



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.2.5>

УДК: 621.385.69; 621.371.3

## ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕТА-ЯЧЕЕК НА СВОЙСТВА ПОГЛОТИТЕЛЕЙ СВЧ-ВОЛН

Л.Г. Стаценко, Я.Р. Котенко, Я.С. Дронин

Дальневосточный федеральный университет  
690922, Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2025 г.

**Аннотация.** В данной работе рассмотрены три спроектированные мета-ячейки в программном обеспечении CST Studio. Проанализированы частотные зависимости коэффициентов отражения и поглощения в диапазоне от 2 до 30 ГГц, при изменениях определенных геометрических параметров рассмотренных мета-ячеек. Полученные в работе зависимости позволяют упростить дальнейшее проектирование метаматериальных поглотителей, и более углубленно разобраться в волновых свойствах метаматериалов.

**Ключевые слова:** метаматериал, поглотитель, резонансные свойства, рабочая частота, коэффициент отражения, коэффициент отражения, композитные структуры.

**Автор для переписки:** Дронин Ярослав Сергеевич, [dronin.ias@dvfu.ru](mailto:dronin.ias@dvfu.ru)

## Введение

Метаматериал – это композитный материал, обладающий уникальными свойствами, не имеющими аналогов [1,2,3]. Ключевой особенностью таких материалов являются отрицательные значения диэлектрической (ENG-материалы) или магнитной (MNG-материалы) проницаемости, либо обоими проницаемостями сразу (DNG-материалы). Помимо этого, метаматериалы обладают такими характеристиками, как обратный эффект Доплера, отрицательный показатель преломления, инверсия группового и фазового векторов скорости волны, увеличение длины электромагнитной волны с увеличением частоты. Благодаря своим уникальным свойствам, метаматериалы могут блокировать, поглощать, усиливать или искривлять электромагнитные волны, что позволяет применять их различных научных и технологических областях.

В основном современные метаматериалы состоят из трех компонентов: базовой проводящей плоскости (ground), диэлектрической подложки и метаматериальной структуры. Метаматериальная структура в свою очередь делится на большое количество одинаковых периодических элементов – мета-ячеек, упорядоченных определенным образом. Эти элементы могут быть различными по своей природе и форме, но их размеры обычно сопоставимы с длиной волны в том диапазоне частот, для которого они предназначены [4,5].

Помимо этого, возможны варианты исполнения метаматериальных поглотителей в виде многослойных мета-структур, двойных диэлектрических подложек и комбинированных метаматериалов в разных геометрических плоскостях [6,7,8].

В представленной работе рассматривается несколько спроектированных видов мета-структуры, структура в форме полумесяца, в форме разделенного кольца и в виде неправильного кольца с элементом в центре, а также их влияние на основные параметры, коэффициент отражения и поглощения.

## 1. Моделирование мета-ячейки

Одним из элементов в моделируемой ячейке, обладающим отрицательным значением магнитной проницаемости, выбран резонатор в виде полумесяца. Построение геометрии и расчет характеристик производится в программном комплексе CST Studio Suite методом подбора оптимальных размеров резонатора, для получения оптимальных значений поглощения и отражения. Конечная модель ячейки и поглощающая поверхность представлены на рисунке 1 и 2 соответственно.

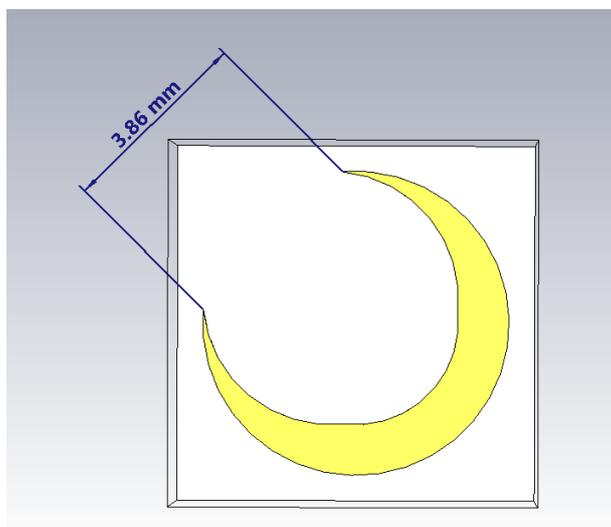


Рис. 1. Спроектированная модель мета-ячейки в форме полумесяца, с расстоянием между концами 3,86 мм.

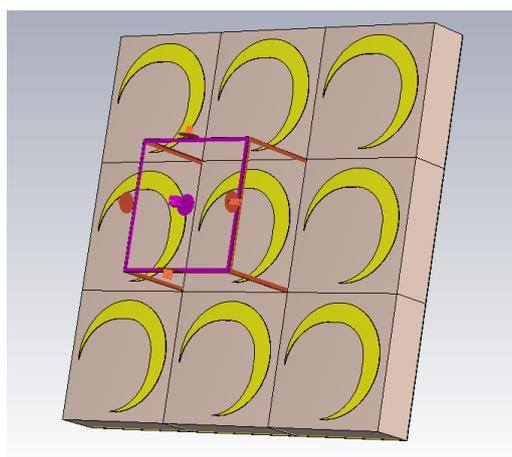


Рис. 2. Вариант поглощающей поверхности с использованием мета-ячейки в форме полумесяца.

В качестве материала для диэлектрического слоя ячейки выбран стеклотекстолит марки FR-4. Относительная диэлектрическая проницаемость которого равна 4,4. Металлизация выполнена на основе меди. Расстояние между концами полумесяца составляет 3,86 мм.

Частотные зависимости коэффициента отражения (S11-параметра) и коэффициента поглощения, представлены на рисунках 3 и 4 соответственно.

