

УДК 535.3, 537.8

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ КРИСТАЛЛЫ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

А. А. Федий, Д. А. Калганов, И. В. Бычков, А. В. Решетов

Челябинский государственный университет, физический факультет

454001, г. Челябинск, ул. Бр. Кашириных, 129

Статья поступила в редакцию 7 июля 2017 г.

**Аннотация.** Метаматериалы с отрицательным показателем преломления содержат, как правило, два типа элементов: длинные проводники (провода) и индуктивно-щелевые резонаторы (разрезные миниатюрные кольца). Система кольцевых резонаторов обуславливает задержку распространяющегося в метаматериале электромагнитного излучения. Это связано со сдвигом фазы на высокочастотном крыле амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) резонаторов. В образцах метаматериала исследованных нами вместо кольцевых резонаторов использовались полуволновые вибраторы. Измерения проводились в свободном пространстве с применением рупорных антенн в частотном диапазоне 8 – 12 ГГц. В работе экспериментально показано, что применяемая в образце метаматериала вибраторная решетка имеет широкую запрещенную полосу (9,3 – 11,0 ГГц), лежащую ниже резонансной частоты отдельных вибраторов (11,0 ГГц). Следовательно, в исследованных образцах на низкочастотном крыле запрещенной полосы для вибраторов выполняется условие  $l/\lambda < 0,5$ , где  $l$  – длина вибратора,  $\lambda$  – длина волны сканирующего излучения. Из теории вибраторных антенных решеток, характеристики которых исследованы и подробно описаны в многочисленных монографиях, известно, что в этом случае на вибраторах наблюдается параллельный резонанс. Фазовый сдвиг будет такой же, как у кольцевых резонаторов на высокочастотном крыле АЧХ. И на этих частотах задержка сигнала приведет к эффективному отрицательному значению магнитной проницаемости. Измерения угловой зависимости спектра пропускания призмы из метаматериала с вибраторами

показали, что наблюдается отрицательное преломление части спектра на частотах 9,2 – 9,5 ГГц, что соответствует низкочастотному крылу АЧХ вибраторной решетки. Для исследованного метаматериала эффективное значение показателя преломления  $n = -1,37 \pm 0,06$ .

**Ключевые слова:** метаматериалы, электромагнитные кристаллы, отрицательное преломление, вибраторы.

**Abstract.** Metamaterials with a negative refractive index contain, generally, two types of elements: long conductors (wires) and inductive–capacitive resonators (miniature split rings). The system of ring resonators causes a delay of propagation of electromagnetic waves in the metamaterial. This is due to the phase shift in the high frequency region of the amplitude-frequency characteristic (AFC) of the resonators. We used half-wave vibrators in our metamaterial samples instead of ring resonators. The measurements were carried out in a free-space using standard horn antennas in the frequency range 8 – 12 GHz. It has been shown experimentally that the vibrator array used in the metamaterial sample has a wide bandgap (9,3 – 11,0 GHz) located below the resonance frequency of individual vibrators (11,0 GHz). Consequently, for the investigated samples in the low-frequency region of the forbidden band for vibrators, the condition  $l/\lambda < 0.5$ , where  $l$  is the length of the vibrator, and  $\lambda$  is the wavelength of the electromagnetic radiation, is valid. From the theory of vibrator antenna arrays, the characteristics of which have been studied and described in detail in numerous monographs, it is known that in this case a parallel resonance is observed. The phase shift will be the same as for ring resonators in the high-frequency region of the AFC, and at these frequencies, the signal delay will lead to the negative value of the effective magnetic permeability. Angular dependence measurements of the electromagnetic waves transmission through the prism of the metamaterial with vibrators showed that negative refraction is observed at frequencies of 9,2 – 9,5 GHz, which corresponds to the low-frequency region of the frequency response of the vibrator array. Effective value of the refractive index for the studied metamaterial was  $n = -1,37 \pm 0,06$ .

