

## МЕТАМАТЕРІАЛИ ТА СТРУКТУРИ НА ЇХ ОСНОВІ

*Корнійчук М. В.; Назарько А. І., к.т.н.*

*Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

Метаматеріалами (англ. *metamaterials*, *MTMs*) називають штучно сформовані та особливим чином структуровані матеріали або структури, які мають електромагнітні властивості, що виходять за межі властивостей компонентів, з яких вони складаються. Метаматеріали синтезують шляхом введення в природний матеріал різних періодичних структур з найрізноманітнішими геометричними формами [1]. Найбільш розповсюдженими різновидами метаматеріалів є кристалоподібні структури (КС, англ. *crystal-like structures*, *CSs*), електромагнітні структури з забороненою зоною (англ. *electromagnetic band-gap*, *EBG*), лівосторонні матеріали (англ. *left-handed MTMs*, *LH MTMs*) та періодичні неоднорідності на заземленій поверхні мікросмужкових пристроїв (англ. *periodic defected ground structures*, *periodic DGSs*). Всі ці структури модифікують діелектричну і магнітну проникність матеріалу.

Задача підвищення ефективності пристроїв являється однією з найважливіших в сучасних реаліях науково-технологічного прогресу. Розвиток традиційних мікросмужкових рішень тривалі роки знаходиться в певному насиченні. Постало питання пошуку та дослідження нових шляхів підвищення ефективності. Одними з перших структур, що розширювали діапазон робочих імпедансів (шляхом зростання зі 100 Ом до ~200 Ом), були *DGS* [2]. Такі структури за рахунок контурів струму на межах неоднорідностей (вікно або щілина різної форми) збуджують поширення електромагнітних хвиль. Це приводить до зміни характеристик лінії передачі — зростання ефективної індуктивності лінії та зменшення ефективної ємності, а також відбувається сповільнення хвилі (збільшення «електричної довжини» структури при незмінній фізичній довжині).

Значний інтерес становить використання не лише поодиноких *DGS*, а і періодичних їх різновидів — вертикально- та горизонтально-періодичні структури [2]. *DGS* мають більш широку смугу подавлення і дозволяють покращувати характеристики пристроїв при невеликій кількості періодів або зменшувати габарити пристроїв на їх основі при заданих характеристиках.

Значного розвитку набули КС для електромагнітних хвиль, перші з яких було розроблено для радіодіапазону і названо фотонними кристалами (ФК, англ. *photonic crystals* — *PCs*). ФК являє собою просторові ґрати, неоднорідності яких розміщені з періодом порядку довжини хвилі світла. З появою ФК оптичного діапазону ФК радіодіапазону отримали назву електромагнітні кристали (ЕК, англ. *electromagnetic crystals*, *ECs*). ЕК складаєть-

ся з періодично розміщених неоднорідностей. В порівнянні з *DGS*, об'ємні конструкції ЕК-неоднорідностей більш ефективні і підвищують максимальне значення  $Z$  до 500 Ом, а також дозволяють реалізувати низькоімпедансні неоднорідності з імпедансами  $Z \sim 5$  Ом. Пристрої на основі ЕК-неоднорідностей мають більшу ефективність в порівнянні з традиційними рішеннями на основі мікросмужкової лінії [3].

Фундаментальні роботи по ФК дозволили розв'язати базові фізичні питання розробки різноманітних пристроїв для оптичних систем обробки сигналів. З урахуванням загальних властивостей КС ідеї, розроблені в рамках ФК, важливі і для подальшого розвитку ЕК, та навпаки.

На рис.1 показано фрагмент конструкції традиційної мікросмужкової лінії (а), *DGS* (б) та ЕК-неоднорідність (в).

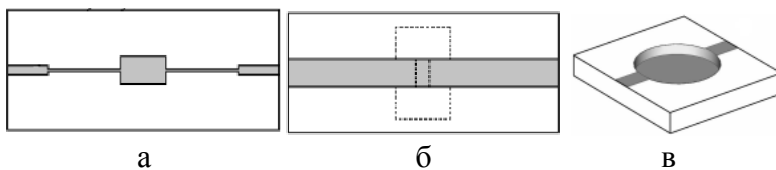


Рисунок 1. Типи мікросмужкових неоднорідностей:  
а — традиційна, б — *DGS*, в — ЕК-неоднорідність

різних частотних діапазонах. Структури на основі ЕВГ широко використовуються в різноманітних мікросмужкових пристроях телекомунікаційної галузі, серед яких низькопрофільні антени, фільтри і т.д. На рис.2 показано

