УДК 537.868.4

DOI: 10.21779/2542-0321-2019-34-4-13–18

Л.М. Василяк, С.П. Ветчинин, В.Я. Печеркин, А.Б. Шварцбург

Резонансные свойства диэлектрических шара и цилиндра в поле плоской электромагнитной волны в СВЧ диапазоне

Объединенный институт высоких температур РАН; Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2; vpecherkin@yandex.ru

Экспериментально исследованы резонансные эффекты в электромагнитных спектрах слабопоглощающих частиц в виде шара и цилиндра с высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon > 100$). В измеренных спектрах в ГГц диапазоне частот помимо электрических резонансов наблюдаются интенсивные магнитные резонансы. Вихревые токи смещения в диэлектрике приводят к возникновению магнитных диполей и возникновению отрицательной магнитной восприимчивости в области резонанса у шара и цилиндра. Диэлектрические элементы со свойствами магнитных диполей могут быть использованы при создании новых метаматериалов.

Ключевые слова: *метаматериал, диэлектрический шар, диэлектрический цилиндр, резонансная частота, магнитный диполь.*

Введение

Метаматериалы (ММ) – это класс искусственных композитных материалов с ярко выраженными резонансными свойствами, обладающих отрицательными магнитной ($\mu < 0$) и (или) диэлектрической ($\epsilon < 0$) проницаемостями, которые появились на рубеже XX–XXI вв. [1]. Метаматериалы создаются из отдельных элементов или групп элементов, расположенных определенным образом. Необычные свойства ММ определяются локальными резонансами в отдельных структурных элементах с размерами существенно меньшими длины падающей волны, но при этом обладающих резонансными свойствами на этой длине волны [2–4]. Волновые свойства ММ могут быть описаны традиционным способом с помощью материальных параметров ϵ и μ , которые связаны с электрическими и магнитными откликами в определенной полосе частот. Правильно подобранные и организованные в пространстве структурные элементы позволяют создавать ММ с желаемыми значениями ϵ и μ , включая отрицательные. Использование диэлектрических материалов с высоким значением диэлектрической проницаемости дает возможность создавать субволновые метаэлементы, размеры которых существенно меньше длины волны падающего излучения в СВЧ области, и продвинуться в область более высоких частот, включая ТГц и ИК диапазоны, и даже вплоть до видимых частот [5–6], несмотря на значительное падение величины диэлектрической проницаемости в этих диапазонах.

В последнее время наибольшие успехи достигнуты в видимой области спектра при использовании наноразмерных структур на основе кремния, германия и их соединений. В таких ММ наблюдается целый ряд уникальных волновых свойств, например, оптический магнетизм [7], искусственная дисперсия и безотражательное туннелирование [8]; показана возможность сделать объемный объект невидимым в определенном спектральном диапазоне [9]. Диэлектрические ММ находят применение в антенной

технике, в том числе при разработке наноантенн [10], при создании магнитных зеркал и сверхчувствительных сенсоров [11]. Изменение параметров диэлектрических ММ позволяет управлять волновыми свойствами электромагнитного поля и использовать их в системах связи, управлении передачей информации [12].

Электромагнитные характеристики отдельных диэлектрических элементов СВЧ диапазона являются основой для управления волновыми процессами при создании метаземента для видимой и ИК областей спектра [13]. В этих областях резонансные элементы имеют характерный размер порядка 100 нм и экспериментальным измерениям поддаются только некоторые средние электродинамические параметры. Физическую картину явлений приходится дополнять компьютерным моделированием. Для детального исследования физических явлений на уровне отдельных элементов в данной работе проведены экспериментальные исследования в СВЧ диапазоне, где характерные размеры исследуемых элементов лежат в сантиметровой области. В этом случае можно создать экспериментальные условия, при которых размер исследуемых элементов меньше длины волны, и при этом размеры диагностических зондов магнитного и электрического полей будут меньше размеров исследуемых элементов.

При падении электромагнитной волны на диэлектрические элементы происходит возбуждение резонансных мод различных порядков. Типы возбуждаемых мод зависят от формы резонатора, типа падающей волны, ее поляризации и ориентации в пространстве. Ранее нами были исследованы резонансные свойства тонких диэлектрических колец в гигагерцовом диапазоне частот [14–15]. 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.

В данной работе экспериментально исследовано резонансное возбуждение шара с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 160$ и цилиндра с $\varepsilon = 160$ в поле падающей линейно-поляризованной электромагнитной волны СВЧ диапазона.

