ФИЗИКА

УДК 537.868.4

DOI: 10.21779/2542-0321-2019-34-4-7–12

**Л.М. Василяк^{1, 2}, С.П. Ветчинин¹, В.Я. Печеркин¹, А.Б. Шварцбург¹, Ю.М. Куликов¹,
В.А. Панов¹, П.А. Привалов³**

Резонансное взаимодействие диэлектрических кольцевых магнитных диполей ГГц диапазона

¹ Объединенный институт высоких температур РАН; Россия, 125412, г. Москва, ул. Ижорская, 13, стр. 2; vpcherkin@yandex.ru;

² Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет); Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9;

³ Российский технологический университет; Россия, 119571, г. Москва, пр. Вернадского, 78.

Экспериментально исследовано магнитное взаимодействие двух субволновых кольцевых диэлектрических контуров в поле плоской электромагнитной волны ГГц диапазона. Под действием электромагнитной индукции в поле волны и взаимной индукции в контурах генерируются азимутальные токи смещения, образующие магнитные диполи. Измерены спектры системы связанных диполей, найдены резонансные частоты и спектральные полосы инверсии магнитной индукции, соответствующие отрицательным значениям магнитной проницаемости. Показана зависимость резонансов от взаимного расположения контуров и расстояния между ними. Представлена пространственная структура магнитного поля диэлектрических диполей, лежащих в одной плоскости, при их резонансном взаимодействии.

Ключевые слова: *метаматериал, диэлектрические кольца, резонансная частота, магнитный диполь.*

Введение

В последние 10–15 лет в радиоэлектронике метаматериалов растёт интерес к задачам управления сигналами оптического и ГГц диапазонов с помощью двумерных полнотью диэлектрических структур. Изменения магнитного поля в таких структурах возбуждают токи смещения, которые, в отличие от токов проводимости, пропорциональны не электрическому полю, а скорости его изменения и диэлектрической проницаемости среды. Оптимальное сочетание электрических и магнитных параметров в таких структурах с субволновыми размерами отдельных элементов открывает возможности создания принципиально новых элементов радиоэлектроники – резонансных диэлектрических магнитных диполей. В этих системах получила развитие тенденция к замене ключевых металлических деталей на их аналоги, состоящие из смешанных (металл–диэлектрик [1]) и чисто диэлектрических [2] элементов. Обобщение эффектов электромагнитной индукции, традиционно связанных с токами проводимости в металлах, на токи смещения в диэлектриках указывает пути уменьшения потерь и формирования резонансных магнитных диполей в виде тонких, плоских, полностью диэлектрических круговых контуров, обтекаемых токами смещения [3]. Такие диполи характери-

зуются знакопеременным магнитным откликом: в окрестности резонанса возникает инверсия магнитной индукции, при которой индукция направлена против возбуждающего поля. Спектры электромагнитных колебаний таких уединённых субволновых круговых и эллиптических диполей в ГГц диапазоне рассмотрены в работах [4–7].

Настоящая работа посвящена эффекту резонансного электромагнитного взаимодействия пары одинаковых кольцевых диэлектрических контуров в поле плоской электромагнитной волны ГГц диапазона.

Эксперимент

Схема измерения резонансного электромагнитного отклика от диэлектрических элементов в ближней волновой зоне приведена в [6]. 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 измерительного 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 два диэлектрических кольца с внешним диаметром 38 мм, внутренним диаметром 28 мм и высотой 5 мм с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 200$. Измерения резонансного отклика проводились для двух случаев расположения колец относительно плоской падающей электромагнитной волны, характеризуемой тройкой векторов $\vec{k}$, $\vec{E}$ и $\vec{H}$ ($\vec{k}$ – волновой вектор, $\vec{E}$ и $\vec{H}$ – электрическая и магнитная компоненты волнового поля).

Расположение 1: плоскости колец лежали также в плоскости $(\vec{k}, \vec{E})$, а кольца располагались соосно друг над другом вдоль вектора магнитного поля H . Зонд магнитного поля помещался на расстоянии 3 мм от его внешней поверхности с противоположной от антенны стороны. Изменение расстояния между кольцами осуществлялось перемещением верхнего кольца вдоль вектора H .

