

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В. Н. КАРАЗІНА

Рибін Олег Миколайович



УДК 537.87

**ДВОКОМПОНЕНТНІ МЕТАМАТЕРІАЛИ І МІКРОСМУЖКОВІ АНТЕНИ
НА ЇХ ОСНОВІ**

01.04.03 – радіофізика

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант:

доктор фізико-математичних наук, професор
Шульга Сергій Миколайович,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
декан факультету радіофізики, біомедичної електроніки та
комп'ютерних систем.

Офіційні опоненти:

доктор фізико-математичних наук, професор,
Просвірнін Сергій Леонідович,
Радіоастрономічний інститут НАН України,
завідувач відділом теоретичної радіофізики;

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник,
Куриляк Дозислав Богданович,
Фізико-механічний інститут імені Г. В. Карпенка НАН України,
завідувач відділу фізичних основ діагностики матеріалів;

доктор фізико-математичних наук, професор
Прокопенко Юрій Володимирович,
Інститут радіофізики і електроніки імені О. Я. Усикова НАН України,
провідний науковий співробітник відділу радіофізики твердого тіла.

Захист відбудеться “07” червня 2018 р. о 13-00 годині

на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.051.02
Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна
за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи 4, ауд. 3-9.

З дисертацією можна ознайомитись у Центральній науковій бібліотеці
Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна
за адресою: 61022, м. Харків, майдан Свободи 4.

Автореферат розісланий “04” травня 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Ю. В. Аркуша

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Застосування метаматеріалів у прикладній електродинаміці є досить новим і актуальним напрямком, що формально виник на межі ХХ і ХХІ століть, хоча передумови для початку освоєння даного напрямку сформувався у семидесятих роках минулого століття. Незважаючи на достатню "молодість" цього напрямку, його популярність трохи поступається популярності таких напрямків, як наноматеріали і фотоніка. Це зумовлено чисельними можливостями застосування метаматеріалів. Остання обставина робить метаматеріали міждисциплінарним науковим напрямком.

Величезні можливості застосування метаматеріалів можна без перебільшення назвати очевидними, і обумовлені вони особливостями структури метаматеріалів. Дійсно, оскільки багато електротехнічних матеріалів є композиційними матеріалами (тобто створеними штучно на основі двох і більше природних компонентів), але метаматеріали можуть розглядатися як нове покоління композиційних матеріалів. У той же час відмінною рисою метаматеріалів є те, що вони мають електродинамічні параметри, які неможливо зустріти у природних умовах, тобто метаматеріали мають характеристики, які не притаманні їх природним інгредієнтам і вже існуючим електротехнічним матеріалам. Так, наприклад, відносні діелектричні і магнітні проникності метаматеріалів (а точніше, їх дійсні частини) можуть мати великі значення; у цьому випадку говорять, що має місце ефект приросту проникностей (enhancement of effective permittivity and / or permeability). Відносні діелектрична і магнітна проникності метаматеріалів також можуть мати малі значення, у цьому випадку говорять, що мають справу з матеріалами, що забезпечують ультранизькими значеннями коефіцієнта заломлення (ultra-low refractive index). Також відносні діелектрична і магнітна проникності метаматеріалів можуть мати одночасно негативні значення, у цьому випадку говорять, що мають справу з подвійними негативними метаматеріалами (double-negative metamaterials). Важливе практичне значення також мають метаматеріали, в яких негативні значення приймають або відносна діелектрична проникність, або відносна магнітна проникність. Проте треба зазначити, що вищенаведена класифікація метаматеріалів є характерною лише для певного діапазону довжин хвиль (або діапазону частот).

Багато робіт, що присвячені метаматеріалам, відносяться саме до надвисокочастотного (НВЧ) діапазону. Даний факт не є випадковим і багато в чому обумовлений тим, що бажані властивості традиційних матеріалів, особливо феритів, серйозним чином деградували в останні десятиліття для частот близьких 1 ГГц. Це вимагає створення принципово нових штучних матеріалів із властивостями, не притаманними природним і вже існуючим композитним матеріалам. Таким чином, метаматеріали повинні частково або повністю заповнити наявний дефіцит властивостей електротехнічних матеріалів НВЧ-діапазону, що намітився на даному етапі розвитку матеріальних технологій.

Якщо в перші роки виникнення метаматеріального напрямку в прикладній електродинаміці найбільш важливим було здійснення "будь-якої" практичної реалізації штучних матеріалів, то в останні роки не прийнято створювати

метаматеріали без подальшого застосування на їх основі конкретних приладів із поліпшеними характеристиками. Як і виробництво будь-якого обладнання, виробництво приладів на основі метаматеріалів вимагає недорогої та' нескладної технології застосування самих метаматеріалів із завданими характеристиками. Іншими словами, технологія створення метаматеріалів не повинна бути занадто трудомісткою і дорогою, інакше створювані на їх основі прилади будуть нерентабельними і неконкурентоспроможними. Тому при розробці та створенні метаматеріалів у першу чергу постає питання про практичну їх реалізацію: про відносну простоту технології виготовлення і реальні витрати на створення таких технологій. При цьому також важливим моментом є зведення до мінімуму кількості природних матеріалів, що використовуються при створенні метаматеріалу як композиту, що безпосередньо визначає фактичну собівартість будь-якого приладу, виготовленого на його основі.

Наступним важливим фактором при дослідженні і створенні метаматеріалів і приладів на їх основі є вибір методів дослідження опису ефективних параметрів метаматеріалів, або, як прийнято зараз говорити, вибір методу характеристики метаматеріалів, що безпосередньо пов'язано із завданням характеристик майбутніх приладів і електротехнічних матеріалів, що створюються на основі цих метаматеріалів.

Характеризація метаматеріалів може бути експериментальною і теоретичною. При експериментальній характеризації на увазі мається вимірювання спектрів комплексної діелектричної та магнітної проникностей дослідженого метаматеріалу. А теоретична характеризація має на увазі використання математичних моделей, які адекватно описують ефективні проникності метаматеріалів у заданому діапазоні довжин хвиль (діапазоні частот).

Якщо методи експериментальної характеризації метаматеріалів в НВЧ-діапазоні вже достатньо глибоко розвинені, наприклад, то математичні моделі для ефективних діелектричних і магнітних проникностей метаматеріалів НВЧ-діапазону ще слабо розвинені навіть для найпростіших метаматеріальних середовищ - ізотропних діелектриків із періодично вбудованими в них немагнітними металевими включеннями сферичної та циліндричної форм. Причому існуючі математичні моделі розроблені виключно для випадку малих включень.

Незважаючи на різноманіття існуючих методів вимірювань комплексних проникностей метаматеріалів, дані методи експериментальної характеризації метаматеріалів у НВЧ-діапазоні мають істотний недолік, а саме: вони вимагають залучення чималих матеріальних засобів і людських ресурсів для проведення вимірювань величин, які безпосередньо використовуються для визначення комплексних проникностей метаматеріалів.

Вищенаведені фактори стали визначальними для автора даної дисертаційної роботи при проведенні досліджень, результати яких лягли в основу роботи. Більш того, передумовою для створення теоретичної частини даної роботи стали експериментальні дослідження, виконані безпосередньо автором роботи в Нагойському інституті технологій (Nagoya Institute of Technology) у 2005-2006 роках. У ході цих досліджень автор власноруч створював зразки двокомпонентних метало-

діелектричних метаматеріалів, а також НВЧ-прилади, що використовувалися в експериментах (мікросмужкова антена і мікросмужкові резонатори), з підручними засобами і матеріалами. При цьому за участю автора даної дисертаційної роботи була розроблена і апробована досить проста і відносно недорога методика вимірювання комплексних ефективних діелектричних і магнітних проникностей зразків метаматеріалів із використанням мережевого аналізатора, а також освоєно методику створення діелектричних матриць за допомогою використання 3-D принтера для швидкого створення дослідних зразків, включаючи налаштування і калібрування самої машини (3-D принтера).

У даній дисертаційній роботі розглянуто двокомпонентні метаматеріали, що являють собою ізотропні діелектричні матриці/середовища з періодично вбудованими в них металевими включеннями циліндричної і сферичної форм. Як в експериментальній, так і в теоретичній частинах роботи були розглянуті немагнітні (мідні) і феромагнітні (залізовмісні) включення. Причому в останньому випадку розглядалися як повністю, так і частково намагнічені включення. В експериментальній частині роботи наведено результати апробації недорогого і простого методу вимірювання ефективних комплексних проникностей метаматеріальних зразків у НВЧ-діапазоні. У даній роботі також наведені теоретичні дослідження з використання розглянутих метаматеріалів для мініатюризації мікросмужкових прямокутних антен НВЧ-діапазону і поліпшення їх коефіцієнтів підсилення за потужністю і їх коефіцієнтів корисної дії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати, наведені в даній дисертаційній роботі, є складовою частиною результатів, отриманих у рамках:

1) науково-дослідного проекту “Fabrication and Microwave Characterization of Metal-Dielectric Metamaterial Structures”, реалізованого в Нагойському інституті технологій (Nagoya Institute of Technology) спільно з NGK Spark Plug Co., Ltd (Японія);

2) персонального науково-дослідного стартап-гранту “Modeling of the Effective Properties of Rod Metamaterial Structures in the Microwave Range”, отриманого дисертантом від Вищої атестаційної комісії Пакистану (Higher Education Commission of Pakistan);

3) персонального науково-дослідного стартап-гранту “Microwave Applications of Two-Component Magnetic Metamaterials”, отриманого дисертантом від Хубейського уряду КНР;

4) держбюджетної теми "Математична модель активних і пасивних багатофункціональних систем на основі метаматеріалів і анізотропних фотонних структур", номер державної реєстрації 22-14-16 (0116U000821), що здійснюється в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна;

5) держбюджетної теми "Компактна антено-фідерна система з друкованих антен для радіолокації ближньої дії", номер державної реєстрації 29-14-17 (0117U0004854), що здійснюється в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна.

Мета і завдання дослідження. Метою даної дисертаційної роботи є отримання

математичних моделей для електромагнітних відгуків двокомпонентних метаматеріалів з металевими включеннями й апробація цих моделей щодо питань мініатюризації мікросмужкових антен, поліпшення таких їх параметрів, як коефіцієнт підсилення за потужністю та коефіцієнт корисної дії. Для досягнення цієї мети в роботі заплановано:

1) отримати математичні моделі для ефективного електромагнітного відгуку безмежного однорідного ізотропного діелектрика з періодично вбудованими в нього немагнітними металевими включеннями циліндричної та сферичної форми та дослідити їх як функції об'ємної частки металу;

2) виготовити найпростіші плоскі метаматеріальні зразки у вигляді діелектричних матриць паралелепіпедної форми з періодично вбудованими в них металевими циліндричними провідниками;

3) розробити та експериментально апробувати недорогий метод вимірювання комплексних ефективних відносних діелектричної та магнітної проникностей метаматеріальних зразків у НВЧ-діапазоні;

4) теоретично й експериментально дослідити вплив найпростіших плоских метало-діелектричних метаматеріалів на випромінювальні характеристики прямокутних мікросмужкових НВЧ-антен при покритті їх поверхні цими метаматеріалами;

5) у НВЧ-діапазоні отримати й апробувати чисельно-аналітичний алгоритм пошарової характеристики двокомпонентних плоских метаматеріальних середовищ у напрямку, перпендикулярному шарам цих середовищ;

6) у НВЧ-діапазоні отримати математичні моделі для тензорів ефективних діелектричної та магнітної проникностей безмежного ізотропного діелектрика з періодично вбудованими в нього феромагнітними металевими включеннями циліндричної і сферичної форм, намагніченими до насичення в зовнішньому постійному магнітному полі, і дослідити ефективні магнітні НВЧ-відгуки даних метаматеріалів у заданих напрямках;

7) у НВЧ-діапазоні отримати математичні моделі для тензорів ефективних діелектричної та магнітної проникностей безмежного ізотропного діелектрика з періодично вбудованими в нього феромагнітними металевими включеннями циліндричної і сферичної форм, частково намагніченими в зовнішньому постійному магнітному полі, і дослідити ефективні магнітні НВЧ-відгуки даних метаматеріалів у заданих напрямках;

8) розробити і теоретично апробувати концепцію мініатюризації прямокутних мікросмужкових НВЧ-антен з метаматеріальними підкладками з поліпшеним коефіцієнтом посилення за потужністю і коефіцієнтом корисної дії та зменшеною інтенсивністю поля в ближній зоні.