Эксперимент

Схема измерения резонансного электромагнитного отклика от диэлектрических элементов в ближней волновой зоне приведена в [16]. Генерация сигналов в заданном диапазоне частот и регистрация электрического сигнала магнитного зонда от исследуемого объекта осуществлялись 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 50 МГц – 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 3,7 мм. Плоскость кольца магнитного зонда была перпендикулярна вектору магнитного поля падающей волны и параллельна волновому вектору и вектору электрического поля.

Перед каждым испытанием проводилось измерение уровня шумов измерительного тракта вместе с соединительными кабелями без зонда и уровня фонового излучения с зондом при наличии падающего излучения в отсутствие тестовых объектов.

Объектами исследования являлись диэлектрические шар диаметром 11 мм и цилиндр диаметром 7 мм и высотой 8 мм. При измерениях резонансного отклика цилиндра вектор магнитного поля плоской падающей волны был перпендикулярен торцу цилиндра, а волновой вектор k перпендикулярен оси цилиндра. Зонд магнитного поля помещался на полувысоте цилиндра на расстоянии 3 мм от его боковой поверхности, а в случае шара – на расстоянии радиуса шара на его высоте, на расстоянии 3 мм от его поверхности с противоположной от антенны стороны.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Точное решение задачи рассеяния плоской электромагнитной волны на диэлектрическом шаре было получено Густавом Ми в 1908 году [17]. Решение уравнений Максвелла представлялось в виде разложения по векторным сферическим волновым функциям, что позволило вычислить поле внутри и вне шара, а также сечение рассеяния и поглощения. В случае шара малого радиуса, когда параметр дифракции $2\pi r\epsilon^{0.5}/\lambda \ll 1$, задача может быть решена аналитически. Здесь r – радиус шара, λ – длина падающей волны. На рис. 1 приведен спектр колебаний электромагнитных полей при падении плоской волны на диэлектрический шар. Этот спектр включает магнитные и электрические резонансы Ми различных порядков.

Наименьшая резонансная соответствует основной магнитной моде [17]. Магнитные моды Ми внутри шара возникают из-за «закручивания» токов смещения, которые создают вторичные магнитные поля в поперечном направлении [5], что усиливает магнитное поле внутри частицы. В нашем случае даже для основного резонанса, когда резонансная частота $f = 2.26$ ГГц (рис. 1), параметр дифракции равен примерно 3 и возможно только численное решение задачи Ми. Как видно на рис. 1, спектры резонансных мод представляют резонансы, возбуждаемые магнитным или электрическим полем.

Отметим, что отношение первых двух резонансных частот первой пары равно отношению резонансных частот во второй паре. Амплитуды этих четырех резонансов достаточно велики и примерно одинаковы, несмотря на значительное расхождение по частотам.

Этот вывод, а также значения резонансных частот следуют из упрощенной модели исследования собственных резонансов в диэлектрическом шаре [18]. Электромагнитное поле шара в дальней зоне тождественно полям, создаваемым магнитным и электрическим диполями с моментами P_m и P_e . Зная параметры P_m и P_e в зависимости от диэлектрической проницаемости ϵ , можно оценить резонансные частоты для различных типов колебаний по формуле [18]

$$f = 150P / \pi r \epsilon^{0.5}.$$

Для основной моды $P_m = 3.1$, $P_e = 4.44$. Измеренные основные резонансные частоты равны $f_m = 2.26$ ГГц, $f_e = 3.25$ ГГц, что менее чем на 5 % отличается от вычисленных по вышеприведенной формуле. Эта формула также подтверждает постоянство отношения частот электрической и магнитной моды для различных порядков колебаний.

Рис. 1. Спектр колебаний электромагнитных полей при падении плоской волны на диэлектрический шар (линия 1); линия 2 – без шара

Задача возбуждения диэлектрического цилиндра конечной длины электромагнитным полем плоской волны решена только численно [17]. В конечном диэлектрическом цилиндре можно выделить два механизма формирования электромагнитных мод. Это моды Ми, 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. На рис. 2 приведен спектр колебаний электромагнитных полей при падении плоской волны на диэлектрический цилиндр. Если исходить из спектра колебаний, то первый глубокий минимум на рис. 2 в области частот 2.9 ГГц можно трактовать как основной магнитный резонанс, связанный с круговым током смещения. Основной магнитный резонанс по форме и амплитуде (≈ 15 дБ) аналогичен основному магнитному резонансу в диэлектрическом кольце [14], а также в вышерассмотренном диэлектрическом шаре. Однако в отличие от шара отношение резонансных частот двух смежных типов колебаний с индексами n и $n + 1$ являются постоянными и не зависят от ε в случае, когда диаметр цилиндра примерно равен его высоте. 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 $\mu < 0$, т. е. он является метаматериалом.

