

УДК 539.3

DOI 10.36910/775.24153966.2023.76.29

С.Л. Куцик, О.А. Мікуліч

*Луцький національний технічний університет,¹ кафедра прикладної математики та механіки***ОСНОВНІ КОНЦЕПЦІЇ ТА ПІДХОДИ ДО СТВОРЕННЯ МЕТАМАТЕРІАЛІВ**

У роботі здійснено огляд основних концепцій та підходів до розробки геометрії метаматеріалів, що є основним типом штучно сконструйованих матеріалів, які мають властивості, що не можна отримати природним шляхом. При цьому внутрішня архітектура таких матеріалів дозволяє забезпечити їх унікальні та поряд з цим контрольовані ефективні властивості. Проведено аналіз впливу мікроархітектури таких матеріалів до поширення мікрохвильових процесів у метаматеріалах. Такі матеріали є надзвичайно важливими при розробці метапристроїв. Огляд також здійснено у напрямку вивчення впливу розвитку метаматеріалів для розробки різних пристроїв та девайсів (мікрохвильових датчиків, фотонних пристроїв, антен, збору енергії та надпровідних квантових інтерференційних пристроїв).

Ключові слова: метаматеріали, ефективні характеристики.

S.L. Kutsyk, O.A. Mikulich

BASIC CONCEPTS AND APPROACHES TO THE CREATION OF METAMATERIALS

The paper reviews the main concepts and approaches to the development of the geometry of metamaterials, which are the main types of artificially constructed materials that have properties that cannot be obtained naturally. At the same time, the internal architecture of such materials allows to ensure their unique and at the same time controlled effective properties. The influence of the microarchitecture of such materials on the spread of microwave processes in metamaterials is analysed. Such materials are extremely important in the development of meta-devices. The review is also carried out in the direction of studying the impact of the development of metamaterials on the development of various devices and devices (microwave sensors, photonic devices, antennas, energy harvesting and superconducting quantum interference devices).

Keywords: metamaterials, effective characteristics.

Постановка проблем. Сучасний розвиток технологій зумовлює частіше застосування у виробництві нових матеріалів задля вирішення нестандартних задач. Для цього використовують різноманітні матеріали, що мають як природні, так і штучне походження: полімери, кераміка, композити, сплави та суперсплави, і т.д. Для вирішення нестандартних задач слід використовувати чи розробляти матеріали, що володіють деякими наперед заданими властивостями. Для цього слід змінити або модифікувати їх природні властивості шляхом зміни мікроструктури матеріалів. Під час таких перетворень отримуються матеріали, що також називаються технічними.

Останнім часом технічні матеріали привернули велику увагу дослідників, оскільки такі матеріали демонструють кращі характеристики у порівнянні з класичними: великий життєвий цикл, широкий діапазон експлуатаційних температур, легка вага тощо. До таких слід також віднести і інженерні матеріали такі як, металоматричні композити, композити на полімерній основі, п'єзоелектричні матеріали, метаматеріали, тощо. Зацікавленість цими матеріалами і їх висока продуктивність відкривають широкі можливості до їх застосування в науці та інженерії.

Метою дослідження є аналіз основних концепцій та підходів до розробки метаматеріалів з урахуванням їх геометрії. Об'єктом дослідження є вивчення впливу внутрішньої архітектури таких матеріалів задля забезпечення їх унікальних контрольованих ефективних характеристик.

Огляд літературних джерел. Уже сама назва «метаматеріали», що з грецької означає «поза межами», характеризує цей новий клас інженерних матеріалів, які виявляють незвичайні властивості, яких немає в природних матеріалів. Загалом, природні матеріали такі як алмаз, скло, тощо, мають додатні значення ефективних характеристик: додатній індекс заломлення, магнітну проникність і електричну/діелектричну проникність. Тоді як нові розроблені матеріали демонструють від'ємний значення ефективних характеристик або значення, що не є можливим для природних матеріалів.

Метаматеріали також називаються лівосторонніми матеріалами або зворотньохвильовими чи матеріалами з від'ємним індексом (NIM) або подвійно від'ємним індексом (DNG). Крім того, метаматеріали мають деякі спеціальні властивості, такі як ідеальне лінзування [2], класична електромагнітно-індукована прозорість [3], здатність до маскуванню [4], висока частота магнетизму

[5], динамічна модуляція з Терагерц (ТГц) випромінювання [6], зворотний ефект Доплера та зворотний ефект Черенкова [7]. Ці унікальні властивості метаматеріалів дають можливість модифікувати та перемикаєти їхні властивості в залежності від потреб та можливостей [8].

