

УДК 537.868.4

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-15-21

EDN: DLTXST

PACS: 75.78.-n, 77.84.-s



Резонансное рассеяние плоских электромагнитных волн субволновой линейной структурой из двух диэлектрических колец

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

Экспериментально и методом компьютерного моделирования исследованы спектры резонансного рассеяния на основной магнитной моде субволновой линейной структурой из двух диэлектрических плоских тонких колец, расположенных вдоль волнового вектора, и возбуждаемых токами смещения падающей плоской электромагнитной волны СВЧ-диапазона. В спектрах рассеяния магнитного поля в дальней волновой зоне, ближней волновой зоне и около центров колец наблюдается расщепление резонансной частоты, в отличие от одиночного кольца. Измеренные спектры совпадают со спектрами, полученными при компьютерных расчетах во всех точках измерений.

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

Введение

Резонансное рассеяние электромагнитных волн широко применяется в разных областях, таких как астрономия, зондирование, техника излучения и приема электромагнитных (ЭМ) сигналов, спектроскопия в широком диапазоне частот. В настоящее время раскрываются новые фундаментальные аспекты и практические возможности в связи с новыми объектами, такими как метаматериалы и метаповерхности или квантовая и топологи-

ческая оптика. Метаматериалы с отрицательной магнитной и диэлектрической проницаемостями обладают уникальными электродинамическими свойствами, отсутствующими у природных материалов [1–3]. Метаматериалы пока не обнаружены в природных условиях, однако они могут быть созданы искусственно на основе субволновых метаэлементов. Первые метаматериалы были созданы на основе резонансного LC-контура в виде металлического кольца с тонкой щелью. Металлические метаэлементы использовались в антенной технике. Одной из первых областей, в которых слабозатухающие резонансные компоненты электромагнитных волн сыграли ключевую роль, является плазмоника [4–6]. Однако, в плазмонных системах резонансы более высоких порядков ограничены большой диссипацией в металлах, что особенно важно в видимом диапазоне длин волн. Замена металлических метаэлементов диэлектрическими является одной из возможностей снизить диссипативные потери на высоких частотах. Применение диэлектрических материалов с высоким значением диэлектрической проницаемости (100–200) позволяет создавать субволновые элементы, размеры которых значительно меньше

Печеркин Владимир Яковлевич¹, с.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: vpecherkin@yandex.ru

Василяк Леонид Михайлович¹, гл.н.с., д.ф.-м.н.

Бухарин Михаил Михайлович^{1,2}, стажер-исследователь.

Доброклонская Марина Сергеевна¹, аспирант.

¹Объединенный институт высоких температур РАН.

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

²Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС".

Россия, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, 4, стр. 1.

Статья поступила в редакцию 14.09.2023

После доработки 28.09.2023

Принята к публикации 3.10.2023

© Печеркин В. Я., Василяк Л. М., Бухарин М. М.,
Доброклонская М. С., 2023

длины волны падающего излучения вплоть до видимых частот [7, 8]. При возбуждении различных типов резонансов в субволновых диэлектрических элементах с высоким показателем преломления можно получить усиление магнитных и электрических полей внутри элемента и вблизи его поверхности на несколько порядков в гигагерцовом и оптическом диапазонах [9–12].

Электромагнитные свойства отдельных элементов являются основой при создании метаматериалов применительно к фундаментальным и прикладным задачам в инфракрасной и СВЧ областях [13–15]. Управление магнитными составляющими волнового поля с помощью диэлектрических структур с отрицательным магнитным откликом, называемых оптическим магнетизмом, связано с созданием наноразмерных колебательных систем и генерацией магнитных мод. В настоящее время они используются в антенной технике, в том числе при разработке субволновых широкополосных наноантенн высокой направленности, при создании магнитных зеркал и сверхчувствительных датчиков [16–18]. Одним из важных свойств метаэлементов является возможность создания условий, при которых отсутствует отраженное и прошедшее рассеянное излучение. Рассеянное излучение при этом будет только в направлении, перпендикулярном волновому вектору. Такое явление носит название эффект Керкера. Этот эффект в ГГц области частот был получен для диэлектрического сфероида при направлении вектора магнитного поля ЭМ-волны вдоль большой оси сфероида, а волнового вектора ЭМ-волны вдоль малой оси и перпендикулярно большой оси [15].

