

ISSN 1028-821X. Radiofiz. Electron. 2020. Vol. 25, No. 1: 80–85

DOI: <https://10.15407/rej2020.01.080>

УДК 621.372.2

М.А. Миляев¹, С.В. Недух^{1,2}, С.И. Тарапов^{1,2,3}

¹ Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

² Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина
4, пл. Свободы, Харьков, 61022, Украина

³ Харьковский национальный университет радиоэлектроники
14, просп. Науки, Харьков, 61166, Украина
E-mail: milyaev.mamay@gmail.com

Управляемый разветвитель на основе планарного гиперболического метаматериала

Предмет и цель работы. Создан и исследован разветвитель сверхвысокочастотной волны на основе планарного гиперболического метаматериала с дефектом в структуре. В планарных гиперболических метаматериалах создаются условия, при которых распространяющаяся электромагнитная (ЭМ) волна канализируется в определенном направлении, зависящем от параметров метаматериала. Разветвление волны возможно при создании дефекта в периодической структуре внутри метаматериала, от которого будет отражаться часть падающей волны. При изменении пространственной ориентации дефекта относительно падающей ЭМ-волны изменяется направление распространения отраженной ЭМ-волны. Таким образом в рассматриваемый разветвитель можно внедрить управление распространением волны.

Методы и методология работы. Для описания возникновения дефекта в планарном гиперболическом метаматериале применена теория цепей, которая связывает материальные параметры с эквивалентными емкостями и индуктивностями внутри элементарной ячейки, зависящие от параметров микрополосковой линии и конденсаторов. Изменение любого параметра цепи внутри элементарной ячейки приводит к изменению материальных параметров этой ячейки, делая ее дефектной. Дефект создается за счет изменения емкости конденсаторов в заданном ряде элементарных ячеек планарного гиперболического метаматериала – тем самым достигается управление размерами и пространственным расположением дефекта относительно распространяющейся волны. Для подтверждения численной модели распространения ЭМ-волны внутри планарного гиперболического метаматериала с дефектом методом активного зонда получены распределения поля над поверхностью метаматериала для трех случаев – бездефектного и двух дефектов различной ориентации. Для введения электронного управления предлагается заменить в элементарных ячейках конденсаторы варакторами.

Результаты работы. Распределения полей показали, что дефект частично отражает падающую на него ЭМ-волну, канализированную в планарном гиперболическом метаматериале. Изменение угла расположения дефекта изменяет угол отраженной волны. Чтобы элементарная ячейка стала дефектной, достаточно изменить емкость в ней на 20 %, что вполне реализуемо в современных варакторах.

Заключение. Рассматриваемый планарный гиперболический метаматериал с дефектом структуры применим для создания управляемых разветвителей ЭМ-волны. Ил. 3. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: планарный гиперболический метаматериал, электромагнитная волна, микрополосковая линия, разветвитель.

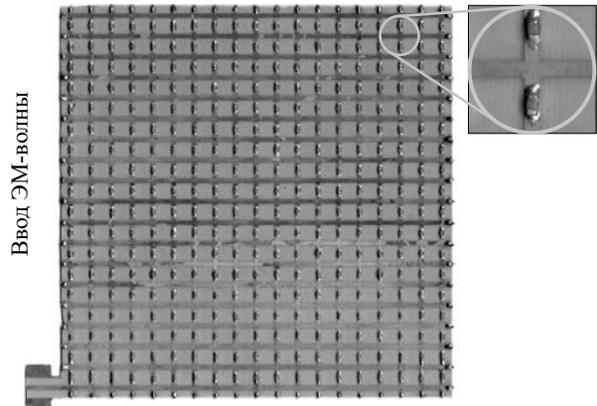
Планарные гиперболические метаматериалы имеют такую форму тензора диэлектрической или магнитной проницаемости, что график дисперсионного соотношения компонент волнового вектора приобретает форму гиперболы

в пространстве волновых векторов [1, 2]. Это приводит к тому, что распределение электромагнитного поля в плоскости данного метаматериала для определенного диапазона частот имеет разрешенные и запрещенные простран-

