

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Гіріч Олексій Олександрович

УДК 537.876.4:537.622

**СПЕКТРАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАМАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ
МАГНІТНИХ ТА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР В
МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ ДОВЖИН ХВИЛЬ**

01.04.03 – радіофізика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
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
Просвірін Сергій Леонідович,
Радіоастрономічний інститут
НАН України (м. Харків),
завідувач відділу теоретичної радіофізики,
доктор фізико-математичних наук, професор
Кісельов Володимир Костянтинович,
Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова
НАН України (м. Харків),
завідувач відділу квазіоптики,
доктор фізико-математичних наук, професор

Захист відбудеться "23" травня 2013 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 64.052.03 при Харківському національному університеті
радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного
університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий "22" квітня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.052.03,
доктор технічних наук, професор



В.М. Безрук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний стан науки і техніки відкриває нові горизонти в області дослідження спектральних властивостей метаматеріалів. Зокрема, в останні роки було розроблено ряд штучних матеріалів із заданими діелектричними і магнітними характеристиками. Тим самим було продемонстровано, що сучасна технологія може створювати матеріали з унікальними характеристиками, що не існують в природі. Такі штучні матеріали, як відомо, прийнято називати метаматеріалами. До цих структур відносяться фотонні кристали (ФК) і лівобічні середовища. Мабуть, одним з найбільш вдалих визначень терміну метаматеріали є наступний: в електромагнетизмі «метаматеріал» є об'єктом, який набуває свої матеріальні властивості від своєї структури замість того, щоб успадкувати їх безпосередньо від матеріалів, з яких він складається [1*].

Серед метаматеріалів особливий інтерес представляють ФК, які є структурами з просторовою періодичною зміною показника заломлення. При цьому величина елементарної комірки ФК порівнянна з довжиною електромагнітної хвилі. Іншими словами ФК - середовища, у яких діелектрична (магнітна) проникність періодично змінюється в просторі з періодом, що допускає брегівську дифракцію електромагнітної хвилі. ФК є предметом інтенсивних теоретичних та експериментальних досліджень в останнє десятиліття [2*-4*] через можливість їх використання в оптоелектроніці та телекомунікаціях. Відомо, що фотонні кристали демонструють ряд важливих і корисних властивостей: наявність заборонених зон у спектрі електромагнітних хвиль, аномальну групову швидкість на краях заборонених зон, від'ємний показник заломлення електромагнітних хвиль [16*-18*].

Можливість керування спектральними властивостями ФК шляхом варіації магнітної сприйнятливості складових елементів структури (такі ФК називають магнітофотонними кристалами), породжує нові напрями досліджень. Використання магнетиків (наприклад, феритів) у складі побудованих на такій основі магнітофотонних кристалів (МФК) знаходять широкі області застосування. Зокрема, існування заборонених зон в спектрі електромагнітних хвиль дозволяє використовувати такі структури в якості частотних фільтрів. Використання магнетиків і напівпровідників у складі метаматеріалів, як окремо, так і в комплексі, дає можливість управління їх спектральними властивостями в режимі реального часу за допомогою зовнішнього магнітного поля. Вивчаючи залежність коефіцієнта відбиття від частоти, кута падіння або магнітного поля, можна отримати дані про фізичні параметри і товщини шарів, що утворюють МФК. Таким чином, вимірювання коефіцієнта відбиття електромагнітних хвиль від МФК може слугувати безконтактним методом контролю параметрів періодичної структури. Крім того, результати досліджень даних структур можуть бути використані в субміліметровому і оптичному діапазонах довжин хвиль з урахуванням дисперсії діелектричної та магнітної проникності. Теоретично ФК були досліджені у роботах [5*-8*].

Останнім часом велику увагу дослідників, що вивчають електромагнітні процеси в МФК [9*-15*], привернув так званий таммівський стан (ТС). У фізиці ФК таммівські стани є електродинамічним аналогом класичних таммівських станів відомих у фізиці твердого тіла. Останні були відкриті в 1928 р. І.Є. Таммом як енергетичні стани одновимірної ґратки, що складається з прямокутних потенційних ям, розділених прямокутними бар'єрами. При цьому в енергетичному спектрі ґратки в області заборонених енергій виникають дозволені енергетичні рівні.

Електродинамічний ТС реалізує себе у вигляді вузького піку в забороненій зоні ФК, обмеженого або середовищем, де один з матеріальних параметрів від'ємний, або іншим ФК, заборонена зона якого перекривається із забороненою зоною першого ФК. При цьому електромагнітне поле концентрується поблизу межі розділу таких двох об'єктів. Часто в електродинаміці такий ТС називають поверхневим електромагнітним станом (ПЕС) [12*] або таммівським поверхневим станом (ТПС) [14*], а пік, пов'язаний з ТС - піком ПЕС, піком ТС або таммівським піком. Якщо в рівняння Максвела, що описують формування такого стану, ввести тангенціальну компоненту поля, то цей поверхневий електромагнітний стан перетвориться в добре відому поверхневу хвилю, що поширюється вздовж межі ФК. Відзначимо, що математичний опис класичного ТС та його електродинамічних аналогів має практично один і той же вид і зводиться до розв'язування рівняння Хілла.

Можливість виявлення ТС в одновимірному МФК на межі з середовищем з від'ємною діелектричною проникністю (ВДП) була теоретично передбачена, мабуть, вперше в [12*] і експериментально зареєстрована в ІЧ діапазоні частот в [9*]. Детальне дослідження та виявлення цього явища в міліметровому діапазоні довжин хвиль було наведено в [13*, 15*].

Іншим окремим випадком метаматеріалів є лівобічні середовища. Ці середовища мають одночасно від'ємну діелектричну і магнітну проникності. Такі середовища можна уявити, зокрема, у вигляді періодичної структури з періодом набагато меншим довжини хвилі, падаючої на структуру. Метаматеріали, побудовані на основі лівобічних середовищ, використовуються при розробці призм, лінз і концентраторів з надроздільною здатністю. Завдяки тому, що метаматеріали мають від'ємний показник заломлення, вони ідеальні для маскування об'єктів у певному діапазоні частот.

Теоретичним вивченням ФК на основі напівпровідників займалися багато авторів, зокрема автори робіт [5*-8*]. Однак експериментальних досліджень у міліметровому діапазоні з даної тематики проведено недостатньо для розуміння багатьох принципових питань. Також, незважаючи на велику кількість робіт по вивченню лівобічних середовищ, поведінка таких середовищ, сформованих природними матеріалами в НВЧ діапазоні частот (напр., [15*, 17*, 18*]), також вимагає більш детального дослідження. Зокрема, практично експериментально не досліджувалися лівобічні середовища на основі магнетиків і напівпровідників.

Таким чином, актуальність теми дисертації полягає: в потребі подальшого розвитку уявлень про електродинамічні процеси, що відбуваються в штучно сформованих середовищах (фундаментальна область); а також у потребі розробки принципів і створенні нових типів електронно-керованих приладів і пристроїв міліметрового і субміліметрового діапазонів довжин хвиль на основі магнітофотонних кристалів і лівобічних середовищ, а також в необхідності поліпшення характеристик існуючих приладів (прикладна область).

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

Дисертаційна робота виконана у відділі радіоспектроскопії ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України в рамках досліджень, що проводяться за держбюджетними темами НДР: «Дослідження лінійних та нелінійних властивостей твердотільних структур із застосуванням електромагнітних хвиль НВЧ діапазону і заряджених частинок» (шифр «Кентавр-4», номер держреєстрації 01064011978, виконавець), «Проходження електромагнітних хвиль НВЧ діапазону в фотонних кристалах на основі феритів та манганітів: НВЧ і магнітна радіоспектроскопія» (шифр «Корвет», номер держреєстрації 0110U004355, заступник наукового керівника роботи).

Мета дослідження – вивчення впливу зовнішнього постійного магнітного поля на спектральні властивості одновимірних і двовимірних метаматеріалів на основі магнетиків і напівпровідників в міліметровому діапазоні довжин хвиль.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробити математичну модель для розрахунку спектральних характеристик одновимірних метаматеріалів (періодичних структур) і метаматеріалів, обмежених середовищем з від'ємною діелектричною проникністю (ВДП), що знаходяться в магнітному полі.

2. На основі розробленої математичної моделі дослідити залежність спектральних властивостей одновимірних метаматеріалів (періодичних структур) від магнітного поля, а також вплив магнітного поля на частоту ПЕС в метаматеріалах, обмежених середовищем з ВДП. Визначити необхідні параметри для проведення їх експериментального дослідження.

3. Створити лабораторні макети періодичних структур, експериментально дослідити їх спектральні властивості в магнітному полі і порівняти результати експерименту і математичного моделювання.

Об'єктом дослідження є процеси поширення електромагнітних хвиль у метаматеріалах на основі магнетиків і напівпровідників в зовнішньому магнітному полі.

Предметом дослідження є спектральні властивості одновимірних і двовимірних метаматеріалів, на основі магнетиків і напівпровідників і їх залежність від зовнішнього постійного магнітного поля в міліметровому діапазоні довжин хвиль.

Методи дослідження. Основні експериментальні результати по дослідженню метаматеріалів отриманих з використанням методу вимірювання S-параметрів чотириполюсника за допомогою векторного аналізатора (Agilent Network Analyzer PNA-L N5230A) в міліметровому діапазоні довжин хвиль.

Методом електронного спінового резонансу було проведено дослідження магніторезонансних властивостей метаматеріалів в міліметровому діапазоні довжин хвиль. Математичне моделювання процесів поширення електромагнітних хвиль у досліджуваних структурах проводилося за допомогою методу матриць перетворення і методу кінцевих різниць у часовій області.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Розроблена нова експериментальна методика для дослідження спектральних властивостей одновимірних і двовимірних метаматеріалів на основі магнетиків і напівпровідників в міліметровому діапазоні довжин хвиль, в широкому діапазоні температур і магнітних полів.

