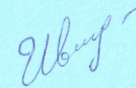


Національна академія наук України
Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова

ІВЖЕНКО ЛЮБОВ ІГОРІВНА



УДК 537.876.4

**СПЕКТРАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ АНІЗОТРОПНИХ ДРОТЯНИХ
МЕТАМАТЕРІАЛІВ МІКРОХВИЛЬОВОГО ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ**

01.04.03 – радіофізика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2017

Дисертація на правах рукопису

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

Науковий керівник: 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
Просвірін Сергій Леонідович,
Радіоастрономічний інститут НАН України (м. Харків), завідувач відділу теоретичної радіофізики

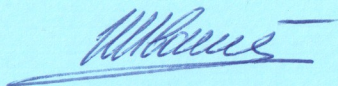
кандидат фізико-математичних наук
Федорін Ілля Валерійович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків), доцент кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики

Захист відбудеться "30" листопада 2017 р. о 14.00 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 "27" жовтня 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



І. В. Іванченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

На сьогодні має місце багато публікацій, в яких наведено визначення такого різновиду штучних середовищ, як електромагнітні метаматеріали [1]. Терміном, який найбільш точно характеризує електромагнітні властивості структур такого роду, вочевидь, є термін, запропонований "Віртуальним інститутом штучних електромагнітних матеріалів і метаматеріалів (METAMORPHOSE VI AISBL) [2], а саме:

«Метаматеріали – це штучно створені структури, електромагнітні властивості яких визначаються не стільки властивостями компонентів, з яких вони сформовані, скільки їх просторовим розташуванням».

Електромагнітні метаматеріали, в залежності від ефективних значень їх діелектричної та магнітної проникностей, прийнято поділяти на штучні діелектрики, штучні магнетики та магніто-діелектричні матеріали.

Серед усього різноманіття аспектів дослідження метаматеріалів особлива увага приділяється розробці принципів їх побудови. Зокрема, інтерес викликають метаматеріали, які демонструють властивості штучних діелектриків з просторовою анізотропією. Такі властивості виявляються корисними, наприклад, під час досліджень різного виду анізотропії в природних матеріалах; при розробці різних пристроїв, що трансформують (каналізують) електромагнітну енергію; при розробці різноманітних маскуючих покриттів та розробці засобів ближньопольової мікроскопії. Одним з найбільш перспективних видів метаматеріалів для використання у вищезазначених областях є штучні діелектрики, які сформовано електропровідними елементами. Зазначимо, що додавання до структури штучних діелектриків магнітних включень суттєво розширює діапазон перебудови їх електромагнітних властивостей [3].

Вивчення штучних діелектриків, які, як правило, представляли собою масиви металевих дротів, сфер або пластин, почалося ще більше половини сторіччя назад [4]. Дротяні метаматеріали виявилися особливо цікавими як об'єкти формування просторової анізотропії. Такі метаматеріали демонструють різні механізми взаємодії із електромагнітними хвилями в залежності від напрямку їх поширення [5]. Зокрема, ще у 50-ті роки ХХ століття було встановлено, що такий вид штучного діелектрика, як періодичний масив тонких ідеально провідних металевих дротів, має електромагнітні властивості, які притаманні штучній плазмі з ефективним показником заломлення [6]. Починаючи з 90-х років ХХ ст. інтерес до структур такого роду (які отримали в літературі [7] назву «дротяне середовище») різко зріс завдяки виявленню ряду фундаментальних властивостей, таких як можливість передачі зображень із надроздільною здатністю на значні відстані, де деталі цього зображення розташовані на відстані багато меншій довжини хвилі, у мікрохвильовому, терагерцевому та оптичному діапазонах [8], явище негативної рефракції і безліч інших. Наявність цих властивостей робить перспективним застосування метаматеріалів в елементній базі широкого класу електронних пристроїв від надвисокочастотного (НВЧ) до оптичного діапазону включно. Відмінною

особливістю дротяних середовищ є також наявність таких специфічних електромагнітних властивостей, які дозволяють їх розглядати як металеві фотонні кристали. Фотонні кристали (ФК), основу яких складає дротяне середовище, не втрачають своєї актуальності ось вже три десятиліття у зв'язку з можливістю побудови на їх основі різного роду фільтрів, тобто частотно-селективних пристроїв. Вищевказані особливості електромагнітних властивостей фотонних кристалів є лише окремим прикладом зі всієї великої кількості незвичайних електромагнітних властивостей дротяних метаматеріалів, наведених в літературі. Ці особливості зумовлюють той факт, що взаємодія електромагнітної хвилі, яка поширюється у середовищі, з включеннями /дротами/, виражається у резонансному збудженні струмів в цих включеннях. У найбільш поширенішому випадку, коли дротяне середовище являє собою періодичний масив із притаманною йому трансляційною симетрією, для опису механізмів взаємодії електромагнітного випромінювання із включеннями/дротами користуються визначенням, запозиченим із фізики твердого тіла, «елементарна комірка».

Резонансна природа субхвильових (багато менших довжини хвилі) включень, які формують дротяні метаматеріали, та геометрія їх елементарної комірки призводять до того, що вищезазначені фундаментальні властивості проявляються лише у вузькому спектральному діапазоні частот. Обмеження робочого діапазону частот в дротяних метаматеріалах можна знизити завдяки використанню елементів з перебудовою геометрії та форми в структурі метаматеріалу. Це зумовлює активний пошук перспективних підходів (способів), які б надали можливість ефективно керувати спектральними та дисперсійними властивостями анізотропних дротяних метаматеріалів. Все вищезазначене обумовлює *актуальність теми* роботи, яка полягає у розробці ефективного підходу до керування спектральними властивостями анізотропних дротяних метаматеріалів, який дозволить розширити робочий діапазон частот.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана у відділі радіоспектроскопії ІРЕ ім. О. Я. Усикова НАН України в рамках досліджень, проведених під час виконання держбюджетних НДР: «Дослідження лінійних та нелінійних властивостей твердотільних структур із застосуванням електромагнітних хвиль НВЧ діапазону і заряджених часток» (шифр «Кентавр-5», номер держреєстрації 0112U000211, виконавець), «Георетичні та експериментальні дослідження властивостей періодичних і стохастичних модульованих наноструктур в оптичному, інфрачервоному та надвисокочастотному діапазонах спектру» (шифр «Георгин», номер держреєстрації 0110U005642, виконавець), «Мікрохвильова спектроскопія перспективних композитних штучних середовищ», яка виконувалась в рамках гранту молодим науковцям НАН України (шифр «ПОН», номер держреєстрації 0113U006021, виконавець), «НВЧ - спектроскопія суспензії магнітних нанопорошків з органічними рідинами», яка виконувалась в рамках гранту молодим науковцям НАН України (шифр «РУТА», номер держреєстрації 0115U005233, виконавець).

Крім того, частину досліджень було виконано в рамках гранту РФФД 13-02-90924 (2013) для молодих науковців «Експериментальне дослідження мікрохвильових властивостей дротяної лінзи, виконаної з мідних провідників у міліметровому діапазоні довжин хвиль», виконавець.

Мета і задачі дослідження

Мета роботи – виявлення особливостей впливу просторового розташування дротів, тобто форми елементарної комірки, на спектральні властивості анізотропних дротяних метаматеріалів.