Ранее мы исследовали резонансные свойства тонкого диэлектрического кольца и эллипса [19–23] в ГГц области частот, и было показано, что в случае падающей плоской ЭМ-волны наибольший резонансный отклик наблюдается на частотах, соответствующих магнитным дипольным резонансам. В случае скользящего падения плоской ЭМ-волны на диэлектрическое кольцо основная резонансная магнитная мода характеризуется отрицательным магнитным откликом [19], и такое кольцо действует как резонансный круговой магнитный диполь в ГГц диапазоне частот.

Целью данной работы является экспериментальное исследование резонансного рассеяния плоских электромагнитных волн ГГц диапазона частот на основном дипольном магнитном резонансе в линейных субволновых структурах, состоящих из двух диэлектрических плоских колец с высокой диэлектрической проницаемостью при ориентации линейной структуры вдоль волнового вектора падающей плоской электромагнитной волны.

Эксперимент

Схема измерения магнитных полей в ближней волновой зоне структуры из диэлектрических колец приведена на рис. 1.

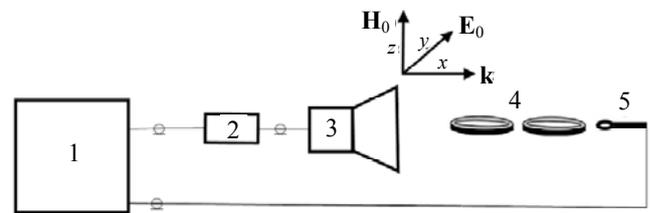


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 – анализатор радиочастотных цепей; 2 – широкополосный усилитель; 3 – рупорная антенна; 4 – диэлектрические кольца; 5 – высокочастотный зонд магнитного поля

Генерация сигналов в заданном диапазоне частот и регистрация электрического сигнала от магнитного зонда от исследуемого объекта осуществлялось анализатором радиочастотных цепей Agilent E5071C ENA Network Analyzer с рабочим диапазоном частот от 300 кГц до 20 ГГц. Плоская линейно поляризованная волна формировалась рупорной антенной (ETS-Lindgren's model 3115) с рабочим диапазоном частот 0,75–18 ГГц. Для увеличения соотношения сигнал–шум и уменьшения влияния эфирных радиопомех в полосе частот 0,75–6 ГГц применялся дополнительный усилитель с коэффициентом усиления 20 дБ. Магнитные поля измерялись с помощью магнитного зонда Beehive Electronics 100B EMC Probe с внутренним диаметром кольца детектора 3,7 мм. Плоскость кольца магнитного зонда была перпендикулярна волновому вектору магнитного поля \mathbf{H} и параллельна волновому вектору \mathbf{k} и вектору электрического

поля E падающей волны. В таком положении зонд регистрирует сумму магнитных полей падающей и рассеянной волны. Для выделения рассеянной составляющей магнитного поля перед каждым испытанием проводилось измерение уровня фонового излучения с зондом при наличии падающего излучения в отсутствие тестовых объектов. Затем фоновый сигнал вычитали из измеренного сигнала при наличии тестовых элементов.

Объектами исследований являлись одиночный диэлектрический кольцевой контур и линейные структуры, состоящие из двух колец одного типа. Для наших экспериментов использовались диэлектрические кольца с внешним диаметром 16 мм с поперечным квадратным сечением $3 \times 3 \text{ мм}^2$, изготовленные из высокочастотной конденсаторной керамики с малым тангенсом потерь на основе титанатов кальция и стронция (TiO_2 , CaTiO_3 , SrTiO_3). Величина диэлектрической проницаемости и тангенс угла потерь определялись экспериментально на частоте 1 кГц с помощью измерителя емкости и индуктивности E7-8. Измеренная диэлектрическая проницаемость материала колец была равна 150 ± 5 , а тангенс угла потерь составлял 3×10^{-4} . Структура из двух колец и помещалась на расстоянии 50 см от антенны таким образом, чтобы волновой вектор k и вектор электрического поля E плоской падающей волны были параллельны плоскости колец, а вектор магнитного поля H перпендикулярен (см. рис. 1).

