

Л. Ф. Політанський¹
Д. А. Вовчук¹
С. Д. Галюк¹
М. М. Хобзей¹
П. Ф. Робулець¹

ЗАСТОСУВАННЯ ПРОВІДНИКОВИХ МЕТАСТРУКТУР У РАДІОТЕХНІЧНИХ ЗАСОБАХ ДЛЯ ПЕРЕДАВАННЯ ТА ВИПРОМІНЮВАННЯ ЕМ ХВИЛЬ (ОГЛЯД)

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

Здійснено огляд основних можливих застосувань провідникових метаструктур у різних радіотехнічних пристроях. Такі структури мають унікальні та неприродні властивості, зокрема від'ємне значення діелектричної проникності. Розглянуто три різновиди провідникових метаматеріалів, а саме структури з паралельних провідників (суперлінза); провідників, що розходяться (гіперлінза), та з випадковим розміщенням провідників (щітка). Сучасний технологічний процес демонструє низку підходів та методів (від звичайного механічного упорядкування до хімічного синтезу) для реалізації розглянутих метаструктур різної форми з подальшим їх використанням у діапазоні частот від радіохвиль до оптичного і вище. Суперлінза може використовуватись як у вузькому так і у широкому діапазоні частот для передавання енергії ЕМ хвиль, включаючи пристрої фотovoltaїки, передавання зображень, ендоскопії, спектроскопії та ін. Широкозмуговий ефект був нещодавно показаний у [9] шляхом дослідження передавання енергії ЕМ хвиль між двома хвилеводами через структуру з паралельних провідників, що стало першим експериментальним підтвердженням висунутої у [12] аналітичної гіпотези. Це стало початком для розвитку широкозмугових ендоскопів на основі структур з паралельних провідників у [15], що вперше показали природу мінімумів та максимумів дисперсії функції передавання, викликаних не резонансами Фабрі–Перо, а появою вихрових мод, а також показали надійність роботи ендоскопа у разі значних кутів згину. Провідникові метаматеріали, такі як гіперлінза та щітка, можуть знайти своє застосування у антенних системах, що функціонують у широкому діапазоні частот. Порівняння їх дисперсій фактора Парсела показують різні результати через те, що гіперлінза, незважаючи на можливість випромінювати на міжрезонансних частотах, в цілому все ще залишається резонансною структурою. Натомість, структура з випадковим розміщенням провідників характеризується неперервним та гладким спектром фактора Парсела. Це стає можливим через те, що форма структури може розглядатися як набір надзвичайно великої кількості локальних гіперлінз різних параметрів, які перевипромінюють та підсилюють ЕМ поле інших локальних гіперлінз і так далі. Як результат, така метаструктура може покривати широку смугу робочих частот (від 1 до 5 ГГц [18]).

Ключові слова: метаматеріали, структури з провідників, гіперлінза, ендоскоп.

Вступ

Метаматеріали — це клас штучних матеріалів з негативними значеннями діелектричної та/або магнітної проникностей, відсутніх у природі у явному вигляді [1], [2]. Такий ефект пояснюється чисто внутрішніми характеристиками структури, що може залежати від розмірів структурних елементів, їх форми, періодом розміщення тощо.

Провідникові метаструктури — це унікальний клас метаматеріалів, що можуть бути легко сформовані для роботи у діапазоні частот від радіодіапазону до оптичного та вище [3]. Це стає можливим через різні методи виготовлення структур з провідників (СП) різних розмірів, що включає чисто механічні підходи до монтажу металевих провідників у структуровані масиви та виготовлення мікро- і наноструктур, які здатні функціонувати у терагерцовому, інфрачервоному та види-

тому діапазонах частот. До останніх можна віднести анодне електрохімічне травлення, анодизація алюмінію та вплив іонних пучків на трекові мембрани різних діелектриків. В результаті можна отримати пористі діелектричні структури товщиною до 2 мкм з діаметром пор 20 нм [4]—[6]. Це стало причиною інтенсивного вивчення СП та метаматеріалів в цілому, де структурні складові є елементами різної форми [2], [3], [7]. Найвідомішими серед СП є суперлінзи — структури з паралельним розміщенням провідників; гіперлінзи — структури з провідників, що розходяться під визначеним кутом один відносно одного; та так звані СП щітки — структури з випадковим розміщенням провідників. *Метою роботи* є огляд сучасних застосувань СП для різних радіотехнічних пристроїв та засобів телекомунікацій, а також обговорення найможливіших варіантів використання таких метаматеріалів.

Структура з паралельних провідників

Структура, що складається з впорядковано розміщених паралельних провідників (СПП) з заданими значеннями довжини провідників L , діаметра $2r$ та періоду їх розміщення a у діелектричній матриці, називається суперлінзою (рис. 1) і знаходить своє використання у задачах, описаних у [3], [8], [9].