Крім того, на основі діелектричної проникності та проникності метаматеріали поділяються на як м'яко-негативний матеріал (MNG), епсилон негативний матеріал (ENG), подвійний позитивний матеріал (DPS) і подвійний негативний матеріал (DNG) [9]. MNG та ENG називаються як одиничний негативний матеріал. Тоді як подвійно негативні і подвійний позитивні матеріали можуть бути розроблені в певному діапазоні частот.

У 1968 році фізик В. Веселаго вперше теоретично запропонував метаматеріали [10]. Він теоретично дослідив електродинаміку матеріалів з від'ємними значеннями магнітної проникності (μ) і відносною діелектричною проникністю (ϵ). Крім того, в цих матеріалах йдеться про поширення електромагнітних хвиль. Тим не менш Smith D.R. та інші практично вперше представили структуру, яка демонструє від'ємне заломлення в мікрохвильовій області [9]. Також J.V. Pendry та інші [11] розробили прототип першого метаматеріалу за допомогою двох взаємопроникаючих підсистем. Зокрема, за допомогою масиву тонких металевих (мідних) дротів та кілець, вони виготовили кільцеві резонатори (SRR), які забезпечують від'ємні значення діелектричної проникності [11].

У метаматеріалах розривні кільця відіграють роль атомів у природних матеріалах і діють як електрично малі резонансні частинки, які сприяють від'ємній проникності. Тут мідний дріт створює від'ємну діелектричну проникність. На рис. 1 представлено графічне зображення метаматеріалу [32].

Ziolkowski R.W. [12] було отримано інший метаматеріал, який складається з підкладки, закріпленої емнісними смугами (CLS) і квадратними SRR. У цьому матеріалі емнісно навантажені смужки дають сильну реакцію на електричні поля та дають від'ємне значення, а SRR взаємодіє з магнітними полями та створює від'ємне значення μ .

Подальші дослідження науковців у цій галузі були спрямовані на розробку та виготовлення різних метаматеріалів. Крім того, на основі наявності SRR метаматеріали доступні в різних формах. Це означає, що метаматеріали, що складаються з SRR, доступні в одному, двох і трьох вимірах [13]. Крім того, ці метаматеріали без SRR (наприклад, ажурна структура) доступні у двох, квазідвох і трьох вимірах [14].

Таким чином, завдяки своїм унікальним властивостям і структурі, метаматеріали знаходять своє застосування в різних пристроях, таких як датчики [15], суперлінзи [16], антени [17], надпровідники [18], поглиначі [19], збирачі енергії [20] тощо.

Класифікація метаматеріалів. Змінені ефективні характеристики визначають властивості метаматеріалів. Ці характеристики залежать від властивостей вихідних матеріалів та визначають макроскопічні параметри, наприклад, діелектричної проникності ϵ та проникності μ матеріалів [21]. На основі діелектричної проникності ϵ та проникності μ метаматеріали класифікуються на наступні чотири групи, як показано на рис. 2.

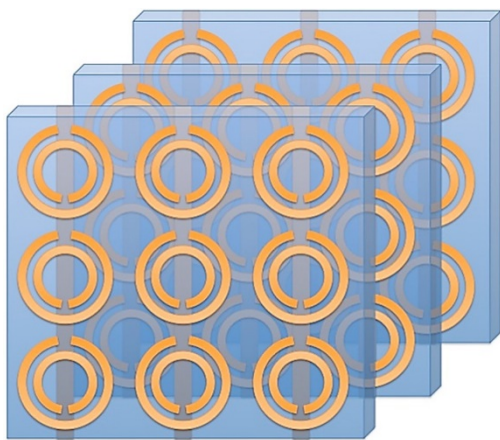


Рис. 1. Графічне зображення метаматеріалу



Рис. 2. Класифікація метаматеріалів

Подвійно позитивні (DPS) матеріали - це матеріали, які мають як діелектричну, так і проникну здатність більше нуля ($\epsilon > 0, \mu > 0$) називають подвійними позитивними (DPS) матеріалами [21].

Більшість поширених середовищ (наприклад, діелектриків) підпадають під це позначення.

Матеріал є епсилон негативний (ENG), якщо він має діелектричну проникність, меншу за нуль, і проникність, більшу за нуль ($\epsilon < 0$, $\mu > 0$) [21]. У певних частотних режимах багато плазм демонструють ці характеристики.

