

**Резонансное рассеяние электромагнитных волн ГГц-диапазона частот
линейной структурой из двух диэлектрических колец
на магнитной дипольной моде***В. Я. Печеркин, Л. М. Василяк*

Экспериментально исследовано резонансное рассеяние на основной магнитной моде линейной структурой из двух диэлектрических колец, ориентированных вдоль волнового вектора падающей волны и возбуждаемых продольно падающей линейно поляризованной электромагнитной волной ГГц диапазона частот. В спектре рассеяния отраженной волны происходит расщепление резонансной частоты и существенно увеличиваются амплитуды обоих пиков по сравнению с амплитудой для одиночного кольца в ближней зоне. В прошедшем сигнале расщепление резонансной частоты нет, амплитуда прошедшего сигнала в дальней зоне существенно увеличивается по сравнению с одиночным кольцом.

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

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-75-81

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 топологическая 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 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 по-

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

E-mail: vpecherkin@yandex.ru

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

Объединенный институт высоких температур РАН.

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

Статья поступила в редакцию 27 сентября 2022 г.

© Печеркин В. Я., Василяк Л. М., 2022

верхности 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 рассеянное вперед 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 ЭМ-волны.

Эксперимент

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

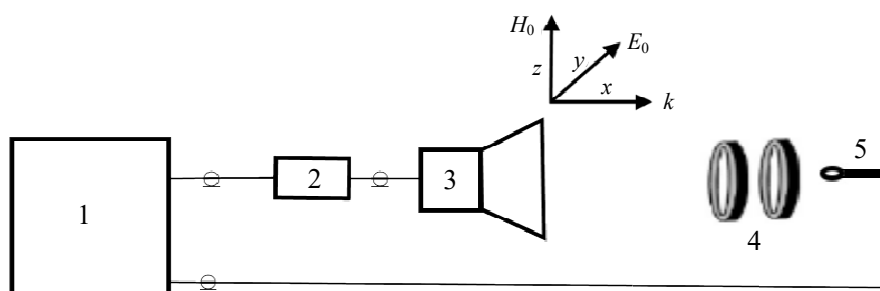


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – анализатор радиочастотных цепей; 2 – широкополосный усилитель; 3 – рупорная антенна; 4 – диэлектрические кольца; 5 – зонд магнитного поля

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 (диапазон частот от 300 кГц до 20 ГГц). Плоская линейно поляризованная

ЭМ-волна формировалась рупорной антенной (ETS-Lindgren's model 3115) с рабочим диапазоном частот 0,75–18 ГГц. Для увеличения соотношения сигнал-шум 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 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 и рассеянной волны. Измерения производились в безэховой камере. Перед каждым испытанием проводилось измерение уровня фонового излучения падающей ЭМ-волны в отсутствие исследуемых объектов. Затем этот фоновый сигнал вычитали из измеренного сигнала при наличии исследуемых элементов.

Объектами исследований являлись одно кольцо и линейные структуры из двух колец с внешним диаметром 16 мм и поперечным квадратным сечением $3 \times 3 \text{ мм}^2$, изготовленные из высокочастотной конденсаторной керамики с малым тангенсом угла диэлектрических потерь на основе титанатов кальция и стронция (TiO_2 , CaTiO_3 , SrTiO_3). Величины диэлектрической проницаемости и тангенс угла потерь были измерены на частоте 1 кГц с помощью измерителя емкости и индуктивности E7-8, и были равны 160 ± 5 и 3×10^{-4} , соответственно. Одиночное кольцо и структуры помещались на расстоянии 50 см от антенны таким образом, чтобы волновой вектор k плоской падающей ЭМ-волны был перпендикулярен плоскости колец, а векторы электрического поля E и магнитного поля H были параллельны (см. рис. 1).