Для досягнення поставленої мети треба було вирішити наступні задачі:

1. Розробити експериментальну методику для міліметрового діапазону довжин хвиль, яка дозволить виконувати вимірювання (реєстрацію) просторового розподілу поля еванесцентних мод, тобто затухаючих хвиль, амплітуда яких експоненційно спадає з відстанню, що випромінюються з анізотропних штучних середовищ (метаматеріалів).

2. Експериментально продемонструвати можливість передачі зображення із надроздільною здатністю, яка перевищує дифракційний ліміт, використовуючи дротяний метаматеріал, у діапазоні 2 – 24 ГГц.

3. Розробити принципи керування спектральними характеристиками анізотропних дротяних метаматеріалів за допомогою зміни форми і розмірів його елементарної комірки механічним шляхом, що дозволить збільшити частотний діапазон перебудови у мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль.

5. Експериментально продемонструвати переваги розроблених принципів керування електромагнітними властивостями анізотропних дротяних метаматеріалів в досягненні мети розширення діапазону перебудови частот механічним шляхом у порівнянні з електронною перебудовою.

Об'єктом дослідження є процеси поширення електромагнітних хвиль у дротяних середовищах із різноманітною просторовою конфігурацією металевих елементів, тобто з різноманітною формою елементарної комірки, яка їх формує.

Предметом дослідження є спектральні та дисперсійні властивості анізотропних дротяних метаматеріалів у міліметровому діапазоні (2 – 24 ГГц) довжин хвиль.

Методи дослідження

Експериментальні результати з дослідження просторового розподілу електромагнітного поля на різноманітних відстанях від анізотропних метаматеріалів отримані з використанням спеціально розробленої методики, основу якої складає метод пробного тіла. Реєстрація зображень із надроздільною здатністю в анізотропному дротяному метаматеріалі мікрохвильового діапазону реалізована за допомогою вдосконалення та модернізації вищезазначеної експериментальної методики, де замість пробного тіла («пасивний зонд») використано дипольну антену («активний зонд»).

Експериментальні результати з дослідження спектральних електромагнітних властивостей анізотропних дротяних метаматеріалів у міліметровому діапазоні довжин хвиль отримані за допомогою методів НВЧ спектроскопії.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Для реєстрації в мікрохвильовому діапазоні просторового розподілу поля еванесцентних мод в анізотропних метаматеріалах розроблена експериментальна методика, що забезпечує амплітудно - фазові дослідження у режимі реального часу завдяки сконструйованим активним зондам, скануючим пристроям та спеціально створеним комп'ютерним програмам інтегрованим з векторним аналізатором кіл.

2. Експериментально продемонстрована можливість досягнення в мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль роздільної здатності близько $\lambda/15$ для двох окремих точкових джерел у дротяному метаматеріалі.

3. Запропоновано експериментальний підхід до керування зонними характеристиками спектру проходження анізотропного дротяного метаматеріалу за допомогою зміни параметрів його елементарної комірки механічним шляхом.

4. Продемонстровано сценарій перетворення електромагнітних властивостей плазмподібного середовища у властивості, що відповідають фотонному кристалу міліметрового діапазону довжин хвиль у дротяному метаматеріалі з механічною перебудовою.

5. Вперше експериментально встановлено, що в метаповерхні з механічною перебудовою елементарної комірки косокутової форми ефект резонансного відбиття проявляється у вигляді одиночного мінімуму в спектрі проходження, частота якого в діапазоні 22-40ГГц однозначно обумовлена кутом схрещування елементарної комірки.

Практичне значення одержаних результатів

За результатами дисертаційної роботи отримані нові знання про вплив просторової конфігурації дротів, тобто вплив форми елементарної комірки, на спектральні властивості анізотропних метаматеріалів. Результати дисертаційної роботи забезпечують передумову до розробки у майбутньому різного класу електромагнітних матеріалів, спектральними властивостями яких можна керувати. Результати роботи можуть бути використані при розробці технологій та проектуванні елементів пристроїв міліметрового діапазону з розширеним діапазоном перебудови, основу яких складають дротяні метаматеріали, наприклад: пристроїв передачі зображень із надроздільною здатністю, широкосмужових НВЧ-поглиначів та поляризаторів, засобів ближньопольової мікроскопії і маскуючих покриттів. Результати дисертаційної роботи можуть бути використані під час навчального процесу для студентів і аспірантів.

Особистий внесок здобувача

Безпосередній внесок автора полягає у розробці експериментальних макетів механічно керованих дротяних метаматеріалів різної конфігурації та у налаштуванні електродинамічної частини вимірювальної установки. Автор виконувала обробку та аналіз усіх представлених експериментальних даних. А саме, в роботах [1*, 6,* 7*] автором особисто розроблена експериментальна методика реєстрації просторового розподілу поля еванесцентних (згасаючих) мод, що випромінюються з анізотропних дротяних метаматеріалів. У мікрохвильовому діапазоні за допомогою методики було продемонстровано зображення із

надроздільною здатністю двох окремих точкових джерел, що перевищує дифракційний ліміт, отримане у ближньому полі за допомогою анізотропного дротяного метаматеріалу [2*]. На підставі цього автор розробила нові принципи керування характеристиками спектру анізотропних дротяних метаматеріалів, де завдяки додаванню до структури метаматеріалу магнітних елементів [3*, 12*] та зміни розміру і форми елементарної комірки механічним шляхом [4*, 5*] досягнуто розширення робочого діапазону частот.

Експериментальні результати, що представлені в роботах [11*, 13*], отримані особисто автором, а у вищезгаданих та в роботах [1*-10*, 12*, 14*] у співавторстві.

Апробація результатів дисертації

Результати роботи доповідалися та обговорювалися на науково-кваліфікаційних семінарах, а також вітчизняних та міжнародних наукових конференціях, симпозіумах: XI International Symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves (MSMW-2016), Kharkiv, Ukraine, 20-24 June 2016; VIII міжнародній науковій конференції «Функциональная база наноэлектроники», Харків, Україна, 28 вересня-2 жовтня 2015; Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF 2015), Dnipro, Ukraine, September 29 – October 2, 2015; International Young Scientists Forum on Applied Physics (YSF 2016), Kharkiv, Ukraine, 10-14 October, 2016; International Symposium on Electrodynamics and Mechatronic Systems (SELM 2013), 15-18 May, Katowice, Poland, 2013; VIII International Symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves (MSMW-2013), Kharkiv, Ukraine, 23-28 June 2013; 3rd International Conference of Young Scientists “Low Temperature Physics” (ICYS-LTP-2012), Kharkiv, Ukraine, 14-18 May, 2012; 3d International Workshop on THz Radiation: Basic Research & Applications (TERA 2011), Kharkiv, Ukraine, 2011; Young Scientists Conference on radiophysics, electronics, photonics and biophysics (YSC 2011), Kharkov, Ukraine, 29 November – 1 December, 2011.

Публікації. Основні результати, які увійшли до дисертації, відображені у 14* друкованих працях, з них 5 статей [1*-5*] у спеціалізованих наукових журналах і 9 тез (2 без співавторів [11*, 13*]) у збірниках доповідей на конференціях [6*-14*].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з переліку умовних позначень, вступу, 4 розділів, висновків і списку використаних джерел. Її повний обсяг становить 143 сторінки. Дисертація містить 44 рисунка. Список використаних джерел представлений на 16 сторінках і нараховує 159 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета й задачі досліджень, наведені наукова новизна, практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробація результатів роботи та список публікацій.