2. Теоретично досліджені спектральні властивості одновимірних і двовимірних метаматеріалів, що складаються з діелектричних, феритових і напівпровідникових шарів у міліметровому діапазоні довжин хвиль і в широкому діапазоні температур:

- показано, що можна ефективно керувати шириною і частотним положенням дозволених зон магнітофотонних кристалів (МФК) напівпровідник-діелектрик у разі, коли зовнішнє постійне магнітне поле спрямоване перпендикулярно напрямку поширення ТМ-електромагнітних хвиль;
- вперше досліджено спектральні властивості двовимірної лівобічної структури, що складається з феритових і напівпровідникових стержнів, розташованих у шаховому порядку. Передбачено існування зворотних хвиль в такій двовимірній лівобічній структурі.

3. Вперше експериментально виявлено поверхневі електромагнітні стани (ПЕС) в МФК ферит-діелектрик, які межують з напівпровідниковим шаром:

- показано, що частотою ПЕС можна в широких межах керувати за допомогою зовнішнього постійного магнітного поля;
- вивчено температурну залежність частоти ПЕС на межі МФК / напівпровідник і показано, що зменшення добротності піку коефіцієнта пропускання, пов'язаного зі збудженням ПЕС при зниженні температури до азотної (77 K), обумовлено зменшенням концентрації вільних електронів в напівпровіднику;
- вперше показано, що досліджуючи характер залежності частоти ПЕС від магнітного поля можна ідентифікувати ТЕ- і ТМ-електромагнітні хвилі.

4. Вперше показана можливість роздільної реєстрації як піку пропускання лівобічного середовища, так і піку Вульф-Брегівського резонансу в дрібношаруватій лівобічній структурі ферит-напівпровідник.

5. Вперше експериментально виявлено лівобічний пік пропускання об'ємних електромагнітних хвиль в двовимірній лівобічній структурі, що складається з феритових і напівпровідникових стержнів, розташованих у шаховому порядку. Вперше в такій структурі зареєстрована негативна рефракція електромагнітних хвиль на межі лівобічної структури та вакууму.

Практичне значення отриманих результатів. Робота дозволяє розширити уявлення про властивості ТЕ- і ТМ-електромагнітних хвиль в метаматеріалах, що складаються з феритових і напівпровідникових шарів. Розроблено ряд нових експериментальних методик, промодельовано і експериментально досліджено розповсюдження електромагнітних хвиль в метаматеріалах на основі магнетиків і напівпровідників в зовнішньому магнітному полі. Зокрема, розроблена спеціалізована комп'ютерна програма для дослідження спектрів електронного спінового резонансу (ЕСР) в магнітних метаматеріалах, яка базується на аналізі діаграми Сміта. Вона дає можливість проводити аналіз спектрів не тільки ЕСР-ефекту, але й часто йому супутнього ефекту гігантського магнітного імпедансу (ГМІ) в інтерактивному режимі. Реалізована можливість окремого спостереження обох ефектів.

Розроблена спеціалізована комп'ютерна програма для дослідження спектрів електронного спінового резонансу різних видів магнетиків на основі апаратно-програмного комплексу радіоспектрометра «БУРАН», забезпечує цифрову реєстрацію ЕСР-спектрів та швидкий їх аналіз. При цьому:

- наявність фільтрації і статистичного усереднення дає можливість збільшити співвідношення сигнал / шум не менше ніж у 10 разів;
- безпосередній прийом даних з реєструючої апаратури, міняючи проміжний цифро-аналоговий перетворювач, також збільшує співвідношення сигнал / шум не менше ніж у 2 рази;
- архітектура програми робить можливим використання її на інших спектрометрах, що виконують аналогічні задачі.

Результати досліджень, які присвячені вивченню властивостей ПЕС, що виникають на межі МФК (ферит-діелектрик), який межує з напівпровідниковим шаром, а також вивченню посилення ефекту Фарадея для фотонного кристалу, навантаженого феритовим шаром, доцільно застосувати при розробці фільтрів і фазообертачів.

Результати досліджень, які присвячені вивченню негативної рефракції в метаматеріалах ферит-напівпровідник із шаховим розташуванням елементів, доцільно застосувати при розробці відгалужувачів, концентраторів полів, а також лінз з надроздільною здатністю.

Результати досліджень можуть бути використані для моделювання спектральних властивостей різних метаматеріалів. Отримані результати можуть застосовуватися для інших діапазонів частот, зокрема субміліметрового та оптичного діапазонів.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих із співавторами, полягає в наступному.

Автором особисто побудовані експериментальні та теоретичні моделі спеціальних фотонних кристалів, лівобічних середовищ [3, 5, 6, 17, 28] та проведені експерименти по дослідженню збудження поверхневих електромагнітних станів на межі метаматеріалів [15, 16, 18, 25, 27].

Автором особисто спроектовані лабораторні макети одновимірних і двовимірних метаматеріалів. Автор брав участь у проведенні експериментів по дослідженню збудження поверхневих електромагнітних станів на межі

метаматеріалу. Автор безпосередньо брав участь в експериментальних дослідженнях одновимірних і двовимірних лівобічних метаматеріалів, проведенні аналізу та обробці експериментальних даних, а також в калібруванні вимірювальної апаратури.

Автор особисто розробив спеціалізовану комп'ютерну програму для дослідження спектрів магнітних резонансів різних видів магнетиків на основі апаратно-програмного комплексу радіоспектрометра «БУРАН», брав участь у проведенні тестових експериментів [8, 9]; розробив спеціалізовану комп'ютерну програму для аналізу експериментальних даних при дослідженні ефектів ЕСР і ГМІ, брав участь у проведенні тестових експериментів [1, 2, 11].

Автор безпосередньо брав участь у розробці експериментальної методики по дослідженню елементів ФК за допомогою дискового діелектричного резонатора з ЕСР-міткою, що налаштовується [4].

Автор безпосередньо брав участь в експериментальних дослідженнях, присвячених посиленню ефекту Фарадея в фотонно-кристалічній структурі, навантажений феритовим шаром і обмежений тонкою металевою плівкою або дротяним середовищем [7, 26].

Автор безпосередньо брав участь в експериментальних дослідженнях, теоретичному моделюванні і розробці експериментальної методики, що присвячені ефекту негативної рефракції електромагнітних хвиль в одновимірній і двовимірній призмах, що складаються з напівпровідникових і феритових шарів [6, 21].

Автор разом з науковим керівником брав безпосередню участь в обробці та аналізі всіх представлених в роботі експериментальних даних, написанні статей, які лягли в основу даної дисертаційної роботи.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи були представлені на наступних наукових конференціях: 10-й міжнародний форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков, Украина, 2006; 7-я конференция молодых ученых «Радиофизика и электроника», Харьков, Украина, 2007; 11-й міжнародний форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», Харьков, Украина, 2007; 1-я Всеукраинская научная конференция молодых ученых «Физика низких температур КМВ-ФНТ-2008», Харьков, Украина, 2008; 8-я конференция молодых ученых «Радиофизика и электроника, биофизика», Харьков, Украина, 2008; 2-я Всеукраинская научная конференция молодых ученых «Физика низких температур КМВ-ФНТ-2009», Харьков, Украина, 2009; International conference “Days on diffraction’2009”, St. Petersburg, Russia, 2009; 3rd International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, London, Great Britain, 2009; NATO Advanced Research Workshop on Terahertz and Mid Infrared Radiation: Basic Research and Applications, «TERA - MIR 2009», Turunç-Marmaris, Turkey, 2009; 4th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Karlsruhe, Germany, 2010; 7th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter waves (MSMW’10) and Workshop on Terahertz Technology (TERATECH’10), Kharkov, Ukraine, 2010; 41st

European Microwave Conference 2011, Manchester, Great Britain, 10-13 October 2011; 2nd International Conference on Nanotechnology: Fundamentals and Applications Ottawa, Ontario, Canada, 28-29 July 2011; Moscow International Symposium on Magnetism (MISM), Moscow, Russia, 21-25 June 2011; 5th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics, Barcelona, Spain, 10-15 October 2011.

Публікації. Результати дисертації були опубліковані в 29 друкованих працях, з них 7 статей [1-7] в наукових журналах і 22 доповіді в збірниках доповідей конференцій серед яких [8-29].

Структура й обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із переліку умовних скорочень, вступу, 3 розділів, висновків, списку використаних джерел, та додатків. Загальний обсяг складає 200 сторінок, з них 143 сторінок основного тексту. Дисертація містить 84 малюнка. Список використаних джерел на 15 сторінках нараховує 157 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету та задачі досліджень. Освітлено наукову новизну, практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про особистий внесок дисертанта, апробацію результатів, публікації, структуру та об'єм дисертації.

У **першому розділі**, наведено огляд літератури по дослідженню мета матеріалів, сформованих з штучних і природних матеріалів. Розглянуто різні класи матеріалів, які можна використовувати для створення метаматеріалів, такі як фотонні кристали, фотонні кристали обмежені середовищем з від'ємною діелектричною проникністю, електромагнітні структури із забороненою зоною, лівобічні середовища.

Другий розділ присвячено теоретичному дослідженню спектральних властивостей одновимірних і двовимірних метаматеріалів, що складаються з діелектричних, магнітних та напівпровідникових шарів у міліметровому діапазоні довжин хвиль і в широкому діапазоні температур. Передбачається, що вісь Oz спрямована перпендикулярно межах шарів, а осі Ox та Oy - паралельно межах шарів. Поширення електромагнітних хвиль у кожному шарі описується за допомогою рівнянь Максвелла. Залежність компонент електричного і магнітного полів від часу і координат в рівняннях Максвелла має вигляд: $\exp[-i(\omega t - k_x x - k_z z)]$. На межах поділу шарів повинні виконуватися граничні умови, які складаються в безперервності тангенціальних компонент електричного і магнітного полів.