Результаты и обсуждение

На рис. 2 и рис. 3 представлены измеренные резонансные спектры магнитного поля рассеянного прошедшего и отраженного излучения для одного кольца в ближней и дальней зонах. При измерениях отраженного и прошедшего излучения зонд магнитного поля располагался вблизи кольца с ближней и дальней стороны от антенны, соответственно, таким образом, чтобы плоскость чувствительного элемента зонда была перпендикулярна вектору магнитного поля падающей волны (рис. 1). В ближней зоне расстояние между краями зонда и кольца составляло $d = 2 \text{ мм}$, в дальней зоне $d = 32 \text{ мм}$.

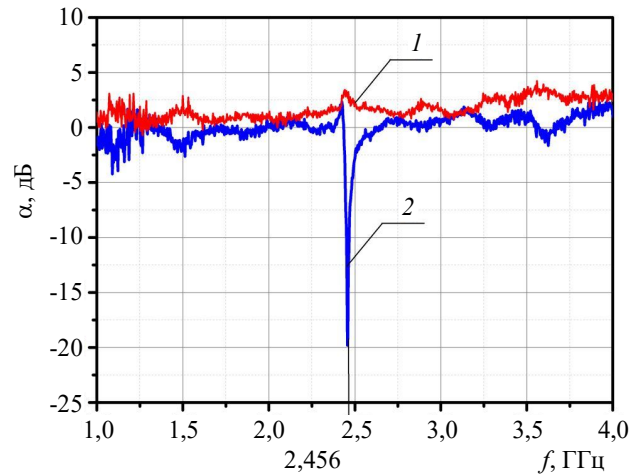


Рис. 2. Резонансные спектры магнитного поля отраженной (1) и прошедшей (2) ЭМ-волны для одного кольца в ближней зоне $d = 2 \text{ мм}$: 1 – перед кольцом с ближней стороны от антенны; 2 – за кольцом с дальней стороны от антенны

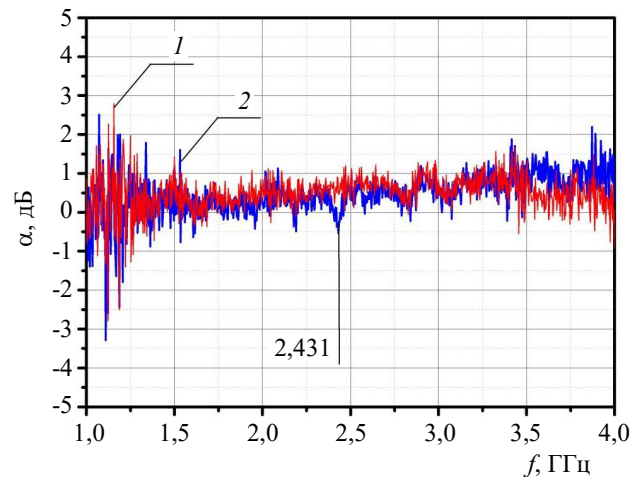


Рис. 3. Резонансные спектры магнитного поля отраженной (1) и прошедшей (2) ЭМ-волны для одного кольца в дальней зоне $d = 32 \text{ мм}$: 1 – перед кольцом с ближней стороны от антенны; 2 – за кольцом с дальней стороны от антенны

В ближней зоне для одного диэлектрического кольца дисперсионные кривые рассеяния отраженной и прошедшей ЭМ-волны различаются. Вблизи резонансной частоты отраженный сигнал имеет слабый положительный отклик (рис. 2, кривая 1), а спектр прошедшей волны (рис. 2, кривая 2) имеет отрицательный отклик. В дальней зоне (рис. 3) спектр отраженной волны практически не наблюдается, так как уровень отраженного сигнала сравним с уровнем шумов. На спектре прошедшей волны наблюдается слабый пик на частоте $f = 2,431 \text{ ГГц}$. Резонансная частота, рассчитанная для электромагнитного LC-контура по формуле $f = (LC)^{-0,5}$ для кольцевого

