Національна академія наук України Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

ПОЛЕВОЙ СЕРГІЙ ЮРІЙОВИЧ

УДК 537.86; 537.874.4; 537.874.4

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ КЕРОВАНИХ МЕТАПОВЕРХОНЬ МІКРОХВИЛЬОВОГО ДІАПАЗОНУ ТА ЇХНЄ ЗАСТОСУВАННЯ

01.04.03 – радіофізика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук

Харків – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова Національної академії наук України, м. Харків.

Науковий консультант:	доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України
	Тарапов Сергій Іванович,
	Інститут радіофізики та електроніки
	ім. О. Я. Усикова НАН України (м. Харків),
	завідувач відділу радіоспектроскопії.
Офіційні опоненти:	доктор фізико-математичних наук, професор,
	член-кореспондент НАН України
	Товстолиткін Олександр Іванович,
	Інститут магнетизму імені В. Г. Бар'яхтара НАН
	України (м. Київ), директор;
	доктор фізико-математичних наук, доцент кафедри
	фізичних основ електронної техніки
	Фесенко Володимир Іванович,
	Радіоастрономічний інститут НАН України (м. Харків),
	провідний науковий співробітник відділу електронних
	НВЧ приладів;
	доктор фізико-математичних наук
	Попов Максим Олександрович.
	Навчально-науковий інститут високих технологій
	Київського національного університету імені Тараса
	Шевченка (м. Київ), доцент кафедри квантової
	раліофізики

Захист відбудеться "<u>13</u>" <u>травня</u> 2025 р. о <u>14⁰⁰</u> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.157.01 Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Акад. Проскури, 12.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України за адресою: 61085, м. Харків, вул. Акад. Проскури, 12.

Автореферат розісланий "<u>07</u>" квітня 2025 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради

Ігор ІВАНЧЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Сьогодні значний інтерес становить вивчення особливостей поширення електромагнітних (ЕМ) хвиль у штучних середовищах і, зокрема, метаматеріалах (ММ) [1*]. У світовій практиці під терміном метаматеріал традиційно мають на увазі штучне середовище, електромагнітні властивості якого визначаються не тільки властивостями його складових компонентів, але й їхнім просторовим розташуванням [2*]. З метою мініатюризації серед метаматеріалів особливий інтерес викликають так звані метаповерхні (МП) [3*, 4*] або планарні метаматеріали, що мають субхвильову товщину.

Історія вивчення електромагнітних штучних матеріалів налічує понад 100 років. Наприклад, в роботі Д. Бозе 1899 року [5*] було отримано великі кути повороту площини поляризації хвилі, що проходить у штучному середовищі у вигляді скрученого джгута. У роботах Р. Вуда і Д. Релея на початку 20-го століття [6*, 7*] для дослідження електромагнітних властивостей метаповерхонь було обрано металеві дифракційні решітки, для яких спостерігалися аномальні смуги поглинання. В роботі В. Кока 1948 року [8*] запропоновано використовувати металеві елементи для покращення характеристик лінз для антен. У 1940–1950-х роках Л. Левіним [9*] і М. А. Хижняком [10*] для створення штучних діелектриків було запропоновано періодично розташовані субхвильові включення з матеріалу, відмінного від навколишнього середовища. У книзі [11*] запропоновано використовувати LC-контур для створення штучного магнетика – тобто середовища з великою магнітною проникністю. Брауном в 1960 році [12*] запропоновано формування штучних діелектриків використовувати для періодично розташовані металеві елементи, такі як пластини, стрижні та диски. У 1962 році В. Ротманом [13*] розглянуто періодично розташовані стрижні та пластини для формування штучних діелектриків з ефективним показником, що менше за одиницю. Пізніше Д. Пендрі та ін. [14*] у 1990-х роках запропоновано схожу ідею для створення матеріалів із від'ємною діелектричною проникністю. Починаючи з 2000-х років, спостерігається значний інтерес з боку дослідників у всьому світі як до метаматеріалів [1*], так і до метаповерхонь [3*, 4*].

роки активно вивчаються метаповерхні, електромагнітні останні В властивості яких є ефективно та швидко перестроюваними, що є однією з важливих особливостей для практичного застосування. Особливий інтерес становить якомога більш плавне й неперервне електронне перестроювання властивостей МП, що збільшує кількість можливих застосувань. Із цією метою в метаповерхні вводять як елементи, що електрично перестроюються, такі як варакторні діоди [15*], так і феродіелектрики, що використовуються В метаповерхнях [5, 10]. Гіротропні магнітоактивних властивості таких метаповерхонь перестроюються за допомогою зовнішнього магнітного поля [16*, 17*]. способом вирішення Іншим механічне цього завдання € наприклад, розтягування/стиснення, перестроювання, яке реалізується на [18*]. Альтернативним підкладках способом пружних механічного перестроювання є використання МП на основі ефекту муару [19*]. Ефект муару –

це поява узору при накладенні двох або більше плоских періодичних структур з однаковими або близькими періодами. Таким чином формується муарова МП як особливий тип квазіперіодичної структури. Її електромагнітні властивості залежать від кута схрещування утворюючих структур при їхньому накладенні (або зсування їх відносно один одного) і від різниці їхніх періодів. Це приводить до появи таких властивостей метаповерхні, які відсутні в окремих структурах, що її утворюють.

Дослідження особливостей електромагнітних властивостей МП мікрохвильового діапазону важливо для фундаментальної науки, оскільки одержання нової інформації про їхні електромагнітні властивості дає можливість розвивати новий напрямок у фізиці керованих електромагнітних метаматеріалів. Для прикладної науки актуальність роботи визначається потребою в розробці компактних і керованих надвисокочастотних (НВЧ) пристроїв, ліній передачі ЕМ хвиль з малими втратами, квантових перетворювачів частоти і систем контролю якості продуктів харчування.

На підставі проведеного вище аналізу вже вирішених завдань фізики метаповерхонь (та інших метаматеріалів, що застосовуються для мікрохвильових і квантових технологій) визначено ряд актуальних невирішених проблем. Зокрема, зазначити проблему подолання такого недоліку метаповерхонь, слід як недостатня гнучкість у керуванні їхніми електромагнітними властивостями. Як правило, МП є вузькосмуговими через їхні резонансні властивості, що обмежує їхнє застосування в мікрохвильових пристроях. Тому в дисертаційній роботі запропоновано вирішення цієї актуальної проблеми у вигляді розробки фізичних принципів електромагнітними властивостями керування метаповерхонь мікрохвильового діапазону за допомогою механічного електронного й перестроювання (за допомогою зовнішнього магнітного поля електромагніту).

Отже, *актуальність дисертаційної роботи* обумовлено потребою створення фізичних принципів ефективного керування електромагнітними властивостями метаповерхонь мікрохвильового діапазону за допомогою механічного й електронного перестроювання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційну роботу виконано радіоспектроскопії відділі y Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України в рамках досліджень, проведених за держбюджетними науково-дослідними роботами (НДР): «Вивчення взаємодії електромагнітних та звукових хвиль, а також заряджених часток з твердотільними структурами» (шифр «Кентавр-5», номер 0112U000211, держреєстрації виконавець): «Дослідження взаємодії електромагнітних та ЗВУКОВИХ хвиль, a також заряджених частинок 3 наноструктурами та метаматеріалами» (шифр «Кентавр-6», номер держреєстрації 0117U004038, виконавець); «Дослідження взаємодії електромагнітних хвиль, а також заряджених частинок з наноструктурами та метаматеріалами» (шифр держреєстрації 0122U001687, «Кентавр-7», виконавець); спільний номер українсько-польський науково-дослідний проєкт «Невзаємні топологічні хвилі у лініях передач із резонансами з магнітною перебудовою у мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль» (шифр «Топаз», номери держреєстрації 0120U103409,

0121U113757, виконавець); HAH України дослідницькими грант лабораторіями/групами молодих вчених HAH України «Діелектричні метаповерхні поляризаційно-виродженим спектром високоточного 3 для кіральних речовин» (шифр «Стокс», номер детектування держреєстрації 0122U002101, керівник роботи); науково-дослідний проєкт програми NATO SPS «Конвертаційні технології для квантової сенсорики та безпеки комунікацій» (шифр «Квант», номери держреєстрації 0123U103737, 0124U003555, виконавець); а також у рамках досліджень, проведених під час участі в міжнародних проєктах: проєкт NATO SPS G5005 (програма НАТО «Наука заради миру та безпеки») "Magnetic resonance & MW detection of improvised explosive and illicit materials" / "Магнітний резонанс та мікрохвильове детектування потенціально-вибухових та небезпечних матеріалів", головна установа Технічний Університет Гебзе (Туреччина), виконавець; проєкт NATO SPS G5859 (програма НАТО «Наука заради миру та безпеки») "Conversion Technologies for Quantum Sensing & Secure Communications" / "Технології перетворення для квантового зондування і безпечного зв'язку", головна установа Технічний Університет Гебзе (Туреччина), номер держреєстрації №94/114, виконавець.

Мета і завдання дослідження

Мета роботи – виявлення експериментальними та чисельними методами таких особливостей спектральних і поляризаційних властивостей метаповерхонь, які необхідні для реалізації ефективного керування цими властивостями в мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Провести огляд часто використовуваних методів керування електромагнітними властивостями метаповерхонь.

2. Розробити ефективний підхід до керування поляризаційними властивостями метаповерхонь малої, в порівнянні з довжиною хвилі, товщини за допомогою зовнішнього магнітного поля в мікрохвильовому діапазоні.

3. Розробити ефективний підхід до керування спектральними властивостями метаповерхонь на ефекті муару за допомогою їхнього механічного перестроювання в мікрохвильовому діапазоні.

4. Дослідити ефективність керування спектральними властивостями фотонного кристала з магнітними включеннями в коаксіальному виконанні.

5. Визначити вплив матеріальних параметрів елементів комбінованого штучного електромагнітного аналога топологічного ізолятора мікрохвильового діапазону на його дисперсійні властивості.

6. Розробити ефективний підхід до керування ближнім полем самокомплементарних метаповерхонь мікрохвильового діапазону.

Також з метою продемонструвати застосовність планарних технологій для практичних застосувань необхідно:

1. Розробити підхід до збільшення фотон-магнонного зв'язку для системи планарного мікрохвильового резонатора й магнітної плівки, яку розташовано поблизу його поверхні.

2. Дослідити застосовність планарного фотонного кристала в мікрохвильовому діапазоні для експрес-аналізу рідин у радіопрозорих ємностях.

Об'єктом дослідження є процеси поширення електромагнітних хвиль у керованих метаповерхнях мікрохвильового діапазону довжин хвиль.

Предметом дослідження є електромагнітні властивості метаповерхонь мікрохвильового діапазону довжин хвиль (вплив геометричних параметрів, механічного перестроювання та зовнішнього магнітного поля на властивості метаповерхонь).

Методи дослідження

Експериментальні дослідження електромагнітних властивостей метаповерхонь і планарних резонаторів із магнетиками проведено за допомогою апробованих методик мікрохвильового діапазону довжин для ХВИЛЬ **i**3 використанням векторного аналізатора кіл Agilent N5230A, генератора частоти Keysight N5173B-UNT, лабораторних електромагнітів із датчиками магнітного поля та спеціалізованих комп'ютерних програм. Експериментальні дослідження просторового розподілу електромагнітного поля проведені методом пробного тіла з використанням спеціалізованого двовимірного скануючого пристрою, що керується за допомогою комп'ютера. Результати чисельного моделювання електромагнітних властивостей метаповерхонь i планарних резонаторів розраховано методом інтегральних функціоналів [20*] та за допомогою спеціалізованих пакетів чисельного моделювання CST Studio Suite, MIT Photonics Bands (MPB).

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше в мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль для феродіелектричної метаповерхні на основі паралелепіпедів:

- експериментально продемонстровано зростання ефекту Фарадея на частоті граткової моди в 5 разів у порівнянні з феродіелектричним шаром такої ж товщини;

- експериментально встановлено, що поблизу частоти граткової моди структура повертає площину поляризації хвилі на великий кут до 90°.

2. В мікрохвильовому діапазоні експериментально й чисельно виявлено вплив форми субхвильових канавок на поверхні феритової пластини на частоту феромагнітного резонансу (ФМР). При цьому вперше:

- з'ясовано механізм зростання частоти ФМР зі збільшенням глибини канавок, що обумовлено впливом розмагнічуючих факторів структурованого фериту;

- визначено, що при напруженості зовнішнього магнітного поля, більшої за поле насичення ферита $H_0 > 2500$ E, залежність частоти ФМР від глибини канавок стає монотонною.

3. Досліджено спектральні властивості метаповерхонь на основі ефекту муару, що механічно перестроюються. Вперше в мікрохвильовому діапазоні:

- експериментально й чисельно здійснено перестроювання в межах 90% від частоти резонансного поверхневого коливання шляхом зміни кута схрещування двох однакових періодичних структур із гексагональною елементарною коміркою; - чисельно продемонстровано зростання частоти поверхневих коливань магнітоактивної муарової метаповерхні з гексагональною елементарною коміркою шляхом збільшення напруженості зовнішнього магнітного поля;

- експериментально здійснено регулювання величини резонансного мінімуму в спектрі метаповерхні з масивів схрещених металевих смуг, розділених тонким тефлоновим прошарком, шляхом зміни товщини прошарку та кута схрещування смуг.

4. Вперше в мікрохвильовому діапазоні експериментально розроблено спосіб безконтактної експрес-ідентифікації рідин у радіопрозорих ємностях, що базується на виникненні поверхневого коливання в неоднорідному мікросмужковому планарному фотонному кристалі. При цьому:

- розроблено методику безконтактного детектування домішок метилового спирту у водних розчинах етилового спирту;

- знайдено діапазон частот, де вплив товщини стінки ємності на результати ідентифікації рідин нехтовно малий.

5. Вперше в мікрохвильовому діапазоні реалізовано значне підвищення фотон-магнонного зв'язку (ФМЗ) планарного резонатора у вигляді розрізаного кільця з феримагнітним зразком шляхом збільшення концентрації змінного магнітного поля в зразку. Зокрема:

- продемонстровано збільшення величини ФМЗ до 40% для круглого резонатора, модифікованого шляхом розширення утворюючої смужкової лінії, завдяки концентрації поля в центрі резонатора, де розташовано феримагнітний зразок;

- продемонстровано збільшення величини ФМЗ більш ніж на 10% для подвійного резонатора у вигляді розрізаного кільця з феримагнітним зразком на частоті зв'язаних коливань.

6. Вперше чисельно показано ефективне керування дисперсійними властивостями електромагнітного аналога топологічного ізолятора, сформованого двоперіодичним гексагональним масивом еліптичних циліндрів із кварцу, шляхом вибору напрямку одноосьової анізотропії кварцу. Зокрема:

- показано, що ширина забороненої зони суттєво збільшується (до 10%) при співпадінні головної осі анізотропії кварцу та геометричної осі циліндра;

- показано, що частоти поверхневих хвиль у системі комбінованого топологічного ізолятора, сформованого двома структурами з різними параметрами елементарної комірки, доцільно регулювати шляхом вибору напрямку одноосьової анізотропії кварцу.