У даному розділі описано метод аналізу метаматеріалів (періодичних структур), що базується на методі матриць перетворення, який пов'язує поля на початку і в кінці періоду структури. За допомогою методу матриць перетворення з урахуванням граничних умов отримано дисперсійне співвідношення для періодичної структури InSb-кварц. Проведено аналіз дисперсійного співвідношення для структури InSb-кварц з кінцевим і

нескінченним числом періодів. Показано, що у випадку нескінченної кількості періодів спектр структури являє собою набір дозволених і заборонених зон (має зонну структуру). У разі кінцевої кількості періодів дозвалені зони являють собою набір вузьких смуг пропускання, кількість яких на одиницю менше числа періодів в структурі. Ці смуги пропускання можна розглядати, як електродинамічний аналог станів Шоклі в квантовій фізиці. Показано, що в зонній структурі спектра можуть бути області частот, для яких: 1) хвильові числа $k_{z1,z2}$ виявляються уявними величинами, а в періодичній структурі поширюються хвилі, інтенсивності полів яких спадають по експоненті від усіх меж структури; 2) хвильове число k_{z1} виявляється дійсним, а k_{z2} – дійсним або уявним, при цьому утворення дозволених і заборонених зон визначається умовою Вульф-Брегівського резонансу на товщині одного з шарів.

З метою дослідження спектральних властивостей двовимірного метаматеріалу була розглянута структура, що складається з феритових і напівпровідникових стержнів, розташованих у шаховому порядку. Вісь x спрямована перпендикулярно напрямку стержнів, вісь y – вздовж напрямку стержнів. Зовнішнє постійне магнітне поле направлено вздовж осі y . Структура складається з чотирьох композитних шарів, що розташовані в площині xOy . Розглядаємо ТЕ-електромагнітну хвилю, що має такі відмінні від нуля компоненти електромагнітного поля: H_x, E_y, H_z .

Для розрахунку залежності коефіцієнта пропускання від частоти були визначені значення ефективної діелектричної (ϵ_{eff}) та ефективної магнітної (μ_{eff}) проникностей для всієї структури. Виявлена частотна область, в якій дійсні частини діелектричної та магнітної проникностей є від'ємними ($\epsilon'_{eff} < 0$, $\mu'_{eff} < 0$). У цьому діапазоні частот в спектрі пропускання композитної структури повинен спостерігатися пік, пов'язаний з лівобічними властивостями структури (ЛБ-пік), що має максимальну амплітуду на частоті, при якій виконується співвідношення $\epsilon'_{eff} \cdot \mu'_{eff} \approx 1$. Відзначимо, що положенням цього піку можна керувати постійним магнітним полем.

За допомогою методу матриць перетворення розрахована залежність коефіцієнта пропускання від частоти для досліджуваної структури в описаному вище наближенні матеріальних параметрів. Виявлена область прозорості, що пов'язана з лівобічними властивостями (ЛБ-область) структури. При цьому, характерним є від'ємність групової швидкості в цьому частотному діапазоні (зворотна хвиля). Щоб показати це, за допомогою методу матриць перетворення було отримано дисперсійне співвідношення для структури. Аналіз цього співвідношення показує, що в частотному спектрі структури присутня область частот (ЛБ-область), в якій дисперсійна характеристика має від'ємний нахил (рис. 1). Це вказує на те, що в цій області частот в структурі поширюється зворотна хвиля. При цьому групова швидкість є від'ємною і структура проявляє лівобічні властивості.

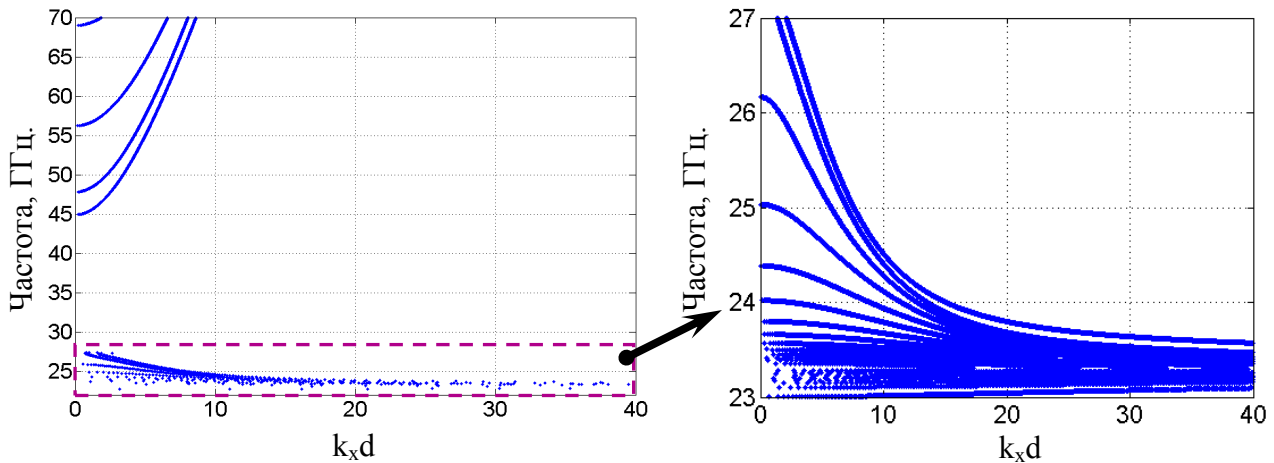


Рис. 1. Залежність хвильового вектора від частоти при $H_0 = 6240 E$

Крім того в даному розділі, з метою визначення впливу температури на спектральні властивості періодичної структури InSb-кварц, розміщеної у вільному просторі, за допомогою методу матриць перетворення була розрахована залежність коефіцієнта пропускання від частоти (ТМ-електромагнітна хвиля) в частотному діапазоні 15-40 ГГц при зміні магнітного поля в інтервалі 6-10 кЕ (рис. 2). Структура представлена 6 періодами. Кожен період складався з шарів кварцу і InSb з товщинами 2 мм і 0,5 мм відповідно. Розрахунок проводився для температури 77 К. Як видно з рис. 2 в залежності коефіцієнта пропускання від частоти структури InSb-кварц спостерігаються дві дозволені і одна заборонена зони (для наочності крива 2 наведена на вставці).

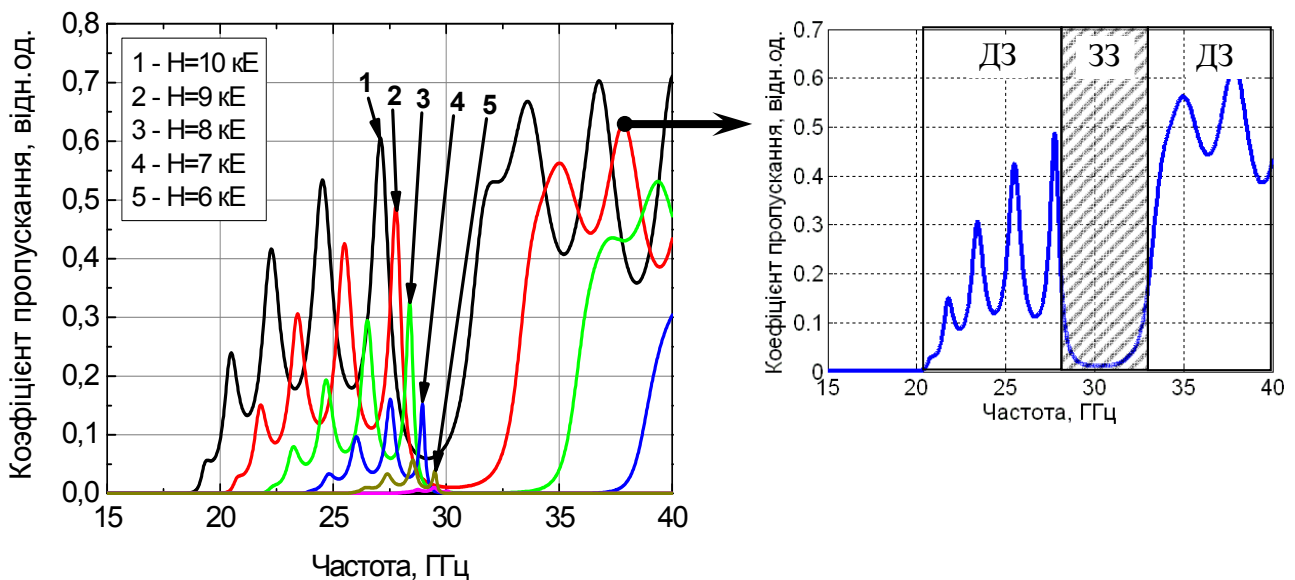


Рис. 2. Залежність коефіцієнта пропускання від частоти для структури InSb-кварц при $T = 77 K$, $H = 6-10$ кЕ (ДЗ - дозволена зона; ЗЗ - заборонена зона)

Кількість резонансних піків в дозволений зоні відповідає величині $N - 1$, де N – число періодів в структурі. При збільшенні магнітного поля спостерігається зміщення зони пропускання структури InSb-кварц в більш низькочастотну область і збільшення амплітуди зон пропускання. Зміщення зони пропускання

обумовлено зміною дійсної частини діелектричної проникності InSb з магнітним полем. Збільшення амплітуди обумовлено зменшенням втрат у InSb із збільшенням магнітного поля. Перестроювання правого краю дозволеної зони становить $0,650 \text{ ГГц}/\text{кЕ}$, а лівого краю – $1,365 \text{ ГГц}/\text{кЕ}$. Таким чином, структура InSb-кварц може бути використана як магнітокерований фільтр з вищевказаними параметрами перестройки по магнітному полю.

