

09

Композиционная среда с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями

© Г.А. Крафтмахер, В.С. Бутылкин

Институт радиотехники и электроники РАН, Москва
E-mail: gkraft@msire.rssi.ru

В окончательной редакции 30 октября 2002 г.

Предложена новая композиционная среда с одновременно отрицательными в микроволновом диапазоне длин волн диэлектрической и магнитной проницаемостями. Среда состоит из ответственных за отрицательную диэлектрическую проницаемость запердельных волноводных структур, в которые внедрены цилиндрические образцы одномерной киральной среды, ответственные за отрицательную магнитную проницаемость. Обнаружены просветление запердельных волноводных структур и антирезонансы коэффициента отражения.

Задача создания сред с одновременно отрицательными диэлектрической ϵ' и магнитной μ' проницаемостями, обладающими необычными электромагнитными свойствами, была поставлена много лет назад [1], но только в настоящее время благодаря прогрессу в области искусственных композиционных сред появилась реальная возможность ее решения.

В [2] предложена и выполнена композиционная среда с одновременно отрицательными ϵ' и μ' в виде комбинации резонансных кольцевых проводящих включений, обуславливающих отрицательную эффективную магнитную проницаемость μ' , и структуры проводящих стержней, ответственных за отрицательную эффективную диэлектрическую проницаемость ϵ' . Эффект формирования среды с одновременно отрицательными ϵ' и μ' в микроволновом диапазоне длин волн подтверждался экспериментально увеличением прохождения через непрозрачную структуру проводящих стержней при внедрении включений. К сожалению, низкий уровень прошедшей мощности (от 52 до 30 dB) затрудняет исследование и практическое применение. В связи с этим актуален поиск новых подходов.

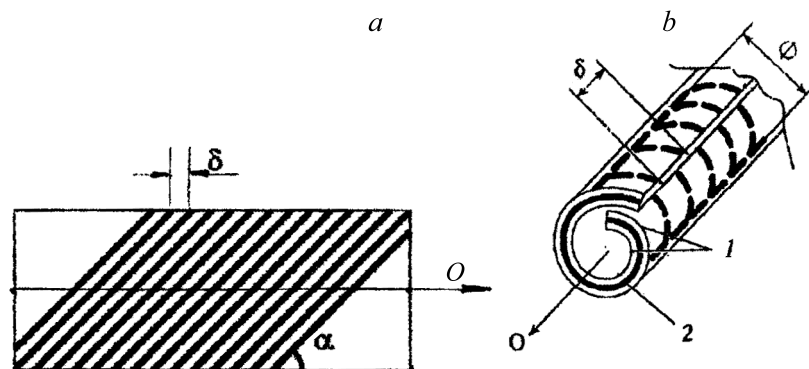


Рис. 1. Материал толщиной 0.25 mm, содержащий частопериодическую решетку медных нитей (a) и выполненный на его основе цилиндрический образец киральной среды из ориентированных изолированных многозаходных спиральных витков в 1.5 оборота с общей O -осью (b): 1 — упругая ткань материала, 2 — одна из проводящих спиралей.

В данной работе предлагается композит, состоящий из двух сред. В качестве одной из них, ответственной за отрицательную μ' , используются подобные исследованным ранее [3–5] цилиндрические образцы одномерной киральной среды на основе множества проводящих многозаходных ориентированных изолированных спиралей с общей осью. На рис. 1 изображены материал (a), содержащий частопериодическую решетку параллельных медных нитей (толщина нитей 0.1 mm, расстояние между ними $\delta = 0.2$ mm), и реализованный на его основе киральный образец (b). Киральные образцы с множеством спиралей в 1.5 оборота были выполнены путем скручивания в трубку диаметром $\varnothing = 2.5$ mm полоски упомянутого материала. Для фиксации и изоляции использовалась диэлектрическая оболочка, исключающая возможность контакта спиралей с волноводом. Киральные образцы при длине 20 mm содержали около 80 спиралей, угол накрутки спиралей $\alpha = 70^\circ$.

Взаимодействие киральной среды с СВЧ-полями связано с возникновением резонансных циркулярных токов, которые наводятся в киральных включениях как переменным электрическим полем, так и

магнитным. Наблюдается резонансный отклик среды на электромагнитное излучение — киральный резонанс (КР). Тепловые потери в спиральных витках при возбуждении циркулярных токов переменным магнитным полем проявляются как магнитные, а среда с киральными включениями — как магнитодиэлектрик, несмотря на отсутствие магнитных компонентов. Киральные включения можно рассматривать как резонансные контуры не только с активным, но и с индуктивным и емкостным сопротивлениями. Резонансная зависимость тока, наведенного магнитным или электрическим полем, обуславливает резонансную зависимость эффективной магнитной и диэлектрической проницаемостей среды. Увеличение емкости уменьшает резонансную частоту, из-за чего резонансные эффекты проявляются в элементах, много меньших длины волны λ .