Практичне значення одержаних результатів

З точки зору фундаментальної науки проведені дослідження розширюють відомі дані про ефективні способи керування електромагнітними властивостями метаповерхонь мікрохвильового діапазону за допомогою зовнішнього магнітного поля, механічного перестроювання та зміни матеріальних параметрів елементів. Комбінування декількох підходів до керування приводить до того, що досягається ще більша гнучкість у перестроюванні електромагнітних властивостей метаповерхонь. З точки зору прикладної науки проведені дослідження електромагнітних властивостей метаповерхонь мікрохвильового діапазону забезпечують розробку нових поколінь мікрохвильових пристроїв. Такі пристрої (фільтри, поляризатори, лінії передачі з малими втратами на основі топологічних ізоляторів, випромінювачі ближнього поля на основі самокомплементарних метаповерхонь та ін.) мають такі переваги як компактність і можливість ефективно керувати їхніми електромагнітними властивостями.

Розроблена методика швидкої безконтактної ідентифікації рідин у радіопрозорих ємностях за допомогою неоднорідного планарного фотонного кристала (ПФК) перспективна для успішного застосування в системах контролю якості харчових продуктів, у системах безпеки і для хімічних технологій.

Результати проведених досліджень фотон-магнонного зв'язку планарних резонаторів з магнітною плівкою перспективні для розробки компактних елементів для ефективних перетворювачів частоти з мікрохвильового в оптичний діапазон.

Особистий внесок здобувача

Автором особисто запропоновано й реалізовано методику експериментального [1, 5, 6, 10, 13] та чисельного [6, 13] дослідження ближніх електромагнітних полів поблизу метаповерхонь мікрохвильового діапазону.

Автор особисто провів експериментальні дослідження [6], чисельне моделювання й аналіз спектральних властивостей муарових метаповерхонь у вільному просторі [6, 26].

Автор брав основну участь у проведенні експериментальних досліджень спектральних і поляризаційних властивостей гіротропних метаповерхонь у мікрохвильовому діапазоні [5, 10, 20, 28] (налагодження раніше розробленої та створеної автором експериментальної установки з поздовжнім намагнічуванням, реєстрація спектрів коефіцієнту проходження у магнітному полі, аналіз результатів).

Автор брав основну участь у проведенні експериментальних досліджень [11, 22] і чисельному моделюванні мікрохвильових магніторезонансних властивостей феритових елементів зі структурованою поверхнею [11, 24, 27].

Автор брав основну участь в експериментальних дослідженнях спектральних властивостей метаповерхонь, що механічно перестроюються, на основі масиву схрещених металевих смужок [1, 17].

У роботі [12] автор провів аналіз результатів чисельного моделювання дисперсійних властивостей топологічних ізоляторів і картин просторового розподілу електромагнітного поля.

Автор проводив розрахунки спектральних властивостей шаруватих середовищ із магнітними елементами в коаксіальному хвилеводі, а також брав основну участь у виготовленні експериментальних структур, проведенні експериментальних досліджень і аналізі отриманих результатів [7, 21].

Автор брав участь у розробці і виготовленні експериментальних структур, проведенні експериментальних досліджень з безконтактної ідентифікації рідин в ємностях на основі методики з використанням неоднорідного ПФК і в аналізі результатів [2 – 4, 8, 9, 18, 25].

Автор розробив спеціалізовану комп'ютерну програму [2–4, 8, 9, 18] для обробки експериментальних результатів у вигляді залежності резонансної частоти й оберненої добротності ПФК від відстані до ємності з рідиною для її безконтактної ідентифікації.

Автор проводив чисельні розрахунки спектрів коефіцієнту проходження і величини фотон-магнонного зв'язку для планарних резонаторів з магнітними зразками в роботах [13, 30, 31, 38]. Автор брав участь у виготовленні досліджуваних планарних резонаторів, проведенні експериментальних досліджень та в аналізі результатів в роботах [13, 14, 16, 30, 31].

Автор особисто розробив спеціалізовану комп'ютерну програму для реєстрації та візуалізації результатів експериментів із дослідження спектрів планарних резонаторів із магнітними зразками в магнітному полі, яка застосовувалася в роботах [13, 31, 34, 36, 38].

Вибір адекватної аналітичної моделі зв'язаних планарних мікрохвильових резонаторів, а також чисельне моделювання і формування висновків виконано автором одноосібно в роботі [34].

Автор виконав чисельне моделювання дисперсійних властивостей самокомплементарних метаповерхонь і картин просторового розподілу електромагнітного поля поблизу їхньої поверхні [15, 32, 37].

Автор брав повноцінну участь в обговоренні й аналізі результатів, формуванні висновків і написанні всіх публікацій, які лягли в основу даної дисертаційної роботи [1 – 38].

Апробація результатів дисертації

Результати досліджень було представлено й обговорено на науковому семінарі відділу теоретичної фізики Інституту радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, а також на наступних міжнародних конференціях, симпозіумах і семінарах:

- 2016 9th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, MSMW'2016, June 21–24, 2016, Kharkiv, Ukraine;
- 9th URSI-France 2017 Workshop "Radio Science for Humanity", JS'17, February 1–3, 2017, Sophia Antipolis, France;
- The European Conference "Physics of Magnetism 2017", PM'17, June 26–30, 2017, Poznań, Poland;
- International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), September 25–28, 2017, Dnipro, Ukraine;
- 6th International Conference on Superconductivity and Magnetism, ISCM'2018, April 29 May 4, 2018, Antalya, Turkey;
- 9-th International Conference for Professionals & Young Scientists "Low Temperature Physics 2018", June 4–8 2018, Kharkiv, Ukraine;
- 3rd International Advanced School on Magnonics, IASM'2018, September 17–21, 2018, Kyiv, Ukraine;
- 23-й міжнародний молодіжний форум "Радіоелектроніка і молодь у XXI столітті", 16–18 квітня 2019 г., Харків, Україна;

- 2019 Conference "Kleinheubacher Tagung 2019", September 23–25, 2019, Miltenberg, Germany;
- 20th International Young Scientists Conference "Optics and High Technology Material Science", SPO-2019, September 26–29, 2019, Kyiv, Ukraine;
- The Fifth Poznań Symposium on Quantum Technologies, Nonlinear Optics, Magnonics, and Metamaterials, QuTecNOMM-2019, October 15 November 18, 2019, Poznan, Poland;
- "Photonics & Electromagnetics Research Symposium" (PIERS-2022), April 25–28, 2022, Hangzhou, China;
- International Conference On Quantum Materials And Technologies (ICQMT2022), October 16–22, 2022, Milas-Bodrum, Turkey;
- Online conference "2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week" (UkrMW'2022), November 14–18, 2022;
- "Quantum 2.0 Conference", June 18–22, 2023, Denver, USA;
- "Photonics & Electromagnetics Research Symposium" (PIERS-2023), July 3–6, 2023, Prague, Czech Republic;
- 2023 IEEE 13th International Conference "Nanomaterials: Applications & Properties" (IEEE NAP-2023), September 10–15, 2023, Bratislava, Slovakia;
- NATO Advanced Research Workshop "Functional Spintronic Nanomaterials for Radiation Detection and Energy Harvesting", September 25–27, 2023, Kyiv, Ukraine;
- 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). October 2–6, 2023, Kharkiv, Ukraine;
- 2023 IEEE 6th International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics" (UkrMiCo), November 13–18, 2023, Kyiv, Ukraine.

Публікації

Результати дисертації було опубліковано в 38 роботах, з них 16 статей у спеціалізованих наукових журналах [1-16] (в тому числі за класифікацією Scimago Journal and Country Rank 4 статті Q1 [1, 10, 13, 15], 1 стаття Q2 [5], 6 статей Q3 [2, 4, 7, 8, 14, 16], 1 стаття Q4 [6]) і 22 тези доповідей на конференціях [17-38] (з яких 1 робота без співавторів [34]).

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається з анотації, переліку умовних позначень, вступу, 8 розділів, висновків, списку використаних джерел і одного додатка. Її обсяг становить 325 сторінок. Дисертація містить 131 рисунок (0 на окремих сторінках), 1 таблицю та 205 використаних джерел. **У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету й завдання дослідження, наведено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи й інформацію про структуру та обсяг дисертації.

У розділі 1 проведено огляд наукової літератури, що стосується досліджень електромагнітних властивостей метаповерхонь мікрохвильового й оптичного діапазонів. Розглянуто питання керування електромагнітними властивостями метаповерхонь різними методами, а також практичні застосування метаповерхонь.

У першому підрозділі аналіз ряду робіт [21*, 22*] для оптичного діапазону дозволяє зробити висновок, що посилення магнітооптичних ефектів може бути досягнуто як у метаповерхнях, що використовують резонанси на поверхневих плазмон-поляритонах, так і в повністю діелектричних метаповерхнях, що використовують граткові резонанси або хвилеводні моди. Однак задачу посилення ефекту Фарадея в метаповерхнях мікрохвильового діапазону вивчено ще недостатньо, хоча такі метаповерхні мають багатообіцяючі перспективи.

У другому підрозділі на прикладі аналізу робіт, виконаних в оптичному [23*] і мікрохвильовому [19*] діапазонах, можна зробити висновок, що ЕМ властивості метаповерхонь на ефекті муару можна ефективно перестроювати механічно. Такі метаповерхні мають багатообіцяючі перспективи при створенні фільтрів, що механічно перестроюються та мають малу, в порівнянні з довжиною хвилі, товщину. Слід зазначити, що метаповерхні на ефекті муару для мікрохвильового діапазону вивчено ще недостатньо.

У третьому підрозділі на прикладі роботи [24*] показано, що, комбінуючи декілька мікрохвильових планарних резонаторів із плівкою магнетика, можна досягти збільшення широкосмуговості та реалізувати багаточастотний фотонмагнонний зв'язок, який є перспективним для розробки квантових перетворювачів частоти. Однак у такій системі величина фотон-магнонного зв'язку і кооперативності залишаються недостатньо великими.

фізиці твердого тіла виділяють структури, що отримали назву У топологічний ізолятор (TI). Основна їхня особливість полягає в тому, що у середині об'єму вони мають властивості діелектрика (ізолятора), а на поверхні є провідниками електричного струму. Для фізики мікрохвильового діапазону також важливо досліджувати властивості електромагнітних аналогів ТІ. Такі ТІ можуть мати специфічні електромагнітні властивості, які проявляються через їхню структуру, наприклад, наявність захищених від локальних дефектів крайових ЕМ станів. Структури такого типу становлять значний інтерес серед дослідників та інженерів за ΤI можна здійснювати TOMV, що допомогою передачу електромагнітної енергії з незначними втратами як в оптичному [25*], так і в мікрохвильовому діапазонах [26*]. ТІ такого типу демонструють схожі, порівняно з класичними TI, властивості відносно спінових і електромагнітних хвиль.

У підрозділі 4 на прикладі аналізу декількох робіт [26*, 27*] розглянуто спосіб керування поширенням ЕМ хвиль у ТІ мікрохвильового діапазону за

допомогою магнітного поля. Однак цей спосіб вимагає застосування електромагніту, що збільшує габарити пристрою.

Таким чином, на підставі проведеного вище аналізу вже вирішених завдань фізики керованих метаповерхонь (та інших планарних метаматеріалів), в даній дисертаційній роботі запропоновано вирішення проблеми ефективного керування електромагнітними властивостями метаповерхонь мікрохвильового діапазону за допомогою механічного й електронного перестроювання.

Розділ 2 присвячено дослідженню електромагнітних властивостей магнітокерованих метаматеріалів, а саме метаповерхонь субхвильової товщини, що містять феродіелектричні елементи [5, 10, 20, 19, 28]. Також досліджено вплив структурування поверхні одиночного феритового елемента [11, 22, 24] на його магніторезонансні властивості, зокрема, на частоту феромагнітного резонансу.

підрозділі розглянуто особливості першому електромагнітних У властивостей двох типів структур, що містять феродіелектричні елементи, а саме, метаповерхні на основі квадратних призм і повністю феродіелектричної метаповерхні у вигляді двоперіодичного масиву циліндрів, розміщених на шарі ж феродіелектричного матеріалу. Для даних метаповерхонь того експериментально і теоретично проаналізовано проходження через них плоских електромагнітних хвиль і продемонстровано посилення ефекту Фарадея в мікрохвильовому діапазоні.

На рис. 1, а схематично показано геометрію досліджуваної МП на основі квадратних призм [5]. ТМ-поляризована пласка хвиля падає з півпростору z < 0 на двошарову метаповерхню під кутом θ щодо осі z. На рисунку показано тільки чотири елементарні комірки нескінченної періодичної структури.

Елементарна комірка метаповерхні складається з паралелепіпедів, що описуються комплексною магнітною і діелектричною проникністю у формі тензорів. Напрямок зовнішнього магнітного поля обрано вздовж осі z (геометрія Фарадея), а його напруженість знаходиться в діапазоні $H_s = 100 - 2700$ Е. При цьому магнітний тензор містить недіагональні елементи.

Для експериментального й чисельного дослідження було обрано структуру з розмірами паралелепіпедів $d_x = d_y = 0.8L$ у площині x - y. Підкладкою було обрано полістиролову пластину, а гіротропний шар виготовлено з фериту марки 1СЧ4. Фотографію досліджуваної структури показано на рис. 1, б.

Електромагнітні властивості метаповерхні, які проявляються в особливостях формування як дальніх і ближніх полів, так і спектрів коефіцієнтів проходження ЕМ хвиль, було змодельовано методом інтегральних функціоналів [20*].

Із чисельно розрахованого коефіцієнта проходження крос-поляризованої компоненти T_{xy} електромагнітної хвилі, що нормально падає ($\theta = 0^\circ$, $\alpha = 0^\circ$) на метаповерхню, знайдено, що для будь-якої товщини гіротропного шару h/L спостерігається високодобротний резонанс граткового типу. При цьому спостерігається майже повне перетворення поляризації хвилі, що пройшла крізь МП, тобто площина поляризації повертається на кут близько 90° із великим коефіцієнтом проходження T_{xy} , що дорівнює приблизно 0,1. Таким чином, досліджувана двошарова метаповерхня демонструє значне посилення ефекту

Фарадея на величину приблизно в 5 разів більшу, ніж для суцільного феродіелектричного шару такої ж сумарної товщини. За такої умови частота резонансної моди нехтовно мало залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля, а резонансне значення T_{xy} різко зростає зі збільшенням магнітного поля.



Рисунок 1 – Метаповерхня на основі двоперіодичного масиву квадратних феродіелектричних призм на діелектричній підкладці: а – схема; б – фотографія

З розрахованих просторових розподілів поля для відбитих E_x і E_y -компонент у безпосередній близькості від поверхні на резонансній частоті структури було визначено, що розподіл поля відповідає саме резонансу граткового типу.

З метою перевірки отриманих чисельно результатів було проведено експериментальне дослідження метаповерхні на основі квадратних призм [5]. Експериментальна установка складається з вищезгаданої метаповерхні, розміщеної між двома рупорними антенами (рис. 2, а). Приймальний рупор повертається навколо своєї осі для вимірювання поляризаційних характеристик структури. Для вимірювань у зовнішньому магнітному полі структуру і рупори було розташовано між полюсами електромагніту, які мають осьові отвори.

Для експериментального дослідження було виготовлено феродіелектричну метаповерхню з такими геометричними параметрами: період квадратної елементарної комірки L = 9,19 мм, товщина феритового шару h = 0,1L, товщина діелектричної підкладки $h_s = 0,267L$ (рис. 1, б).

Для вивчення особливостей поляризаційних властивостей метаповерхні було експериментально досліджено величину фарадіївського обертання площини поляризації ЕМ хвилі, що пройшла, в дальньому полі. На рис. 2, б наведено залежність кута повороту головної осі еліпса поляризації θ_t хвилі, що пройшла крізь метаповерхню, від напруженості зовнішнього магнітного поля й частоти.