Об'єктом дослідження є двокомпонентні метало-діелектричні метаматеріали з немагнітними і феромагнітними металевими включеннями.

Предметом дослідження є НВЧ-електромагнітні відгуки двохкомпонентних метало-діелектричних метаматеріалів з немагнітними і феромагнітними металевими включеннями.

Методи дослідження. Для гомогенізації метаматеріальних середовищ,

розглянутих у даній дисертаційній роботі, використовувався підхід методу ефективного середовища. При розробці чисельного алгоритму в третьому розділі дисертації був також використаний метод градієнтів і ітераційний метод Ньютонна. У шостому розділі використовувався стандартний підхід мінімізації функції двох змінних на прямокутній області.

Отримані в дисертації математичні моделі адекватно описують ефективні відносні діелектричні і магнітні проникності досліджуваних метаматеріальних середовищ в НВЧ-діапазоні: вони добре узгоджуються з результатами лабораторних вимірювань і чисельного моделювання, що здійснювалося з використанням комерційного електродинамічного програмного забезпечення PLANC FDTD, а також у граничних окремих випадках збігаються з результатами робіт, опублікованих раніше іншими авторами.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі створено новий науковий напрямок, – розвинуто теорію ефективного середовища для нерезонансних метаматеріалів у мікрохвильовому діапазоні. При цьому вперше:

- 1) отримано наближення для ефективних матеріальних параметрів (діелектричної і магнітної проникності) нескінченного метаматеріала, представленого у вигляді безмежного ізотропного діелектрика з періодично вбудованими в нього немагнітними металевими включеннями циліндричної та сферичної форм та показана наявність приросту ефективної відносної діелектричної проникності, діамагнітну складову ефективної відносної магнітної проникності, що мають низькі діелектричні і магнітні втрати ($10^{-3} \div 10^{-4}$);
- 2) на основі розвинутої теорії виготовлено метаматеріальні зразки у вигляді діелектричних матриць у формі паралелепіпеда з періодично вбудованими в них металевими та феромагнітними включеннями циліндричної форми, які (як було показано експериментально) можуть бути використані для поліпшення характеристик ближнього та дальнього поля мікросмужкової антени;
- 3) запропоновано чисельно-аналітичний метод пошарової декомпозиції плоских метаматеріалів/композитів;
- 4) отримано тензор ефективної магнітної проникності метаматеріалів у вигляді безмежного ізотропного діелектрика з періодично вбудованими в нього металевими феромагнітними включеннями циліндричної та сферичної форм, що намагнічені повністю або частково, та показано, що:
 - у випадку повного намагнічування феромагнітних включень магнітні втрати поза резонансами знаходяться в межах $10^{-3} \div 10^1$ для циліндричних включень і є на два порядки вищими для сферичних включень;
 - у випадку часткового намагнічування феромагнітних включень магнітні втрати поза резонансами знаходяться в межах $10^{-8} \div 10^1$ для циліндричних включень та $10^{-5} \div 10^1$ – для сферичних включень;
 - як у випадку часткового, так і у випадку повного намагнічування феромагнітних включень, в залежності від напрямку поширення первісної електромагнітної хвилі, у відповідних частотних діапазонах у розглянутих метаматеріалах

спостерігається: а) приріст дійсної частини ефективної відносної магнітної проникності; б) малі значення дійсної частини ефективного коефіцієнту заломлення (менше одиниці але більше нуля); в) негативні значення дійсної частини ефективної відносної магнітної проникності;

– у випадках різних значень величини зовнішнього постійного магнітного поля у розглянутих метаматеріалах спостерігається або повне проходження (з інверсією фази або без неї), або повне відбиття НВЧ-хвилі;

5) отримано умову відсутності втрат у слабкому полі для розглянутих метаматеріалів у випадку часткового намагнічування феромагнітних включень;

б) показано, що мініатюризація об'ємного профілю прямокутної мікросмужкової антени із суттєвим зменшенням інтенсивності її поля у ближній зоні, збільшенням її коефіцієнта посилення за потужністю і коефіцієнта корисної дії досягається використанням в якості підкладки метаматеріалів/композитів з приростом ефективної відносної діелектричної або магнітної проникності. Причому поліпшення даних параметрів антени спостерігається у випадку багатосарових підкладок антен, при умові збереження об'ємного профілю антени;

7) отримано основні співвідношення для визначення мінімально можливого об'ємного профілю прямокутної мікросмужкової антени з немагнітною підкладкою з приростом ефективної відносної діелектричної і/або магнітної проникності у випадку заданих параметрів: резонансної частоти хвилі та бажаної товщини метаматеріальної підкладки (або резонансної частоти хвилі та бажаної ефективної відносної діелектричної проникності метаматеріалу).

Практичне значення отриманих результатів. Результати, отримані в даній дисертаційній роботі, можуть бути використані при:

1) синтезі метаферитів НВЧ-діапазону нового покоління;
2) створенні принципово нових хвильоводів НВЧ-діапазону;
3) створенні метаферитних ізоляторів, метаферитних фазообертачів і метаферитних циркуляторів НВЧ-діапазону;

4) створенні альтернативних вже існуючим НВЧ-фільтрів, конверторів та ретрансляторів/транспондерів ЕМ-хвиль;

5) створенні компактних бездротових систем передачі електричної енергії в НВЧ-діапазоні з високими значеннями коефіцієнта корисної дії;

б) створенні мініатюрних мікросмужкових антен НВЧ-діапазону з високими значеннями коефіцієнта посилення за потужністю і коефіцієнта корисної дії.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні положення і результати експериментальних досліджень автором дисертації виконані самостійно. Зокрема, статті [4], [12], [15-20] опубліковані автором дисертації без співавторів. У роботі [1] внесок автора полягає у виготовленні резонатора, проведенні вимірювань і моделювання ефективних параметрів. У роботі [6] внесок автора полягає у виготовленні резонатора і метаматеріальних зразків, проведенні вимірювань і моделювання ефективних параметрів. У роботах [2, 3] автору належить постановка задачі та отримання всіх аналітичних формул. У роботах [5], [7], [9], [14] автору належить постановка задачі, отримання всіх аналітичних виразів, проведення

чисельного моделювання й аналіз отриманих результатів. У роботах [8], [10] автору належить постановка задачі, отримання всіх аналітичних виразів і проведення чисельного моделювання. У роботі [11] автору належить постановка задачі, проведення чисельного моделювання, аналіз отриманих результатів. У роботі [13] автору належить постановка задачі та отримання всіх аналітичних формул. В роботі [21] автору належить постановка задачі виготовлення метаматеріального зразка і мікросмужкової антени, проведення вимірювань та чисельне моделювання. В роботі [22] автору належить постановка задачі, отримання всіх аналітичних виразів, чисельне моделювання. У роботах [23-27] автору належить постановка задачі, отримання всіх аналітичних виразів, аналітичне та чисельне моделювання.

Апробація результатів роботи. Результати, викладені в даній дисертаційній роботі, були повідомлені й обговорені на 10 міжнародних конференціях і симпозіумах:

- IEEE 1st Ukrainian Conference on Electrical and Computer Engineering, Kyiv (Ukraine), 2017.
- 9th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwave, Millimeter and Submillimeter Waves, Kharkiv (Ukraine), 2016.
- 10th International Conference on Antenna Theory and Techniques, Kharkiv (Ukraine), 2015.
- 15th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Dnepropetrovsk (Ukraine), 2014.
- 8th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwave, Millimeter and Submillimeter Waves, Kharkiv (Ukraine), 2013.
- 14th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Kharkov (Ukraine), 2012.
- 13th of International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Kiev (Ukraine), 2010.
- 7th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwave, Millimeter and Submillimeter Waves, Kharkiv (Ukraine), 2010.
- 10th International Symposium on Advanced Materials, Islamabad (Pakistan), 2007.
- 1st Asia-Oceania Ceramic Federation (AOCF) Conference Convened in Conjunction with The 18th Fall Meeting of The Ceramic Society of Japan, Osaka (Japan), 2005.

Публікації за темою дисертації. Результати, викладені в даній дисертаційній роботі, опубліковані у 38 наукових працях: у 27 статтях у наукових журналах і в 11 тезах доповідей міжнародних наукових конференцій і симпозіумів.

Структура й обсяг дисертації. Дана дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків і списку використаних джерел. Загальний обсяг дисертації - 337 сторінок, із них основного тексту - 270 сторінок. Список використаних джерел на 17 сторінках налічує 225 найменувань. Дисертація також налічує 155 малюнків і 15 таблиць, з яких 14 таблиць займають всю площу сторінки. У дисертації прийнято наскрізну нумерацію формул, малюнків і таблиць у межах кожного розділу.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** висвітлено актуальність теми дослідження дисертації й обґрунтовано необхідність виконання роботи, її зв'язок із науковими програмами, визначено мету та задачі дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, зазначено використані при його проведенні методи, перелічено положення, що виносяться на захист, наведено дані про апробацію, висвітлено особистий внесок автора дисертації в публікаціях, сформульовано отримані нові результати та висвітлено їх практичне значення.

Розділ 1 «Огляд літератури та вибір напрямку дослідження» присвячено огляду літератури за темою дисертації. Розглянуто поняття метаматеріалів взагалі та подано класифікацію нерезонансних метаматеріалів (розмір включень яких значно менший за довжину електромагнітної (ЕМ) хвилі) з точки зору теорії ефективного середовища. Обговорено прикладну важливість метаматеріалів. Розглянуто принципові методи теоретичного й експериментального дослідження властивостей нерезонансних метаматеріалів. З'ясовано принципову різницю між композитами і метаматеріалами. Особливу увагу приділено теорії ефективного середовища, частково порушено історичні основи розвитку цього методу. Визначено коло питань, що потребують дослідження, та обґрунтовано коло проблем, які потрібно вирішити для того, щоб досягти поставленої в дисертації мети.

