

УДК 537.877

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЧ- И ИК-МЕТАМАТЕРИАЛОВ С ТРЁХМЕРНЫМИ РЕЗОНАТОРАМИ*

В. А. Сейфи^{1,2}, В. Я. Принц¹

¹Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13

²Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: valentin_seyfi@isp.nsc.ru

Рассчитаны спектральные характеристики метаматериалов, сформированных из массивов оригинальных цилиндрических резонаторов, взаимодействующих с подложкой. Показано, что в данных резонаторах наряду с обычными модами возбуждаются дополнительные моды, связанные с особенностью формы резонаторов и наличием диэлектрической подложки. Обнаружено, что помимо основного резонанса спектральная характеристика содержит дополнительный резонансный пик, зависящий от ширины поперечной щели цилиндра и диэлектрической постоянной материала подложки. Полученные зависимости указывают на возможность создания динамически управляемых метаматериалов.

Ключевые слова: метаматериалы, численное моделирование, цилиндрические резонаторы.

Введение. Известно множество работ по созданию и исследованию электромагнитных метаматериалов (см., например, библиографию в [1]), формируемых из массивов периодически расположенных электромагнитных резонаторов. Падающее на такой материал электромагнитное излучение с частотой близкой или равной резонансной возбуждает в резонаторах большие токи, которые, в свою очередь, генерируют вторичное излучение, усиливая или ослабляя исходную электромагнитную волну. В результате этого метаматериалы обладают уникальными свойствами (отрицательный коэффициент преломления, гигантская оптическая активность и т. д.), отсутствующими у природных материалов.

К настоящему времени известен целый ряд практических применений метаматериалов, охватывающих такие области, как радиотехника, телекоммуникации и др. Разрабатываются различные приборы для управления электромагнитным излучением: сверхлинзы с разрешением много меньшим длины волны излучения, поляризаторы, экраны невидимости, сверхпоглотители [1, 2].

Большинство исследований в области метаматериалов выполнено с массивами плоских двумерных резонаторов [3]. В плоских резонаторах невозможно достичь одновременного их взаимодействия с электрической и магнитной составляющими излучения, что значительно сужает области их практического применения [4]. В работе [5] впервые были созданы и исследованы терагерцовые метаматериалы на основе трёхмерных резонаторов, сформированных по оригинальной российской технологии [6].

Переход к трёхмерным резонаторам открывает новые возможности в области управления электромагнитным излучением. Создан метаматериал с использованием киральных

*Работа выполнена при поддержке Сибирского отделения РАН (проект № 128), Интеграционного проекта СО РАН и НАН Беларуси (№ 28) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 12-02-01254-а).

метаматериалов, обладающих гигантской оптической активностью [7]. Данная технология позволяет формировать широкий круг $3D$ -резонаторов от спиралей до цилиндров с характерными размерами от миллиметров до нанометров. Компьютерное моделирование обеспечивает эффективность выполнения таких работ. Пока известна одна публикация, в которой для инфракрасного диапазона рассчитан спектр поглощения трёхмерных цилиндров, не имеющих поперечной щели, без учёта влияния подложки [8].

Задача данной работы — моделирование свойств трёхмерных цилиндрических резонаторов с дополнительной поперечной щелью и изучение влияния ширины этой щели на спектральные характеристики предлагаемого метаматериала с учётом наличия диэлектрической подложки.

Моделирование спектральных характеристик СВЧ- и ИК-метаматериалов.

С помощью моделирования в программном пакете Ansoft HFSS рассчитаны амплитуды S_{21} -параметров (коэффициенты прохождения) для массивов цилиндров с продольной и поперечной щелями в СВЧ- и среднем ИК-диапазонах. Наряду с ожидаемыми резонансами, обусловленными возбуждением магнитным полем круговых токов на поверхности цилиндра, обнаружены неожиданные резонансы, связанные со специально созданной анизотропией структуры и взаимодействием резонатора с подложкой. Прослежены трансформация спектра при последовательном увеличении размера поперечной щели и влияние диэлектрической подложки на характер возбуждаемых резонансных мод.

