

УДК 537.868.4
EDN: ZOJEUG

PACS: 75.78.-n, 77.84.-s



Резонансные свойства диэлектрического цилиндра в поле плоской электромагнитной волны в СВЧ-диапазоне

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

Экспериментально и методом компьютерного моделирования исследованы спектры резонансного рассеяния основных низших мод диэлектрического цилиндра, возбуждаемого линейно поляризованной электромагнитной волной ГГц диапазона частот. В полученных спектрах в ГГц диапазоне частот наблюдаются резонансы магнитного и электрического диполя и квадруполья. Вихревые токи смещения в диэлектрике приводят к возникновению магнитного диполя и возникновению отрицательной магнитной восприимчивости в области основного резонанса. Результаты эксперимента и численного моделирования хорошо совпадают.

Ключевые слова: диэлектрический цилиндр, метаматериалы, диэлектрический магнитный диполь, отрицательный магнитный отклик, плоская электромагнитная волна, резонанс.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-5-9

Введение

Диэлектрические резонансные элементы с низкими потерями находят применение в фильтрах, линиях передач, антеннах и для создания метаматериалов, обладающих отрицательными магнитной и (или) диэлектрической проницаемостями в области резонансных частот. Использование метаэлементов с высоким значением диэлектрической проницаемости дает возможность создавать субволновые метаэлементы, размеры которых существенно меньше длины волны иницирующего излучения в СВЧ-области, а также продвинулись в

область более высоких частот, включая ТГц и ИК-диапазоны, и даже вплоть до видимых частот [1–3], несмотря на значительное падение величины диэлектрической проницаемости в этих диапазонах. Электромагнитные параметры отдельных диэлектрических метаэлементов являются основой для управления волновыми процессами при создании метаповерхностей, наноантенн, метаматериалов для видимой и ИК областей спектра [1–10]. В этих областях резонансные элементы имеют характерный размер порядка 100 нм, поэтому проводить экспериментальные измерения полей достаточно сложно. В этих условиях зачастую основной упор делается на компьютерное моделирование, которое не всегда корректно, поскольку неизвестны точные значения диэлектрической проницаемости и потерь на высоких частотах. Если относительная диэлектрическая проницаемость метаэлементов велика (100–150), то в СВЧ-диапазоне характерные размеры исследуемых элементов лежат в сантиметровой области. В этом случае можно создать такие экспериментальные условия, при которых размер исследуемых элементов будет меньше длины волны пада-

Печеркин Владимир Яковлевич, с.н.с., к.ф.-м.н.
Василяк Леонид Михайлович, гл.н.с., д.ф.-м.н.
E-mail: vasilyak@ihed.ras.ru
Бухарин Михаил Михайлович, стажер-исследователь.
Доброклонская Марина Сергеевна, аспирант.
Объединенный институт высоких температур РАН.
Россия, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2.

Статья поступила в редакцию 13.01.2023
После доработки 2.02.2023
Принята к публикации 7.02.2023

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

ющего СВЧ-излучения, размеры диагностических зондов ЭМ-полей будут меньше размеров исследуемых элементов.

При падении электромагнитной волны на диэлектрические элементы происходит возбуждение резонансных мод различной природы и различных порядков, которые зависят от геометрии диэлектрического элемента, типа падающей волны, ее поляризации и ориентации в пространстве. Ранее нами были исследованы резонансные свойства тонких диэлектрических колец [11–14], эллипса [15], диэлектрического прямоугольника [16], сферы [17] и эллипсоида вращения (сфероида) [18]. Было показано, что наибольший отклик наблюдается на основной частоте магнитной моды. Магнитные поля возбуждаются резонансными вихревыми токами смещения, которые, в отличие от токов проводимости, пропорциональны не электрическому полю, а скорости его изменения, и локализованы в диэлектрическом элементе лишь частично. Основная магнитная мода характеризуется отрицательной величиной магнитного отклика при резонансе и возбуждается током смещения плоской волны при скользящем падении волны на контур. Для применений чаще всего используют низшие частоты, которые обычно соответствуют возбуждению магнитного и электрического диполя и магнитного и электрического квадруполья. Поскольку точные значения диэлектрической проницаемости и потерь не известны, и зачастую их сложно измерить, то компьютерное моделирование не будет точно соответствовать реальным значениям частотного спектра, поэтому необходимы экспериментальные исследования. Для субволновых диэлектрических цилиндров можно получить эффекты невидимости [1] и существования суперрезонансных состояний увеличения добротности [1]. Интерес к цилиндрическим элементам связан с относительно простотой их изготовления и применения в различных устройствах.

В настоящей работе экспериментально и компьютерным моделированием исследованы низшие резонансные частоты магнитного и электрического диполей при возбуждении диэлектрического цилиндра в поле линейно-поляризованной электромагнитной волны СВЧ-диапазона.