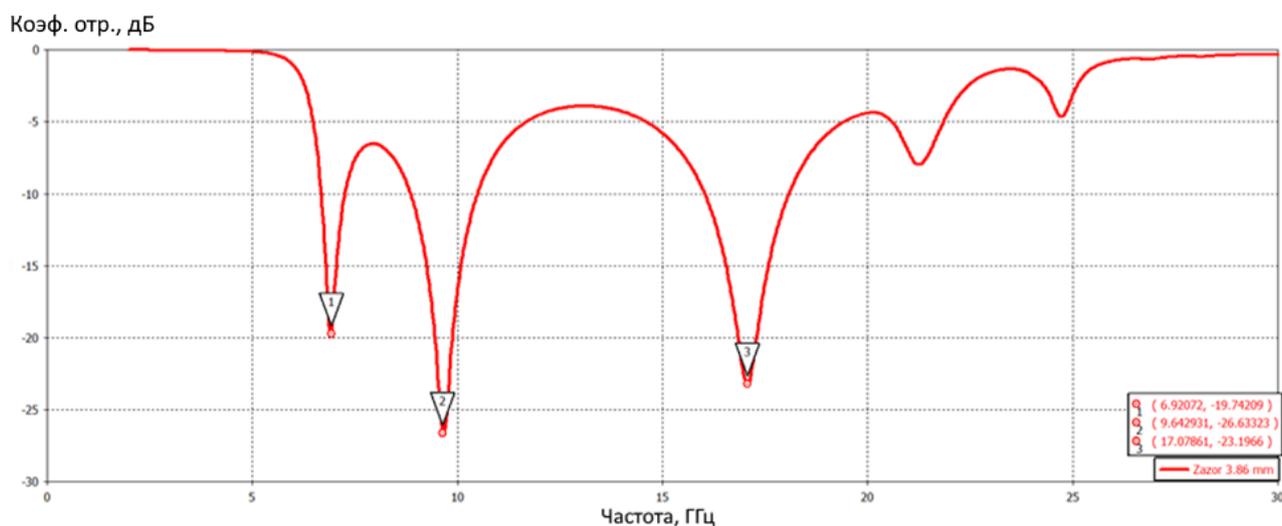


Рис. 3. График зависимости коэффициента отражения (S11 параметра) от частоты для мета-ячейки в форме полумесяца.

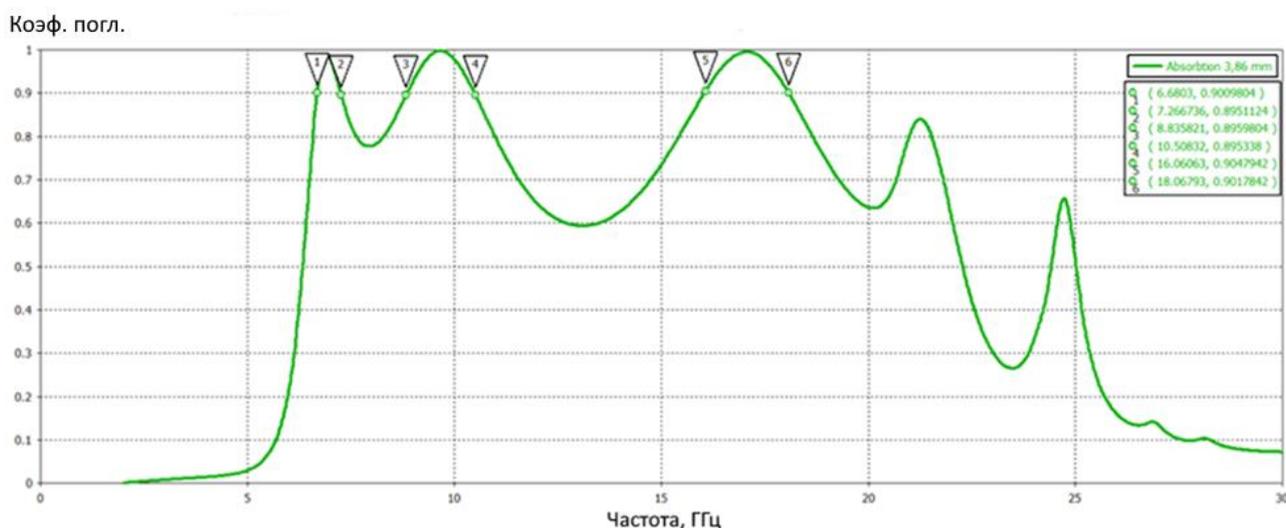


Рис. 4. График зависимости коэффициента поглощения от частоты для мета-ячейки в форме полумесяца.

Анализируя график 3, можно заключить: мета-структура обладает тремя резонансами: на частотах 6,9 ГГц, 9,6 ГГц и 17 ГГц соответственно. Поглотитель, выполненный из данных мета-ячеек, является многодиапазонным, также обладающим широкой полосой частот на резонансе под маркером 3 (рис. 3).

Считаем оптимальным значения коэффициента поглощения выше 0,9 так как при таких значениях сигнал ослабевает в 10 раз. Полученные диапазоны поглощения составляют от 6,7 до 7,3 ГГц (маркеры 1, 2 на рисунке 3), от 8,8 до 10,5 ГГц (маркеры 3, 4 на рисунке 3) и от 16,1 до 18,1 ГГц (маркеры 5 и 6 на рисунке 3).

В работе исследовалось влияние геометрических размеров мета-ячейки на основные характеристики поглотителя.

Изначально рассчитанную мета-ячейку изменяем как показано на рис. 5.