Розділ 2 «НВЧ-теорія ефективного середовища для немагнітних двокомпонентних металодіелектричних метаматеріалів» присвячено створенню теорії ефективного середовища для безмежного ізотропного діелектрика (з відносною діелектричною проникністю ϵ_m і відносною магнітною проникністю μ_m) з періодично вбудованими в нього немагнітними металевими включеннями (з відносною діелектричною проникністю ϵ_i і відносною магнітною проникністю μ_i) циліндричної та сферичної форм, рис. 1.

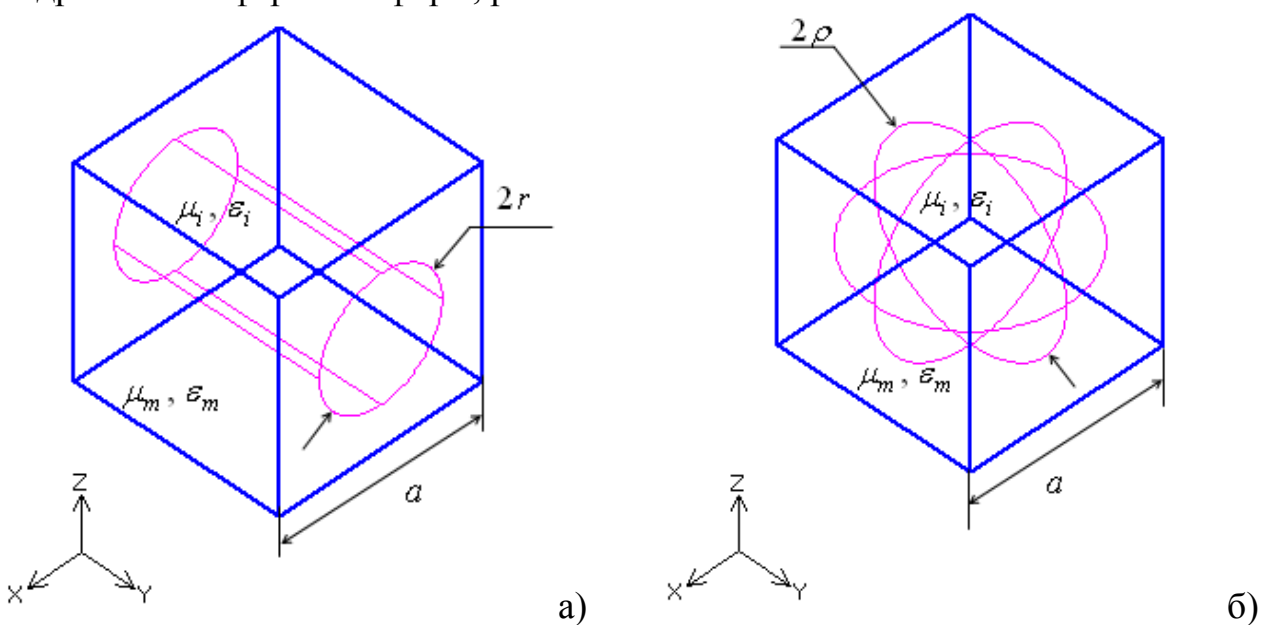


Рис. 1. Елементарна комірка безмежного двокомпонентного метаматеріалу з (а) циліндричними включеннями, із (б) сферичними включеннями

Уперше отримані мікрохвильові наближення для ефективних електромагнітних відгуків як функцій частоти й об'ємної частки металевих включень для таких композитних середовищ у вигляді тензорних елементів ε^{cyl} , μ_{yy}^{cyl} , ε^{sph} та μ^{sph} тензорів ефективної діелектричної $\widehat{\varepsilon}_{eff}^{cyl}$ та магнітної $\widehat{\mu}_{eff}^{cyl}$ проникностей у випадку циліндричних включень

$$\widehat{\varepsilon}_{eff}^{cyl} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} \varepsilon^{cyl} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy}^{cyl} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon^{cyl} \end{bmatrix}, \quad \widehat{\mu}_{eff}^{cyl} = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu^{cyl} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{yy}^{cyl} & 0 \\ 0 & 0 & \mu^{cyl} \end{bmatrix} \quad (1)$$

та тензорів ефективної діелектричної ε^{sph} та магнітної μ^{sph} проникностей у випадку циліндричних включень

$$\widehat{\varepsilon}_{eff}^{sph} = \varepsilon_0 \begin{bmatrix} \varepsilon^{sph} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon^{sph} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon^{sph} \end{bmatrix}, \quad \widehat{\mu}_{eff}^{sph} = \mu_0 \begin{bmatrix} \mu^{sph} & 0 & 0 \\ 0 & \mu^{sph} & 0 \\ 0 & 0 & \mu^{sph} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Уперше показано, що в НВЧ-діапазоні ці композитні середовища мають приріст ефективної відносної діелектричної проникності ($\text{Re}(\varepsilon^{cyl}) > \varepsilon_m$ у випадку циліндричних включень і $\text{Re}(\varepsilon^{sph}) > \varepsilon_m$ у випадку сферичних включень) і діамагнітну ефективну відносну магнітну проникність ($\text{Re}(\mu_{yy}^{cyl}) < \mu_m$ у випадку циліндричних включень і $\text{Re}(\mu^{sph}) < \mu_m$ у випадку сферичних включень), а також володіють низькими як діелектричними, так і магнітними втратами. Уперше дано фізичне пояснення явища приросту ефективної відносної діелектричної проникності та явища діамагнітної ефективної відносної магнітної проникності для розглянутих у даному розділі безмежних немагнітних метаматеріалів.

Використовуючи чисельне моделювання за допомогою електромагнітного симулятора PLANC FDTD (версія 6.2, що розроблена Information and Mathematical Science Laboratory Inc.), порівняно ефективні властивості безмежного метаматеріального середовища із ефективними властивостями відповідного метаматеріального шару кінцевої товщини і зазначено, що ефективні параметри двомірних безмежних структур можуть бути з достатнім ступенем точності описані ефективними параметрами безмежного метаматеріального середовища з тією ж самою геометрією елементарної комірки. Більш того, як показали чисельні FDTD-експерименти, кількість елементарних шарів метаматеріального шару, який приблизно описує безмежне метаматеріальне середовище, зменшується зі зменшенням об'ємної частки металу.

Розділі 3 «Експериментальне визначення ефективних проникностей двокомпонентних металодіелектричних метаматеріалів і структур на їх основі» присвячено експериментальному дослідженню і практичному виготовленню композитних

матеріалів у вигляді діелектричних матриць у формі паралелепіпеду з періодично вбудованими в них металевими включеннями циліндричної форми, рис.2. Причому розглядалися як немагнітні, так і феромагнітні включення.

Даний розділ присвячено вимірюванням комплексних ефективних відносних проникностей таких метаматеріалів. У розділі розроблено і практично апробовано новий та недорогий метод вимірювання ефективних проникностей метаматеріалів, в основі якого відкритий смужковий резонатор, аналогічний тому, що є зображеним на фото рис. 3.

Згідно з запропонованим методом вимірювання комплексних ефективних відносних проникностей, будь-який метаматеріальний зразок, комплексні ефективні проникності якого треба визначити, представлений як деякий чотириполюсник (рис. 4) зі своїми S-параметрами, а також функціями ЕМ-поля F_I , F_{II} , L_I , L_{II} , (у дисертації це компоненти вектора напруженості електричного поля).

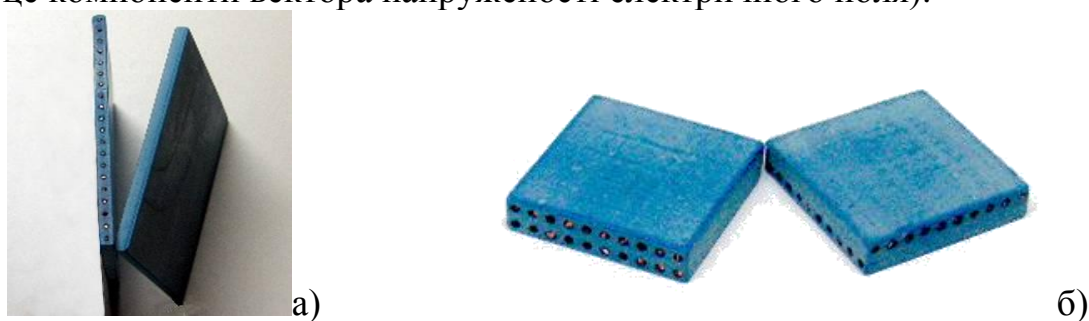


Рис. 2. Зразок метаматеріалу (а) (ліворуч на рисунку), що виготовлений із воскової матриці (другий на рис.1а) розміром 0,045 м на 0,045 м на 0,0025 м з періодично вставленими в неї 20 залізними дротами (один шар) діаметром 0,0005 м, віддалені один від одного на відстань 0,0025 м; зразки метаматеріалів (б), що виготовлені з двох паралельних шарів з 10 мідних дротів діаметром 0,001 м, віддалені один від одного на відстань 0,0045 м, вставлених періодично у воскову матрицю розміром 0,0225 м на 0,0225 м на 0,0045 м у двох різних комбінаціях

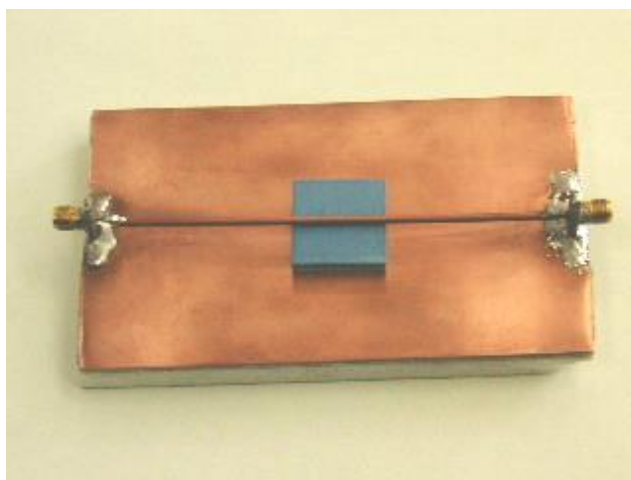


Рис. 3. Резонатор, використаний для вимірювання ефективних проникностей метаматеріалів, виготовлених у формі паралелепіпед

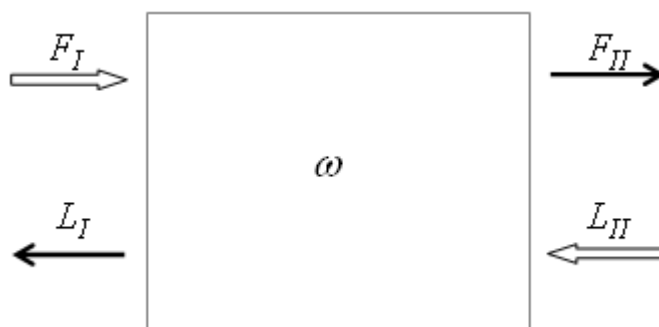


Рис. 4. Подання об'єкта розсіювання у вигляді чотириполюсника

Вимірювані S-параметри потім використовуються для обчислення комплексних ефективних відносних проникностей за математичними моделями роботи [Nicolson A. M. Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques / A. M. Nicolson and G. F. Ross // IEEE Trans. Instrumentation and Measurement. – September 1970. – Vol. TM-19, Issue 4. – P. 377–382]. Такий же підхід використовується в дисертації при моделюванні комплексних ефективних проникностей у вільному просторі з використанням електромагнітного симулятора PLANC FDTD з різницею в тому, що в якості моделей для перерахунку проникностей за обчисленими S-параметрами беруться математичні моделі роботи [Ghodgaonkar D. K. Free-Space Measurement of Complex Permittivity and Complex Permeability of Magnetic Materials at Microwave Frequencies / D. K. Ghodgaonkar, V. V. Varadan, and V. K. Varadan // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – April 1990. – Vol. 39, No. 2. – P. 387–394].

