відповідає поверхневому поляритону ( $q_1^2 > 0; q_2^2 > 0$ ), II – псевдоповерхневому поляритону ( $q_1^2 > 0; q_2^2 < 0$ ), III – узагальненому поверхневому поляритону ( $\text{Re} q_{1,2} \neq 0; \text{Im} q_{1,2} \neq 0$ ), IV – об'ємному магнітному поляритону ( $q_{1,2}^2 < 0$ ).

$q_{1,2}$  - зворотні глибини спадання відповідних парціальних хвиль у магнітному середовищі) у двопарціальний поверхневий ТМ- поляритон  $q_{1,2}^2 > 0$ . З аналізу отриманих співвідношень виходить, що досліджуваний поляритон існує лише при  $|\mathbf{E}_0| \neq 0$  та не реалізується без одночасного врахування ефекту неоднорідного обміну та КМОВ.

У **підрозділі 4.2** на основі одночасного врахування КМОВ та неоднорідної обмінної взаємодії аналітично вивчено локальну кривизну поверхні хвильових векторів (ПХВ) нормального кулонівського ТМ-поляритону в необмеженому центросиметричному скомпенсованому АФМ у постійному зовнішньому електричному полі. На основі порівняння отриманих результатів з розрахунками із попереднього підрозділу було, зокрема, показано, що необхідними умовами існування знайденого типу поляритонної хвилі є: 1) наявність на ПХВ нормальної об'ємної ТМ- хвилі ділянки з негативною гаусовою кривизною, 2) збіг напрямку поширення кулонівського магнітного ТМ- поляритона з напрямком, у якому кривизна ПХВ максимальна.

Спільний вплив КМОВ та ефектів просторової дисперсії на форму ПХВ центросиметричного скомпенсованого АФМ дає підставу очікувати появу ряду особливостей у динаміці об'ємних поляритонів.

У **підрозділі 4.3** досліджені умови поширення об'ємного кулонівського магнітного ТМ- поляритона (магнона E- типу) з  $\mathbf{k} \in YZ$  у пластині центросиметричного скомпенсованого антиферомагнетика в постійному зовнішньому електричному полі  $\mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{l}_0 \parallel \mathbf{n} \parallel OZ$  й  $\mathbf{E}_0 \parallel OY, \mathbf{l}_0 \parallel \mathbf{n} \parallel OZ$ . Проведений аналіз спектру хвилеводних магнітних ТМ- поляритонів ультратонкої пластини центросиметричного АФМ (тобто коли довжина падаючої хвилі набагато більша товщини пластини), яка знаходиться в немагнітному середовищі, показує, що у випадку  $\mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{l}_0 \parallel \mathbf{n}$  хвилеводний магнітний ТМ- поляритон являє собою хвилю прямого типу, а при  $\mathbf{E}_0 \perp \mathbf{l}_0 \parallel \mathbf{n}$  на спектрі хвилі є мінімум, тобто напрямок групової швидкості поляритонної хвилі залежить від величини тангенціальної складової хвильового вектора падаючої об'ємної електромагнітної хвилі р- поляризації. При цьому вважалось, що на поверхні пластини здійснені обмінні умови Радо - Уіртмена. Зазначена особливість спектру хвилеводних ТМ-поляритонів ультратонкої АФМ пластини проявляється в результаті гібридизації ефектів просторової дисперсії та КМОВ.

Для довільної товщини АФМ пластини аналіз дисперсійних властивостей об'ємних E- магнонів проводився при  $\omega/c \rightarrow 0$ . З рівнянь електростатики, електродинамічних граничних умов та граничних умов Кітеля, за допомогою апарата інтегральних рівнянь, були отримані дисперсійні співвідношення для металізованої пластини центросиметричного АФМ при  $|\mathbf{E}_0| \neq 0$ . З аналізу знайденого спектру входить, що одночасний вплив ефекту неоднорідної обмінної взаємодії та КМОВ у випадку

