

## **Перестраиваемые терагерцовые метаматериалы на основе кубических диэлектрических резонаторов с металлической полоской с управляемой электрической длиной**

*Рассмотрены терагерцовые метаматериалы на основе диэлектрических кубических резонаторов с нанесенной на грань металлической полоской. Структура проявляет свойства среды с отрицательной магнитной или диэлектрической проницаемостью вблизи магнитного или диэлектрического Ми-резонансов соответственно. Частоты Ми-резонансов зависят от электрической длины полоски. Данный метод управления может использоваться при разработке перестраиваемых метаматериалов.*

### **Метаматериал, перестраиваемый метаматериал, терагерцовое излучение**

Активные исследования искусственных материалов, работающих в терагерцовом частотном диапазоне, начали проводиться сравнительно недавно. Большой интерес к этой проблеме объясняется тем, что терагерцовое излучение может эффективно использоваться для медицинского сканирования, для контроля качества, в системах безопасности, а также в космических исследованиях [1,2].

Искусственные структуры, так называемые метаматериалы, позволяют получить требуемые электромагнитные свойства в любом частотном диапазоне. Примеры метаматериалов, работающих в терагерцовом диапазоне рассмотрены в работе [3]. Однако управление мощностью или же направленностью терагерцового излучения является достаточно сложной задачей. Для этого требуются управляемые устройства, такие как перестраиваемые фильтры, переключатели или фазовращатели. Данные устройства могут быть разработаны с использованием метаматериалов с управляемыми характеристиками. В работе предложены перестраиваемые метаматериалы в виде регулярной решетки диэлектрических резонаторов.

Существует множество способов создания структур с отрицательным значением эффективной диэлектрической или магнитной проницаемости. Наибольшее распространение получили метаматериалы в виде регулярных структур разомкнутых кольцевых резонаторов (РКР) и/или параллельных металлических проволок. Ряд авторов предлагает реализацию метаматериала в виде регулярной структуры диэлектрических резонаторов, работающих вблизи так называемого резонанса Ми [4-7]. В данной работе именно диэлектрические резонаторы были выбраны в качестве базовых элементов благодаря ряду преимуществ. Во-первых, в них в отличие от РКР отсутствуют потери в проводниках. Во-вторых, диэлектрические частицы позволяют получить оба типа откликов: магнитный, вблизи которого магнитная проницаемость становится отрицательной, и электрический, вблизи которого становится отрицательной диэлектрическая проницаемость. Для обеспечения отрицательных эффективных электромагнитных параметров могут использоваться сферы, кубики,

стержни, сделанные из материалов с высокой диэлектрической проницаемостью. Переход от микроволнового к терагерцовому диапазону выполняется путем масштабирования геометрических параметров структуры.

Лишь малая часть из описанных метаматериальных структур является перестраиваемой в терагерцовом диапазоне. В данной работе предложен оригинальный подход к проектированию перестраиваемых метаматериалов. На рис. 1а изображен диэлектрический кубик с нанесенной на одну из его граней резонансной металлической полоской. Кубик сделан из материала с высокой диэлектрической проницаемостью, а его размеры выбраны так, чтобы отклики Ми-резонансов наблюдались в терагерцовом частотном диапазоне. Падающая волна перпендикулярна передней грани куба, а вектор напряженности электрического поля параллелен металлической полоске на этой грани. Электродинамическими характеристиками кубика можно управлять, изменяя электрическую длину полоски. Для электродинамического моделирования выбраны следующие размеры: сторона куба  $a = 0.22$  мм, ширина металлической полоски  $w = 0.04$  мм. Диэлектрическая проницаемость материала кубика  $\epsilon_c = 50$ .