Також даний розділ присвячено експериментальному вивченню впливу метаматеріальної накладки на характеристики мікросмужкової антени, – мікросмужкової антени, патч якої повністю покривався метаматеріалом з одним шаром залізних дротів, рис. 5.

Уперше експериментально показано, що метаматеріали у вигляді діелектричних матриць правильної форми з періодично вбудованими в них металевими включеннями циліндричної форми мають такі властивості:

- приріст дійсної частини ефективної відносної діелектричної проникності і діамагнітний характер дійсної частини ефективної відносної магнітної проникності;

- приріст дійсної частини ефективної відносної діелектричної і магнітної проникностей у випадку феромагнітних металевих включень;

- такі метаматеріали можуть бути використані для поліпшення характеристик далекого поля мікросмужкової антени при повному покритті її випромінювального елемента (патча) цими матеріалами;

- S-параметри даних метаматеріалів містять аномальні піки, що обумовлені розмірним резонансом.

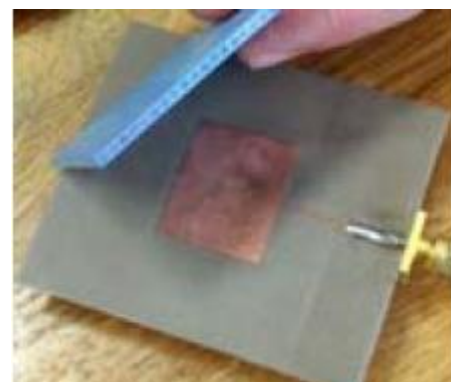


Рис. 5. Метаматеріальний зразок, що знаходиться на поверхні прямокутної мікросмужкової антени

Розділ 4 «Ефективні електромагнітні властивості шаруватих композитних матеріалів» присвячено теоретичному дослідженню в НВЧ-діапазоні ефективних електродинамічних параметрів плескато-шаруватих метал-діелектричних композитів, що знаходяться у вільному просторі.

У першій половині розділу, рухаючись шляхом ускладнення композита, отримано НВЧ-наближення для ефективних відносних проникностей композитів, що представлені на рис. 6 (ускладнення структури відповідає руху по структурах від (а) до (в)), як функцій об'ємної доли металу. У розділі розглядалося нормальне падіння плоскої монохроматичної хвилі на бокову поверхню композитних структур, а у випадку структури (в) розглядалися як немагнітні металічні включення циліндричної і сферичної форми, які мають бути симетрично вбудованими в бокові шари структури. При цьому необхідно зазначити, що композитні структури рис. 6 побудовані на основі безмежного ланцюга немагнітних металічних кругових циліндрів, підрисунок (а).

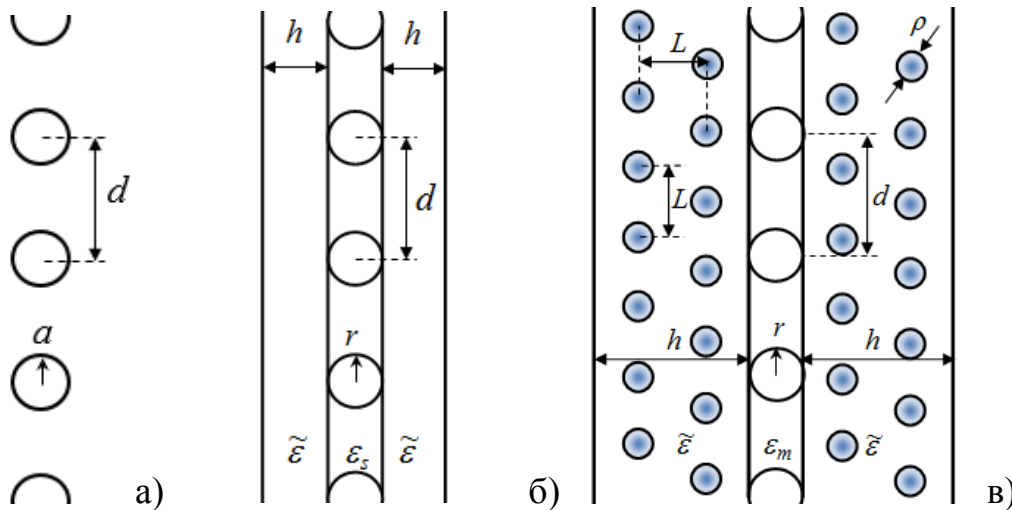


Рис. 6. Плескато-шаруваті композитні розсіювачі у вільному просторі

Дослідження НВЧ-наближень для ефективних відносних проникностей композитів рис. 6 як функцій об'ємної доли металу показало, що плоскі композитні середовища характеризуються приростом дійсної частини ефективної відносної діелектричної проникності та діамагнітною дійсною частиною ефективної відносної магнітної проникності, причому дані ефекти виявляються сильнішими, якщо в композиті можна виділити елементарну комірку, тобто якщо композит є метаматеріалом.

Другу частину цього розділу присвячено розробці чисельно-аналітичного підходу пошарової декомпозиції плоских метаматеріальних середовищ у припущенні нормального падіння ЕМ-хвилі на бокові поверхні середовищ. Згідно з цим підходом, будь-який плоский метаматеріал, який гіпотетично можна «розкласти» на певну кількість підшарів з товщиною, що дорівнює постійній елементарній комірці (рис. 7), може бути досліджена на чисельні значення комплексних ефективних відносних проникностей.

Запропонований чисельно-аналітичний підхід є фактично математичним інструментом теоретичної характеристики плоских метаматеріалів на рівні

гіпотетичного атома у НВЧ-діапазоні.

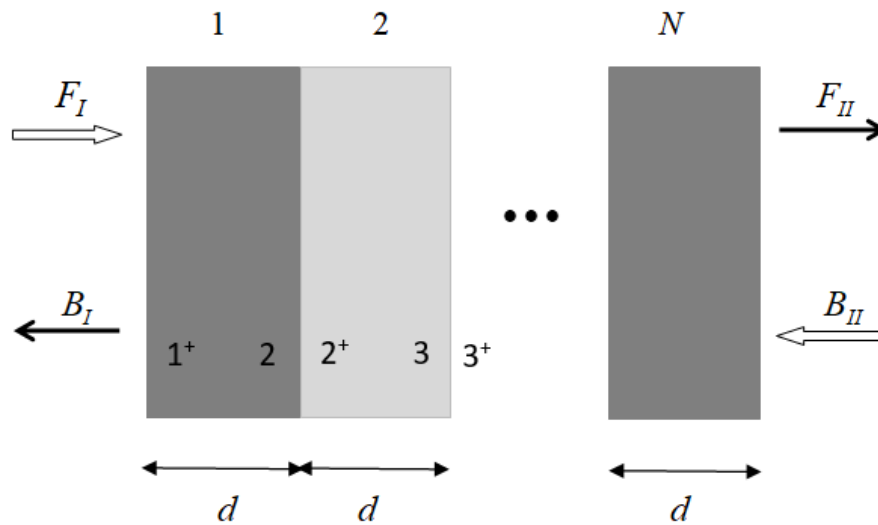


Рис. 7. Метаматеріальний шар, представлений у вигляді послідовності матеріальних підшарів

Розділ 5 «НВЧ-теорія ефективного середовища для двокомпонентних магнітних метаматеріалів» присвячено створенню теорії ефективного середовища для безмежного ізотропного діелектрика з періодично вбудованими в нього феромагнітними металевими включеннями циліндричної і сферичної форм, намагніченими повністю або частково під дією зовнішнього постійного магнітного поля, рис.8.

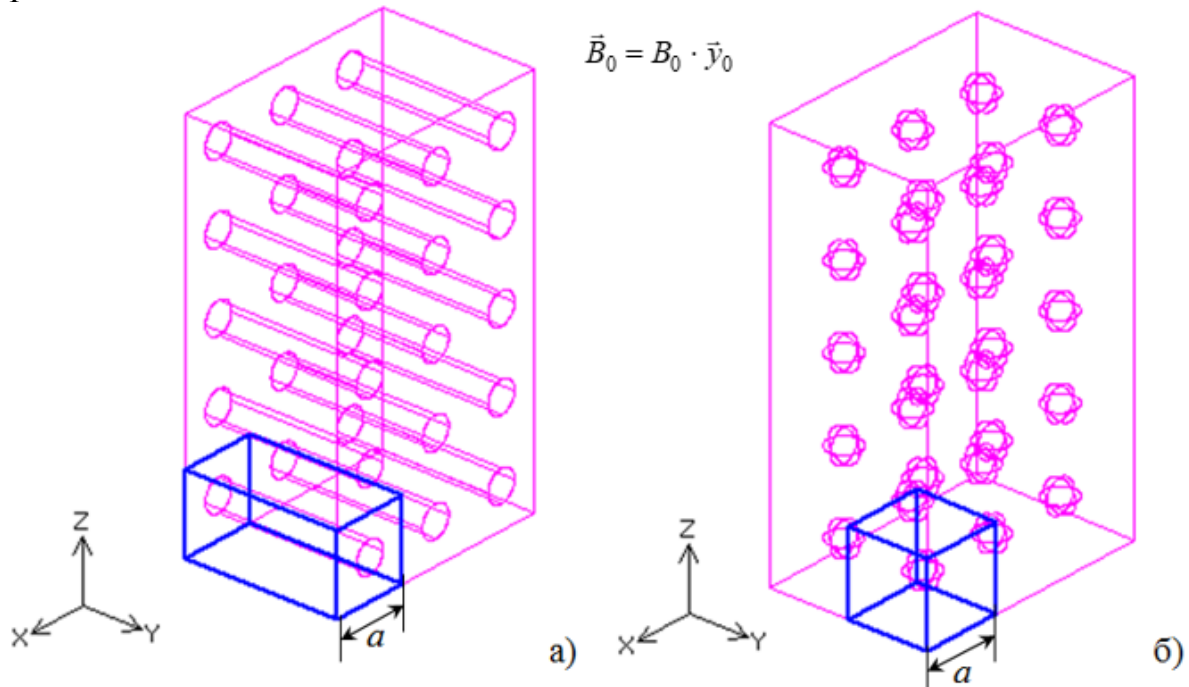


Рис. 8. Фрагменти метаматеріалів із виділеними в них елементарними комірками

Уперше отримані тензори ефективної магнітної проникності для таких магнітних метаматеріалів. Показано, що у випадку повного намагнічування включень тензор ефективної магнітної проникності має вигляд:

$$\hat{\mu}_{eff} = \begin{bmatrix} \mu & 0 & -ik \\ 0 & \mu_0 & 0 \\ ik & 0 & \mu \end{bmatrix}, \quad (3)$$

у той час як у випадку частково намагнічуваних включень тензор ефективної магнітної проникності має вигляд:

$$\hat{\mu}_{eff} = \begin{bmatrix} \mu & 0 & -ik \\ 0 & \mu_y & 0 \\ ik & 0 & \mu \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де елементи μ і k тензорів (3) і (4) суттєво відрізняються між собою.