μ -негативний (MNG) матеріал має діелектричну проникність, більшу за нуль, і проникність, меншу за нуль ($\epsilon > 0$, $\mu < 0$) [21]. Деякі гіротропні матеріали у певних частотних режимах виявляють ці характеристики.

Подвійно негативний матеріал (DNG) – це матеріал, що має діелектричну проникність і проникність менше нуля ($\epsilon < 0$, $\mu < 0$) [21]. Цей клас матеріалів можна отримати тільки штучно.

Види метаматеріалів. Класифікація метаматеріалів у цій роботі проведена на основі аналізу їх застосування. Відповідно до описаного критерію, метаматеріали можна розділити на такі групи.

Електромагнітні метаматеріали. (EM) – це матеріали, які мають нові (або відмінні від класичних) електромагнітні характеристики рис. 3. EM використовується для оптичних і мікрохвильових застосувань, таких як смугові фільтри, лінзи, мікрохвильові з'єднувачі, направляючі промені та об'їмники антен. Метаматеріали менше впливають на електромагнітні хвилі порівняно з довжиною хвилі електромагнітного випромінювання. Серед таких матеріалів виділяють наступні чотири групи метаматеріалів.

Одиничні негативні метаматеріали (SNG) мають або від'ємну діелектричну проникність ϵ або від'ємну проникність μ . Поєднання двох шарів SNG в один створює іншу форму метаматеріалів DNG [22]. Для проведення експериментів з відображенням хвилі були з'єднані плити з матеріалів MNG та ENG [22]. Як метаматеріали DNG, SNG змінюють свої параметри, такі як показник заломлення n , діелектрична проникність ϵ та проникність μ , зі зміною частоти через їх дисперсійний характер.

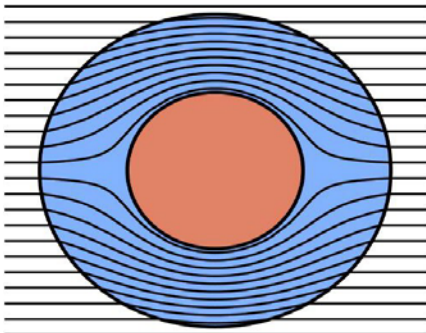


Рис. 3. Електромагнітний метаматеріал

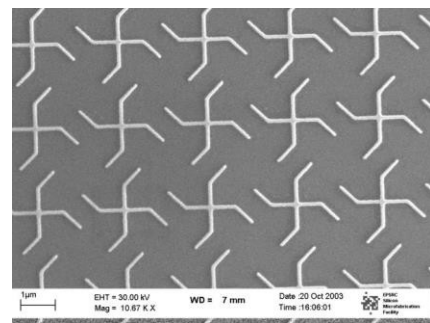


Рис. 4. Хіральный метаматеріал

Подвійні негативні метаматеріали (DNG) – це метаматеріали, які мають як діелектричну проникність, так і проникну здатність із від'ємним показником заломлення. Вони також відомі як метаматеріали з від'ємним індексом (NIM) [23]. Інші назви DNG – лівосторонні середовища, середовища з від'ємним показником заломлення та «середовища зі зворотною хвилею» [24].

Метаматеріали електромагнітної забороненої зони (EBG) контролюють поширення світла [22-24]. Це досягається або фотонними кристалами (PC), або лівосторонніми матеріалами (LHM). Обидва класи мають штучні структури, які контролюють і маніпулюють поширенням електромагнітних хвиль.

Бі-ізотропні та бі-анізотропні метаматеріали – це такий клас матеріалів, який на основі незалежних електричних і магнітних реакцій, що описуються параметрами діелектричної та магнітної проникності, можуть бути як одинарні або подвійно негативні [24]. Однак у багатьох прикладах електромагнітних метаматеріалів електричне поле викликає магнітну поляризацію, а магнітне поле індукує електричну поляризацію, тобто магнітоелектричний зв'язок. Таке середовище позначається як бі-ізотропне середовище, оскільки воно демонструє магнітоелектричний зв'язок, який є анізотропним, і також називається бі-анізотропним [24].

Хіральні метаматеріали складаються з масивів діелектричних гаммадіонів або плоского металу на підкладці на рис. 4 [25]. Коли лінійно поляризоване світло падає на масив, воно стає еліптично поляризованим під час взаємодії з гаммадіонами з тією ж швидкістю, що й сам гаммадіон.