**Keywords:** metamaterials, electromagnetic crystal, negative refraction, vibrator.

## 1. Введение

Основными структурными элементами метаматериалов с эффективными отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями, которые обеспечивают отрицательный показатель преломления [1], являются две группы элементов. Во-первых, длинные проводники (стержни или проволоки) образуют подрешетку с отрицательной эффективной диэлектрической проницаемостью. Во-вторых, структуру, отвечающую за отрицательную эффективную магнитную проницаемость, образуют индуктивно-щелевые микрорезонаторы (разрезные плоские колечки, аббревиатура SRR в англоязычной литературе [2-4]). Элементарная ячейка такого метаматериала содержит оба типа элементов. Микрорезонаторы имеют выраженные резонансные характеристики. Добротность микрорезонаторов составляет несколько сот единиц, и они при возбуждении переизлучают на частотах, определяемых собственной добротностью, что приводит к задержке распространяемого сигнала.

В подавляющем большинстве экспериментальных работ в качестве магнитных элементов используют разрезные колечки одиночные или сдвоенные [3,4]. В работах [5,6] приведена схема трансформации индуктивно-щелевого резонатора в резонатор, состоящий из двух параллельных проводящих полосок. Фактически это два вибратора с электромагнитной связью, широко известные в антенной технике [7,8].

Полуволновый вибратор  $l/\lambda=0,5$  ( $l$  – длина проводящего стержня,  $\lambda$  – длина волны) в экваториальной плоскости имеет круговую диаграмму направленности. При резонансном возбуждении в вибраторе протекают токи, которые излучают в окружающее пространство и круговое магнитное поле. Т.е. полуволновые вибраторы можно применить в метаматериалах в качестве магнитных элементов [5].

Электромагнитные кристаллы простейшей структуры (рис. 1а) исследованы детально. Характерной особенностью спектров пропускания  $T(f)$  таких метаматериалов является зонная структура: имеются запрещенные зоны,

которые трактуются как частотные области с отрицательной диэлектрической проницаемостью [9].

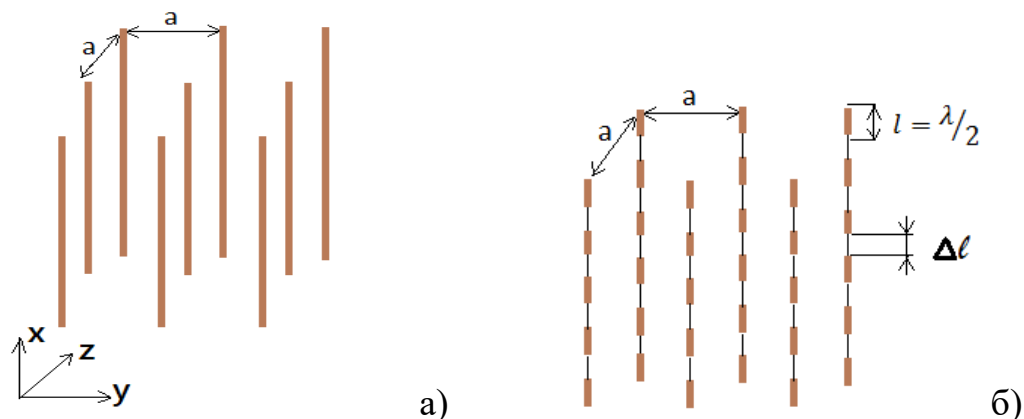


Рис. 1. Структура электромагнитного кристалла (а) [9], и кристалла из вибраторов (б)

В представляемой работе исследовался спектр пропускания кристалла, состоящего из двух квадратных подрешеток: из длинных проволок (рис. 1а) и цепочек полуволновых вибраторов (рис. 1б). Найден частотный интервал и постоянная решетки  $a$ , при которых наблюдалась спектральная линия  $T(f)$  при отрицательном преломлении.

### 1. Метод исследований

Исследования проводились в частотном диапазоне 8 – 12 ГГц на скалярном измерителе модуля коэффициентов отражения и передачи P2M-40. Измерения проводились в свободном пространстве с использованием рупорных антенн. Схема установки приведена на рис. 1.