диэлектрического контура в предположении однородного распределения токов смещения в поперечном сечении кольца при возбуждении электромагнитной плоской волной, равна $f_{0r} = 2,407$ ГГц [19]. Измеренные частоты основного магнитного резонанса для прошедшей волны в ближней и дальней зоне отличаются значениями, что связано с влиянием емкости и индуктивности зонда на резонансный контур. Ранее нами было исследовано влияние положения зонда относительно кольца на сдвиг резонансной частоты, где было показано, что зонд, помещенный в дальней зоне, оказывает наименьшее влияние на смещение резонансной частоты [24]. Следовательно, если принять значение резонансной частоты, измеренной в дальней зоне $f_{0m} = 2,431$ ГГц (рис. 3, кривая 2), то оно будет близким к теоретически рассчитанному. Отличие теоретического значения резонансной частоты от экспериментального составляет менее 3 % и может быть связано с погрешностями измерения диэлектрической проницаемости и вычисления магнитной индуктивности кольца с квадратным сечением.

На рис. 4 и рис. 5 приведены измеренные спектры отраженной (кривая 1) и прошедшей (кривая 2) ЭМ-волны для структуры из двух колец. Кольца расположены вдоль оси x друг за другом. Плоскости колец перпендикулярны волновому вектору k (ось x). Расстояние между краями колец равно 20 мм. Расположение зонда такое же, как и при измерениях магнитного поля для одного кольца. На рис. 4 видно, что в ближней зоне от линейной цепочки расщепление резонансной частоты наблюдается только для отраженной волны (рис. 4, кривая 1). Для прошедшей волны (рис. 4, кривая 2) расщепление отсутствует, однако, вблизи резонансной частоты излучения единичного кольца $f_{0m} = 2,431$ ГГц наблюдается уширение магнитного поля. Для двух колец также существенно возрастают обе амплитуды отраженного сигнала в ближней зоне по сравнению с одним кольцом. В дальней зоне увеличиваются амплитуды рассеянного магнитного поля как прошедшей, так и отраженной ЭМ-волны. 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 отра-

женный 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. Расщепление основной резонансной частоты для структуры из двух колец для отраженной ЭМ-волны 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 [19, 23]. 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 возможностью протекания индуцированных токов в противоположных направлениях. На рис. 4 экспериментально продемонстрировано, что в ближней зоне происходит расщепление основного магнитного резонанса на две частоты $f_{0-} = 2,372$ ГГц и $f_{0+} = 2,472$ ГГц (рис. 4, кривая 1). В дальней зоне также должно наблюдаться расщепление основного резонанса. Однако, в наших экспериментах, мы не смогли этого зафиксировать в связи со слабым сигналом отраженной волны.

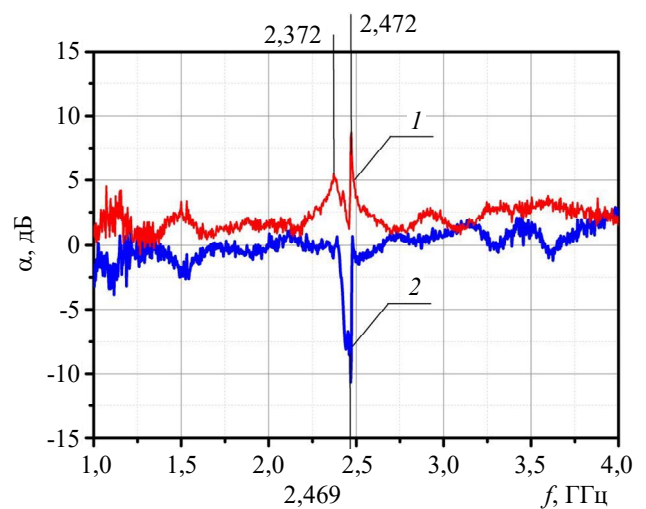


Рис. 4. Резонансные спектры магнитного поля отраженной (1) и прошедшей (2) ЭМ-волны для двух колец в ближней зоне $d = 2$ мм: 1 – перед первым кольцом с ближней стороны от антенны; 2 – за вторым кольцом с дальней стороны от антенны