Результаты исследований и обсуждение

В процессе исследований были проведены компьютерное моделирование и экспериментальные измерения резонансных спектров рассеяния падающего излучения плоской электромагнитной волны диэлектрическими кольцами вблизи основной частоты магнитного дипольного момента. Компьютерное моделирование было проведено с помощью программы CST Microwave Studio во временной области с открытыми граничными условиями. Параметры расчета были заданы в соответствии условиями эксперимента. В расчетах приняты значения диэлектрической проницаемости и тангенса потерь 150 и 3×10^{-4} , соответственно.

Для определения рассеяния падающей электромагнитной волны элементами линейной цепочки экспериментально были измерены спектры рассеяния в различных точках линейной цепочки. При расчетах и проведении измерений датчик был установлен над кольцами. Расстояние между верхней плоскостью колец и нижней плоскостью датчика было равно 2 мм. Центр магнитного сенсора датчика был расположен на оси симметрии линейной цепочки параллельной волновому вектору. Перемещение датчика осуществлялось вдоль волнового вектора. Были проведены измерения магнитного поля в пяти точках: 1 – точка вблизи кольца с ближней стороны от антенны на расстоянии 32 мм от края кольца; 2 – точка вблизи кольца с ближней стороны от антенны на расстоянии 2 мм от края кольца; 3 – точка в центре 1 кольца (ближнее к антенне); 4 – точка в центре 2 кольца (дальнее от антенны); 5 – точка вблизи кольца с дальней стороны от антенны на расстоянии 2 мм от края кольца; 6 – точка вблизи кольца с дальней стороны от антенны на расстоянии 32 мм от края кольца. Результаты измерений приведены на рис. 2–6.

На рисунке 2 и рисунке 3 представлены рассчитанные и измеренные спектры рассеяния магнитного поля прошедшего излучения колец в точках 5 и 6 соответственно.

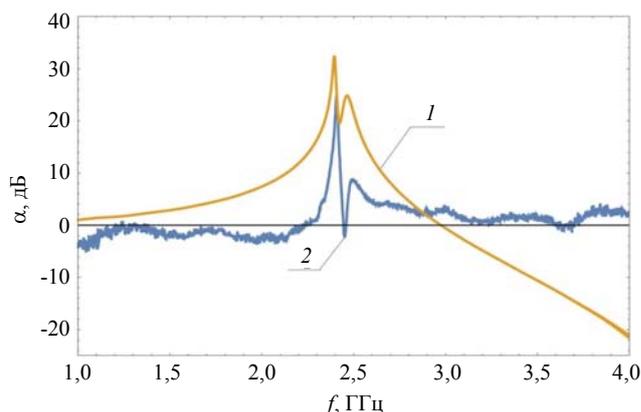


Рис. 2. Резонансные спектры рассеяния магнитного поля прошедшей электромагнитной волны для двух диэлектрических. Датчик расположен в точке 5. Расстояние между центрами колец равно 18 мм, расстояние между краями датчика и кольца равно 2 мм, расстояние от плоскости датчика до плоскости колец (вдоль волнового вектора, ось x) составляло 0 мм. 1 – спектр моделирования. 2 – измеренный спектр, из которого вычтен спектр магнитного поля падающей волны при отсутствии кольца