Експериментально встановлено, що починаючи з напруженості магнітного поля близько 600 Е поблизу частоти 23,85 ГГц структура повертає площину поляризації хвилі на кут до 90° (рис. 2, б), що є дуже значною величною. Відзначимо, що структура з суцільним феритовим шаром такої ж товщини повертає площину поляризації на кут у кілька разів менше. Отже, посилення ефекту Фарадея для досліджуваної метаповерхні підтверджено експериментально.



Рисунок 2 – Експериментальна установка для дослідження спектральних і поляризаційних характеристик феродіелектричної метаповерхні (а); експериментальна залежність кута повороту головної осі еліпсу поляризації хвилі, що пройшла крізь гіротропну метаповерхню, як функція частоти й напруженості зовнішнього магнітного поля (б)

З метою демонстрації схожих ефектів для більш простих у виготовленні структур розглянуто повністю феродіелектричну метаповерхню [10] (рис. 3, а). Для цього було обрано двоперіодичний масив циліндрів, розміщених на шарі з того ж феродіелектричного матеріалу (ферит марки L14H).



Рисунок 3 – Повністю феродіелектрична метаповерхня: а – фотографія досліджуваної структури; б – експериментальні частотні залежності кросполяризованого T_{xy} і ко-поляризованого T_{xx} коефіцієнта проходження ЕМ хвилі крізь повністю феродіелектричну метаповерхню при напруженості зовнішнього магнітного поля $H_s = 100$ Е залежно від нормованого періоду структури L/λ

Для дослідження поляризаційних характеристик структури було виміряно експериментальні частотні залежності крос-поляризованого T_{xy} і ко-поляризованого T_{xx} коефіцієнтів проходження для нормально падаючої пласкої

12

електромагнітної хвилі ($\theta = 0^{\circ}$, $\alpha = 0^{\circ}$), що пройшла крізь метаповерхню, для зовнішнього магнітного поля з напруженістю $H_s = 100$ E (рис. 3, б).

3 рис. 3, б видно, що крос-поляризований коефіцієнт проходження ЕМ хвиль має максимум поблизу нормованої резонансної частоти 0,644 L/λ , де λ – довжина хвилі у вакуумі, з відносно значною величиною, приблизно рівною $T_{xy} = 0,35$. Це означає, що метаповерхня демонструє посилення ефекту Фарадея завдяки своїм резонансним властивостям.

Отже, експериментально й чисельно показано, що для двох типів двоперіодичних метаповерхонь, які мають субхвильову товщину та складаються з періодично розташованих феродіелектричних елементів на підкладці, спостерігається посилення ефекту Фарадея в мікрохвильовому діапазоні.

У другому підрозділі досліджено особливості магніторезонансних властивостей магнітоактивного метаматеріалу у вигляді зразків структурованого фериту як перспективного елементу магнітокерованої метаповерхні. Набір зразків такого фериту (структурованого завдяки субхвильовим канавкам, виконаним на його поверхні) вивчено методом електронного спінового резонансу (ЕСР) залежно від напрямку та глибини канавок на поверхні ферита і величини зовнішнього магнітного поля.

Як структурований магнітоактивний метаматеріал обрано шість зразків фериту у формі паралелепіпеда (марка 1СЧ4, $4\pi M_s = 4750$ Гс, g = 2,14) із розмірами $a \times b \times c = 7,2 \times 3,4 \times 1,0$ мм [11]. Структурування об'єкта забезпечено тим, що на одній стороні зразка було виконано паралельні канавки (гребінчаста структура з періодом 0,4 мм) (рис. 4, а, б). Усі зразки було розділено на дві серії. У першій серії канавки розташовано паралельно довгій стороні зразка *a*, а в другій серії канавки розташовано перпендикулярно цій стороні.



Рисунок 4 – Типовий зразок структурованого фериту: а – схематичний вигляд зразка; б – отримане за допомогою скануючого електронного мікроскопа зображення зразка з канавками

З метою аналізу залежності частоти феромагнітного резонансу (ФМР) досліджуваних зразків структурованого фериту від їхніх геометричних параметрів було проведено чисельне моделювання з урахуванням факторів розмагнічування зразків і глибини канавок *d* на них.

У ході експерименту кожний зразок поміщали всередину металевого порожнього прямокутного хвилеводу з перетином $A \times B = 23 \times 10$ мм, в якому збуджували основну моду TE_{10} . Зовнішнє постійне магнітне поле H_0 спрямовано уздовж вузької сторони хвилеводу. Частотні спектри коефіцієнта проходження електромагнітних хвиль через хвилевід зі зразком реєстрували при необхідних значеннях напруженості зовнішнього магнітного поля H_0 за допомогою спеціально розробленої комп'ютерної програми.

З аналізу залежності частоти ФМР від глибини канавок випливає висновок, що резонансна частота f_{FMR} зразка зростає зі збільшенням напруженості поля H_0 для всіх значень глибини канавок d. Крім того, частота f_{FMR} зростає зі збільшенням глибини канавок d при фіксованих значеннях поля H_0 . Для наочності залежності $f_{FMR}(d)$ показано на рис. 5.



Рисунок 5 – Експериментальні залежності резонансної частоти f_{FMR} від глибини канавок d для декількох значень зовнішнього магнітного поля H_0 для структурованого фериту у хвилеводі: а – канавки, паралельні стороні a; б – канавки, перпендикулярні стороні a

З рис. 5 видно, що на залежностях умовно виділено дві області – немонотонну («сіра» область) і монотонну («біла» область). Немонотонну поведінку $f_{FMR}(d)$ пояснено тим, що ферит є ненасиченим (в «сірій» області на рис. 5). У випадку, коли $H_0 > H_{sat}$, ферит переходить у насичений стан, і залежність $f_{FMR}(d)$ стає монотонною («біла» область на рис. 5). Інакше кажучи, коли в структурованому фериті виникає магнітне насичення, а саме при $H_0 > H_{sat}$, магнетик виявляється колінеарним. У цьому випадку всередині нього формується внутрішнє поле і величина магнітного поля суттєво перевищує поле поверхневої анізотропії, викликаної структуруванням.

Таким чином, у цьому підрозділі в результаті досліджень обраного структурованого зразка ферита експериментально й чисельно показано, що:

- частота ФМР зростає зі збільшенням глибини канавок для зовнішнього магнітного поля *H*₀ > 2500 E;

- частота ФМР вище для зразків з орієнтацією канавок уздовж широкої сторони зразка при напруженості зовнішнього магнітного поля $H_0 > 2500$ Е в порівнянні з іншою орієнтацією канавок;

- за умови, коли розмір зразка структурованого ферита стає порівнянним із довжиною електромагнітної хвилі в ньому, частота ФМР демонструє різко змінний характер залежності від зовнішнього магнітного поля при напруженості $H_0 \approx 2500$ Е.

Розділ 3 присвячено експериментальному дослідженню спектральних властивостей метаповерхонь із механічним перестроюванням їхніх електромагнітних властивостей, що не вимагає застосування електричного або магнітного полів.

У першому підрозділі розглянуто метаповерхні, що утворені схрещеними масивами металевих смуг, спектральні властивості яких перестроюються за допомогою механічного впливу [1, 17].

Метаповерхнею, що механічно перестроюється, обрано утворюючу структуру з похилою решіткою на основі схрещених металевих смуг, розташованих на підкладці з високочастотного ламіната (рис. 6, а) [1].

На підкладці з періодом a = 7 мм розташовано мідні смуги шириною w = 1 мм і товщиною 18 мкм, які виготовлені за допомогою хімічного травлення. Для метаповерхні було взято дві утворюючі вищеописані структури у вигляді підкладки з мідними смугами, які прилягали одна до одної з боку смуг, утворюючи схрещену з кутом β структуру (рис. 6, а).

Спектри коефіцієнта проходження електромагнітних хвиль крізь метаповерхню, а також ближні поля, було розраховано методом інтегральних функціоналів [20*].



Рисунок 6 – Метаповерхня на основі схрещених металевих смуг: а – елементарна комірка; б – фотографія утворюючих метаповерхню структур

У реальному експерименті завжди є похибка установки метаповерхні відносно хвильового вектора. Тому експериментально досліджено залежність резонансного мінімуму проходження ЕМ хвиль крізь метаповерхню від кута її нахилу відносно хвильового вектора при куті схрещування металевих смуг $\beta = 45^{\circ}$ (рис. 7, а) [17].

Видно, що при зміні кута нахилу метаповерхні відносно осі y від 0° до 6° глибина резонансного мінімуму коефіцієнта проходження ЕМ хвиль зменшується (рис. 7, а). При цьому амплітуда мінімуму проходження при зміні кута падіння хвилі менше 3° слабо зменшується, а при кутах більш 3° сильно зменшується. Найімовірніше, це обумовлено зростанням дифракційних втрат у метаповерхні при збільшенні кута нахилу. Отже, в експерименті припустима похибка при установці структури щодо хвильового вектора повинна бути не більше ніж 3°.



Рисунок 7 – Спектри коефіцієнта проходження електромагнітних хвиль крізь метаповерхню на основі схрещених металевих смуг: а – для декількох значень кута нахилу досліджуваної структури відносно осі *у* (при $\beta = 45^{\circ}$); б – для випадків розділення утворюючих структур зі смугами тефлоновою плівкою різної товщини, що розташована між ними (при $\beta = 60^{\circ}$)

Для оцінки впливу величини зазору між утворюючими структурами в метаповерхні на її резонансні властивості між структурами було розміщено тонкий прошарок у вигляді діелектричної пластини (тефлонової плівки) [17]. На експериментально рис. 7, б показано зареєстровані спектри коефіцієнта проходження ЕМ хвиль для декількох значень товщини тефлонової плівки *t*: від 0 мм до 0,06 мм із кроком 0,02 мм. Як видно з рис. 7, б, при збільшенні товщини мінімуму плівки глибина резонансного зменшується. Зазначимо, ШО досліджуваний резонансний мінімум проходження на спектрі чітко видно при товщині тефлонової плівки до 0,04 мм. У випадку більш товстої плівки лобротність метаповерхні (що відповідає частоті мінімуму коефіцієнта проходження на спектрі) значно знижується. Імовірно, що це відбувається через небажані перевідбиття від утворюючих структур із металевими смугами. Таким чином, в експерименті припустимий зазор між структурами повинен бути не більшим ніж 0.04 мм.

У другому підрозділі з метою перевірки можливості використання ефекту муару для широкосмугового механічного перестроювання спектральних властивостей метаповерхонь експериментально й чисельно продемонстровано керування резонансними властивостями деяких типів одновимірних і двовимірних муарових структур шляхом зміни їхніх геометричних параметрів у мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль.

Для керування частотами поверхневих коливань у метаповерхнях на основі ефекту муару обрано дві утворюючі структури з гексагональною елементарною коміркою, схрещені під певним кутом [6]. Кожна структура є двоперіодичним масивом тонких металевих рівносторонніх шестикутників зі стороною a, розташованих у вузлах гексагональної решітки з періодом p. При накладенні двох таких структур із деяким кутом схрещування α у муаровій метаповерхні формується квазіперіодична структура (рис. 8, а).

Показано, що квазіперіод p_q такої комбінованої структури (гексагональної муарової метаповерхні) залежить від періоду утворюючих структур p, і для малого кута схрещування α дорівнює $p_q = (p/2)/\sin(\alpha/2)$ [28*]. Із цієї формули видно, що зі зменшенням кута α значення квазіперіода збільшується.



Рисунок 8 – Муарова метаповерхня, що є накладенням двох однакових плоских структур із кутом схрещування α : а – схематичне зображення квазіперіодичної структури при $\alpha = 7^{\circ}$; б – фотографія утворюючої структури

Для демонстрації механічного керування частотами поверхневих коливань у двоперіодичній муаровій метаповерхні на основі схрещених структур було обрано наступні параметри: період гексагональної решітки формуючих структур p = 2 мм, розмір сторони мідних шестикутників a = 0,7 мм, товщина мідних елементів 0,035 мм. Структури розміщували впритул одна до одної з кутом схрещування α . Розрахунок проведено для діапазону частот 1 – 15 ГГц і діапазону $\alpha = 3^{\circ} - 12^{\circ}$ (рис. 9, a) схрещування кутів при нормальному падінні електромагнітних хвиль на метаповерхню. З рис. 9, а видно, що в певному діапазоні частот і кутів схрещування структур існує резонансний мінімум проходження хвиль, який зміщується вбік більш високих частот зі збільшенням кута схрещування. Такий зсув резонансу слід пояснити тим, що довжина металевих смуг, які утворюються (шляхів струмів), залежить від кута схрещування структур. Цей резонанс у спектрі відповідає одній із мод поверхневого коливання в даній структурі. Зазначимо, що в діапазоні кутів $\alpha = 8,5^{\circ} - 11,5^{\circ}$ спостерігається монотонне збільшення частоти цієї моди поверхневого коливання зі збільшенням кута схрещування.



Рисунок 9 – Коефіцієнт проходження електромагнітних хвиль крізь муарову метаповерхню залежно від частоти і кута схрещування утворюючих її структур: а – чисельно розрахований; б – експериментальна і розрахункова частота моди поверхневого коливання

З метою експериментальної перевірки виявлених резонансних властивостей двовимірних муарових метаповерхонь виготовлено гексагональну муарову метаповерхню. Період гексагональної решітки утворюючих структур (рис. 8, б) обрано для роботи в НВЧ діапазоні і дорівнює p = 1,125 мм, а розмір сторони металевих шестикутників a = 0,375 мм.

Для порівняння експериментальних даних із результатами чисельного моделювання зареєстровано залежність спектра коефіцієнта проходження електромагнітних хвиль крізь метаповерхню при їхньому нормальному падінні від кута схрещування утворюючих структур. Кружками на графіку (рис. 9, б) позначено ті чисельно розраховані значення частот мінімумів коефіцієнта проходження при декількох обраних кутах схрещування, що потім порівнювали з експериментально зареєстрованими даними. Видно, що є гарне якісне узгодження між експериментально зареєстрованими частотами поверхневих коливань (квадрати) і результатами чисельного моделювання (кола).

підрозділі експериментально Таким чином, y цьому й чисельно ефективне перестроювання продемонстровано безперервне спектральних властивостей метаповерхонь на основі ефекту муару шляхом зміни їх геометричних параметрів. Показано, що:

- квазіперіодичний муаровий метаматеріал, сформований накладенням двох одновимірних планарних фотонних кристалів у мікросмужковому виконанні із близькими періодами, демонструє додаткові заборонені зони на нижчих частотах в спектрі коефіцієнта проходження, що викликані муаровою суперпозицією фотонних кристалів;

коефіцієнта квазіперіодичної - y спектрі проходження муарової метаповерхні, утвореної двома ідентичними схрещеними з одною одна елементарною двоперіодичними структурами з гексагональною коміркою, спостерігаються резонансні мінімуми, що вказують на наявність поверхневих коливань.

У третьому підрозділі чисельно продемонстровано ефективне керування спектральними властивостями магнітоактивних муарових метаповерхонь з феромагнітними включеннями за допомогою зовнішнього магнітного поля [26].

Для визначення ефективності керування частотою поверхневих коливань за допомогою зовнішнього магнітного поля обрано двоперіодичну гексагональну муарову метаповерхню (рис. 10, а). Досліджувана метаповерхня складається з двох планарних структур із гексагональною елементарною коміркою, схрещених одна з одною під заданим кутом α і розділених тонким шаром ферита. Кожна планарна структура є двоперіодичним масивом тонких металевих рівносторонніх шестикутників, розташованих у вузлах гексагональної решітки з періодом p = 2 мм. Розмір сторони металевих шестикутників a = 0,7 мм, а товщина мідних елементів t = 0,035 мм. Дві металеві гексагональні структури розташовано впритул до феритового шару товщиною d = 0,05 мм. Феритовий шар (марки 1СЧ4) намагнічувався перпендикулярно площині структури.