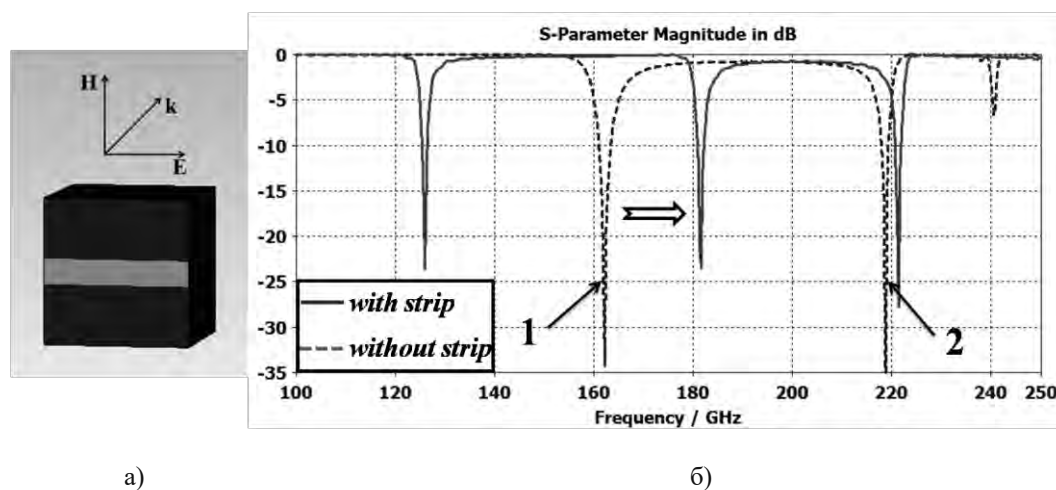
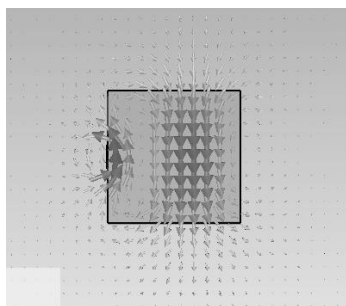


Рис. 1.

На рис. 1б представлена частотная зависимость коэффициента передачи  $S_{21}$  для двух случаев: одиночного диэлектрического кубика и кубика с нанесенной на одну из его граней полоской. Резонанс 1 соответствует первому (магнитному) Ми-резонансу. В узкой полосе частот вблизи этого резонанса эффективная магнитная проницаемость становится отрицательной, при этом возникает полоса запираания. Резонанс 2 соответствует второму (электрическому) Ми-резонансу. Вблизи этого резонанса становится отрицательной эффективная диэлектрическая проницаемость. Как видим, частота магнитного резонанса смещается вверх при добавлении металлической полоски. В то же время, положение электрического резонанса практически не зависит от наличия полоски. Кроме того, существует еще одно свойство кубика с полоской, которое заключается в появлении дополнительного резонанса на частоте  $f = 125$  ГГц, соответствующего электрическому резонансу самой полоски. Эффект сдвига резонансных частот объясняется распределением магнитного и электрического полей вблизи магнитного и электрического Ми-резонансов (рис. 2).

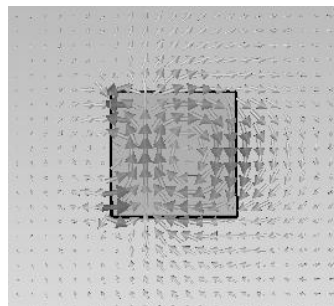
Магнитный резонанс:

Н-компонента:



а)

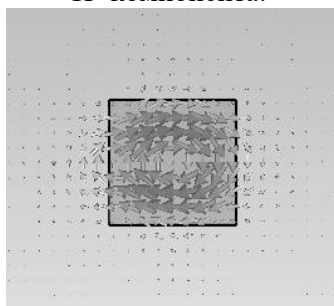
Е- компонента:



б)

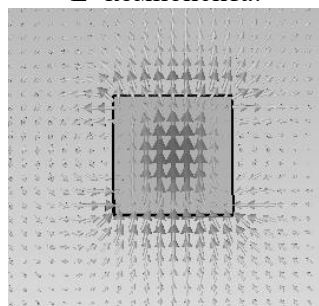
Электрический резонанс:

Н- компонента:



в)

Е- компонента:



г)

Рис. 2.

Благодаря влиянию металлической полоски поле перераспределяется так, что ведет к сдвигу резонансных частот только лишь вблизи магнитного резонанса. Этот эффект может быть использован для управления положением частоты магнитного резонанса. Она существенно зависит от электрической длины полоски. Частотная зависимость коэффициента передачи  $S_{21}$  при разных длинах металлической полоски представлена на рис. 3.

