

## Резонансный спектр двух непараллельных диэлектрических колец

В. Я. Печеркин, М. М. Бухарин, Л. М. Василяк, М. С. Доброклонская

*Экспериментально и методом компьютерного моделирования исследованы спектры резонансного рассеяния на основной магнитной моде субволновых линейных структур из двух непараллельных диэлектрических плоских тонких колец, расположенных вдоль волнового вектора и возбуждаемых падающей плоской электромагнитной волной СВЧ-диапазона. Обнаружено, что в амплитудно-частотном спектре в области резонанса магнитного поля внутри системы из двух колец возникает резкий провал на резонансной частоте одиночного кольца при наклоне плоскостей колец относительно друг друга. При параллельных плоскостях колец резонансный провал не регистрируется. Обнаруженный эффект можно использовать при монтаже нескольких колец для контроля их плоскостей или для создания диагностики отклонения на малые углы.*

*Ключевые слова:* метаматериалы, диэлектрический магнитный диполь, отрицательный магнитный отклик, диэлектрическое кольцо, диэлектрическая структура, плоская электромагнитная волна, СВЧ-диапазон, резонанс.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-4-76-80

### Введение

Для создания метаматериалов [1–3], метаповерхностей, направленных антенн [4], систем фильтрации и перераспределения СВЧ-излучения [5], идеальных линз [6] используются резонансные элементы [6–9]. Наиболее часто такими элементами являются металлические кольца с тонким разрезом, который является конденсатором в резонансной  $LC$ -цепи, состоящей из одного витка [6]. Резонансная частота для тонкого кольца определяется его

индуктивностью  $L$  и емкостью  $C$  по формуле Томпсона  $f = (LC)^{-0.5}$ . Для уменьшения потерь на высоких частотах в настоящее время активно исследуется возможность замены этих металлических элементов на полностью диэлектрические кольца [7–9]. Для создания структур, например метаповерхностей, необходимо разместить большое количество колец определенным образом. При близком расположении колец относительно друг друга их магнитные поля могут взаимодействовать. Ранее мы исследовали резонансные свойства тонкого диэлектрического кольца и системы из двух колец [10] в ГГц области частот, и было показано, что в случае падающей плоской ЭМ-волны наибольший резонансный отклик наблюдается на частотах, соответствующих магнитным дипольным резонансам. Для системы из двух одинаковых колец в случае субволнового элемента, когда размер этой системы много меньше длины волны иницирующего излучения, резонансный спектр рассеянного излучения состоит из двух пиков, возникающих из-за взаимодействия магнитных полей колец, которое зависит от величини

Печеркин Владимир Яковлевич, с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: vpcherkin@yandex.ru

Бухарин Михаил Михайлович, стажер-исследователь.

Василяк Леонид Михайлович, гл.н.с., д.ф.-м.н.

Доброклонская Марина Сергеевна, аспирант.

Объединенный институт высоких температур РАН.

Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 27.06.2024

После доработки 10.07.2024

Принята к публикации 19.07.2024

Шифр научной специальности: 1.3.4

© Печеркин В. Я., Бухарин М. М., Василяк Л. М.,  
Доброклонская М. С., 2024

ны взаимной индуктивности  $M$ , а две резонансные частоты возникают вследствие одинакового и противоположного направлений тока взаимоиндукции:  $f = f_0(1 \pm M/L)^{-0.5}$ , где  $f_0$  – резонансная частота одного кольца [10]. Поскольку плоскости колец в реальных структурах не будут идеально параллельны, то взаимодействие магнитных полей колец будет зависеть от угла наклона плоскостей колец. Естественно, что основные изменения конфигурации магнитного поля будут внутри этой системы между кольцами, а измерения обычно проводят рассеянного излучения в дальней зоне и иногда в ближней зоне [10]. Цель настоящей работы – исследование изменения магнитного поля внутри субволновой системы из двух диэлектрических колец при изменении угла наклона плоскостей колец при их возбуждении плоской электромагнитной волной СВЧ-диапазона.