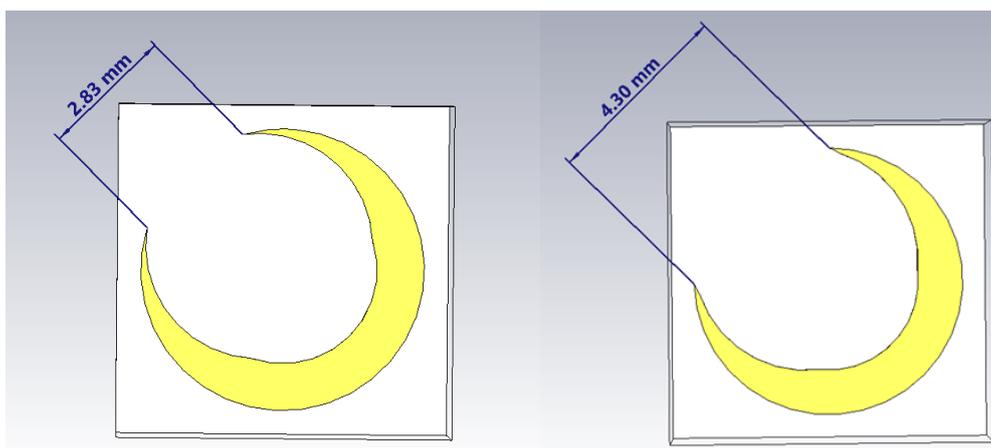


Рис. 5. Измененные мета-ячейки с различным расстоянием между концами полумесяца.

Расстояние между концами полумесяца изменено до значений 2,83 мм и 4,3 мм соответственно (рис. 5). Синим цветом (рис. 6) представлены частотные зависимости коэффициентов отражения ячейки с расстояниями между концами полумесяца 2,83 мм, красным – 3,86 мм, зеленым – 4,30 мм.

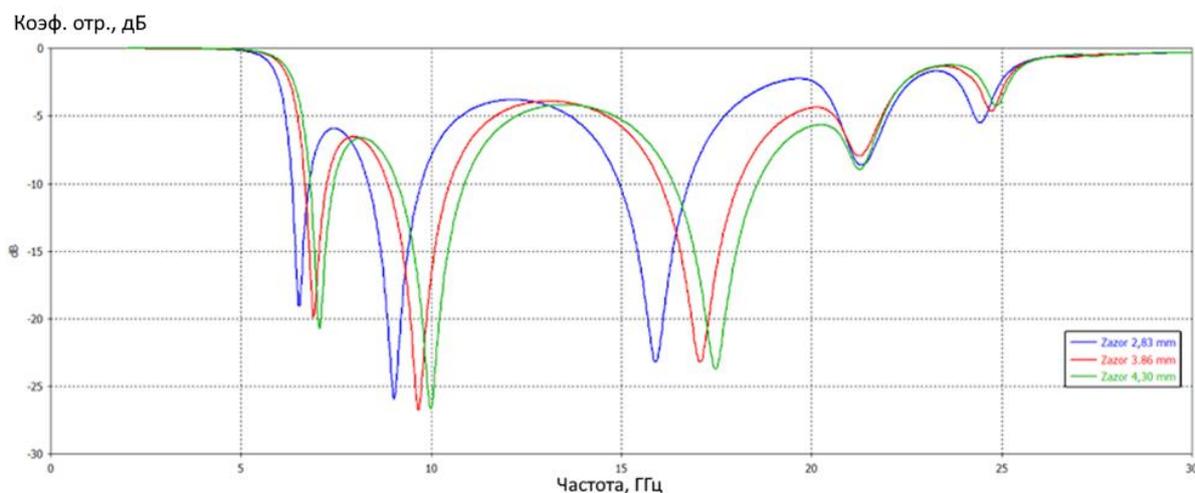


Рис. 6. Сравнение графиков частотной зависимости коэффициента отражения мета-ячейки в форме полумесяца при изменении расстояния между концами полумесяца.

Можно заключить, что изменение геометрических параметров метаматериала приводит к смещению рабочих частот: на рисунке 6 при увеличении расстояния в область высоких частот, при уменьшении – в область низких частот и смещению резонансов, которое заметно в области частот от 15 до 20 ГГц.

Также были получены частотные зависимости коэффициента поглощения (рис. 7). Красным цветом на рисунке обозначена частотная зависимость при уменьшении расстояния между концами полумесяца до значения 2,83 мм, зеленым цветом – для исходной мета-ячейки, синим цветом – для мета-ячейки с расстоянием между концами полумесяца 4,3 мм.

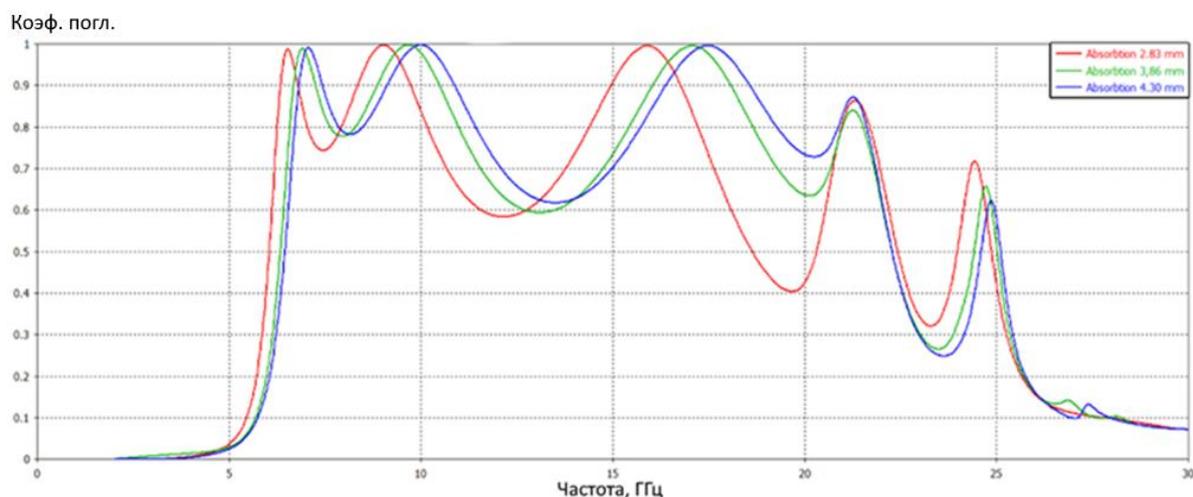


Рис. 7. Сравнение графиков зависимости коэффициента поглощения от частоты мета-ячейки формы полумесяца при изменении геометрических размеров.