$\mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{I}_0 \parallel \mathbf{n} \parallel OZ$  може призводити до формування кросовера на дисперсійних кривих з різним порядковим номером мод коливань, а при  $\mathbf{E}_0 \parallel OY, \mathbf{I}_0 \parallel \mathbf{n} \parallel OZ$  – до утворення мінімуму на дисперсійних кривих. Причому, як при  $\mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{I}_0 \parallel \mathbf{n}$ , так і при  $\mathbf{E}_0 \perp \mathbf{I}_0 \parallel \mathbf{n}$ , внесок неоднорідної обмінної взаємодії може пригнічувати ефекти, пов'язані із впливом КМОВ. Дана ситуація має місце для мод з високими порядковими номерами, при цьому для обох зазначених вище варіантів орієнтації  $\mathbf{E}_0, \mathbf{I}_0$  та  $\mathbf{n}$  моди розглянутого об'ємного  $E$  – магнона будуть являти собою хвилі прямого типу, що не мають ні точок кросоверу, ні точок екстремуму.

У цьому ж розділі побудована ПХВ нормальних кулонівських ТМ – поляритонів та знайдено зв'язок її локальної геометрії з конфігурацією спектра об'ємних кулонівських ТМ- поляритонів, як для  $\mathbf{E}_0 \parallel \mathbf{I}_0 \parallel \mathbf{n}$ , так і для  $\mathbf{E}_0 \perp \mathbf{I}_0 \parallel \mathbf{n}$ .

У висновках сформульовані основні результати роботи.

## ВИСНОВКИ

Підсумком роботи можна вважати наступні результати:

1) У постійному зовнішньому електричному полі квадратична магнітооптична взаємодія (КМОВ) приводить до формування на межі розділу «центросиметричний АФМ - вакуум» та «центросиметричний АФМ - ідеальний метал» нового типу поверхневого магнітного ТМ- поляритона, а також індукує трансформацію поверхневого магнітного ТЕ- поляритона на межі «центросиметричний скомпенсований АФМ – вакуум». Дисперсійні властивості та характер локалізації зазначених поляритонів істотно залежать від величини та напрямку постійного зовнішнього електричного поля.

2) Для падаючої ззовні на поверхню центросиметричного АФМ об'ємної електромагнітної хвилі р- типу в постійному зовнішньому електричному полі реалізується максимум амплітудного коефіцієнта проходження за умови, що частота та кут падіння об'ємної хвилі одночасно задовольняють закону дисперсії поверхневого магнітного ТМ- поляритона, що поширюється вздовж межі розділу «центросиметричний - ідеальний метал».

3) У пластині центросиметричного АФМ, яку поміщено у постійне зовнішнє електричне поле, КМОВ приводить до формування нового типу безобмінних об'ємних спин-хвильових збуджень - електростатичних спінових хвиль. Їхні дисперсійні властивості визначаються орієнтацією постійного зовнішнього електричного поля відносно нормалі до поверхні пластини та площини поширення хвилі.

4) Для заданого хвильового числа кількість мод поверхневих магнітних поляритонів ТМ- типу, що формуються у постійному зовнішньому електричному полі в пластині центросиметричного скомпенсованого АФМ або в сандвіч-структурі «АФМ – немагнітний діелектрик – АФМ», можна



змінювати від двох до нуля шляхом зміни товщини пластини або у випадку сандвіч-структури – товщини немагнітного шару.

5) Вже в наближенні ефективного середовища поблизу зовнішньої поверхні одновимірного магнітного фотонного кристала типу «центросиметричний антиферромагнетик – немагнітний діелектрик» у постійному зовнішньому електричному полі можливі формування нового типу колективних поверхневих магнітних ТМ- поляритонів, а також істотна перебудова спектра колективних поверхневих магнітних ТЕ- поляритонів. Кількість гілок у спектрі зазначених поверхневих збуджень ТМ- та ТЕ-поляризації та їхні дисперсійні властивості, а також ступінь локалізації поблизу поверхні надгратки залежать як від величини і напрямку зовнішнього електричного поля, так і від відносної товщини магнітного та немагнітного шарів надгратки.