### Эксперимент

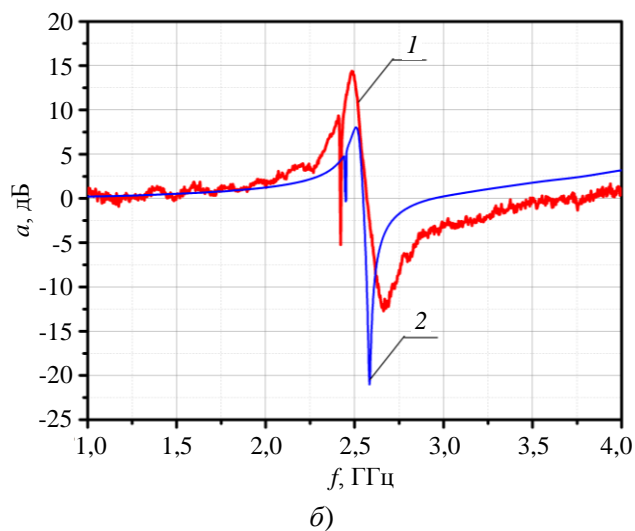
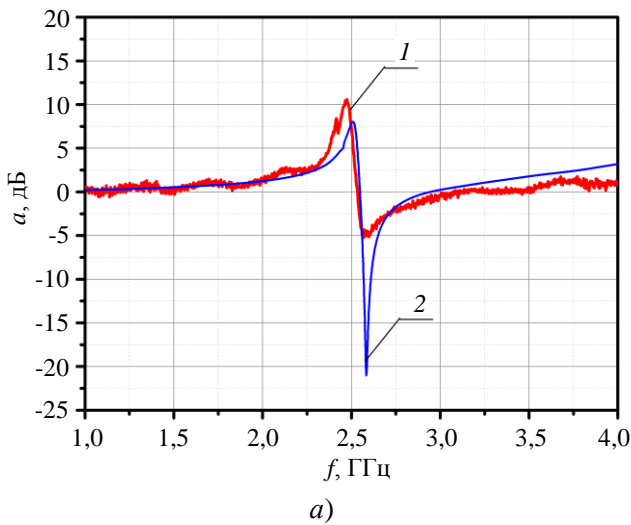
Схема проведения экспериментов по измерения магнитных полей в ближней волновой зоне структуры из двух диэлектрических колец, возбуждаемой плоской электромагнитной волной, была аналогична использованной нами ранее [10]. Задающим генератором служил один из каналов спектроанализатора сигналов цепей Agilent E5071C ENA Network Analyzer с рабочим диапазоном частот от 300 кГц до 20 ГГц. Сигнал от спектроанализатора поступал на дополнительный усилитель с коэффициентом усиления 20 дБ для увеличения соотношения сигнал–шум и уменьшения влияния эфирных радиопомех в полосе частот 0,75–6 ГГц. Далее сигнал поступал на рупорную антенну ETS-Lindgren's model 3115 с рабочим диапазоном частот 0,75–18 ГГц, которая формировала плоскую линейно поляризованную волну. Магнитные поля измерялись с помощью магнитного зонда Beehive Electronics 100B EMC Probe с внутренним диаметром кольца детектора 3,7 мм, сигнал с которого поступал на вход анализатора спектров сигналов цепей Agilent E5071C ENA Network Analyzer. Объектом исследований являлась субволновая структура из двух одинаковых диэлектрических колец с внешним диаметром 16 мм с поперечным квадратным сечением

$3 \times 3 \text{ мм}^2$ , изготовленных из высокочастотной конденсаторной керамики с малым тангенсом угла диэлектрических потерь на основе титанатов кальция и стронция ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaTiO}_3$ ,  $\text{SrTiO}_3$ ). Величина диэлектрической проницаемости и тангенс угла диэлектрических потерь определялись экспериментально на частоте 1 кГц с помощью измерителя емкости и индуктивности E7-8. Измеренная диэлектрическая проницаемость материала колец была равна  $160 \pm 5$ , а тангенс угла потерь составлял  $3 \times 10^{-4}$ . Структура помещалась на расстоянии 35 см от антенны до первого кольца вдоль волнового вектора таким образом, чтобы волновой вектор и вектор электрического поля плоской падающей волны были параллельны плоскости колец, а вектор магнитного поля волны перпендикулярен. Расстояние между краями колец составляло 3 мм. Зонд магнитного поля был расположен между кольцами на линии, соединяющей центры колец. Расстояние от плоскости датчика до плоскости колец (вдоль волнового вектора) составляло 12 мм. Плоскость кольца магнитного зонда была перпендикулярна волновому вектору магнитного поля  $H$  и параллельна волновому вектору  $k$  и вектору электрического поля  $E$  падающей волны. В таком положении зонд регистрирует сумму магнитных полей падающей волны и полей рассеяния системы из двух колец. Для выделения рассеянной составляющей магнитного поля системы колец перед каждым испытанием проводилось измерение уровня фонового излучения иницирующей волны с зондом при отсутствии тестовых объектов. Затем фоновый сигнал вычитали из измеренного сигнала при наличии тестовых элементов.