В качестве другой среды, носителя отрицательной эффективной диэлектрической проницаемости, впервые используется запердельный волновод. Действительно, прямоугольный волновод, у которого постоянная распространения имеет вид $\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}$ (волна типа H_{10}), можно рассматривать как некоторую среду с эффективной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1 - (\lambda/2a)^2$ (a — размер широкой стенки волновода), при уменьшении размера волновода и переходе в запердельный режим ϵ становится отрицательной, а постоянная распространения — мнимой величиной.

Предлагаемая композиционная среда состоит из запердельных волноводных структур (в виде множества запердельных волноводных ячеек или ряда параллельных металлических полосок), в которые внедрены цилиндрические образцы одномерной киральной среды. Микроволновые свойства такой среды изучались в волноводах в диапазоне 3.2–5.6 GHz с использованием образцов, содержащих ограниченное число ячеек (рис. 2). Применялся панорамный измеритель КСВН с волноведущей системой прямоугольных волноводов сечением 48×24 mm (основной волновод). В качестве запердельных волноводных ячеек использовались отрезок основного волновода длиной 20 mm, разделенный на 3 части металлическими перегородками, параллельными направлению распространения, как показано на рис. 2, *a* для случая h -возбуждения КР, и волноводные секции с меньшими сечениями 23×11 mm и 16×8 mm (как показано на рис. 2, *b*), волноведущие соответственно в диапазонах 8–12 и 12–18 GHz. В каждую из волноводных запердельных ячеек

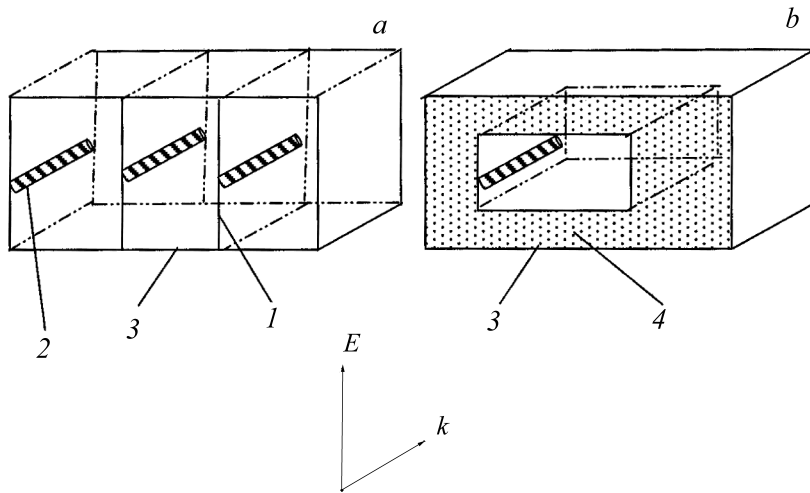


Рис. 2. Волноводные варианты (*a, b*) композиционных структур на основе запердельных волноводных ячеек для случая *h*-возбуждения: 1 — металлические перегородки, 2 — цилиндрические образцы одномерной киральной среды, 3 — основной волновод, 4 — поглотитель.

помещалось по одному цилиндрическому киральному образцу с КР в диапазоне 3–5 GHz.

Измерялись коэффициенты отражения R и прохождения T киральных цилиндрических образцов, помещенных непосредственно в основной волновод. Наблюдались резонансные пики КР практически одинаковой интенсивности как при *h*-возбуждении (микроволновое магнитное поле $h \parallel$ оси спиралей, киральные образцы проявляют свойства магнитодиэлектрика с резонансной зависимостью μ'' и μ'), так и при *E*-возбуждении (микроволновое электрическое поле $E \parallel$ оси спиралей, в этом случае киральные образцы проявляют свойства диэлектрика с резонансной зависимостью ϵ'' и ϵ'). Измерялись частотные зависимости ϵ' и μ' киральных образцов в области КР при использовании полуволновых резонаторов разной длины. Выше центральной частоты КР наблюдались отрицательные значения ϵ' и μ' , при этом резонансные значения ϵ' и μ' были близки по величине.

