

05.2

Идентификация и разделение магнитного и электрического микроволновых откликов киральных элементов

© Ю.Н. Казанцев, Г.А. Крафтмахер, В.П. Мальцев

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва
E-mail: gkraft@ms.ire.rssi.ru

Поступило в Редакцию 17 сентября 2015 г.

Предложен метод идентификации типа возбуждения (магнитным или электрическим переменным полем) резонансов в проводящих киральных элементах по отражению электромагнитных волн в режимах стоячей и бегущей волны. Метод апробирован экспериментально в микроволновом диапазоне и подтвержден численно. Показана возможность широкополосного согласования композиционных радиопоглощающих материалов не на основе традиционных четвертьволновых эффектов, а решеткой резонансных элементов, возбуждаемых магнитным полем волны.

Активизация исследований киральных сред была связана с переходом из оптики в СВЧ-диапазон благодаря созданию искусственных киральных композитов с включениями, много меньшими длины волны и пространственно подобными оптически активным молекулам в виде спиралей и спиральных цепочек. В последнее время наблюдается обратный процесс, когда результаты микроволновых исследований инициируют создание оптических метаструктур с использованием нанотехнологий и происходит взаимопроникновение оптических и микроволновых подходов. Интерес к киральным средам во многом связан с уникальными эффектами, обусловленными резонансными кольцевыми (замкнутыми) токами. Кольцевые токи могут наводиться в элементах в зависимости от их ориентации магнитным h (магнитное возбуждение) или электрическим E (электрическое возбуждение) переменными полями (h - и E -excitation). Ток, наведенный магнитным полем h , создает переменные магнитный и электрический дипольные моменты, при этом магнитный момент дает вклад в магнитную проницаемость μ , а электрический момент — в параметр киральности, влияющий на магнитную

индукцию. Когда кольцевой ток наводится электрическим полем E , формируются магнитный и электрический дипольные моменты, но в этом случае электрический момент дает вклад в диэлектрическую проницаемость ϵ , а магнитный — в параметр киральности, влияющий на электрическую индукцию. Помимо этого в киральных элементах электрическое поле может наводить резонансные токи, обуславливающие резонансные эффекты аналогично обыкновенным диполям. Резонансный эффект, обусловленный наведением резонансных кольцевых токов, в литературе иногда называют „magnetic resonance“, „magnetic response“ в случае возбуждения не только магнитным полем волны, но и в случае электрического возбуждения, а „electric resonance“ называют резонансные эффекты, обусловленные возбуждением дипольных токов [1]. Под магнитным откликом будем понимать лишь отклик на магнитное возбуждение, резонансные эффекты, обусловленные кольцевыми токами, будем называть „кольцевой (ring) резонанс“ (RR) и соответственно магнитное и электрическое возбуждение RR. Резонансные эффекты, возбуждаемые токами диполя, будем называть „дипольный резонанс“ (DR).

Разработка методов идентификации типа возбуждения важна, учитывая большой набор элементов разного вида, множество резонансов и трудности прямых измерений магнитных и электрических параметров [2]. Точный резонаторный метод позволяет провести прямые измерения, но требует специальных образцов [3,4]. В [3] получены соотношения, связывающие параметры резонатора с параметрами киральных сред, в [4] созданы специальные киральные образцы и измерены комплексные ϵ и μ .

Существующие методы идентификации основаны на исследовании спектров прохождения T . В [1] предложено идентифицировать „magnetic response“, сравнивая резонансные отклики прохождения T для двойных разомкнутых колец („split ring resonator“ — SRR [5]) и сплошных колец. Резонансный отклик, исчезающий у замкнутых колец, идентифицируется как „magnetic“. В этом случае происходит разделение резонансных эффектов кольцевых и линейных токов (RR и DR), но не разделяются эффекты магнитного и электрического возбуждения RR. В [6] магнитный и электрический отклики идентифицируются по положению полос прозрачности в запердельных волноведущих структурах.

В данной работе предлагается идентификация магнитного и электрического возбуждения по отражению в свободном пространстве или в

волноводе в режиме стоячей волны, а также в режиме бегущей волны на основании обнаруженных особенностей дисперсионных характеристик.