Терагерцеві метаматеріали – це комбінація штучних матеріалів рис. 5, які взаємодіють на частотах терагерців (ТГц) [25]. Такі матеріали все ще знаходяться в стадії розробки. З від'ємними значеннями проникності ці метаматеріали можуть досягти бажаної магнітної реакції. Ці метаматеріали також називають пасивними матеріалами. Такі ефекти досягаються шляхом

виготовлення нового матеріалу, що має дещо змінні розміри для створення нової реакції. Терагерцові хвилі знаходяться безпосередньо перед початком мікрохвильового діапазону до далекого кінця інфрачервоного діапазону. Діапазон частот терагерцових метаматеріалів становить від 0,1 до 10 ТГц для досліджень або інших застосувань.

Фотонні метаматеріали – це тип електромагнітних метаматеріалів, які призначені для взаємодії з оптичними частотами, відомі як оптичні метаматеріали рис. 6 [26].

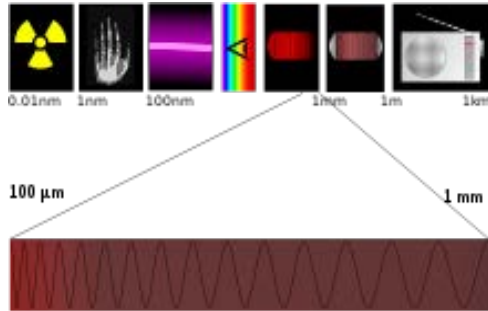


Рис. 5. Утворення хвиль терагерцевих метаматеріалів

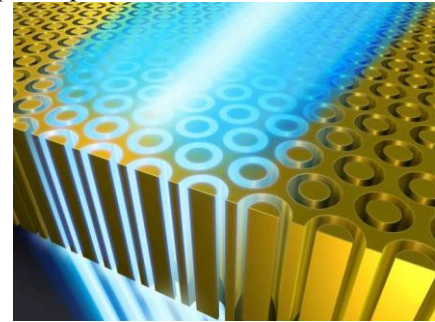


Рис. 6. Фотонні метаматеріали

Фотонні метаматеріали випромінюють джерело на оптичних довжинах хвиль. Крім того, субперіод довжини хвилі відрізняє фотонні метаматеріали від фотонної структури забороненої зони. Це пояснюється тим, що оптичні властивості виникають не через фотонні заборонені зони, а через субхвильову взаємодію зі спектром світла. Метаматеріали з можливістю нульового показника заломлення (ZIMs) і від'ємних значень показника заломлення (NIMs) є активною областю досліджень оптичних матеріалів.

Налаштовувальні метаматеріали – це матеріали, які мають здатність випадковим чином змінювати частоту показника заломлення рис. 7 [27]. Падаюча електромагнітна хвиля дає змінну реакцію цих метаматеріалів, оскільки така хвиля взаємодіє з метаматеріалами під час дистанційного керування. Структура налаштовувальних метаматеріалів змінна в реальному часі, що дає можливість реконфігурувати пристрій під час роботи [27]. Налаштування в ближньому інфрачервоному діапазоні досягається шляхом зміни діелектричної проникності нематичного рідкого кристала. Метаматеріали можна налаштувати від від'ємних значень індексу до нульового індексу або додатних значень індексу. Крім того, від'ємні значення індексу можна збільшити або зменшити.

Метаматеріали на основі частотно-селективної поверхні (FSS) є заміною метаматеріалів із фіксованою частотою зі статичною геометрією та відстанню в елементарних комірках рис. 8, які використовуються для визначення частотної характеристики даного метаматеріалу [27]. Метаматеріали на основі FSS мають можливість змінювати частоти в одному середовищі, але при фіксованій частотній характеристиці це неможливо. Вперше такий матеріал був розроблений для контролю характеристик пропускання та відбиття хвилі падаючого випромінювання [27]. FSS певної геометричної форми можуть бути складені у вигляді періодичних масивів з елементами двовимірної площини. Метаматеріали на основі FSS мають взаємозамінну термінологію High Impedance Surface (HIS) або Artificial Magnetic Conductor (AMC). HIS або AMC має штучну металеву електромагнітну структуру. Розроблені конструкції існуючих прототипів з виділенням опорних поверхневих хвильових струмів відрізняються від консервативних металевих провідників.

Нелінійні метаматеріали – це штучні матеріали, в яких існує нелінійність [27]. Це пояснюється тим, що макроскопічне електричне поле електромагнітного джерела є меншим, ніж мікроскопічне електричне поле включень [27]. Проникність і діелектрична проникність матеріалу описує реакцію на електромагнітне випромінювання. Він також може бути виготовлений з певного типу нелінійних метаматеріалів, які мають властивості змінювати потужність падаючої хвилі.