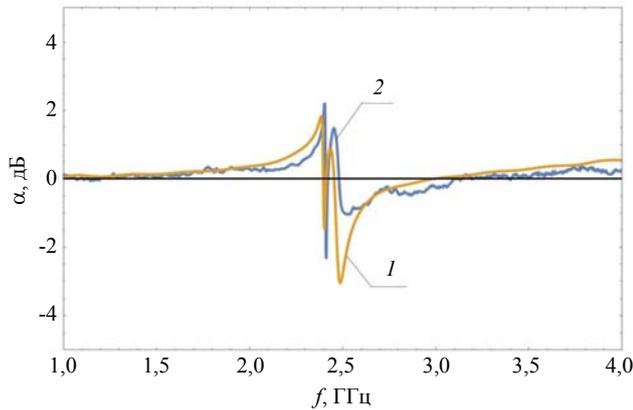


Рис. 3. Резонансные спектры рассеяния магнитного поля прошедшей электромагнитной волны для двух диэлектрических колец. Датчик расположен в точке 6. Расстояние между краями датчика и кольца равно 32 мм, расстояние от плоскости датчика до плоскости колец (вдоль волнового вектора, ось x) составило 0 мм. 1 – спектр моделирования. 2 – измеренный спектр, из которого вычтен спектр магнитного поля падающей волны при отсутствии кольца

На рисунках 2 и 3 видно расщепление основной резонансной частоты единичного кольца, которое обусловлено индуктивной связью между двумя кольцевыми контурами. Появление таких резонансов для другой конфигурации двух колец и при скользящем падении плоской волны было теоретически рассмотрено нами ранее [13, 28]. В данном случае физический механизм расщепления резонанса такой же. Для двух одинаковых кольцевых контуров с индуктивностью L и коэффициентом взаимной индукции M будут возникать две резонансные частоты $f_{0\pm} = f_0(1 \pm M/L)^{-0,5}$. Появление двух резонансных частот связано с взаимной индуктивностью колец и возможностью протекания индуцированных токов в противоположных направлениях. На рисунке 3 наиболее наглядно продемонстрировано расщепление основного магнитного резонанса на две частоты $f_{0-} = 2,392$ ГГц и $f_{0+} = 2,496$ ГГц (кривая 2). Экспериментальные результаты хорошо соответствуют теоретическим (кривая 1).

На рисунке 4 видно, что при положении датчика над центром дальнего от антенны кольца в точке 4 резонансный спектр излучения уширяется, а амплитуда увеличивается. Спектр от ближнего антенны кольца в точке 3 практически совпадает с приведенным на рисунке 4. Уширение спектра объясняется тем, что кольца имеют определенное сечение, на

длине которых может возникать многомодовый режим генерации. Внутри кольца наблюдается усиление этих мод. На этом фоне наблюдаемое расщепление основной резонансной частоты становится менее выраженным.

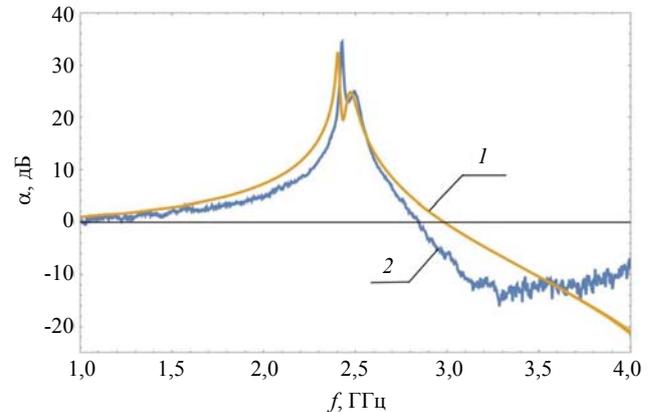


Рис. 4. Резонансные спектры рассеяния магнитного поля рассеянной электромагнитной волны для двух диэлектрических колец. Датчик расположен в центре дальнего от антенны кольца в точке 4. Расстояние между центрами колец равно 18 мм, расстояние между краями датчика и кольца равно 2 мм, расстояние от плоскости датчика до плоскости колец составляло 2 мм. 1 – спектр моделирования. 2 – измеренный спектр, из которого вычтен спектр магнитного поля падающей волны при отсутствии кольца