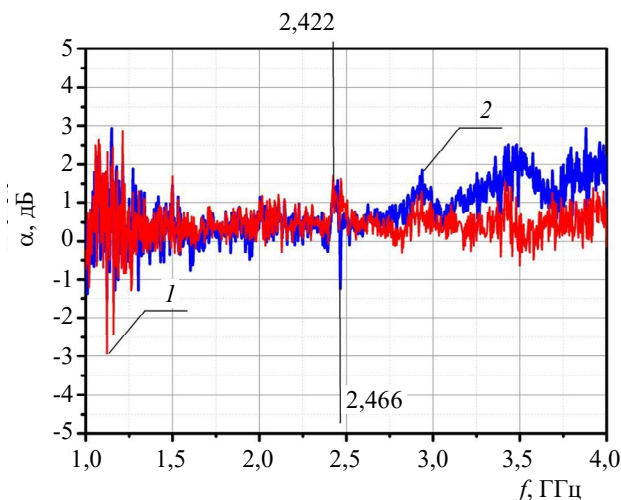


Рис. 5. Резонансные спектры магнитного поля отраженной (1) и прошедшей (2) ЭМ-волны для двух колец в дальней зоне $d = 32$ мм: 1 – перед первым кольцом с ближней стороны от антенны; 2 – за вторым кольцом с дальней стороны от антенны

Заключение

Экспериментально обнаружено, что для линейной субволновой структуры из двух диэлектрических колец в ближней волновой зоне в спектре рассеяния происходит расщепление резонансной частоты отраженной ЭМ-волны вследствие взаимной индуктивности колец. Амплитуда отраженного для двух колец сигнала существенно возрастает по сравнению с одним кольцом. В прошедшем сигнале расщепление резонансной частоты в рассеянном спектре не наблюдается, однако, наблюдается уширение пика резонансного излучения по сравнению со спектром излучения в ближней зоне для одного кольца. Диэлектрические кольцевые схемы с высокой диэлектрической проницаемостью могут служить элементами для проектирования субволновых метаматериалов, миниатюрных диэлектрических антенн, фильтров и линий задержек.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785 от 23 сентября 2020 г.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Veselago V. G. // Phys. Usp. 2011. Vol. 54. № 11. P. 1161.
2. Vendik I. B., Vendik O. G. // Tech. Phys. 2013. Vol. 58. P. 1.

3. Zhao Q., Du B., Kang L., Zhao H., Xie Q., Li B., Zhang X., Zhou J., Li L., Meng Y. // Appl. Phys. Lett. 2008. Vol. 92. № 5. P. 051106.
4. Wang Z. B., Luk'yanchuk B. S., Hong M. H., Lin Y., Chong T. C. // Phys. Rev. B. 2004. Vol. 70. P. 035418.
5. Bashevov M. V., Fedotov V. A., Zheludev N. I. // Opt. Express. 2005. Vol. 13. P. 8372.
6. Luk'yanchuk B. S., Ternovsky V. // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 73. P. 235432.
7. Verplanken M., Van-Bladel J. // IEEE Trans. Microwave Theory Technol. 1976. № 24. P. 108.
8. Kuznetsov A. I., Miroshnichenko A. E., Fu Y. H., Zhang J., Luk'yanchuk B. // Sci. Rep. 2012. Vol. 2. P. 57.
9. Evlyukhin A. B., Reinhardt C., Seidel A., Luk'yanchuk B., Chichkov B. N. // Phys. Rev. B. 2010. Vol. 82. P. 045404.
10. Garcia-Etxarri A., Gómez-Medina R., Froufe-Pérez L. S., López C., Chantada L., Scheffold F., Aizpurua J., Nieto-Vesperinas M., Sáenz J. J. // Opt. Express. 2011. Vol. 19. P. 4815.
11. Evlyukhin A. B., Novikov S. M., Zywiets U., Eriksen R. L., Reinhardt C., Bozhevolnyi S. I., Chichkov B. N. // Nano Lett. 2012. № 12. P. 3749.
12. 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.
13. Pozar D. M. Microwave Engineering. – USA. Hoboken. John Wiley & Sons, 2012.
14. Yang Y., Kravchenko I., Briggs D., Valentine J. // Nat. Commun. 2014. Vol. 5. P. 5753.
15. Bukharin M. M., Pecherkin V. Y., Ospanova A. K., Il'in V. B., Vasilyak L. M., Basharin A. A., Luk'yanchuk B. // Sci. Rep. 2022. Vol. 12. P. 7997.
16. Krasnok A. E., Maksymov I. S., Denisyuk A. I., Belov P. A., Miroshnichenko A. E., Simovskii C. R., Kivshar Yu. S. // Phys. Usp. 2013. Vol. 56. № 6. P. 539.
17. Paniagua-Domínguez R., Luk'yanchuk B., Kuznetsov A. Control of scattering by isolated dielectric nano-antennas. – UK. Woodhead Publishing, 2020.