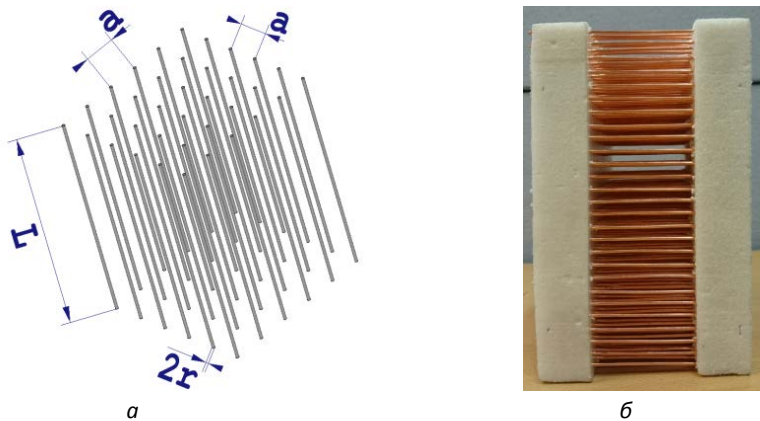


Рис. 1. Структура, що складається з паралельних металевих провідників, довжиною L , діаметром $2r$ та періодом їх розташування: а — CST модель; б — експериментальний зразок [9]

Перш за все, СПП є широко досліджуваним з метою використання при передаванні зображень. Як показано у одних з перших робіт, це стало можливим на частотах резонансів Фабрі–Перо структури [10]—[11]. Один з прикладів показаний на рис. 2 [11]. Принцип роботи полягає в тому, що антена, яка має форму бажаної для передавання фігури, розміщена навпроти переднього інтерфейсу СПП на відстані, що не перевищує значення періоду розташування провідників метаструктури. У роботі [10] подано результати двох експериментальних досліджень такої суперлінзи у мікрохвильовому діапазоні частот (894 та 1034 кГц). Як видно з порівняння розподілів електричних полів, що фіксуються на приймальній стороні (рис. 2б — правий верхній та правий нижній), такий пристрій може функціонувати тільки на резонансній частоті СПП, оскільки відображення фігури, показаній справа внизу рис. 2б, є нечітким.

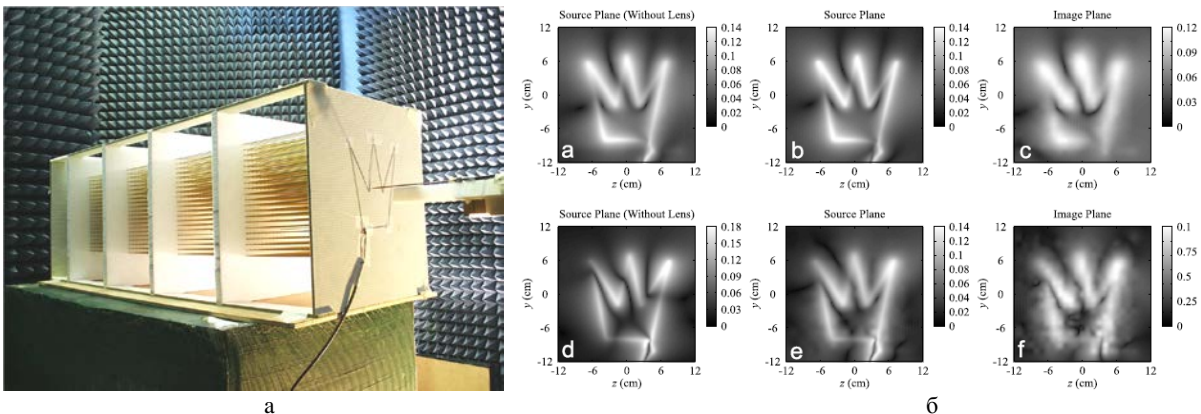


Рис. 2: а — структура з паралельних провідників, що використовувалась у [10] для передавання зображень; б — отримані зображення на частоті резонансу Фабрі–Перо

Описаний вище підхід до передавання зображень і енергії ЕМ хвиль в цілому має основний недолік, що полягає у прив'язаності робочої частоти до загальних розмірів провідникової структури. Вперше ідея широкосмугового передавання була висунута в [12], де СПП використовувалось як ефективна багатопарова структура між емітером та елементом фотовольтаїки як показано на рис. 3.

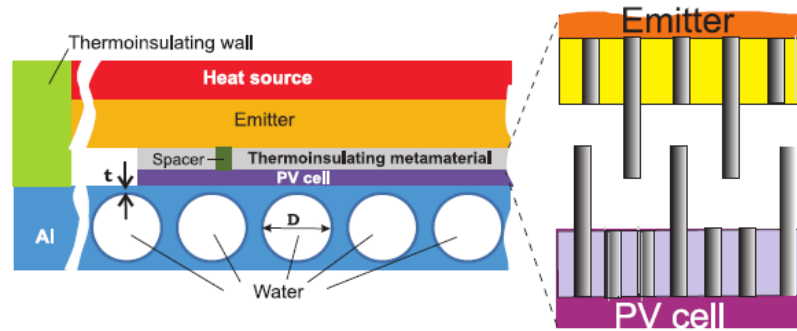


Рис. 3. Мікропроміжок термофотовольтаїчної системи, заповнений структурою з паралельних провідників [12]

Експериментальні дослідження, що доводить можливості широкосмугового передавання енергії ЕМ сигналів, описано у [9], [13]. Це можливо реалізувати, якщо джерело випромінювання безконтактно розмістити безпосередньо у структуру між її провідниками. Модель системи широкосмугового передавання енергії ЕМ хвиль через повітряний проміжок між двома хвилевідними портами, розміщеними один навпроти одного, показана на рис. 4. Дослідження включають порівняння S_{21} -параметрів для двох випадків, коли передавання відбувається без та зі структурою розміщеною між портами. У першому випадку енергія ЕМ хвиль сильно розсіюється у вільний простір, а середнє значення S_{21} -параметрів становить 4,5 дБ у частотному діапазоні 0,9...2 ГГц (одномодовий режим роботи використовуваних хвилеводів) (рис. 5а — пунктирна лінія — empty). Якщо розмістити метаструктуру між хвилеводами, вмонтувавши її на 5 мм у кожний з портів, то покращується передавання ЕМ сигналів у 2,24 рази (рис. 5а — суцільна лінія, WM та рис. 5б). У діапазоні частот 0,9...12 ГГц (багатомодовий режим використовуваних хвилеводів) середнє значення покращення передавання становить 3,78 разів [9].