6) Одночасне врахування поряд із КМОВ також і ефекту просторової дисперсії призводить вже в електростатичному наближенні до формування поблизу поверхні просторово однорідного напівобмеженого центросиметричного АФМ нового типу двопарціального поверхневого магнітного ТМ - поляритона.

7) Знайдена взаємно однозначна відповідність між локальною геометрією перетину поверхні рефракції нормальних кулонівських ТМ-поляритонів необмеженого центросиметричного АФМ площиною падіння електромагнітної хвилі та особливостями цього типу поляритонів у просторово обмеженому зразку.

## ПЕРЕЛІК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кринчик Г.С. Физика магнитных явлений / Кринчик Г.С. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – 336 с.
2. Магнитооптика и спектроскопия антиферромагнетиков/ [В.В. Еременко, Н.Ф. Харченко, Ю.Г. Литовченко и др.]. – К.: Наукова думка, 1989. – 262 с.
3. Магнитное двупреломление света в антиферромагнитных фторидах переходных металлов/ А.С. Боровик –Романов, Н.М. Крейнс, А.А. Панков, А.А. Талалаев // ЖЭТФ. – 1973. – Т.64, №5. – С. 1762 -1775.
4. Abraha K. Theory of far infrared properties of magnetic surfaces, films and superlattices / K. Abraha, D.R. Tilley // Surf. Sci. Rep. – 1996. – Vol.24, №3. – P.125-222.
5. Поверхностные поляритоны. Поверхностные электромагнитные волны на границах сред / [Под ред. Аграновича В.М., Миллса Д.В.] - М.: Наука, 1985.- 526 с.
6. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / Л.М. Бреховских – М.: Наука, 1973. – 343 с.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА МАТЕРІАЛАМИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Савченко А.С. Индуцированная внешним электрическим полем локализация магнитного ТМ- поляритона вблизи поверхности магнитоупорядоченного кристалла / А.С. Савченко, С.В. Тарасенко // *Опт. и спектр.* – 2005. – Т. 98, №3. – С.431-441.
2. Особенности отражения объемной электромагнитной ТМ -волны от пластины негиротропного сегнетомагнетика / А.С. Савченко, С.В. Тарасенко, Т.Н. Тарасенко, К.И. Примак // *ФНТ.* – 2006. - Т.32, № 1. - С. 83-90.
3. Савченко А.С. Новый механизм формирования виртуальных поверхностных магнитных поляритонов / А.С. Савченко, С.В. Тарасенко, Т.Н. Тарасенко // *Оптика и спектроскопия.* – 2006. – Т.100, №6. – С.972–981.
4. Савченко А.С. Особенности локализации магнитных ТМ-поляритонов в структуре «сегнетоэлектрик - негиротропный магнетик» / А.С. Савченко, С.В. Тарасенко // *Кристаллография.* - 2006. - Т.51, №4.- С.689–695.
5. Савченко А.С. Поверхностная спин-волновая электродинамика легкоосного антиферромагнетика во внешнем постоянном электрическом поле / А.С. Савченко, С.В. Тарасенко, Т.Н. Тарасенко // *ФТТ.* – 2007. - Т.49, №2.- С.267-276.
6. Кулагин Д.В. Трансформация поляритонного спектра одномерного магнитного фотонного кристалла в постоянном внешнем электрическом поле / Д.В. Кулагин, А.С. Савченко, С.В. Тарасенко // *Оптика и спектроскопия.* – 2007. - Т.102, №4.- С.929–939.
7. Савченко А.С. Особенности отражения объемной электромагнитной ТЕ-волны от пластины негиротропного сегнетомагнетика / А.С. Савченко, С.В. Тарасенко // *ФНТ.* – 2007. - Т.33, № 5.- С.552-563.
8. Савченко А.С. Трансформация спектра поверхностных магнитных ТЕ-поляритонов в условиях квадратичного электрооптического эффекта / А.С. Савченко, С.В. Тарасенко // *Кристаллография.* - 2007. - Т.52, №4.- С.696–702.
9. Кулагин Д.В. Трансформация спектра ТЕ- поляритонов одномерного магнитного фотонного кристалла в условиях квадратичного электрооптического эффекта / Д.В. Кулагин, А.С. Савченко, С.В. Тарасенко // *ФТТ.* – 2007. - Т.49, №10.- С.1842-1848
10. Савченко А.С. Индуцированная внешним электрическим полем локализация электромагнитной волны вблизи поверхности антиферромагнитного кристалла / А.С. Савченко, С.В. Тарасенко // *Новые магнитные материалы для микроэлектроники: XIX международная школа-семинар, 28 июня–2июля 2004 г. : тезисы докл.* – М., 2004. - С. 320 – 321.