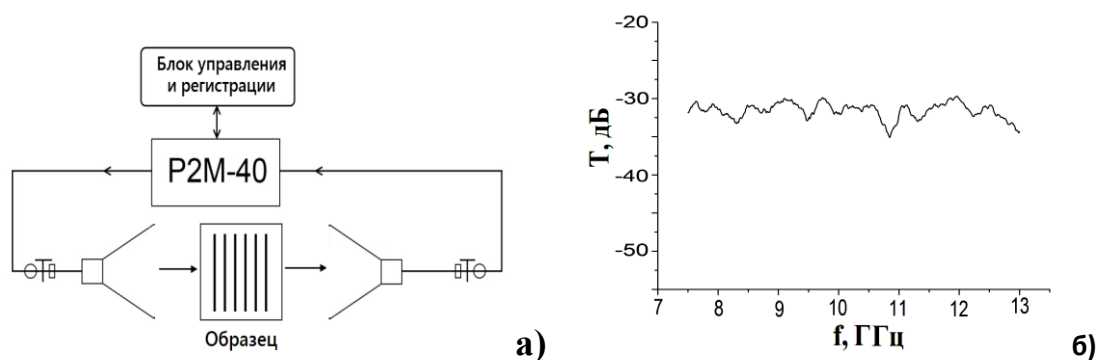


Рис. 2. Функциональная схема установки для измерений частотной зависимости коэффициента пропускания (а); калибровочная кривая при расстоянии между антеннами примерно 80 см.

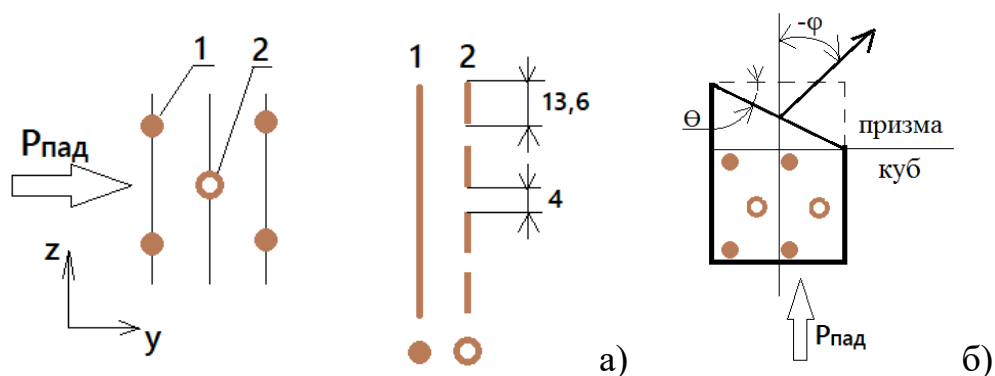


Рис. 3. Фрагмент структуры образца с подрешетками из проволок и вибраторов (а); схема измерений угловой зависимости  $T(f)$  (б). 1 – длинные проволоки; 2 – цепочки вибраторов.

Основной образец исследуемого электромагнитного кристалла имел габаритные размеры  $160 \times 160 \times 160$  мм с подрешетками из проволок и вибраторов и структуру, показанную на рис.3а. Проволочная подрешетка состояла из проволок длиной 160 мм диаметром 0,71 мм. Полуволновые вибраторы длиной 13,6 мм ( $f_{рез}=11$  ГГц) были собраны в цепочки. Подрешетка вибраторов сдвинута по осям  $y$ ,  $z$  на  $a/2$ . Подрешетки проволок и вибраторов образовывали каждая квадратную структуру с постоянной  $a \times a = 21 \times 21$  мм.