Третій розділ присвячений аналізу вимірюваних і розрахованих залежностей коефіцієнта пропускання від частоти для різних структур на основі напівпровідника і магнетика: 1) структури ферит-кварц з напівпровідниковою межею; 2) структури тефлон-кварц, навантаженої феритовим шаром і обмеженої плазмоподібним середовищем, що знаходиться в постійному магнітному полі. Проаналізовано поведінку спектрів пропускання шарувато-періодичних структур, сформованих напівпровідниковими і феритовими елементами, що мають лівобічні властивості.

Пік пропускання, пов'язаний зі збудженням ПЕС (пік ПЕС) для структури ферит-кварц з напівпровідниковою межею, виявлено теоретично і експериментально в забороненій зоні МФК для різних орієнтацій вектора постійного магнітного поля відносно магнітної компоненти змінного поля. Показано, що у випадку паралельної орієнтації частота ПЕС зменшується зі збільшенням магнітного поля за рахунок зміни діелектричної проникності шару InSb. Показано, що у випадку перпендикулярної орієнтації частота ПЕС збільшується із збільшенням магнітного поля за рахунок зміни магнітної проникності феритового шару. Показано, що зміна частоти ПЕС зовнішнім магнітним полем дозволяє ідентифікувати ТЕ- і ТМ-електромагнітні хвилі. (рис. 3, 4).

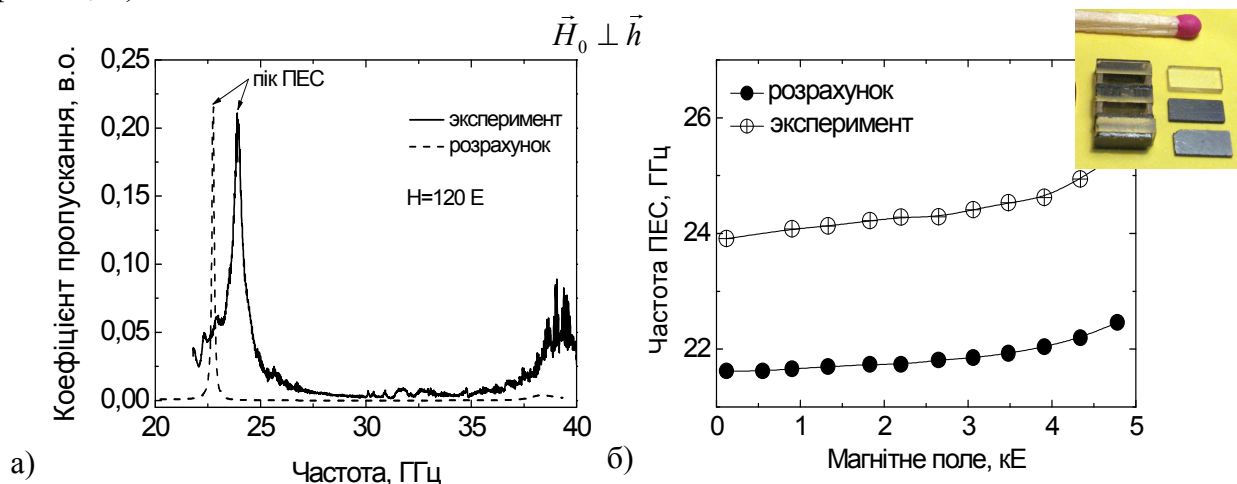


Рис. 3. (а) Залежність коефіцієнта пропускання від частоти (перпендикулярна орієнтація); (б) залежність частоти ПЕС від магнітного поля

Цікавим з точки зору фундаментальної та прикладної фізики є дослідження структур напівпровідник / ферит, у випадку, коли довжина хвилі помітно перевищує розмір кожного елемента структури. Особливо важливим є задача вивчення цих структур в області частот, в якій діелектрична і магнітна проникності є від'ємними.

З цією метою експериментально і теоретично досліджено спектральні властивості одновимірної дрібношаруватої лівобічної структури напівпровідник / ферит і вперше показана можливість окремої реєстрації як піку пропускання лівобічного середовища (ЛБС), так і піку Вульф-Брегівського резонансу (ВБР, рис. 5).

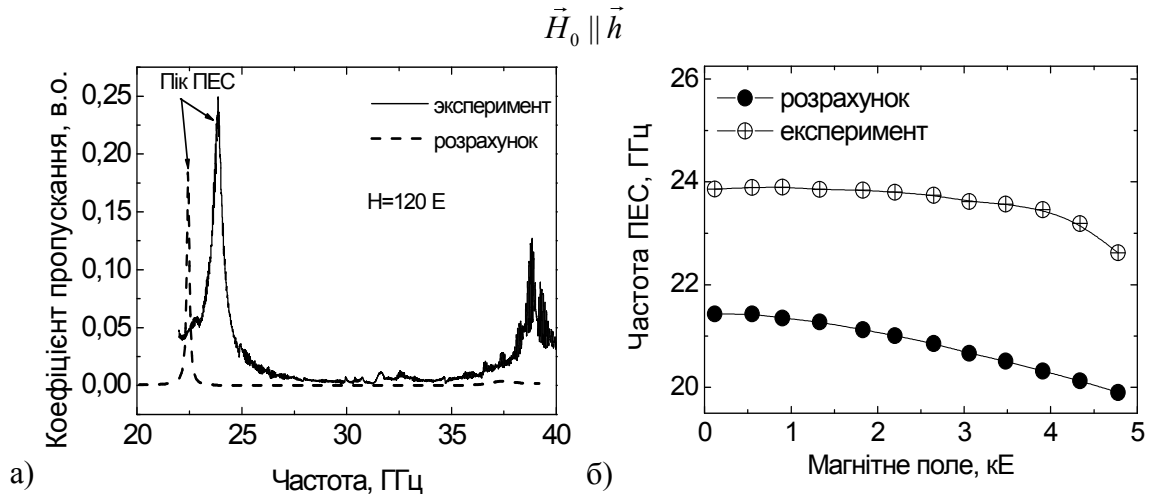


Рис. 4. (а) Залежність коефіцієнта пропускання від частоти (паралельна орієнтація); (б) залежність частоти ПЕС від магнітного поля

З метою вивчення лівобічних властивостей (ЛБ-властивостей) двовимірного метаматеріалу в міліметровому діапазоні довжин хвиль проведено експериментальне дослідження структури, що складається з феритових і напівпровідникових елементів розташованих у шаховому порядку (рис. 6). Проаналізовано спектр пропускання такого метаматеріалу, розміщеного в одномодовому металевому хвилеводі. Виявлено збільшення коефіцієнта пропускання через метаматеріал, в області частот, де діелектрична і магнітна проникність є від'ємними.

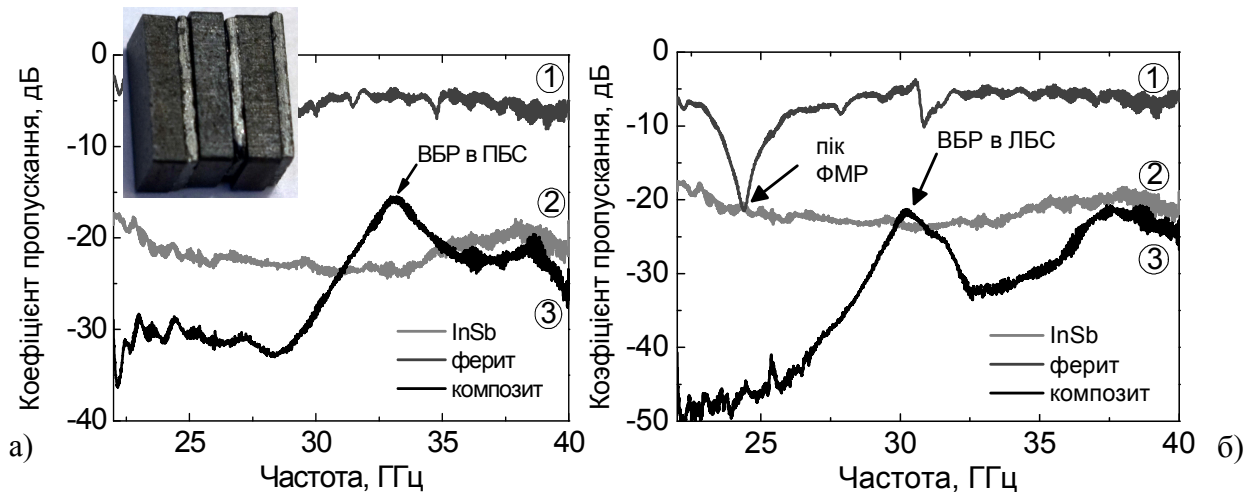


Рис. 5. Спектр коефіцієнта пропускання при різних магнітних полях: (а): ВБР в РБС (правобічне середовище); (б): ВБР в ЛБС (1 - феритовий шар; 2 - InSb шар; 3 - структура ферит-напівпровідник)