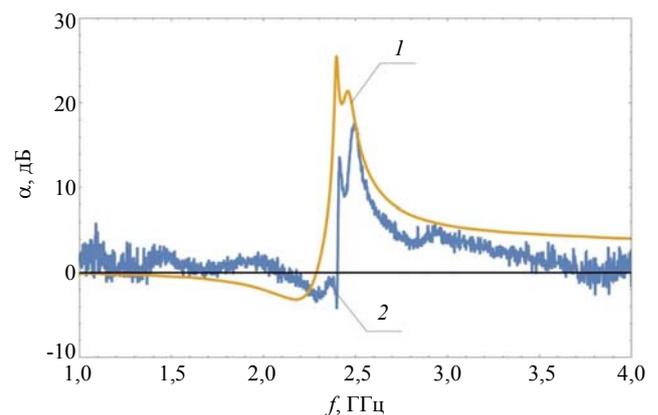


Рис. 5. Резонансные спектры рассеяния магнитного поля отраженной электромагнитной волны для двух диэлектрических колец. Датчик расположен в точке 2. Расстояние между центрами колец равно 18 мм, расстояние между краями датчика и кольца равно 2 мм, расстояние от плоскости датчика до плоскости колец (вдоль волнового вектора, ось x) составило 0 мм. 1 – спектр моделирования. 2 – измеренный спектр, из которого вычтен спектр магнитного поля падающей волны при отсутствии кольца

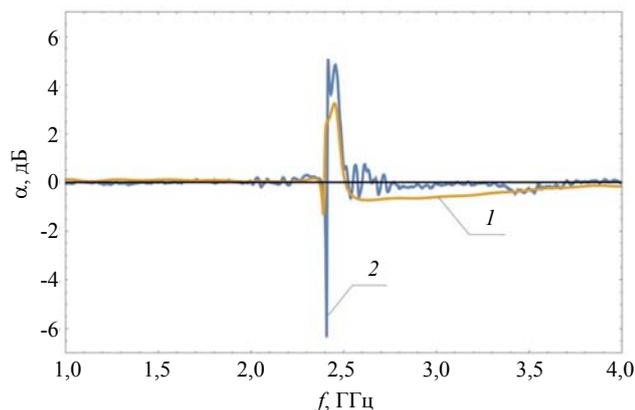


Рис. 6. Резонансные спектры рассеяния магнитного поля отраженной электромагнитной волны для двух диэлектрических колец. Датчик расположен в точке 1. Расстояние между центрами колец равно 18 мм, расстояние между краями датчика и кольца равно 32 мм, расстояние от плоскости датчика до плоскости колец (вдоль волнового вектора, ось x) составляло 0 мм. 1 – спектр моделирования. 2 – измеренный спектр, из которого вычтен спектр магнитного поля падающей волны при отсутствии кольца

На рисунках 5–6 видно, что для линейной структуры расщепление резонансной частоты наблюдается и для отраженной волны. Однако, в отличие от прошедшей волны в дальней зоне наблюдается уширение резонансного спектра. Различия в спектрах прошедшего излучения вдоль волнового вектора и отраженного излучения в направлении волнового вектора объясняется тем, что прошедший сигнал зависит от рассеяния по всем направлениям, а отраженный сигнал вдоль волнового вектора определяется конфигурацией линейной системы и увеличивается с увеличением количества резонансных элементов, рассеивающих с запаздыванием во времени. Время запаздывания возрастает с увеличением диэлектрической проницаемости материала колец. Для прошедшей волны спектр рассеяния совпадает со спектром, показанным на рисунке 3, однако, возрастает амплитуда пика поглощения на низшей частоте и сильно уменьшается его полуширина.

Заключение

Были проведены теоретическое моделирование и экспериментальные исследования основных электромагнитных резонансов с наименьшими частотами в линейной структуре из двух колец, ориентированной вдоль волнового вектора падающей волны и возбужда-

емой продольно падающей линейно поляризованной микроволной. Измеренные резонансные спектры хорошо совпадают с результатами моделирования. Показано, что для линейной структуры в ближней и дальней волновой зонах на расстоянии 2 мм и 32 мм от краев колец наблюдается расщепление резонансной частоты, прошедшей и отраженной волны вследствие взаимной индуктивности колец. В центре каждого кольца, также, наблюдается расщепление, однако, центры колец являются излучателями более широкого спектра частот, ширина которого зависит от геометрических размеров и поперечного сечения кольца, что также приводит к уширению спектров в ближней зоне прошедшего и отраженного сигнала. В дальней зоне наблюдается уширение спектра отраженного сигнала, которое связано с конфигурацией структуры, размерами и диэлектрической проницаемостью колец.

