

05;12

Волноводное распространение СВЧ-излучения в двухслойном метаматериале

© В.Г. Веселаго, Е.А. Виноградов, В.И. Голованов, А.А. Жуков,
А.А. Романов, А.В. Капустян, Ю.М. Урличич, В.П. Лаврищев

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

E-mail: v.veselago@relcom.ru

Российская корпорация ракетно-космического приборостроения
и информационных систем, Москва

Научно-производственный центр „Спурт“, Москва, Зеленоград

Поступило в Редакцию 26 октября 2010 г.

Представлены экспериментальные результаты исследования характеристик канализации СВЧ-излучения в диапазоне от 8 до 12 GHz в слоистой среде на основе метаматериала с изменяемыми геометрическими характеристиками, размещаемого в свободном пространстве и возбуждаемого волноводным излучателем. Получены экспериментальные данные по взаимодействию отдельных слоев метаматериала между собой, что позволило выяснить влияние геометрических параметров метаматериала на его электродинамические характеристики. Впервые показана принципиальная возможность управления положением резонансного пика метаматериала с управляемыми электродинамическими характеристиками путем изменения его геометрических параметров.

Бурное развитие в начале нового века теоретической и прикладной электродинамики показало перспективы применения метаматериалов, созданных на основе положений, представленных в работе [1], посвященной свойствам сред одновременно с отрицательными значениями диэлектрической ϵ и магнитной μ проницаемостей и соответственно с отрицательным показателем преломления электромагнитных волн. Несмотря на то что многие исследователи стремились создать эффективные метаматериалы с вышеуказанным свойством, применимые, в частности, на очень высоких частотах, включая оптический диапазон электромагнитных волн, ряд принципиальных проблем, таких как управление величиной и положением резонансного отклика системы, оставались не решенными. При этом значительный практический интерес

представляет создание метаматериалов, свойства которых изменяются при внешних воздействиях. Так, известна работа [2], в которой развит метод исследования характеристик коэффициента пропускания метаматериала при нормальном падении на его поверхность. Показано, что в такой конфигурации эксперимента частота пропускания метаматериала не зависит от поворота структуры вокруг оси, перпендикулярной к ее поверхности (в этом случае кольцевые резонаторы не возбуждаются магнитным полем волны).

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию характеристик и особенностей канализации СВЧ-излучения в слоистой среде на основе метаматериала с изменяемыми геометрическими характеристиками, размещаемого в свободном пространстве и возбуждаемого волноводным излучателем вдоль поверхности структуры.

В качестве объекта исследования применена известная [3,4] планарная двумерная периодическая (период $d = 5 \text{ mm}$) структура двойных расщепленных кольцевых резонаторов и непрерывных (в отличие от [3]) металлических полос, образующих систему магнитных и электрических диполей со взаимно перпендикулярными электрическими и магнитными полями, сформированных на диэлектрических подложках методами литографии. В качестве подложек применены стеклотекстолитовые пластины с размерами $285 \times 205 \text{ mm}$. Геометрические параметры структуры (размеры ячеек, шаг мультипликации) выбраны из расчета получения отрицательного преломления на частоте электромагнитного излучения $f \sim 10 \text{ GHz}$. В эксперименте последовательно изменяли расстояние между диэлектрическими подложками от 8 до 16 mm. Для придания необходимой жесткости метаматериалу между листами структур прокладывались тонкие пластинки пенополистирола, обеспечивающие ничтожно малые потери и очень близкую к единице величину диэлектрической проницаемости. Меняя число пластинок, можно определить степень взаимодействия полей отдельных структур и получить представление о возможности управления их характеристиками. Прежде всего, представляло интерес исследование двухслойных метаматериалов СВЧ-диапазона (с толщиной, близкой к периоду структуры $|a|$ и существенно меньшей длины волны излучения), возбуждаемых излучением открытого конца волновода.

Для измерений частотной зависимости обратной величины коэффициента пропускания такой системы и ее резонансной частоты при различном расстоянии между двумя структурами был создан СВЧ-

стенд, состоящий из источника СВЧ-излучения (генератор стандартных сигналов с плавной перестройкой от 8 до 12 GHz) с волноводным выходом стандартного сечения ($10 \times 23 \text{ mm}^2$), приемной волноводной детекторной головки и селективного усилителя для регистрации принимаемого сигнала. СВЧ-излучение было промодулировано с частотой 1 kHz. Исследуемый метаматериал помещали непосредственно между волноводным выходом генератора и входом детекторной головки и ориентировали в свободном пространстве таким образом, чтобы магнитные и электрические диполи эффективно взаимодействовали соответственно с магнитным и электрическим полем волны типа H_{01} , распространяющейся по волноводному тракту. Схема эксперимента по измерению обратной величины коэффициента пропускания при различной частоте и резонансной частоте при варьированном расстоянии между двумя структурами метаматериала и фотографии верхней и нижней структур метаматериала представлены на рис. 1, *a* и *b* соответственно.