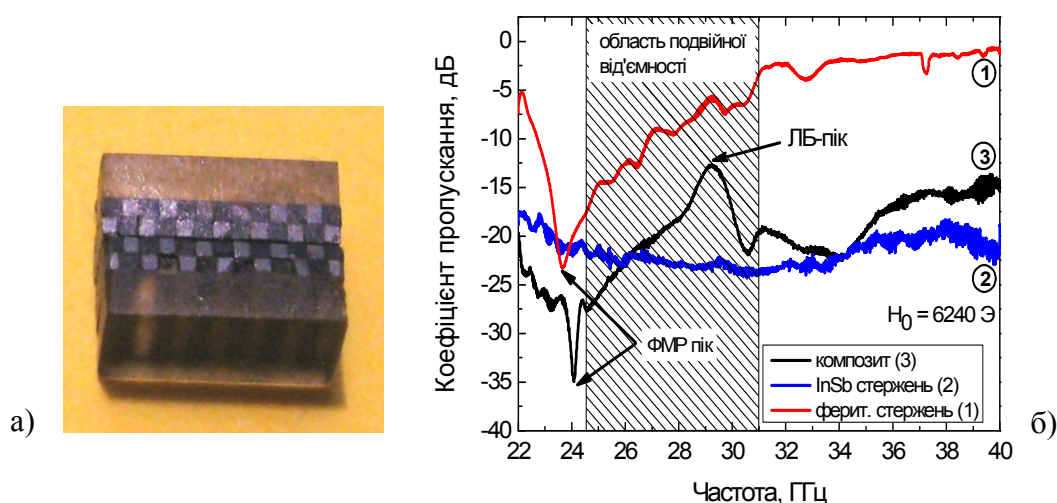


Рис. 6. (а) Досліджувана структура: шаховий метаматеріал. (б) експериментальний спектр пропускання композитної структури $H_0 = 6240$ Е (1-ферит, 2-напівпровідник, 3-шахова структура)

Вперше зареєстровано лівобічний пік пропускання (ЛБ-пік) об'ємних електромагнітних хвиль, обумовлений подвійною від'ємною діелектричною та магнітною проникностями, в структурі ферит / напівпровідник з елементами, розташованими в шаховому порядку (рис. 6). Теоретично показано, що в області частот, де виявлений ЛБ-пік, групова швидкість є від'ємною, що пов'язано з наявністю лівобічних властивостей в досліджуваній структурі. Виявлена залежність частоти ЛБ-піка від величини прикладеного магнітного поля. В результаті аналізу експериментальних і теоретичних результатів показано, що двовимірна структура проявляє лівобічні властивості при довжині структури вдвічі меншій, ніж довжина подібної одновимірної структури з такими ж товщинами шарів.

З метою перевірки негативної рефракції в лівобічному метаматеріалі проведено експериментальне дослідження лівобічних властивостей призми з метаматеріалу, що складається з феритових і напівпровідникових стержнів розташованих у шаховому порядку у міліметровому діапазоні довжин хвиль (рис. 7).

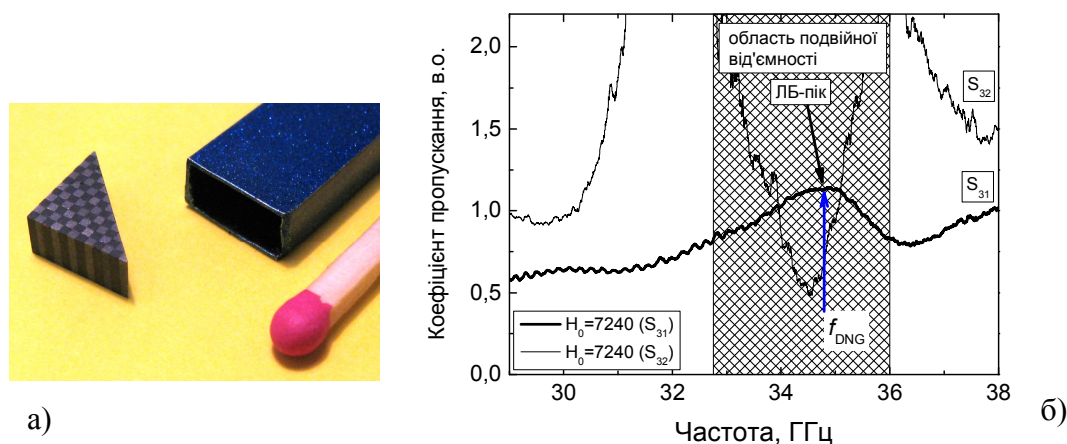


Рис. 7. (а) Фото призми шахового метаматеріалу. (б) Експериментальна залежність коефіцієнтів пропускання від частоти (S_{32} , S_{31}) для композитної призми в магнітному полі 7240 Е.

При цьому вперше за допомогою такої призми зареєстрована негативна рефракція електромагнітних хвиль на межі лівобічної структури та вакууму. Експериментально і теоретично продемонстровано виникнення ЛБ-піку. Показано задовільний збіг між експериментальними та чисельними результатами. Виявлено та проаналізовано залежність положення ЛБ-піку від зовнішнього постійного магнітного поля на частоті f_{DNG} (рис. 7).

Виявлено задовільний збіг між експериментальними та чисельними результатами. Виявлено та проаналізовано залежність положення ЛБ-піка від зовнішнього магнітного поля, яка викликана дисперсією магнітної проникності поблизу феромагнітного резонансу (ФМР) в феритових елементах. Показано існування ефекту негативної рефракції електромагнітної хвилі за допомогою ферит-напівпровідникової призми.

У додатку наведено опис вдосконалених існуючих та розроблених автором нових експериментальних методик: 1) вимірювання коефіцієнтів пропускання одновимірних метаматеріалів; 2) вимірювання коефіцієнтів пропускання призми з метаматеріалу; 3) дослідження ефектів ЕСР та ГМІ за допомогою діаграми Сміта. Розроблено спеціалізовану комп'ютерну програму для дослідження спектральних властивостей різних видів магнетиків та представлені основні її можливості. Наведено конструктивні особливості експериментальних макетів досліджуваних метаматеріалів.

Експериментальні дослідження спектрів пропускання одновимірних метаматеріалів проводилися при кімнатній та азотній (77 К) температурах у міліметровому діапазоні довжин хвиль. Вимірювання спектрів пропускання при азотній температурі проводилися за допомогою спеціалізованого кріомодуля. Схема експерименту показана на рис. 8.

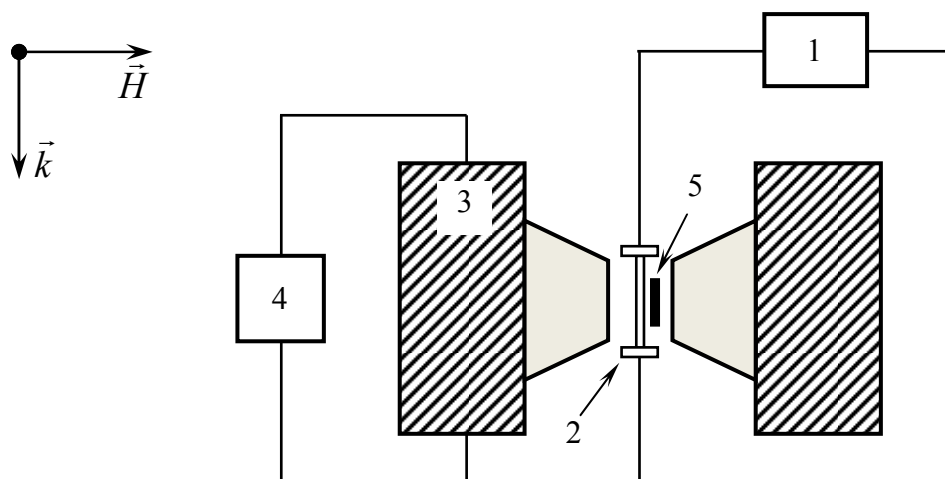


Рис. 8. Схема експерименту (1 - векторний аналізатор кіл; 2 - вимірювальна комірка з досліджуваним метаматеріалом; 3 - електромагніт; 4 - блок живлення електромагніту; 5 - вимірювач магнітної індукції)

В якості генератора і детектора випромінювання використовувався векторний аналізатор кіл Agilent N5230A. Хвильовідний тракт утворений порожніми прямокутними хвильоводами з перерізом $7,2 \times 3,4 \text{ мм}^2$. Магнітне поле створювалося за допомогою електромагніту. Досліджувану структуру

(метаматеріал) розміщували у вимірювальній комірці (відрізок хвильоводу) між полюсами електромагніту. Хвильовий вектор орієнтований перпендикулярно вектору постійного магнітного поля. Коефіцієнт пропускання метаматеріалу вимірювався в діапазоні частот 22-40 ГГц. Нижня межа діапазону обумовлена частотою відсічки використовуваного хвильоводу, а верхня – технічними характеристиками векторного аналізатора. Величину зовнішнього постійного магнітного поля змінювали в діапазоні 0-15 кЕ, змінюючи струм блоку живлення електромагніту в діапазоні 0-15 А. Максимальна неоднорідність магнітного поля в зазорі електромагніту в обсязі досліджуваного метаматеріалу становить не більше 5%. Вимірювання магнітного поля проводилося за допомогою вимірювача магнітної індукції Ш1-8. Похибка вимірювання магнітного поля при цьому не перевищувала 5%.

Методика вимірювання коефіцієнтів пропускання призми з метаматеріалу розглядається на прикладі двовимірної композитної призми типу 45-90-45 градусів (рис. 9), яка складається з феритових (марка 1СЧ4) і напівпровідникових (n-InSb) стержнів, що розташовані у шаховому порядку.