Уперше показано, що метаматеріали в НВЧ-діапазоні мають такі властивості:

- при повній магнетизації включень поширення електромагнітної (ЕМ) хвилі в напрямку зовнішнього намагнічування або в напрямку, що є перпендикулярним до зовнішнього намагнічування, характеризується тим, що тангенс кута магнітних втрат поза резонансів коливається в межах $10^{-3} \div 10^1$ для циліндричних включень і є на два порядки вищим для сферичних включень;

- при частковому намагнічуванні включень елементи тензора ефективної магнітної проникності мають малі магнітні втрати, причому в разі циліндричних включень такі втрати на два порядки вищі, ніж у разі сферичних втрат;

- при частковому намагнічуванні включень поширення ЕМ-хвилі в напрямку зовнішнього намагнічування або в напрямку, що є перпендикулярним до зовнішнього намагнічування, характеризується тим, що тангенс кута магнітних втрат поза резонансів коливається в межах $10^{-8} \div 10^1$;

- як при частковому, так і при повному намагнічуванні включень, в залежності від напрямку поширення ЕМ-хвилі, у розглянутих метаматеріальних середовищах виявляються ефекти, що супроводжуються: а) приростом дійсної частини ефективної відносної магнітної проникності; б) ультранизькими значеннями дійсної частини ефективного коефіцієнта заломлення; в) негативними значеннями дійсної частини ефективної відносної магнітної проникності.

У даному розділі також уперше отримано умови відсутності втрат у слабкому полі для композитних середовищ у вигляді безмежного ізотропного діелектрика з періодично вбудованими у нього частково намагнічених металевих феромагнітних включень циліндричної і сферичної форми. Уперше показано, що при різних значеннях зовнішнього постійного магнітного поля дані магнітні метаматеріали можуть замикати проходження монохроматичних компонентів НВЧ-хвилі, забезпечувати її повне проходження в заданому діапазоні частот або інвертувати її фазу. Отримані вище результати дозволяють використовувати досліджувані магнітні метаматеріали для синтезу штучних феритів НВЧ-діапазону, які можуть бути використані для:

- створення метаферитних ізоляторів, метаферитних фазообертачів і метаферитних циркуляторів НВЧ-діапазону;
- створення керованих метаповерхонь НВЧ-діапазону;
- створення альтернативних до вже існуючих НВЧ-фільтрів, конверторів і

ретрансляторів/транспондерів ЕМ-хвиль;

– створення компактних бездротових систем передачі електричної енергії в НВЧ-діапазоні з високими значеннями коефіцієнта корисної дії.

Розділ 6 «НВЧ-мініатюризація прямокутних мікросмушкових антен із композитними підкладками» присвячено розробці принципів мініатюризації мікросмушкових антен НВЧ-діапазону з подальшим поліпшенням характеристик ближнього та далекого полів таких антен.

Уперше показано, що можна домогтися суттєвої мініатюризації профілю прямокутної мікросмушкової антени і поліпшення її коефіцієнта посилення за потужністю і коефіцієнта корисної дії при використанні в якості підкладки метаматеріалів/композитів з приростом ефективної відносної діелектричної проникності і/або ефективної відносної магнітної проникності. Причому, поліпшення даних параметрів антен також відбувається при збільшенні кількості метаматеріальних шарів у випадку композитних підкладок, при збереженні їх об'ємних профілю. Більш того, мікросмушкові антени з метаматеріальними/композитними підкладками можуть бути мультидіапазонними і мультиспрямованими і є більш узгодженими в порівнянні з мікросмушковими антенами з діелектричними підкладками.

У даному розділі вперше отримані основні співвідношення між резонансною частотою хвилі f_r і бажаною товщиною метаматеріальної підкладки антени d або резонансною довжиною хвилі λ_r і бажаним значенням ефективної відносної діелектричної проникності ε_r ($\mu_r = 1$) метаматеріальної підкладки (рис. 9) в припущенні мінімально можливого об'ємного профілю антени з немагнітною підкладкою з приростом ефективної відносної діелектричної проникності в інтервалі частот від 10 до 35 ГГц:

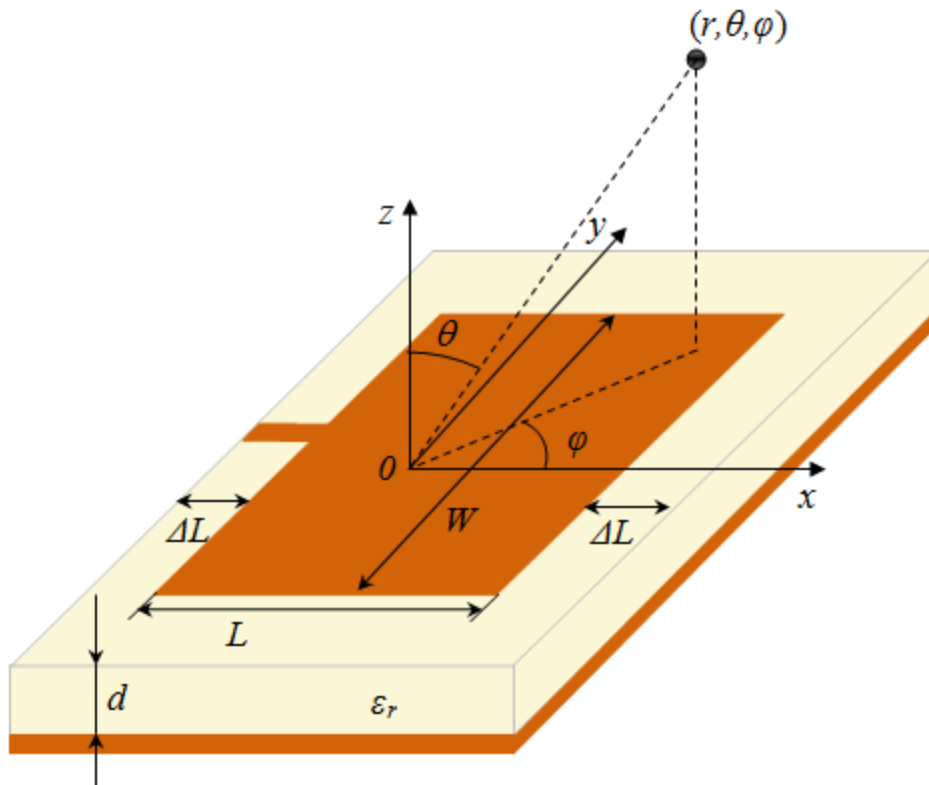


Рис. 9. Прямокутна мікросмушкова антена, що живиться через патч

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{1}{16\sqrt{6\sqrt{2}}} \sqrt{\frac{(c/f_r)^3}{d}} \left(1 - \frac{1}{16^4\sqrt{54\sqrt{2}}} \left(\frac{c}{f_r d} \right)^{3/4} \right) - 0.824 \cdot d, \\ W &= \frac{1}{16\sqrt{6\sqrt{2}}} \sqrt{\frac{(c/f_r)^3}{d}}, \\ \varepsilon_r &= \frac{512\sqrt{2}}{f_r} c \cdot d, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

при цьому лінійні розміри площини підкладки запропоновано обчислювати за формулами:

$$\left. \begin{aligned} L_a &= L + 4.944 \cdot d, \\ W_a &= W + 6d \frac{\ln 4}{\pi}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Показано, що зменшення об'ємного профілю антени на завданій частоті може досягати 80% і більше, табл. 1 (усі розрахунки у таблиці було виконано на частоті 15 ГГц і для товщини підкладки $d = 0,0004$ м).

Табл. 1.

Відповідність між бажаною товщиною підкладки, її відносною діелектричною проникністю і виграшем у профілі мініатюризованої мікросмушкової антени на частоті 15 ГГц

d , м	ε_r	Виграш, %
0,0015	54,31	21,43
0,0014	50,69	25
0,0013	47,07	23,53
0,0012	43,45	16,67
0,0011	39,82	17,58
0,001	36,2	22,73
0,0009	32,58	17,39
0,0008	28,96	23,08
0,0007	25,34	23,17
0,0006	21,72	27,45
0,0005	18,1	31,05
0,0004	14,48	41,5
0,0003	10,86	56,7
0,0002	7,24	88,87

Також у даному розділі вперше показано, що при заміні діелектричної підкладки на метаматеріальну з приростом ефективної відносної діелектричної проникності або ефективної відносної магнітної проникності інтенсивність полів у ближній зоні істотно зменшується, що є позитивним результатом з точки зору негативного впливу

електромагнітного випромінювання на живі істоти і відкриває широкі перспективи для використання таких метаматеріальних антен у мобільному зв'язку, а також при виробництві гаджетів.

При моделюванні параметрів антен із метаматеріальними/композитними підкладками було розглянуто: 1) одношарові немагнітні (з приростом тільки ефективної відносної діелектричної проникності) з циліндричними і сферичними включеннями; 2) одношарові магнітні (з приростом тільки ефективної відносної магнітної проникності) з циліндричними включеннями; 3) двошарові немагнітні (включення одного з шарів мають бути намагнічені відповідним чином) з циліндричними включеннями. Показано, що найбільшій мініатюризації вдається досягти у випадку антен з магнітними підкладками, проте у сукупності всіх параметрів ближнього і далекого поля, що розглядалися, найбільш перспективними є антени з мультишаровими композитними немагнітними підкладками.

ВИСНОВКИ

У дисертації створено новий науковий напрямок дослідження нерезонансних метаматеріалів методом теорії ефективного середовища. Головною проблемою, на вирішення якої спрямовано цей метод, є отримання частотно-залежних виразів для комплексних ефективних відносних проникностей розглянутих у роботі метаматеріальних/композитних середовищ і об'єктів. У ході дослідження було також виявлено та проаналізовано кілька нових фізичних явищ.

Об'єктом досліджень, проведених у цій дисертаційній роботі, є нерезонансні двокомпонентні метаматеріали, що являють собою однорідні й ізотропні діелектричні матриці або середовища з періодично вбудованими в них металевими включеннями циліндричної та сферичної форм.

Теоретично й експериментально було показано, що якщо включення таких метаматеріалів виготовлені з немагнітних металів, то в НВЧ-діапазоні ці метаматеріали можуть мати приріст ефективної відносної діелектричної проникності і діамагнітну ефективну відносну магнітну проникність (точніше, їх дійсну частину). Уперше з'ясовано фізичні основи цих явищ. НВЧ-теорію ефективного середовища було розроблено в даній роботі для цих метаматеріальних середовищ.

Також у даній дисертації було розвинено НВЧ-теорію ефективного середовища на випадок включень із феромагнітних металів, частково та повністю намагнічених зовнішнім постійним магнітним полем. Ця теорія показала, що в залежності від орієнтації зовнішнього поля намагнічування і напрямку поширення первинної ЕМ-хвилі можуть спостерігатися такі фізичні явища, які супроводжуються: приростом ефективної відносної магнітної проникності, низькими позитивними і навіть негативними її значеннями (точніше, її дійсної частини). Важливою особливістю всіх розглянутих у даній роботі метаматеріальних середовищ (з магнітними і немагнітними включеннями) є наявність у них малих втрат майже у всьому розглянутому діапазоні частот.

