

МЕТАМАТЕРИАЛЬНОЕ «МАГНИТНОЕ» ПОКРЫТИЕ НА СВЧ- ЧАСТОТАХ

И. А. Карпов, Э. Д. Шу

Институт Физики твёрдого тела РАН, Черноголовка

Статья получена 15 апреля 2014 г.

Абстракт. В данной статье приведены результаты подробного исследования частотных свойств действующего в микроволновом диапазоне кольцеобразного метаматериального покрытия (Smith et al). Для этих целей была разработана установка визуализации микроволновых полей, на которую получен Патент РФ. Показано, что данное метаматериальное покрытие обладает хорошими маскирующими свойствами при определённых частотах.

Ключевые слова: метаматериальное покрытие, СВЧ, электрическое поле, визуализация полей.

Abstract. In this paper, detail study of the ring-like metamaterial cloak (Smith et al) at a wide range of microwave frequencies was carried out. The setup for microwave electric field visualization was developed (Russian Patent). The metamaterial cloak studied is shown to have good cloaking properties at certain frequencies.

Keywords: metamaterials cloaks, microwave frequencies, electric field, field visualization.

Введение

В последние годы всё больший интерес проявляется исследователями к изучению метаматериалов – материалов, состоящих из большого количества упорядоченных в подобную кристаллической решётке упаковку структурных единиц – метаатомов. Каждый метаматериальный метаатом состоит из большого числа обычных атомов или молекул. Но это – не единственное отличие метаматериалов от обычных материалов. Метаатомы могут состоять не обязательно из одного типа молекул или атомов, а включать в себя несколько различных веществ, заполняющих пространство метаатома определённым,

заданным заранее образом. Такие метаатомы одного или нескольких разных типов далее упаковываются в определённую, также заданную заранее, пространственную структуру-решётку, формируя метаматериал [1 - 3].

Одним словом, метаматериал – это искусственный материал, созданный определённым образом из одного или более веществ, скомпонованных в пространстве в заданной последовательности для достижения желаемых свойств.

Структура и размеры как самого метаматериального изделия, так и его метаатомов, зависят от длины волны электромагнитного излучения, с которым взаимодействует данный метаматериал. Чем меньше длина волны электромагнитного излучения, тем меньше должны быть размеры метаматериальных метаатомов. Для оптического диапазона размеры метаатомов могут достигать 50 – 200 нанометров, что вполне доступно для современной литографической и материалобрабатывающей техники, используемой в микроэлектронике для создания сверхбольших интегральных микросхем, например, компьютерных микропроцессоров. Для микроволнового СВЧ диапазона размеры метаатомов гораздо больше: они составляют единицы и даже десятки миллиметров [4 – 7]. Таким образом, метаатомы СВЧ метаматериала можно видеть невооружённым глазом.

Метаматериальное покрытие

Авторы работы [7] описали конструкцию метаматериального изделия, позволяющего волнам электромагнитного поля СВЧ огибать как сам созданный ими кольцеобразный метаматериальный объект, так и предметы, помещаемые внутрь такого кольцеобразного покрытия. Это достигается при помощи низких, менее единицы, значений показателя эффективной магнитной проницаемости метаматериала, радиальная компонента μ_r которого, к тому же, сильно изменяется от его внутренней (0,003) к его наружной поверхности (0,279).

Отражения и рассеяния такая метаматериальная конструкция (как утверждают авторы работы [7]) также не должна давать в идеальном случае, поскольку вся волна проходит сквозь покрытие, как по пустому волноводу,

благодаря чему создаётся иллюзия «пустого пространства», словно на пути СВЧ-волны никакого объекта не было вовсе. Так как внутрь кольца СВЧ-волна не попадает, то там можно разместить какие-либо объекты, и их присутствие внутри кольца никак не должно сказаться на картине распространения волн СВЧ. Авторы демонстрируют это, помещая внутрь кольцеобразного метаматериального покрытия медный цилиндр диаметром пять сантиметров и высотой один сантиметр, абсолютно непрозрачный для электромагнитных волн.