Угловая зависимость спектра пропускания  $T(f)$  измерялась на образце в виде призмы, схематически изображенном на рис. 3б, угол при вершине призмы  $\theta=28^\circ$ . Измерения для нахождения оптимального значения постоянной решетки  $a$ , а также влияния резонансных характеристик вибраторов на спектры  $T(f)$  проводились на кубических образцах (рис. 3а – часть образца, обозначенная как куб). Сканирующее СВЧ излучение направлялось на образец по нормали к плоскости, в которой лежали проволоки или цепочки вибраторов, вектор  $\mathbf{E}$  параллелен проволокам. Все элементы образцов крепились в пенополистирольной матрице ( $\epsilon \approx 1,01$ ), которая не влияла на результаты измерений.

## 2. Результаты экспериментов и обсуждение

Для оценки влияния вибраторной решетки на спектр пропускания электромагнитного кристалла Был проведен ряд предварительных экспериментов. Были измерены мплитудночастотные характеристики (АЧХ)

вибраторных решеток: одно-, двух- и пятислойных. Результаты отображены на рис. 4 и рис. 5. Имеется сильная электромагнитная связь между близко расположенными вибраторами (рис. 4б), а в многослойной вибраторной решетке появляется еще и слабая связь. Поэтому в многослойной решетке АЧХ имеет вид широкой полосы  $\approx 1,6$  ГГц (рис. 5).

Спектр пропускания кристалла из цепочек вибраторов с постоянной решетки  $a$  (рис. 1) отличался от спектра электромагнитного кристалла с такой же постоянной решетки  $a$  появлением запрещенной полосы, определяемой АЧХ вибраторной решетки (рис. 6).

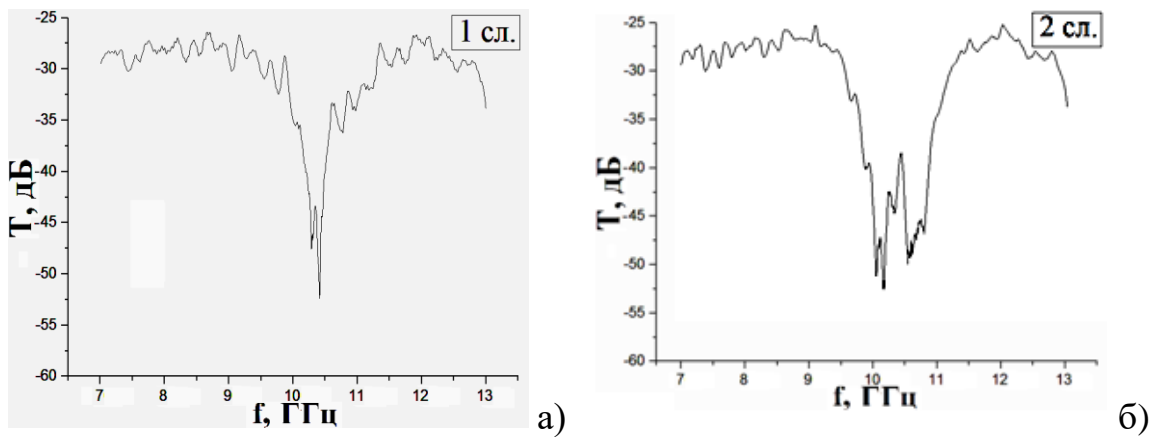


Рис. 4. АЧХ однорядной однослойной (а) и двухслойной (б) вибраторных решеток.