В розділі 1 наведено огляд літератури по метаматеріалам та дротяним середовищам, їхній аналіз із погляду електродинаміки. Розглянуто специфічні фундаментальні властивості, які мають місце у дротяних середовищах, в залежності від кута та напрямку поширення електромагнітних хвиль в таких середовищах. Показано, що наявність у дротяних середовищах специфічних електромагнітних властивостей роблять їх перспективними та зручними як об'єкти формування просторової анізотропії.

В розділі 2 з метою дослідження у міліметровому діапазоні довжин хвиль просторового розподілу поля еванесцентних мод, тобто хвиль, амплітуда яких експоненційно спадає із відстанню, у метаматеріалах розроблено експериментальну методику [1*, 6*]. Ця методика відлагоджена та втілена в експериментальній установці, основу якої складає загальновідомий метод пробного тіла (метод малого збурювання). За допомогою цієї установки виконано експериментальне дослідження просторового розподілу електромагнітного поля поблизу анізотропного дротяного метаматеріалу (АДМ), представленого у вигляді дротяної лінзи (рис. 1).

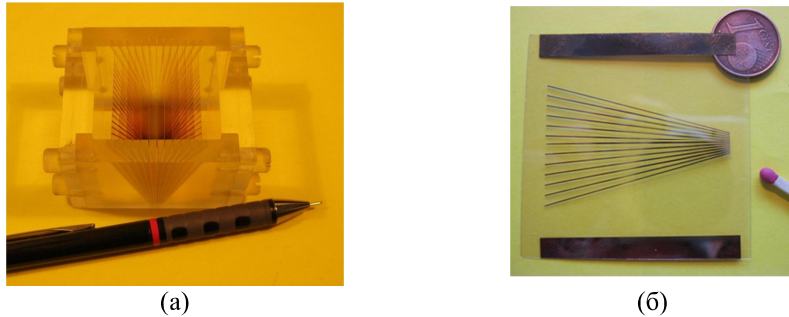


Рис. 1. Зовнішній вигляд дротяної лінзи (а), що складається з 13 пластин слюди з нанесеними на них 13 мідними дротами (б)

З метою реєстрації у мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль зображень із надроздільною здатністю в анізотропних дротяних метаматеріалах вищезгадана експериментальна методика, що втілена в установці (рис. 2, а) модернізована та вдосконалена. Ця методика втілена у експериментальній установці (рис. 2, б), де як збурюючий елемент, який вноситься у ближнє поле дротяної лінзи замість «пасивного зонду» (як у «традиційному» випадку), використовується дипольна антена (у подальшому – електричний диполь або «активний зонд»).

Таке вдосконалення експериментальної методики, як вимірювання не тільки амплітудних, а й фазових характеристик за допомогою «активного зонду», який поєднано із векторним аналізатором кіл (ВАК), надало можливість візуалізації та аналізу даних вимірювання у режимі реального часу. Крім того, підбір оптимального за розміром, матеріалом та формою зонду, а також орієнтації його у просторі забезпечили оптимальні умови (необхідну чутливість) для реєстрації розрізнення двох окремих об'єктів, розташованих на відстані меншій за $\lambda/2$.

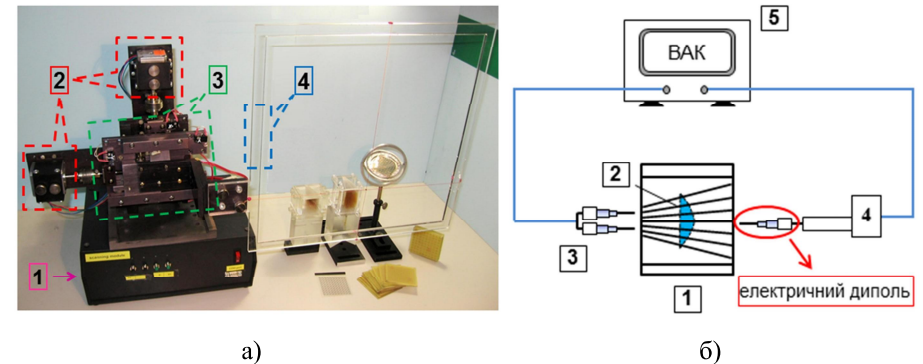


Рис. 2. Зовнішній вигляд експериментальної установки з реєстрації просторового розподілу поля еванесцентних (згасаючих) мод поблизу АДМ, де використовується «пасивний зонд»: 1 - модуль цифрового керування; 2 - крокові двигуни; 3 – 2D пристрої переміщення; 4 - фіксатор зонду (рамка) (а); схема експериментальної установки з реєстрації зображень із надроздільною здатністю у ближньому полі АДМ, де використовується «активний зонд»: 1 - дротяна лінза, 2 - фазовий компенсатор, 3 - коаксіальні кабелі з відкритим кінцем (джерело/приймач), 4 - сканер, 5 - векторний аналізатор кіл (ВАК) (б)

В розділі 3 за допомогою відлагодженої експериментальної методики, де використовується «пасивний зонд» [1*, 6*], продемонстрована можливість дротяною лінзою здійснювати концентрацію електромагнітної енергії поля у малому об'ємі простору в міліметровому діапазоні довжин хвиль [7*]. На підставі отриманих двовимірних картин просторового розподілу поля можна спостерігати, що розмір (діаметр) плями поля не зазнає значних змін зі збільшенням відстані від вузької апертури дротяної лінзи на відстанях до 2-3 довжин хвиль (рис. 3, а).

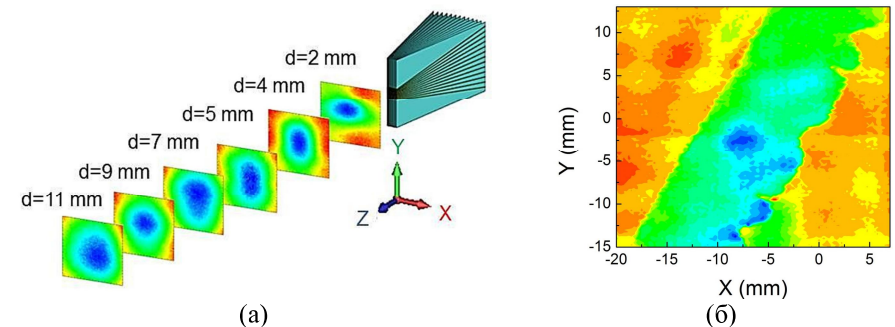


Рис. 3. Зовнішній вигляд дротяної лінзи та зміна конфігурації просторового розподілу електромагнітної енергії поля з ростом відстані (d) від вузької апертури дротяної лінзи (а); зображення об'єкту, розташованого у ближньому полі широкої апертури дротяної лінзи (б)

Вибір оптимального за розміром зонду, що найчастіше представляє собою сталеву кульку діаметром 1,56 мм, та робочої частоти ($f_p = 31,2$ ГГц), на якій дротяна лінза функціонує у так званому режимі каналування [8], забезпечили достатні умови для реєстрації зображення об'єкту, розташованого у ближньому полі з боку широкої апертури дротяної лінзи (рис. 3, б).