18. Paniagua-Domínguez R., Feng Yu. Ye., Miroshnichenko A. E., Krivitsky L. A., Hsing F. Y., Valuckas V., Gonzaga L., Toh Y. T., Yew Seng K. A., Luk'yanchuk B., Kuznetsov A. I. // Nat. Comm. 2016. Vol. 7. P. 10362.
19. Shvartsburg A. B., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Fortov V. E. // Sci. Rep. 2017. Vol. 7. P. 2180.
20. 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.
21. Shvartsburg A. B., Pecherkin V. Ya., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Fortov V. E. // Phys. Usp. 2018. Vol. 61. № 7. P. 698.
22. Shvartsburg A., Pecherkin V., Jiménez S., Vasilyak L., Vázquez L., Vetchinin S. // J. Phys. D. Appl. Phys. 2021. Vol. 54. P. 075004.
23. Shvartsburg A. B., Vasilyak L. M., Vetchinin S. P., Alybin K. V., Volpyn O. D., Obod Yu. A., Pecherkin V. Ya., Privalov P. A., Churikov D. V. // Optics and Spectroscopy. 2021. Vol. 129. № 2. P. 252.
24. Печеркин В. Я., Шварцбург А. Б., Васильяк Л. М., Ветчинин С. П., Костюченко Т. С., Панов В. А. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 3. С. 191.

PACS: 75.78.-n, 77.84.-s

Resonant scattering of GHz electromagnetic waves by a linear structure of two dielectric rings on a magnetic dipole mode

V. Ya. Pecherkin and L. M. Vasilyak

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

Received September 27, 2022

Experimental studies of resonance scattering on the main magnetic mode in a dielectric linear structure consisting of two rings oriented along the wave vector of the incident wave and excited by longitudinally incident linearly polarized microwaves have been performed. In the scattering spectrum of the reflected wave, the resonant frequency splits and the amplitudes of both peaks increase significantly compared to the amplitude for a single ring in the near zone. There is no splitting of the resonant frequency in the transmitted signal, the amplitude of the transmitted signal in the far zone increases significantly compared to a single ring.

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

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-5-75-81

REFERENCES

1. V. G. Veselago, Phys. Usp. **54** (11), 1161 (2011).
2. I. B. endik and O. G. Vendik, Tech. Phys. **58**, 1 (2013).
3. Q. Zhao, B. Du, L. Kang, H. Zhao, Q. Xie, B. Li, X. Zhang, J. Zhou, L. Li, and Y. Meng, Appl. Phys. Lett. **92**, 051106 (2008).
4. Z. B. Wang, B. S. Luk'yanchuk, M. H. Hong, Y. Lin, and T. C. Chong, Phys. Rev. B. **70**, 035418 (2004).
5. M. V. Bashevoy, V. A. Fedotov, and N. I. Zheludev, Opt. Express **13**, 8372 (2005).
6. B. S. Luk'yanchuk and V. Ternovsky, Phys. Rev. B. **73**, 235432 (2006).
7. M. Verplanken and J. Van-Bladel, IEEE Trans. Microwave Theory Technol. **24**, 108 (1976).
8. A. I. Kuznetsov, A. E. Miroshnichenko, Y. H. Fu, J. Zhang, and B. Luk'yanchuk, Sci. Rep. **2**, 57 (2012).