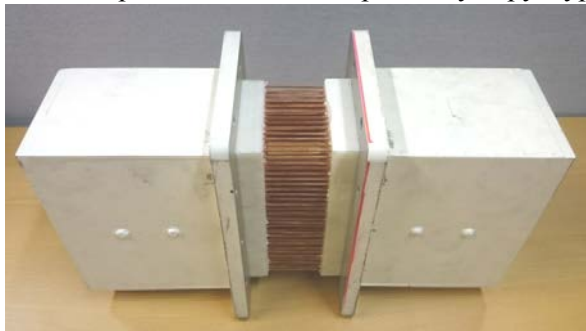


Рис. 4. Експериментальна установка, складена з двох хвилевідних портів та структурою з паралельних металевих провідників, вмонтованою на 5 мм у кожний з них [9]

У діапазоні частот 0,9...12 ГГц (багатомодовий режим використовуваних хвилеводів) середнє значення покращення передавання становить 3,78 разів [9].

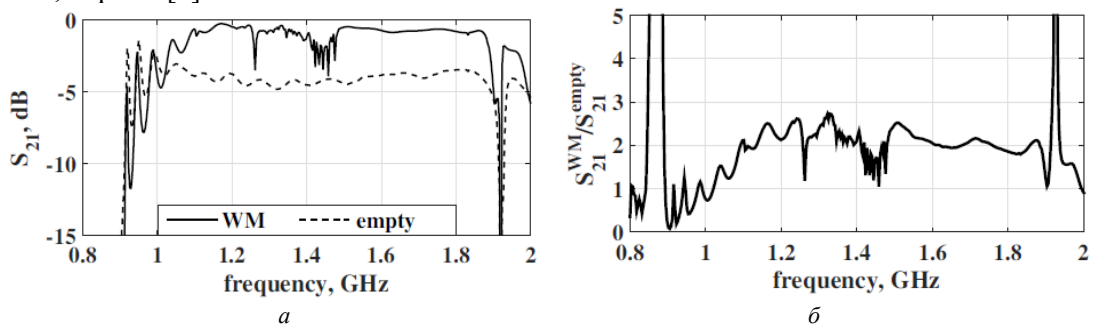


Рис. 5: а — дисперсія S_{21} -параметрів при передаванні ЕМ хвиль між двома хвилеводами через вільний простір (штрихова лінія — empty) та через структуру з паралельних провідників, (суцільна лінія — WM); б — частотна залежність покращення передавання за допомогою експериментальної установки [9]

Дослідження у [9], [12], [13] відкрили нові можливості застосування СПП, наприклад, для контролю за тепловими потоками у термофотовольтаїчних пристроях, сенсорних приладах, телекомунікаційних засобах та багато інших.

Позитивні результати досліджень широкосмугового ефекту передавання енергії ЕМ хвиль відіграли не останню роль для початку розвитку засобів ендоскопії. У роботах [14], [15] СПП стала основою запропонованої конструкції ендоскопа. Ендоскоп містив СПП, що вмонтовувалось у по-

риятий поліетиленовий діелектрик ($\epsilon = 2,25$), властивості якого дозволяють його функціонуванню у діапазоні терагерцових частот (0,5...1 ТГц). Вивчення показали здатність оптично довгого ендоскопа зберігати властивості передавання у разі кутів його згину до 180° і навіть вище. Довжина ендоскопа складала 20 мм, а радіус згину $R \approx 6,3$ мм (рис. 6а). Крім того, запропонований прилад демонструє функціональну ефективність і за досить малого значення радіусу згину, що становить $R \approx \lambda$ на частоті близькій 0,75 ТГц (рис. 6б) [14].

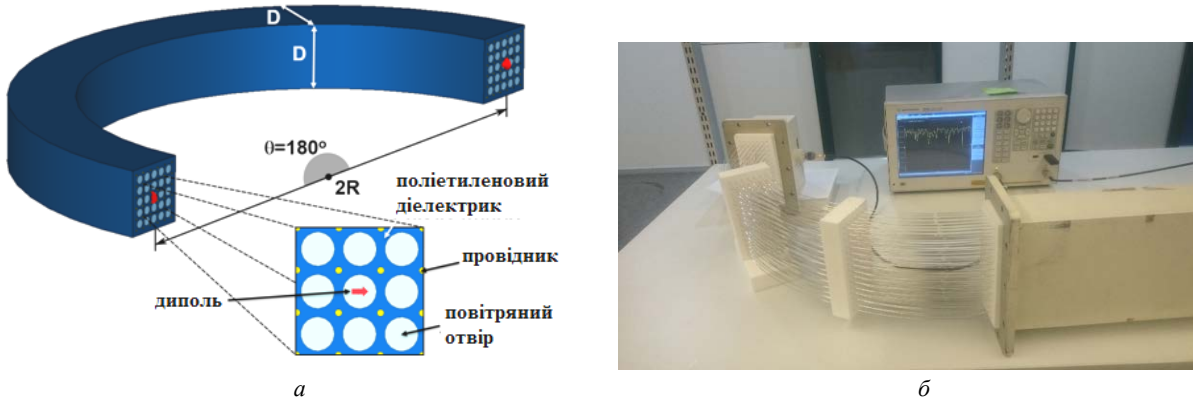


Рис. 6: а — модель ендоскопа терагерцового діапазону частот, що складається з паралельних провідників, вмонтованих у пористий діелектрик, б — його експериментальний аналог мікрохвильового діапазону частот [14], [15]

Експериментальним підтвердженням функціонування такого приладу стали дослідження у мікрохвильовому діапазоні 1...2 ТГц. Для цього виготовлено декілька зразків ендоскопів з різними кутами згину та радіусом $R = L/\pi$, де L — довжина ендоскопа.