Незважаючи на те, що дана дисертаційна робота в основному має теоретичний характер (лише один розділ її присвячено експериментальним дослідженням), основні її результати та висновки орієнтовані виключно на практичне використання.

Більш того, у третьому розділі запропоновані нові підходи для вимірювання комплексних ефективних проникностей метаматеріалів у НВЧ-діапазоні. Також у даному розділі на основі результатів експериментів робиться висновок, що розглянуті метаматеріали можуть бути використані для створення НВЧ-хвильоводів і резонаторів, альтернативних вже існуючим, а результати вимірювань повністю підтверджують результати другого (теоретичного) розділу. Більш того, додаткові вимірювання з використанням магнітних метаматеріалів показали, що такі штучні матеріали можуть допомагати покращувати деякі характеристики ближнього та далекого полів мікросмужкових антен.

У п'ятому розділі представлено основи НВЧ-теорії ефективного середовища для штучного магнітного метаматеріалу. При цьому окремо розглянуті і досліджені випадки часткового і повного намагнічування металевих включень. Показано, що в залежності від напрямку поширення первісною ЕМ-хвилі щодо напрямку зовнішнього намагнічування такі метаматеріали можуть бути використані при створенні альтернативних (вже існуючим) фільтрів, конверторів фази, транспондерів і ретрансляторів ЕМ-хвиль НВЧ-діапазону, а також при створенні керованих селективних метаповерхонь НВЧ-діапазону.

Шостий розділ присвячено питанням конструювання мініатюрних прямокутних мікросмужкових НВЧ-антен із метаматеріальними підкладками на основі нерезонансних метаматеріалів, що були розглянуті у попередніх розділах. У цьому розділі вдалося показати, що використання розглянутих метаматеріалів для створення підкладок мікросмужкових антен дозволяє істотно мінімізувати антенний профіль (до 80%) з одночасним поліпшенням таких параметрів далекого поля антени, як коефіцієнт посилення за потужністю і коефіцієнт корисної дії. Крім того, у цьому розділі також доведено, що якщо підкладки антен складаються з двох шарів метаматеріалу таким чином, що ефективна відносна діелектрична проникність такої підкладки більша за одиницю, а її відносна магнітна проникність близька до одиниці, то вдається досягти найбільших значень для коефіцієнта посилення за потужністю та коефіцієнта корисної дії та істотно невеликих інтенсивностей ближніх полів, що важливо при проектуванні антен для гаджетів і при використанні їх у мобільному зв'язку. Важливо також відзначити, що згадані вище антени й антени з магнітними метаматеріальними підкладками можуть бути мультисмуговими і мультиспрямованими, тобто містять вторинні корисні гармоніки з випромінюванням у напрямках, відмінних від напрямків випромінювання головної гармоніки.

Перспективні напрямки подальших досліджень. Незважаючи на присутність спадкоємності подачі матеріалу в даній дисертаційній роботі і логічної завершеності матеріалу її розділів, дисертант чітко бачить необхідність у логічному продовженні досліджень прикладного характеру на основі вже отриманих у дисертації результатів. Зокрема, автор дисертації вважає за необхідне розпочати дослідження зі створення на основі розглянутих у дисертації метаматеріалів НВЧ-хвильоводів і резонаторів, альтернативних вже існуючим. Також автор дисертації вважає за необхідне створення на основі розглянутих метаматеріалів таких приладів НВЧ-діапазону з керованими властивостями, як ізоляторів, фазообертачів, циркуляторів, фільтрів, конверторів

фази та транспондерів, керованих метаповерхонь. Дані прилади планується створювати на основі метаферитного середовища, запропонованого у п'ятому розділі. Управління властивостями цих приладів передбачається здійснювати за рахунок керування величиною намагнічування феритних металевих включень метаферитного середовища. Управління намагнічуванням феритних металевих включень, як і врахування форми самих включень, також повинні стати важливими моментами у майбутніх дослідженнях зі створення мініатюрних мікросмушкових мультиспрямованих мультідіапазонних антен із діапазоном частот, що перестроюється, а також скануючих антенних решіток, створених на основі таких мініатюрних антен.

Зараз на кафедрі теоретичної радіофізики ХНУ імені В.Н. Каразіна триває робота за участю автора дисертації щодо створення прототипу антенно-фідерної системи за планарною друкованою технологією з використанням підкладок із метаматеріалу (метаповерхні), яка б мала корисні властивості щодо низького рівня прямої взаємодії між випромінюючим і приймаючим портами, компактністю, малою вагою, діапазонністю та достатньою спрямованістю для використання у радіолокації близької дії. Отримані в дисертації результати виявилися дуже доречними на всіх етапах планування та проведення досліджень із цієї науково-дослідної роботи, а також з іншої науково-дослідної роботи, згідно з якою на кафедрі теоретичної радіофізики проводяться дослідження щодо резонансних метаматеріалів НВЧ-діапазону.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці (статті у фахових журналах), в яких опубліковані **основні** наукові результати дисертації:

- [1]. Zouganelis G. Two Layer Magnetodielectric Metamaterial with Enhanced Dielectric Constant as a New Ferrite Like Material / Georgios Zouganelis, Oleg Rybin // Japanese Journal of Applied Physics. – 2006. – Vol. 45, No. 44. – L.1175-1178 (внесок здобувача полягає у виготовленні резонатора, проведенні вимірювань і моделюванні ефективних параметрів).
- [2]. Rybin O. An Improved Broadband Method for the Evaluation of Effective Parameters of Slab Metamaterials / O. Rybin, T. Abbas, M. Raza, T. Nawaz // AEUE: International Journal of Electronics and Communications. – 2008. – Vol.62, No.10. – P. 762-767 (автору дисертації належить постановка задачі та отримання всіх аналітичних формул).
- [3]. Rybin O. Evaluation of Layer Properties of Effective Parameters of Metallic Rod Metamaterials in GHz Frequencies / O. Rybin, M. Raza, T. Nawaz, and T. Abbas // AEUE: International Journal of Electronics and Communications. – 2009. – Vol. 63, No. 8. – P. 648-652 (автору дисертації належить постановка задачі та отримання всіх аналітичних формул).
- [4]. Rybin O. Enhancement of Dielectric Constant in Metal-Dielectric Metamaterials / O. Rybin // The African Review of Physics. – 2009. – Vol. 3, No. 1. – P. 49-55.
- [5]. Rybin O. Microwave Effective Medium Approximation for Two-Component Metamaterial with Saturated Cylindrical Ferrite Like Metal Inclusions / O. Rybin and T. Nawaz // Telecommunications and Radio Engineering. – 2009. – Vol. 68, No. 7. – P. 567-

575 (автору дисертації належить постановка задачі, отримання всіх аналітичних виразів, проведення чисельного моделювання та аналіз отриманих результатів).

[6]. Rybin O. Enhancement of the Dielectric Constant in Magneto-Dielectric Metamaterial Substrates / O. Rybin, G. Zouganelis // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2009. – Vol. 68, No. 9. – P. 835-840 (внесок здобувача полягає у виготовленні резонатора і метаматеріальних зразків, проведенні вимірювань і моделюванні ефективних параметрів).

[7]. Rybin O. Effective Electric and Magnetic Properties of the Infinite Chain of Circular Metallic Cylinders / O. Rybin, M. Raza // *The International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2009. – Vol.31, No.2. – P. 61-66 (автору дисертації належить постановка задачі, отримання всіх аналітичних виразів, проведення чисельного моделювання та аналіз отриманих результатів).

[8]. Rybin O. Effective Electromagnetic Response of the Infinite Chain of Metallic Cylinders Immersed in Isotropic Dielectric Matrix / O. Rybin, M. Raza, S. Vyalkina // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2010. – Vol. 69, No. 6. – P. 473-480 (автору дисертації належить постановка задачі, отримання всіх аналітичних виразів і проведення чисельного моделювання).

[9]. Rybin O. Microwave Homogenization for Two-Component Metamaterial with Spherical Metal Ferrite Like Inclusions / O. Rybin, A. Pitafi, T. Nawaz // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2010. – Vol. 69, No. 7. – P. 565-573 (автору дисертації належить постановка задачі, отримання всіх аналітичних виразів, проведення чисельного моделювання та аналіз отриманих результатів).

[10]. Rybin O. Long Wave Layer-Specific Representation of the Optical Properties of Slab Metamaterials / O. Rybin, M. Raza // *The International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2010. – Vol.32, No. 4. – P. 207-218 (автору дисертації належить постановка задачі, отримання всіх аналітичних виразів і проведення чисельного моделювання).

[11]. Rybin O. N. Microwave Effective Electromagnetic Response of Sandwich Like Magnetic Composite / O. N. Rybin, A. I. Pitafi, S. P. Vyalkina // *Радиофизика и электроника*. – 2011. – Том. 16, № 1. – С. 19-23 (автору дисертації належить постановка задачі, проведення чисельного моделювання, аналіз отриманих результатів).

[12]. Rybin O. Microwave Effective Medium Theory for Two-Component Magnetic Metamaterials / O. Rybin // *The International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2011. – Vol. 35, No. 2. – P. 93-101.

[13]. Rybin O. Nonresonance Effective Electromagnetic Response of Sandwich Metmaterial with Ferrite Inclusions / O. Rybin, K. Yemelyanov, and T. Nawaz // *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. – 2011. – Vol. 7, No. 2. – P. 170-183 (автору дисертації належить постановка задачі та отримання всіх аналітичних формул).

[14]. Rybin O. N. Microwave Evaluation of Effective Electromagnetic Properties of Metal-Dielectric Metamaterial With Spherical Inclusions / O. N. Rybin, A. I. Pitafi // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2011. – Vol. 70, No. 18. – P. 1607-1615 (автору дисертації належить постановка задачі, отримання всіх аналітичних виразів,

проведення чисельного моделювання та аналіз отриманих результатів).