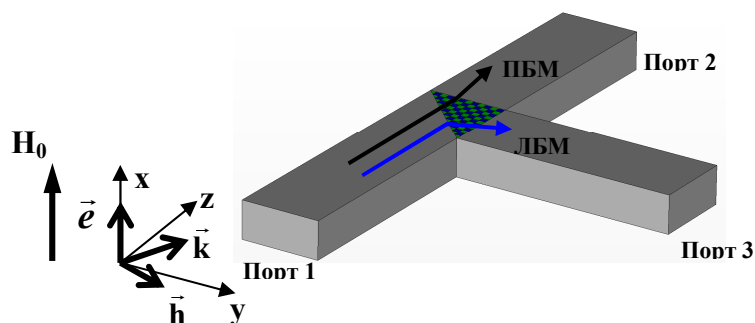
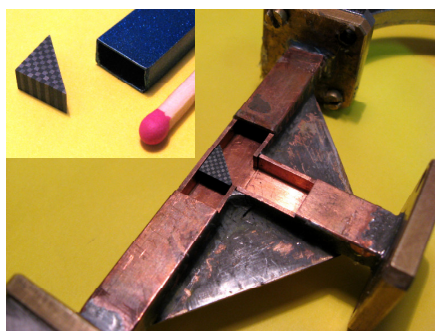


Рис. 9. Т-подібний хвильвід з призмою з метаматеріалу: фото (ліворуч); схема (праворуч)

Трикутна призма (з катетами 7,2 мм) утворена 12 елементами з кожного боку. Товщина призми складає 3,4 мм. Композитну структуру розташовують у Т-подібному хвильоводі Н-типу з поперечним перерізом $7,2 \times 3,4 \text{ мм}^2$. Два порти Т-хвильоводу: порт 2 (S_{21}) і порт 3 (S_{31}) підключені до атенюаторів для калібрування коефіцієнтів пропускання через метаматеріал в нульовому магнітному полі. Електромагнітна хвиля поширюється вздовж осі z , електрична компонента змінного поля направлена вздовж осі x , а магнітна компонента змінного поля – вздовж осі y . Зовнішнє статичне магнітне поле H_0 прикладали перпендикулярно компоненті змінного магнітного поля (рис. 9).

Калібрування Т-хвильоводу проводилася при нульовому магнітному полі. Для вимірювання параметра S_{21} необхідною умовою є, щоб атенюатор, підключений до порту 2, знаходився у відкритому стані, а атенюатор, підключений до порту 3 – в закритому. Відповідно, для вимірювання параметра S_{31} необхідною умовою є, щоб атенюатор, підключений до порту 2, знаходився в закритому стані, а атенюатор, підключений до порту 3 – у відкритому.

Також, з метою дослідження магнітних компонентів метаматеріалу запропоновано методику роздільного виявлення відгуку електронного спінового резонансу (ЕСР) від магнітного зразка і ЕСР-мітки, поміщених в дисковий діелектричний резонатор (ДДР), не порушуючи його геометричні параметри. Запропоновано використання такого ДДР у якості експериментальної комірки магніторезонансного спектрометру. Надійність методики продемонстровано як теоретично, так і експериментально.

Метод розрахунку розподілу електричних полів у ДДР знайшов застосування у розробленій експериментальній методиці магнітної радіоспектроскопії: проведено аналіз залежності коефіцієнта пропускання від частоти та просторового розподілу резонансного електромагнітного поля у ДДР в перестроюваному та неперестроюваному випадку; проведена експериментальна реєстрація ЕСР-спектру і чисельний розрахунок залежності коефіцієнта пропускання від магнітного поля для ДДР з ЕСР-міткою та зразком ДФПГ. Вивчено вплив різних вставок у ДДР і показано, що рубінова вставка вносить вельми мале збурення резонансної моди ДДР при досить великому ЕСР-відгуку від цієї мітки. Це доводить доцільність використання рубінової ЕСР-мітки для ЕСР-експерименту з ДДР. Експериментально виявлений ЕСР-пік ДФПГ за допомогою ДДР з ЕСР-міткою, що налаштовується. Отримано збіг теорії з експериментом з досить високою точністю.

Запропоновано методику досліджень явищ електронного спінового резонансу (ЕСР) і гігантського магнітного імпедансу (ГМІ), що базується на аналізі діаграми Сміта. Розраховано залежність комплексного імпедансу від частоти для різних магнітних наноструктур в частотній області спостереження ЕСР і ГМІ ефектів. Розроблено техніку одночасної реєстрації поглинання і дисперсії (дійсної та уявної частини комплексного імпедансу відповідно) і візуалізація цих величин на діаграмі Сміта за допомогою спеціальної розробленої комп'ютерної програми. Показана можливість роздільного спостереження ефектів ЕСР і ГМІ, використовуючи діаграму Сміта.

Розроблено спеціалізовану комп'ютерну програму для дослідження спектрів електронного магнітного резонансу різних видів магнетиків на основі апаратно-програмного комплексу радіоспектрометра «БУРАН». При цьому основними перевагами даної програми є: 1) проведення цифрової реєстрації ЕСР-спектрів досліджуваних структур і їх швидкого аналізу; 2) наявність фільтрації і статистичного усереднення дає можливість збільшити співвідношення сигнал/шум не менше ніж у 10 разів; 3) безпосередній прийом даних з реєструючої апаратури минаючи проміжний цифро-аналоговий перетворювач, що також збільшує співвідношення сигнал/шум; 4) можливість використання розробленої програми на інших спектрометрах, що виконують аналогічні задачі.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову задачу з вивчення впливу зовнішнього постійного магнітного поля на спектральні властивості

одновимірних і двовимірних метаматеріалів на основі магнетиків та напівпровідників у міліметровому діапазоні довжин хвиль. Основні результати дисертації полягають у наступному:

1. Розроблено нову експериментальну методику для дослідження магнітозалежних спектральних властивостей одновимірних і двовимірних періодичних структур на основі магнетиків і напівпровідників у міліметровому діапазоні довжин хвиль і в широкому діапазоні температур.

2. Теоретично досліджено спектральні властивості одновимірних і двовимірних періодичних структур, що складаються з діелектричних, феритових і напівпровідникових шарів у міліметровому діапазоні довжин хвиль і в широкому діапазоні температур. Показано, що для ТМ-електромагнітних хвиль можна ефективно керувати шириною і частотним положенням дозволених зон фотонного кристалу напівпровідник / діелектрик у разі, коли зовнішнє постійне магнітне поле спрямоване перпендикулярно напрямку магнітної компоненти змінного поля. Вперше досліджено спектральні властивості двовимірної лівобічної структури, що складається з феритових і напівпровідникових стержнів, розташованих у шаховому порядку і передбачено існування зворотних хвиль у двовимірній лівобічній структурі.

3. Вперше експериментально виявлено ПЕС в МФК ферит / діелектрик, що межують з напівпровідниковим шаром. Показано, що частотою ПЕС можна в широких межах керувати зовнішнім постійним магнітним полем. Вивчена температурна залежність частоти ПЕС на межі магнітофотонний кристал-напівпровідник і показано, що зменшення добротності піку коефіцієнта пропускання, пов'язаного зі збудженням ПЕС при зниженні температури до азотної (77 К), обумовлено зменшенням концентрації вільних електронів в напівпровіднику. Показано, що досліджуючи характер залежності частоти ПЕС від магнітного поля, можна ідентифікувати ТЕ- і ТМ-електромагнітні хвилі.

4. Вперше показана можливість окремої реєстрації як піку пропускання лівобічного середовища, так і піку Вульф-Брегівського резонансу у дрібношаруватій лівобічній структурі ферит-напівпровідник.

5. Вперше експериментально виявлено лівобічний пік пропускання об'ємних електромагнітних хвиль у двовимірній лівобічній структурі, що складається з феритових і напівпровідникових стержнів, розташованих у шаховому порядку. Вперше в такій структурі зареєстрована негативна рефракція електромагнітних хвиль на межі лівобічної структури та вакууму.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. М.К. Ходзицкий. Программно-аппаратный комплекс для измерения СВЧ-свойств магнитных структур / М.К. Ходзицкий, А. А. Гирич, С.И. Тарапов // "Вісник Сумського Державного Університету". – 2006. – № 10(94). – С. 91-96
2. М.К. Khodzitsky. Investigation of ESR and GMI effects in magnetic structures using Smith Chart / М.К. Khodzitsky, А.А. Girich, S.I. Tarapov //

- Telecommunications and Radio Engineering. – 2007. – Vol. 66, No. 19. – P. 1735-1746
3. Girich A.A. Magnetically Controlled Millimeter Waveband Filter Based on Disk Resonator Chain / Girich A.A., Tarapov S.I. // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. – 2008. – Vol. 30. – P. 85-93
 4. A. Girich. ESR-Cell Based on Disk Dielectric Resonator with Tunable Marker / A. Girich, T. Kalmykova, S. Tarapov. // Telecommunications and Radio Engineering. – 2009. – Vol. 68, No. 10. –P. 895-903
 5. Bulgakov A.A. Transmission of electromagnetic waves in a magnetic fine-stratified structure / Bulgakov A.A., Girich A.A., Khodzitsky M.K., Shramkova O.V., Tarapov S.I. // Journal of the Optical Society of America. – 2009. – Vol. 26, No. 12. – P. 156-160
 6. Гирич А.А. Зона прозрачности в левостороннем метаматериале с шахматной ориентацией ферритовых и полупроводниковых элементов в миллиметровом диапазоне длин волн // Радиотехника. – 2011. – № 167. – С. 135-142.
 7. A.A. Girich. Experimental study of the Faraday Effect in 1D-photonic crystal in millimeter waveband / A.A. Girich, S.Yu. Polevoy, S.I. Tarapov, A.M. Merzlikin, A.B. Granovsky, D.P.Belozorov // Solid State Phenomena. – 2012. – Vol. 190. – P. 365-368.
 8. Girich A.A. Program for processing and analysis of data for automatized measuring system of ESR-spectroscopy / Girich A.A., Khodzitsky M.K. // 10-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: конф., 10-12 апреля 2006: сборник аннотаций докладов. – Харьков, 2006. – С. 572.
 9. Ходзицкий М.К. Программно-аппаратный комплекс для ЭПР-измерений / Ходзицкий М.К., Гирич А.А. // 10-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: конф., 10-12 апреля 2006: сборник аннотаций докладов. – Харьков, 2006. – С. 54.
 10. Ходзицкий М.К.. Магниторезонансное поглощение в гетероструктуре (полупроводник/гранулярная пленка) с эффектом инжекционного магнитосопротивления. / Ходзицкий М.К., Гирич А.А., Полевой С.Ю. // 6-я конференция молодых ученых «Радиофизика и электроника»: конф., 13-14 декабря 2006: сборник аннотаций докладов. – Харьков, 2006. – С. 52.
 11. Girich A.A. Investigation of the GMI effect using Smith chart / Girich A.A., Khodzitsky M.K. // 11-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: конф., 10-12 апреля 2007: сборник аннотаций докладов. – Харьков, 2007. – С. 171.
 12. Гирич А.А. Моделирование магнитополевых характеристик одномерного фотонного кристалла (полупроводник-диэлектрик) в миллиметровом диапазоне длин волн. // 7-я конференция молодых ученых «Радиофизика и электроника»: конф., 12-14 декабря 2007: сборник аннотаций докладов. – Харьков, 2007 – С. 92.
 13. Гирич А.А. Моделирование магнитополевой зависимости резонансных полей в связанных дисковых резонаторах с полупроводником // 1-я