Рисунок 10 – Муарова метаповерхня, що утворена з двох однакових планарних періодичних структур, схрещених під певним кутом α , між якими поміщено тонкий шар фериту: а – схематичне зображення структури при $\alpha = 6^{\circ}$; б – розраховані спектри коефіцієнта проходження електромагнітних хвиль крізь метаповерхню при нормальному падінні хвиль для декількох значень напруженості зовнішнього магнітного поля H_0

Зі спектра коефіцієнта проходження ЕМ хвиль (рис. 10, б) видно, що на деяких певних частотах (позначених f_1 і f_2) помітно резонансні мінімуми проходження хвиль крізь МП, і вони зміщуються вбік більш високих частот зі збільшенням напруженості зовнішнього магнітного поля H_0 . Ці мінімуми відповідають найбільш інтенсивним модам поверхневих коливань, які

збуджуються в досліджуваній магнітоактивній муаровій метаповерхні. Зазначимо, що в спектрі спостерігаються й інші, більш високочастотні моди. Вони викликані протіканням поверхневих струмів по інших, більш коротких шляхах у метаповерхні.

Отже, у цьому підрозділі чисельно продемонстровано ефективне керування спектральними властивостями магнітоактивних муарових метаповерхонь із феромагнітними включеннями за допомогою зовнішнього магнітного поля.

У розділі 4 для розробки фізичних принципів керування спектральними властивостями коаксіальних середовищ із шаруватими (в т.ч. планарними) магнітними включеннями експериментально і теоретично показано можливість ефективного керування положенням забороненої зони в спектрі шаруватого магнітофотонного кристалу (МФК) у коаксіальному виконанні шляхом зміни геометричних розмірів його елементів або величини зовнішнього магнітного поля [7]. Також показано можливість ефективного керування частотою дефектного коливання в забороненій зоні фотонного кристала в коаксіальному виконанні (КФК) при зміні величини зовнішнього магнітного поля.

Для вирішення поставленої задачі керування властивостями шаруватих середовищ у коаксіальній лінії проведено наближені розрахунки коефіцієнтів проходження електромагнітних хвиль крізь такі середовища відомим і апробованим методом характеристичних матриць [29*]. При цьому обрано напрямок зовнішнього магнітного поля уздовж напрямку поширення хвилі – вздовж осі коаксіальної лінії (рис. 11, а).



Рисунок 11 – Експериментальна установка для дослідження спектральних властивостей коаксіальних шаруватих структур у зовнішньому магнітному полі (а); магнітофотонний кристал (б); магнітний дефект, оточений двома діелектричними фотонними кристалами (в)

Для наближеного розрахунку поширення квазі-ТЕМ хвилі в такій коаксіальній лінії використовується ефективна магнітна проникність шарів, намагнічених уздовж осі коаксіальної лінії $\mu_{eff} = (\mu^2 - \beta^2)/\mu$ [30*], де μ –

діагональна, а β – недіагональна компоненти тензора магнітної проникності. Цей вираз виконується тим точніше, чим далі знаходиться частота *f* для розрахунку μ_{eff} від частоти феромагнітного резонансу в магнітних шарах.

Для вимірювання коефіцієнта проходження електромагнітної хвилі крізь шарувате середовище в коаксіальній лінії в зовнішньому магнітному полі використано відповідну експериментальну установку (рис. 11, а).

В експериментах застосовувався ферит марки 1СЧ4 з такими параметрами: діелектрична проникність $\varepsilon = 13, 2 - i0,00528$, постійна згасання $\alpha = 0,064$, намагніченість насичення $4\pi M_S = 4750$ E, *g*-фактор g = 2,14.

У першому підрозділі для демонстрації можливості керування забороненою зоною коаксіального МФК за допомогою магнітного поля теоретично й експериментально досліджено проходження електромагнітної хвилі крізь МФК, що складається з трьох елементарних комірок (рис. 11, б). Кожна елементарна комірка складається із шару фериту товщиною $d_f = 1,0$ мм і шару повітря товщиною d_a .

Експериментально зареєстровано серію частотних залежностей коефіцієнта проходження електромагнітних хвиль крізь МФК із товщинами шарів повітря $d_a = 4,6$ мм (рис. 12, а) і $d_a = 6,0$ мм (рис. 12, б) для декількох значень напруженості зовнішнього магнітного поля *H*. На рисунках штрих-пунктирними лініями позначено частоти лівої та правої границь забороненої зони в спектрі МФК.



Рисунок 12 – Експериментальні частотні залежності коефіцієнта проходження електромагнітних хвиль крізь коаксіальний магнітофотонний кристал, що складався з трьох елементарних комірок із шарів фериту і повітря товщиною d_a для декількох значень напруженості зовнішнього магнітного поля H: а – $d_a = 4,6$ мм; б – $d_a = 6,0$ мм

Аналіз залежності частот границь забороненої зони від напруженості магнітного поля *H* свідчить, що частота границь забороненої зони плавно зміщується в більш високочастотну область зі збільшенням напруженості магнітного поля. Цей результат підтверджено теоретичними розрахунками.

З порівняння рис. 12, а і рис. 12, б видно, що при збільшенні товщини повітряного шару в комірках МФК центр забороненої зони зміщується в бік більш низьких частот. Це обумовлено тим, що на частоті поблизу центру забороненої зони на елементарній комірці МФК укладається ціле число півхвиль.

У другому підрозділі для керування спектральними властивостями КФК запропоновано немагнітний КФК із магнітним дефектними шаром.

Параметри шаруватої структури підібрано таким чином, щоб товщина дефектного шару приблизно дорівнювала половині довжини хвилі у фериті на частоті середини забороненої зони діелектричного КФК. Структура складається з дефектного шару фериту товщиною $d_{def} = 4$ мм, оточеного із двох сторін діелектричними КФК із трьох елементарних комірок кожний (рис. 11, в). Елементарна комірка КФК складається із шару полістиролу товщиною $d_p = 2,8$ мм і шару повітря товщиною $d_a = 4,4$ мм.

Експериментально зареєстровано серію частотних залежностей коефіцієнта проходження ЕМ хвиль для КФК із магнітним дефектним шаром для декількох значень напруженості зовнішнього магнітного поля *H* (рис. 13, а) [7, 25]. З рисунка видно, що частота дефектного піка плавно зміщується в більш високочастотну область при збільшенні напруженості магнітного поля. Цей результат також підтверджено теоретичними розрахунками.



Рисунок 13 — Експериментальні частотні залежності для коаксіального фотонного кристала з магнітним дефектним шаром: а — коефіцієнта проходження електромагнітних хвиль крізь КФК для декількох значень зовнішнього магнітного поля H; б — частоти дефектного піка і частот границь забороненої зони від напруженості зовнішнього магнітного поля H

Така поведінка частоти дефектного піка пояснюється тим, що відбувається зменшення дійсної частини ефективної магнітної проникності μ_{eff} фериту зі збільшенням напруженості магнітного поля у випадку, коли частота феромагнітного резонансу перебуває далеко від частоти дефектного піка, і втрати μ_{eff} будуть малими.

Отже, у розділі 4 експериментально і теоретично показано можливість ефективно керувати положенням забороненої зони та дефектним піком в спектрі

коефіцієнта проходження коаксіального фотонного кристала з магнітними елементами шляхом зміни розмірів складових елементів КФК або величини зовнішнього магнітного поля.

У розділі 5 наведено особливості розробленої методики безконтактної експрес-ідентифікації рідин, що знаходяться в радіопрозорих контейнерах, на основі такого метаматеріалу як неоднорідний планарний фотонний кристал (ПФК).

Як було показано в роботі [31*], у спектрі коефіцієнта проходження електромагнітних хвиль крізь ПФК у мікросмужковому виконанні присутні зони проходження і запирання. На рис. 14, а (пунктирні лінії) наведено розрахункові спектри коефіцієнта проходження хвиль через два різних однорідних ПФК [9]. Однорідний ПФК складається з 8 елементарних комірок, які є ділянками мікросмужкової лінії різної ширини, що чергуються.



Рисунок 14 – Розрахункові залежності спектра коефіцієнта проходження ЕМ хвиль через однорідні ПФК у мікросмужковому виконанні, а також для їхнього послідовного з'єднання (неоднорідного ПФК) (а); експериментальна установка для безконтактної ідентифікації рідин на основі неоднорідного ПФК (б)

При підборі певних геометричних параметрів двох послідовно з'єднаних однорідних ПФК ми одержуємо ПФК із дефектом (неоднорідний ПФК) (рис. 15, а). Середина забороненої зони одного з обраних ПФК лежить поблизу частоти $f_1 = 9,5$ ГГц. Для цього випадку ширина вузьких ділянок обох однорідних ПФК дорівнює 1,5 мм, а широких – 3 мм. Для першого ПФК довжина обох ділянок складає 5 мм, а для другого ПФК довжина вузької ділянки дорівнює 5 мм, широкої – 15 мм. Водночас у певних заборонених зонах в спектрі неоднорідного ПФК з'являється вузький резонансний пік проходження ЕМ хвиль поблизу частоти $f_1 = 9,5$ ГГц (рис. 14, а, суцільна лінія). На частоті піка резонансне мікрохвильове електричне поле набуває форми дуже вузької локалізованої області поблизу границі розділу двох однорідних ПФК [31*].



Рисунок 15 – Резонансні комірки на основі неоднорідних ПФК, що використовувалися в експерименті на частотах: $f_1 = 9,5$ ГГц (1), $f_2 = 3,2$ ГГц (2) і $f_3 = 1,0$ ГГц (3) (а); зворотна добротність 1/Q і резонансна частота f_{res} піка для різних відстаней h_{var} від границі розділу ПФК до контейнера з полістиролу з різними рідинами для робочих частот ПФК ($\delta - \Gamma$): $\delta - f_1 = 9,5$ ГГц; $B - f_2 = 3,2$ ГГц; $\Gamma - f_3 = 1,0$ ГГц

Експериментальну установку для демонстрації безконтактної ідентифікації рідин на основі неоднорідного ПФК у мікросмужковому виконанні показано на рис. 14, б [2, 18]. Вона складається з ПФК, з'єднаного з векторним аналізатором кіл Agilent N5230A, за допомогою якого вимірюються коефіцієнт проходження електромагнітних хвиль крізь ПФК в обраному діапазоні частот. Для точного позиціонування контейнера з досліджуваною рідиною відносно границі розділу двох фотонних кристалів використано двокоординатний скануючий пристрій.

У процесі експерименту визначаються деякі параметри резонансного піка в забороненій зоні [18]. Для цього вимірюваний спектр коефіцієнта проходження електромагнітної хвилі через неоднорідний ПФК поблизу піка апроксимується кривою форми Лоренца методом найменших квадратів. Потім по розрахованій апроксимаційній залежності визначаються такі параметри резонансного піка, як резонансна частота f_{res} і добротність ПФК Q.

24

Експериментально показано [2-4, 19], що при розміщенні контейнера з рідиною на досить близькій відстані до границі розділу двох ПФК (робоча область) параметри резонансного піка на спектрі змінюються. Для наочного графічного зображення цих параметрів було обрано формат $1/Q = f(f_{res})$, де 1/Q – зворотна добротність, fres – резонансна частота. Зазначимо, що згідно з теорією малих збурень [32*], на резонансну частоту впливає, в основному, дійсна частина діелектричної проникності, а на зворотну добротність – уявна частина діелектричної проникності. При зміні відстані від границі ПФК до контейнера з рідиною h_{var} ми одержимо набір значень параметрів піка f_{res} і 1/Q, який зручно показати у вигляді деякої кривої на графіку. При цьому часто зручно проводити нормування значень резонансної частоти і зворотної добротності на ті їхні значення, які спостерігаються при видаленні контейнера з рідиною з робочої області поблизу границі ПФК.

Щоб визначити вплив робочої частоти на достовірність ідентифікації рідини в радіопрозорому контейнері проведено дослідження різних рідин у тонкому контейнері з полістиролу. При цьому експериментально зареєстровано різний характер залежності зворотної добротності 1/Q і резонансної частоти f_{res} від відстані h_{var} до контейнера (рис. 15, б – г) [4].

Для експериментальних досліджень обрано три частоти: $f_1 = 9,5$ ГГц (рис. 15, б), $f_2 = 3,2$ ГГц (рис. 15, в) і $f_3 = 1,0$ ГГц (рис. 15, г). Було розроблено і виготовлено методом фотолітографії неоднорідні ПФК з цими робочими частотами (рис. 15, а). Для зменшення розмірів ПФК для робочої частоти 1,0 ГГц ділянки з різною шириною мікросмужкової лінії було викладено зиґзаґом. З рис. 15, б – г видно, що робоча відстань, при якій досягається найбільша достовірність ідентифікації рідини, не перевищує приблизно 2 мм для частоти $f_1 = 9,5$ ГГц, і 3 мм для частот $f_2 = 3,2$ ГГц і $f_3 = 1,0$ ГГц.

Експериментально встановлено, що вплив товщини стінки контейнера на результати ідентифікації рідин нехтовно малий для робочої частоти ПФК близько 1 ГГц. Для точної та достовірної ідентифікації водних розчинів максимальна товщина стінок контейнера з кополімеру поліетилентерефталату (РЕТ) для випадку робочої частоти $f_1 = 9,5$ ГГц не повинна перевищувати 0,4 мм, а для частоти $f_2 = 3,2$ ГГц не повинна перевищувати 1,6 мм. Для вимірювань рідин у контейнерах із товщинами стінки h > 1,6 мм (наприклад, скляна пляшка) ідентифікацію рідини ефективно проводити на частотах $f_{res} < 3,2$ ГГц. При малій, у порівнянні з довжиною хвилі, товщині стінки контейнера (наприклад, РЕТ досягається пляшка) найбільша достовірність ідентифікації на частотах $f_{res} \ge 9,5$ ГГц.

Таким чином, для водомістких рідин у тонких пластикових контейнерах визначено оптимальну смугу робочих частот (близько 2 – 4 ГГц) експериментальної установки для їхньої достовірної ідентифікації. Для випадку інших робочих частот спостерігаються такі недоліки. На робочій частоті $f_1 = 9,5$ ГГц, незважаючи на більш високу достовірність в ідентифікації, однозначно прослідковується сильний вплив товщини стінок контейнера на результати ідентифікації, що критично зменшує достовірність. На частоті $f_3 = 1,0$ ГГц продемонстровано занадто малу достовірність для випадку малих розмірів контейнера (діаметром менше 60 мм). Зважаючи на це, для пластикових контейнерів доцільно використовувати діапазон частот 2–4 ГГц, де немає сильного впливу параметрів контейнера на достовірність ідентифікації рідин.

У другому підрозділі наведено перспективний метод вирішення такої актуальної задачі, як безконтактний контроль наявності метанолу в спиртовмісних рідинах [4]. З метою її розв'язку продемонстровано можливість розрізнення водних розчинів етилового і метилового спиртів із використанням розробленої методики на основі неоднорідного ПФК із достатньою для практичних застосувань точністю.