В качестве резонансного элемента для СВЧ-метаматериала был выбран медный цилиндр квадратного сечения (рис. 1) с внешним размером сторон $s = 2,2$ мм и длиной $l = 3$ мм. Толщина стенок $w = 0,2$ мм. Продольная щель имеет ширину $t = 0,3$ мм. Ширина поперечной щели d варьировалась от 0,1 до 1 мм. В качестве подложки использовался диэлектрик FR4 с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 4,4$ и толщиной $h = 0,25$ мм. В метаматериале цилиндры упорядочены в двумерном массиве в плоскости XZ , оси цилиндров перпендикулярны подложке, период p в направлении OX и OZ равен 5 мм. Для ИК-метаматериала $s = 2$ мкм, $l = 8$ мкм, $w = 0,1$ мкм, $t = 0,2$ мкм, $d = 1$ мкм, $p = 5$ мкм, подложка отсутствует. Численное моделирование выполнено для плоской электромагнитной волны, распространяющейся в направлении, перпендикулярном оси цилиндра, и падающей нормально со стороны противоположной продольной щели, при этом электрическая

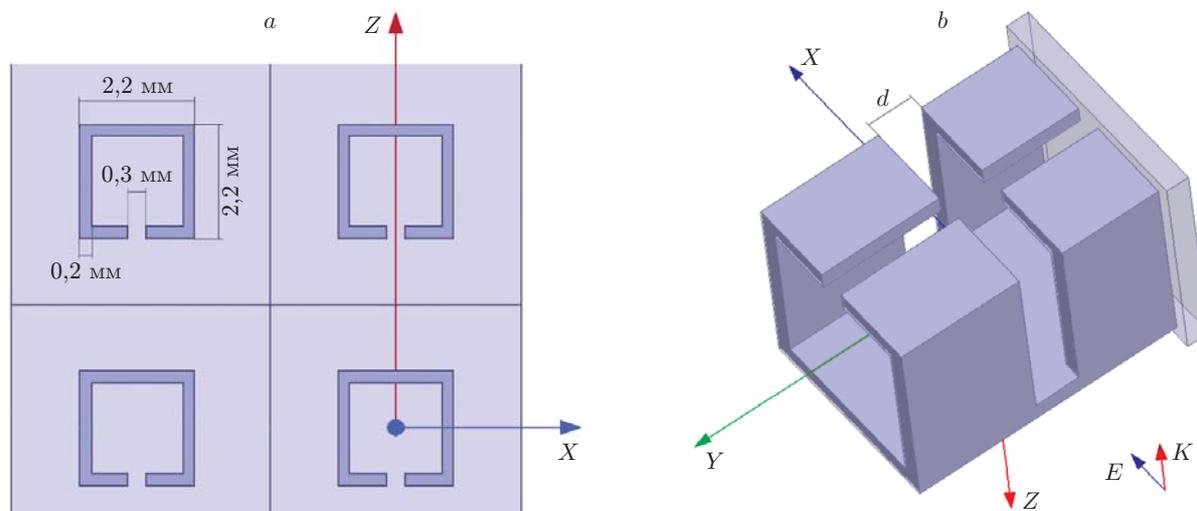


Рис. 1. Схематическое изображение исследуемого метаматериала: a — массив связанных цилиндрических резонаторов на диэлектрической подложке; b — элементарная ячейка метаматериала