В случае цилиндра без покрытия хорошо видна тень позади цилиндра и усиление цветовой картины поля впереди цилиндра за счёт отражения от него. На карте поля СВЧ с медным цилиндром, окружённым метаматериальным кольцом, тень позади объекта размывается, отражение вперёд от объекта также уменьшается, о чём свидетельствует ослабление цветовой интенсивности картины поля с фронтальной стороны от метаматериального покрытия.

В идеальном случае тень от медного цилиндра при окружении его метаматериальным кольцом должна была бы полностью исчезнуть. Но этого не происходит: некая размытая тень позади покрытия с медным цилиндром внутри всё же видна. Авторы объясняют это потерями в метаматериале.

Действительно: метаматериал состоит из большого числа метаатомов – кольцевых щелевых резонаторов (SRR), изготовленных из тонкой медной фольги толщиной 17 микрон, размещённой на диэлектрическом основании – гибком диэлектрике “Duroid 5870”, представляющем собой полиэтилентерефталатную плёнку, армированную стекловолоконной крошкой, и имеющую толщину 381 микрон. Так как медь является не идеальным проводником (не сверхпроводник) и обладает электрическим сопротивлением, то очень большая часть потерь приходится на это сопротивление. Также и диэлектрик не является идеальным: его тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10 ГГц равен 0,0012. В материале имеются и другие потери, свойственные всякому неидеальному (не теоретически рассчитанному) объекту. Здесь можно согласиться с авторами работы [7].

Оборудование и метаматериальный образец

Так как данное метаматериальное изделие показалось нам очень интересным объектом для исследований, да и все его размеры и параметры в упомянутой выше статье указывались достаточно чётко и однозначно, то мы выбрали его для изучения частотных свойств покрытий. Внешний вид метаматериального покрытия с медным цилиндром внутри показан ниже на рисунке 1.

Для исследования свойств предложенного в работе [7] американскими исследователями метаматериального изделия нами была разработана новая оригинальная экспериментальная установка визуализации картины распределения микроволнового поля в пространстве [8] (Рисунок 2). Такая установка позволяет получать в условных цветах картины величины электрической составляющей электромагнитного потока СВЧ мощности в окрестностях метаматериального изделия с заданным шагом в полярных координатах.



Рис. 1. *Метаматериальное покрытие с медным цилиндром внутри.*

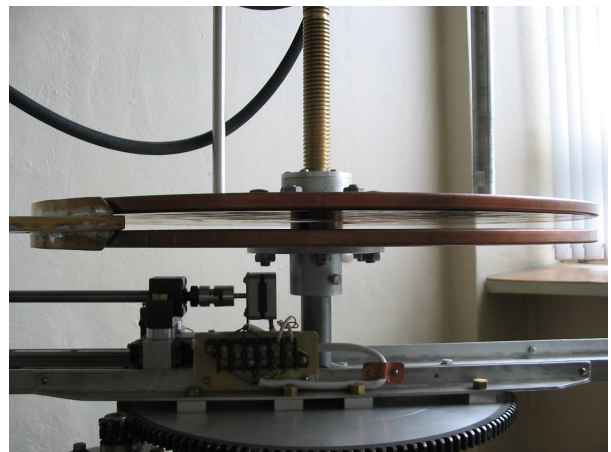


Рис. 2. *Измерительная камера установки визуализации СВЧ-полей.*

Изделие помещали в центр измерительной камеры нашей установки для визуализации картины электрических полей СВЧ, описание которой приводится в работе [8]. Из рупора с выходным сечением 1 см на 20 см СВЧ-сигнал с вертикальной поляризацией электрической составляющей подаётся в измерительную камеру – пространство между двумя параллельными медными