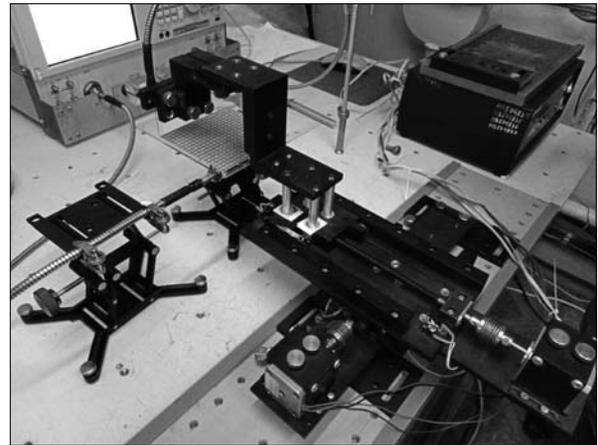
ственные области распространения. Это свойство делает подобные метаматериалы перспективными для создания на их основе элементов систем, где есть необходимость управлять направлением распространения волны в плоскости. В качестве примера может быть предложен венти́ль, в котором прохождение электромагнитной (ЭМ) волны и ее интенсивность обратно пропорциональны величине активных потерь в метаматериале [3]. Кроме того, на основе планарного гиперболического метаматериала также можно синтезировать левостороннюю среду [4]. На практике реализация подобного метаматериала в микроволновом диапазоне возможна на основе микрополосковых линий и элементов поверхностного монтажа [2]. Простота создания подобного метаматериала позволяет конструировать на его основе множество устройств СВЧ-техники.

Одним из таких устройств является разветвитель СВЧ-волны [5]. Современные разветвители изготавливают в планарном исполнении с целью их миниатюризации [6]. С помощью элементов электронных цепей возможна реализация переключения между линиями разветвителя. Однако существующие разветвители не обеспечивают разветвление волны с произвольно управляемым направлением. Для СВЧ-устройств, где существует подобная необходимость, предлагается вариант реализации планарного разветвителя СВЧ-волны с произвольно изменяемым направлением на основе планарного гиперболического метаматериала с дефектными элементарными ячейками в структуре.

1. Методика эксперимента. Нами был численно смоделирован и технически реализован планарный гиперболический метаматериал в виде структуры из периодически повторяющихся элементарных ячеек (рис. 1, а). На частоте 4,4 ГГц размер d элементарной ячейки разрабатываемой структуры должен быть много меньше длины волны λ , распространяющейся в ней, для того чтобы вся структура периодически расположенных элементарных ячеек приобрела свойства метаматериала. Микрополосковые линии с конденсаторами, согласно теории цепей, представляют собой сосредоточенные индуктивности и емкости. В рамках теории метаматериалов тензоры диэлектрической



а



б

Рис. 1. Фотографии планарного гиперболического метаматериала (а) и экспериментальной установки (б)

и магнитной проницаемости могут быть описаны через сосредоточенные элементы цепи [7]. В нашем случае гиперболическость достигается за счет разности знаков компонент тензора магнитной проницаемости.

На исследуемой частоте для получения значений компонент тензора магнитной проницаемости $\mu_x = 1$ и $\mu_y = -1,11$, согласно [4], были рассчитаны параметры элементарной ячейки. Ячейка представляет собой пересечение микрополосковых линий шириной 1,26 мм. По одной из осей сделаны разрывы на линии, в которые впаяны конденсаторы емкостью 0,47 пф. Размер элементарной ячейки составляет 6×6 мм. Планарный гиперболический метаматериал выполнен посредством химического травления текстолита фирмы *Neltec* толщиной 0,381 мм с $\varepsilon = 2,17$.