На рис. 2, *a* представлена типичная высокочастотная резонансная зависимость обратной величины коэффициента пропускания от частоты при расстоянии между структурами 16 mm. Следует заметить, что в диапазоне частот, перекрываемом генератором, наблюдалось несколько подобных резонансов, отвечающих как за положительный, так и за отрицательный показатель преломления. Нет ничего особенного и в величинах резонансного ослабления излучения, тем более что специально выбиралась достаточно большая оптическая длина пути излучения в метаматериале. Дополнительно проведены исследования резонансной зависимости обратной величины коэффициента пропускания от частоты для двух структур, плоскости которых расположены под различными углами. Эксперименты с такого рода структурами показали, что даже при достаточно больших углах ($\sim 10^\circ$) добротность резонансной характеристики остается высокой (рис. 2, *b*). Перемещение приемного волновода в направлениях, перпендикулярных его широкой стенке, показало наличие узкого (порядка длины волны излучения) максимума излучения, свидетельствующего о наличии эффекта плоской линзы, характерного для материалов с отрицательным показателем преломления. Для подтверждения наблюдаемого эффекта была собрана призма в виде параллелограмма, образованная шестислойной структурой, каждый из слоев которой вместе с соответствующей пенопластовой прокладкой последовательно сдвигался на определенный шаг параллельно длинной стороне структур так, чтобы края с узкой стороны структур образо-

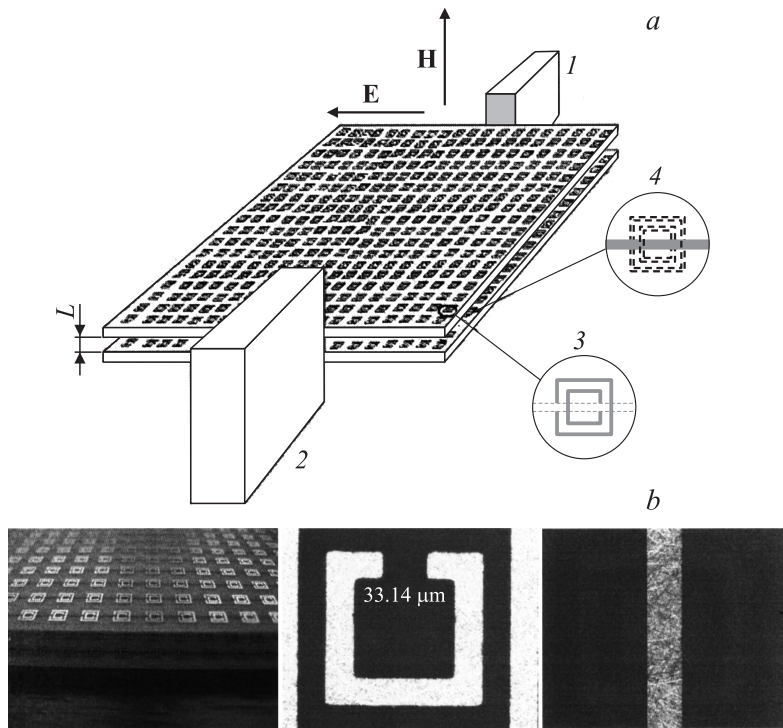


Рис. 1. Схема эксперимента по измерению обратной величины коэффициента пропускания при различной частоте и при варьируемом расстоянии между двумя структурами метаматериала (а) и микрофотографии структур метаматериала (b): 1 — приемный вход волновода, 2 — излучающий выход волновода, 3 — верхняя структура, 4 — нижняя структура.

вывали призму с углом наклона в 30° . Сама установка была модифицирована путем параллельного переноса оси приемного волновода относительно излучающего в плоскости перпендикулярной плоскости рисунка. Приемный волновод перемещался параллельно своей оси, а структура поворачивалась вслед за входным концом приемного волновода. Оказалось, что максимум передаваемого сигнала наблюдается при Z-образном взаимном расположении волноводов и структуры, когда