дисками, расположенными на расстоянии 11 – 12 миллиметров друг от друга. После прохождения по измерительной камере СВЧ-сигнал собирается стержневой антенной, перемещающейся двумя шаговыми двигателями как по радиусу, так и по дуге окружности (в полярных координатах). Эта стержневая антенна-зонд представляет собой конец тонкого полужёсткого коаксиального кабеля с загнутой вверх центральной жилой, очищенной от экранирующего внешнего трубчатого проводника. Далее собранный стержневой антенной сигнал по фазостабильному коаксиальному кабелю подаётся на Векторный Анализатор Цепей Р4М-18 Томской НПФ «Микран». Векторный Анализатор Цепей обрабатывает поступивший на него сигнал, измеряя его амплитуду и фазу. С помощью компьютерной программы, написанной нами специально для наших измерений на языке «Visual Basic 6.0», на экране компьютера в условных цветах рисуется картина (карта) электрического поля СВЧ в измерительной камере. Баклажаново-фиолетовый цвет соответствует минимумам (отрицательным максимумам) электрического поля СВЧ, а красный – положительным максимумам. Нулю напряжённости электрического поля соответствует зеленовато-голубая окраска экспериментальных точек на картине поля.

Таким образом, данная измерительная установка позволяет видеть на экране компьютера пространственную картину величины СВЧ поля в окружающем метаматериальном образце пространстве, отображаемую в условных цветах с некоторым заданным шагом, величину которого можно изменять при каждом измерении в некотором интервале.

Эксперимент и обсуждение результатов

Мы исследовали картины электрического поля СВЧ в пустой измерительной камере и для случая с медным цилиндром диаметром 50 мм и высотой 10 мм, который располагался в центре измерительной камеры, в диапазоне частот. (Рисунок 3).

Также мы получили серию картин распределения электрической компоненты СВЧ-поля для метаматериального покрытия с медным цилиндром

внутри на различных частотах. Размеры медного цилиндра во всех этих экспериментах также были равны тем, что приводятся в американской работе [7], где диаметр цилиндра 50 мм, а его высота 10 мм. При получении серии рисунков СВЧ-поля метаматериальное покрытие с медным цилиндром внутри размещалось в центре измерительной камеры нашей установки. Несколько образцов картин электрической составляющей СВЧ-поля для таких случаев представлены на рисунках 4 и 5.