Эксперимент

Схема измерения резонансных магнитных полей около диэлектрического цилиндра в ближней волновой зоне приведена на рис. 1. Плоская линейно поляризованная волна формировалась рупорной антенной (ETS-Lindgren's model 3115) с рабочим диапазоном частот 0,75–18 ГГц (3). На антенну подавался синусоидальный сигнал в заданном диапазоне частот от анализатора радиочастотных цепей Agilent E5071C ENA Network Analyzer (1) с рабочим диапазоном частот от 300 кГц до 20 ГГц. Этот же анализатор регистрировал спектры сигналов от датчика магнитных полей. Для увеличения уровня мощности сигнала, подаваемого на рупорную антенну, применялся дополнительный усилитель (2) с коэффициентом усиления 20 дБ. Магнитные поля измерялись с помощью зонда магнитного поля Beehive Electronics 100B EMC Probe с внутренним диаметром чувствительно элемента равным 3,7 мм (4). Перед каждым испытанием проводилось измерение уровня фонового излучения без исследуемого цилиндра при наличии падающей электромагнитной волны. Вектор магнитного поля H плоской падающей волны был параллелен оси диэлектрического цилиндра диаметром 7 мм и высотой 8 мм с диэлектрической проницаемостью равной 150, а волновой вектор k был перпендикулярен оси цилиндра. Такие размеры цилиндра были выбраны для того, чтобы резонансные частоты магнитного и электрического диполей были достаточно близки. Цилиндр помещен на расстоянии 30 см от антенны. Зонд магнитного поля помещался на полувысоте цилиндра на расстоянии 2 мм от его боковой поверхности вдоль волнового вектора с противоположной от антенны стороны. Плоскость чувствительно элемента датчика магнитного поля была перпендикулярна вектору магнитного поля падающей волны и параллельна волновому вектору и вектору электрического поля. Диэлектрический цилиндр был изготовлен из высокочастотной керамики на основе титаната (TiO_2 , $CaTiO_3$, $SrTiO_3$) с диэлектрической проницаемостью в исследуемом диапазоне частот 145–160 и с тангенсом потерь 10^{-4} – 10^{-3} . Для образца керамики, использованного в экспериментах, мы

измерили диэлектрическую проницаемость и тангенс потерь на частоте 1 кГц, которые были равны 155 ± 10 и $(3 \pm 0,2) \cdot 10^{-4}$, соответственно. Тангенс потерь практически не изменяется до частоты 1 ГГц и увеличивается только на частотах выше 10 ГГц.

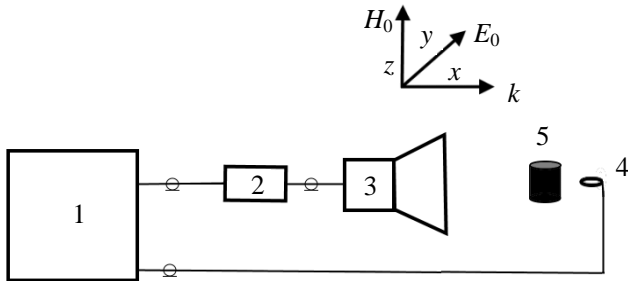


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – спектроанализатор; 2 – усилитель; 3 – рупорная антенна; 4 – датчик магнитного поля; 5 – диэлектрический цилиндр

Результаты и обсуждение

Задача возбуждения диэлектрического цилиндра конечной длины электромагнитным полем плоской линейно-поляризованной волны достаточно сложна. В диэлектрическом цилиндре конечной длины ее можно решить численно, используя два механизма формирования электромагнитных мод. Это моды M_i , связанные с круговым профилем неограниченно длинного цилиндра, и моды Фабри-Перо, возникающие между плоскими торцами цилиндра конечной длины, когда на длине цилиндра укладывается целое число полуволн. Нами были проведены экспериментальные измерения и компьютерное моделирование спектров рассеяния падающей плоской линейно-поляризованной электромагнитной волны на диэлектрический цилиндр. Мощность сигнала, излучаемая антенной, была порядка 30 мВт. На рис. 2 (кривая 1) приведен спектр рассеяния магнитных полей.

Первый глубокий минимум и максимум в области частот 3,033 ГГц (рис. 2) можно трактовать, как основной магнитный резонанс поперечной магнитной моды или магнитного диполя, связанный с круговым током смещения. Этот резонанс по форме и амплитуде (15 дБ) аналогичен основному магнитному резонансу в диэлектрическом кольце [14]. Второй резонанс в области частот 3,87 ГГц (рис. 2) относится к низшему электрическому

резонансу поперечной электрической моды и его можно трактовать как электрический диполь. Этот резонанс приводит к возникновению магнитного момента и появлению отрицательной магнитной восприимчивости. Тогда на основной магнитной моде в одиночном диэлектрическом цилиндре магнитная восприимчивость становится отрицательной, то есть он является метаэлементом. В нашем случае отрицательная магнитная восприимчивость проявляется в одиночном элементе на резонансной частоте, в то время как в работе [19] отрицательный магнитный отклик появляется только в периодической квадратной решетке из диэлектрических цилиндров с диэлектрической проницаемостью равной 200 в спектральной области, соответствующей резонансу M_i .

