

УДК 537.874.6

## СВЧ ФОТОННЫЙ КРИСТАЛЛ ИЗ СПИРАЛЕЙ

В. И. Голованов<sup>1</sup>, А. П. Мартынов<sup>2</sup>, К. Ф. Шипилов<sup>3</sup>

*Исследованы особенности распространения микроволнового излучения в диапазоне частот от 8.5 до 12 ГГц через двумерную периодическую структуру из цилиндрических спиральных катушек. Измерена частотная зависимость эффективного показателя преломления  $n_{\text{эф}}$  структуры. Отмечены особенности измерения и оценки отражательной способности структуры в разных областях исследуемого диапазона частот. В диапазоне частот, где значения  $n_{\text{эф}} \sim 0$ , зарегистрирована поверхностная волна, распространяющаяся вокруг структуры.*

**Ключевые слова:** двумерная периодическая структура, отрицательное преломление, спиральные катушки, фотонный кристалл.

Хорошо известны возможности практического применения фотонных кристаллов в СВЧ-диапазоне [1–4], например такие, как высоконаправленные резонансные антенны, различные виды фильтров, замедляющие системы, согласованные нагрузки, экранирующие оболочки и др. Для реализации и демонстрации отрицательного преломления в метаматериалах в 2000 году [5] была предложена комбинация из разорванных колец, предназначенных для возбуждения магнитного момента, и медных штырей – для возбуждения электрического дипольного момента. Разорванные кольца, нагруженные кольца, двойные разорванные кольца, спирали, бифилярные спирали использовали для создания эффективной магнитной проницаемости. Традиционно эти периодические структуры исследуют в узком диапазоне частот, тогда как для различных практических приложений могут быть интересны их свойства в широком диапазоне частот.

В настоящей работе для формирования двухмерной периодической системы (фотонного кристалла) использованы цилиндрические спиральные катушки (соленоиды), имеющие 30 витков из медной проволоки диаметром 2.5 мм. Внешний диаметр витка

<sup>1</sup> ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38.

<sup>2</sup> АО ЦНИРТИ им. А. И. Берга, 107078 Россия, Москва, Новая Басманная, 20, стр. 9.

<sup>3</sup> НЦВИ ИОФ РАН, 119991 Россия, Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kfship@kapella.gpi.ru.

соленоида 20 мм, шаг намотки 5 мм и высота соленоида  $\sim 150$  мм. Соленоиды закреплены соосно и образуют в поперечном сечении двухмерную треугольную периодическую структуру класса  $p_3$  – фотонный кристалл в виде плоскопараллельной пластины с внешними размерами  $90 \times 170 \times 150$  мм<sup>3</sup>. Постоянная треугольной структуры  $a = 30$  мм. Соленоиды закручены в одну сторону. Известно, что такие спиральные структуры обладают богатым набором электродинамических свойств [6].

Для измерения частотной зависимости эффективного показателя преломления фотонного кристалла в диапазоне частот 8.5 – 12 ГГц использован волноводный двухлучевой гибридный интерферометр, описанный ранее в работах [6, 7]. Выходы двух волноводных плеч, одно – с исследуемым образцом, другое – с калиброванным аттенюатором, соединены между собой волноводной измерительной линией с отсчетным перемещением детекторной головки с погружным зондом. В измерительных линиях обычно используют зонд штыревого типа, который возбуждается электрической составляющей поля в линии, при этом стремятся, чтобы мощность, отбираемая зондом, не превышала 2% от мощности излучения, передаваемого по линии в режиме бегущей волны. Зонд нагружен на детекторный СВЧ диод, сигнал с которого на частоте 1 кГц (частота модуляции СВЧ сигнала генератора) подается на селективный нановольтметр. Таким образом, перемещая зонд, можно регистрировать минимумы или максимумы интерференционной картины поля в измерительной линии. Для возбуждения двухлучевого волноводного интерферометра использован волноводный направленный ответвитель, который устраняет переотражения и уменьшает коэффициент стоячей волны в плечах. Для подавления стоячей и отраженных волн между ответвителем и волноводным выходом генератора (ГЗ-26) установлен ферритовый вентиль.