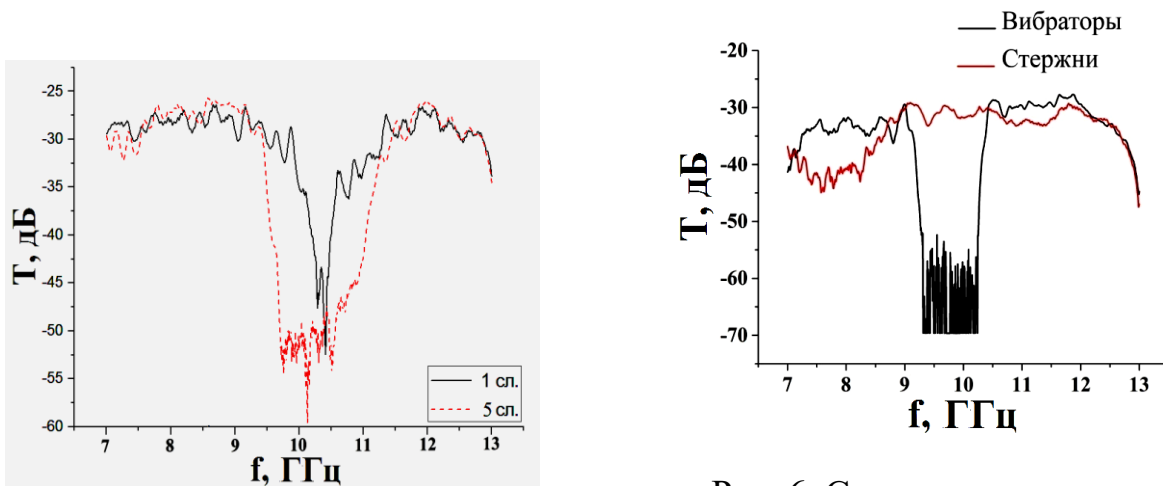


Рис. 5. АЧХ однослойной и пятислойной вибраторных решеток.

Рис. 6. Спектр пропускания электромагнитного кристалла (рис. 1а) и кристалла из вибраторов (рис. 1б).

Спектр пропускания основного образца, как уже отмечалось, включающего две подрешетки с постоянной решетки  $a=21$  мм, показан на рис. 7а. На том же рис. 7б показан спектр отклоненного к вершине призмы на  $-68^\circ \pm 2^\circ$  луча. Это возможно только при отрицательном показателе преломления метаматериала призмы. Простые вычисления дают значение  $n = -1,37 \pm 0,06$ .

Спектр пропускания подрешетки из длинных проволок начинается с частоты 10 ГГц. Запрещенная полоса вибраторной подрешетки 9,2 – 11,3 ГГц.

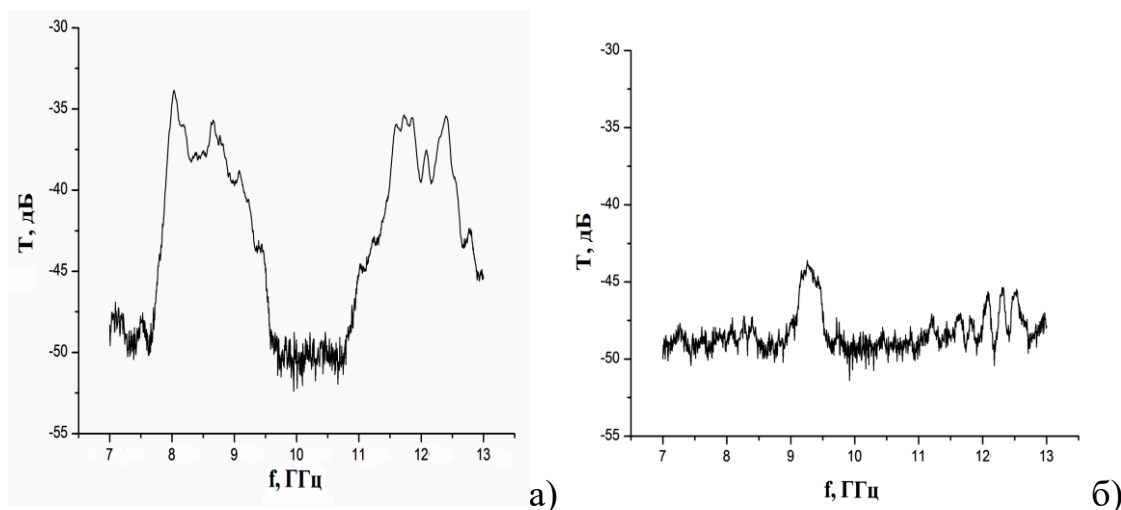


Рис.7. Спектр  $T(f)$  метаматериала, содержащего две подрешетки: из длинных проводников и подрешетки полуволновых вибраторов (а), и спектр луча, отклоненного на  $-68^\circ$  к вершине призмы (б).