11. Savchenko A.S. Surface polariton dynamic of the antiferromagnet medium under the external electric field / A.S. Savchenko, S.V. Tarasenko // Trends in Magnetism (EASTMAG-2004): 2-nd Euro-Asian symposium, 24-27 August, 2004: abstr. book – Krasnoyarsk, 2004. - P 264.
12. Савченко А.С. Особенности динамики поверхностных поляритонов легкоосного антиферромагнетика во внешнем электрическом поле / А.С. Савченко, С.В. Тарасенко // Ломоносов-2005: международная конференция студентов аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам; секция «Физика», 12-16 апр. 2005 г. : тезисы докл. – М., 2005. - Т.2. - С. 162-163.
13. Савченко А. Поверхневі ТМ- і ТЕ- поляритони легкоосного антиферромагнетика у зовнішньому електричному полі / А. Савченко // Еврика-2005: міжнародна конференція студентів та молодих вчених з теоретичної і експериментальної фізики, 24-26 трав. 2005 р. : тези допов. – Львів, 2005. – С. 54-55.
14. Savchenko A.S. The peculiarities of surface magnetic s-polariton formation in the nongyrotropic magnetic medium in the constant electric field / A.S. Savchenko, S.V. Tarasenko // Fifth international young scientists' conference on applied physics, 20-24 June 2005: abstr. book – Kyiv, 2005. - P. 81.
15. Savchenko A.S. The new mechanism of virtual surface polariton formation / A.S. Savchenko, S.V. Tarasenko // Moscow international symposium on magnetism, 25-30 June 2005: abstr. book – Moscow, 2005. – P. 108-109.
16. Savchenko A.S. The anomalies of the volume ТМ- (ТЕ-) wave reflection for the ant ferromagnetic crystal under the external electric field / A.S. Savchenko, S.V. Tarasenko // Functional materials: international conference, 3-8 October 2005: abstr. book – Crimea, Partenit, 2005 - P. 148.
17. Савченко А.С. Аномалии спектра ТЕ- поляритонов антиферромагнитного кристалла во внешнем электрическом поле / А.С. Савченко, С.В. Тарасенко // Оптика-2005: IV международная конференция молодых ученых и специалистов, 17-21 октября 2005г.: тезисы докл. - Санкт-Петербург, 2005. - С. 298.
18. Савченко А.С. Аномалии отражения объемной ТМ- волны от пластины одноосного антиферромагнетика во внешнем электрическом поле / А.С. Савченко, С.В. Тарасенко // Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ-2005): международная научная конференция, 26-28 окт. 2005 г. : тезисы докл. – Минск, 2005. - Т.1 - С. 71-72.
19. Kulagin D. Polariton spectrum of unidimensional magnetic photonic crystal in the permanent electric field / D. Kulagin, A. Savchenko, S. Tarasenko // Еврика-2006: міжнародна конференція студентів та молодих вчених з теоретичної і експериментальної фізики, 15-17 трав. 2006 р. : тези допов. – Львів, 2006. - С. 18.