Проведенная калибровка интерферометра с помощью пластины из плавленого кварца показала, что погрешность измерений показателя преломления в диапазоне частот 9–12 ГГц не превышает 10%, рис. 1.

Разность геометрических путей излучения в плечах интерферометра описывается следующим соотношением:

$$L_{rw} - L_{mw} + L_{ms}(1 - n_x/n) = 2Y, \quad (1)$$

где  $L_{rw}$  и  $L_{mw}$  – соответственно длины опорного и измерительного волноводных плеч,  $L_{ms}$  – длина волноводного разрыва измерительного плеча, в нашем случае практически длина измеряемого образца,  $n_x$  и  $n$  – соответственно показатели преломления измеря-

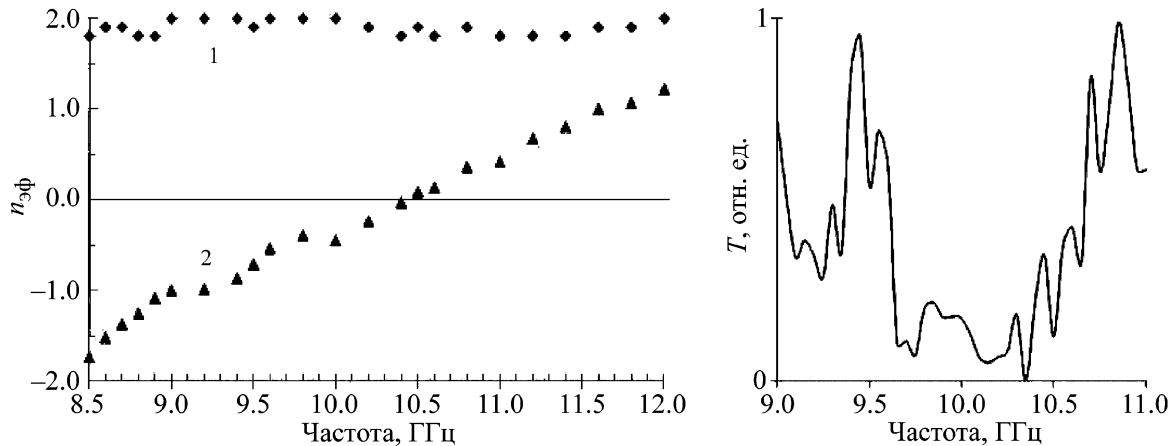


Рис. 1: Частотные зависимости: 1 – показателя преломления кварцевой пластины; 2 – эффективного показателя преломления фотонного кристалла в направлении  $[110]$ .

Рис. 2: Частотная зависимость коэффициента пропускания фотонного кристалла в направлении  $[110]$ .

емого образца и волновода,  $Y$  – отсчет положения зонда измерительной волноводной линии. Показатель преломления волновода определяет соотношение:

$$n = (1 - \lambda^2/\lambda_{\text{cr}}^2)^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве,  $\lambda_{\text{cr}}$  – критическая длина волны в волноводе, которая для основной моды равна удвоенной ширине широкой стенки волновода. Измерения эффективного показателя преломления фотонного кристалла проведены по трем направлениям  $[110]$ ,  $[1\bar{1}0]$ ,  $[100]$ .

На рис. 1 представлены измеренные частотные зависимости эффективного показателя преломления фотонного кристалла вдоль направления  $[110]$  и показателя преломления кварцевой пластины толщиной 10 мм, использованной как эталон.

Проведено исследование частотной зависимости коэффициента пропускания фотонного кристалла. Источником СВЧ излучения служил генератор ГЗ-26 с выходной мощностью излучения до 10 мВт и внутренней модуляцией на частоте 1 кГц, выходной сигнал которого поступал на широкополосный усилитель мощности. Использованный усилитель обладает высоким и равномерным усилением до 40 дБ в широкой полосе частот от 4 до 12 ГГц и дает высокую выходную мощность до 5 Вт. Он имеет температурную компенсацию усиления. Выходной разъем усилителя через коаксиально-волноводный переходник был нагружен или на конический рупорный излучатель длиной 100 мм с

круглым поперечным сечением и выходной апертурой диаметром 30 мм, или на отрезок открытого волновода. Измерения проведены в направлениях  $[110]$  и  $[1\bar{1}0]$ .