Диэлектрические кольцевые схемы с высокой диэлектрической проницаемостью могут служить элементами для проектирования субволновых метаматериалов, миниатюрных диэлектрических антенн, фильтров и линий задержек.

Экспериментальная часть работы выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-01129-23-00), в части компьютерного моделирования работа выполнена при поддержке в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» (грант НИТУ «МИСИС» № К2-2022-025)

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбин М. В., Лимонов М. Ф. / Успехи физ. наук. 2019. Т. 189. С. 881.
2. Kuznetsov A. I., Miroshnichenko A. E., Fu Y. H., Zhang J. Bo., Luk'yanchuk B. / Sci. Rep. 2012. Vol. 2. P. 492.
3. Jahani S., Jacob Z. / Nature Nanotechnology. 2016. Vol. 11. P. 23.
4. Linden S., Enkrich C., Wegener M., Zhou J., Koschny T., Soukoulis C. M. / Science. 2004. Vol. 306. P. 1351.
5. Shvartsburg A. B., Obod Yu. A. / Progress in Optics. 2015. Vol. 60. P. 489.

6. Rybin M. V., Filonov D., Belov P., Kivshar Y. S., Limonov M. F. / *Sci Rep.* 2015. Vol. 5. P. 8774.
7. Краснок А. Е., Максимов И. С., Денисюк А. И., Белов П. А., Мирошниченко А. Е., Симовский К. Р., Кившарь Ю. С. / *Успехи физ. наук.* 2013. Т. 183. С. 561.
8. Tittl A et al. / *Science.* 2018. Vol. 360. P. 1105.
9. Ремнев М. А., Климов В. В. / *Успехи физ. наук.* 2018. Т. 188. С. 169.
10. Vallion P., Geffrin J. M. / *J. Quant. Spectr. Radiat. Transfer.* 2014. Vol. 146. P. 100.
11. Shvartsburg A. B., Pecherkin V. Ya., Vaslyak L. M., Vetchinin S. P., Fortov V. E. / *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7. P. 2180.
12. Шварцбург А. Б., Печёркин В. Я., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Фортвов В. Е. / *Успехи физ. наук.* 2018. Т. 188. С. 780.
13. Печеркин В. Я., Шварцбург А. Б., Василяк Л. М., Ветчинин С. П., Костюченко Т. С., Панов В. А. / *Успехи прикладной физики.* 2018. Т. 6. № 3. С. 191.
14. Shvartsburg A. B., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Alybin K. V., Vol'pryan O. D., Obod Yu. A., Pecherkin V. Ya., Privalov P. A., Churikov D. V. / *Opt. Spectrosc+.* 2021. Vol. 129. P. 252.
15. Shvartsburg A., Pecherkin V., Jiménez S., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Vázquez L., Fortov V. E. / *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2018. Vol. 51. P. 475001.
16. Shvartsburg A., Pecherkin V., Jiménez S., Vasilyak L., Vázquez L., Vetchinin S. / *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2021. Vol. 54. P. 075004.
17. Luk'yanchuk B., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Y., Vetchinin S. P., Fortov V. E., Wang Z. B., Paniagua-Domínguez R., Fedyanin A. A. / *Sci. Rep.* 2021. Vol. 11. P. 23453.
18. Bukharin M. M., Pecherkin V. Ya., Ospanova A. K., Il'in V. B., Vasilyak L. M., Basharin A. A., Luk'yanchuk B. / *Sci. Rep.* 2022. Vol. 12. P. 7997.
19. O'Brien S., Pendry J. B. / *J. Phys. Condens. Matter.* 2002. Vol. 14. P. 4035.