Изменяя геометрические параметры, можно регулировать рабочие полосы частот под необходимые условия (рис. 7).

Следующим этапом изучения влияния геометрических параметров мета-ячейки на качественные параметры поглотителя являлась доработка мета-ячейки в форме полумесяца, путем добавления перегородки (рисунок 8).

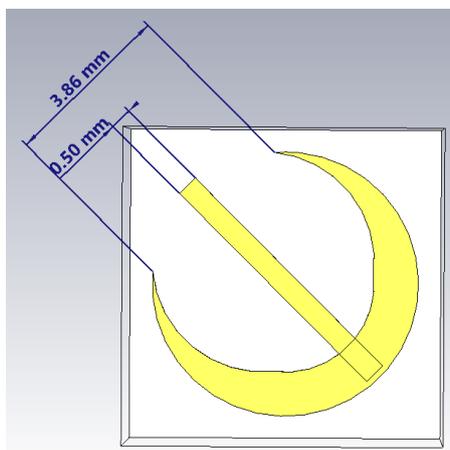


Рис. 8. Спроектированная модель мета-ячейки в форме полумесяца, с расстоянием между концами 3,86 мм и перегородкой 0,5 мм.

На (рис. 9,10) представлены частотные зависимости коэффициентов отражения и поглощения для мета-ячейки в форме полумесяца с перегородкой.

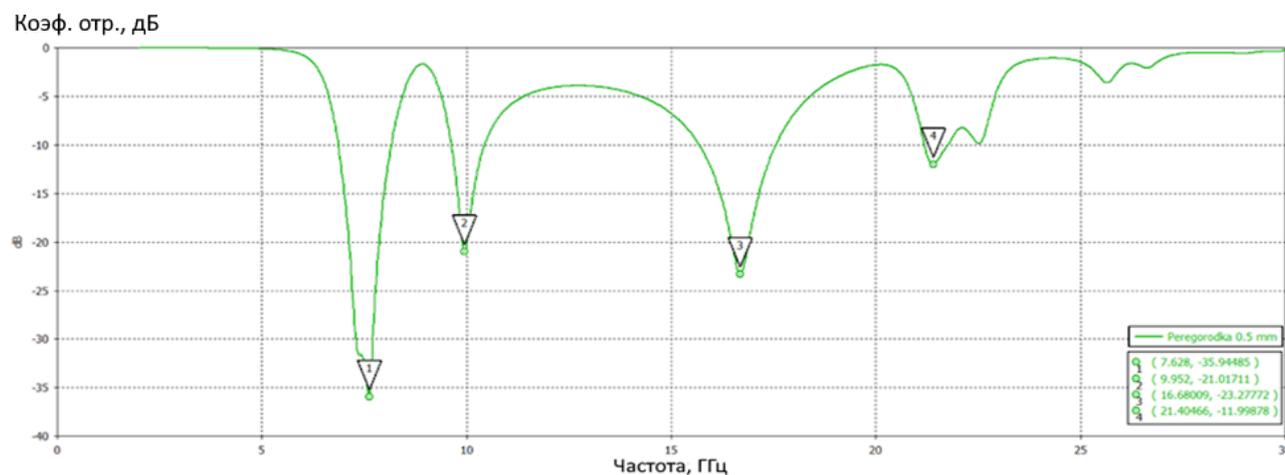


Рис. 9. График зависимости коэффициента отражения (S11 параметра) от частоты мета-ячейки в форме полумесяца с расстоянием между концами 3,86 мм и перегородкой 0,5 мм.

Вследствие изменения конструкции мета-ячейки был значительно усилен резонанс в диапазоне частот от 6,8 до 8,1 ГГц, который составляет -35,9 дБ, в то время как без перегородки составлял -20 дБ на частоте 7,6 ГГц.

График зависимости коэффициента поглощения для рассматриваемой мета-ячейки показан на рисунке 10.

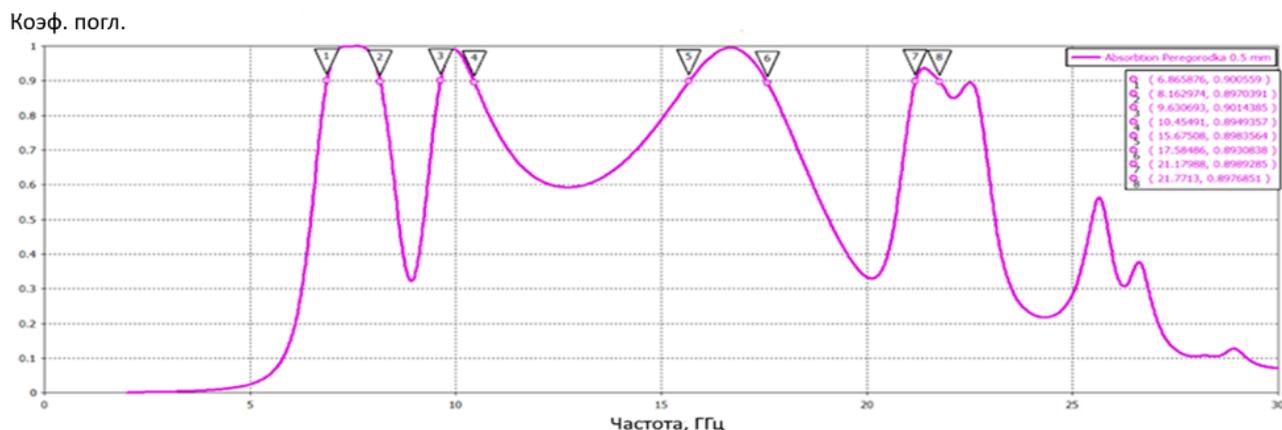


Рис. 10. График зависимости коэффициента поглощения от частоты мета-ячейки в форме полумесяца с расстоянием между концами 3,86 мм и перегородкой 0,5 мм,

Дальнейшим этапом исследовалась зависимость качественных параметров поглотителя на основе метаматериала в форме полумесяца от различных значений размеров перегородки. Ширина перегородки изменена до значений 0,2 мм, 1 мм и 0,5 мм. Полученные частотные зависимости коэффициента отражения и поглощения показаны на рисунках 11 и 12 соответственно.