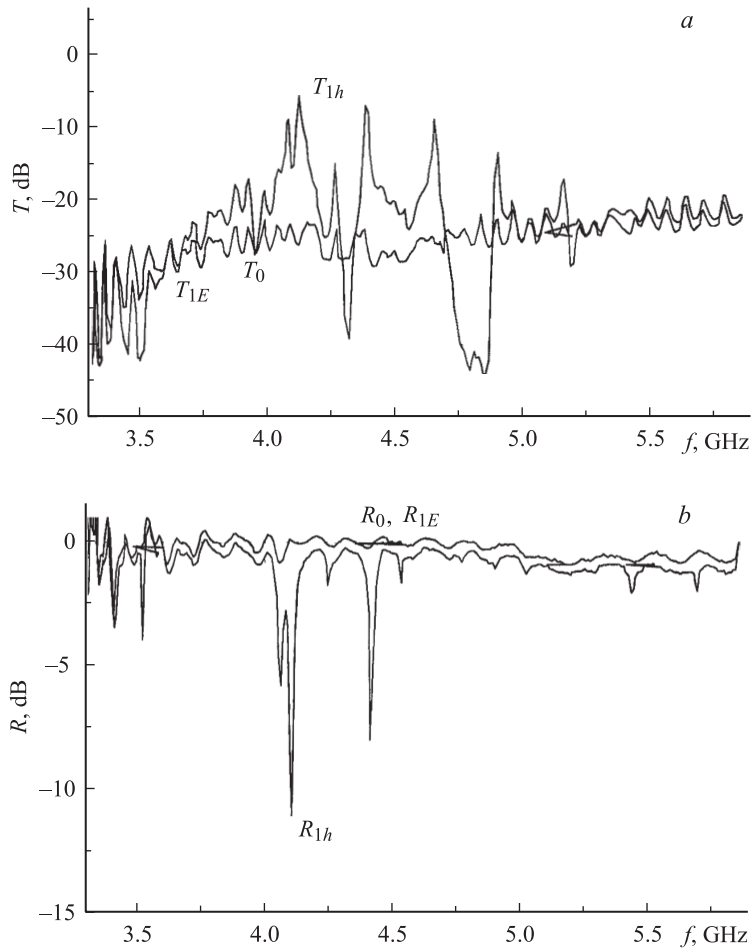


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициентов прохождения T (a) и отражения R (b) для запердельной волноводной структуры, соответствующей рис. 2, a . Пунктирные кривые — коэффициенты прохождения (отражения) T_0 (R_0) в отсутствие киральных образцов. С ними совпадают коэффициенты прохождения (отражения) T_{1E} (R_{1E}) с киральными образцами при E -возбуждении. Сплошные кривые — коэффициенты прохождения (отражения) T_{1h} (R_{1h}) с киральными образцами при h -возбуждении.

На рис. 3, *a* приведены результаты измерений коэффициентов прохождения T для композиционной структуры, соответствующей рис. 2, *a*, при возбуждении КР как магнитным (T_{1h}), так и электрическим (T_{1E}) микроволновым полем. Обнаружено просветление запредельной структуры при внедрении киральных образцов в ориентации h -возбуждения КР. В этом случае (как показано на рис. 2, *a*) цилиндрические киральные образцы помещались вблизи боковых стенок запредельных ячеек в максимумах микроволнового поля h , параллельного оси спиралей. Полосы просветления соответствуют резонансным пикам КР, наблюдаемым при расположении киральных образцов в основном волноводе. Многорезонансный характер возбуждения обусловлен сильной связью спиралей. В области резонансных частот КР коэффициент прохождения T_{1h} (с киральными образцами при h -возбуждении) значительно превышает T_0 (в отсутствие киральных образцов), достигая величины $T_{1h} = -5$ dB, в то время как T_{1E} (с киральными образцами при E -возбуждении, когда киральные образцы помещались в центре запредельных ячеек в максимумах микроволнового поля E , параллельного оси спиралей) практически не отличается от $T_0 = -(35 \div 25)$ dB. Эффективное просветление запредельных волноводных структур (T_{1h} превышает T_0 более чем на 20 dB), наблюдаемое при расположении цилиндрических образцов у боковых стенок, достигается при длине структуры, существенно меньшей длины волны.

При измерениях коэффициентов отражения R (рис. 3, *b*) эффект просветления проявляется в виде резонансного минимума R на частотах КР для случая h -возбуждения ($R_{1h} = -12$ dB). В отсутствие киральных образцов или в случае внедрения их при E -возбуждении структуры являются непропускающими, практически полностью отражающими ($R_0 \cong 0$ dB, $R_{1E} \cong 0$ dB).

Аналогичные результаты получены при изучении структур типа приведенных на рис. 2, *b*.

Наблюдаемые эффекты могут быть объяснены тем, что при внедрении киральных образцов с отрицательной величиной μ' в запредельные волноводные структуры, обладающие отрицательной величиной ϵ' , формируется среда с одновременно отрицательными ϵ' и μ' .

В заключение авторы благодарят С.Л. Просвирнина за полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 01-02-97049, 02-02-16794.

Список литературы

- [1] *Веселого В.Г.* // УФН. 1967. Т. 92. В. 3. С. 517–526.
- [2] *Smith D.R., Padilla Willie J., Vier D.C., Nemat-Nasser S.C., Schultz S.* // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 84. N 18. P. 4184–4187.
- [3] *Kraftmakher G.A., Kazantsev Yu.N.* // Advances in Complex Electromagnetic Materials. Kluwer Academic Publishers. 1997. NATO ASI Ser. 3. V. 28. P. 341–358.
- [4] *Казанцев Ю.Н., Крафтмахер Г.А.* // РЭ. 1997. Т. 42. № 3. С. 277–283.
- [5] *Крафтмахер Г.А., Казанцев Ю.Н.* // РЭ. 1999. Т. 44. № 12. С. 1510–1520.