

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОРИЕНТАЦИОННОЙ  
АНИЗОТРОПИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТААТОМОВ  
В ДИСКРЕТНЫХ МАГНИТНЫХ МЕТАМАТЕРИАЛАХ  
В ГГЦ ДИАПАЗОНЕ

А.А. Радковская<sup>1</sup>, Г.С. Пальванова<sup>1</sup>, Е.И. Лебедева<sup>1</sup>, В.Н. Прудников<sup>1</sup>,  
О.А. Котельникова<sup>1</sup>, П.Н. Захаров<sup>2</sup>, А.Ф. Королев<sup>2</sup>, А.П. Сухоруков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова,  
физический факультет, кафедра магнетизма

<sup>2</sup>Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова,  
физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн  
a\_radkovskaya@mail.ru

Метаматериалами называют искусственные структуры с уникальными электрическими и магнитными свойствами, которые не могут быть реализованы в конденсированных средах. Теоретически возможность существования среды с отрицательным показателем преломления была предсказана Веселаго в 1968 году [1]. Такая среда была создана только в 2001 году [2]. В этой среде в качестве «метаатомов» используются резонансные элементы различной конфигурации, взаимодействующие как с падающей электромагнитной волной (ЭМВ), так и между собой. Чтобы ЭМВ взаимодействовала с метаматериалом как с непрерывной средой, размеры метаатомов должны быть много меньше длины падающей волны. Практическое применение метаматериалов имеет большие перспективы, как в области высоких частот, так и в оптическом диапазоне. Однако при уменьшении размеров элементов простой метод масштабирования не работает: чем меньше размеры элементов и выше частота, тем сложнее становится взаимодействие.

В МГц диапазоне, где взаимодействие между элементами имеет только магнитную природу, по структуре распространяются магнитоиндуктивные волны [3]. Даже в этом простом случае чисто магнитной связи между элементами, коэффициент взаимодействия, в зависимости от взаимного расположения элементов, может быть как положительным так и отрицательным, что приводит к радикальным различиям в дисперсии магнитоиндуктивных волн.

При переходе к ГГц диапазону:

- расстояние между элементами становится сравнимо с длиной электромагнитного излучения, поэтому необходимо учитывать существенное влияние запаздывания, что в свою очередь приводит к тому, что коэффициент взаимодействия становится комплексной величиной;
- распределение зарядов и токов в элементах становится неоднородным. В результате наряду с магнитным взаимодействием между элементами появляется электрическое взаимодействие;

• возникает сильная анизотропия взаимодействия при различной взаимной ориентации элементов в плоскости. В зависимости от взаимной ориентации метаатомов может преобладать магнитная или электрическая компоненты коэффициента взаимодействия. Возможны также конфигурации, при которых магнитная или электрическая компоненты коэффициента взаимодействия компенсируют друг друга, приводя к отсутствию взаимодействия [4]. В отличие от МГц диапазона коэффициент взаимодействия двух элементов, расположенных в одной плоскости, может иметь разный знак.

В отличие от МГц диапазона, когда при планарной конфигурации метаатомов всегда выполняется неравенство  $k < 0$  ( $k$  – коэффициент взаимодействия двух соседних метаатомов), при планарной конфигурации в ГГц диапазоне в плоскости возникает сильная анизотропия взаимодействия при различной взаимной ориентации дискретных элементов, составляющих среду.



Рис.1. а) Схематичное изображение расщепленного кольцевого резонатора для ГГц диапазона. Внутренний радиус  $r_0=10$  мм, высота  $l=5$  мм, толщина  $w=1$  мм, ширина щели  $g=1$  мм. Резонансная частота элемента 1.81 ГГц.  
б) Схематичное изображение конфигурации двух кольцевых резонаторов и двух антенн (излучающей и приемной) для экспериментального определения коэффициента взаимодействия

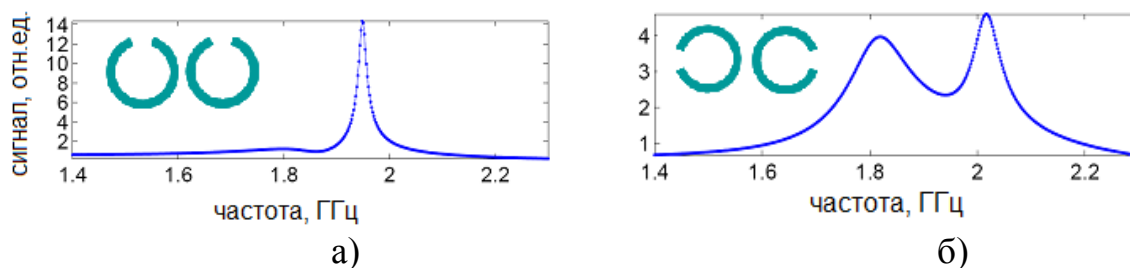


Рис.2. Расщепление резонансной кривой при взаимодействии двух метаатомов в ГГц диапазоне. Резонансная частота 1.81 ГГц. Ориентация элементов показана на вставках.

Расстояние между центрами элементов 24 мм

Ранее был проделан теоретический расчет ориентационных карт коэффициента взаимодействия для всех возможных взаимных ориентаций двух элементов расположенных рядом в одной плоскости [4].