За допомогою вдосконаленої та модернізованої експериментальної методики, де використовується «активний зонд», продемонстрована можливість передачі дротяною лінзою зображення із надроздільною здатністю, яка перевищує дифракційний ліміт у мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль [2*], а саме: розрізнення двох окремих точкових джерел, які розташовані на відстані $\lambda/15$ один від одного та випромінюють із різною фазою відносно один одного (рис. 4). Найбільш якісне розрізнення двох точкових джерел спостерігається на частоті 4,8 ГГц, яка задовольняє умовам резонансу Фабрі–Перо в дротяній лінзі, тобто товщина дротяної лінзи дорівнює цілому числу половин довжин хвиль і у лінзі має місце вищезгаданий режим каналування. З рисунку 4, а видно, що на широкій апертурі дротяної лінзи чітко розрізнені два гострих максимуми розподілу інтенсивності поля M_1 та M_2 . Для підтвердження, що точкові джерела збуджуються не у фазі відносно один одного, наведено на експериментально отриманому графіку залежності фази від частоти (рисунком 4, б). З рисунку 4, б видно, що різні (протилежні за значенням) величини фази двох точкових джерел мають відмінний колір (червоний та синій).

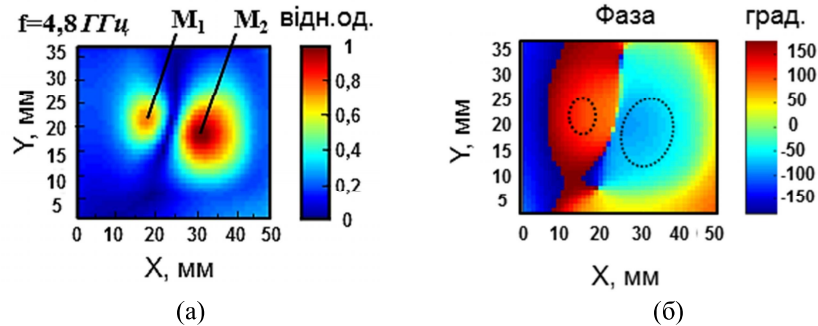


Рис. 4. Експериментальна демонстрація можливості передачі зображення із надроздільною здатністю (близько $\lambda/15$) двох окремих точкових джерел у дротяній лінзі у мікрохвильовому діапазоні: (а) просторовий розподіл інтенсивності поля двох окремих точкових джерел; (б) просторовий розподіл фази

З метою дослідження впливу просторової конфігурації дротяних елементів на спектральні властивості АДМ отримано експериментальну залежність спектру проходження від частоти [8*-10*]. Результати вимірювань отримані для випадку АДМ, що представлений у вигляді обмеженого двовимірного масиву дротів (рис. 5, а). Елементарна комірка такого АДМ має вигляд прямокутника, де період $a \neq b$ (рис. 5, б).

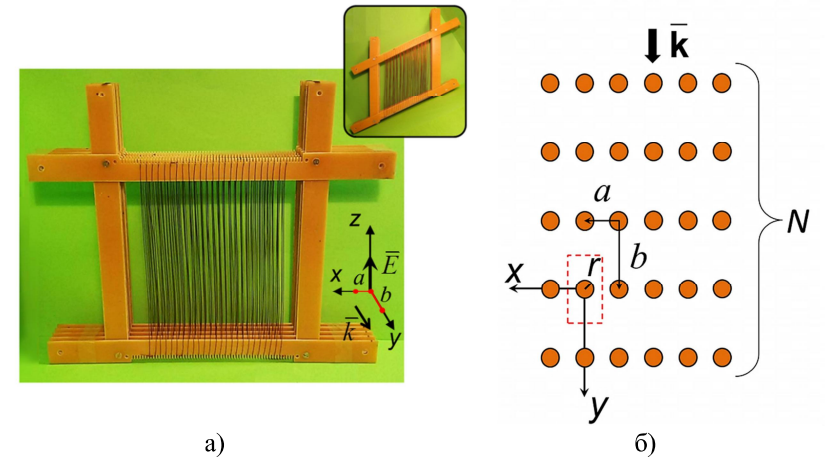


Рисунок 5 – (а) зовнішній вигляд анізотропного дротяного метаматеріалу з механічною перебудовою елементарної комірки, де r - радіус, $a \neq b$; (б) схематичне зображення АДМ з прямокутною елементарною коміркою

У цьому випадку та й надалі розглядатиметься випадок ТЕ - поляризації, вектор електричної напруженості \vec{E} має напрямок уздовж дротів.

Експериментально продемонстровано, що така структура еквівалентна плазмподібному середовищу [3*, 4*]: за результатами аналізу на спектрі проходження можна виділити так звану плазмову частоту метаматеріалу f_{pm} , яка розділяє області частот, де метаматеріал має ефективну діелектричну проникність різного знаку (рис. 6, а). А саме: для електромагнітних хвиль з частотою нижчою за f_{pm} в АДМ відсутнє проходження НВЧ випромінювання, оскільки ефективна діелектрична проникність ϵ_{eff} набуває тут негативного значення. Падаюча електромагнітна хвиля, частота якої нижча за f_{pm} , відбивається від АДМ і її амплітуда експоненційно згасає при проникненні у АДМ. Для електромагнітних хвиль з частотою, що перевищує f_{pm} , має місце високий рівень проходження тому, що ϵ_{eff} такого метаматеріалу становить позитивну величину. Як показано на рисунку 6, а дротяний метаматеріал, що складається з N рядів є еквівалентним однорідному плазмподібному середовищу; при цьому має місце співвідношення $a, b, r \ll \lambda$, за умови $N > 3$. Саме за цих умов спостерігається однаковий для усіх $N > 3$ характер спектральних кривих. А саме: в області $f_{pm} = 15$ ГГц добре видна різка зміна коефіцієнта заломлення, що відповідає зміні знаку ϵ_{eff} .

У ході експериментальних вимірювань, числового моделювання за допомогою методу кінцевих різниць у часовій області (FDTD) та числового розрахунку з використанням формули для знаходження плазмової частоти для випадку дротяного середовища із прямокутною елементарною коміркою [4*], тобто $a \neq b$, встановлено, що в спектрі проходження АДМ з прямокутною

елементарною коміркою зі зменшенням відстані між дротами має місце зміщення плазмової частоти в область більш високих частот (рис. 6, б).

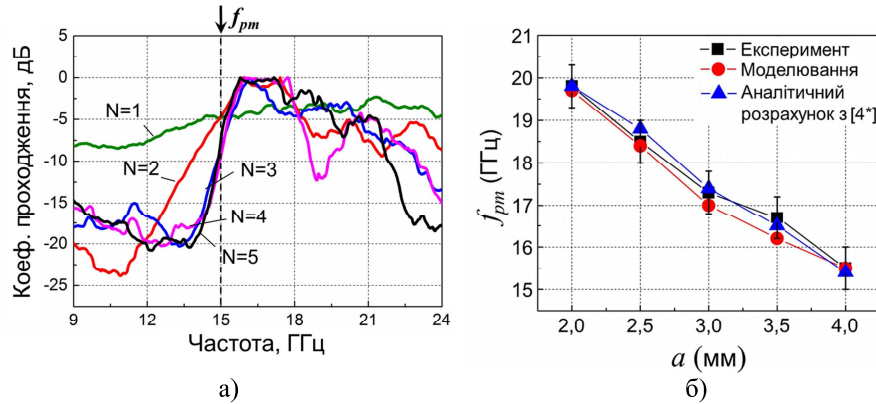


Рис. 6. Експериментальна залежність спектру проходження від частоти для випадку різної кількості рядів дротів N у АДМ з прямокутною елементарною коміркою (а); залежність плазмової частоти метаматеріалу f_{pm} від параметру елементарної комірки a при фіксованому $b=6,5$ мм для АДМ (б)

Це явище зумовлене збільшенням щільності металевого заповнення у метаматеріалі, тобто збільшенням модуля ефективної діелектричної проникності метаматеріалу.