### Результаты экспериментов и моделирования

В процессе исследований были проведены экспериментальные измерения резонансных спектров рассеяния падающего излучения плоской электромагнитной волны диэлектрическими кольцами вблизи основной частоты магнитного дипольного момента и моделирование. Компьютерное моделирование проводилось с использованием программы CST Microwave Studio. Параметры расчета были заданы в соответствии с условиями экспери-

мента. На рисунке представлены рассчитанные и измеренные спектры магнитного поля внутри системы из двух колец без наклона и углом наклона плоскостей.



*Измеренные (красная линия 1) и рассчитанные (синяя линия 2) спектры магнитного поля для двух колец: а) – без наклона; б) – с углом наклона*

Представленные на рисунке спектры являются резонансными спектрами системы двух взаимодействующих магнитных диполей. Если плоскости колец параллельны, то спектры на рисунке а) аналогичны спектрам двух взаимодействующих магнитных диполей, на которых видно расщепление резонансного пика для одного кольца на два пика вследствие взаимоиндукции [10], которые хорошо видны в спектрах рассеянного излучения [10]. Если плоскости колец наклонены даже на относительно малый угол  $3^\circ$ , то на спектрах появляется глубокий провал на резонансной частоте

одиночного кольца. Спектр рассеянного излучения в дальней волновой зоне при этом положении колец с углом наклона не отличается от спектра для двух колец с параллельными плоскостями. Следовательно, при наклоне плоскости одного из колец мы регистрируем изменение в распределении внутренней энергии системы из двух колец, а рассеивающие свойства этой системы изменяются незначительно. Поскольку взаимодействие между кольцами происходит на резонансной частоте магнитного диполя для одного кольца, то при повороте плоскости одного из колец зонд магнитного поля регистрирует это изменение, т. к. изменилась симметрия системы. Рассеяние энергии происходит с двумя пиками в амплитудно-частотном спектре из-за расщепления резонансной частоты одного кольца вследствие взаимодействия колец, которое зависит от взаимной индуктивности. Поскольку взаимоиндуктивность незначительно изменяется при повороте плоскости одного из колец на малый угол (в условиях данного эксперимента  $3^\circ$ ), то и спектр рассеянного излучения тоже изменяется незначительно, поэтому в наших экспериментах такие изменения не удается обнаружить. Компьютерное моделирование хорошо согласуется с экспериментальными спектрами для обоих случаев. Различия экспериментальных и рассчитанных спектров в амплитудах пиков и их полуширине может быть вследствие более высокого значения тангенса диэлектрических потерь при высоких частотах в ГГц-области частот по сравнению со значениями, измеренными на частоте 1 кГц.

## Заключение

Проведены теоретическое моделирование и экспериментальные исследования основных электромагнитных резонансов с наименьшими частотами на основной моде магнитного диполя в линейной структуре из двух колец, ориентированных вдоль волнового вектора падающей волны и возбуждаемых продольно падающими линейно поляризованными микроволнами при наклоне плоскостей колец относительно волнового вектора. Измерения и моделирование выполнены для коор-