Продемонстрируем основные результаты на примере двойных разомкнутых колец SRR. Процессы возбуждения резонансов в SRR детально исследованы аналитически и численно, например в [7,8]. Используем измерители коэффициентов стоячей волны по напряжению P2-58 (3–5.5 GHz) и P2-59 (5.3–7.6 GHz) и одноканальный метод измерений коэффициентов отражения R в прямоугольном волноводе: режим стоячей волны с металлической заглушкой и режим бегущей волны с согласованной нагрузкой. Помещаем кольцо SRR в центре прямоугольного волновода сечением 48×24 и 35×15 mm в разных ориентациях относительно компонент поля падающей электромагнитной волны (рис. 1, *a*). На рис. 1, *a* для каждой исследуемой ориентации (1–4) кольца SRR указан тип возбуждения кольцевого резонанса RR. В режиме стоячей волны при расположении SRR на металлической заглушке (в пучности магнитного поля h) в ориентации 1 (h -exc.) наблюдается резонансный минимум коэффициента отражения, который пропадает в минимуме поля h при расположении SRR на расстоянии $s = \lambda/4$ от заглушки. При $s = \lambda/4$ резонанс наблюдается в ориентации 4 (E -exc.) в максимуме поля E и пропадает при $s = 0$ в минимуме E . Этот простой способ разделения магнитного и электрического возбуждения требует малых образцов относительно длины волны, чтобы в пучности магнитного (электрического) поля образец не подвергался влиянию электрического (магнитного) поля.

В режиме бегущей волны резонансные эффекты проявляются в виде резонансного провала на частотных кривых коэффициента прохождения, которому соответствует резонансный максимум на кривой коэффициента отражения. Такие кривые характерны для композитов на основе резонансных хаотично расположенных элементов. Однако в случае ориентированных киральных элементов, включая одиночные элементы, резонансные кривые отражения имеют более сложный вид: наряду с резонансным максимумом наблюдается связанный с ним резонансный минимум, положение которого зависит от типа возбуждения. При электрическом возбуждении резонансный минимум имеет место на более высоких частотах относительно резонансного максимума. При магнитном возбуждении резонансный минимум наблюдается на более низких частотах, при этом со стороны высоких частот относительно максимума коэффициент отражения медленно спадает, сохраняя доволь-

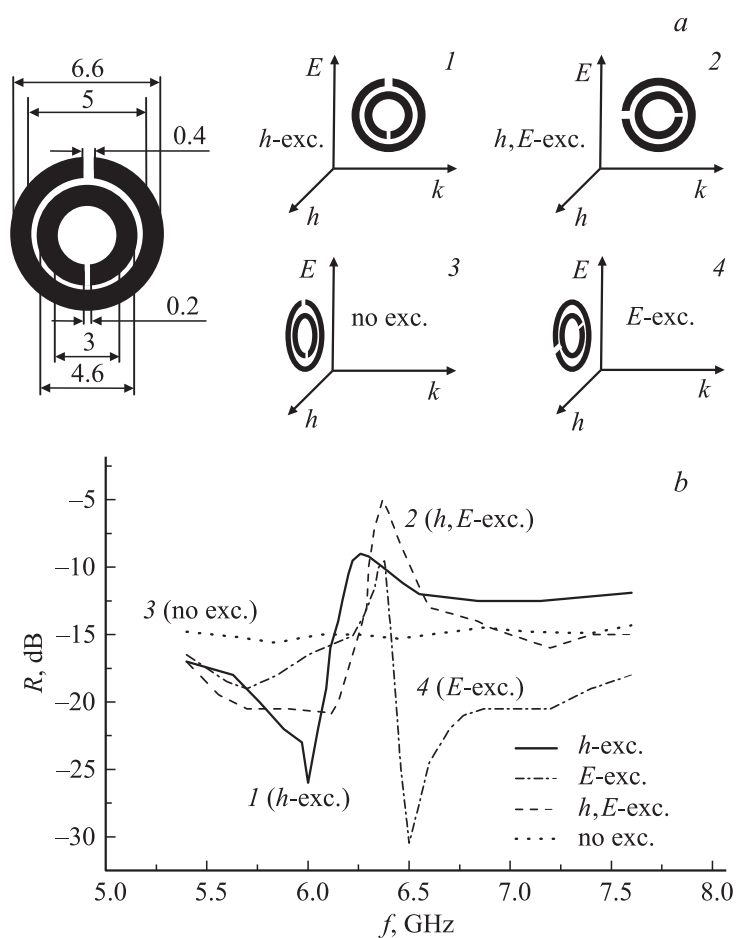


Рис. 1. *a* — геометрия двойного разомкнутого кольца SRR и исследуемые ориентации SRR относительно волнового вектора k и полей h и E падающей электромагнитной волны. *b* — измеренные частотные зависимости коэффициентов отражения R в прямоугольном волноводе в режиме бегущей волны в области кольцевого резонанса RR при разных ориентациях (разном возбуждении резонанса).

но большую величину в некотором диапазоне частот. Кроме этого, фаза коэффициента отражения при магнитном возбуждении меняется плавно, проходя через нуль на резонансной частоте, в отличие от скачкообразного изменения при электрическом возбуждении.