В нашем случае отрицательная магнитная восприимчивость появляется в одиночном элементе на основной магнитной моде, в то время как в работе О'Брайена и Джо Пендри 2002 года [19] отклик с $\mu < 0$ появляется в гигагерцовом диапазоне только в периодической квадратной решетке из диэлектрических цилиндров с $\varepsilon = 200$ в спектре частот, соответствующей резонансу Ми [19].

Рис. 2. Спектр колебаний электромагнитных полей при падении плоской волны на диэлектрический цилиндр (линия 1); линия 2 – без цилиндра

Заключение

Экспериментально измерены низшие резонансные моды электромагнитных колебаний диэлектрического шара диаметром 11 мм и цилиндра диаметром 7 мм и высотой 8 мм в СВЧ диапазоне частот. Получено хорошее совпадение резонансных частот основной моды с расчетами по теоретическим моделям.

В случае диэлектрического шара отмечена эквидистантность резонансных частот магнитных и электрических колебаний для различных мод.

Аналогично диэлектрическому кольцу [15] возникновение сильного резонанса на основной магнитной моде может приводить к отрицательной магнитной восприимчивости исследованных диэлектрических элементов с высокими значениями диэлектрической проницаемости в виде шара и цилиндра в СВЧ области.

Литература

1. Веселаго В.Г. // УФН. – 2011. – Т. 181, № 11. – С. 1201.
2. Engheta N., Ziolkowski R.W. (Eds) Electromagnetic Metamaterials: Physics and Engineering Explorations. – New York: Wiley&IEEE Press, 2006.
3. Theory and Phenomena of Metamaterials. Capolino F. (Ed.). – Boca Raton, FL: CRC Press&Taylor and Francis, 2009.
4. Рыбин М.В., Лимонов М.Ф. // УФН. – 2019. – Т. 189, № 8. – С. 881.
5. Kuznetsov A.I. et al. // Sci. Rep. – 2012. – V. 2. – P. 492.
6. Jahani S., Jacob Z. // Nature Nanotechnology. – 2016. – Vol. 11. – P. 23.
7. Linden S. et al. // Science. – 2004. – V. 306. – P. 1351.
8. Shvartsburg A.B., Obod Yu.A., O.D. // Progress in Optics. – 2015. – V. 60. – P. 489–503.
9. Rybin M.V. et al. // Sci. Rep. – 2015. – V. 5 – P. 8774.
10. Краснок А.Е., Максимов И.С., Денисюк А.И., Белов П.А., Мирошниченко А.Е., Симовский К.Р., Кившарь Ю.С. Оптические наноантенны // УФН. – 2013. – Т. 183. – С. 561–589.

11. Tittl A. et al. // Science. – 2018. – V. 360. – P. 1105.
12. Ремнев М.А., Климов В.В. Метаповерхности: новый взгляд на уравнения Максвелла и новые методы управления светом // УФН. – 2018. – Т. 188. – С. 169–205.
13. Vallion P., Geffrin J.M. Recent advances in microwave analogy to light scattering experiments // J. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. – 2014. – V. 146. – P. 100–105.
14. Shvartsburg A.B., Pecherkin V.Ya., Vasilyak L.M., Vetchinin S.P. and Fortov V.E. // Sci. Rep. – 2017. – V. 7. – P. 2180.
15. Шварцбург А.Б., Печеркин В.Я., Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Фортвов В.Е. // УФН. – 2018. – Т. 188, № 7. – С. 780.
16. 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.
17. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами. – М.: Мир, 1986. – 664 с.
18. Диэлектрические резонаторы / под ред. М.Е. Ильченко. – М.: Радио и связь, 1989. – С. 328.
19. O'Brien S., Pendry J.B. // J. Phys. Condens. Matter. – 2002. – V. 14. – P. 4035.

Поступила в редакцию 11 сентября 2019 г.

UDC 537.868.4

DOI: 10.21779/2542-0321-2019-34-4-13–18

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

L.M. Vasilyak, S.P. Vetchinin, V.Ya. Pecherkin, A.B. Shvartsburg

Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences; Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya st., 13, b.2; vpecherkin@yandex.ru

Resonance effects in the electromagnetic spectra of weakly absorbing particles in the form of a ball and a cylinder with a high dielectric permittivity ($\epsilon > 100$) are experimentally investigated. In the measured spectra in the GHz frequency range, in addition to electric resonances, intense magnetic resonances are observed. Eddy displacement currents in the dielectric lead to the emergence of magnetic dipoles and the emergence of negative magnetic susceptibility in the resonance region of the ball and cylinder. Dielectric elements with the properties of magnetic dipoles can be used in the creation of new metamaterials.

Keywords: *metamaterial, dielectric ball, dielectric cylinder, resonant frequency, magnetic dipole.*

Received 11 September, 2019