- Всеукраинская научная конференция молодых ученых «Физика низких температур КМВ-ФНТ-2008»: конф., 20-23 мая 2008: сборник аннотаций докладов. – Харьков, 2008. – С. 109.
14. Гирич А.А. Моделирование ответвителя с полупроводниковым элементом, управляемого при помощи постоянного магнитного поля // 8-я конференция молодых ученых «Радиофизика и электроника, биофизика»: конф., 25-27 октября 2008: сборник аннотаций докладов. – Харьков, 2008. – С. 113.
 15. Kostylyova O.V. Transmission spectrum peculiarities of the magneto-photonic crystal bounded with the semiconductor layer / Kostylyova O.V., Girich A.A., Khodzitsky M.K., Sramkova O.V., Bulgakov A.A., Tarapov S.I. // International conference "Days on diffraction'2009": int.conf., 26-29 May: conf. proc. – Saint Petersburg, Russia, 2009. – С. 122-123.
 16. Girich A.A. Influence of temperature on properties of surface oscillations in the structure magneto-photonic crystal/semiconductor // 2-я Всеукраинская научная конференция молодых ученых «Физика низких температур КМВ-ФНТ-2009»: конф., 1-5 июня 2009: сборник аннотаций докладов. – Харьков, 2009. – С. 69.
 17. Girich A.A. Experimental investigation of left-handed medium properties of semiconductor-ferrite composite in millimetre waveband / Girich A.A., Khodzitsky M.K., Tarapov S.I. // 3rd International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics: int. conf., 21-25 August: conf. proc. – London, UK, 2009. – P. 590-592.
 18. Girich A.A. Surface waves on the interface of magnetophotonic crystal and semiconductor / Khodzitsky M.K., Kostylyova O.V., Bulgakov A.A., Girich A.A., Tarapov S.I. // 3rd International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics: int. conf., 21-25 August: conf. proc. – London, UK, 2009. – P. 230-232.
 19. Girich A.A. Left-handed properties of composite ferrite/semiconductor medium oriented in staggered order / Girich A.A., Tarapov S.I. // NATO Advanced Research Workshop on Terahertz and Mid Infrared Radiation: Basic Research and Applications, "TERA - MIR 2009": int. conf., 3-6 November: conf. proc. – Turunç-Marmaris, Turkey, 2009. – P. 43-47.
 20. Girich A.A. Experimental analysis of metamaterials' spectra to design tunable THz-GHz passive devices / Girich A.A., Khodzitsky M.K., Nedukh S.V., Tarapov S.I. // NATO Advanced Research Workshop on Terahertz and Mid Infrared Radiation: Basic Research and Applications, "TERA - MIR 2009": int. conf., 3-6 November: conf. proc. – Turunç-Marmaris, Turkey, 2009. – P. 159-164.
 21. Girich A.A. Experimental verification of negative refraction in semiconductor-ferrite prism in millimeter waveband. // Girich A.A., Khodzitsky M.K., Tarapov S.I. // 4th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics: int. conf., 13-16 September: conf. proc. – Karlsruhe, Germany, 2010. – P. 159-161.

22. Girich A.A. Influence of dissipative processes on the propagation of electromagnetic waves in a magnetic fine-stratified structure / Girich A.A., Khodzitsky M.K., Shramkova O.V., Tarapov S.I. // 7th International Kharkov symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves (MSMW'10) and workshop on terahertz technology (TERATECH'10): int. conf., 22-25 June: conf. proc. – Kharkov, Ukraine, 2010. – P. 21-23.
23. Neduch S.V. Magnetoiresonance features of strontium-doped lanthanum manganites-perovskites in microwave band / Neduch S.V., Girich A.A., Kharchenko A.A., Khodzitsky M.K., Tarapov S.I., Pogorily A.N., Tovstolytkin A.I., Belous A.G // 7th International Kharkov symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves (MSMW'10) and workshop on terahertz technology (TERATECH'10): int. conf., 22-25 June: conf. proc. – Kharkov, Ukraine, 2010. – P. 24-26.
24. Girich A.A.. Microwave Properties of the Magnetic Periodic Multilayered Structures / Girich A.A., Khodzitsky M.K., Shramkova O.V., Tarapov S.I. // 40th European Microwave Conference 2010: int. conf., 26 September - 1 October: conf. proc. – Paris, France, 2010.
25. Kostilyova O.V. Transmission spectra in ferrite-dielectric periodic structure with defect layer / Kostilyova O.V., Bulgakov A.A., Girich A.A., Kharchenko A.A., Tarapov S.I. // 41st European Microwave Conference 2011: int. conf., 10-13 October: conf. proc. – Manchester, UK, 2011. – P. 850-853.
26. Girich A.A. Experimental study of the Faraday Effect in 1D-photonic crystal of millimeter waveband / Girich A.A., Polevoy S. Yu., Tarapov S.I., Merzlikin A.M. // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM): int. conf., 21-25 August: conf. proc. – Moscow, Russia, 2011. – P. 207.
27. Merzlikin A.M. Future of the optical Tamm State formed in degenerate band gaps / Merzlikin A.M., Vinogradov A.P., Girich A.A., Tarapov S.I., // Moscow International Symposium on Magnetism (MISM): int. conf., 21-25 August: conf. proc. – Moscow, Russia, 2011. – P. 882.
28. Girich A.A. Investigation of negative refraction in composite ferrite-semiconductor prism for millimeter waveband. / Girich A.A. Tarapov S.I. // 5th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics: int. conf., 10-15 October: conf. proc. – Barvelona, Spain, 2011. – P. 447-449.
29. Tarapov S. Composite magnetodispersive media and metamaterials at microwaves. / S. Tarapov, D. Belozorov, A. Girich, S. Polevoy // International conference on science (ICSIDS): int. conf., 2-5 September: conf. proc. – Cesme-Izmir, Turkey, 2012. – P. 62.

СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1*. Tretyakov S.A. Magnetolectric interactions in bi-anisotropic media / S.A. Tretyakov, A.H. Sihvola, A.A. Sochava, C.R. Simovski // J. Electromagn. Waves Appl. – 1998. – Vol. 12, №4. – P. 481–497.
- 2*. Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics / Yablonovitch E. // Phys. Rev. Lett. – 1987. – Vol. 58. – P. 2059
- 3*. Joannopoulos J.D. Photonic crystals: putting a new twist on light / Joannopoulos J.D., Villeneuve P.R., Fan S. // Nature. – 1997. – Vol. 386. – P. 143.
- 4*. Lyubchanskii I.L. Magnetic photonic crystals. Topical review / Lyubchanskii I.L., Dadoenkova N.N., Lyubchanskii M.I., Shapovalov E.A. and Rasing Th. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2003. – Vol. 36. – P. R277-R287.
- 5*. Басс Ф.Г., Булгаков А.А. Тетервов А.П. Высокочастотные свойства полупроводников со сверхрешетками. – М.: Наука, 1889. – 288 с.
- 6*. Булгаков А.А. Исследование коэффициента отражения от полупроводниковой сверхрешетки, помещенной в магнитное поле / Булгаков А.А., Шрамкова О.В. // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34, №6. – С. 712-718.
- 7*. Елисеева С.В. Спектр собственных электромагнитных волн периодической структуры ферромагнетик-полупроводник / Елисеева С.В., Семенцов Д.И. // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75, №7. – С. 106-111.
- 8*. Булгаков А.А. Сравнительная характеристика зонных спектров периодических структур, образованных слоями различных материалов во внешнем магнитном поле / Булгаков А.А., Ханкина С.И., Шрамкова О.В., Яковенко В.М. // Радиофизика и электроника. – 2008. – Т. 13, №2. – С. 190-199.
- 9*. Goto T. Optical Tamm States in One-Dimensional Magnetophotonic Structures / T. Goto, A.V. Dorofeenko, A.M. Merzlikin, A.V. Baryshev, A.P. Vinogradov, M. Inoue, A.A. Lisyansky, A.B. Granovsky // Phys. Rev. Lett. – 2008. – Vol. 101, pp. 113902.
- 10*. Inoue M. Magnetophotonic crystals / Inoue M., Fujikawa R., Baryshev A., Khanikaev A., Lim P.B., Uchida H., Aktsipetrov O., Fedyanin A., Murzina T and Granovsky A. // J. Phys D: Appl. Phys. – 2006. – Vol. 39. – P. 151-161.
- 11*. Inoue M. Magnetophotonic crystals / Inoue M., Granovsky A., Aktsipetrov O., Uchida H. and Nishimura K. // Magnetic Nanostructures: Springer Series in Material Science. – 2007. – Vol. 94. – P. 29–43.
- 12*. Vinogradov A.P. at al. Surface state peculiarities in one-dimensional photonic crystal interfaces. // Phys. Rev. B. – 2006. – Vol. 74. P. 045128.
- 13*. Belozorov D.P. Tamm states in magnetophotonic crystals and permittivity of the wire medium. / Belozorov D.P., Khodzitsky M.K. and Tarapov S.I. // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2009. – Vol. 42, pp. 055003.
- 14*. Виноградов А.П. Поверхностные состояния в фотонных кристаллах / Виноградов А.П., Дорофеев А.В., Мерзликин А.М., Лисянский А.А. // УФН. – 2010. – Т. 180, №3. – С. 249-263.