Експериментальні дослідження в [14] показали стабільну роботу запропонованого ендоскопа при згині структури на кути 90° , 180° та більше. Підтвердженням того, що згин ендоскопа не впливає на втрати, є те, що середні значення дисперсій втрат $\langle P \rangle$, показаних на рис. 7, у досліджуваному діапазоні для прямого ендоскопа та вигнутого на 90° і 180° є практично однаковими і становлять 0,38, 0,4 і 0,41, відповідно.

Проте, показані залежності втрат на рис. 7 містять гострі мінімуми та максимуми, природу яких вдалось визначити моделюванням структури у мікрохвильовому діапазоні частот. Таким чином, у [14], [15] показано, що наявність гострих максимумів функції втрат викликана появою зворотних

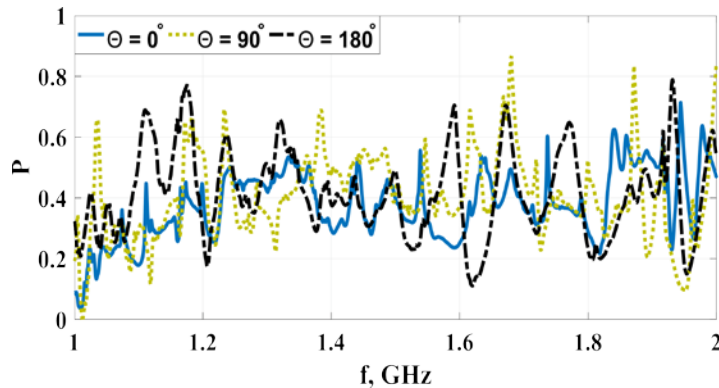


Рис. 7. Частотна залежність втрат при передаванні ЕМ хвиль через прямий ендоскоп та при його згині на 90° та 180° , отримані шляхом експериментальних досліджень у мікрохвильовому діапазоні частот [14]

хвиль, що, в свою чергу, пояснюються виникненням вихрових мод на деяких частотах через згин структури. Підґрунтям такого твердження стали результати, показані на рис. 8, де показані розподіли векторів Пойнтинга та електричного поля при куті згину ендоскопа 180° , розраховані на частотах локальних мінімумів S_{21} -параметрів. З рис. 8а видно, що частина стрілок, що показують градієнт векторів Пойнтинга у визначених точках, спрямовані у напрямку передавального порту.

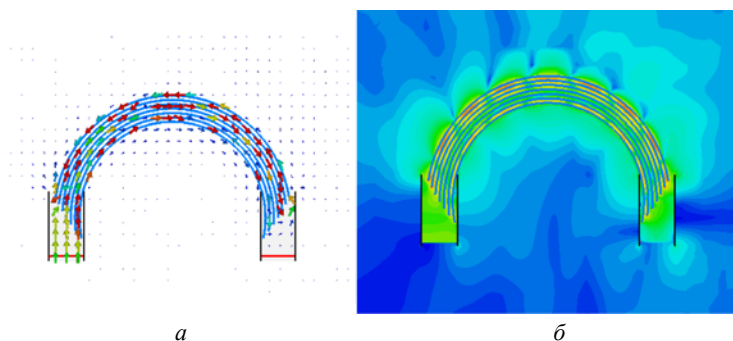


Рис. 8. Розподіли: а — векторів Пойнтинга; б — електричних полів при передаванні ЕМ хвиль через ендоскоп з паралельних металевих провідників з кутом згину 180° [14]

Структура з провідників, що розходяться

СП, що складається з масиву провідників, що розходяться під кутом заданого значення один відносно одного, так звана гіперлінза, запропонована для вирішення проблеми покращення випромінювання слабких ЕМ хвиль на резонансних та міжрезонансних частотах. На рис. 9 показана гіперлінза як структура, що дозволяє фіксувати слабкі шумові коливання та випромінювати підсилені сигнали у вільний простір [16]. Це можливо за рахунок форми запропонованої структури, оскільки значення величин площ вхідної та вихідної апертур відрізняються і фактор підсилення напряму залежить від співвідношення їх розмірів.

У [17] така структура запропонована для модифікування звичайної півсферичної лінзи з метою покращення випромінювання енергії нагрітого тіла — емітера, що розміщене у основі метаструктури, як показано на рис. 10, у діапазоні інфрачервоних хвиль. Принцип роботи полягає в тому, що гіперболічний метаматеріал перетворює близькопольове випромінювання емітера у власні моди метаструктури, які ефективно випромінюються з поверхні пристрою.