20. Савченко А.С. Особенности локализации магнитных ТМ-поляритонов в структуре «Сегнетоэлектрик - негиротропный магнетик» / А.С. Савченко // Фундаментальные и прикладные проблемы современной физики: Демидовская конференция с международным участием, 25-28 февраля 2006 г. : тезисы докл. – М., 2006. - С.279-280.
21. Кулагин Д.В. Распространение электромагнитных волн в магнитных фотонных кристаллах в условиях квадратичного электрооптического эффекта / Д.В. Кулагин, А.С. Савченко, С.В. Тарасенко // Новые магнитные материалы для микроэлектроники: XX международная школа-семинар, 12 июня–16 июля 2006 г. : тезисы докл.– Москва, 2006. - С. 628.
22. Кулагин Д.В. Трансформация спектра поверхностных поляритонов тонкослойной магнитной сверхрешетки во внешнем электрическом поле / Д.В. Кулагин, А.С. Савченко, С.В. Тарасенко // НАНО – 2007: II всероссийская конференция по наноматериалам, 13 - 16 марта 2007 г. : тезисы докл. – Новосибирск, 2007. – С. 469.
23. Поверхностная динамика негиротропного мультиферроика с квадратичным магнитоэлектрическим взаимодействием / Т.В. Лаптева, С.В. Тарасенко, А.С. Савченко [и др.] // Среды со структурным и магнитным упорядочением (Multiferroics-2007): I международный, междисциплинарный симпозиум, 5-10 сентября 2007г. : тезисы докл. – Ростов-на-Дону, 2007. – С. 159-162.
24. The analysis of a one dimensional gyrotropic magnetic crystal in an external DC field / D.V. Kulagin, A.S. Savchenko, S.V. Tarasenko, V.V. Shtyrhunova // Magnetism on a nanoscale (EASTMAG-2007): Euro-Asian Symposium, 23-26 August 2007: abstr. book – Kazan, 2007. - P 202.
25. Кулагин Д.В. Электродинамика объемных магнитных ТМ-поляритонов пластины центросимметричного антиферромагнетика в постоянном внешнем электрическом поле / Д.В. Кулагин, А.С. Савченко, С.В. Тарасенко // Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ-2007): международная научная конференция, 23-26 окт. 2007 г. : тезисы докл. – Минск, 2007. – Т.1 – С. 195-197.

## АНОТАЦІЯ

**Савченко А.С. Магнітні поляритони у центросиметричних антиферромагнітних структурах: ефекти електричного поля.-Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.11 – Магнетизм. – Донецький фізико-технічний інститут імені О.О. Галкіна, Національна академія наук України, Донецьк, 2008.

Робота присвячена теоретичному вивченню впливу анізотропної квадратичної магнітооптичної взаємодії на поляритонну динаміку низки

обмежених центросиметричних магніто скомпенсованих антиферромагнітних структур, що знаходяться у постійному зовнішньому електричному полі та межують з немагнітним середовищем. На цьому підґрунті зокрема знайдено новий тип віртуального однопарціального поверхневого магнітного ТМ-поляритона, який обумовлений впливом квадратичної магнітооптичної взаємодії. Виявлено цілу низку аномалій в умовах відбиття та проходження об'ємної електромагнітної хвилі скрізь межу розподілу «центросиметричне антиферромагнітне середовище - немагнітний діелектрик». Теоретично доведено, що одночасний вплив анізотропної квадратичної магнітооптичної та неоднорідної обмінної взаємодій зумовлює появу нового типу двухпарціального поверхневого магнітного ТМ- поляритона та виникнення додаткових особливостей у динаміці об'ємних магнітних поляритонів вже у кулонівському наближенні.

**Ключові слова:** квадратична магнітооптична взаємодія, поверхневий поляритон, антиферромагнетик, електричне поле, проходження, відбиття, магнітний фотонний кристал.

## АННОТАЦІЯ

**Савченко А.С. Магнитные поляритоны в центросимметричных антиферромагнитных структурах: эффекты электрического поля. - Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.11 – Магнетизм. – Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, Национальная академия наук Украины, Донецк, 2008.