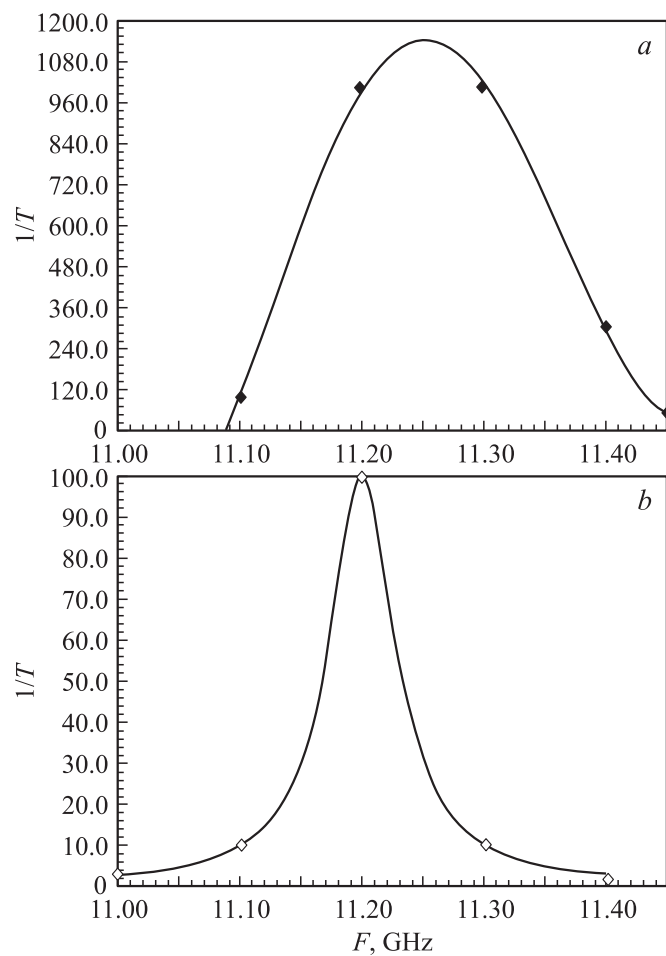


Рис. 2. Типичная высокодобротная резонансная зависимость от частоты (F) обратной величины коэффициента пропускания ($1/T$) плоскопараллельных структур при расстоянии между ними 16 nm (a) и двух структур, плоскости которых расположены под углом 7.5° (b).

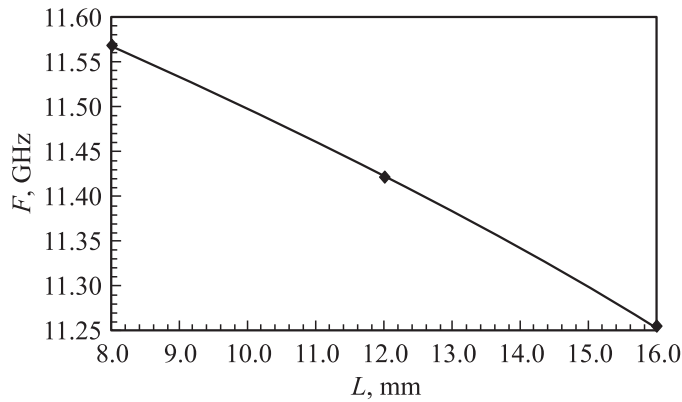


Рис. 3. Резонансная частота (F) в метаматериале при различном расстоянии (L) между двумя плоскопараллельными структурами (8–16 mm).

излучения, падающие и на поверхность призмы и распространяющиеся вдоль структуры, лежат по одну сторону относительно нормали ко входной грани призмы, что и соответствует случаю отрицательного преломления. На рис. 3 приведена наблюдаемая зависимость резонансной частоты от расстояния между двумя структурами, варьируемого вышеуказанным способом. Как видно из рис. 3, резонансная частота линейно уменьшается при возрастании расстояния между структурами. Такая зависимость характерна для расстояний между структурами, превышающих их период.

Таким образом, разработаны стенд и методика, обеспечивающие измерение электродинамических характеристик метаматериалов с расстоянием между плоскопараллельными структурами от 8 до 16 mm в диапазоне от 8 до 12 GHz. Получены экспериментальные данные по взаимодействию отдельных слоев метаматериала между собой, что позволило выяснить влияние геометрических параметров метаматериала на его характеристики. Экспериментально обнаружено, что две параллельные структуры с зазором между ними эквивалентны полосковой линии, а сильно расходящиеся волны в результате дифракции на открытом конце волновода могут эффективно преобразовываться в направляемые структурой волны. Впервые показана принципиальная возможность управления положением резонансного пика при изменении геометрических

характеристик структуры и создания метаматериала с управляемыми в достаточной для практических целей степени электродинамическими характеристиками путем изменения его геометрических параметров.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 06-02-16830-а, 07-02-00233-а, 09-02-01186-а, 10-02-01336-а.

Список литературы

- [1] *Veselago V.G.* // УФН. 1967. Т. 92. С. 517. [Veselago V.G. // Sov. Phys. Usp. 1968. V. 10. P. 509].
- [2] *Chuang Li, Huiging Fan, Nanjing Li.* // Appl. Phys. Lett. 2007. V. 91. P. 11905.
- [3] *Smith D.R.* et al. // PRL. 2000. V. 84. P. 4184.
- [4] *Greegor R.B., Parazzoli C.G., Li K., Koltenebah B.E.C., Tanielian M.* // Optics Express. 2003. V. 11. N 7. P. 688.