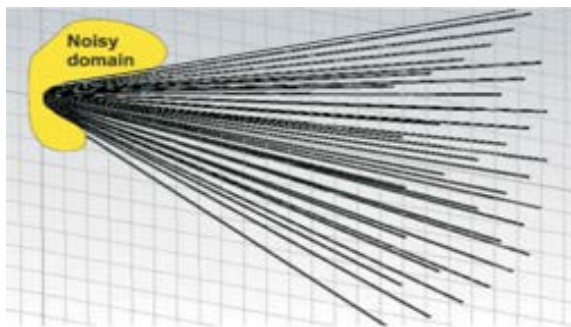


Рис. 9. Модель структури з провідників, що розходяться під кутом заданої величини [16]

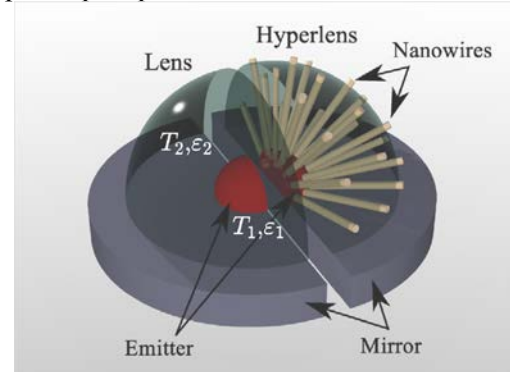


Рис. 10. Навісферична структура модифікована метаматеріалом з провідників, що розходяться, запропонована у [17] для покращення теплового випромінювання нагрітого тіла (емітера)

Структура з випадковим розміщенням провідників

СП може бути використана у процесі модифікування різних типів антен для випромінювання затухаючих ЕМ хвиль на частотах, що не відповідають резонансним частотам цих антен без модифікації. Властивості випромінювання таких модифікованих антен напряму залежать від особливостей конфігурації СП. Робота [18] дає пояснення цього. У роботі поставлено за мету широкомугове випромінювання, для чого запропоновано структуру з випадковим розміщенням провідників, яка базується на властивостях та геометричних параметрах СПП та гіперлінзи. Процес синтезу такої структури показано на рис. 11а—в [18].

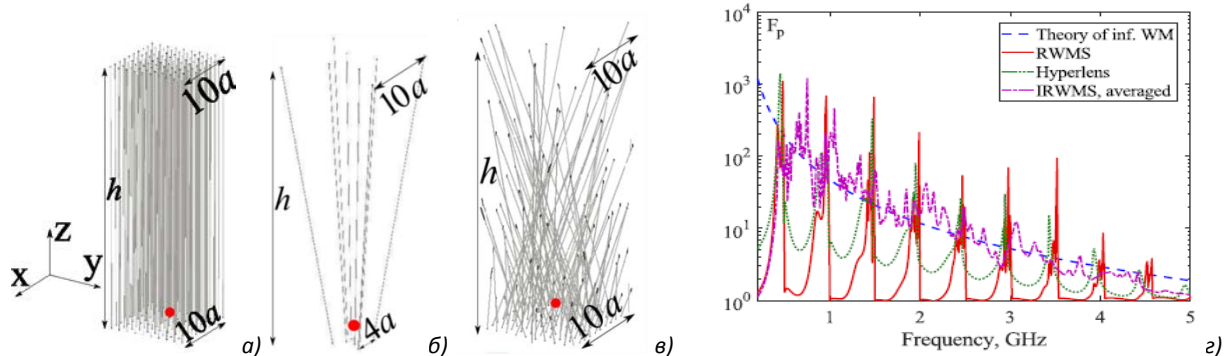


Рис. 11. Процес синтезу структури з розміщенням металевих провідників: а — паралельних; б — що розходяться; в — випадковим; г — частотна залежність фактора Парселла при випромінюванні через структуру провідників: а — червона суцільна лінія, RWMS); б — зелена точкова лінія, Hyperlens; в — фіолетова штрихпунктирна лінія, IRWMS [18]

Суперлінза (рис. 11а) може забезпечити вузькосмугове випромінювання на частотах резонансів Фабрі-Перо (рис. 11г — червона суцільна лінія), в той час як гіперлінза (рис. 11б) випромінює не тільки на частотах резонансів, але й між ними, оскільки частотний розподіл фактора Парселла набуває значення більше 1 (рис. 11г — зелена точкова лінія). Проте, сама частотна залежність зали-

шається нерівномірною з яскраво вираженими піками дисперсії фактора Парсела на частотах резонансів Фабрі–Перо. Тому запропоновано структуру з випадковим розміщенням провідників, що по суті є комбінацією двох попередніх СП, оскільки її геометричні розміри відповідають СПП, в той час як будь-яку точку по всьому об'єму структури можна розглядати як локальну гіперлінзу різних розмірів і різними кутами нахилу провідників один відносно одного. Випромінювання будь-якої з локальних гіперлінз перевипромінюється наступними локальними гіперлінзами, що призводить до покращення процесів випромінювання в цілому (рис. 11в). Таким чином, значення частотного розподілу фактора Парсела є згладженим вздовж досліджуваного діапазону (рис. 11г — фіолетова штрихпунктирна лінія).

Для експериментальних досліджень попередньо виготовлено структури з паралельних провідників та з їх випадковим розміщенням з однаковими геометричними розмірами [18]. Експериментальна установка, що складається з аналізатора Network Analyzer, за допомогою якого відображались основні результати, хвилевідного порту та зразків метаструктур показана нарис. 12а.

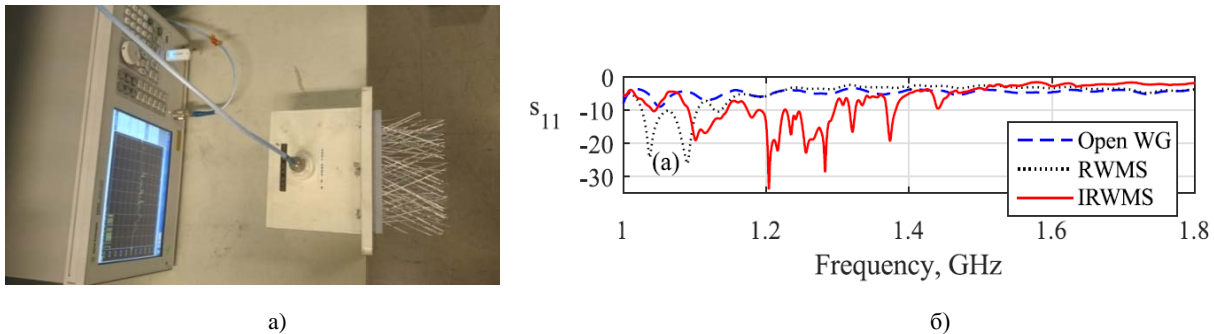


Рис. 12: а — експериментальна установка для дослідження процесу покращення випромінювання з використанням провідникових метаструктур; б — S_{11} -параметри, коли апертура хвилевідного порту випромінює у вільний простір (синя пунктирна лінія, OpenWG), через структуру з паралельних провідників (чорна точкова лінія, RWMS) та через структуру з випадковим розміщенням провідників (червона суцільна лінія, IRWMS) [18]