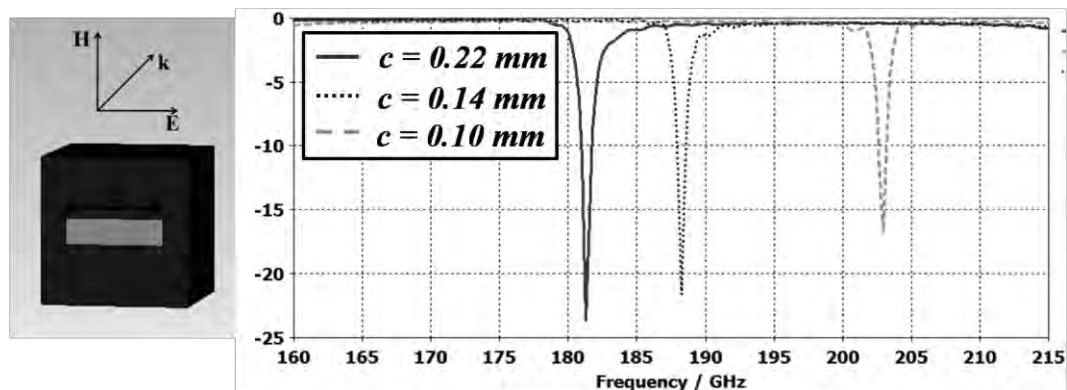


Рис. 3.

Распределение магнитного и электрического полей внутри кубика может контролироваться путем изменения формы наносимых металлических объектов. Таким образом, возможно управление электродинамическими характеристиками

метаматериала. Одна из возможных структур изображена на рис. 4а. Она позволяет контролировать положение не только магнитного, но и электрического резонанса (рис. 4б).

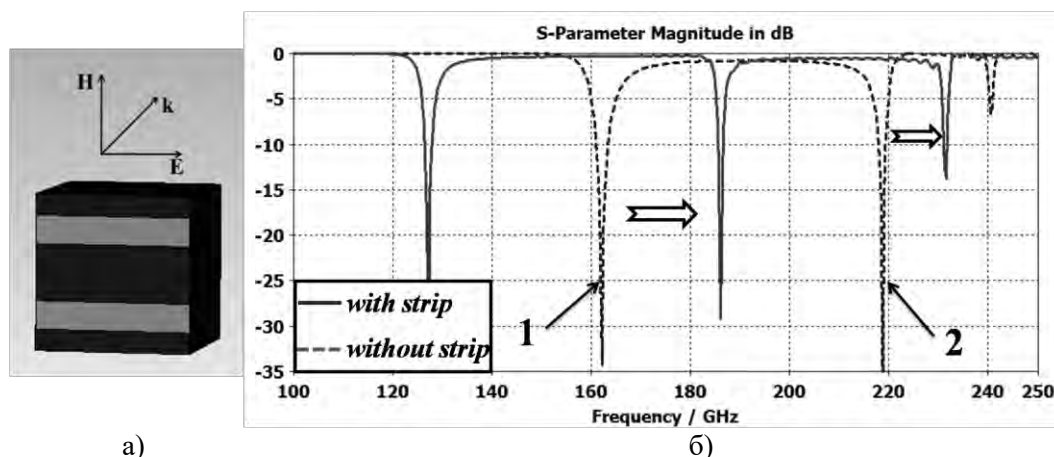


Рис. 4.

Для уменьшения чувствительности метаматериала к направлению поляризации электромагнитной волны форма металлизированных полосок может быть изменена. Примеры таких конфигураций металлизации представлены на рис. 5.



Рис. 5.

В свою очередь, электрическая длина полоски может изменяться различными способами. Первый заключается в формировании активной области с переменной проводимостью в зазоре посередине полоски, где поверхностный ток максимален (рис. 6). Данная область может быть выполнена из фоточувствительного полупроводникового материала. Проводимость полупроводника изменяется под действием засветки. Увеличение проводимости активной области будет эквивалентно закорачиванию зазора.