В розділі 4 з метою досліджень впливу просторової конфігурації елементів АДМ на її спектральні властивості запропоновано експериментально-числовий підхід до керування спектральними характеристиками дротяних метаматеріалів за допомогою зміни розміру їх елементарної комірки механічним шляхом у мікрохвильовому діапазоні [4*, 11*]. АДМ з механічною перебудовою елементарної комірки реалізований у лабораторному макеті, який виконано за принципом роботи пристрою «пантограф», тобто при механічному впливі на макет змінюється відстань a між сусідніми дротами вздовж вісі x (див. рис. 5, а).

На рисунку 7, а експериментально (червоні зірочки) та за допомогою числового моделювання (чорна лінія) в АДМ продемонстровано сценарій перетворення електромагнітних властивостей однорідного плазмодобного середовища (які притаманні дротяному середовищу у низькочастотній області мікрохвильового діапазону за умови $\lambda/b > 3$) у властивості ФК (які набуває дротяний метаматеріал в області більш високих частот, коли довжина хвилі стає сумірною з одним із параметрів елементарної комірки). Внаслідок цього в спектрі проходження спостерігаємо першу та другу заборонені зони, позначені як ЗЗ-1 та ЗЗ-2.

На підставі розробленого підходу, що полягає у зміні розміру елементарної комірки АДМ механічним шляхом, продемонстровано, також, керування дисперсійними та зонними характеристиками спектру проходження анізотропних

дротяних метаматеріалів. Зазначимо (рис. 7, б), що зі зменшенням відстані між дротами a спостерігається розширення та поглиблення вищезгаданих ЗЗ-1 та ЗЗ-2. Крім того, в спектрі проходження АДМ із досягненням високочастотної області (65-80 ГГц) спостерігається утворення додаткових заборонених зон (рис. 7, б, ліва частина). Слід підкреслити, що характер поведінки забороненої зони нульового порядку (ЗЗ-0), яка розташована у області спектру $f < f_{pm}$, є відмінним, оскільки вона підпорядковується іншим фізичним принципам.

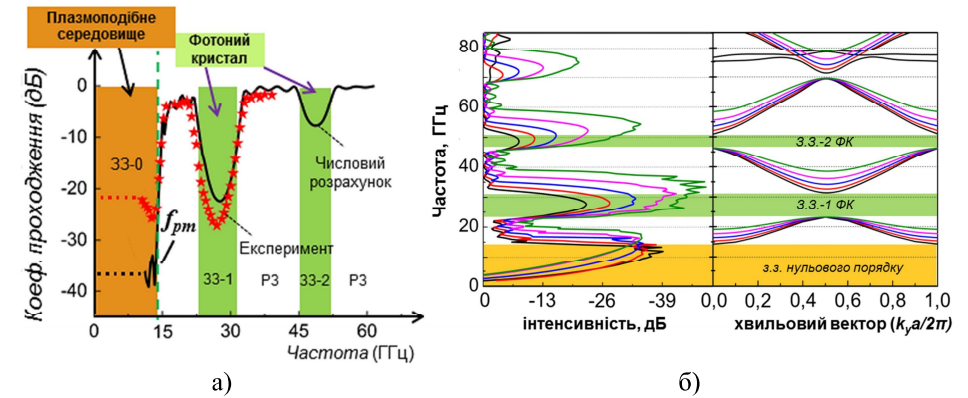


Рис. 7. Експериментальна та числова залежність спектру проходження від частоти у АДМ з прямокутною елементарною коміркою (а); еволюція спектральних залежностей коефіцієнтів проходження (ліва частина) та дисперсійних кривих (права частина) АДМ з механічною перебудовою параметру a елементарної комірки: чорна лінія дорівнює $a = 4$ мм, червона лінія ($a = 3,5$ мм), синя лінія ($a = 3$ мм), рожева лінія ($a = 2,5$ мм), зелена лінія ($a = 2$ мм) (б)

Слід зазначити, що зростання глибини та ширини заборонених зон ЗЗ-1 та ЗЗ-2 із зменшенням a викликано збільшенням щільності дротяного метаматеріалу (рис. 7, б, ліва частина). З рисунку 7, б (права частина) видно, що дисперсійні криві, із ростом періоду a , стають усе більш пологішими. А у критичному випадку, коли $a \rightarrow 0$, дисперсійні криві перетворюються у прямі горизонтальні лінії. Вочевидь, що у цьому випадку АДМ у електродинамічному наближенні – «реальний метал», і властивий йому «зоний характер» спектра зникає.

Для дослідження впливу на спектральні характеристики планарних метаматеріалів зміни форми елементарної комірки механічним шляхом було розроблено метаповерхню з керованим кутом схрещення дротяних елементів, що її формують [5*, 14*]. Метаповерхня утворена накладенням одна на одну ряду металевих смужок, які розміщено на діелектричному субстраті (рис. 8, а). Завдяки схрещенню металевих смужок під деяким кутом β елементарна комірка такої метаповерхні набуває косокутової форми.

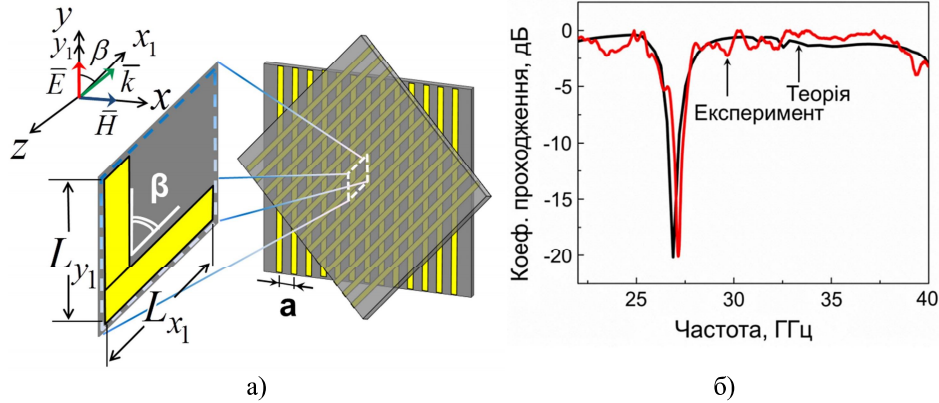


Рис. 8. Зовнішній вигляд анізотропного планарного метаматеріалу (метаповерхні) з механічною перебудовою формуючих його елементів (а); експериментальна (червона лінія) та теоретична (чорна лінія) залежність коефіцієнтів проходження від частоти для метаповерхні з механічною перебудовою елементів для $\beta = 45^\circ$ (б)

Експериментально підтверджено передбачене раніше теоретично [9], що в метаповерхні з механічною перебудовою елементарної комірки косокутової форми явище резонансного відбиття проявляється у вигляді одиночного мінімуму у частотному спектрі проходження цієї метаповерхні (рис. 8, б). Спільний аналіз експериментальних та теоретичних результатів досліджень продемонстрував, що природа резонансного мінімуму проходження зумовлена косокутовою формою елементарної комірки: уздовж однієї зі складових частин елементарної комірки, яка знаходиться під кутом нахилу відносно \vec{E} -вектора, утворюється резонансне коливання. Отже, зі зменшенням кута схрещування β , який сформовано із резонансних складових частин L_{x_1} та L_{y_1} , збільшується резонансна довжина складовою частини елементарної комірки L_{x_1} , в рамках якої утворюється резонансне коливання (рис. 9, а). Внаслідок цього спостерігається збільшення амплітуди резонансного мінімуму проходження та його зміщення у низькочастотну область частот на величину 1 ГГц/град зі зміною кута схрещування елементів метаповерхні.