У випадку, коли відкритий кінець хвилевідного порту випромінює у вільний простір без будь-якого СП, значення S_{11} -параметрів в середньому становить 5 дБ (рис. 12б, синя пунктирна лінія), що свідчить про неузгодженість імпедансів апертури хвилеводу та вільного простору. Якщо апертура хвилеводу модифікована шляхом введення структури з паралельних провідників, випромінювання є можливим на резонансних частотах (рис. 12б, чорна точкова лінія). Широкосмугове випромінювання у діапазоні від 1,1 до майже 1,4 ГГц досягнуто у [18] шляхом використання метаструктури з випадковим розміщенням провідників (рис. 12б, червона суцільна лінія).

Також у роботі [18] досліджено покращення випромінювання симетричної дипольної антени у смузі частот, що не містить власних резонансів диполя. Якщо диполь безконтактно вмонтований у структуру з паралельних провідників на відстань, що відповідає значенню періоду метаструктури, то така система забезпечує випромінювання на частотах 2,7 та частково на 4,3 ГГц (рис. 13, суцільна лінія). На частотах, відмінних від резонансних, значення фактора Парсела очікувано дорівнюють 1. У випадку невпорядкованої структури отримується випромінювання у всьому досліджуваному діапазоні 2...5 ГГц (рис. 13, пунктирна лінія). Хоча залежність є не зовсім рівномірною, проте значення фактора Парсела значно перевищує 1.

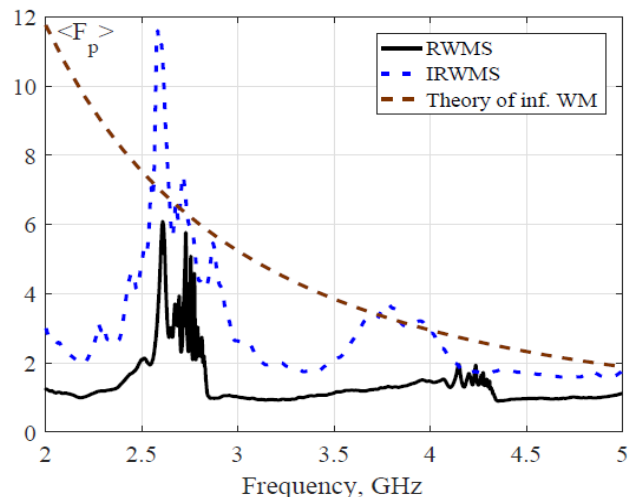


Рис. 13. Експериментально отримані частотні залежності значень фактора Парсела при випромінюванні ЕМ сигналів з використанням структури: суцільна лінія, RWMS — з паралельних провідників; точкова лінія, RWMS — з випадково розміщених провідників; пунктирна лінія, Theory of inf. WM — невпорядкована структура (теоретично розрахунок структури) [18]

Висновки

СП є перспективним класом матеріалів з унікальними властивостями, які не існують у природному вигляді. Проте, такі матеріали можуть бути легко синтезовані у лабораторних умовах. Універсальність полягає в тому, що існують різні підходи їх виготовлення необхідних розмірів для можливого застосування у різних діапазонах частот від мікрохвильового до оптичного та навіть вище.

Широко досліджуваними є структури, що складаються з паралельних металевих провідників, з провідників, що розходяться, та з випадковим розміщенням провідників. Кожна з них характеризується різними своєрідними властивостями. Наприклад, СПП може бути застосована як для вузькосмугового, так і для широкосмугового передавання енергії ЕМ хвиль, що знаходить своє застосування, перш за все, у системах передавання зображень та у пристроях термофотovoltaїки. Подальший розвиток та дослідження СПП показали можливість їх застосування для зондування, ендоскопії, спектроскопії тощо. Перші ендоскопи були вузькосмуговими та чутливими до значних згинів, що значно обмежувало спектр їх застосувань [19]. Проте, нещодавно проведені дослідження у цій області запропонували ендоскоп на основі СПП, який здатний функціонувати у широкій смузі частот, що охоплюють мікрохвильовий та терагерцовий діапазони.

Структури, які складаються з провідників, що розходяться, можуть бути використані для покращення передавання енергії ЕМ хвиль та їх випромінювання не тільки на частотах резонансів Фабрі–Перо, а і на міжрезонансних частотах. Покращення значення частотного розподілу фактора Парсела між резонансами напряму залежить від співвідношення розмірів інтерфейсів структури. Проте, дисперсія S_{11} -параметрів залишається нерівномірною у широкому діапазоні частот. Для того, щоб випромінювання було рівномірним у всьому досліджуваному діапазоні частот, запропоновано метаструктуру з випадковим розміщенням провідників. За допомогою такої структури можна досягнути поставленої задачі широкосмугового випромінювання за рахунок того, що будь-яку точку структури можна розглядати як локальну гіперлінзу з різними розмірами та значенням кутів нахилу провідників. Випромінювання кожної з локальних гіперлінз перевипромінюється та підсилюється іншими локальними гіперлінзами структури. Таким чином, дисперсія S_{11} -параметрів залишається рівномірною у широкому діапазоні частот, що донедавна вважалося неможливим.