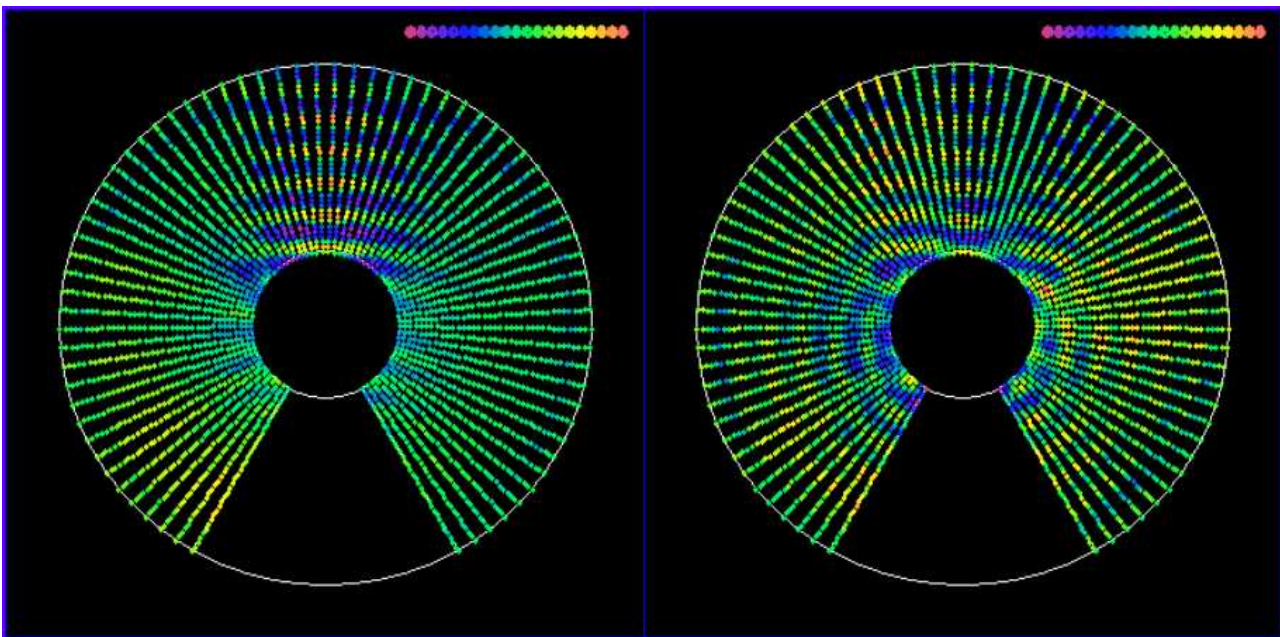


Рис. 3. Картина распределения величины мгновенных значений электрической составляющей микроволнового поля на частоте 10 ГГц в пустой измерительной камере установки визуализации СВЧ-полей (слева) и в измерительной камере той же установки, при помещении в её центр медного цилиндра диаметром 50 мм и высотой 10 мм (справа).

Также мы получили серию картин распределения электрической компоненты СВЧ-поля для метаматериального покрытия с медным цилиндром внутри на различных частотах. Размеры медного цилиндра во всех этих экспериментах также были равны тем, что приводятся в американской работе [7], где диаметр цилиндра 50 мм, а его высота 10 мм. При получении серии рисунков СВЧ-поля метаматериальное покрытие с медным цилиндром внутри размещалось в центре измерительной камеры нашей установки. Несколько образцов картин электрической составляющей СВЧ-поля для таких случаев

представлены на рисунках 4 и 5.