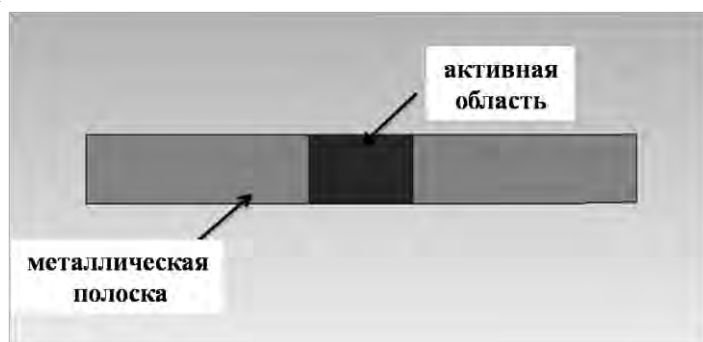


Рис. 6.

Второй метод основан на изменении емкости зазора. В этом случае резонансная частота может контролироваться прикладываемым внешним напряжением к встраиваемому в зазор полоски элементу со структурой МЭМС.

Сочетание решетки кубических диэлектрических резонаторов и проволоочной среды позволяет создать метаматериал с отрицательным значением коэффициента преломления (рис. 7). Металлические проволоочки располагаются между диэлектрическими резонаторами. Для перестройки характеристик материала на верхней поверхности кубиков располагаются металлические полоски с управляемыми зазорами.

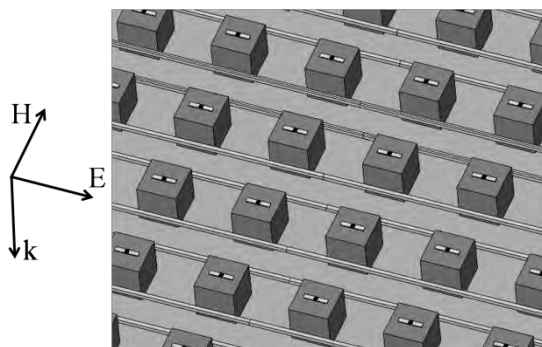


Рис. 7.

**В заключение** отметим, что в данной статье был рассмотрен перестраиваемый метаматериал гигагерцового диапазона на решетке диэлектрических кубических резонаторов с металлической полоской, нанесенной на одну из граней кубика. Предложен оригинальный способ управления, основанный на перераспределении полей внутри резонатора за счет дополнительного влияния металлической полоски. При слабом взаимодействии диэлектрических резонаторов друг с другом в составе регулярной решетки характеристики метаматериала близки к характеристикам его элементов (Рис. 3 и 4). Метод возмущения резонансных свойств кубика за счет изменения электрической длины полоски обеспечивает эффективное управление электродинамическими параметрами метаматериала.

#### Библиографический список

- [1] W. L. Chan, J. Deibel and D. M. Mittleman, Imaging with terahertz radiation, Reports on Progress in Physics, Volume 70, Number 8, (2007) 1325–1379.
- [2] P. Maagt, Terahertz technology for space and earth applications, Antennas and Propagation, 2006. EuCAP 2006. First European Conference on, 6-10 Nov. 2006, pp. 1 – 4.
- [3] R. D. Averitt, W. J. Padilla, H. T. Chen, J. F. O'Hara, A. J. Taylor, C. Highstrete, M. Lee, J. M. O. Zide, et al. (2007). "Terahertz metamaterial devices". Proceedings of SPIE 6772: 677209. doi:10.1117/12.751613.
- [4] M. S. Wheel, A. J. Stewart, M. Mohammad, Negative permittivity and permeability in the infrared due to dielectric spheres, Proceedings of the SPIE, Volume 5971, pp. 252-261 (2005).
- [5] V. Yannopapas, A. Moroz, Negative refractive index metamaterials from inherently non-magnetic materials for deep infrared to terahertz frequency ranges, Journal of Physics: Condensed Matter, Volume 17, Number 25 (2005) 3717–3734.
- [6] O. G. Vendik, M. S. Gashinova, Artificial double negative (DNG) media composed by two different dielectric sphere lattices embedded in a dielectric matrix, Proc. of the 34th European Microwave Conference 2004, pp. 1209-1212, Oct. 2004.
- [7] I. B. Vendik, M. A. Odit and D. S. Kozlov, 3D isotropic metamaterial based on a regular array of resonant dielectric spherical inclusions, Metamaterials, Volume 3, Issues 3-4, November-December 2009, Pages 140-147.