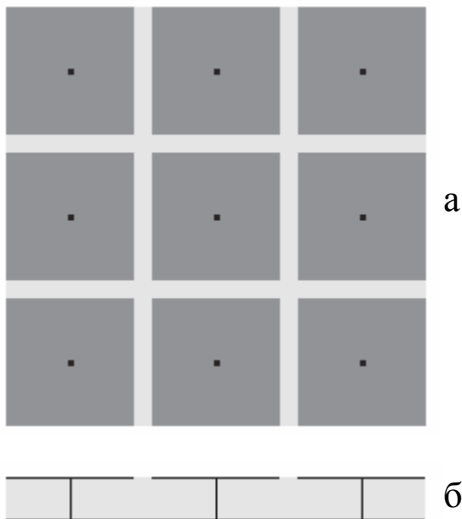


Рисунок 2. Конструкція типової двовимірної грибоподібної ЕВГ-антени: а — вигляд зверху; б — поперечний переріз.

типову двовимірну конструкцію антени на основі ЕВГ, що утворена періодичними грибоподібними випромінювачами. Фаза кожного випромінювача обирається з умови забезпечення вузького пучка з високим коефіцієнтом підсилення в заданому напрямку. Механізм випромінювання таких антен аналогічний механізму випромінювання рефлекторних антен.

В конструкціях антен на основі ЕВГ збільшується коефіцієнт підсилення, зводяться до мінімуму задні пелюстки, а також зменшується зв'язок між випромінюючим шаром та шаром заземлення [4]. Використання ЕВГ в пристроях фільтрації забезпечує широку і глибоку смугу подавлення гармонік, а для підсилювачів і об'ємних резонаторів — збільшення вихідної потужності та коефіцієнту корисної дії. До недоліків слід віднести складність виконання таких структур та великі розміри по відношенню до

довжин хвиль.

Одним з новітніх напрямів розвитку метаматеріалів є середовища з від'ємним коефіцієнтом заломлення — лівосторонні матеріали (відомі також як середовища зі зворотною хвилею). В таких середовищах діелектрична та магнітна проникності одночасно менше нуля, а вектори напруженостей електричного  $E$  і магнітного  $H$  полів, а також хвильовий вектор  $k$  утворюють ліву трійку векторів, що приводить до незвичних ефектів — аномальної рефракції, реверсійного доплерівського зсуву [5].

Знаходження областей прозорості в спектрі пропускання структур з від'ємними матеріальними параметрами лівосторонніх матеріалів дає можливість розробити широкопasmові та вузькопasmові фільтри, атенуатори, резонатори, відгалужувачі, суперлінзи.

#### Перелік посилань

1. Smith D.R. What are Metamaterials. The research group of D.R. Smith [Електронний ресурс]. — Режим доступу до рес.: <http://people.ee.duke.edu/~drsmith/research.htm>
2. Weng L. H., Guo Y. C., Shi X. W. et al. An overview on defected ground structure // Progress In Electromagnetics Research. — 2008. — Vol. 7, В. — P. 173—189.
3. Назарько А.І. Порівняльний аналіз ефективності кристалоподібних та традиційних мікросмужкових структур // Вісн. НТУУ «КПІ». Серія — Радіотехніка. Радіоапаратобудування — 2014. — Вип. 59. — С. 93—102.
4. Yang F., Rahmat-Samii Y. Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures: a low mutual coupling design for array applications // IEEE Trans. Antennas Propagat. — 2003. — Vol. 51, N. 10. — P. 2936–2946.
5. Shelby R.A. et al. Microwave transmission through a two-dimensional, isotropic, left-handed metamaterial // Appl. Phys. Lett. — 2001. — Vol. 78, N. 4 — P. 489—491.

#### Анотація

Розглянуто найбільш поширені напрямки метаматеріалів, що використовуються в мікросмужкових пристроях, — кристалоподібні структури, електромагнітні структури з забороненою зоною (EBG), лівосторонні матеріали та періодичні неоднорідності на заземленій поверхні мікросмужкових пристроїв (періодичні DGSs). Вказано особливості, переваги та недоліки розглянутих технологій.

Ключові слова: метаматеріали, штучні періодичні структури.

#### Аннотация

Рассмотрены наиболее распространенные направления метаматериалов, используемых в микрополосковых устройствах, — кристаллоподобные структуры, электромагнитные структуры с запрещенной зоной (EBG), левосторонние материалы и периодические неоднородности на заземленной поверхности микрополосковых устройств (периодические DGS). Указано особенности, преимущества и недостатки рассмотренных технологий.

Ключевые слова: метаматериалы, искусственные периодические структуры.

#### Abstract

The most widespread areas of metamaterials used in microstrip devices are considered — crystal-like structures, electromagnetic bandgap, left-handed metamaterials and periodic defected ground structures. In the paper are specified features, advantages and disadvantages of the considered technologies.

Keywords: metamaterials, artificial periodic structures.