В данной работе впервые проведены измерения коэффициента взаимодействия между двумя ближайшими элементами дискретных магнитных метаматериалов в ГГц диапазоне для всех возможных взаимных ориентаций элементов в плоскости. Экспериментальная часть работы выполнена на измерительной установке, созданной на базе вектор-анализатора Rohde&Schwarz ZFB20, позволяющей в автоматическом режиме проводить одномерное сканирование поверхности с микронным разрешением [5].

В качестве метаатомов использованы расщепленные медные кольцевые резонаторы с резонансной частотой порядка 1.8 ГГц. Диаметр элементов – 23 мм, высота – 5 мм, толщина – 1 мм, ширина щели – 1 мм (Рис.1а). Элементы расположены в одной плоскости на расстоянии 24 мм (Рис.1б).

Модуль полного коэффициента взаимодействия может быть вычислен как  $|\kappa| = 2\Delta\omega / \omega_0$ , где  $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$  – разность частот верхнего и нижнего резонансов.

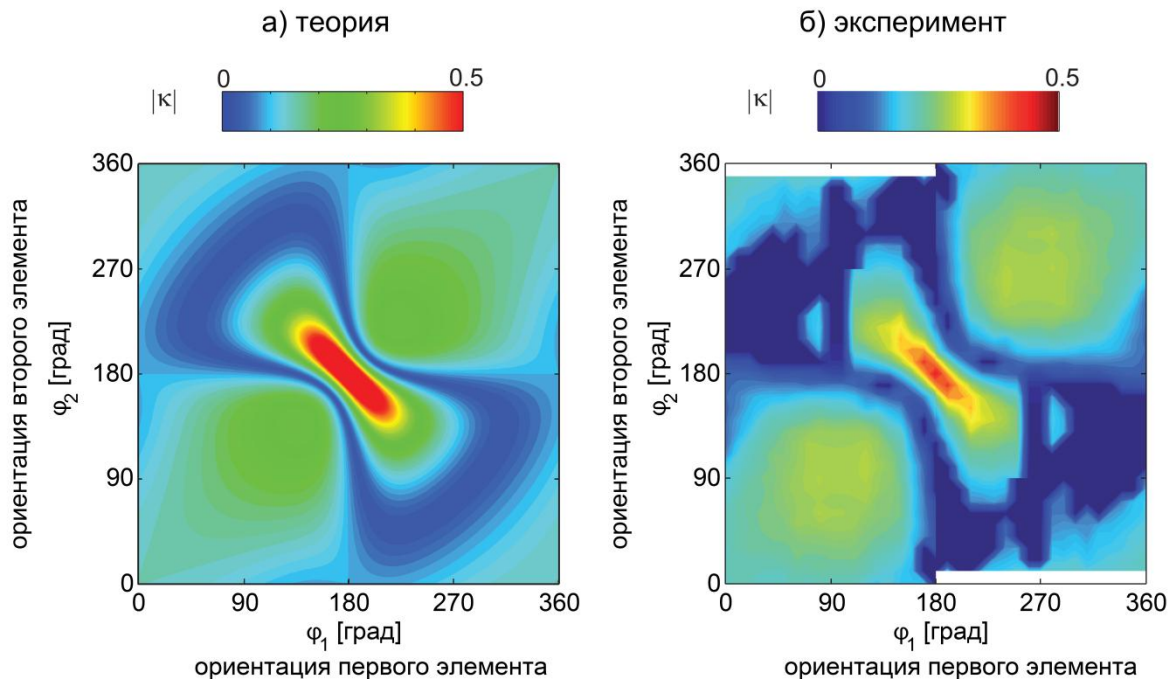


Рис.3. Ориентационные карты модуля коэффициента взаимодействия двух метаатомов в ГГц диапазоне. По горизонтальной оси – ориентация первого элемента, по вертикальной оси – ориентация второго элемента. Цветом показано значение  $|\kappa|$ .

Слева результаты расчета [4], справа экспериментальные результаты

Расщепление резонансной кривой очень сильно зависит от взаимной ориентации расположенных рядом метаатомов (Рис.2). По экспериментальным результатам рассчитаны и построены в ГГц диапазоне ориентационные карты для модуля коэффициента взаимодействия  $\kappa$ . Полученные экспериментальные значения хорошо согласуются с результатами теоретического расчета, полученными в работе [4] (Рис.3).

Понимание механизмов взаимодействия метаатомов даст возможность управлять дисперсионными характеристиками метаматериалов и создавать материалы с заранее заданными свойствами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-02-00889-а и проекта Минобрнауки №16.516.12.6008

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Веселаго В.Г. // УФН. 1967. Т. 92 С. 517.
2. Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., S Nemat-Nasser.C., Schultz S. // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84 P. 4184.
3. Solymar L., Shamoina E. Waves in Metamaterials. Oxford Univ. Press, 2009.
4. Tatartschuk E., Gneiding N., Nesmer F., Radkovskaya A., Shamoina E. // J. Appl. Phys. 2012. V. 111. P. 094904-1.
5. Радковская А.А., Прудников В.Н., Захаров П.Н., Бабушкин А.К., Королев А.Ф., Сухоруков А.П. Специальный физический практикум. Волны в магнитных метаматериалах с сильным взаимодействием между элементами. Суперлинза М.: Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, 2010.