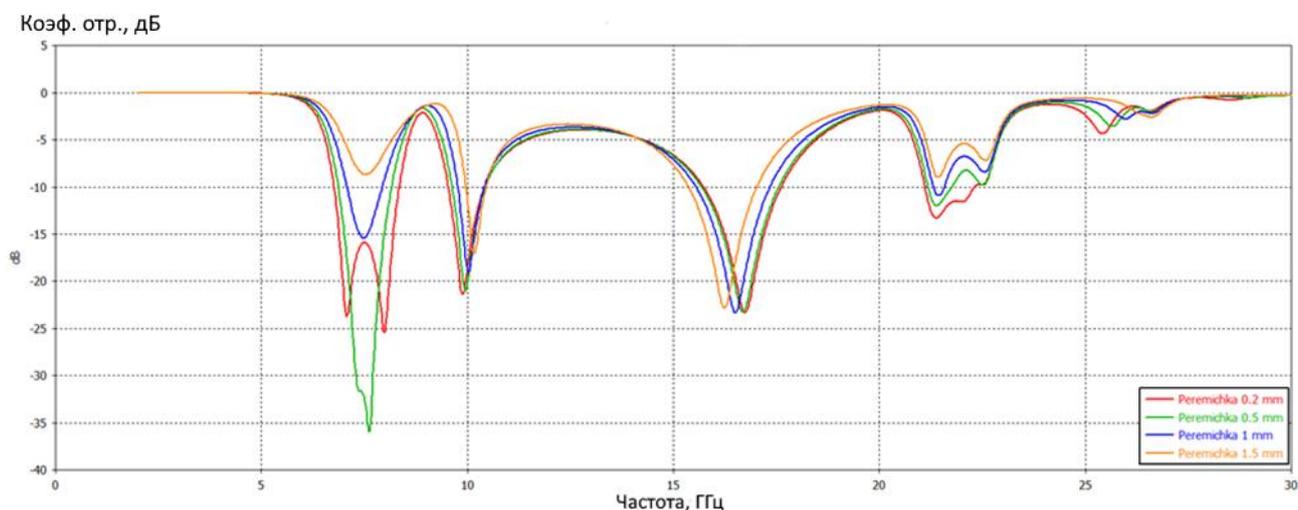


Рис. 11. Сравнение графиков зависимости коэффициента отражения ( $S_{11}$  параметра) от частоты мета-ячейки в форме полумесяца при изменении ширины перегородки.

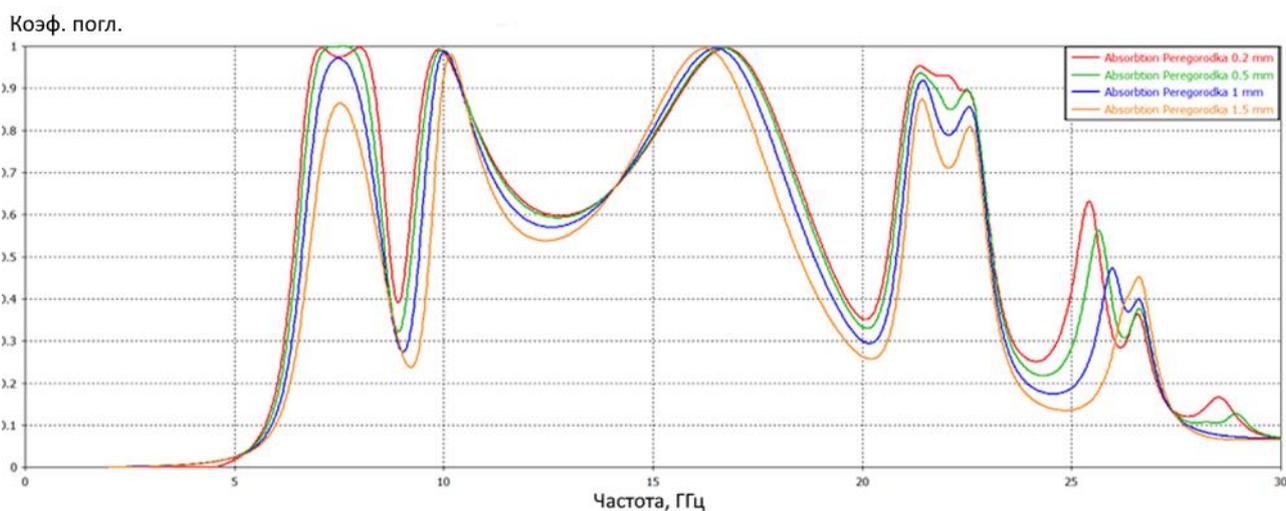


Рис. 12. Сравнение графиков зависимости коэффициента поглощения от частоты мета-ячейки в форме полумесяца при изменении ширины перегородки.

Можно заметить, что добавление перегородки незначительно влияет на характеристики на частотах до 10 ГГц и после 20 ГГц, в промежутке 10–20 ГГц особых изменений не выявлено.