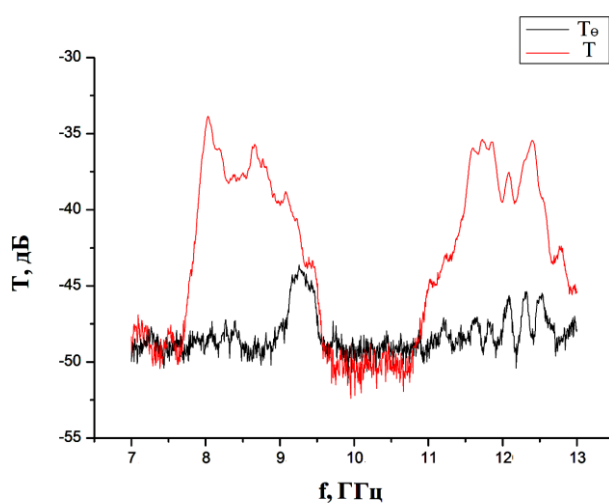


Рис. 8. Сопоставление спектров  $T(f)$  метаматериала и отклоненного луча призмой.

Следовательно, отклоненный призмой луч лежит в запрещенной частотной области обеих подрешеток, в той области где и  $\epsilon$  и  $\mu$  отрицательны. Что в запрещенной области  $T(f)$  электромагнитного кристалла  $\epsilon$  отрицательно следует из работ [9,10]. В частотной области 9,2 – 9,5 ГГц для вибраторов выполняется условие  $l/\lambda < 0,5$  и наблюдается параллельный резонанс [7,8]. То есть реакция вибраторов магнитная, и вибраторная подрешетка имеет эффективное отрицательное  $\mu$ .

Таким образом, метаматериал с регулярной структурой из длинных проволок и полуволновых пассивных вибраторов может иметь отрицательный показатель преломления в СВЧ области.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-07-08111А.

### Литература

1. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями  $\epsilon$  и  $\mu$  // УФН. – 1967. – Т. 92. – Вып. 3. – С. 517-526
2. Харди, Уайтхед. Резонатор типа разрезанного кольца для исследования магнитного резонанса в диапазоне 200...2000 МГц // Приборы научных исследований – 1981. - №2. – С 64-68.
3. D.R. Smith et.al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity // Phys. Rev. Lett. – 2000. – Vol. 84. – No. 18. – P. 4184-4187.
4. J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, W.J. Stewart Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1999. – Vol. 47. – No. 11. – P. 2075-2084.
5. G. Dolling, C. Enkrich, M. Wegener, J. Zhou, C.M. Soukoulis, S. Linden Cut-wire pairs and plat pairs as magnetic atoms for optical metamaterials //Opt. Lett. – 2005. – Vol. 30. – No. 23. – P. 3198-3200.
6. О.Д. Вольпян, А.И. Кузьмичев Отрицательное преломление волн. Введение в физику и технологию электромагнитных материалов / Под ред. Г.М. Зверева. – К.-М.:Аверс, 2012. – 360 с.



7. Д.И. Воскресенский, В.Л. Гостюхин, В.М. Максимов, Л.И. Пономарев  
Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д.И. Воскресенского. Изд. 2-е, доп. и  
перераб. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.: ил.
8. Г.С. Горелик Колебания и волны / Под ред. С. М. Рытова – М.:  
ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 656 с.
9. P.A. Belov, S.A. Tretyakov, A.J., Viitanen. J. Dispersion and reflection properties  
of artificial media formed by regular lattices of ideally conducting wires, *Waves  
and Appl.* 2003. Vol.16. № 8, pp. 1153-1170.
10. С.Е. Банков Электромагнитные кристаллы. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.–352 с.

**Ссылка на статью:**

А. А. Федий, Д. А. Калганов, И. В. Бычков, А. В. Решетов. Электромагнитные кристаллы с отрицательным показателем преломления. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. №9. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/4/text.pdf>