Измерение распределения ЭМ-поля осуществлялось с использованием метода актив-

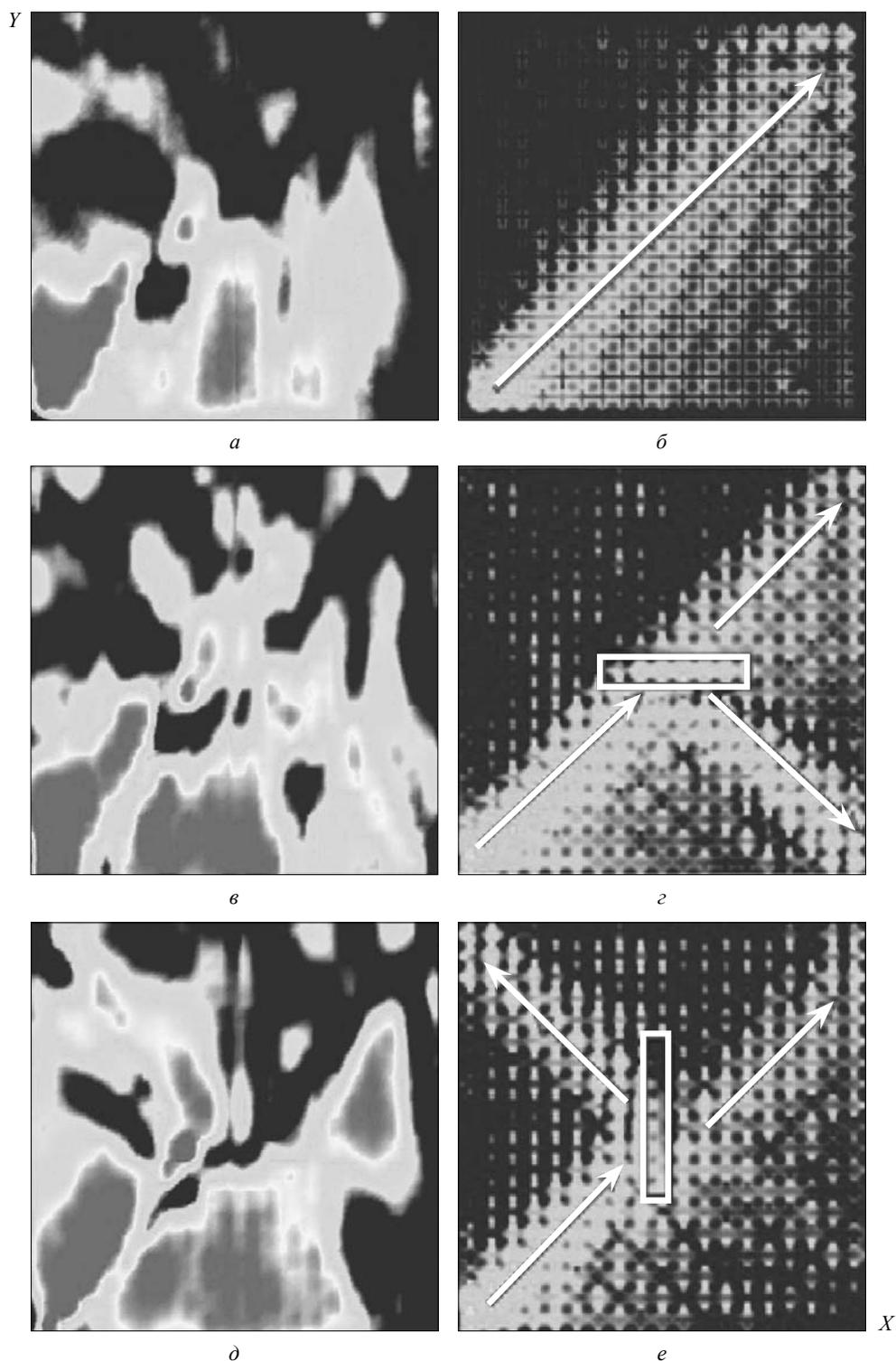


Рис. 2. Результаты экспериментального исследования (слева) и численного моделирования (справа) распределения поля в планарном гиперболическом метаматериале: *а, б* – без дефекта; *в, г* – с дефектом, параллельным оси *X*; *д, е* – с дефектом, параллельным оси *Y*

ного зонда [8]. Установка для измерений состояла из векторного анализатора цепей *Agilent-N5230A* и активного зонда (медная проволока толщиной 1 мм и длиной 40 мм), перемещае-

мого с помощью двухосевого сканатора [9], управляемого через компьютер (рис. 1, б).

Удалив конденсаторы в ряде ячеек, мы таким образом создаем дефект в структуре. Так

как в направлении распространения волны размер дефекта составляет около 8 мм, а длина распространяющейся в планарном гиперболическом метаматериале волны составляет около 24 мм, то дефект является субволновым.