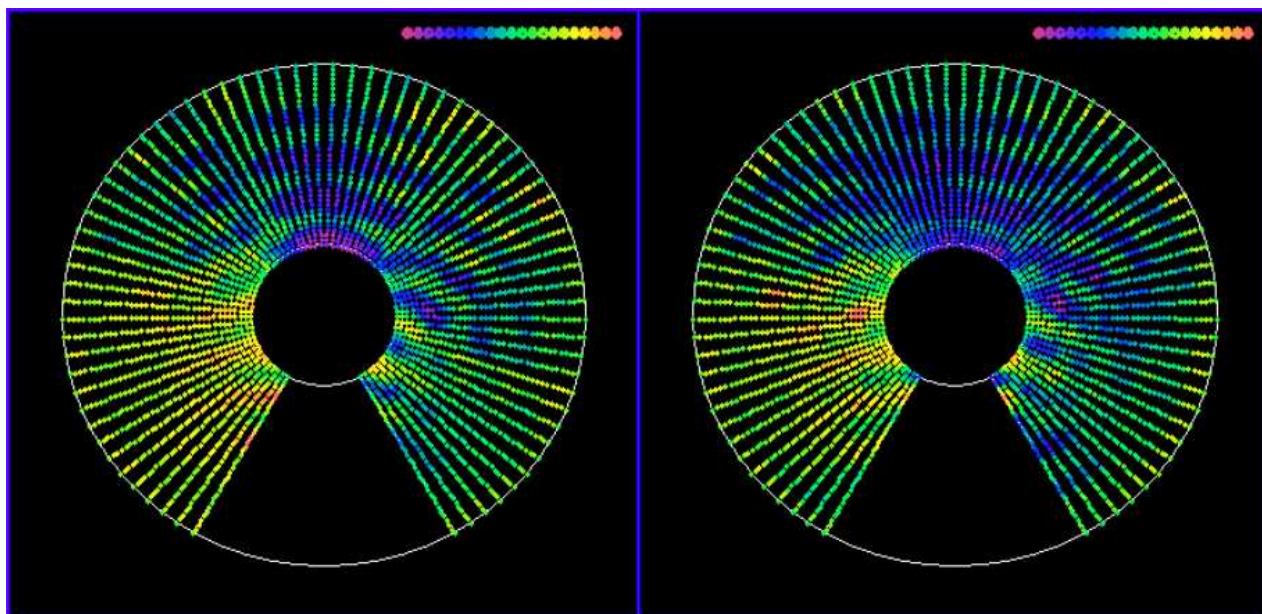


Рис. 4. Картины распределения мгновенных значений электрического микроволнового поля при частоте 7,3 ГГц вокруг пустого метаматериального покрытия (слева) и вокруг метаматериального покрытия с медным цилиндром внутри (справа). Центр медного цилиндра и центр метаматериального кольцеобразного покрытия совпадают с центром измерительной камеры установки визуализации микроволновых полей.

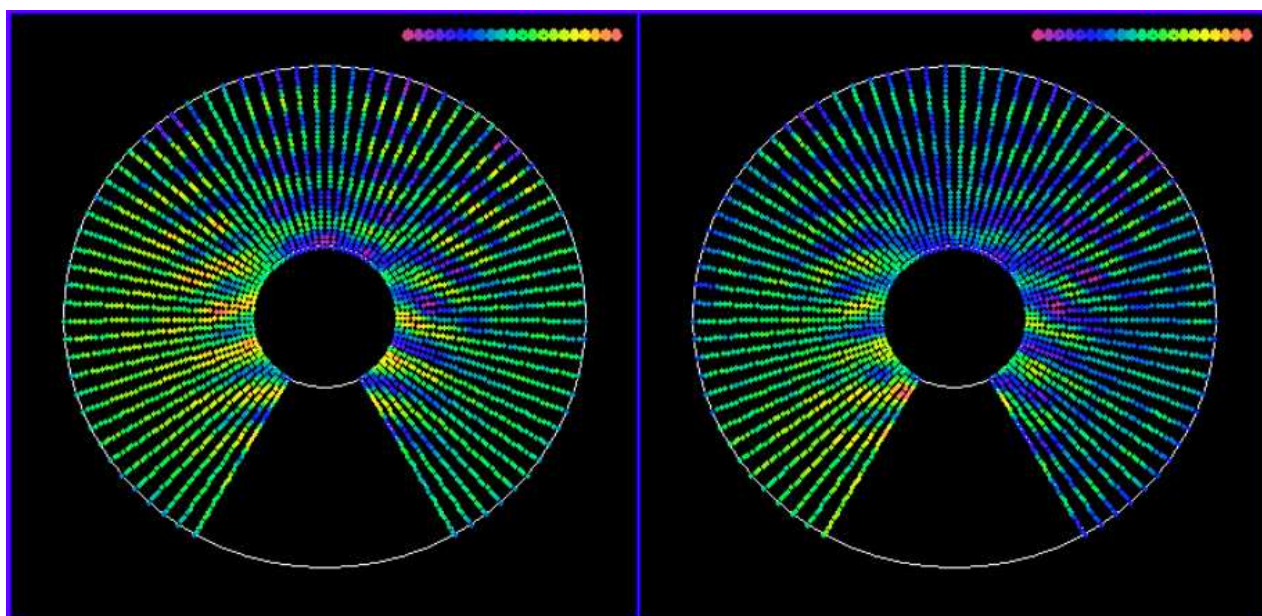


Рис. 5. Картины распределения мгновенных значений электрического микроволнового поля при частоте 7,4 ГГц вокруг пустого метаматериального покрытия (слева) и вокруг метаматериального покрытия с медным цилиндром внутри (справа). Центр медного цилиндра и центр метаматериального кольцеобразного покрытия совпадают с центром измерительной камеры установки визуализации микроволновых полей.

установки визуализации микроволновых полей.