Переваги метаматеріалів. До основних переваг зазначеного класу матеріалів слід віднести:

I) покращення спрямованості: метаматеріали мають притаманну властивість, яка контролює напрямок електромагнітного випромінювання, щоб збирати вихідну енергію в невеликій кутовій області навколо нормалі до поверхні [28]. Матеріал DNG покращує спрямовані властивості антени.

II) розширення пропускну здатності: антена з метаматеріалів збільшує досягнуту пропускну здатність порівняно зі звичайною патч-антеною [29]. Це досягається використанням суперстрату метаматеріалу поверх звичайної антени або завантаженням LHM.

III) посилення випромінюваної потужності: невелика антена може збільшити потужність випромінювання за рахунок застосування метаматеріалів DNG [30]. Невелика дипольна антена, покрита метаматеріалами DNG, використовується для збільшення потужності випромінювання набагато більше порівняно зі звичайною антеною.

IV) зміна ширини променя: антени з метаматеріалів зменшують ширину променя та співвідношення бічних пелюсток [31] і таким чином підвищують спрямованість і зменшують зворотні втрати антен.

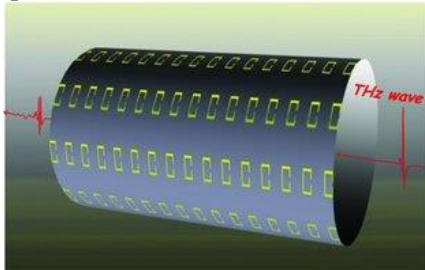


Рис. 7. Налаштовувальні метаматеріали

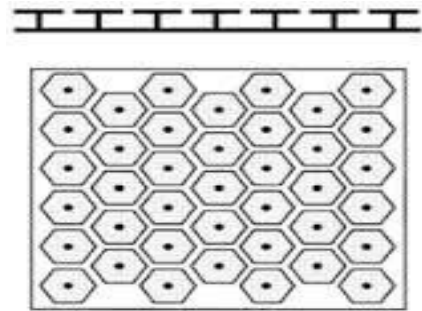


Рис. 8. Структура FSS

Висновки. Метаматеріали – це нова галузь досліджень, яка, без сумніву, стає надзвичайно актуальною сферою досліджень. Науковців з багатьох сфер приваблюють метаматеріали через їх унікальні ефективні характеристик. Застосування метаматеріалів дозволило отримати дивовижні покращень у функціях електромагнітного відгуку, які можуть запропонувати набагато ширші можливості для майбутнього проектування пристроїв, компонентів і основних властивостей метаматеріалів.

Список використаних джерел:

1. Mikulich, O., Shvabyuk, V., Sulym, H. Dynamic Stress Concentration at the Boundary of an Incision at the Plate under the Action of Weak Shock Waves. // Acta Mechanica et Automatica. — 2017. —11(3).— PP. 217-221.
2. Pendry, J.B.: Negative refraction makes a perfect lens. Phys. Rev. Lett. 2000.
3. Papasimakis, N. Fedotov, V.A., Zheludev, N.I., Prosvirnin, S.L.: Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency. Phys. Rev. Lett. 2008.
4. Schurig, D., Mock, J.J., Justice, B.J., Cummer, S.A., Pendry, J.B., Starr, A.F., Smith, D.R.: Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. Science 2006, 314, 977–980 p.
5. Linden, S., Enkrich, C., Dolling, G., Klein, M.W., Zhou, J., Koschny, T., Soukoulis, C.M., Burger, S., Schmidt, F., Wegener, M.: Photonic Metamaterials: Magnetism at Optical Frequencies. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2006, 12, 1097–1105 p.
6. Li, C., Wu, J., Jiang, S., Su, R., Zhang, C., Jiang, C., Zhou, G., Jin, B., Kang, L., Xu, W.: Electrical dynamic modulation of THz radiation based on superconducting metamaterials Appl. Phys. Lett. 2017.
7. Shelby, R.A., Smith, D.R., Schultz, S.: Experimental verification of a negative index of refraction. Science 2001, 292, 77–79 p.
8. Zheludev, N.I.: The road ahead for metamaterials. Science 2010, 328, 582–583 p.
9. Smith, D.R., Padilla, W.J., Vier, D.C., Nemat-Nasser, S.C., Schultz, S.: Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity. Phys. Rev. Lett. 2000.
10. Veselago, V.G.: The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ . Usp. Fiz. Nauk. 1967, 92, 517–526 p.
11. Pendry, J.B., Holden, A.J., Robbins, D.J., Stewart, W.J.: Magnetism from Conductors, and Enhanced Non-linear Phenomena. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1999.
12. Ziolkowski, R.W.: Design, Fabrication, and Testing of Double Negative Metamaterials. IEEE Trans. Antennas Propag. 2003.
13. Shamonina, E., Solymar, L.: Magneto-inductive waves supported by metamaterial elements: components for a one-dimensional waveguide. J. Phys. D: Appl. Phys. 2004, 37, 362–367 p.
14. Kafesaki, M., Tsiapa, I., Katsarakis, N., Koschny, T., Soukoulis, C.M., Economou, E.N.: Left-handed meta-materials: The fishnet structure and its variations. Phys. Rev. B 2007.