PACS: 75.78.-n, 77.84.-s

Resonant scattering of plane electromagnetic waves by a subwavelength linear structure of two dielectric rings

V. Ya. Pecherkin¹, L. M. Vasilyak¹, M. M. Bukharin^{1,2} and M. S. Dobroklonskaya¹

¹ Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences
Bd. 2, 13 Izhorskaya st., Moscow, 125412, Russia
E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru

² National University of Science and Technology "MISIS"
Bd. 1, 4 Leninskiy prospekt, Moscow, 119049, Russia

Received 14.09.2023; revised 28.09.2023; accepted 3.10.2023

The resonant scattering spectra on the main magnetic mode by a subwavelength linear structure consisting of two dielectric flat thin rings located along the wave vector and excited by the displacement currents of the incident plane electromagnetic wave of the microwave range are investigated experimentally and by computer modeling. In the scattering spectra of the magnetic field in the far wave zone, near wave zone and near the centers of the rings, splitting of the resonant frequency is observed, unlike a single ring. The measured spectra coincide with the spectra obtained by computer calculations at all measurement points.

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

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-5-15-21

REFERENCES

1. Rybin M. V. and Limonov M. F., *Phys. Usp.* **62**, 823 (2019).
2. Kuznetsov A. I., Miroshnichenko A. E., Fu Y. H., Zhang J. Bo. and Luk'yanchuk B., *Sci. Rep.* **2**, 492 (2012).
3. Jahani S. and Jacob Z., *Nature Nanotechnology* **11**, 23 (2016).
4. Linden S., Enkrich C., Wegener M., Zhou J., Koschny T. and Soukoulis C. M., *Science* **306**, 1351 (2004).
5. Shvartsburg A. B. and Obod Yu. A., *Progress in Optics* **60**, 489 (2015).
6. Rybin M. V., Filonov D., Belov P., Kivshar Y. S. and Limonov M. F., *Sci. Rep.* **5**, 8774 (2015).
7. Krasnok A. E., Maksymov I. S., Denisyuk A. I., Belov P. A., Miroshnichenko A. E., Simovskii C. R. and Kivshar Yu. S., *Phys. Usp.* **56**, 539 (2013).
8. Tittel A. et al., *Science* **360**, 1105 (2018).
9. Remnev M. A. and Klimov V. V., *Phys. Usp.* **61**, 157 (2018).
10. Vallion P. and Geffrin J. M., *J. Quant. Spectr. Radiat. Transfer* **146**, 100 (2014).
11. Shvartsburg A. B., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P. and Fortov V. E., *Sci. Rep.* **7**, 2180 (2017).
12. Shvartsburg A. B., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P. and Fortov V. E., *Phys. Usp.* **61**, 698 (2018).
13. Pecherkin V. Ya., Shvartsburg A. B., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Kostyuchenko T. S. and Panov V. A., *J. Commun. Technol. El+* **66**, S62 (2021).
14. Shvartsburg A. B., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Alybin K. V., Vol'p'yan O. D., Obod Yu. A., Pecherkin V. Ya., Privalov P. A. and Churikov D. V., *Opt Spectrosc+* **129**, 252 (2021).
15. Shvartsburg A., Pecherkin V., Jiménez S., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Vázquez L. and Fortov V. E., *J. Phys. D. Appl. Phys.* **51**, 475001 (2018).
16. Shvartsburg A., Pecherkin V., Jiménez S., Vasilyak L., Vázquez L. and Vetchinin S., *J. Phys. D. Appl. Phys.* **54**, 075004 (2021).
17. Luk'yanchuk B., Vasilyak L. M., Pecherkin V. Y., Vetchinin S. P., Fortov V. E., Wang Z. B., Paniagua-Domínguez R. and Fedyanin A. A., *Sci. Rep.* **11**, 23453 (2021).
18. Bukharin M. M., Pecherkin V. Ya., Ospanova A. K., Il'in V. B., Vasilyak L. M., Basharin A. A. and Luk'yanchuk B., *Sci. Rep.* **12**, 7997 (2022).
19. O'Brien S. and Pendry J. B., *J. Phys. Condens. Matter.* **14**, 4035 (2002).