Расположение 2: кольца располагались вдоль волнового вектора k , друг за другом в плоскости $(\vec{k}, \vec{E})$, а вектор магнитного поля H падающей волны был перпендикулярен плоскости колец. Зонд магнитного поля помещался вблизи дальнего от антенны кольца на расстоянии 3 мм от его внешней поверхности с противоположной от антенны стороны. Изменение расстояния между кольцами осуществлялось перемещением ближнего к антенне кольца вдоль волнового вектора k .

Экспериментальные результаты и обсуждение

Токи смещения, наведённые падающей электромагнитной волной в диэлектрических контурах, формируют магнитные диполи; электромагнитная связь таких контуров, каждый из которых расположен в ближней зоне другого, в основном определяется их взаимной индукцией. Спектры связанных колебаний пары диполей в геометрии для случая 1 для различных расстояний между диполями приведены на рис 1. Полученный спектр на рис. 1 показывает расщепление собственной частоты уединённого диполя ω_1 при взаимодействии с соседним диполем, обусловленное взаимной индуктивностью диполей M :

$$\omega_{\pm} = \frac{\omega_1}{\sqrt{1 \pm \frac{M}{M_1}}} \quad (1)$$

Здесь M_1 – самоиндукция тонкого кольцевого диполя с радиусами R и r ($R \gg r$) [8]:

$$M_1 = 4\pi R \left[\ln\left(\frac{8R}{r}\right) - \frac{7}{4} \right] \quad (2)$$

Рис. 1. Спектры колебаний электрических полей при соосном расположении пары магнитных резонансных кольцевых диполей при разных расстояниях между диполями: 1 – 0 мм, 2 – 4 мм, 3 – 20 мм, 4 – 50 мм, 5 – спектр уединённого диполя (одного кольца)

Зная параметры диполей R и r в (2) и измеряя резонансные частоты $\omega_{\pm}$, можно рассчитать из (1) коэффициент взаимной индукции M .

На рис. 1 видно, что взаимная индукция колец сказывается на расстоянии меньше 50 мм. При сближении колец вначале наблюдается расщепление линии основного магнитного резонанса в сторону меньших частот (кривая 4). При дальнейшем сближении колец основной резонанс, характерный для уединённого кольца (кривая 5), размывается (кривая 3). При дальнейшем сближении колец смещение магнитного резонанса в сторону меньших частот увеличивается. При этом ширина магнитного резонанса сужается,

а его амплитуда увеличивается (линии 1 и 2). При нулевом расстоянии между кольцами частота магнитного резонанса уменьшается примерно в $2^{0,5}$ по сравнению с резонансной частотой уединенного кольца.

Спектры резонансных частот, соответствующие случаю 2, когда кольцевые магнитные диполи расположены в одной плоскости вдоль волнового вектора $\vec{k}$, приведены на рис. 2. В этом случае, как и в предыдущем, наблюдается расщепление линии основного магнитного резонанса на две составляющие. Частота основной составляющей магнитного резонанса также смещается в сторону меньших частот, а второй – в сторону больших частот. Однако ширина линии основной составляющей магнитного резонанса и его амплитуда практически не меняются, линия второго резонанса сильно уширяется, а его резонансная частота слабо зависит от взаимного расположения колец.

Рис. 2. Резонансные спектры колебаний электрических полей, индуцированных парой магнитных диэлектрических кольцевых диполей, расположенных в одной плоскости вдоль волнового вектора $\vec{k}$. 1 – уединённый диполь (одно кольцо); 2 – расстояние между краями колец 4 мм; 3 – 10 мм; 4 – 40 мм

Из вышеизложенного следует, что магнитная связь резонансных диполей существенно сильнее в первом случае, чем во втором. Для наглядности проявления магнитной связи между двумя диэлектрическими резонансными диполями было измерено распределение магнитного поля в ближней зоне колец, расположенных согласно случаю 2 (рис. 3). На рис. 3 видно, что при резонансе магнитное поле концентрируется внутри диэлектрических колец. Наибольшая величина магнитного поля регистрируется в центре колец. В отличие от уединенного кольца [4], где снаружи кольца наблюдается ослабление магнитного поля, на взаимосвязанных кольцах наблюдается усиление величины магнитного поля как вокруг ближайшего к антенне кольца, так и в области между кольцами.