- 15*. Tarapov S.I. Microwaves in dispersive magnetic composite media / S.I. Tarapov and D.P. Belozorov // Low Temp. Phys. – 2012. – Vol 38. – P. 603.
- 16*. Yablonovitch E. Photonic band-gap structures / Yablonovitch E. // Journal of Optical Society of America. B. – 1993. – Vol. 10, pp. 283.
- 17*. Khodzitskiy M.K. Left-Handed Properties of Metal-Ferrite Composites Placed into Waveguide in Millimetric Wave Range / M.K. Khodzitskiy, A.A. Kharchenko, A.V. Strashevsky and S.I. Tarapov // Telecommunications and Radio Engineering. – 2009. – Vol. 68, №7. – P. 561-566.
- 18*. Masaya Notomi. Negative refraction in photonic crystals / Masaya Notomi // Optical and Quantum Electronics. – 2002. – Vol. 34, pp. 133–143.

Анотація

Гіріч О.О. Спектральні властивості метаматеріалів на основі магнітних та напівпровідникових структур в міліметровому діапазоні довжин хвиль. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за фахом 01.04.03 – радіофізика. Харківський національний університет радіоелектроніки МОНмолодьспорту України, Харків, 2013.

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача, яка полягає у вивченні впливу зовнішнього постійного магнітного поля на спектральні властивості одновимірних і двовимірних періодичних структур на основі магнетиків і напівпровідників в міліметровому діапазоні довжин хвиль.

Розроблено нову експериментальну методику для дослідження магнітозалежних спектральних властивостей одновимірних та двовимірних періодичних структур на основі магнетиків і напівпровідників у міліметровому діапазоні довжин хвиль та в широкому діапазоні температур.

Теоретично досліджено спектральні властивості одновимірних і двовимірних періодичних структур, що складаються з діелектричних, феритових і напівпровідникових шарів у міліметровому діапазоні довжин хвиль і в широкому діапазоні температур. Показано, що для ТМ-електромагнітних хвиль можна ефективно керувати шириною і частотним положенням дозволених зон фотонного кристалу напівпровідник-діелектрик у разі, коли зовнішнє постійне магнітне поле направлено перпендикулярно напрямку поширення хвилі. Вперше досліджено спектральні властивості двовимірної лівобічної структури, що складається з феритових і напівпровідникових стержнів, розташованих у шаховому порядку. Передбачено існування зворотних хвиль в двовимірній лівобічній структурі.

Вперше експериментально виявлено поверхневі електромагнітні стани (ПЕС) в МФК ферит-діелектрик, що межують з напівпровідниковим шаром. Вперше експериментально виявлено ПЕС в МФК ферит-діелектрик, що межують з напівпровідниковим шаром. Вперше показано, що досліджуючи характер залежності частоти ПЕС від магнітного поля можна ідентифікувати ТЕ- і ТМ-електромагнітні хвилі.

Вперше показана можливість роздільної реєстрації як піку пропускання лівобічного середовища, так і піку Вульф-Брегівського резонансу, експериментально досліджуючи спектральні властивості дрібношаруватої лівобічної структури ферит-напівпровідник.

Вперше експериментально виявлено лівобічний пік пропускання об'ємних електромагнітних хвиль в двовимірній лівобічній структурі, що складається з феритових і напівпровідникових стержнів, розташованих у шаховому порядку. Вперше в такій структурі зареєстровано негативну рефракцію електромагнітних хвиль на межі лівобічна структура-вакуум.

Ключові слова: магнітофотонний кристал, метаматеріал, поверхнєве коливання, лівобічне середовище, спектр пропускання

Аннотация

Гирич А.А. Спектральные свойства метаматериалов на основе магнитных и полупроводниковых структур в миллиметровом диапазоне длин волн. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиофизика. Харьковский национальный университет радиоэлектроники МОН молодежи спорта Украины, Харьков, 2013.

В диссертационной работе решена актуальная научная задача, которая заключается в изучении влияния внешнего постоянного магнитного поля на спектральные свойства одномерных и двумерных периодических структур на основе магнетиков и полупроводников в миллиметровом диапазоне длин волн. Основные результаты работ заключаются в следующем.

Разработана новая экспериментальная методика для исследования магнитоинвариантных спектральных свойств одномерных и двумерных периодических структур на основе магнетиков и полупроводников в миллиметровом диапазоне длин волн и в широком диапазоне температур.

Теоретически исследованы спектральные свойства одномерных и двумерных периодических структур, состоящих из диэлектрических, ферритовых и полупроводниковых слоев в миллиметровом диапазоне длин волн и в широком диапазоне температур. Показано, что для ТМ-электромагнитных волн можно эффективно управлять шириной и частотным положением разрешенных зон фотонного кристалла полупроводник/диэлектрик в случае, когда внешнее постоянное магнитное поле направлено перпендикулярно направлению распространения волны. Впервые исследованы спектральные свойства двумерной левосторонней структуры, состоящей из ферритовых и полупроводниковых стержней, расположенных в шахматном порядке. Предсказано существование обратных волн в двумерной левосторонней структуре.

Впервые экспериментально обнаружены поверхностные электромагнитные состояния в магнитофотонных кристаллах феррит/диэлектрик граничащих с полупроводниковым слоем. Показано, что

частотой поверхностных электромагнитных состояний можно в широких пределах управлять внешним постоянным магнитным полем. Изучена температурная зависимость частоты поверхностного электромагнитного состояния на границе магнитофотонный кристалл-полупроводник и показано, что уменьшение добротности пика коэффициента пропускания, связанного с возбуждением поверхностных электромагнитных состояний при понижении температуры до азотной (77 К), обусловлено уменьшением концентрации свободных электронов в полупроводнике. Впервые показано, исследуя характер зависимости частоты поверхностного электромагнитного состояния от магнитного поля можно идентифицировать ТЕ- и ТМ-электромагнитные волны.

Впервые показана возможность отдельной регистрации, как пика пропускания левосторонней среды, так и пика Вульф-Брэгговского резонанса, экспериментально исследуя спектральные свойства мелкослоистой левосторонней структуры феррит-полупроводник. Впервые исследован переход от мелкослоистой структуры к фотонно-кристаллической структуре и определен диапазон частот, для которого исследуемая магнитоактивная периодическая структура может быть рассмотрена как бигиротропный левосторонний материал. Впервые зарегистрирована отрицательная рефракция электромагнитных волн на границе левосторонняя структура-вакуум при помощи феррит-полупроводниковой призмы, находящейся в Т-образном волноводе в миллиметровом диапазоне длин волн в присутствии магнитного поля.

Впервые экспериментально обнаружен левосторонний пик пропускания объемных электромагнитных волн в двумерной левосторонней структуре, состоящей из ферритовых и полупроводниковых стержней, расположенных в шахматном порядке. Впервые в такой структуре зарегистрирована отрицательная рефракция электромагнитных волн на границе левосторонняя структура-вакуум.

Ключевые слова: магнитофотонный кристалл, метаматериал, поверхностное колебание, левосторонняя среда, спектр пропускания.

Abstract

Girich A.A. Spectral properties of metamaterials based on magnetic and semiconductor structures in the millimeter waveband. – Manuscript.

Thesis for a candidate degree in physics and mathematics by speciality 01.04.03 – radiophysics. Kharkiv National University of Radioelectronics of Ministry of Education and Science, Kharkiv, 2013.

A new experimental technique for the study of magnetic field dependent spectral properties of one-dimensional and two-dimensional periodic structures based on magnetics and semiconductors in the millimeter waveband and wide temperature range has been developed.

The spectral properties of one-dimensional and two-dimensional periodic structures consisting of dielectric, ferrite and semiconductor layers has been studied theoretically in the millimeter waveband and wide temperature range. It is shown that

for the TM electromagnetic waves an effective control by the width and position of the allowed bands of the photonic crystal semiconductor/dielectric can be realized when an external magnetic field is perpendicular to the direction of wave propagation. For the first time, the spectral properties of two-dimensional left-handed structure consisting of ferrite and semiconductor rods arranged in a chess order has been studied, and the existence of a backward waves in the two-dimensional left-handed structure has been studied.

For the first time, surface electromagnetic states in magnetophotonic crystals ferrite/dielectric bounded to the semiconductor layer was experimentally detected.

For the first time, the possibility of separate registration of a left-handed transmittance peak and the Wolf-Bragg resonance peak, during the experimental study of spectral properties of fine-layered left-handed structure ferrite-semiconductor is shown.

For the first time the transmission peak of volume electromagnetic waves and negative refraction of electromagnetic waves at boundary left-handed structure-vacuum is observed during experimental study of the spectral properties of two-dimensional left-handed structure consisting of ferrite and semiconductor elements arranged in a chess order.

Key words: magnetophotonic crystal, metamaterial, surface electromagnetic state, left-handed medium, transmission spectrum.

Підп. до друку 01.04.13. Формат 60×84¹/₁₆. Спосіб друку – ризографія.

Умов. друк. арк. 1,2. Тираж 100 прим. Ціна договірна. Зам. № 2-38

Україна, 61166 Харків, просп. Леніна, 14

Віддруковано в учбово-виробничому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ
Україна, 61166 Харків, просп. Леніна, 14