Измеренные частотные зависимости отражения R в области RR в режиме бегущей волны приведены на рис. 1, *b*. Видим, что частотные зависимости R кардинально различаются для различных ориентаций. Наряду с резонансными максимумами (частота $f_{\max} = 6.3$ GHz) наблюдаются резонансные минимумы на частотах, более низких при магнитном возбуждении (h -exc.) и более высоких при электрическом возбуждении (E -exc.): $f_{\min, h\text{-exc.}} = 6$ GHz и $f_{\min, E\text{-exc.}} = 6.5$ GHz. В ориентации 2 может иметь место возбуждение как h -exc., так и E -exc., при этом на кривой R наблюдаются размытые минимумы. Ориентация 3 не допускает возбуждения RR, и на кривой R отсутствует резонансный эффект.

Отличительные особенности проявляются и на кривых, полученных численно для модуля и фазы R (рис. 2, *a, b*). Форма резонансной кривой R существенно зависит от возбуждения в отличие от резонансного провала коэффициента прохождения T . Подобные особенности подтверждены экспериментально с включениями в форме планарной спирали, одинарного разомкнутого кольца, цилиндрического образца из ориентированных спиралей. Различие частотных характеристик позволяет идентифицировать тип возбуждения и разделять магнитный и электрический резонансные отклики применительно к включениям самой разной формы.

Особый интерес представляет магнитное возбуждение, обуславливающее искусственный магнетизм, востребованный для создания „левых“ сред [9] и соответствующих применений на их основе. Обнаружение особенностей частотных характеристик R (плавное изменение фазы при сохранении большой величины выше резонансной частоты) открывает новый аспект проблемы поглощения, который ранее не обсуждался. Это — возможность широкополосной компенсации зависящих от частоты отражений от традиционных поглощающих композитов на основе резистивных нитей или пленок, обеспечивая равные значения отражений в противофазе от композита и расположенной вплотную, возбуждаемой магнитным полем волны, решетки резонансных элементов выше их резонансной частоты. Ранее компенсация отражений

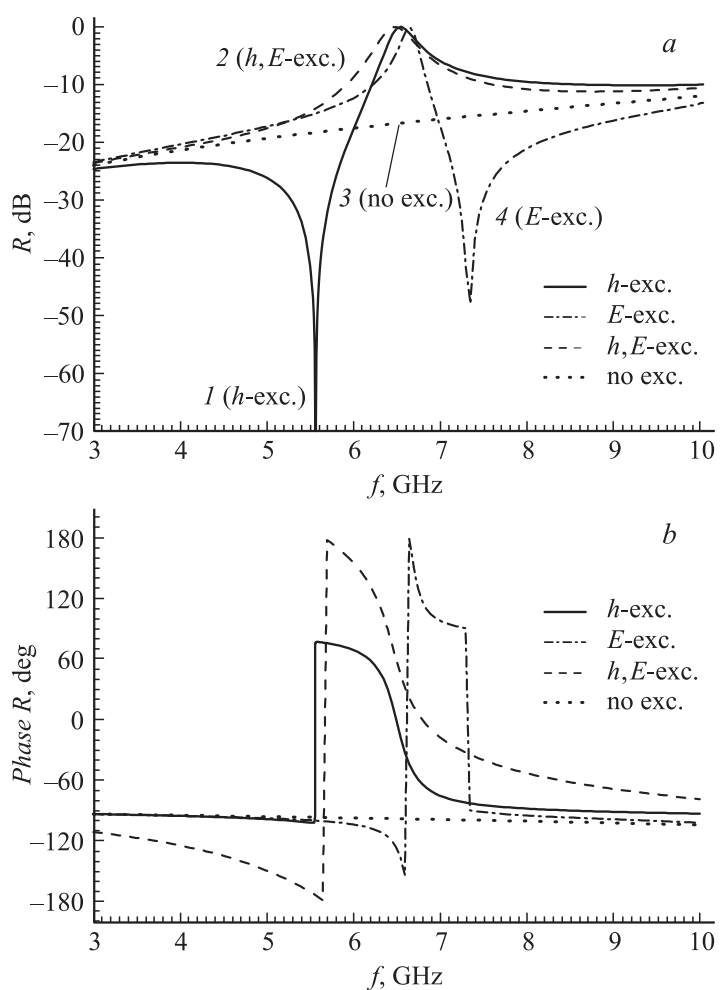


Рис. 2. Расчетные частотные зависимости коэффициентов отражения R для периодической решетки колец SRR в свободном пространстве в области кольцевого резонанса RR при разных ориентациях колец (разном возбуждении резонанса), период решетки $P = 13$ mm: a — величина R , b — фаза R .