Вимірювання проведено в тонкому поліпропіленовому контейнері за допомогою вищеописаної методики. Експериментально виміряно залежності величин 1/Q і f_{res} для різних відстаней h_{var} від границі ПФК до контейнера з рідиною на частотах $f_2 = 3,2$ ГГц і $f_1 = 9,5$ ГГц (рис. 16) для трьох водних розчинів: 40 % етанолу, 20 % етанолу в суміші з 20 % метанолу і для 40 % метанолу.

Як видно з рис. 16, на частоті $f_2 = 3,2$ ГГц отримано більшу відмінність у вимірюваних значеннях 1/Q і f_{res} для обраних спиртових розчинів, ніж на частоті $f_1 = 9,5$ ГГц. Це відбувається тому, що істотний внесок у загальне поглинання хвиль вносить метанол, так як його власна резонансна частота поглинання близька до 3,2 ГГц. Величина поглинання в етанолі й у воді на цій частоті є значно меншою.



Рисунок 16 – Зворотна добротність 1/Q і резонансна частота f_{res} для різних відстаней h_{var} від границі розділу неоднорідного ПФК до контейнера з розчинами етилового і метилового спиртів у воді для робочих частот ПФК: а – $f_1 = 9,5$ ГГц і б – $f_2 = 3,2$ ГГц

Отже, у розділі 5 експериментально показано можливість безконтактного розпізнавання рідин у мікрохвильовому діапазоні за допомогою методики на основі неоднорідного ПФК. Показано, що на частоті 3,2 ГГц можна розрізняти не тільки розчини чистих етилового та метилового спиртів у воді, але і їхні суміші. Показано, що ця частота є найкращою для ідентифікації та розпізнавання даного типу рідин серед розглянутих робочих частот ПФК.

У розділі 6 експериментально і чисельно проаналізовано декілька систем, що складаються з планарних резонаторів з тонкоплівочним феримагнетиком у вигляді залізо-ітрієвого гранату (ЗІГ) мікронної товщини, в яких спеціально підібраними способами реалізовано збільшення фотон-магнонного зв'язку [24*, 33*]. Зокрема, розглянуто модифікацію форми резонатора у вигляді круглого розрізаного кільця [13], резонатор у вигляді подвійного розрізаного кільця [34, 38], спіральний резонатор [31] і U-подібний резонатор [30].

Для реєстрації спектрів коефіцієнта проходження ЕМ хвиль через планарні резонатори застосовували векторний аналізатор кіл Keysight P9374A, підключений до обох кінців живильної мікросмужкової лінії через коаксіальномікросмужкові переходи. Для вивчення просторового розподілу компонент ЕМ поля поблизу площини резонаторів застосували метод пасивного зонда. Для цього на етапі регулювання використано два зонди (з фериту марки 1СЧ4 для реєстрації розподілу *h*-компоненти поля і з графіту для реєстрації розподілу *e*-компоненти поля) з розмірами ~0,2 мм, що набагато менше довжини хвилі на робочій частоті.

У першому підрозділі проаналізовано особливості істотного збільшення фотон-магнонного зв'язку за рахунок збільшення просторової концентрації магнітної складової ЕМ поля модифікованого круглого планарного резонатора у вигляді розрізаного кільця в області розташування плівки ЗІГ. Для цього проведено чисельне моделювання та експериментальне дослідження двох резонаторів у вигляді розрізаного кільця (РРК), що мають різну форму [13].

Планарний РРК квадратної форми (рис. 17, а) обрано як реперний резонатор. Його утворено мідним провідником (смужкою) у формі квадрата із зазором. Експериментально зареєстрований та чисельно розрахований просторовий розподіл поля поблизу цього резонатора демонструє, що магнітну складову поля локалізовано всередині нього з максимумом поблизу сторони резонатора, протилежної зазору [13].



Рисунок 17 – Схематичне зображення планарного резонатора у вигляді розрізаного кільця зверху: а – квадратної форми; б – модифікованої круглої форми

Для демонстрації збільшення просторової концентрації *h*-компоненти поля також розглянемо результат чисельного моделювання модифікованого круглого РРК (рис. 17, б). Ширину утворюючої резонатор смужкової лінії було збільшено

при збереженні його резонансної частоти близько 6 ГГц. Резонатор мав форму мідного диска (радіус R = 4,1 мм) з круглим отвором (радіус r = 1,0 мм) у центрі і радіальним вирізом (сектор 12°).

З розрахованого та експериментально зареєстрованого просторового розподілу модуля напруженості *h*-компоненти поля в площині круглого РРК на резонансній частоті отримано, що магнітна компонента поля переважно локалізована в круглому центральному отворі. Таким чином, підтверджується збільшення просторової концентрації *h*-компоненти поля для круглого РРК модифікованої форми, оскільки площа, де локалізована *h*-компонента поля для випадку модифікованого круглого РРК, менша, ніж для квадратного РРК.

На наступному етапі як для квадратного РРК (рис. 17, а), так і для круглого РРК (рис. 17, б) модифікованої форми магнітний зразок у вигляді диска (товщина 10 мкм і діаметр 3,5 мм) з плівки ЗІГ було поміщено на поверхню резонатора в області максимальної локалізації змінного магнітного поля. Напрямок зовнішнього постійного магнітного поля *Н* обрано перпендикулярним напрямку мікросмужкової лінії (уздовж осі у) (рис. 17). Експериментально зареєстровану залежність коефіцієнта проходження (параметр $|S_{21}|$) ЕМ хвилі крізь живильну мікросмужкову лінію від напруженості зовнішнього магнітного поля *H* і частоти *f* для квадратного РРК показано на рис. 18, а, а для круглого РРК модифікованої форми – на рис. 18, б.



Рисунок 18 — Експериментальні залежності коефіцієнта проходження $|S_{21}|$ ЕМ хвиль від напруженості зовнішнього магнітного поля *H* і частоти *f* для РРК і магнітної плівки ЗІГ для: а — квадратного РРК; б — модифікованого круглого РРК

З рис. 18 видно, що завдяки сильному зв'язку мікрохвильової моди РРК і магнонної моди ЗІГ виникає відомий ефект «розштовхування» мод. На рисунках пунктирними лініями показано частоти резонансних мод. Як відомо, величина фотон-магнонного зв'язку *g* залежить від різниці частот цих мод $\Delta f = 2g/(2\pi)$ при рівності резонансних частот резонатора та ФМР. Нормовану на спінове число величину зв'язку розраховано по формулі $g_N/(2\pi) = g_N/(2\pi\sqrt{N_s})$ [33*], де N_s –

число спінів в об'ємі зразка ЗІГ, а концентрацію спінів для ЗІГ було обрано $n_s = 4,22 \times 10^{27} \text{ м}^{-3}$.

З експериментально зареєстрованих спектрів коефіцієнта проходження ЕМ хвиль $|S_{21}|$ від напруженості поля H (рис. 18, а, б) обчислено величину зв'язку $g/2\pi = 122$ МГц для квадратного РРК і $g/2\pi = 183$ МГц для круглого РРК модифікованої форми. Нормована на число спінів величина зв'язку становить $g_N = 0,192$ Гц для квадратного РРК і $g_N = 0,288$ Гц для круглого РРК модифікованої форми.

Таким чином, модифікація форми РРК дозволяє досягти високої просторової локалізації h-компоненти ЕМ поля і, тим самим, збільшити коефіцієнт заповнення феримагнетика змінним магнітним полем h. При цьому експериментальні дослідження показали, що величина фотон-магнонного зв'язку g у такій системі збільшується до 50% у порівнянні з реперним РРК квадратної форми з плівкою ЗІГ при збереженні резонансної частоти. При цьому, чисельне дослідження показало, що величина g збільшується до 40% для круглого РРК модифікованої форми у порівнянні з реперним РРК.

У другому підрозділі з метою збільшення фотон-магнонного зв'язку чисельно досліджено систему подвійного РРК із магнітною плівкою [34]. Для аналізу добротності мод резонатора розглянуто модифіковану модель вимушених коливань двох зв'язаних осциляторів, в основі якої лежить модель двох індуктивно зв'язаних *LCR* кіл. Результати, що отримані з теорії зв'язаних осциляторів, перевірено чисельно на системі зв'язаних планарних резонаторів мікрохвильового діапазону, а саме, подвійний РРК, що працює на нижчих модах.

Для чисельного моделювання обрано подвійний РРК (рис. 19), що має планарну двошарову структуру на підкладці з ламінату з нехтовно малими втратами Rogers 4350B ($\varepsilon' = 3,66$). Резонатори розміщено один навпроти одного по різні сторони підкладки.



Рисунок 19 – Схематичне зображення шарів подвійного РРК: а – верхня сторона з першим резонатором; б – нижня сторона з другим резонатором

На чисельно розрахованому спектрі коефіцієнта проходження ЕМ хвилі крізь мікросмужкову лінію з подвійним РРК спостерігаються два резонанси: перша мода із частотою $f_1 = 5,8$ ГГц і добротністю РРК $Q_1 = 9667$ і друга мода з $f_2 = 6,6$ ГГц і $Q_2 = 274$. З просторового розподілу змінного магнітного поля

отримано, що лише для першої моди воно зосереджено між резонаторами. Така структура поля для першої моди типова для мод зв'язаних коливань (так званих «замкнених» мод [34*]), на яких резонатори можуть мати високу добротність, що досягається завдяки зменшенню електромагнітного випромінювання в навколишній простір. Ці моди можуть бути корисними для збільшення фотонмагнонного зв'язку в мікрохвильовому резонаторі з магнітною плівкою, розташованою поблизу його поверхні, оскільки змінне магнітне поле тут зосереджено в невеликому об'ємі.

Для перевірки цього припущення автором проведено чисельне моделювання фотон-магнонної взаємодії в подвійному РРК із плівкою залізо-ітрієвого гранату (рис. 19, а). З розрахованого спектру коефіцієнта проходження (параметр $|S_{21}|$) ЕМ хвилі крізь подвійний РРК із плівкою ЗІГ залежно від напруженості зовнішнього магнітного поля H (рис. 20, а) знайдено, що для «замкненої» моди з частотою f_1 нормована на число спінів величина зв'язку $g_N/(2\pi) = 0,408$ Гц. Для порівняння, з розрахованого спектру на рис. 20, б для нижчої моди одиночного РРК із плівкою ЗІГ (металізація на нижній стороні підкладки) величина $g_N/(2\pi) = 0,370$ Гц. Таким чином, для «замкненої» моди подвійного РРК величина g_N вище на 10% ніж для нижчої моди одиночного РРК, що пояснюється більшою величиною коефіцієнта заповнення плівки ЗІГ змінним магнітним полем на частоті «замкненої» моди. Тобто робота резонатора із плівкою ЗІГ на такій моді дійсно дозволяє збільшити величину фотон-магнонного зв'язку.



Рисунок 20 – Чисельно розраховані спектри коефіцієнта проходження (параметр |S₂₁|) ЕМ хвиль крізь подвійний РРК із плівкою ЗІГ від напруженості зовнішнього магнітного поля для: а – «замкненої» моди подвійного РРК; б – нижчої моди одиночного РРК

З метою дослідження впливу моди резонатора на такий важливий параметр фотон-магнонної системи резонаторів із плівкою ЗІГ, як кооперативність $C = g^2/(k_a k_m)$ [33*], де k_a – півширина фотонної моди, а k_m – півширина магнонної моди, проведено додаткові розрахунки. Кооперативність для подвійного РРК склала C = 23520 для моди із частотою f_1 , і для моди одиночного РРК C = 3851. Отже, для подвійного РРК із плівкою ЗІГ на частоті «замкненої» моди кооперативність більш ніж в 6 разів вище, ніж для моди одиночного РРК із плівкою ЗІГ, що пояснюється високою добротністю подвійного РРК на частоті «замкненої» моди.

Таким чином, у розділі 6 чисельно було передбачено й експериментально досягнуто високі значення фотон-магнонного зв'язку для декількох розглянутих планарних резонаторів із магнітним зразком (плівкою ЗІГ), які можуть бути перспективними елементами метаповерхонь.

У розділі 7 представлено результати, що демонструють керування електромагнітними властивостями двовимірних (2D) діелектричних електромагнітних аналогів топологічних ізоляторів (TI) різних типів.

У першому підрозділі з метою розробки керованих ТІ на прикладі двоперіодичного масиву еліптичних елементів із кварцу продемонстровано ефективний спосіб керування електромагнітними властивостями таких структур шляхом зміни діелектричної проникності елементів, що утворюють ТІ.

Для розрахунків дисперсійних діаграм 2D TI було використано пакет чисельного моделювання MIT Photonic Bands (MPB).

Як приклад 2D TI, обрано двоперіодичну структуру з гексагональною елементарною коміркою з періодом p (рис. 21, а) [12]. Гексагональну елементарну комірку обрано тому, що вона має менший кут обертальної симетрії, ніж прямокутна, що приводить до більшої ізотропності TI в площині x - y. Це полегшує пошук забороненої зони в такій структурі. У свою чергу, елементарна комірка складається з шести діелектричних еліптичних циліндрів, що нескінченні уздовж осі z і розташовані у вакуумі. Кути між сусідніми центрами еліпсів і центром комірки складають $\varphi = 60^{\circ}$.



Рисунок 21 – Топологічний ізолятор на базі двоперіодичного масиву еліптичних циліндрів із кварцу: а – схема 2D елементарної комірки; б, в – схема TI з кутом повороту еліпсів в елементарній комірці: $6 - C_1 = 0^\circ$; $B - C_2 = 90^\circ$

За допомогою чисельного моделювання підібрано геометричні параметри елементарних комірок двох ТІ для робочої області частот поблизу 10 ГГц (рис. 21): період елементарної комірки p = 20,7 мм, відстань від центру елементарної комірки до центрів еліпсів l = p/3, розмір півосей еліпсів, які формують циліндри, a = 0,155p і b = 0,095p. Кут повороту еліпсів у елементарній комірці обрано з умови достатньо широкого перекриття заборонених зон обох TI для спостереження топологічних властивостей, і він становив $C_1 = 0^\circ$ и $C_2 = 90^\circ$.

Як матеріал для еліптичних циліндрів обрано α - кварц з одноосьовою анізотропією величною близько 4%, що достатньо для керування шириною забороненої зони TI на 10%.

Спочатку проведено дослідження впливу напрямку осі анізотропії кварцу на спектральні і дисперсійні властивості однорідного ТІ. Для еліптичних циліндрів для розрахунку спочатку обрано одноосьову анізотропію α -кварцу в напрямку осі x: $\varepsilon_{xx} = 4,847$, $\varepsilon_{yy} = 4,643$, $\varepsilon_{zz} = 4,643$, що відповідає реальним значенням компонент тензора діелектричної проникності в мікрохвильовому діапазоні.

З метою з'ясування, наскільки сильно перекриваються заборонені зони TI при зміні геометричних параметрів елементарної комірки, розраховано дисперсійні діаграми для двох TI (схема на рис. 21, а) з кутом повороту еліпсів $C_1 = 0^\circ$ (рис. 21, б) і $C_2 = 90^\circ$ (рис. 21, в). Зазначимо, що для TI з кутом $C_1 = 0^\circ$ заборонена зона знаходиться у діапазоні частот fp/c = 0,689 - 0,702, її ширина складає 1,89%, а для TI з кутом $C_2 = 90^\circ$ заборонена зона знаходиться в діапазоні частот fp/c = 0,688 - 0,702, її ширина складає 2,03% [12].