Незважаючи на те, що застосування СПП для випромінювання ЕМ хвиль можливе тільки на частотах резонансів, шляхом зміни параметрів структури можна керувати значеннями резонансних частот та незначно розширити смугу випромінювання [20].

Робота може бути корисною для розширення розуміння у розробленні метаструктур з провідників та їхнього застосування, а також для розробників та науковців, які працюють у напрямку метаматеріалів. Робота може допомогти знайти нові інженерні рішення щодо розвитку різних радіотехнічних пристроїв з унікальними властивостями та характеристиками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] F. Capoloni, *Theory and Phenomena of Metamaterials*. Taylor and Francis Group, LLC, 2009.
- [2] A. Sihvola, "Metamaterials in electromagnetic," *Physical Review Letters*, vol. 85, no. 18, pp. 3966-3069, 2000.
- [3] C. Simovski, P. A. Belov, A. V. Atrashchenko, and Yu. S. Kivshar, "Wire metamaterials: Physics and applications," *Advanced Materials*, 24, pp. 4229-4248, 2012.
- [4] A. V. Atrashchenko, V. N. Katz, V. P. Ulin, V. P. Evtikhiev and V. P. Kochereshko, "Fabrication and optical properties of porous InP structures," *Physica E*, no. 44, pp. 1324-1328, 2012.
- [5] H. Föll, M. Leisner, A. Cojocar, and J. Carstensen, "Macroporous semiconductors," *Materials*, no. 3, pp. 3006-3076, 2010.
- [6] V. P. Ulin, and S. G. Konnikov, "Electromechanical pore formation mechanism in III-IV crystals," *Semiconductors*, no. 41, pp. 832-844, 2007.
- [7] M. Albooyeh, "Electromagnetic Characterization of Metasurfaces." PhD Thesis, Aalto University, Espoo, Finland, 2015.
- [8] P. A. Belov, R. Marques, S. I. Maslovski, I. S. Nefedov, M. Silverinha, C. Simovski, and S. A. Tretyakov, "Strong spatial dispersion in wire media in the very large wavelength limit," *Physical Review B*, no. 67, 113103 (1-4), 2003.
- [9] D. Vovchuk, S. Kosulnikov, I. Nefedov, S. Tretyakov, and C. Simovski, "Multi-Mode Broadband Power Transfer through a Wire Medium Slab," *Progress in Electromagnetics Research (PIER)*, no. 154, pp. 171-180, 2015.
- [10] P. A. Belov, Y. Zhao, S. Sudhakaran, A. Alomainy, and Y. Hao, "Experimental study of the subwavelength imaging by a wire medium slab," *Applied Physics Letter*, no. 89, pp. 459-462, 2006.
- [11] P. A. Belov, et al., "Transmission of images with subwavelength resolution to distances of several wavelengths in the microwave range," *Physics Review B*, no. 77, 193108 (1-4), 2008.
- [12] M. S. Mirmoosa, and C. R. Simovski, "System Analysis of Micron-Gap Thermophotovoltaic Systems Enhanced by Nanowires," *Photonics and Nanstructures – Fundamentals and Applications*, no. 13, pp. 20-30, 2015.
- [13] S. Kosulnikov, D. Vovchuk, I. Nefedov, S. Tretyakov, and C. Simovski, "Broadband Power Transfer Through a Metallic Wire Medium Slab," *Proc. URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS)*, Espoo, pp. 596-599, 2016.

- [14] C. Simovski, D. Vovchuk, and S. Kosulnikov, "Power Vortices in Wire-Medium Endoscopes," in *Proc. 12th International Congress Metamaterials*, Espoo, pp. 315-317, 2018.
- [15] D. Vovchuk, S. Kosulnikov, and C. Simovski, "Unusual eigenmodes of wire-medium endoscopes: impact on transmission properties," *Optics Express*, vol. 26, no. 14, pp. 17988-18005, 2018.
- [16] S. Kosulnikov, D. Filonov, S. Glybovski, P. Belov, S. Tretyakov, and C. Simovski, "Wire-Medium Hyperlens for Enhancing Radiation from Subwavelength Dipole Sources," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, no. 63, pp. 4848-4856, 2015.
- [17] C. Simovski, S. Maslovski, I. Nefedov, S. Kosulnikov, P. Belov, and S. Tretyakov, "Hyperlens makes thermal emission strongly super-Planckian," *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, no. 13, pp. 31-41, 2015.
- [18] S. Yu. Kosulnikov, M. S. Mirmoosa, D. A. Vovchuk, S. A. Tretyakov, S. B. Glybovski, and C. R. Simovski, "Enhancement of Radiation with Irregular Wire Media," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 12, pp. 5469-5474, 2016.
- [19] X. Radu, D. Garray, and C. Craeye, "Towards a wire medium endoscope for MRI imaging. Metamaterials," vol. 3, pp. 90-99, 2009.
- [20] D. Vovchuk, M. Khobzei, and I. Zhadan, "Properties of Antennas Modified by Wire Media," in *Proc. of 1-st International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, 2018.