динат внутри системы из двух колец, следовательно, они характеризуют внутреннюю запасенную энергии системы из двух колец в состоянии резонансов магнитных диполей. Измеренные резонансные спектры хорошо совпадают с результатами моделирования. Обнаружено, что в амплитудно-частотном спектре в области резонанса магнитного поля внутри системы из двух колец возникает резкий провал на резонансной частоте одиночного кольца при наклоне плоскостей колец относительно друг друга. При параллельных плоскостях колец резонансный провал не регистрируется. Следует отметить, что измерение рассеянного излучения в дальней волновой зоне, которое обычно и исследуется, не содержит в энергии магнитного поля провала на этой частоте. Обнаруженный эффект можно использовать при монтаже нескольких колец для контроля их плоскостей или для создания диагностики отклонения на малые углы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Haxha S., AbdelMalek F., Ouerghi F., Charlton M. D. B., Aggoun A., Fang X. / Scientific Reports. 2018. Vol. 8. P. 16119.
2. Zheng Y., Dai H., Wu J., Zhou C., Wang Z., Zhou R., Li W. / Frontiers in Physics. 2022. Vol. 10. P. 1069722.
3. Zheludev N. I., Kivshar Y. S. / Nature Materials. 2012. Vol. 11. P. 917–924.
4. Engheta N. / IEEE Transactions on Antennas and Wireless Propagation Letters. 2002. Vol. 1. № 1. P. 10–13.
5. Lagarkov A., Kissel V. / Pys. Rev. Lett. 2004. Vol. 92. № 7. P. 077401.
6. Pendry J. B. / Phys. Rev. Lett. 2000. Vol. 85. № 18. P. 3996.
7. Рыбин М. В., Лимонов М. Ф. / Успехи физ. наук. 2019. Т. 189. С. 881.
8. Kuznetsov A. I., Miroshnichenko A. E., Fu Y. H., Zhang J. Bo., Luk'yanchuk B. / Sci. Rep. 2012. Vol. 2. P. 492.
9. Jahani S., Jacob Z. / Nature Nanotechnology. 2016. Vol. 11. P. 23.
10. Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Бухарин М. М., Доброклонская М. С. / Прикладная физика. 2023. № 5. С. 15–21.

PACS: 75.78.-n, 77.84.-s

## The resonance spectrum of two nonparallel dielectric rings

V. Ya. Pecherkin, M. M. Bukharin, L. M. Vasilyak and M. S. Dobroklonskaya

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences  
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia  
E-mail: vpecherkin@yandex.ru

Received 27.06.2024; revised 10.07.2024; accepted 19.07.2024

*The resonance scattering spectra of subwavelength linear structures consisting of two nonparallel dielectric flat thin rings located along the wave vector and excited by an incident plane electromagnetic microwave wave are studied experimentally and by computer modeling. It was found that in the amplitude-frequency spectrum in the resonance region of the magnetic field inside a system of two rings, a sharp dip occurs at the resonant frequency of a single ring when the planes of the rings are tilted relative to each other. With parallel planes of the rings, the resonant dip is not recorded. The detected effect can be used when mounting several rings to control their planes or to create a small angle deviation diagnosis.*

**Keywords:** metamaterials, dielectric magnetic dipole, negative magnetic response, dielectric ring, dielectric structure, plane electromagnetic wave, microwave, resonance.

**REFERENCES**

1. Haxha S., AbdelMalek F., Ouerghi F., Charlton M. D. B., Aggoun A. and Fang X., *Scientific Reports* **8**, 16119 (2018).
2. Zheng Y., Dai H., Wu J., Zhou C., Wang Z., Zhou R. and Li W., *Frontiers in Physics* **10**, 1069722 (2022).
3. Zheludev N. I. and Kivshar Y. S., *Nature Materials* **11**, 917–924 (2012).
4. Engheta N., *IEEE Transactions on Antennas and Wireless Propagation Letters* **1** (1), 10–13 (2002).
5. Lagarkov A. and Kissel V., *Pys. Rev. Lett.* **92** (7), 077401 (2004).
6. Pendry J. B., *Phys. Rev. Lett.* **85** (18), 3996 (2000).
7. Rybin M. V. and Limonov M. F., *Phys. Usp.* **62**, 823–838 (2019).
8. Kuznetsov A. I., Miroshnichenko A. E., Fu Y. H., Zhang J. Bo. and Luk'yanchuk B., *Sci. Rep.* **2**, 492 (2012).
9. Jahani S. and Jacob Z., *Nature Nanotechnology* **11**, 23 (2016).
10. Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Bukharin M. M. and Dobroklonskaya M. S., *Applied Physics*, № 5, 15–21 (2023) [in Russian].