15. Abdulkarim, Y.I., Deng, L., Altintas, O., Unal, E., Karaaslan Physica, M. Low-Dimens, E.: Metamaterial absorber sensor design by incorporating swastika shaped resonator to determination of the liquid chemicals depending on electrical characteristics. Syst. Nanostruct. 2019.
16. Fang, N., Zhang, X.: Rapid growth of evanescent wave by a silver superlens. Appl. Phys. Lett. 2003, 82, 161–163 p.
17. Zhu, J., Eleftheriades, G.V.: Dual-band metamaterial-inspired small monopole antenna for WiFi applications. Electron. Lett. 2009.
18. Aydin, K., Bulu, I., Ozbay, E.: Subwavelength resolution with a negative-index metamaterial superlens. Appl. Phys. Lett. 2007.
19. Tao, Hu, Nathan I. Landy, Christopher M. Bingham, Xin Zhang, Richard D. Averitt, and Willie J. Padilla.: A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization. Optics express 2008.
20. Bagmanci, M., Karaaslan, M., Unal, E., Özaktürk, M., Akgol, O., Karadag, F., Bhadauria, A., Bakir, M.: Wide band fractal-based perfect energy absorber and power harvester. Int. J. RF Microw. Comput. Aided Eng. 2019.
21. D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz.: Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity. Phys. Rev. Lett. 2000.
22. S. Zhang, W. Fan, N. Panoiu, K. Malloy, R. Osgood, and S. Brueck.: Experimental demonstration of near-infrared negative-index metamaterials. Phys. Rev. Lett., Sep. 2005.
23. E. Nader and R. W. Ziolkowski.: A positive future for double-negative metamaterials, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2005, vol. 53, pp. 1535-1556.
24. R.W. Ziolkowski and A. Kipple.: Causality and double-negative metamaterials. Phys. Rev. E, Aug. 2003.
25. Jaggard, D. L., Mickelson, A. R., Papas, C. H.: On electromagnetic waves in chiral media. Applied Physics 18 (2): 211. Bibcode1979.
26. Rüdiger Paschotta (2008-18): Photonic Metamaterials Encyclopedia of Laser Physics and Technology I & II Wiley-VCH Verlag. p. 1. Retrieved 2009.
27. Y. S. Kivshar, Nonlinear and Tunable Metamaterials, in: Metamaterials: Fundamentals and Applications II, edited by M. A. Noginov, N. I. Zheludev, A. D. Boardman, and N. Engheta Proc. SPIE 7392, 739217 (2009).
28. H. Zhou et al.: A novel high-directivity microstrip patch antenna based on zero-index metamaterial. IEEE Antennas and Wireless Propagat. Lett. 2009, vol. 8, no. 6, pp. 538–541.
29. Jui Han Lu.: Bandwidth Enhancement Design of Single layer Slotted Circular Microstrip Antennas. IEEE Transactions on Antenna and propagation. May 2003, vol.51, pp 1126-1129 No.5.
30. R.W. Ziolkowski and A. Kipple.: Application of double negative metamaterials to increase the power radiated by electrically small antennas. IEEE Trans. Antennas Propagation, Oct. 2003, vol.51, pp.2626–2640.
31. Enoch S. et.: A metamaterial for directive emission. Phys Rev. Letters 2002.
32. Manufacturing Disruption, Available online: <https://manufacturingdisruption.com/2014/12/31/metamaterials-ultimate-composites/> (accessed on 4 May 2021)

Рецензент: Делявський Михайло Володимирович, доктор технічних наук, професор