Таким чином, експериментально та теоретично продемонстрована можливість ефективного керування частотою резонансного мінімуму проходження за допомогою змінення кута схрещення елементів метаповерхні механічним шляхом (рис. 9, б).

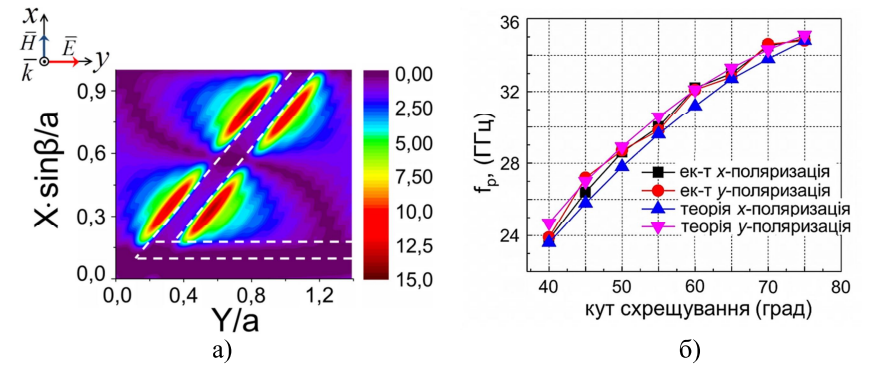


Рис. 9. Змодельований розподіл $|E_y|$ -компоненти поля в площині xy на відстані $0.001a$ від металевих смужок. Падаюче по нормалі електричне поле \vec{E} лінійно поляризовано уздовж вісі y на резонансній частоті для кута схрещення $\beta = 45^\circ$ (а); залежність експериментальної та теоретичної частот резонансних мінімумів проходження від кута схрещення дротяних елементів формуючих метаповерхню для двох випадків поляризації падаючої електромагнітної хвилі (б)

Експериментально продемонстровано, що вплив на спектральні властивості вищезазначеної метаповерхні таких додаткових параметрів як розміщення між дротяними елементами шару діелектрика (рис. 10, а), а також нахил метаповерхні відносно напрямку хвильового вектору \vec{k} (рис. 10, б) збільшують ширину кривої мінімуму проходження на частоті резонансного відгуку [14*].

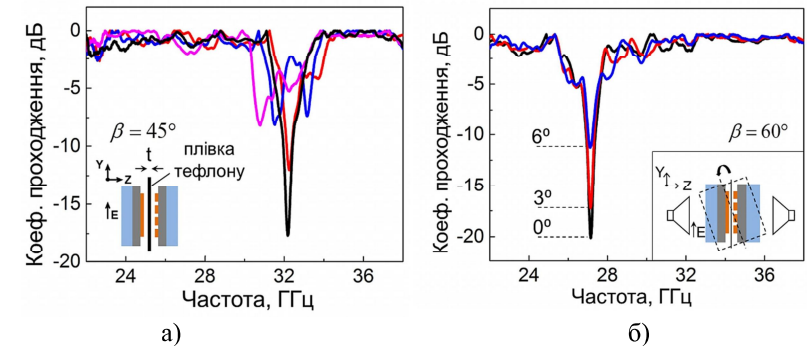


Рис. 10. Експериментальна залежність коефіцієнтів проходження від частоти метаповерхні з механічною перебудовою елементарної комірки (кут схрещення складає 60°) у випадку розміщення між дротяними елементами шару діелектрика різної товщини t . Чорна лінія – шар діелектрика відсутній, червона лінія – $t = 0,02$ мм; синя лінія – $t = 0,04$ мм, рожева лінія – $t = 0,06$ мм (а); експериментальна залежність коефіцієнтів проходження від частоти метаповерхні з механічною перебудовою ($\beta = 45^\circ$) у випадку нахилу метаповерхні відносно напрямку хвильового вектору \vec{k} під різними кутами (б).

ВИСНОВКИ

1. Розроблена експериментальна методика для дослідження просторового розподілу поля еванесцентних (згасаючих) мод в анізотропних дротяних метаматеріалах в міліметровому діапазоні довжин хвиль з використанням активних зондів і можливістю виміру фазових характеристик. За використанням її:

- продемонстрована здатність дротяної лінзи виконувати локалізацію еванесцентного поля у малому об'ємі простору;
- здійснена ресстрація зображень, розташованих у ближньому полі широкої апертури, об'єкту.

2. Вперше у мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль експериментально зареєстровано розрізнення двох окремих точкових джерел із надроздільною здатністю близько $\lambda/15$ у ближньому полі, що випромінюються з дротяного метаматеріалу. Цей факт продемонстрував здатність дротяного метаматеріалу (який працює у режимі каналірування) передавати інформацію про деталі багаторазово менші за довжину хвилі у міліметровому діапазоні довжин хвиль.

3. Вперше у мікрохвильовому діапазоні довжин хвиль продемонстрована можливість ефективного керування спектральними характеристиками дротяних метаматеріалів:

- експериментально та теоретично показано, що інтервали частот, які відповідають забороненим зонам, і ширину самих заборонених зон в частотному спектрі анізотропного дротяного метаматеріалу можна ефективно змінювати шляхом механічної перебудови геометричних розмірів та конфігурації елементарної комірки;
- за допомогою числового моделювання показано, що величиною плазмової частоти дротяного метаматеріалу з магнітним заповненням можна ефективно керувати за допомогою зовнішнього магнітного поля;

4. У метаматеріалі з механічною перебудовою на основі дротяного середовища вперше експериментально та теоретично продемонстровано сценарій перетворення електромагнітних властивостей плазмподібного середовища мікрохвильового діапазону у властивості фотонного кристалу міліметрового діапазону довжин хвиль:

- встановлено, що в спектрі проходження АДМ зі зростанням частоти спостерігається утворення додаткових ЗЗ у високочастотній області спектру, а також розширення та поглиблення ЗЗ-1 та ЗЗ-2, що викликано збільшенням щільності металевих заповнень у метаматеріалі;
- виявлено зміщення плазмової частоти в область більш високих частот зі зменшенням відстані між дротями анізотропного метаматеріалу завдяки збільшенню модуля ефективної діелектричної проникності метаматеріалу.