Досліджено вплив напрямку осі анізотропії кварцу на ширину і положення забороненої зони ТІ. Для цього розраховано три структури ТІ з напрямами осей анізотропії, які спрямовані вздовж осей координат. При виборі одноосьової анізотропії α -кварцу у напрямку осі у ширина забороненої зони складає 2,03% для ТІ з кутом $C_1 = 0^\circ$ (рис. 21, б), а для ТІ з кутом $C_2 = 90^\circ$ (рис. 21, в) ширина забороненої зони складає 1,89%. Однак, при виборі одноосьової анізотропії α кварцу у напрямку осі *z* ширина забороненої зони збільшується і складає 2,27% для ТІ з кутом $C_1 = 0^\circ$, і 2,10% для ТІ з кутом $C_2 = 90^\circ$.

Аналіз розрахунків показав, що при виборі напрямку одноосьової анізотропії уздовж осі z ми отримуємо розширення забороненої зони до 10% у порівнянні з двома іншими випадками (анізотропія уздовж осі x та осі y). Таким чином, шляхом вибору напрямку одноосьової анізотропії матеріалу ТІ продемонстровано можливість підлаштовувати його електромагнітні властивості, не змінюючи інших параметрів структури.

В результаті проведених розрахунків для усіх трьох випадків вибору напрямку одноосьової анізотропії кварцу спостерігається значне перекриття частот заборонених зон для TI з кутами повороту еліпсів $C_1 = 0^{\circ}$ та $C_2 = 90^{\circ}$. Це дозволяє розроблювати на їхній основі комбіновані структури, на границі яких очікується виникнення поверхневих ЕМ коливань [26*]. При цьому перекриття заборонених зон TI є необхідною умовою для виникнення поверхневих станів на границі двох різних TI.

У другому підрозділі вивчено особливості виникнення поверхневих станів у повністю діелектричних електромагнітних аналогах ТІ на прикладі комбінованої структури з масивів еліптичних елементів із кварцу.

Як комбіновану структуру двовимірного топологічного ізолятора обрано дві розглянуті вище структури з різними кутами повороту елементів в елементарній комірці: для першої $C_1 = 0^\circ$ (рис. 21, б) і для другої $C_2 = 90^\circ$ (рис. 21, в). При

цьому заборонені зони ТІ повинні перекриватися в певному частотному діапазоні. Схему такої комбінованої структури на основі масиву еліптичних кварцових циліндрів поблизу межі двох ТІ наведено на рис. 22, де границю двох різних ТІ позначено пунктирною лінією.



Рисунок 22 – Просторовий розподіл нормальної (E_z) компоненти поля для комбінованої структури TI на базі масиву еліптичних циліндрів із кварцу поблизу границі двох TI з параметрами $C_1 = 0^\circ$ та $C_2 = 90^\circ$

З метою знаходження діапазону частот, в якому виникають поверхневі стани, розраховано дисперсійні діаграми (рис. 23) у напрямку Г-К [12] для комбінованої структури, яка складається з двох ТІ (рис. 22), що межують, з кутом повороту еліпсів у комірках ТІ $C_1 = 0^\circ$ і $C_2 = 90^\circ$. Точки Г, К – позначення для особливих точок всередині зони Бріллюена для 2D фотонного кристалу з гексагональною елементарною коміркою. Ha дисперсійній діаграмі по горизонтальній осі відкладено нормований хвильовий вектор $k_x p/2\pi$, а по вертикальній осі відкладено нормовану частоту *fp/c*. Розрахунок виконано для двох комбінованих структур ТІ. Для першої вісь анізотропії кварцу було обрано вздовж осі z (рис. 23, а), а для другої вздовж осі x (рис. 23, б).



Рисунок 23 – Дисперсійні діаграми для комбінованої структури, що складається з двох ТІ на базі масиву еліптичних циліндрів із кварцу з параметрами $C_1 = 0^\circ$ та $C_2 = 90^\circ$ з одноосьовою анізотропією кварцу: а – вздовж осі *z*; б – вздовж осі *x*

Як видно з рис. 23, у забороненій зоні комбінованої структури ТІ присутні дві вироджені моди поверхневого стану (ПС), що позначені жирними лініями: стану *p*-типу (нижня лінія) і *d*-типу (верхня лінія). Ці стани відповідають хвилям із круговою поляризацією: правою – ПКП (*p*-тип) і лівою – ЛКП (*d*-тип). Ці ПС на дисперсійній діаграмі перетинаються при $k_x = 0$.

Отже, чисельний розрахунок продемонстрував, що вибором напрямку одноосьової анізотропії кварцу можна ефективно керувати частотами поверхневих станів комбінованих ТІ. Так, для першої структури резонансні моди ПС перетинаються на частоті поблизу fp/c = 0,685 (рис. 23, а), тоді як для другої структури на частоті поблизу fp/c = 0,697 (рис. 23, б).

З метою визначення швидкості спадання ЕМ поля від границі ТІ на частоті поверхневого стану чисельно розраховано просторовий розподіл нормальної (E_z) компоненти поля для комбінованої структури ТІ (рис. 22). Розрахунок проведено на нормованій частоті ПС fp/c = 0,69029, розташованій у забороненій зоні кожного окремо взятого ТІ. Вісь анізотропії кварцу було обрано уздовж осі z. З рис. 22 видно, що концентрація поля спостерігається на границі двох ТІ (напруженість поля позначено кольором) і спадає до нехтовно малих величин при віддаленні від неї уздовж осі x на відстань близько декількох періодів структури (близько двох довжин хвиль).

Таким чином, у розділі 7 чисельно продемонстровано, що вибором напрямку одноосьової анізотропії кварцу можна ефективно керувати частотами заборонених зон TI та поверхневих станів комбінованої структури TI.

У розділі 8 чисельно проаналізована ефективність збудження поверхневих хвиль заданої поляризації поблизу самокомплементарних метаповерхонь з метою розробки способу керування поляризацією ближнього електромагнітного поля поблизу них [15, 32, 37]. Самокомплементарні МП є комбінацією на одній елементарній комірці металевого елемента малої товщини та його додаткової (комплементарної) копії, де металевий елемент і навколишній простір поміняно місцями. При цьому для керування ближнім полем використано явище поляризаційного виродження поверхневих ТЕ і ТМ мод уздовж конкретних напрямків поширення хвиль для самокомплементарних МП.

Відомо, що самокомплементарні метаповерхні, які задовольняють принципу Бабіне, матимуть повне виродження ТЕ і ТМ мод у заданому напрямку тільки у випадку метаповерхні з нескінченно малою товщиною елементів з ідеального провідника [35*]. Введення в досліджувану структуру діелектричної підкладки приведе до порушення принципу Бабіне. Завдяки цьому виродження ТЕ і ТМ мод буде знято. Тому спочатку було проаналізовано електромагнітні властивості самокомплементарної МП з підкладкою з діелектричною проникністю $\varepsilon'=1$.

Параметри досліджуваної метаповерхні обрано для роботи на частоті поблизу 10 ГГц. Елементарна комірка (рис. 24, а) складається з "Г"-подібного мідного елементу і його інвертованої копії, тобто отвору в металевому екрані такої ж форми, з такими параметрами: період a = 10 мм, $L_x = 0.7a$, $L_{x2} = 0.2a$, $L_y = 0.3a$, w = 0.05a. Товщина мідних елементів $h_m = 0.0035a$.

Для досліджуваної МП з метою оцінки ступеня виродження мод ТЕ і ТМ типу розраховано дисперсійну діаграму в напрямку поширення хвилі вздовж осі *х*

для двох нижчих мод (рис. 24, б). З рисунка видно, що в усьому аналізованому діапазоні частот моди ТЕ і ТМ типу сильно вироджені. Ступінь виродження мод оцінюється як різниця їхніх постійних поширення $dk_x = |k_{TE} - k_{TM}|$ на заданій частоті. У результаті чисельного розрахунку показано, що $dk_x < 0,01\pi/a$ для частот нижче 10,7 ГГц.



Рисунок 24 — Самокомплементарна метаповерхня, що складається з "І"-подібного металевого елемента та його інвертованої копії: а — елементарна комірка; б — дисперсійна діаграма $f(k_x)$ в напрямку поширення хвилі вздовж осі x

Відомо, що хвиля з будь-якою поляризацією може бути представленою як сума ортогонально поляризованих хвиль з однаковою довжиною. При цьому в загальному випадку ці хвилі повинні мати різні амплітуди і різні початкові фази. Оскільки дві нижчі моди самокомплементарної метаповерхні (ТЕ-мода і ТМмода, рис. 24, б) є ортогонально поляризованими та достатньо виродженими $(dk_x << \pi/a)$, то ТЕ- і ТМ-поляризовані хвилі можуть поширюватися на метаповерхні на відстань до декількох періодів із нехтовно малою різницею фаз між ними. Для формування хвилі із заданою поляризацією поблизу метаповерхні необхідно скласти ці дві ортогонально поляризовані хвилі з необхідними амплітудами та початковими фазами. При цьому, таку метаповерхню ефективно використовувати як випромінювач ЕМ хвиль із заданою поляризацією.

Для дослідження можливості керування поляризацією ближнього поля обрано напівскінченну самокомплементарну метаповерхню, що складається з 21 вищезгаданої елементарної комірки в напрямку осі x (рис. 25) і нескінченна вздовж осі y. Поширення ЕМ хвилі розглянуто вздовж осі x. 3 одного боку структури в першій елементарній комірці розміщено два ортогонально спрямовані збуджуючі електричні диполі (порти збудження). Якщо амплітуду і початкову фазу диполів змінювати, то відбувається збудження хвиль змішаної поляризації на першій елементарній комірці, яке потім передається на сусідні елементарні комірки МП.



Рисунок 25 – Елементарна комірка напівскінченної самокомплементарної метаповерхні на підкладці, що періодична вздовж осі *y* і складається з 21 елементарних комірок (показаних на рис. 24, а) вздовж осі *x*

Проаналізовано просторовий розподіл електричного поля за допомогою формалізму параметрів Стокса [15]. Для розрахунку параметрів Стокса було обрано ортогональні компоненти напруженості електричного поля E_y та E_z : $S_0 = |E_y|^2 + |E_z|^2$, $S_1 = |E_y|^2 - |E_z|^2$, $S_2 = 2 \operatorname{Re}(E_y E_z^*)$ і $S_3 = -2 \operatorname{Im}(E_y E_z^*)$.

Для демонстрації випромінювання хвиль із лінійною поляризацією спочатку було розраховано картини просторового розподілу нормованого параметра Стокса S_1/S_0 на частоті 10,9 ГГц. У першому випадку ЕМ поле збуджував лише перший диполь (рис. 26, а), а у другому випадку лише другий диполь (рис. 26, б).



Рисунок 26 – Просторовий розподіл нормованого параметра Стокса S_1/S_0 поблизу самокомплементарної МП при збудженні поверхневих ЕМ хвиль окремо диполями з ТЕ і ТМ поляризацією (f = 10,9 ГГц): а – випромінюючий диполь 1; б – випромінюючий диполь 2

З рис. 26, а видно, що в дальній зоні $S_1/S_0 \approx 1$, що відповідає лінійній горизонтальній поляризації в напрямку осі *у*. У другому випадку на рис. 26, б показано картину для випадку другого випромінюючого диполя, де видно, що в дальній зоні $S_1/S_0 \approx -1$. Цей випадок відповідає лінійній вертикальній поляризації хвиль у напрямку осі *z*, яка є ортогональною до поляризації хвилі в першому випадку.

36

Відповідно до головної мети цього розділу чисельно продемонстровано збудження поверхневої хвилі з довільною еліптичною поляризацією за допомогою двох збуджуючих диполів [15]. Для цього обрано стан еліптичної поляризації з нормованими параметрами Стокса $S_1/S_0 = 0$, $S_2/S_0 = \pm 0,707$, $S_3/S_0 = \pm 0,707$.

Розраховано такі оптимальні параметри портів збудження з амплітудами A і початковими фазами $\phi: A_1 = 1, \phi_1 = 0^\circ, A_2 = 1,2, \phi_2 = -25^\circ$. Відповідні розраховані просторові розподіли нормованих параметрів Стокса $S_1/S_0, S_2/S_0$ і S_3/S_0 у площині в середині елементарної комірки МП (y = 0 мм) на частоті поблизу резонансу 10,9 ГГц показані на рис. 27, б – г відповідно.



Рисунок 27 – Збуджені еліптичні стани поляризації в площині *хог* у кількох точках на висотах $z = \pm \lambda$ і $z = \pm 2\lambda$ над метаповерхнею при y = 0 мм (а); просторовий розподіл нормованих параметрів Стокса (f = 10,9 ГГц) в площині *хог* при y = 0 мм при параметрах портів збудження $A_1 = 1$, $\phi_1 = 0^\circ$, $A_2 = 1,2$, $\phi_2 = -25^\circ$ ($\delta - \Gamma$): $\delta - S_1/S_0$, в) S_2/S_0 і г) S_3/S_0

З просторових розподілів параметрів Стокса видно, що параметр S_1/S_0 знаходиться на рівні шуму зі значеннями в кілька разів меншими, ніж у випадку S_2/S_0 і S_3/S_0 . Відповідні еліпси поляризації (рис. 27, а) збудженої хвилі зображено в декількох точках на висоті над МП $z = \pm \lambda$ і $z = \pm 2\lambda$. Таким чином, продемонстровано збудження поверхневих хвиль еліптичної поляризації за допомогою двох збуджуючих диполів на самокомплементарній метаповерхні. При цьому очікується, що за допомогою правильного вибору відповідних параметрів двох збуджуючих диполів будь-який стан поляризації поверхневої хвилі може бути досягнуто.

З точки зору практичної реалізації важливо проаналізувати вплив підкладки на поляризаційне збудження поверхневих хвиль [15, 37]. Чисельно показано, що вплив підкладки, кінцевого розміру МП і кількості портів робить незначний внесок у збудження ближнього поля з заданою поляризацією і, таким чином, не впливає на основні результати досліджень.

Отже, у розділі 8 чисельно продемонстровано збудження поверхневих хвиль лінійної горизонтальної, вертикальної та діагональної, право- та лівосторонньої кругової, а також еліптичної поляризацій, що охоплюють майже повністю сферу поляризаційних станів Пуанкаре.

ВИСНОВКИ

У ході розв'язання поставлених у дисертаційній роботі завдань отримано такі наукові результати:

1. При експериментальному й чисельному дослідженні спектральних і поляризаційних властивостей повністю діелектричних метаповерхонь у мікрохвильовому діапазоні:

- для двоперіодичної метаповерхні субхвильової товщини, що складається з феродіелектричних квадратних призм, періодично розташованих на діелектричній підкладці, експериментально й чисельно продемонстровано посилення ефекту Фарадея;

- чисельно показано, що резонансну частоту метаповерхні можна задавати шляхом змінювання товщин феродіелектричних призм і діелектричної підкладки.

2. При вивченні впливу форми канавок субхвильового періоду на поверхні прямокутної феритової пластини на частоту феромагнітного резонансу (ФМР) показано, що:

- частота ФМР залежить від напрямку канавок відносно зовнішнього магнітного поля, що обумовлено впливом розмагнічуючих полів структурованого фериту;

- при напруженості зовнішнього магнітного поля, що перевищує поле насичення розглянутого фериту (*H*₀ > 2500 E), зростання частоти ФМР у залежності від глибини канавки стає монотонним.