Также в качестве элементов в моделируемой ячейке, обладающей отрицательным значением магнитной проницаемости, выбраны резонаторы в виде разделенных колец – в виде одинарного разделенного кольца (Split ring resonator) и разделенного кольца произвольной формы. Спроектированные мета-ячейки показаны на рисунке 13.

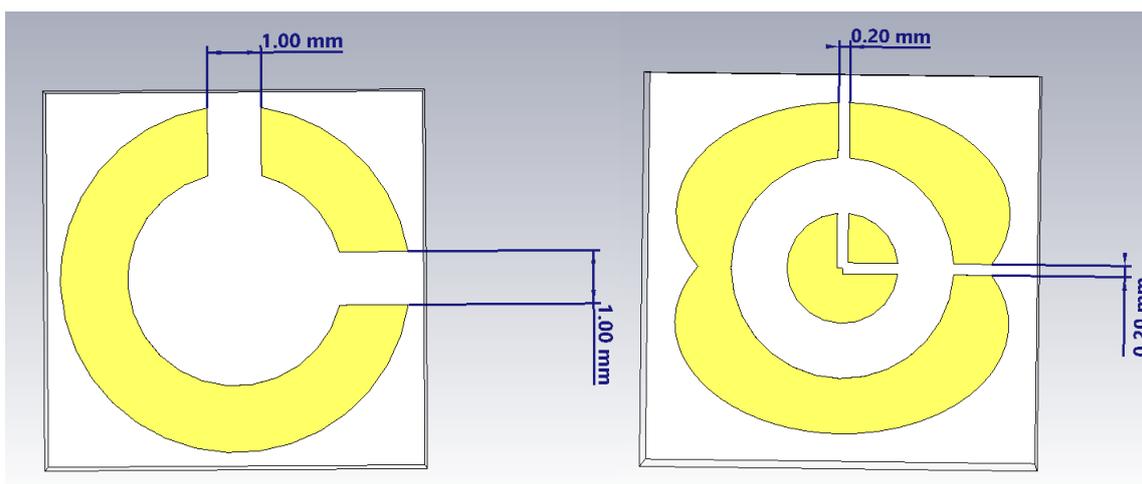


Рис. 13. Спроектированные модели мета-ячеек в форме разделенных колец (одинарное разделенное кольцо – слева, разделенное кольцо произвольной формы – справа).

Для ячейки, разделенного кольца стандартной формы измерения проводились для расстояния 1,0 мм, 1,6 мм и 2,0 мм, для ячейки с произвольной формы разделенного кольца 0,2 мм, 0,4 мм, 1,0 мм.

Смоделированные поглощающие поверхности на основе рассмотренных метаматериалов показаны на рисунках 14 и 15.

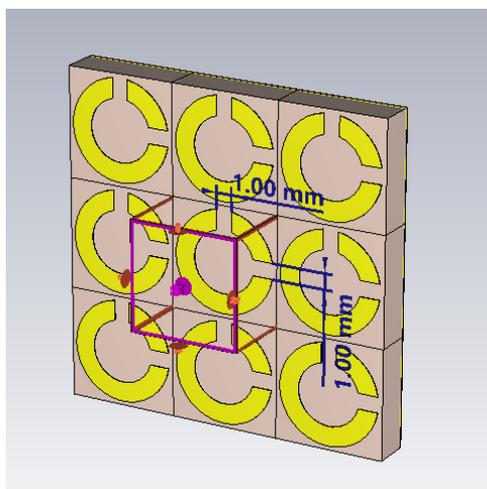


Рис. 14. Вариант поглощающей поверхности с мета-ячейкой в форме разделенного одинарного кольца.

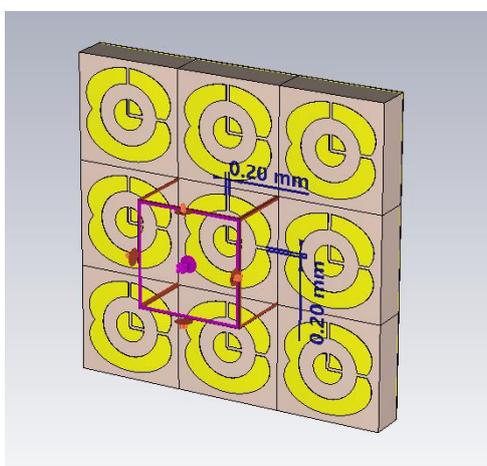


Рис. 15. Вариант поглощающей поверхности с мета-ячейкой в форме неправильного разделенного кольца, с промежутками по 0,2 мм.

Полученные частотные зависимости коэффициента отражения показаны на рисунке 16.