5. Вперше експериментально підтверджено, що в метаповерхні з механічною перебудовою елементарної комірки, виконаної у вигляді схрещених металевих смужок з керованим кутом схрещення, в діапазоні частот 22-40 ГГц

явище резонансного відбиття проявляється у вигляді одиночного мінімуму у частотному спектрі проходження цієї метаповерхні:

- встановлено, що природа резонансного відбиття зумовлена косокутовою формою елементарної комірки таким чином, що зі зменшенням кута схрещення β збільшується резонансна довжина складової частини елементарної комірки, в межах якої утворюється резонансне коливання;
- продемонстровано можливість ефективно зміщувати частоту резонансного мінімуму проходження на величину 1 ГГц/град в область більш низьких частот за допомогою збільшення кута схрещення дротяних елементів метаповерхні механічним шляхом;
- продемонстровано, що розміщення між дротяними елементами шару діелектрика та нахил самої метаповерхні відносно напрямку хвильового вектору знижують добротність метаповерхні на частоті резонансного відгуку.

ПЕРЕЛІК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sihvola A. Metamaterials in electromagnetics / A. Sihvola // *Metamaterials*. – 2007. – V. 1, Iss. 1. – P. 2–11.
2. Metamaterials [Електронний ресурс] // Metamorphose Network of Excellence project site – 2017. – Режим доступу: <http://www.metamorphose-vi.org/index.php/metamaterials>.
3. Zhao H. Tunable two-dimensional left-handed material consisting of ferrite rods and metallic wire / H. Zhao, J. Zhou, L. Kang, and Qian Zhao *Optics Express*. – 2009. – V. 17, Iss. 16. – P. 13373-13380.
4. Rotman W. Plasma simulation by artificial and parallel plate media / W. Rotman // *IRE Trans. Ant. Propagat* – 1962. – Vol. 10, Iss. 1, P. 82-95.
5. Smith D. R. Electromagnetic wave propagation in media with indefinite permittivity and permeability tensors / D. R. Smith, D. Schurig // *Phys. Rev. Lett.* – 2003. – V. 90, No. 7. – P. 077405.
6. Brown J. Artificial dielectrics having refractive indices less than unity / J. Brown. // *Proc. Inst. Elect. Eng (London)* – 1953, Part IV. – Vol. 100, Monograph No. 62R, P. 51–62.
7. Pendry J. B. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures / J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart et al. // *Phys. Rev. Lett.* – 1996. – Vol. 76, No. 7. – P. 4773–4776.
8. Belov P. A. Image transmission with the subwavelength resolution in microwave, terahertz and optical frequency bands / P. A. Belov, C.R. Simovski, P. Ikonen, et al. // *J. Commun. Technol. Electron.* – 2007. Vol. 52, Iss. 9, P. 1009-1022.
9. Yachin V.V. In *Advanced Techniques for Microwave Systems. Transmission Lines and Periodic Structures* / V.V. Yachin, K. Watanabe, K. Yasumoto, // edited by G. Schettini, Research Signpost Publ. –2011, – P.85–102.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1*. Kozhara L. I. Technique for analysis of the spatial field distribution in tapered wire medium / L. I. Kozhara, S. Y. Polevoy, I. V. Popov // Solid State Phenomena. – 2014. – Vol. 214. – P. 75–82.

2*. Кожара Л. И. Передача субволнового изображения проволочной линзой с фазовой компенсацией в миллиметровом диапазоне длин волн / Л. И. Кожара, С. Ю. Полевой, Д. С. Филонов // Радиотехника. – 2014. – Вып. 176. – С. 205–209.

3*. Ивженко Л.И. Магнитоуправляемые проволочные среды в миллиметровом диапазоне длин волн / Л.И. Ивженко, Е.Н. Одаренко, С.И. Тарапов // Радиотехника. – 2015. – Вып. 183. – С. 127-131.

4*. L. Ivzhenko Mechanically tunable wire medium metamaterial in the millimeter wave band / L. Ivzhenko, E. Odarenko, S. Tarapov // Progress of Electromagnetic Research – 2016. – Vol. 64. – P. 93-98.

5*. V. Yachin Resonant response in mechanically tunable metasurface based on crossed metallic gratings with controllable crossing angle / V. Yachin, L. Ivzhenko, S. Polevoy, S. Tarapov // Applied Physics Letters – 2016. – Vol. 109, Issue 22. – P 221905 (4pp).

6*. L. I. Kozhara, S. Y. Polevoy Technique for measuring the spatial field distribution in tapered wire medium, Proceedings of the International Symposium on Electrodynamics and Mechatronic Systems, (SELM 2013), May 15-18, 2013. Katowice, Poland. – pp.67-68.

7*. L. I. Kozhara, S. Yu. Polevoy, I.V. Popov, S. V. Nedukh. Spatial distribution of the electromagnetic field in the vicinity of tapered wire medium metamaterial, Proceedings of the VIII International Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves, (MSMW'13), June 23-28, 2013, WT-14, Kharkiv, Ukraine.

8*. L. Kozhara, E. Ostrizhnoy Focusing properties of tapered wire medium formed by copper conductors, Proceedings of 3rd International Conference of Young Scientists “Low Temperature Physics”, (ICYS–LTP–2012), May 14-18, 2012, Kharkiv, Ukraine, 2012. – P. 110

9*. L. Kozhara, V. A. Damaschin, S. Tarapov Anisotropic properties of wire medium formed by various conductors, Proceedings of 3d International Workshop on THz Radiation: Basic Research & Applications, (TERA 2011), September 4 -8, 2011, Kharkiv, Ukraine, 2011. – P. 014 (3pp).

10*. L. Kozhara, E. Ostrizhnoy Polarization and focusing properties of wire media lens in the millimeter waveband, Proceedings of XI Kharkiv Young Scientist Conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics, (YSC 2011), November 29 – December 1, 2011, Kharkiv, Ukraine, 2011

11*. L. Ivzhenko The Spatial Anisotropy of the Wire Metamaterials in the Millimeter Waveband, Proceedings of the International Young Scientists Forum on Applied Physics, (YSF 2015), September 29 – October 2, 2015, Dnipro, Ukraine.

12*. Л.И. Ивженко, Е.Н. Одаренко, С.И. Тарапов Магнитоуправляемые проволочные среды микроволнового диапазона. Сборник научных трудов VIII

Международной научной конференции «Функциональная база наноэлектроники», 28 сентября-02 октября 2015, Харьков, Украина, – С. 43-48.

13*. L. Ivzhenko Wire Medium as Metamaterial with Tuned Spectral Characteristics, Proceedings of the International Young Scientists Forum on Applied Physics, (YSF 2016), October 10-14, 2016, Kharkiv, Ukraine.

14*. L. Ivzhenko, S. Polevoy, S. Tarapov, V. Yachin Crossed Metallic Gratings as Metasurface with Tuned Crossing Angle, Proceedings of XI International Symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter and submillimeter waves, (MSMW'2016), June 20 – 24, 2016, Kharkiv, Ukraine.

Анотація

Ивженко Л. И. Спектральные свойства анизотропных метаматериалов микроволнового диапазона долин хвиль. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика. – Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова НАН України, м. Харків, 2017.