3. При дослідженні спектральних властивостей механічно керованих метаповерхонь на основі ефекту муару:

 експериментально й чисельно показано можливість керування (в межах 90%) частотою поверхневого коливання шляхом зміни кута схрещування між утворюючими періодичними структурами з гексагональною елементарною коміркою, накладеними одна на одну;

- чисельно продемонстровано можливість керування резонансною частотою поверхневих коливань магнітоактивних муарових метаповерхонь із

гексагональною елементарною коміркою та феромагнітним шаром за допомогою зовнішнього магнітного поля, що дозволяє розширити можливості механічного перестроювання;

- для метаповерхні, яка складається з масиву схрещених металевих смуг, експериментально показано, що величина резонансного мінімуму в спектрі зменшується зі збільшенням товщини тефлонової роздільної плівки, розміщеної між утворюючими схрещеними масивами смуг.

4. При дослідженні спектральних властивостей магнітокерованих шаруватих середовищ у коаксіальному виконанні експериментально й теоретично продемонстровано, що:

- положенням забороненої зони в спектрі магнітофотонного кристала ефективно керувати шляхом зміни розмірів його складових елементів або величини зовнішнього магнітного поля;

- частотою дефектного піка в спектрі фотонного кристала з магнітним дефектним шаром ефективно керувати за допомогою зовнішнього магнітного поля.

5. У ході безконтактної експрес ідентифікації рідин, що перебувають у радіопрозорих ємностях, за допомогою методики, заснованої на проходженні електромагнітних хвиль мікрохвильового діапазону крізь неоднорідний планарний фотонний кристал (ПФК) у мікросмужковому виконанні:

- показано можливість безконтактного розпізнавання не тільки водних розчинів етилового і метилового спиртів, але і їхніх змішаних водних розчинів;

- для водомістких рідин у тонких пластикових ємностях знайдено оптимальну смугу робочих частот (2 – 4 ГГц) експериментальної установки для їхньої достовірної ідентифікації.

6. При чисельному й експериментальному дослідженнях планарних резонаторів із магнітним зразком (плівкою залізо-ітрієвого гранату – ЗІГ) показано можливість збільшення фотон-магнонного зв'язку шляхом збільшення коефіцієнта заповнення магнітного зразка змінним магнітним полем і встановлено, що:

- для круглого резонатора у вигляді розрізаного кільця (РРК) зі зміненою формою досягнуто збільшення величини фотон-магнонного зв'язку до 40% у порівнянні з реперним РРК квадратної форми при однаковій резонансній частоті резонаторів;

- для подвійного РРК при розміщенні плівки ЗІГ в області між двома РРК величина фотон-магнонного зв'язку збільшується більш ніж на 10% на частоті зв'язаних коливань у порівнянні з модою, спостережуваною на іншій частоті одиночного РРК завдяки великому коефіцієнту заповнення плівки ЗІГ змінним магнітним полем на частоті зв'язаних коливань.

7. При дослідженні електромагнітного аналога топологічного ізолятора (TI) у вигляді двовимірного двоперіодичного масиву еліптичних циліндрів із кварцу чисельно показано, що:

- заборонена зона розширюється до 10% при виборі напрямку осі анізотропії кварцу вздовж осі циліндрів для однорідного ТІ;

- шляхом вибору напрямку одноосьової анізотропії матеріалу TI ефективно задавати частоти поверхневих станів для комбінованої структури, що складається з двох різних TI.

8. При чисельному дослідженні збудження поверхневих хвиль заданої поляризації на самокомплементарній метаповерхні, елементарна комірка якої складається з І-подібного металевого елементу та його комплементарної копії:

- продемонстровано збудження поверхневих хвиль лінійної горизонтальної, вертикальної та діагональної поляризації, право- та лівосторонньої кругової, а також еліптичної поляризацій, що охоплюють майже повністю сферу поляризаційних станів Пуанкаре;

- оцінено, що на довжині більшій за довжину затухання, вплив діелектричної проникності підкладки на збудження поверхневих хвиль є нехтовно малим, тоді як цей вплив потрібно враховувати для менших відстаней від метаповерхні.

Резюмуючи вищенаведені результати досліджень цієї дисертаційної роботи можна стверджувати, що вони вносять певний внесок як у фундаментальну фізику, так і у декілька галузей прикладної фізики і технології мікрохвильового діапазону.

Зокрема, з погляду фундаментальної фізики проведені дослідження розширюють знання про способи керування електромагнітними хвилями в метаповерхнях мікрохвильового діапазону та супутніх фізичних явищах. А саме, в дисертаційній роботі продемонстровано підсилення ефекту Фарадея в керованих за допомогою магнітного поля метаповерхнях субхвильової товщини, розглянуто явище механічного настроювання робочої частоти метаповерхонь на ефекті муару, вирішено завдання керування електромагнітними властивостями топологічного резонатора за допомогою зміни матеріальних параметрів матеріалу, з якого його зроблено, і продемонстровано збудження поверхневих хвиль заданої поляризації на самокомплементарній метаповерхні.

З погляду прикладних наук метаповерхні з магнітними елементами є перспективними для застосування як компактних магнітокерованих планарних елементів пристроїв мікрохвильового й оптичного діапазонів, таких як вентилі, модулятори сигналів, високочутливі датчики змінного поля. Разом з тим є підстави очікувати, що муарові метаповерхні з магнітними включеннями стануть основою для планарних НВЧ фільтрів, спектральні властивості яких ефективно плавно перестроювати одночасно як за допомогою зовнішнього магнітного поля, так і шляхом механічної перебудови.

Отже, можна стверджувати, що в результаті досліджень розвинуто основи перспективного фізичного напрямку – фізики електронно- і механічно керованих метаповерхонь мікрохвильового діапазону.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1*. Metamaterials / ed. by T. J. Cui, D. Smith, R. Liu. Boston, MA : Springer US, 2010. URL: <u>https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0573-4</u>
- 2*. Sihvola A. Metamaterials in electromagnetics. *Metamaterials*. 2007. Vol. 1, no. 1. P. 2–11. URL: <u>https://doi.org/10.1016/j.metmat.2007.02.003</u>
- 3*. Yu N., Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces. *Nature Materials*. 2014. Vol. 13, no. 2. P. 139–150. URL: <u>https://doi.org/10.1038/nmat3839</u>
- 4*. Kildishev A. V., Boltasseva A., Shalaev V. M. Planar Photonics with Metasurfaces. *Science*. 2013. Vol. 339, no. 6125. P. 1232009. URL: <u>https://doi.org/10.1126/science.1232009</u>
- 5*. Bose O. C. On the rotation of plane of polarisation of electric wave by a twisted structure. *Proceedings of the Royal Society of London*. 1898. Vol. 63, no. 389–400. P. 146–152. URL: <u>https://doi.org/10.1098/rspl.1898.0019</u>
- 6*. Wood R. W. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1902. Vol. 4, no. 21. P. 396–402. URL: https://doi.org/10.1080/14786440209462857
- 7*. Rayleigh L. Note on the remarkable case of diffraction spectra described by Prof. Wood. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal* of Science. 1907. Vol. 14, no. 79. P. 60–65. URL: https://doi.org/10.1080/14786440709463661
- 8*. Kock W. E. Metallic Delay Lenses. Bell System Technical Journal. 1948. Vol. 27, no. 1. P. 58–82. URL: https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01331.x
- 9*. Lewin L. The electrical constants of a material loaded with spherical particles. Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part III: Radio and Communication Engineering. 1947. Vol. 94, no. 27. P. 65–68. URL: <u>https://doi.org/10.1049/ji-3-2.1947.0013</u>
- 10*. Хижняк Н. А. Искусственные анизотропные диэлектрики. *Журнал технической физики*. 1957. Т. 27, № 9, С. 2006–2038.
- 11*. Schelkunoff S. A. Antennas: theory and practice. New York : Wiley, 1952. 639 p.
- 12*. Brown J. Artificial dielectrics. *Progress in dielectrics Part 2*. Ed. J.B. Birks. 1960. P. 194–225.
- 13*. Rotman W. Plasma simulation by artificial dielectrics and parallel-plate media. *IRE Transactions on Antennas and Propagation*. 1962. Vol. 10, no. 1. P. 82–95. URL: <u>https://doi.org/10.1109/tap.1962.1137809</u>
- 14*. Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Mesostructures / J. B. Pendry et al. *Physical Review Letters*. 1996. Vol. 76, no. 25. P. 4773–4776. URL: <u>https://doi.org/10.1103/physrevlett.76.4773</u>
- 15*. Girich A. A., Tarapov S. I. Impact of External DC Magnetic Bias Field and Frequency on the Bistability Features of a Nonlinear Microwave Meta-Atom. *Progress In Electromagnetics Research Letters*. 2019. Vol. 82. P. 81–87. URL: <u>https://doi.org/10.2528/pierl18112701</u>

- 16*. Maksymov I. Magneto-Plasmonics and Resonant Interaction of Light with Dynamic Magnetisation in Metallic and All-Magneto-Dielectric Nanostructures. *Nanomaterials*. 2015. Vol. 5, no. 2. P. 577–613. URL: https://doi.org/10.3390/nano5020577
- 17*. Magnetoplasmonics: Combining Magnetic and Plasmonic Functionalities / G. Armelles et al. Advanced Optical Materials. 2013. Vol. 1, no. 1. P. 10–35. URL: <u>https://doi.org/10.1002/adom.201200011</u>
- 18*. Ee H.-S., Agarwal R. Tunable Metasurface and Flat Optical Zoom Lens on a Stretchable Substrate. *Nano Letters*. 2016. Vol. 16, no. 4. P. 2818–2823. URL: <u>https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b00618</u>
- 19*. Rotationally reconfigurable metamaterials based on moiré phenomenon / J.-H. Han et al. *Optics Express*. 2015. Vol. 23, no. 13. P. 17443–17449. URL: <u>https://doi.org/10.1364/oe.23.017443</u>
- 20*. Yachin V. V., Watanabe K., Yasumoto K. Method of Integral Functionals for Electromagnetic Wave Scattering from Three-Dimensional Gratings. Advanced Techniques for Microwave Systems. Part A. Transmission lines and Periodic Structures. Research Signpost, 2011. P. 85–102. ISBN: 978-81-308-0453-8.
- 21*. Enhanced magneto-optical effects in magnetoplasmonic crystals / V. I. Belotelov et al. *Nature Nanotechnology*. 2011. Vol. 6, no. 6. P. 370–376. URL: <u>https://doi.org/10.1038/nnano.2011.54</u>
- 22*. Bsawmaii L. Enhancement of Every Magneto-Optical Effect with All-Dielectric Guided-Mode Resonant Gratings Based on a Magnetic Sol-Gel Nanocomposite : These de Doctorat. Saint-Etienne, France, 2020. URL: https://theses.hal.science/tel-03207393v1/file/These-Bsawmaii-Laure-2020.pdf
- 23*. Wu Z., Zheng Y. Moiré Chiral Metamaterials. *Advanced Optical Materials*. 2017. Vol. 5, no. 16. P. 1700034. URL: https://doi.org/10.1002/adom.201700034
- 24*. Broadband photon-magnon coupling using arrays of photon resonators / B. Bhoi et al. *Journal of Applied Physics*. 2021. Vol. 129, no. 8. P. 083904. URL: <u>https://doi.org/10.1063/5.0040194</u>
- 25*. Photonic Floquet topological insulators / M. C. Rechtsman et al. *Nature*. 2013. Vol. 496, no. 7444. P. 196–200. URL: <u>https://doi.org/10.1038/nature12066</u>
- 26*. Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states / Z. Wang et al. *Nature*. 2009. Vol. 461, no. 7265. P. 772–775. URL: <u>https://doi.org/10.1038/nature08293</u>
- 27*. Reflection-Free One-Way Edge Modes in a Gyromagnetic Photonic Crystal / Z. Wang et al. *Physical Review Letters*. 2008. Vol. 100, no. 1. P. 013905. URL: <u>https://doi.org/10.1103/physrevlett.100.013905</u>
- 28*. Moiré edge states in twisted graphene nanoribbons / M. Fleischmann et al. *Physical Review B*. 2018. Vol. 97, no. 20. P. 205128. URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.97.205128
- 29*. Wolf E., Born M. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation Interference and Diffraction of Light. Pergamon Pr, 1981. 808 p.
- 30*. Brodwin M. E., Miller D. A. Propagation of the Quasi-TEM Mode in Ferrite-Filled Coaxial Line. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1964. Vol. 12, no. 5. P. 496–503. URL: <u>https://doi.org/10.1109/tmtt.1964.1125865</u>

- 31*. Belozorov D. P., Girich A. A., Tarapov S. I. Analogue of surface Tamm states in periodic structures on the base of microstrip waveguides. URSI Radio Science Bulletin. 2013. Vol. 2013, no. 345. P. 64–72. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/7910034
- 32*. Stratton J. A. Electromagnetic theory. New York : McGraw-Hill, 1941. 615 p.
- 33*. Bhoi B., Kim S.-K. Chapter One Photon-magnon coupling: Historical perspective, status, and future directions. *Solid State Physics*. 2019. Vol. 70. P. 1–77. URL: <u>https://doi.org/10.1016/bs.ssp.2019.09.001</u>
- 34*. Sharp Trapped-Mode Resonances in Planar Metamaterials with a Broken Structural Symmetry / V. A. Fedotov et al. *Physical Review Letters*. 2007. Vol. 99, no. 14. P. 147401. URL: <u>https://doi.org/10.1103/physrevlett.99.147401</u>
- 35*. Plane-wave scattering by self-complementary metasurfaces in terms of electromagnetic duality and Babinet's principle / Y. Nakata et al. *Physical Review B*. 2013. Vol. 88, no. 20. P. 205138. URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.88.205138

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- Yachin V., Ivzhenko L., Polevoy S., Tarapov S., Resonant response in mechanically tunable metasurface based on crossed metallic gratings with controllable crossing angle. *Applied Physics Letters*. 2016. Vol. 109, no. 22. P. 221905 (1–4). URL: <u>https://doi.org/10.1063/1.4971191</u>
- Polevoy S. Y., Vakula A. S., Nedukh S. V., Tarapov S. I. Fast Identification of Liquids Using Planar Metamaterial. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2017. Vol. 76, no. 3. P. 237–243. URL: https://doi.org/10.1615/telecomradeng.v76.i3.40
- Nedukh S. V., Polevoy S. Y., Tarapov S. I., Vakula A. S., Identification of liquids in different containers using a microwave planar metamaterial. *Radiofizika I Elektronika*. 2017. Vol. 22, no. 4. P. 69–73. URL: https://doi.org/10.15407/rej2017.04.069
- Polevoy S. Y., Michaylichenko V. A., Vakula A. S., Nedukh S. V., Tarapov S. I. Principal parameters for optimization of experimental technique for fast remote identification of liquids at microwaves. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. Vol. 77, no. 18. P. 1639–1648. URL: https://doi.org/10.1615/telecomradeng.v77.i18.60
- Yachin V. V., Polevoy S. Yu., Ivzhenko L. I., Tarapov S. I., Nakhimovych M. I. Experimental verification of Faraday rotation enhancement by all-ferrodielectric metasurface. *Journal of the Optical Society of America B*. 2019. Vol. 36, no. 2. P. 261–266. URL: <u>https://doi.org/10.1364/josab.36.000261</u>
- Polevoy S. Y., Tarapov S. I. Controlling Surface States of Planar Metamaterial Based on Moire Effect. *Progress In Electromagnetics Research M.* 2019. Vol. 84. P. 187–195. URL: <u>https://doi.org/10.2528/pierm19060708</u>
- 7. **Polevoy S. Y.**, Rudenko D. A., Vakula A. S., Tarapov S. I. Control of spectrum of coaxial photonic crystal with magnetic layers. *Telecommunications and Radio*