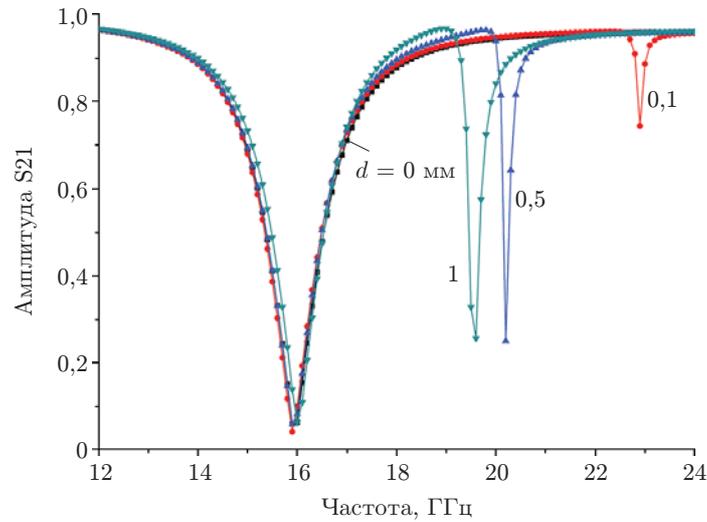


Рис. 2. Спектр пропускания (амплитуда S21-параметра) двумерного массива цилиндров на диэлектрической подложке. Размер поперечной щели $d = 0$ соответствует цилиндру без поперечного разреза. Частота основного резонанса (для $d = 0$) $f = 15,9$ ГГц

компонента волны перпендикулярна оси цилиндра и продольна поперечной щели, а магнитная направлена вдоль оси цилиндра. Важно подчеркнуть, что в такой геометрии достигается эффективное взаимодействие магнитного поля с цилиндрическим резонатором, и это является основным преимуществом 3D-технологии перед 2D-технологией.

Цилиндры для СВЧ-диапазона, рассчитанные в данной работе, имеют миллиметровые размеры и могут быть изготовлены методом механической обработки. Для перехода в более высокочастотный диапазон необходимо уменьшать размеры цилиндров. Трёхмерные резонаторы микронных размеров могут быть созданы с помощью технологий направленного изгиба и сворачивания напряжённых гетероструктур, в том числе гетероструктур металл—полупроводник [6, 7]. На рис. 2 приведён результат моделирования электромагнитных свойств массива цилиндрических резонаторов. Кроме основного резонанса имеет место дополнительный, связанный с наличием диэлектрической подложки. Из приведёнno-

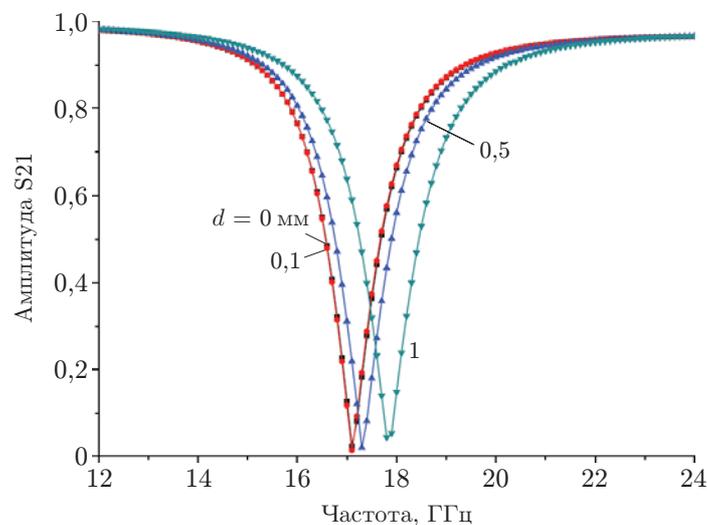


Рис. 3. Спектр пропускания (амплитуда S21-параметра) двумерного массива цилиндров без подложки. Частота основного резонанса (для $d = 0$) $f = 17,1$ ГГц