Рекомендована кафедрою телекомунікаційних систем та телебачення ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 23.04.2020

Політанський Леонід Францович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки;

Вовчук Дмитро Анатолійович — канд. техн. наук, асистент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки, e-mail: dimavovchuk@gmail.com ;

Галюк Сергій Дмитрович — канд. техн. наук, асистент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки;

Хобзей Микола Михайлович — студент фізичного факультету;

Робулець Павло Федорович — аспірант кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки.

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці

L. F. Polityanskyi¹
D. A. Vovchuk¹
S. D. Haliuk¹
M. M. Khobzei¹
P. F. Robulets¹

Implementation of Wire Media for Radio Engineering Means for Transfer and Radiation of EM Waves (Review)

¹Yurii Fedkovych Chernivtsi National University

In the presented paper the review of the major possible applications of a wire medium in different radio engineering field is performed. The structures possess the unique properties such as a negative value of permittivity. Three types of wire media shapes are considered which include structures with parallel (superlens), tapered (hyperlens) and irregular (brush) metallic wires allocations. Modern progress allows a number of approaches (from usual mechanic arrangement to chemical synthesis) to realize wire media of different shape for their utilizing in frequency range from microwave to optics and higher. Superlens can be applied to narrow and broadband energy transfer of electromagnetic waves including photovoltaic devices, imaging, endoscopy, spectroscopy and many others. The broadband effect was shown recently in [9] by the investigation of EM power transfer between two waveguides through a wire media slab that became the first experimental evidence of analytical hypothesis of [12]. It was a beginning point to develop of wire media endoscopes in [15] which shown the nature of non-Fabry-Perot minima and maxima of dispersion function as the vortex modes as well as reliability of endoscope operation under the huge bend. The wire media such as hyperlens and irregular one can find applications in antennas development that operate in the wide frequency range. Comparison of Parcell factor dispersions of these two kinds of metamaterials shows different results due to hyperlens, despite the possibility to radiate at interresonant frequencies, stays resonant structure in general. Instead, a wire medium brush is characterized by the continuing Parcell factor spectrum. It is possible in consequence of the structure shape that can be considered as a set of a huge number of local hyperlenses with different parameters that reradiate and amplify EM field of another local hyperlenses and so on. As the result a wide frequency range can be covered (from 1 up to 5 GHz in [18]).

Keywords: metamaterials, wire structure, hyperlens, endoscope.

Politanskyi Leonid F. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Radio Engineering and Information Security;

Vovchuk Dmytro A. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant of the Chair of Radio Engineering and Information Security, e-mail: dimavovchuk@gmail.com ;

Haliuk Serhii D. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant of the Chair of Radio Engineering and Information Security;

Khobzei Mykola M. — Student of Physical Department;

Robulets Pavlo F. — Post-Graduate Student of the Chair of Radio Engineering and Information Security

Л. Ф. Политанський¹

Д. А. Вовчук¹

С. Д. Галюк¹

М. М. Хобзей¹

П. Ф. Робулец¹

Применение проволочных структур в радиотехнических средствах для передачи и излучения ЭМ волн (обзор)

¹Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича

Проведен обзор основных возможных применений проводящих метаструктур в различных радиотехнических устройствах. Такие структуры обладают уникальным свойством, а именно отрицательным значением диэлектрической проницаемости. Рассмотрены три разновидности проводниковых метаматериалов, а именно структуры из параллельных проводников (суперлинза), расходящихся проводников (гиперлинзы), и проводников со случайным размещением (щетка). Современный технологический процесс демонстрирует ряд подходов и методов (от обычного механического упорядочения к химическому синтезу) для реализации рассматриваемых метаструктур различной формы с последующим их использованием в диапазоне частот от радиоволн до оптического и выше. Суперлинза может использоваться как в узком так и в широком диапазоне частот для передачи энергии ЭМ волн, включая устройства фотovoltaики, передачи изображений, эндоскопии, спектроскопии и др. Широкополосный эффект описан в [9]. Исследована передача энергии ЭМ волн между двумя волноводами через структуру из параллельных проводников, это стало первым экспериментальным подтверждением выдвинутой в [12] аналитической гипотезы. Положено начало развитию широкополосных эндоскопов на основе структур из параллельных проводников в [15], впервые показана природа минимумов и максимумов дисперсии потерь, которая не относится к резонансам Фабри–Перо, а является следствием возникновения вихревых мод, а также продемонстрировала надежную работу эндоскопа при значительных изгибах. Проводниковые метаматериалы, такие как гиперлинзы и щетка, могут найти свое применение в антенных системах, функционирующих в широком диапазоне частот. Сравнение их дисперсий фактора Парсела показывают разные результаты из-за того, что гиперлинзы, несмотря на возможность излучения на межрезонансных частотах, в целом все еще остается резонансной структурой. Зато структура со случайным размещением проводников характеризуется непрерывным и гладким спектром фактора Парсела. Это стало возможным потому, что форма структуры может рассматриваться как набор чрезвычайно большого количества локальных гиперлинз различных параметров, которые переизлучают и усиливают ЭМ поле других локальных гиперлинз и так далее. Как результат, такая метаструктура может покрывать широкую полосу рабочих частот (от 1 до 5 ГГц [18]).

Ключевые слова: метаматериалы структуры из проводников, гиперлинза, эндоскоп.

Политанский Леонид Францович — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и информационной безопасности;

Вовчук Дмитрий Анатольевич — канд. техн. наук, ассистент кафедры радиотехники и информационной безопасности, e-mail: dimavovchuk@gmail.com ;

Галюк Сергей Дмитриевич — канд. техн. наук, ассистент кафедры радиотехники и информационной безопасности;

Хобзей Николай Михайлович — студент физического факультета;

Робулец Павел Федорович — аспирант кафедры радиотехники и информационной безопасности