2. Результаты исследований. В результате проведенных экспериментов и численного моделирования получены распределения полей для трех случаев. На рис. 2, а, б показано направление распространения электромагнитной волны в бездефектном планарном гиперболическом метаматериале. Дефект, расположенный на пути распространения волны, приводит к частичному ее отражению (рис. 2, в–е), в отличие от случая метаматериала без дефекта. Наиболее показателен пример с дефектом, расположенным вдоль оси Y (рис. 2, д, е). Падающая на дефект волна отражается под углом, равным углу падения в область, где до этого волна не могла распространяться. Также наблюдается участок с усиленной интенсивностью под углом, равным углу падения, для случая дефекта вдоль оси X , что так же свидетельствует об отражении части волны от дефекта. Отражаемая от исследуемого дефекта мощность составила около 50 % от исходной.

Помимо удаления конденсатора, создать дефектную элементарную ячейку можно простым изменением номинала конденсатора внутри ячейки. Для того чтобы управлять изменением номинала электронным образом, можно использовать варакторы. Как показало моделирование, достаточно 20 % изменения емкости от номинала для того, чтобы возник рассеивающий волну дефект, что вполне достижимо для современных варакторов. При реализации цепи, где значением каждого варактора можно управлять независимо, возможно создать планарный гиперболический метаматериал, где

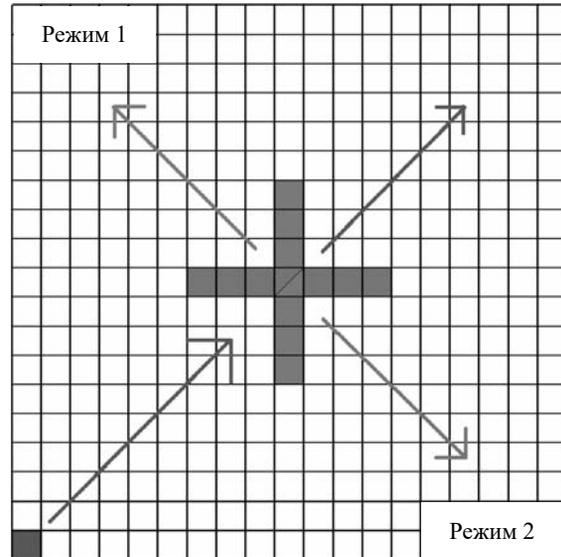


Рис. 3. Схема перспективного разветвителя СВЧ-волны

направлением распространения волны и положением дефекта относительно нее можно будет управлять электронным образом. Схематическое изображение подобного устройства представлено на рис. 3, где показан разветвитель, имеющий два режима работы: режим 1 – включен вертикальный дефект, режим 2 – включен горизонтальный дефект.

Вывод. Таким образом, в работе предложена конструкция разветвителя СВЧ-волны на основе планарного гиперболического метаматериала с дефектом. Варьируя пространственную ориентацию дефекта относительно падающей ЭМ-волны, можно изменять направление распространения отраженной волны. Вариация размеров и пространственного положения дефекта относительно распространяющейся волны осуществляется изменением емкости конденсаторов в заданном ряде элементарных ячеек планарного гиперболического метаматериала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Smith D.R., Schurig D. Electromagnetic Wave Propagation in Media with Indefinite Permittivity and Permeability Tensors. *Phys. Rev. Lett.* 2003. Vol. 90, Iss. 7. P. 077405(4 p.). DOI: 10.1103/PhysRevLett.90.077405.
2. Chshelokova A.V., Kapitanova P.V., Poddubny A.N., Filonov D.S., Slobozhanyuk A.P., Kivshar Y.S., Belov P.A. Hyperbolic transmission-line metamaterials. *J. Appl. Phys.* 2012. Vol. 112, Iss. 7. P. 073116(5 p.). DOI: 10.1063/1.4758287.
3. Jiang H., Liu W., Yu K., Fang K., Sun Y., Li Y., Chen H. Experimental verification of loss-induced field enhancement and collimation in anisotropic μ -near-zero metamaterials. *Phys. Rev. B.* 2015. Vol. 91, Iss. 4. P. 045302.
4. Feng Y., Teng X., Chen Y., Jiang T. Electromagnetic wave propagation in anisotropic metamaterials created by a set of periodic inductor-capacitor circuit networks. *Phys. Rev. B.* 2005. Vol. 72, Iss. 24. P. 245107. DOI: 10.1103/PhysRevB.72.245107.
5. Pozar D.M. *Microwave Engineering*. Fourth ed. John Wiley & Sons Inc. 2005. P. 317–372.
6. Abbosh A. A compact UWB three-way power divider. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.* 2007. Vol. 17, Iss. 8. P. 598–600. DOI: 10.1109/LMWC.2007.901777.