На рис. 2 представлена частотная зависимость коэффициента пропускания фотонного кристалла в направлении  $[110]$  в диапазоне от 8.5 до 11.5 ГГц. В диапазоне частот от 10.5 до 11.5 ГГц периодическая структура дает сильное рассеяние. В то же время, в этом частотном диапазоне зарегистрированы максимумы прошедшего через структуру излучения, которые обусловлены интерференционным резонансным пропусканием фотонного кристалла, если рассматривать его как однородную сплошную плоскопараллельную пластину, толщина которой, в направлении распространения излучения, кратна половине длины волны излучения в среде. Для описания коэффициента пропускания такой плоскопараллельной пластины воспользуемся формулой Эйри:

$$T = \frac{(1 - R)^2}{(1 - R)^2 - 4R \sin^2 \delta}, \quad (3)$$

где  $R$  – отражательная способность поверхности пластины,  $R = ((n_x - 1)/(n_x + 1))^2$ ;  $\delta = 4\pi n_x h / \lambda_0(f)$ ,  $n_x$  – измеренный эффективный показатель преломления,  $\lambda_0(f)$  – длина волны излучения в воздухе,  $h$  – толщина пластины. При оценке отражательной способности  $R$  возникли некоторые трудности. В диапазоне частот, где эффективный показатель преломления становится отрицательным, оценки по традиционным соотношениям дают значения  $R$ , стремящиеся к бесконечности, тогда как она не может быть больше 1. Это подтверждают и наши измерения в этой области частот, здесь  $R \leq 1$ . Кроме того, в работе [9] отмечено, что в средах, где показатель преломления принимает отрицательные значения, в формулах Френеля, при вычислении коэффициента отражения, необходимо использовать не показатели преломления, а импедансы. С помощью двухлучевого интерферометра мы смогли достоверно измерить только изменения с частотой разностей геометрических путей излучения в плечах интерферометра и оценить частотные зависимости эффективного показателя преломления фотонного кристалла. Поэтому мы оценивали  $R$  и, соответственно  $T$ , только в диапазонах, где  $R$  принимает разумные значения меньше 1, но больше 0.

На рис. 3 представлена рассчитанная с учетом измеренных значений эффективного показателя преломления (рис. 1) частотная зависимость коэффициента пропускания пластины. На рис. 3 показана также измеренная экспериментально частотная зависимость коэффициента пропускания фотонного кристалла вдоль направления  $[110]$ .

В области частот, где эффективный показатель преломления приближается к нулевому значению для нормального направления к поверхности структуры, наблюдает-

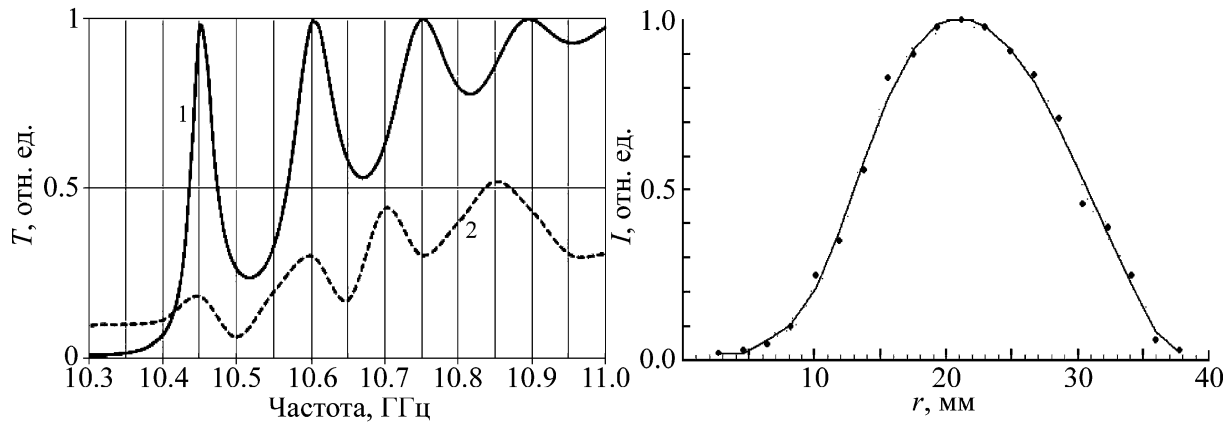


Рис. 3: Частотные зависимости коэффициента пропускания фотонного кристалла вдоль направления [110] в диапазоне частот, где  $n_{\text{эф}} > 0$ : 1 – расчёт; 2 – эксперимент.