Engineering. 2019. Vol. 78, no. 6. P. 501–510. URL: <u>https://doi.org/10.1615/telecomradeng.v78.i6.40</u>

- Vakula A. S., Polevoy S. Yu., Nedukh S. V., Tarapov S. I. Portable 2.0-2.5 GHz oscillator-detector unit for liquids identification by planar photonic crystal technique. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol. 78, no. 9. P. 813–819. URL: https://doi.org/10.1615/telecomradeng.v78.i9.70
- Polevoy S. Yu., Vakula A. S., Nedukh S. V., Tarapov S. I. A technique for noncontact identification of liquids in closed containers using microwave planar metamaterial. URSI Radio Science Bulletin. 2019. Vol. 2019, no. 371. P. 53–62. URL: <u>https://doi.org/10.23919/ursirsb.2019.9117244</u>
- Ivzhenko L. I., Polevoy S. Y., Tarapov S. I., Yachin V. V., Kurselis K., Kiyan R., Chichkov B. N. Experimental observation of tunable Wood type resonances in an all-ferrodielectric periodical metasurface. *Optics Letters*. 2020. Vol. 45, no. 19. P. 5514–5517. URL: <u>https://doi.org/10.1364/ol.402936</u>
- Polevoy S. Yu., Kharchenko G. O., Tarapov S. I., Kravchuk O. O., Kurselis K., Kiyan R., Chichkov B. N., Slipchenko N. I. A magnetoactive metamaterial based on a structured ferrite. *Radiofizika I Elektronika*. 2021. Vol. 26, no. 1. P. 28–34. URL: <u>https://doi.org/10.15407/rej2021.01.028</u>
- Ivzhenko L. I., Polevoy S. Yu., Odarenko E. N., Tarapov S. I. Dispersion properties of artificial topological insulators based on an infinite double-periodic array of elliptical quartz elements. *Radiofizika I Elektronika*. 2021. Vol. 26, no. 3. P. 11–17. URL: <u>https://doi.org/10.15407/rej2021.03.011</u>
- Girich A., Nedukh S., Polevoy S., Sova K., Tarapov S., Vakula A. Enhancement of the microwave photon-magnon coupling strength for a planar fabricated resonator. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, no. 1. P. 924(1–8). URL: <u>https://doi.org/10.1038/s41598-022-27285-6</u>
- Vakula A.S., Polevoy S.Yu., Sova K.Yu., Nedukh S.V., Girich A.A., Tarapov S.I., Special features of low-temperature microwave ferromagnetic resonance in nanometer ferrite layer patterned by macroporous silicon substrate. *Low Temperature Physics*. 2023. Vol. 49, no. 4. P. 467–472. URL: <u>https://doi.org/10.1063/10.0017591</u>
- Polevoy S., Yermakov O. Excitation of Surface Waves With On-Demand Polarization at Self-Complementary Metasurface. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2023. Vol. 22, No. 8. P. 1962–1966. URL: https://doi.org/10.1109/lawp.2023.3270456
- Girich A., S. Nedukh, Polevoy S., Sova K., Tarapov S., Vakula A., Enhancement of photon-magnon coupling strength by inverted split-ring resonator at GHz. *AIP Advances*. 2024. Vol. 14, no. 2. P. 025138 (1–8). URL: <u>https://doi.org/10.1063/5.0187796</u>
- Ivzhenko L., Polevoy S., Tarapov S., Yachin V. Crossed metallic gratings as metasurface with tuned crossing angle. 2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW), Kharkiv, Ukraine, 20–24 June 2016. 2016. P. 1–3. URL: <u>https://doi.org/10.1109/msmw.2016.7538127</u>

 Polevoy S., Vakula A., Nedukh S., Tarapov S. Planar photonic crystals for express analysis of liquids. 9th URSI-France 2017 Workshop "Radio Science for Humanity" (JS'17) : Conf. Proc., Sophia Antipolis, France, 1–3 February 2017. 2017. P. 27–30. URL: <u>https://www.ursi-</u>

france.org/fileadmin/journees_scient/docs_journees_2017/data/articles/000033.pdf

 Tarapov S., Girich A., Polevoy S., Nedukh S., Vovk R. Magnetic Microwave Planar Metamaterials: Experimental Results. *The European Conference "Physics* of Magnetism 2017", PM'17: Abstracts, Poznań, Poland, 26–30 June 2017. Poznań, 2017. P. 113. URL: https://www.ifmpan.poznan.pl/pm17/abst/143-tarapov ire kharkov ua-

2017-02-24-15-08-58.pdf

- Polevoy S. Yu., Ivzhenko L. I., Tarapov S. I., Yachin V. V. Faraday rotation enhancement by gyrotropic metasurface. 2017 XXIInd International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), Dnipro, 25–28 September 2017. 2017. P. 269–272. URL: https://doi.org/10.1109/diped.2017.8100617.
- Polevoy S., Rudenko D., Tarapov S., Vakula A. Coaxial Magnetophotonic Crystal for Detection of Illicit and Dangerous Liquids. *6th International Conference on Superconductivity and Magnetism (ISCM'2018)* : Abstract book, Antalya, Turkey, 29 April – 4 May, 2018. P. 593.
- 22. Kravchuk O., **Polevoy S.** Electromagnetic properties of metamaterial based on structured ferrite. *IX International Conference for Professionals & Young Scientists "Low Temperature Physics" (ICPYS LTP 2018)* : Conference Program and Book of Abstracts, Kharkiv, 4–8 June 2018. P. 79.
- 23. Nedukh S., Vakula A., **Polevoy S.**, Vovk R., Tarapov S. Synthesis of FMR spectra of patterned magnetic nanostructures for access control and identification systems. *3rd International Advanced School on Magnonics IASM'2018* : Abstracts, Kyiw, 17–21 September 2018, P. 144.
- 24. Кравчук О. А., **Полевой С. Ю.** Расчет частоты ФМР магнитоактивного метаматериала на основе структурированного феррита. 23-й міжнародний молодіжний форум "Радіоелектроніка та молодь в XXI сторіччі": Матеріали форуму, Харків, 16–18 квітня 2019 р. Харків, 2019, Т. 1, С. 61–62. URL: <u>http://openarchive.nure.ua/handle/document/9019</u>
- Tarapov S., Ivzhenko L., Polevoy S., Vakula A. Experimental Implementation of Non-uniformity Effects in Artificial Media: (Invited). 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL), Sozopol, Bulgaria, 6–8 September 2019. 2019. P. 46–49. URL: https://doi.org/10.1109/caol46282.2019.9019487
- Polevoy S., Pogorily A., Tarapov S. Magnetoactive Surface States in Moire Metamaterials. 2019 Conference "Kleinheubacher Tagung 2019": Conf. Proc., Miltenberg, Germany, 23–25 September 2019. 2019. P. 46–48. URL: <u>https://ieeexplore.ieee.org/document/8890131</u>
- 27. Kravchuk O., **Polevoy S.** Numerical modelling the FMR frequency of a magnetically active metamaterial based on structured ferrite. *Twentieth*

International Young Scientists Conference "Optics & High Technology Material Science", SPO-2019: Scientific works, Kyiv, 26–29 September 2019. P. 45–46.

- Ivzhenko L., Polevoy S., Yachin V., Chichkov B., Tarapov S. Experimental and numerical identification of Faraday effect enhancement by all-ferrodielectric metasurface. *The Fifth Poznań Symposium on Quantum Technologies, Nonlinear Optics, Magnonics, and Metamaterials, QuTecNOMM-2019*: Abstracts, 15 October – 18 November 2019, Poznan, Poland. P. 15.
- Girich A. A., Nedukh S. V., Polevoy S. Yu., Sova K. Yu., Vakula A. S., Tarapov S. I. Photon-magnon Coupling in the Planar Photonic Crystal with Magnetic Defect. *PhotonIcs & Electromagnetics Research Symposium (PIERS-*2022). Hangzhou, China, 25–28 April 2022. P. 1–2. URL: https://author2021.piers.org/ac api/preview.php?t=ab&id=210713160409
- Polevoy S. Yu., Tarapov S. I., Girich A. A., Vakula A. S., Nedukh S. V., Sova K. Yu. Large Photon-Magnon Coupling in a Pi-Shaped Resonator with a Magnetic Sample. *International Conference On Quantum Materials And Technologies (ICQMT2022)*: Abstract book, Milas-Bodrum, Turkey, 16–22 October 2022. P. 245.
- Polevoy S., Girich A., Tarapov S., Vakula A., Nedukh S., Sova K. Influence of the Magnet Filling Factor by the Field of Planar Resonators on the Photon-Magnon Coupling Strength. 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Ukraine, 14–18 November 2022. 2022. P. 105–108. URL: https://doi.org/10.1109/ukrmw58013.2022.10036988
- Polevoy S., Kharchenko G., Kalmykova T., Ostrizhnyi Y., Ivzhenko L., Yermakov O. Polarization-Controlled Excitation of Surface Waves at Self-Complementary Metasurface. 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Ukraine, 14–18 November 2022. 2022. P. 222–225. URL: https://doi.org/10.1109/ukrmw58013.2022.10036966
- 33. Girich A. A., Nedukh S. V., Polevoy S. Yu., Sova K. Yu., Vakula A. S., Tarapov S. I. Strong Photon-magnon Coupling in a System of Two Coupled Resonators: Planar Photonic Crystal with Defect and Inverted Split-ring Resonator. 2023 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), Prague, Czech Republic, 3–6 July 2023. 2023. P. 200–204. URL: https://doi.org/10.1100/piers50004.2023.10221554

URL: https://doi.org/10.1109/piers59004.2023.10221554

- 34. Polevoy S. Increasing of the Photon-Magnon Coupling Strength in a System of Coupled Microwave Resonators with a Magnetic Sample. 2023 IEEE 13th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP), Bratislava, Slovakia, 10–15 September 2023. 2023. IMT05. P. 1–4. URL: https://doi.org/10.1109/nap59739.2023.10310809
- 35. **Polevoy S. Yu.**, Tarapov S. I., Vakula A. S., Nedukh S. V., Girich A. A., Sova K. Yu. Spin magnetism for frequency converting at quantum computing technologies. *NATO Advanced Research Workshop "Functional Spintronic Nanomaterials for Radiation Detection and Energy Harvesting"*. Kyiv, 25–27 September 2023, 1 p.

URL: <u>http://spinnano.kpi.ua/images/abstracts/SPINNANO_Abstract_Polevoy.pdf</u>

- 36. Sova K., Vakula A., Polevoy S., Tarapov S., Girich A., Nedukh S. Planar Waveguide Defect Features for Photon-Magnon Coupling Strength Increasing / K. Sova et al. 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2–6 October 2023. 2023. 4 pp. URL: https://doi.org/10.1109/khpiweek61412.2023.10312993
- 37. Polevoy S., Tarapov S., Yermakov O. Role of Dielectric Substrate on Excitation of Surface Waves with Preselected Polarization State at Self-Complementary Metasurface in Microwaves. 2023 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Kyiv, Ukraine, 13–18 November 2023. 2023. P. 331–334. URL: <u>https://doi.org/10.1109/ukrmico61577.2023.10380418</u>
- Girich A. A., Nedukh S. V., Polevoy S. Yu., Rami B., Sova K. Yu., Tarapov S. I., Vakula A. S., Magnetic Nanocomponents for Frequency Converting in Quantum Computing Technologies. *Functional Magnetic and Spintronic Nanomaterials*. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. Eds.: I. Vladymyrskyi et al. Dordrecht, Netherlands, 2024. P. 197–206. URL: https://doi.org/10.1007/978-94-024-2254-2 9

АНОТАЦІЯ

Полевой С. Ю. Електромагнітні властивості керованих метаповерхонь мікрохвильового діапазону та їхнє застосування. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, м. Харків, 2025.

Дисертаційну роботи присвячено вирішенню актуальної проблеми вдосконалення фізичних принципів ефективного керування електромагнітними властивостями метаповерхонь мікрохвильового діапазону за допомогою як електронного перестроювання матеріальних параметрів, так і механічного перестроювання геометричних параметрів формуючих метаповерхню елементів. У роботі показано, що з погляду фундаментальної фізики проведені в роботі дослідження розширюють знання про способи керування електромагнітними хвилями в метаповерхнях мікрохвильового діапазону та супутніх фізичних явищах. Зокрема, продемонстровано посилення ефекту Фарадея в керованих за допомогою магнітного поля метаповерхнях субхвильової товщини; розглянуто явище механічного настроювання резонансної частоти метаповерхонь на ефекті муару; продемонстровано ефективне керування спектральними властивостями фотонного кристала з магнітними включеннями в коаксіальному хвилеводі; вирішено завдання керування дисперсійними властивостями електромагнітного аналога топологічного ізолятора за допомогою зміни матеріальних параметрів матеріалу, з якого його виготовлено, і розроблено ефективний підхід до керування поляризацією ближнього поля самокомплементарних метаповерхонь. Для практичного застосування планарних метаматеріалів розроблено підходи до збільшення величини фотон-магнонного зв'язку для системи планарного мікрохвильового резонатора і феримагнітної плівки, яку розташовано поблизу

продемонстровано ефективність його поверхні, a також використання неоднорідного планарного фотонного кристала в мікрохвильовому діапазоні для експрес-аналізу рідин у радіопрозорих ємностях. З точки зору прикладних наук метаповерхні 3 феритовими елементами бачаться перспективними ДЛЯ застосування елементів компактних магнітокерованих пристроїв як мікрохвильового й оптичного діапазонів, таких як вентилі, модулятори сигналів, високочутливі датчики змінного поля.

Ключові слова: метаповерхня, керування електромагнітними властивостями, гіротропія, ефект Фарадея, ефект муару, фотон-магнонний зв'язок.

ABSTRACT

Polevoy S. Yu. Electromagnetic properties of controlled microwave metasurfaces and their applications. – As a manuscript.

Thesis for a scientific degree of doctor of science in physics and mathematics on speciality 01.04.03 – radiophysics. – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics NAS of Ukraine, Kharkiv, 2025.

The dissertation is devoted to solving the current problem of improving the physical principles of effective control of the electromagnetic properties of microwave metasurfaces using both electronic adjustment of constitutive parameters and mechanical restructuring of the geometric parameters of the elements forming the metasurface. It was shown that from the point of view of fundamental physics, the studies carried out in the work expand knowledge about the methods of controlling electromagnetic waves in microwave metasurfaces and related physical phenomena. In particular, the enhancement of the Faraday effect in metasurfaces of subwavelength thickness controlled by a magnetic field was demonstrated; the phenomenon of mechanical tuning of the resonant frequency of a metasurface based on the moiré effect was considered; effective control of the spectral properties of a photonic crystal with magnetic inclusions in a coaxial line was demonstrated; the problem of controlling the dispersion properties of an electromagnetic analogue of a topological insulator was solved by changing the constitutive parameters of the material from which it is made; and an effective approach to controlling the near field polarization of selfcomplementary metasurfaces was developed. As practical applications of planar metamaterials, the approaches to increasing of photon-magnon coupling strength for a system of a planar microwave resonator and a ferrimagnetic film placed near its surface were developed, and the efficiency of using an inhomogeneous planar photonic crystal (PPC) in the microwave range for express-analysis of liquids in radio-transparent containers was demonstrated. As for applications in applied sciences, planar metasurfaces with ferrite elements are considered promising for compact, magnetically controllable components in microwave and optical devices such as valves, signal modulators, and high-sensitivity alternating field sensors.

Key words: metasurface, control of electromagnetic properties, gyrotropy, Faraday effect, moiré effect, photon-magnon coupling.