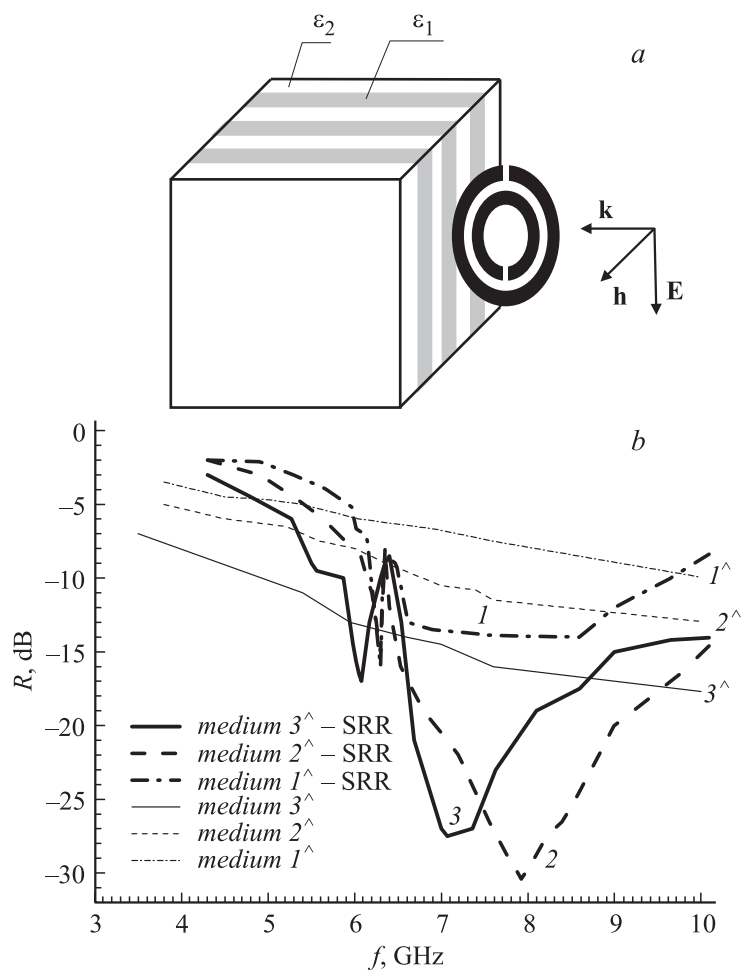


Рис. 3. *a* — геометрия эксперимента со структурой „medium-SRR“. *b* — измеренные частотные зависимости коэффициентов отражения R в прямоугольном волноводе с разными поглощающими композитами (medium $1^$, $2^$ и $3^$), отличающимися коэффициентами отражения R (тонкие кривые $1^$, $2^$ и $3^$) в сравнении со структурами „medium-SRR“ (жирные кривые 1, 2 и 3).

рассматривалась с помощью интерференционных покрытий и покрытий из слоев метаматериала с ϵ , $\mu \approx 1$ и ϵ , $\mu \approx -1$ [10].

Для апробации были выполнены образцы поглощающих композитов (назовем „medium“), содержащие слои углеродосодержащей бумаги (толщина 0.07 mm, $\epsilon'_1 = 15$) и пенополистирола, отличающиеся толщиной пенополистирольных прослоек ($d_2 = 1, 3$ и 4 mm), и проведены измерения R в волноводе в сравнении со структурами „medium–SRR“ (рис. 3, *a*, *b*).

Таким образом, обнаружение особенностей частотных отражательных характеристик магнитного и электрического микроволновых откликов позволяет выявить магнитный отклик применительно к включениям самой разной формы, что не только востребовано при разработке метаматериалов с искусственным магнетизмом, „левых“ сред и применений на их основе, но и открывает новый аспект, связанный с возможностью использования магнитного отклика для широкополосной компенсации отражений от композиционных поглощающих материалов.

Список литературы

- [1] *Katsarakis N., Koschny T., Kafesaki M., Economou E.N., Soukoulis C.M.* // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 84. N 15. P. 2943–2945.
- [2] *Smith D.R., Schultz S., Markos P., Soukoulis C.M.* // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. P. 195104(1–5).
- [3] *Tretyakov S.A., Viitanen A.J.* // Helsinki University of Technology Faculty of Electrical Engineering Electromagnetics Laboratory. Report 134. 1994.
- [4] *Казанцев Ю.Н., Крафтмакхер Г.А.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 20. С. 16–24.
- [5] *Pendry J.B., Holden A.J., Robbins D.J., Stewart W.J.* // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. 1999. V. 47. P. 2075.
- [6] *Kraftmakher G.* // Int. J. Appl. Electromag. Mech. 2000. V. 11. P. 1–6. JAE536.
- [7] *Marques R., Medina F., Rafii-El-Idrissi R.* // Phys. Rev. B. 2002. V. 65. P. 144440.
- [8] *Sauvias B., Simovski C.R., Tretyakov S.A.* // Electromagnetics. 2004. V. 24. P. 317–338.
- [9] *Smith D.R., Padilla W.J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. P. 4184.
- [10] *Lagarkov A.N., Kisel V.N., Semenenko V.N.* // Prog. Electromag. Res. Lett. 2008. V. 1. P. 35–44.