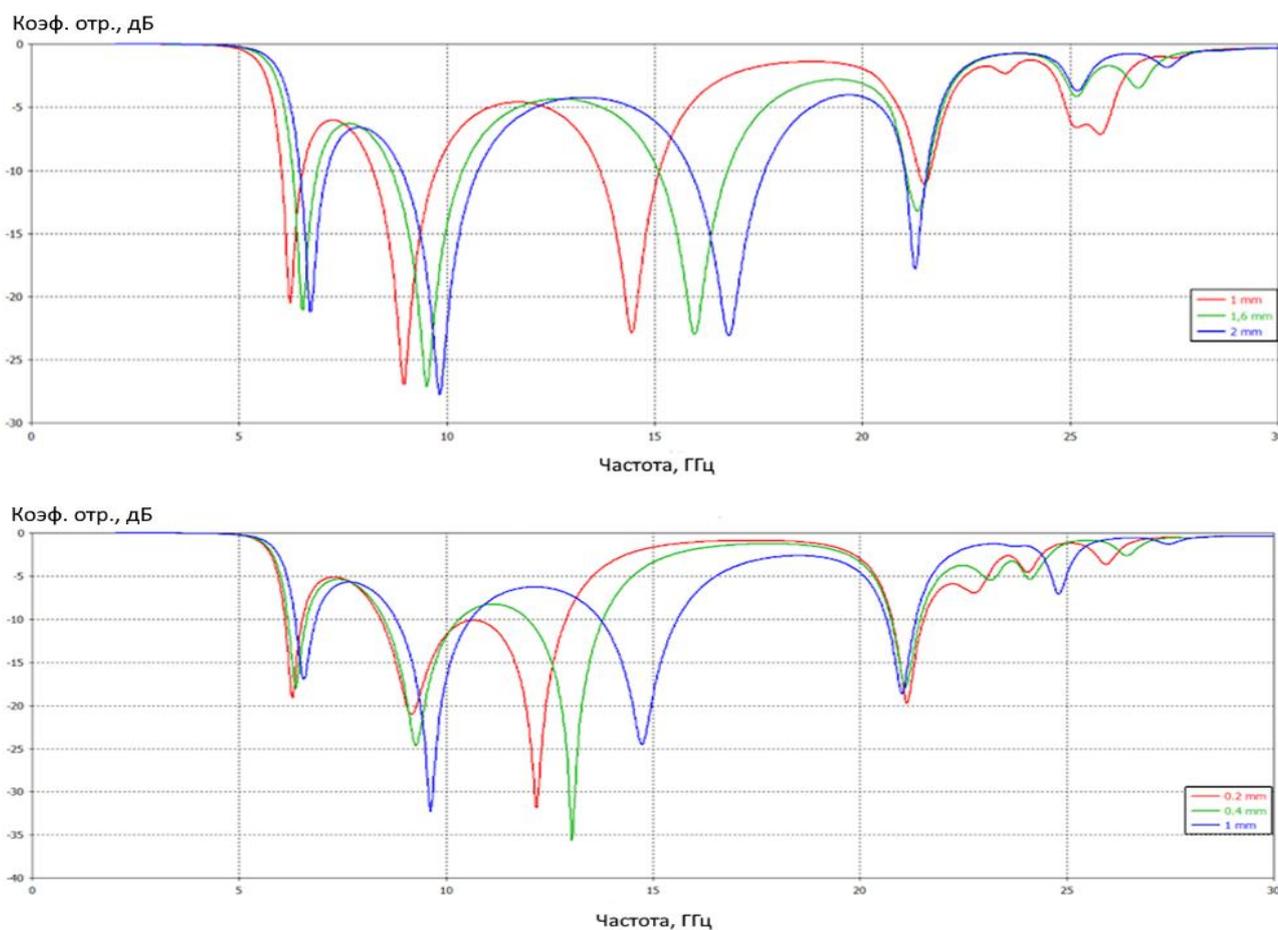


Рис. 16. Сравнение графиков зависимости коэффициента отражения от частоты мета-ячейки в формах (разделенного кольца стандартной формы сверху, разделенного кольца произвольной формы снизу).

Видно, что увеличение ширины щелей в кольцевых резонаторах метаматериала приводит к смещению его резонансных частот в область более высоких значений (что иллюстрируют зеленые и синие кривые на рис. 16). Наиболее значительный сдвиг наблюдается для резонансов, изначально расположенных в диапазоне 12–15 ГГц.

Также в рамках анализа были рассмотрены частотные зависимости коэффициента поглощения, показанные на рисунке 17.