Рис. 3. Экспериментальное пространственное распределение магнитного поля вблизи двух диэлектрических колец с размерами $38 \times 28 \times 5$ мм, полученного с помощью зонда магнитного поля на резонансной частоте. Расстояние между краями колец 4 мм

Закключение

Проведены эксперименты, показывающие магнитное взаимодействие двух магнитных диэлектрических кольцевых контуров, облучаемых плоской линейно поляризованной электромагнитной волной ГГц диапазона. Азимутальные токи смещения, индуцируемые в этих контурах, образуют резонансные магнитные диполи, собственные частоты которых определяются диэлектрической проницаемостью материала колец и их самоиндукцией. Взаимная электромагнитная индукция пары кольцевых диполей определяет спектр связанных колебаний пары и частотную полосу инверсии её магнитного момента. Показана зависимость спектра связанных колебаний диполей от их взаимного расположения и расстояния между ними. Полученные характеристики парного взаимодействия искусственных магнитных диполей представляют интерес для разработки новых структур и нахождения оптимальных параметров радиофотонных структур [9, 10].

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 13 «Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии».

Литература

1. Alu A., Salandrino A., Engheta N. // Optics Express. – 2006. – V. 14 (4). – P. 1557.
2. Jahani S., Jacob Z. // Nature Nanotechnology. – 2016. – Vol. 11. – P. 23.
3. Bakunov M.I. et al. // Photon. Nanostruct: Fundam. Appl. – 2014. – V. 12. – P. 114 – 121.

4. Шварцбург А.Б., Печёркин В.Я., Василяк Л.М., Ветчинин С.П., Фортвов В.Е. // УФН. – 2018. – Т. 188, № 7. – С. 780.
5. Shvartsburg A.B., Pecherkin V.Ya., Jimenez S., Vasilyak L.M., Vetchinin S.P., Vazquez L., Fortov V.E // J. Phys. D.: Appl. Phys. – 2018. – V. 51. – P. 475001.
6. 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.
7. Jelinek L., Marques R. // J. of Phys. Condens. Matter. – 2010. – V. – 22 (2). – P. 121.
8. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1992. – С. 191.
9. 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.
10. Рыбин М.В., Лимонов М.Ф. // УФН. – 2019. – Т. 189, № 8. – С. 881.

Поступила в редакцию 11 сентября 2019 г.

UDC 537.868.4

DOI: 10.21779/2542-0321-2019-34-4-7–12

Resonant interaction of dielectric ring magnetic dipoles of the GHz band

**L.M. Vasilyak^{1,2}, S.P. Vetchinin¹, V.Ya. Pecherkin¹, A.B. Shvartsburg¹, Yu.M. Kulikov¹,
V.A. Panov¹, P.A. Privalov³**

¹ Joint Institute for High Temperatures of Russian Academy of Sciences; Russia, 125412, Moscow, Izhorskaya st., 13; bd. 2; vpecherkin@yandex.ru;

² Moscow Institute of Physics and Technology; Russia, 141701, Moscow Region, Dolgoprudny, Institutsky per., 9;

³ Russian Technological University; Russia, 119571, Moscow, Vernadsky Avenue, 78;

The magnetic interaction of two subwavelength ring dielectric circuits in the field of a plane electromagnetic wave of the GHz band is experimentally investigated. Under the action of electromagnetic induction in the wave field and mutual induction in the circuit, azimuthal displacement currents are generated, forming magnetic dipoles. The spectra of the system of coupled dipoles were measured, resonance frequencies and spectral bands of magnetic induction inversion corresponding to negative values of magnetic permeability were found. The dependence of the resonances on the relative position of the contours and the distance between them is shown. The spatial structure of the magnetic field of dielectric dipoles lying in the same plane at their resonance interaction is presented.

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

Received 11 September, 2019