7. Feng Y., Teng X., Chen Y., Jiang T., Zhao J. Anomalous reflection and refraction in anisotropic metamaterial realized by periodically loaded transmission line network. *J. Appl. Phys.* 2006. Vol. 100, Iss. 11. P. 114901(7 p.). DOI: 10.1063/1.2369540.
8. Kozhara L.I., Polevoy S.Y., Popov I.V. Technique for analysis of the spatial field distribution in tapered wire medium. *Solid State Phenomena*. 2014. Vol. 214. P. 75–82. DOI:10.4028/www.scientific.net/SSP.214.75.
9. Валитов Р.А., Сретенский В.Н. *Радиотехнические измерения*. М.: Сов. радио, 1970. 712 с.

Стаття надійшла 10.07.2019

REFERENCES

1. Smith, D.R., Schurig, D., 2003. Electromagnetic Wave Propagation in Media with Indefinite Permittivity and Permeability Tensors. *Phys. Rev. Lett.*, **90**(7), pp. 077405(4 p.). DOI: 10.1103/PhysRevLett.90.077405.
2. Chshelokova, A.V., Kapitanova, P.V., Poddubny, A.N., Filonov, D.S., Slobozhanyuk, A.P., Kivshar, Y.S., Belov, P.A., 2012. Hyperbolic transmission-line metamaterials. *J. Appl. Phys.*, **112**(7), pp. 073116(5 p.). DOI: 10.1063/1.4758287.
3. Jiang, H., Liu, W., Yu, K., Fang, K., Sun, Y., Li, Y., Chen, H., 2015. Experimental verification of loss-induced field enhancement and collimation in anisotropic μ -near-zero metamaterials. *Phys. Rev. B*, **91**(4), pp. 045302.
4. Feng, Y., Teng, X., Chen, Y., Jiang, T., 2005. Electromagnetic wave propagation in anisotropic metamaterials created by a set of periodic inductor-capacitor circuit networks. *Phys. Rev. B*, **72**(24), pp. 245107. DOI: 10.1103/PhysRevB.72.245107.
5. Pozar, D.M., 2005. *Microwave Engineering*. Fourth ed. John Wiley & Sons Inc., pp. 317–372.
6. Abbosh, A., 2007. A compact UWB three-way power divider. *IEEE Microwave Wireless Compon. Lett.*, **17**(8), pp. 598–600. DOI: 10.1109/LMWC.2007.901777.
7. Feng, Y., Teng, X., Chen, Y., Jiang, T., Zhao, J., 2006. Anomalous reflection and refraction in anisotropic metamaterial realized by periodically loaded transmission line network. *J. Appl. Phys.*, **100**(11), pp. 114901(7 p.). DOI: 10.1063/1.2369540.
8. Kozhara, L.I., Polevoy, S.Y., Popov, I.V., 2014. Technique for analysis of the spatial field distribution in tapered wire medium. *Solid State Phenomena*, **214**, pp. 75–82. DOI:10.4028/www.scientific.net/ssp.214.75.
9. Valitov, R.A., Sretenskiy, V.N., 1970. *Radio engineering measurements*. Moscow: Sov. Radio Publ. (in Russian).

Received 10.07.2019

М.А. Миляев¹, С.В. Недух^{1,2}, С.И. Тарапов^{1,2,3}

¹O.Ya. Usikov IRE of NASU

12, Acad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

²V.N. Karazin Kharkiv National University

4, Svoboda Sq., Kharkiv 61022, Ukraine

³Kharkiv National University of Radio Electronics

14, Nauka Av., Kharkiv, 61166, Ukraine

A TUNABLE SPLITTER UPON

A PLANAR HYPERBOLIC METAMATERIAL

Subject and Purpose. The paper presents the development and testing of a microwave splitter based on a planar hyperbolic metamaterial with a structural defect. The planar hyperbolic metamaterial is so constructed that a propagating electromagnetic (EM) wave is channeled in a certain direction depending on the metamaterial parameters. The wave splitting is possible where a part of the incident wave is reflected from a defect created inside the metamaterial. As the defect spatial orientation relative to the incident EM wave changes, the propagation direction of the reflected EM wave also changes. By this means the wave propagation control can be implemented in the considered splitter.