- [15]. Rybin O. Negative Permeability Frequency Conditioning for Two-Component Metamaterial Media with Ferrite Like Inclusions / O. Rybin // *The International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2012. – Vol. 38, No. 1. – P. 9-15.
- [16]. Rybin O. Effective Microwave Magnetic Response of Two-Component Metaferrite / O. Rybin // *The International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2012. – Vol. 40, No. 3. – P. 185-193.
- [17]. Rybin O. An Advanced Optimization Technique for Layer-specific Characterization of Slab Metamaterials / O. Rybin // *International Journal of Modern Physics C*. – 2013. – Vol. 24, No. 4. – P. 1350019-1-13.
- [18]. Rybin O. Effective Permeability Tensor of Partially Magnetized Two-Component Metaferrites / O. Rybin // *Modern Physics Letters B*. – 2014. – Vol. 28, No. 25. – P. 1450199-1-6.
- [19]. Rybin O. Unusual Microwave Effective Properties of Two-Component Metaferrites / O. Rybin // *The International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2014. – Vol. 46, No. 3. – P. 519-526.
- [20]. Rybin O. Microwave Miniaturization Concept for Narrow Band Rectangular Patch Antenna Structures / O. Rybin // *The International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 2015. – Vol. 48, No. 1. – P. 69-75.
- [21]. Rybin O. Feedback Magnetization of Ultra-Low Index Irradiative Structure / O. Rybin, S. Shulga // *Modern Physics Letters B*. – 2015. – Vol. 29, No. 29. – P. 1550179-1-6 (автору дисертації належить постановка задачі виготовлення метаматеріального зразка і мікросмужкової антени, проведення вимірювань та чисельне моделювання).
- [22]. Rybin O. Profile Miniaturization and Performance Improvement of a Rectangular Patch Antenna by Using Magnetic Metamaterial Substrates // O. Rybin, S. Shulga // *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. – 2016. – Vol. 26, Issue 3. – P. 254-261 (автору дисертації належить постановка задачі, отримання всіх аналітичних виразів, чисельне моделювання).
- [23]. Рыбин О. Н. Автоматизированное СВЧ проектирование миниатюризированных прямоугольных микрополосковых антенн с метаматериальными подложками / О. Н. Рыбин, С. Н. Шульга // *Радиофизика і радіоастрономія*. – 2016. – Том 21, № 2. – С. 141-147 (автору дисертації належить постановка задачі, отримання всіх аналітичних виразів, аналітичне та чисельне моделювання).
- [24]. Rybin O. Utilization of Double Metal-Dielectric Composite Substrates for Microwave Miniaturization of Rectangular Patch Antennas / O. Rybin, S. Shulga // *Journal of Computational Electronics*. – 2016. – Vol. 15, No. 3. – P. 1023-1027 (автору дисертації належить постановка задачі, отримання всіх аналітичних виразів, аналітичне та чисельне моделювання).
- [25]. Рыбин О. Н. Эффективные магнитные СВЧ отклики частично намагниченного двухкомпонентного метаферрита со сферическими включениями / О. Н. Рыбин, С. Н. Шульга, О. В. Багацкая // *Вестник Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина. Серия “Радиофизика и электроника”*. – 2016. – Выпуск 25, С. 26-33 (автору дисертації належить постановка задачі, отримання всіх аналітичних виразів).

[26]. Rybin O. An Advanced Microwave Effective Medium Theory for Two-Component Non-Magnetic Metamaterials: Fundamentals and Antenna Substrate Application / O. Rybin, S. Shulga // *Journal of Computational Electronics*. – 2017. – Vol. 16, No. 2. – P. 369-381 (автору дисертації належить постановка задачі, отримання всіх аналітичних виразів, аналітичне та чисельне моделювання).

[27]. Rybin O. Magnetically Tuned Two-Component Microwave Metamaterial / O. Rybin, S. Shulga // *PIER M*. – 2017. – Vol. 56. – P. 63-70 (автору дисертації належить постановка задачі, отримання всіх аналітичних виразів, аналітичне та чисельне моделювання).

Опубліковані праці **апробаційного** характеру (**тези міжнародних симпозіумів та конференцій**):

[28]. Zouganelis G. Study of Ultra Low Index ($0 < \varepsilon < 1$) Metamaterial Using a Patch Antenna / G. Zouganelis, F. Soma, O. Rybin, H. Ohsato // *Proceedings of The 1st Asia-Oceania Ceramic Federation Conference (AOCF'2005) Convened in Conjunction with The 18th Fall Meeting of The Ceramic Society of Japan, 27-27 September 2005, Osaka (Japan)*. – Vol. 18. – P. 1PD41.148.

[29]. Zouganelis G. Study of Enhancement of Internal Magnetic Constants of Metamaterials Made From Layers of Magnetic Wires / G. Zouganelis, O. Rybin, H. Ogawa, H. Ohsato // *Proceedings of The 1st Asia-Oceania Ceramic Federation Conference (AOCF'05) Convened in Conjunction with The 18th Fall Meeting of The Ceramic Society of Japan, 27-27 September 2005, Osaka (Japan)*. – Vol. 18. – P. 1PD42.148.

[30]. Rybin. O. An Improved Broadband Method to Evaluate Effective Parameters of Slab Metamaterials in the Microwave Frequency Range // O. Rybin, M. Raza, T. Nawaz, and T. Abbas // *Proceedings of 10th International Symposium on Advanced Materials (ISAM'2007), 3-7 September 2007, Islamabad (Pakistan)*. - P. 57-62.

[31]. Rybin O. Unusual Properties of Two-Component Metamaterial Medium with Metal Ferrite Like Inclusions in the Microwave Frequency Range / Rybin, T. Nawaz, A. Pitafi // *Proceedings of 7th International Kharkov Symposium On Physics and Engineering of Microwave, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2010), 21-26 June 2010, Kharkov (Ukraine)*. – P. 1-3. doi: [10.1109/MSMW.2010.5546198](https://doi.org/10.1109/MSMW.2010.5546198)

[32]. Rybin O. Long Wave Layer-Specific Representation of Metamaterial Slabs in Microwave Frequency Range / O. Rybin, M. Raza // *Proceedings of 13th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET'2010), 6-8 September 2012, Kiev (Ukraine)*. – P. 1-4. doi: [10.1109/MMET.2010.5611364](https://doi.org/10.1109/MMET.2010.5611364)

[33]. Rybin O. Alternative Long Wave Layer-Specific Characterization of Slab Metamaterials / O. Rybin // *Proceedings of 14th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET'2012), 28-30 August 2012, Kharkov (Ukraine)*. – P. 378-381. doi: [10.1109/MMET.2012.6331198](https://doi.org/10.1109/MMET.2012.6331198)

[34]. Rybin O. Microwave Effective Permeability Tensor of Partially Magnetized Two-Component Lossless Ferrite-Like Metamaterials / O. Rybin, L. Girinova // *Proceedings of 8th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwave, Millimeter and Submillimeter Waves, 23-28 June 2013, Kharkov (Ukraine)*. – P. 127-129. doi: [10.1109/MSMW.2013.6622188](https://doi.org/10.1109/MSMW.2013.6622188)

- [35]. Rybin O. Substrate Application of Electrically Enhanced Microwave Metamaterials / O. Rybin, S. Wang/ Proceedings of 15th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET'2014), 26-28 August 2014, Dnepropetrovsk (Ukraine). – P. 202-204. doi: [10.1109/MMET.2014.6928697](https://doi.org/10.1109/MMET.2014.6928697)
- [36]. Rybin O. Substrate Application of Magnetic Metamaterial / O. Rybin, S. Shulga // Proceeding of 10th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'2015), 21-24 April 2015, Kharkov (Ukraine). – P. 345-347. doi: [10.1109/ICATT.2015.7136879](https://doi.org/10.1109/ICATT.2015.7136879)
- [37]. Rybin O. Theorem of Two-Layer Magnetic Composite for Antenna Substrate Application / O. Rybin, S. Shulga // Proceedings of 9th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwave, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2016), 21-24 June 2016, Kharkov (Ukraine). – P. 1-3. doi: [10.1109/MSMW.2016.7538125](https://doi.org/10.1109/MSMW.2016.7538125)
- [38]. Rybin O. RLC-Circuit Effective Medium Approach for Two-Component Non-Magnetic Metamaterials / O. Rybin, S. Shulga // Proceedings of IEEE 1st Ukrainian Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON'2017), May 29-June 2, 2017, Kyiv (Ukraine). – P. 127-131. doi: [10.1109/UKRCON.2017.8100422](https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100422)

АНОТАЦІЯ

Рибін О.М. Двокомпонентні метаматеріали і мікросмужкові антени на їх основі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 - «радіофізика». – Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2018.

Дана дисертація присвячена теоретичному й експериментальному дослідженню ефективних електродинамічних властивостей двокомпонентних метало-діелектричних метаматеріалів у надвисокочастотному (НВЧ) діапазоні, а також створенню концепції мініатюризації мікросмужкових прямокутних антен НВЧ-діапазону з підкладками на основі зазначених метаматеріалів із поліпшеними характеристиками ближнього і далекого полів.

Розглянуті в дисертації метаматеріали являють собою ізотропні діелектрики (матриці) з періодично вбудованими в них металевими включеннями циліндричної або сферичної форми. У дисертації були окремо розглянуті випадки немагнітних (мідних) металевих включень і феромагнітних (залізозмісних) металевих включень. У другому випадку розглядалися режими повного та часткового намагнічування феромагнітних включень під дією зовнішнього постійного магнітного поля з позицій розповсюдження електромагнітних хвиль як у напрямку зовнішнього магнітного поля, так й перпендикулярно до цього напрямку.

Дисертація складається з шести розділів.

Перший розділ присвячений огляду літератури за темою дисертації та обґрунтуванню вибору напрямку дослідження, його мети, а також завдань, які необхідно розв'язати для досягнення мети.

Другий розділ дисертації присвячений створенню теорії ефективного середовища для безмежного ізотропного діелектрика з періодично вбудованими в нього немагнітними металевими включеннями циліндричної і сферичної форми.

Уперше отримані мікрохвильові наближення для ефективних електромагнітних відгуків для таких композитних середовищ. Уперше показано, що в НВЧ-діапазоні ці композитні середовища мають приріст ефективної відносної діелектричної проникності і діамагнітну ефективну відносну магнітну проникність, а також володіють низькими як діелектричними, так і магнітними втратами.

Уперше дано фізичне пояснення явища приросту ефективної відносної діелектричної проникності та явища діамагнітної ефективної відносної магнітної проникності для розглянутих в даному розділі безмежних немагнітних мета матеріалів.

Третій розділ дисертації присвячений експериментальному підтвердженню теорії, створеної у другому розділі. З цією метою було виготовлено композитні матеріали у вигляді діелектричних матриць паралелепіпедної форми з періодично вбудованими в них металевими включеннями циліндричної форми.

Також даний розділ присвячений вимірюванням ефективних проникностей таких метаматеріалів. У розділі розроблений і практично апробований новий та недорогий метод вимірювання ефективних проникностей метаматеріалів. Уперше експериментально показано, що метаматеріали у вигляді діелектричних матриць правильної форми з періодично вбудованими в них металевими включеннями циліндричної форми мають такі властивості:

- приріст дійсної частини ефективної відносної діелектричної проникності і діамагнітний характер дійсної частини ефективної відносної магнітної проникності;
- приріст дійсної частини ефективної відносної діелектричної і магнітної проникностей у випадку феромагнітних металевих включень;
- такі метаматеріали можуть бути використані для поліпшення характеристик далекого поля мікросмужкової антени при повному покритті її випромінювального елемента (патча) цими матеріалами;
- S-параметри даних метаматеріалів містять аномальні піки, що є обумовлені розмірним резонансом.

Четвертий розділ дисертації присвячено аналітичному дослідженню в НВЧ-діапазоні ефективних електродинамічних параметрів шаруватих метал-діелектричних композитів та розробці чисельно-аналітичного алгоритму пошарової декомпозиції плоских композитних/метаматеріальних середовищ.

Показано, що плоскі метало-діелектричні композитні середовища характеризуються приростом дійсної частини ефективної відносної діелектричної проникності і діамагнітною дійсною частиною ефективної відносної магнітної проникності, причому дані ефекти виявляються сильнішими, якщо в композиті можна виділити елементарну комірку, тобто якщо композит є метаматеріалом.