В работе теоретически изучено влияние анизотропного квадратичного магнітооптичного взаємодія для ряда ограниченных центросиметричных магніто скомпенсованих антиферромагнітних структур, которые находятся в постоянном внешнем электрическом поле и граничат с немагнитной средой. Рассмотрены случаи магнітного полупространства, пластины, магнітної сэндвич-структуры, одномерного магнітного фотонного кристалла. В частности исследованы особенности отражения и прохождения об'ємної електромагнітної волни, падающей извне на одну из выше перечисленных магнітних структур, связанные с обсуждаемым механизмом формирования электродипольноактивных возбуждений в центросиметричных скомпенсованих магнетиках. Определены условия, при выполнении которых на границе раздела «центросиметричный антиферромагнетик – немагнитный диелектрик» во внешнем постоянном электрическом поле могут возникать аномальная или отрицательная рефракции об'ємної електромагнітної волни. На этой основе проанализированы условия формирования, распространения и локализации поверхностных магнітних поляритонов ТМ- и ТЕ- типов на

границе раздела «центросимметричный скомпенсированный антиферромагнетик – вакуум». Показано, что в ненулевом внешнем электрическом поле влияние квадратичного магнитооптического взаимодействия приводит как к возникновению нового типа однопарциального виртуального поверхностного магнитного ТМ-поляритона, так и к коренной перестройке спектра поверхностных магнитных ТЕ - поляритонов. Для случая границы раздела немагнитного диэлектрика и одномерного магнитного фотонного кристалла типа «центросимметричный скомпенсированный антиферромагнетик – немагнитный диэлектрик» проведен анализ особенностей динамики поверхностных поляритонов, обусловленных квадратичным магнитооптическим взаимодействием. Теоретически доказано, что в постоянном внешнем электрическом поле на границе раздела одномерной магнитной сверхрешетки «скомпенсированный антиферромагнетик-немагнитный диэлектрик» возможна реализация нового механизма формирования коллективных поверхностных магнитных ТМ- поляритонов. Подтверждено расчетами, что к аналогичным эффектам в поверхностной поляритонной динамике магнитно скомпенсированного мультиферроика приводит квадратичное магнитоэлектрическое взаимодействие. Исследовано одновременное влияние эффектов пространственной дисперсии и анизотропного квадратичного магнитооптического взаимодействия на характер локализации, распространения и дисперсионные свойства электромагнитных волн, распространяющихся вдоль ограниченного центросимметричного антиферромагнетика. В частности обнаружено, что в этом случае в постоянном внешнем электрическом поле на границе раздела двух полупространств: «центросимметричный АФМ – вакуум», уже в кулоновском пределе формируется новый тип двухпарциального магнитного поверхностного ТМ-поляритона, а в пластине центросимметричного антиферромагнетика при помощи изменения величины и направления постоянного электрического поля можно изменять ряд динамических характеристик кулоновских объемных магнитных поляритонных волн р- типа (например, величину и направление групповой скорости поляритонной волны, частотную область локализации, наличие кроссовера на дисперсионных кривых поляритонных мод и т.д).

**Ключевые слова:** квадратичное магнитооптическое взаимодействие, поверхностный поляритон, антиферромагнетик, электрическое поле, прохождение, отражение, магнитный фотонный кристалл.

**ABSTRACT****Savchenko A.S. Magnetic polariton in centrosymmetrical antiferromagnetic structures: effects of electrical field. - Manuscript.**

Thesis for a competition of candidate science degree in physics and mathematics, speciality 01.04.11 – Magnetism. – Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O. Galkin, National Academy of Sciences of Ukraine, Donetsk, 2008.

The influence of anisotropic quadratic magneto-optical interactions on the polariton dynamic centrosymmetrical compensated antiferromagnetic mediums, which are located in external DC electric field, is considered in the dissertation. The conditions of formation and dispersive equations of surface magnetic polaritons of compensated centrosymmetrical antiferromagnetic, which is located in the external DC electric field are investigated. The new type of one-component surface magnetic TM- polaritons, caused by quadratic magneto-optical interactions, is found. The features of reflection and propagation of volume electromagnetic wave through interface «centrosymmetrical antiferromagnetic medium - dielectric» due external DC electric field are revealed. It is shown that the simultaneous influence of quadratic magneto-optical and inhomogeneous exchange interactions results to the some peculiarities of dynamics volume polaritons and new surface magnetic two-component polariton of TM - type existence.

**Key words:** quadratic magneto-optical interaction, surface polariton, antiferromagnetic, electric field, propagation, reflection, magnetic photon crystal.