Methods and Methodology. A defect in a planar hyperbolic metamaterial is created using the circuit theory that relates the material parameters to the equivalent unit-cell capacitances and inductances which, in turn, depend on the parameters of the microstrip line and capacitors. Thus, a change in any parameter of the circuit inside the unit cell changes its material parameters and makes a defect cell. In this work, a defect is created by changing the capacitance of the capacitors in a given set of elementary cells of a planar hyperbolic metamaterial, controlling thereby the size of the defect and its spatial location relative to the propagating wave. The numerical model of EM wave propagation inside a planar hyperbolic metamaterial with a defect is validated by experiment. In it, the field distribution over the metamaterial surface is obtained using the active probe method in the three cases: a defect-free metamaterial and two variants of defect orientation. To insert the electronic control, it is proposed to replace the elementary cell capacitors with varactors.

Results. The obtained field distributions show that the defect partially reflects the incident EM wave channelized in the planar hyperbolic metamaterial. As the defect location angle changes, the wave reflection angle also changes. To make a defect unit cell, it will only suffice to change its capacity by 20% from the original, which is quite feasible in modern varactors.

Conclusion. The performed studies have shown that the considered planar hyperbolic metamaterial with a structural defect is good for creating tunable electromagnetic wave splitters.

Key words: planar hyperbolic metamaterial, electromagnetic wave, microstrip line, splitter.

М.О. Мільяєв¹, С.В. Недух^{1,2}, С.І. Тарапов^{1,2,3}

¹Інститут радіофізики та електроніки ім. А.Я. Усикова НАН України
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

²Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
4, пл. Свободи, Харків, 61022, Україна

³Харківський національний університет радіоелектроніки
14, просп. Науки, Харків, 61166, Україна

КЕРОВАННИЙ РОЗГАЛУЖУВАЧ НА ОСНОВІ ПЛАНАРНОГО ГІПЕРБОЛІЧНОГО МЕТАМАТЕРІАЛУ

Предмет і мета роботи. Створено і досліджено розгалужувач надвисокочастотної хвилі на основі планарного гіперболічного метаматеріалу з дефектом у структурі. У планарному гіперболічному метаматеріалі створюються умови, за яких поширення електромагнітної (ЕМ) хвилі каналізується в певному напрямку, залежному від параметрів метаматеріалу. Розгалуження хвилі можливе при створенні дефекту усередині метаматеріалу, від якого частина падаючої хвилі відбиватиметься. При зміні просторової орієнтації дефекту щодо падаючої ЕМ-хвилі змінюється напрям поширення відбитої ЕМ-хвилі. Таким чином у розглянутий розгалужувач можна впровадити керування поширенням хвилі.

Методи і методологія роботи. Для опису появи дефекту в планарному гіперболічному метаматеріалі застосовано теорію кіл, яка пов'язує матеріальні параметри з еквівалентними ємностями та індуктивностями всередині елементарної комірки, що залежать від параметрів мікросмужкової лінії і конденсаторів. Зміна будь-якого параметра кола всередині елементарної комірки призводить до зміни матеріальних параметрів цієї комірки, роблячи її дефектною. Дефект створюється за рахунок зміни ємності конденсаторів у заданому ряді елементарних комірок планарного гіперболічного метаматеріалу – у такий спосіб досягається керування розмірами і просторовим розташуванням дефекту щодо поширюваної хвилі. Для підтвердження чисельної моделі поширення ЕМ-хвилі всередині планарного гіперболічного метаматеріалу з дефектом методом активного зонда отримано розподіл поля над поверхнею метаматеріалу для трьох випадків – бездефектного і двох дефектів різної орієнтації. Для введення електронного керування пропонується замінити в елементарних комірках конденсатори на варактори.

Результати роботи. Розподіли полів показали, що дефект частково відбиває падаючу на нього ЕМ-хвилю, каналізовану в планарному гіперболічному метаматеріалі. Зміна кута розташування дефекту змінює кут відбитої хвилі. Щоб елементарна комірка стала дефектною, досить змінити ємність у ній на 20 %, що можна реалізувати у сучасних варакторах.

Висновок. Досліджуваний планарний гіперболічний метаматеріал з дефектом структури можна застосовувати для створення керованих розгалужувачів ЕМ-хвилі.

Ключові слова: планарний гіперболічний метаматеріал, електромагнітна хвиля, мікросмужкова лінія, розгалужувач.