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову задачу з визначення особливостей впливу просторової конфігурації та розмірів елементарної комірки анизотропних дротяних метаматеріалів на їх спектральні властивості, яка доповнює та поглиблює вже існуючі знання про поширення електромагнітних хвиль мікрохвильового діапазону в штучних середовищах (метаматеріалах). З прикладної точки зору актуальність задачі полягає у можливості розробки технологій та проектуванні елементів пристроїв міліметрового діапазону, основу яких складають дротяні метаматеріали, наприклад: пристроїв передачі зображень з надроздільною здатністю, ширококутових НВЧ-поглиначів та поляризаторів, засобів ближньопольової мікроскопії і маскуючих покриттів.

Для реєстрації просторового розподілу поля еванесцентних мод у ближній зоні анизотропних штучних середовищ (метаматеріалів) мікрохвильового діапазону розроблена експериментальна методика. Завдяки поєднанню в методиці взаємодоповнюючих складових, а саме: сконструйованих активних зондів та скануючого пристрою, які сполучені з спеціально створеними комп'ютерними програмами разом з ВАК, оптимізовано процес амплітудно-фазових досліджень в метаматеріалах цього діапазону в режимі реального часу.

За допомогою цієї методики була продемонстрована можливість передачі анизотропним дротяним метаматеріалом (дротяною лінзою) зображення із надроздільною здатністю, що перевищує дифракційний ліміт у мікрохвильовому діапазоні 2 – 24 ГГц. Розроблені та представлені принципи керування частотними характеристиками спектру анизотропних дротяних метаматеріалів за допомогою додавання до структури метаматеріалу магнітних елементів та зміни розміру і форми елементарної комірки механічним шляхом. А саме: показано, яким чином зміна відстані між сусідніми дротами, що формують анизотропний метаматеріал, впливає на його спектральні та дисперсійні властивості. На підставі цього продемонстровано сценарій перетворення електромагнітних властивостей плазмоподібного середовища у властивості, що відповідають фотонному кристалу

міліметрового діапазону довжин хвиль у дротяному метаматеріалі з механічною перебудовою. Також, вперше експериментально встановлено, що в метаповерхні з механічною перебудовою елементарної комірки косокутової форми, ефект резонансного відбиття проявляється у вигляді одиночного мінімуму в спектрі проходження, частота якого в діапазоні 22-40 ГГц однозначно обумовлена кутом схрещування елементарної комірки.

Ключові слова: анізотропний дротяний метаматеріал, плазмopodobне середовище, фотонний кристал, заборонена зона, ефективні матеріальні параметри, надроздільна здатність, субхвильове зображення.

Аннотация

Ивженко Л. И. Спектральные свойства анизотропных проволочных метаматериалов микроволнового диапазона длин волн. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – радиопизика. – Институт радиопизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, г. Харьков, 2017.

В диссертационной работе решена актуальная научная задача по определению особенностей влияния пространственной конфигурации и размеров элементарной ячейки анизотропных проволочных метаматериалов на их спектральные свойства, которая дополняет и углубляет уже существующие знания о распространении электромагнитных волн микроволнового диапазона в искусственных средах (метаматериалах). С прикладной точки зрения актуальность задачи состоит в необходимости разработки технологий и проектировании элементов устройств миллиметрового диапазона, основу которых составляют проволочные метаматериалы, например: устройства передачи изображений со сверхразрешением, широкополосные СВЧ-поглопители и поляризаторы, средства ближнеполевой микроскопии и маскирующих покрытий.

Для регистрации пространственного распределения поля эванесцентных мод в ближнем поле анизотропных искусственных сред (метаматериалов) микроволнового диапазона разработана экспериментальная методика. Благодаря сочетанию в методике взаимодополняющих составляющих, а именно: сконструированных «активных» зондов и сканирующего устройства, которые сопряжены со специально созданными компьютерными программами вместе с векторным анализатором цепей, оптимизирован процесс амплитудно-фазовых исследований в режиме реального времени.

С помощью этой методики была продемонстрирована возможность передачи анизотропным проволочным метаматериалом (проволочной линзой) изображения со сверхразрешением, превышающим дифракционный предел в микроволновом диапазоне 2 – 24 ГГц. Разработаны и приведены принципы управления характеристиками спектра анизотропных проволочных метаматериалов путем внесения в структуру метаматериала магнитных элементов, а также путем изменения размера и формы элементарной ячейки механическим способом. А именно: показано, каким образом изменение расстояния между формирующими анизотропный метаматериал соседними

проволочками влияет на его спектральные и дисперсионные свойства. На основании этого продемонстрирован сценарий преобразования электромагнитных свойств плазмopodobной среды в свойства, присущие фотонному кристаллу миллиметрового диапазона длин волн в проволочном метаматериале с механической перестройкой. Также, впервые экспериментально установлено, что в метаповерхности с механической перестройкой элементарной ячейки косоугольной формы, эффект резонансного отражения проявляется в виде одиночного минимума в спектре прохождения, частота которого в диапазоне 22-40 ГГц зависит от угла скрещивания элементарной ячейки.

Ключевые слова: анизотропный проволочный метаматериал, плазмopodobная среда, фотонный кристалл, запрещенная зона, эффективные материальные параметры, сверхразрешающая способность, субволновое изображение.

Abstract

Ivzhenko L. I. The spectral properties of anisotropic wire medium metamaterials at microwaves. – On the manuscript.

Thesis for a candidate degree in physics and mathematics by speciality 01.04.03 – radiophysics. – O. Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NAS of Ukraine, Kharkiv, 2017.

In this thesis an actual scientific task, such as influence of the spatial configuration and unit cell dimensions on the spectral properties of anisotropic wire medium metamaterials in the millimeter waveband, has been solved. This task solving supplements and deepens the already existing knowledge about the propagation of electromagnetic waves in artificial media (metamaterials) at microwaves. Practically, actuality of the tasks are needed to develop technologies and design elements of microwave devices based on wire medium metamaterials, for example: subwavelength imaging devices, broadband microwave absorbers and polarizers, near field microscopy and masking coatings.

The experimental technique, which allows to register the spatial distribution of evanescent modes at the near field of anisotropic artificial media (metamaterials) at microwaves, has been developed. Due to combination of essential components in the experimental technique, namely: designed "active" probes and a scanning module that are united with specially developed software together and using Vector Network Analyzer, the process of amplitude-phase studies in real time is optimized. Using this technique, it was demonstrated that an anisotropic wire medium metamaterial (wire lens) is able to transmit subwavelength images at microwaves. The principles, which allow to control the spectral characteristics of the spectrum of anisotropic wire medium metamaterials, are developed. The manipulations with spectral characteristics are carried out by adding to metamaterial structure the magnetic elements and also by changing the size and shape of the unit cell mechanically. Namely, it is shown the nature of influence which causes changing the distance between the neighboring wires formed anisotropic metamaterial on his spectral and dispersion properties. On this basis, the scenario of transformation the electromagnetic properties which are typical to

plasma-like medium into the properties that inherent to a photonic crystal of the millimeter wavelength range in a mechanically tunable wire medium metamaterial is demonstrated. It was established experimentally that in a metasurface with mechanical adjustment of a unit cell with oblique form the resonant reflection effect manifests itself as a single minimum in the transmission spectrum, whose frequency for the 22-40 GHz band depends on the crossing angle.

Key words: anisotropic wire medium metamaterial, plasma-like medium, photonic crystal, band gap, effective constitutive parameters, subwavelength resolution subwavelength image.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. 444-17.
Підписано до друку 09.10.17. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

СТИЛЬ®
ИЗДАТ
ТИПОГРАФІЯ
www.stil-izdat.com