П'ятий розділ присвячено створенню теорії ефективного середовища для безмежного ізотропного діелектрика з періодично вбудованими в нього феромагнітними металевими включеннями циліндричної і сферичної форм, намагнічений повністю або частково під дією зовнішнього постійного магнітного поля. Уперше отримані тензори ефективної магнітної проникності для таких

магнітних метаматеріалів. Уперше показано, що метаматеріали в НВЧ-діапазоні мають такі властивості:

- при повній магнетизації включень розповсюдження електромагнітної (ЕМ) хвилі в напрямку зовнішнього намагнічування або в напрямку, що є перпендикулярним до зовнішнього намагнічування, характеризується тим, що тангенс кута магнітних втрат поза резонансів коливається в межах $10^{-3} \div 10^1$ для циліндричних включень і є на два порядки вищим для сферичних включень;
- при частковому намагнічуванні включень елементи тензора ефективної магнітної проникності мають малі магнітні втрати, причому в разі циліндричних включень такі втрати на два порядки вище, ніж в разі сферичних втрат;
- при частковому намагнічуванні включень розповсюдження ЕМ-хвилі в напрямку зовнішнього намагнічування або в напрямку, що є перпендикулярним до зовнішнього намагнічування, характеризується тим, що тангенс кута магнітних втрат поза резонансів коливається в межах $10^{-8} \div 10^1$;
- як при частковому, так і при повному намагнічуванні включень, в залежності від напрямку розповсюдження ЕМ-хвилі, у розглянутих метаматеріальних середовищах виявляються ефекти, що супроводжуються: а) приростом дійсної частини ефективної відносної магнітної проникності; б) ультранизькими значеннями дійсної частини ефективного коефіцієнта заломлення; в) негативними значеннями дійсної частини ефективної відносної магнітної проникності.

Теоретичні результати якісно підтверджуються експериментальними результатами, які було отримано для феромагнітних включень і відображено в третьому розділі.

У даному розділі також уперше отримано умова відсутності втрат у слабкому полі для композитних магнітних середовищ у вигляді безмежного ізотропного діелектрика з періодично вбудованими у нього частково намагнічених металевих феромагнітних включень циліндричної і сферичної форми.

Уперше показано, що при різних значеннях зовнішнього постійного магнітного поля дані магнітні метаматеріали можуть замикати проходження монохроматичних компонентів НВЧ-хвилі, забезпечувати її повне проходження в заданому діапазоні частот або інвертувати її фазу.

Отримані вище результати дозволяють використовувати досліджувані магнітні метаматеріали для синтезу штучних феритів НВЧ-діапазону, які можуть бути використані для:

- створення метаферитних ізоляторів, метаферитних фазообертачів і метаферитних циркуляторів НВЧ-діапазону;
- створення керованих метаповерхонь НВЧ діпазону;
- створення альтернативних до вже існуючих НВЧ-фільтрів, конверторів і ретрансляторів/транспондерів ЕМ-хвиль;
- створення компактних бездротових систем передачі електромагнітної енергії в НВЧ-діапазоні з високими значеннями коефіцієнта корисної дії.

Шостий розділ дисертації присвячено розробці принципів мініатюризації мікросмужкових прямокутних антен НВЧ-діапазону з подальшим поліпшенням характеристик ближнього та далекого полів таких антен.

Уперше показано, що можна домогтися суттєвої мініатюризації профілю прямокутної мікросмужкової антени і поліпшення її коефіцієнта посилення за потужністю і коефіцієнта корисної дії при використанні в якості підкладки метаматеріалів або композитів з приростом ефективної відносної діелектричної проникності і/або ефективної відносної магнітної проникності. Причому, поліпшення даних параметрів антен також відбувається при збільшенні кількості метаматеріальних шарів у випадку композитних підкладок, при збереженні об'ємного профілю антени.

У даному розділі вперше отримані основні співвідношення між резонансною частотою хвилі і бажаною товщиною метаматеріальної підкладки антени або резонансною довжиною хвилі і бажаним значенням ефективної відносної діелектричної проникності метаматеріальної підкладки в припущенні мінімально можливого об'ємного профілю антени з немагнітною підкладкою з приростом ефективної відносної діелектричної проникності.

Також у даному розділі вперше показано, що при заміні діелектричної підкладки на метаматеріальну підкладку з приростом ефективної відносної діелектричної проникності або ефективної відносної магнітної проникності інтенсивність полів у ближній зоні істотно зменшується, що відкриває широкі перспективи для використання таких метаматеріальних антен у мобільному зв'язку, а також при виробництві гаджетів. При цьому, найбільш корисним виявляється використання багатосферних немагнітних композитних підкладок, що містять один магнітний метаматеріальний шар.

Ключові слова: електромагнітні хвилі; надвисокі частоти; метаматеріали і композити; теорія ефективного середовища; S-параметри; ферити; мікросмужкові антени.

ABSTRACT

Rybin O. Two-Component Metamaterials and Patch Antennas on Them. – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the scientific degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences on specialty 01.04.03 - «Radiophysics». – V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2018.

The dissertation is dedicated to the theoretical and experimental investigation of the effective properties of two-component metal-dielectric metamaterials as well as the principles of miniaturization of microwave patch antennas on the metamaterials and improving the far near and field parameters of such antennas.

The above mentioned metamaterials are homogeneous and isotropic dielectrics (matrices) with periodically imbedded metal inclusions of cylindrical and spherical shape. The case of non-magnetic metal (copper) inclusions and the case of ferromagnetic metal inclusions are considered in the dissertation. The mode of fully saturated inclusions and the mode of partially saturated inclusions by bias dc magnetic field are considered in the second case in the terms of wave propagation in the direction of external magnetic field and in the direction transverse to the direction of external magnetic field.

The dissertation consists of six chapters.

First chapter is dedicated to the reference review regarding the topic of the dissertation as well as the substantiation of choice of the topic.

Second chapter is dedicated to the creation of effective medium theory for unbounded isotropic dielectric with periodic embedded non-magnetic metal inclusions of cylindrical and spherical shape.

Microwave approximations for tensors of the both effective relative permittivity and effective relative permeability are obtained for the first time for the mentioned composite media. It is shown for the first time that the considered metamaterial media possess the enhancement of effective relative permittivity and diamagnetic effective relative permeability in the microwave frequency range as well as they have low dielectric and magnetic losses in the microwave frequency range.

Physical interpretation of the phenomenon of enhancement of the effective relative permittivity of non-magnetic metamaterials considered as well as their diamagnetic relative permeability in this chapter is made for the first time.

Third chapter is dedicated to the experimental confirmation of the theory created in the second chapter. In order to do that the metamaterial samples were fabricated. The metamaterials as dielectric matrices of parallelepiped form with periodical imbedded metal inclusions of cylindrical shape.

The measurements of the effective relative permittivity and permeability of metamaterials were performed in this chapter as well as the description of a cheap measurement method. It is shown for the first time that metamaterials presented as dielectric matrices with periodically imbedded metal inclusions of cylindrical form, possess the properties:

- enhancement of real part of the effective relative permittivity as well as diamagnetic effective relative permeability;
- S-parameters have anomalous peaks caused by dimensional resonances;
- enhancement of real part of the effective relative permeability for the case of ferric inclusions;
- they can be used for improving the far field parameters of patch antennas if the antenna patch is covered by the metamaterials.

Fourth chapter is dedicated to the creating of hybrid method of layer-wise decomposition of slab metamaterial media in the direction perpendicular to the lateral sides of metamaterial media.

It is shown that flat metal-dielectric composites can have the enhancement of effective relative permittivity and diamagnetic effective relative permeability in the microwave frequency range. Moreover, the last phenomena are strongest if the above composites are metamaterials.

Fifth chapter is dedicated to the creation of effective medium theory for unbounded isotropic dielectric with periodic embedded ferric inclusions of cylindrical and spherical shape. It is assumed that the inclusions are fully or partially magnetized by an external bias dc magnetic field. Microwave approximation for tensor of the effective relative permeability is obtained for the first time for the mentioned composite media. It is shown for the first time that the considered metamaterials possess in the microwave frequency range the next properties:

- if the inclusions are fully magnetized, then the wave propagation in the direction of bias magnetic field or transverse to it the magnetic loss is of order $\sim 10^{-3} \div 10^1$ for cylindrical inclusions and it is of order $\sim 10^{-1} \div 10^2$ for spherical inclusions (out of the resonances) in the microwave frequency range;
- if the inclusions are partially magnetized, the tensor of effective relative permeability has a low loss diagonal element while its order is always for 10^2 larger for cylindrical inclusions in the microwave frequency range
- if the inclusions are partially magnetized, then the wave propagation in the direction of bias magnetic field or transverse to it the magnetic loss is of order $\sim 10^{-8} \div 10^1$ (out of the resonances) regardless the shape of inclusions in the microwave frequency range;
- independently on the magnetization level, the magnetic metamaterials reveal three different phenomena subject to the direction of wave propagation: a) enhancement of the effective relative permeability; b) ultra-low refractive index; c) negative values of the effective relative permeability.

Theoretical results are qualitatively confirmed by experimental results of made in the third chapter for ferromagnetic inclusions.

It is also obtained in this chapter for the first time the conditions of absence of low-field losses are obtained for an unbounded isotropic dielectric with periodic embedded ferric partially magnetized inclusions of cylindrical and spherical shape.

It is obtained for the first time that the considered magnetic metamaterials can block the microwave monochromatic wave propagation or can fully transmit the microwave monochromatic wave or can transmit the microwave monochromatic wave with inverting its phase subject to the value of dc bias magnetic field. The obtained results enable us to use the considered magnetic metamaterials for the synthesis of novel artificial microwave ferrites to be able to use for creating:

- metaferrite isolators, metaferrite phase shifters, metaferrite circulators;
- alternative microwave filters, alternative microwave convertors, alternative microwave transponders;
- tuneable microwave metasurface;
- compact microwave wireless power transfer systems with high efficiency.

Sixth chapter is dedicated to the creation of principles of the miniaturization of microwave patch antennas with improved near/far field parameters.

It is shown for the first time that a considerable miniaturization of profile of a microwave patch antenna with an improvement of power gain and efficiency by using metamaterial/layered composite substrates with enhancement in the effective relative permittivity and/or permeability. Moreover, the larger number of layers the better improvement of power gain and efficiency if the volume profile is kept unchanged.

The basic relation between the resonant frequency and desired thickness of metamaterial/composite substrate or between the resonant wavelength and desired effective relative permittivity of metamaterial/composite substrate is obtained in this chapter for the first time in assuming that maximum miniaturization of the volume profile is achieved for a microwave patch antenna with non-magnetic substrate with enhanced effective relative permittivity.

It is also shown in this chapter for the first time that interchanging dielectric substrate with metamaterial one having enhanced effective relative permittivity or permeability, causes a considerable increasing in the intensity of near fields of the antennas. Last result enables us to use the metamaterial patch antennas in mobile communication and for designing gadgets. Moreover the case of multilayer non-magnetic composite substrates containing one magnetic metamaterial layer is a most useful one.

Key words: electromagnetic waves; microwave; metamaterials & composites; S-parameters; ferrites; Microwave Effective Theory; patch antennas.