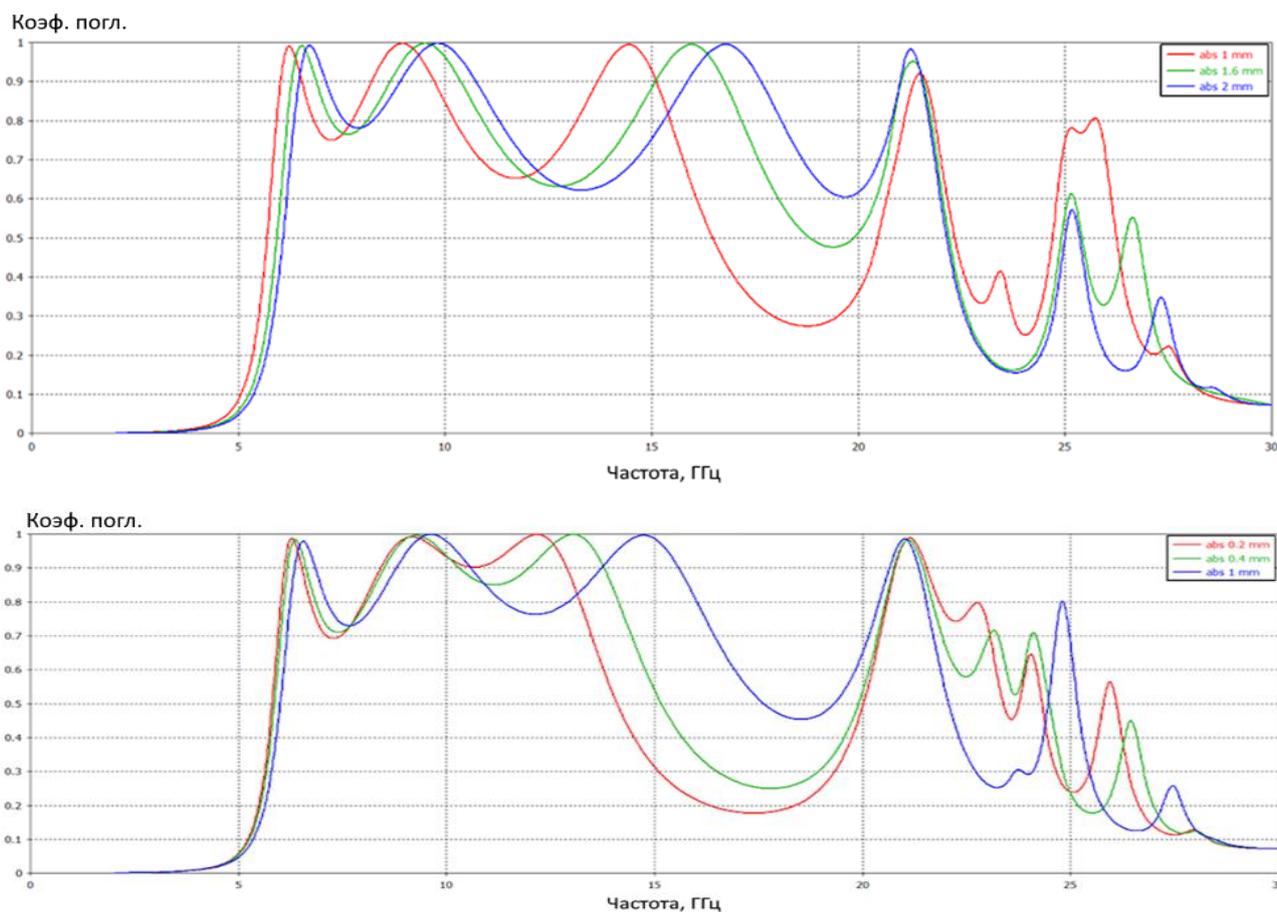


Рис. 17. Сравнение графиков зависимости коэффициента поглощения от частоты мета-ячейки в формах (разделенного кольца стандартной формы сверху, разделенного кольца произвольной формы снизу).

Подтверждается выявленная ранее закономерность: изменение геометрических параметров метаматериала дает возможность регулировать его поглощающие свойства в зависимости от области применения и поставленных задач.

В таблице 1 приводятся полученные закономерности при изменении геометрических параметров мета-ячеек.

Таблица 1. Полученные закономерности при изменении геометрических параметров мета-ячеек.

Изменение ширины перегородки			Изменение расстояния между концами полумесяца		
Ширина перегородки, мм	Рабочая частота, ГГц	Значения коэф. отражения, дБ	Расстояние между концами полумесяца, мм	Рабочая частота, ГГц	Значение коэф. отражения, дБ
0,2	7,1; 7,9; 9,9; 16,7; 21,4	-23,8; -25,4; -21,2; -23,3; -13,3	2,83	6,5; 9,0; 15,9	-18,9; -25,8; -23,1
0,5	7,6; 9,9; 16,7; 21,4	-35,9; -21,1; -23,0; -12,0	3,86	6,9; 9,6; 17,0	-19,7; -26,6; -23,2
1,0	7,4; 10,0; 16,5; 21,4	-15,4; -19,0; -23,3; -10,9	4,30	7,1; 10,0; 17,5	-20,6; -26,7; -23,7
1,5	10,2; 16,3	-17,1; -22,8	–	–	–

## Заключение

В результате проведенной работы, можно сделать вывод о целесообразности применения метаматериалов для проектирования поглотителей СВЧ-радиоволн, а также для проектирования антенн, работающих в СВЧ-диапазоне. При использовании мета-ячеек, объединенных в определенные структуры, удалось добиться расширения частотной области коэффициента поглощения при сохранении малых размеров.

Таблица 1 показывает изменение значений коэффициента отражения на рабочей частоте в зависимости от изменения геометрических параметров мета-ячейки (ширины перегородки и расстояния между концами полумесяца). Согласно полученным значениям, можно сделать вывод, что при изменении ширины перегородки не происходит значительных изменений частотных зависимостей коэффициентов отражения. В свою очередь изменение расстояния

между концами полумесяца приводит к смещению рабочих частот в область более высоких значений. Например, для расстояний 2,83 и 4,30 мм происходит смещение резонансов от 6,5 до 7,1 ГГц, от 9,0 до 10,0 ГГц, от 15,9 до 17,5 ГГц. Кроме этого, наблюдается усиление резонансов. Для тех же расстояний первый резонанс усиливается от -18,9 до -20,6 дБ, второй от -25,8 до -26,7 дБ, третий от -23,1 до -23,7 дБ.

Рассмотренные в работе мета-ячейки и их зависимости от геометрических параметров могут использоваться при проектировании поглощающих и антенных систем, работающих в СВЧ диапазоне.

### Литература

1. Стаценко Л.Г., Пуговкина О.А. Метаматериалы в системах СВЧ. – 2014.
2. Satarkar P.R., Lohani R.B. Characterization of metamaterial based patch antenna for worldwide interoperability for microwave access application // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – 2022. – Т. 11. – №. 5. – С. 2687-2695.
3. Krzysztofik W.J., Cao T.N. Metamaterials in application to improve antenna parameters // Metamaterials and metasurfaces. – 2018. – Т. 12. – №. 2. – С. 63-85. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.80636>
4. Стаценко Л.Г. и др. Применение метаматериалов в антенных устройствах цифровых систем связи // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.1.2>
5. Север Д.С. и др. Применение микрополосковых и фрактальных антенн на основе метаматериалов в цифровых системах связи для повышения их энергоэффективности // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.14>
6. Dai Tielin, Jin Liuchao, Shang Chen and others. Advances in Intelligent Design of Metamaterials // Journal of Engineering and Applied Science. – 2024. – Т. 12, 120602. С. 1-26. <https://doi.org/10.1063/5.0247369>

7. Kaur P., Bansal S., Kumar N. SRR metamaterial-based broadband patch antenna for wireless communications // Journal of Engineering and Applied Science. – 2022. – Т. 69. – №. 1. – С. 47. <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00103-6>
8. Zhang Y. Design and analysis of a broadband microwave metamaterial absorber // IEEE Photonics Journal. – 2023. – Т. 15. – №. 3. – С. 1-10. <https://www.doi.org/10.1109/JPHOT.2023.3277449>

**Для цитирования:**

Стаценко Л.Г., Котенко Я.Р., Дронин Я.С. Влияние геометрических параметров мета-ячеек на свойства поглотителей СВЧ-волн // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.2.5>