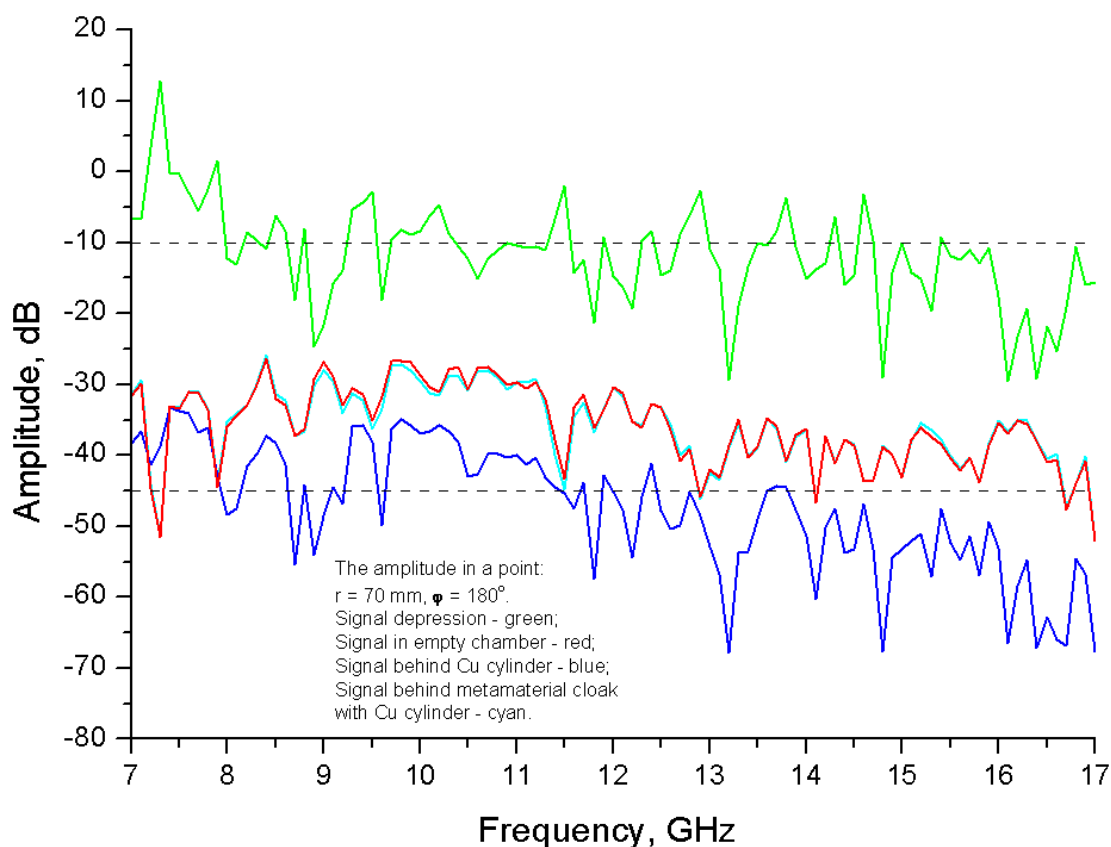


Рис. 6. Частотные зависимости напряжённости электрического поля в точке с координатами $r = 70 \text{ мм}$ и $\varphi = 180^\circ$, расположенной позади исследуемых объектов, в зоне тени. Синяя кривая соответствует непокрытому «голому» медному цилиндру; голубая – медному цилиндру, покрытому метаматериальным кольцом; красная – пустой измерительной камере. Зелёная кривая соответствует разности между синей и красной кривыми, показывая значительное ослабление сигнала в зоне тени. Красная и голубая кривые почти совпадают, что демонстрирует хорошие маскирующие свойства покрытия.