9. A. B. Evlyukhin, C. Reinhardt, A. Seidel, B. Luk'yanchuk, and B. N. Chichkov, *Phys. Rev. B* **82**, 045404 (2010).
10. A. Garcia-Etxarri, R. Gómez-Medina, L. S. Froufe-Pérez, C. López, L. Chantada, F. Scheffold, J. Aizpurua, M. Nieto-Vesperinas, and J. J. Sáenz, *Opt. Express* **19**, 4815 (2011).
11. A. B. Evlyukhin, S. M. Novikov, U. Zywiets, R. L. Eriksen, C. Reinhardt, S. I. Bozhevolnyi, and B. N. Chichkov, *Nano Lett.* **12**, 3749 (2012).
12. B. Luk'yanchuk, L. M. Vasilyak, V. Y. Pecherkin, S. P. Vetchinin, V. E. Fortov, Z. B. Wang, R. Paniagua-Domínguez, and A. A. Fedyanin, *Sci. Rep.* **11**, 23453 (2021).
13. D. M. Pozar, *Microwave Engineering*. (John Wiley & Sons, USA, Hoboken, 2012).
14. Y. Yang, I. Kravchenko, D. Briggs, and J. Valentine, *Nat. Commun.* **5**, 5753 (2014).
15. M. M. Bukharin, V. Y. Pecherkin, A. K. Ospanova, V. B. Il'in, L. M. Vasilyak, A. A. Basharin, and B. Luk'yanchuk, *Sci. Rep.* **12**, 7997 (2022).
16. A. E. Krasnok, I. S. Maksymov, A. I. Denisyuk, P. A. Belov, A. E. Miroschnichenko, C. R. Simovskii, and Yu. S. Kivshar, *Phys. Usp.* **56** (6), 539 (2013).
17. R. Paniagua-Domínguez, B. Lukyanchuk, and A. Kuznetsov, *Control of scattering by isolated dielectric nanoantennas*, (Woodhead Publishing, UK, 2020).
18. R. Paniagua-Domínguez, Yu. Ye. Feng, A. E. Miroschnichenko, L. A. Krivitsky, F. Y. Hsing, V. Valuckas, L. Gonzaga, Y. T. Toh, K. A. Yew Seng, B. Luk'yanchuk, and A. I. Kuznetsov, *Nat. Comm.* **7**, 10362 (2016).
19. A. B. Shvartsburg, V. Ya. Pecherkin, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, and V. E. Fortov, *Sci. Rep.* **7**, 2180 (2017).
20. A. Shvartsburg, V. Pecherkin, S. Jiménez, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, L. Vázquez, and V. E. Fortov, *J. Phys. D. Appl. Phys.* **51**, 475001 (2018).
21. A. B. Shvartsburg, V. Ya. Pecherkin, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, and V. E. Fortov, *Phys. Usp.* **61** (7), 698 (2018).
22. A. Shvartsburg, V. Pecherkin, S. Jiménez, L. Vasilyak, L. Vázquez, and S. Vetchinin, *J. Phys. D. Appl. Phys.* **54**, 075004 (2021).
23. A. B. Shvartsburg, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, K. V. Alybin, O. D. Volpyan, Yu. A. Obod, V. Ya. Pecherkin, P. A. Privalov, and D. V. Churikov, *Optics and Spectroscopy* **129** (2), 252 (2021).
24. V. Ya. Pecherkin, A. B. Shvartsburg, L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, T. S. Kostyuchenko, and V. A. Panov, *Usp. Prikl. Fiz.* **6** (5), 191 (2018).