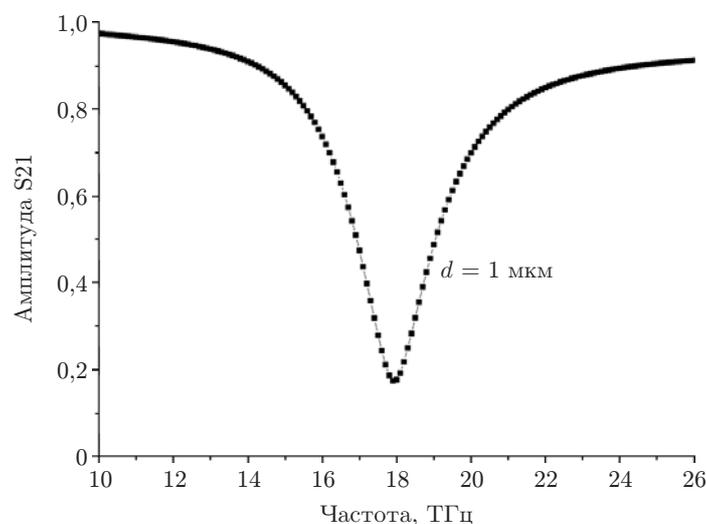


Рис. 4. Спектр пропускания (амплитуда S21-параметра) двумерного массива микронных цилиндров без подложки. Размер поперечной щели $d = 1 \text{ мкм}$. Частота основного резонанса $f = 17,9 \text{ ТГц}$ (длина волны $\lambda = 16,76 \text{ мкм}$)

го графика видно, что поперечный разрез и наличие диэлектрической подложки вызывают появление дополнительного резонансного пика в спектре пропускания цилиндрического резонатора. Хорошо видно, что чем больше размер поперечной щели d , тем ближе дополнительный пик к основному резонансу и больше его амплитуда. В отсутствие подложки при любой ширине поперечной щели спектр рассматриваемого массива не имеет дополнительного резонанса (рис. 3). Также при удалении цилиндра от подложки амплитуда дополнительного резонанса уменьшается и на расстоянии, превышающем 0,2 мм, исчезает полностью.

График спектра пропускания для массива золотых цилиндров микронных размеров приведён на рис. 4. Размеры цилиндра подобраны таким образом, чтобы резонанс был в средней ИК-области. Как видно из графика, масштабирование размеров цилиндра в сторону уменьшения даёт ту же форму резонансной кривой и подтверждает перспективность перехода в более высокочастотный диапазон.

Заключение. В данной работе численным моделированием установлен спектр пропускания метаматериалов с трёхмерными элементами цилиндрической формы с продольной и поперечной щелями. Обнаружено наличие дополнительного резонансного пика в спектре пропускания такого метаматериала и исследована его зависимость от ширины поперечной щели при учёте влияния подложки. Столь выраженные резонансные свойства указывают на возможность создания с помощью рассмотренного массива цилиндров динамически перестраиваемого метаматериала, свойства которого можно изменять, варьируя показатель преломления подложки или эффективную ширину поперечной щели. Также показана возможность масштабирования резонансных элементов в сторону их уменьшения для перехода в более высокочастотный ИК-диапазон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shalaev V. M., Cai W.** Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications. N. Y.: Springer Science + Business Media, 2010. 200 p.
2. **Zheludev N. I., Kivshar Y. S.** From metamaterials to metadevices // Nature Mater. 2012. **11**, N 11. P. 917–924.

3. **Ramakrishna S., Grzegorzczak T.** Physics and Applications of Negative Refractive Index Materials. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2009. 414 p.
4. **Soukoulis C. M., Wegener M.** Past achievements and future challenges in the development of three-dimensional photonic metamaterials // Nature Photon. 2011. **5**, N 9. P. 523–530.
5. **Naumova E. V., Prinz V. Ya., Seleznev V. A. et al.** Fabrication of metamaterials on the basis of precise micro- and nanoshells // Metamaterials 2007: Proc. of the First Intern. Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics. Rome, Italy, 22–24 October, 2007. P. 74–77.
6. **Prinz V. Ya., Seleznev V. A., Gutakovsky A. K. et al.** Free-standing and overgrown InGaAs/GaAs nanotubes, nanohelices and their arrays // Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures. 2000. **6**, N 1. P. 828–831.
7. **Наумова Е. В., Принц В. Я., Голод С. В. и др.** Киральные метаматериалы терагерцового диапазона на основе спиралей из металл-полупроводниковых нанопленок // Автометрия. 2009. **45**, № 4. С. 12–22.
8. **Chiam S. Y., Bettiol A. A., Bahou M. et al.** Observation of a New Magnetic Response in 3-Dimensional Split Ring Resonators under Normal Incidence. URL: <http://arxiv-web3.library.cornell.edu/abs/0807.4585v2> (дата обращения: 2.07.2013).

Поступила в редакцию 2 июля 2013 г.