Рис. 4: Нормированное пространственное распределение интенсивности излучения с частотой 9.3 ГГц, сфокусированного фотонным кристаллом на расстоянии, равном половине толщины кристалла, от его выходной границы.

ся появление проходящего сигнала, что можно объяснить тем, что падающий пучок имел заметную дифракционную расходимость и мог просачиваться через кристалл. Это обстоятельство подтверждает прохождение излучения в этой области частот, если повернуть фотонный кристалл на небольшой угол относительно основного направления распространения пучка излучения. Кроме того, в этой области частот обнаружено возбуждение поверхностной волны, распространяющейся вдоль внешней поверхности структуры.

В диапазоне частот, где эффективный показатель преломления отрицательный, наблюдали фокусировку расходящегося пучка излучения из выходного торца волновода. На рис. 4 представлено распределение сфокусированного излучения с частотой 9.3 ГГц, где  $n_{\text{эф}} \approx -1$ , на расстоянии, равном половине толщины фотонного кристалла, от его выходной границы.

Кроме того, проведено исследование влияния постоянного магнитного поля с индукцией  $\sim 10$  мкТл вдоль направления [100] на эффективный показатель преломления фотонного кристалла в направлении [110]. Наблюдали уверенное смещение нулевого отсчета положения зонда измерительной волноводной линии, но для надежных измерений необходимо увеличить индукцию магнитного поля. К сожалению, электромагниты

дают существенную наводку на тракт измерения с селективным нановольтметром, поэтому необходимо модернизировать систему измерений.

Проведённые экспериментальные измерения показали, что изготовленный образец структуры с двумерной периодичностью, несмотря на неоднородность его структурных элементов, может обеспечить фокусировку СВЧ-пучка и его можно однозначно характеризовать эффективным показателем преломления. Предварительные исследования магнитного влияния на лучевые параметры структуры открывают возможность магнитного управления амплитудно-частотными характеристиками СВЧ фотонных кристаллов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-02-00675.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] E. Ozbay, B. Temelkuran, and M. Baayindir, *Progress in Electromagnetics Research* **41**, 185 (2003).
- [2] C. A. Kuriazidou, H. F. Contopanagos, and N. G. Alexopoulos, *IEEE Transactions on microwave theory and techniques* **49**(2), 297 (2001).
- [3] G. W. Burns, I. G. Thayne, J. M. Arnold, *Improvement of Planar Antenna Efficiency when Integrated with a Millimetre-Wave Photonic*. Proc. of European Conference on Wireless Technology (Amsterdam, Netherlands, 2004), p. 229. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1394812/>
- [4] Wu Hsien-Shun, Ching-Kuang C. Tzuang, *Miniaturized High-Gain Synthetic Rectangular Waveguide Antenna of Near-Omnidirectional Radiation* in: Proc. of 34-rd European Microwave Conf. (Amsterdam, Netherlands, 2004), vol. 2, p. 1189. <http://www.eumwa.org/en/knowledge-centre/knowledge-centre.html?doctype=EuMC&keyword=&author=Hsien-Shun+Wu>.
- [5] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, et al., *Phys. Rev. Lett.* **84**, 4184 (2000).
- [6] Б. З. Каценеленбаум, Е. Н. Коршунова, А. Н. Сивов, А. Д. Шатров, *УФН* **167**(11), 1201 (1997).
- [7] E. A. Vinogradov, G. I. Vinogradova, V. I. Golovanov, et al., *Physics of Wave Phenomena* **20**(4), 30 (2012).
- [8] V. I. Golovanov, D. M. Mazo, A. P. Martynov, and K. F. Shipilov, *Physics of Wave Phenomena* **24**(4), 1 (2016).
- [9] V. Veselago, L. Braginsky, V. Shklover, and Ch. Hafner, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* **3**, 1 (2006).

Поступила в редакцию 19 декабря 2017 г.