Нами были получены также зависимости напряжённости электрического поля СВЧ от частоты в точке, расположенной по азимуту 180° угловых градусов на расстоянии 70 мм от центра измерительной камеры, совпадающего с центрами как медного цилиндра, так и метаматериального кольца, то есть позади объекта, в теневой зоне. Для сравнения в этой же точке нами были сняты частотные зависимости напряжённости электрического поля СВЧ для непокрытого метаматериалом «голого» медного цилиндра и в пустой

измерительной камере. Кривые этих частотных зависимостей для всех трёх случаев представлены на рисунке 6. Путём поточечного вычитания кривых, соответствующих случаю непокрытого “голого” медного цилиндра и пустой измерительной камеры (пустого пространства), мы получили разностную кривую частотной зависимости напряжённости электрического поля СВЧ в данной точке позади объекта. Эта кривая демонстрирует заметное ослабление мощности сигнала СВЧ позади “голого” медного цилиндра, что соответствует образованию тени от него. Кривые частотных зависимостей для случаев покрытого метаматериалом медного цилиндра и пустой измерительной камеры (пустого пространства), как видно из рисунка, почти совпадают. Так при частоте 10 ГГц ослабление сигнала в точке с координатами 70 мм и 180 угловых градусов позади “голого” медного цилиндра составляет $-8,33211$ дБ, а позади медного цилиндра, покрытого метаматериальным кольцом, ослабление сигнала в той же точке составляет всего $-0,97751$ дБ.

Для идеального случая метаматериального покрытия, при тех частотах, где близки к нулю разницы величин электрического поля СВЧ для случаев метаматериального покрытия с медным цилиндром и пустой измерительной камеры (пустого пространства), указанная разница величин электрического поля СВЧ должна была бы вообще обратиться в ноль. Но, так как метаматериальное покрытие не идеально, обладает потерями, то кривые частотных зависимостей напряжённости электрической составляющей микроволнового поля для покрытия с цилиндром и пустого пространства всё же не совпадают, лишь незначительно отличаясь друг от друга.

Выводы

Таким образом, мы продемонстрировали с помощью нашей новой установки визуализации микроволновых полей в пространстве картины СВЧ-поля вокруг предложенного американцами метаматериального покрытия в диапазоне частот от 7 ГГц до 17 ГГц.

Было выявлено значительное ослабление тени позади покрытого метаматериалом медного цилиндра, что указывает на хорошие скрывающие

свойства данного покрытия при определённых частотах.

Авторы благодарят инженера Мерзлякова Г. В., механиков Лаборатории Электронной кинетики ИФТТ РАН за помощь в создании установки визуализации микроволновых полей, а также заведующего указанной лабораторией, профессора Трунина М. Р., за финансовую поддержку работы; фирму “Электропривод” (С.- Петербург) за поставку шаговых двигателей и механизмов прецизионных перемещений; научно-производственную фирму “Микран” (Томск) за поставку векторного анализатора цепей Р4М-18 и прочих СВЧ-компонентов, использованных в нашей установке визуализации; фирму “КТЦ-Микрокомплект” (Москва) и “EASCA” (Китай) за производство развёртки метаматериального образца.

Работа была выполнена при финансировании по Государственному Контракту № 02.740.11.0216 и при поддержке Программы РАН «Новые Материалы».

Литература

1. J. Valentine, S. Zhang, T. Zentgraf, E. Ulin-Avila, D. A. Genov, G. Bartal, and X. Zhang, *Nature (London)* **455**, 376–380 (2008).
2. Z. Liu, H. Lee, Y. Xiong, C. Sun, and X. Zhang, *Science* **315**, 1686 (2007).
3. B. D. F. Casse, W. T. Lu, Y. J. Huang, E. Gultepe, L. Menon, and S. Sridhar, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 023114 (2010).
4. W. T. Lu, S. Savo, B. Didier, F. Casse, and S. Sridhar, *Microwave Opt. Technol. Lett.* **51** (11), 2705–2709 (2009).
5. E. D. Gennaro, P. V. Parimi, W. T. Lu, S. Sridhar, J. S. Derov, and B. Turchinets, *Phys. Rev. B* **72**, 033110 (2005).
6. A. Degiron, J. J. Mock, and D. R. Smith, *Opt. Express* **15** (3), 1115–1127 (2007).
7. D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith, “Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies,” *Science* **314**, 977–980 (2006).
8. I. A. Karpov and E. D. Shoo, “New equipment for microwave electric field visualization”, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 074704 (2012).