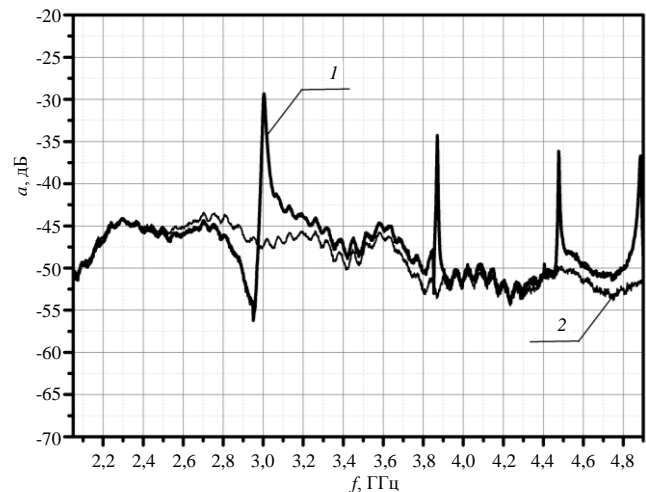


Рис. 2. Измеренные спектры. 1 – спектр рассеяния магнитных полей за цилиндром при падении плоской ЭМ волны; 2 – спектр фона при отсутствии цилиндра

Численные расчеты были проведены с помощью программы CST Microwave Studio во временной области с открытыми граничными условиями. В расчетах приняты значения диэлектрической проницаемости и тангенса потерь 150 и 3×10^{-4} , соответственно. Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 3 (кривая 1).

На рис. 3 видно, что рассчитанные значения резонансных частот, равные для основного магнитного 3,054 ГГц и электрического 3,907 ГГц резонансов, согласуются с хорошей точностью с измеренными значениями 3,033 и 3,899 ГГц, соответственно. Следует отметить, что без вычитания фона форма эксперимен-

тальной кривой 1 на рис. 2 несколько отличается от формы рассчитанной кривой 1 на рис. 3. После вычитания из спектра рассеяния цилиндра (рис. 2, кривая 1) спектра фонового излучения (рис. 2, кривая 1) расчетный и экспериментальный спектры хорошо совпадают (рис. 3, кривые 1 и 2).

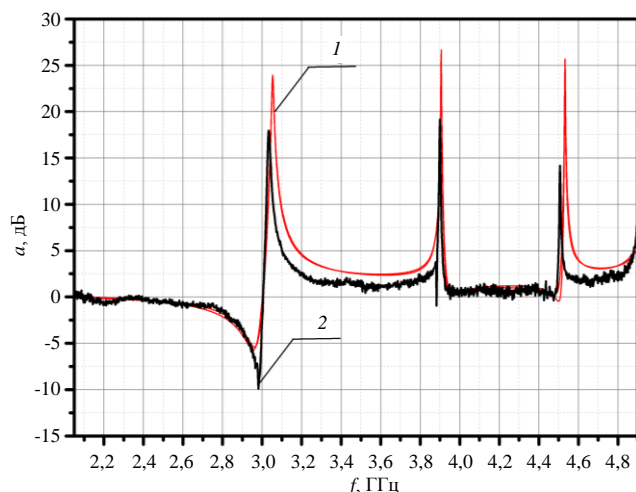


Рис. 3. Спектр рассеяния магнитных полей. 1 – результаты моделирования, 2 – экспериментальные результаты, полученные при вычитании спектра фонового сигнала при отсутствии цилиндра

Заключение

Экспериментально и методом компьютерного моделирования исследованы спектры резонансного рассеяния на низших резонансных модах диэлектрического цилиндра диаметром 7 мм и высотой 8 мм, возбуждаемого плоской линейно поляризованной ЭМ-волной ГГц диапазона частот. В полученных спектрах рассеяния наблюдаются интенсивные резонансы магнитного и электрического диполей. Получено хорошее совпадение результатов эксперимента и численного моделирования. Аналогично диэлектрическому кольцу возникновение сильного резонанса на основной магнитной моде может приводить к отрицательной магнитной восприимчивости диэлектрического цилиндра с высоким значением диэлектрической проницаемости в СВЧ-области.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-01129-23-00).

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыбин М. В., Лимонов М. Ф. / Успехи физических 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 физических 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 физических 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., Vasilyak 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 физических 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. V. 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.

Resonant properties of a dielectric cylinder in the field of a plane electromagnetic wave in the microwave range

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

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

Received 13.01.2023; revised 2.02.2023; accepted 7.02.2023

The resonance scattering spectra of the main lower modes of a dielectric cylinder excited by a linearly polarized electromagnetic wave of the GHz frequency range have been studied experimentally and by computer modeling. Resonances of magnetic and electric dipole and quadrupole are observed in the obtained spectra in the GHz frequency range. The vortex displacement current in the dielectric leads to the appearance of a magnetic dipole and the appearance of negative magnetic susceptibility in the region of the main resonance. The results of the experiment and numerical simulation coincide well.

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

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-1-5-9

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. Tittl 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).