

онопная линза с  $\lambda = 31.8$  – которая получает название П-мо 88.1 модема и куплена у дистрибутора. В качестве квазиапоставленной монтировки использовалась кассета из пластика с отверстиями для оптических элементов. УДК 537.874.4;534.18;534.1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПЛОСКИХ ЛИНЗ С ПОМОЩЬЮ РАДИОВИЗОРА

Е. А. Виноградов, В. А. Бабинцев, В. Г. Веселаго,

В. И. Голованов, К. Ф. Шипилов

*Исследована фокусировка плоскими линзами с отрицательным преломлением, образованными гексагональной структурой из металлических цилиндрических стержней, электромагнитного излучения точечного источника с длиной волны 3 см. Пространственное распределение СВЧ- поля в поляризации H поляризации в фокальной плоскости линзы регистрировали экраном радиовизора, который преобразует его в видимое изображение. Полная ширина распределения на полувысоте фокального пятна при оптимальной фокусировке не превышала половины длины волны излучения.*

В настоящее время активно развиваются новое научное направление – электродинамика структурированных сред с отрицательным преломлением (метаматериалы). Один из нас показал [1], что плоский слой среды с отрицательным преломлением может безберрационно фокусировать изображение точечного источника. Недавно, менее пяти лет тому назад, это направление стало развиваться в акустике [2, 3]. В [4] экспериментально была получена фокусировка изображения источника звука в дальней зоне акустического кристалла, образованного гексагональной решеткой металлических цилиндров в воздухе в виде плоского слоя, который по аналогии может быть назван фононным кристаллом. Перспективой развития этого направления является продвижение в инфракрасный и оптический диапазоны электромагнитных волн.

В [5] исследован фотонный кристалл, представляющий собой периодическую, с треугольной элементарной ячейкой, матрицу из цилиндрических медных стержней высотой

и диаметром 1.26 см. Постоянная треугольной решетки – 3.15 см. Измерения выполнены в волноводе, образованном парой металлических пластин. В волноводе возбуждали поперечную ТМ-моду, так что электрическое поле было параллельно оси стержней. Для измерения угла преломления с помощью дипольной антенны фотонный кристалл был сформирован в виде призмы. Исследования во второй зоне Бриллюэна вдоль направления Г – К на частотах 7–11 ГГц показали, что структура обладает отрицательным показателем преломления, что хорошо согласуется с численными расчетами.

В [6] изучен фотонный кристалл с квадратной структурой элементарной ячейки (периодичность по обоим направлениям 4.79 мм), образованный диэлектрическими стержнями ( $\epsilon = 9.61$ ) в воздухе. Радиус стержней – 1.6 мм, высота – 150 мм. Согласно анализу такая структура должна обладать в первой зоне Бриллюэна для ТМ поляризации отрицательным показателем преломления в диапазоне частот 13–15.44 ГГц. Эксперимент проведен с фотонным кристаллом, имевшим 17 слоев вдоль направления распространения электромагнитной волны с частотой 13.968 ГГц и 21 слой в поперечном направлении. Измеренный с помощью монопольной антенны отрицательный показатель преломления составил –1.94. Этот фотонный кристалл был использован для демонстрации фокусировки им излучения монопольной антенны, как точечного источника, в дальней зоне плоского слоя с отрицательным преломлением. Приемником также служила монопольная антenna. Полная ширина распределения на половине интенсивности электромагнитного поля в фокусе составила  $0.21\lambda$ .

В [6], с помощью аналогичных методов измерения, также исследован металлодиэлектрический фотонный кристалл, в котором основания металлических и диэлектрических стержней располагали в точках диагонали квадратной элементарной ячейки. Использованы цилиндрические стержни из окиси алюминия с  $\epsilon = 9.61$  и радиусом 1.55 мм и алюминиевые стержни с радиусом 1.5 мм. Оба типа стержней были высотой 150 мм. Постоянная квадратной решетки  $\sim 10.7$  мм. На частоте электромагнитного поля 9.70 ГГц также измерены отрицательные показатели преломления структуры в широком диапазоне углов падения пучка на поверхность кристалла и получена фокусировка пучка в дальней зоне.

В [7] исследован металлодиэлектрический фотонный кристалл, образованный цилиндрическими стержнями с металлической сердцевиной и диэлектрической оболочкой, которые помещены в пенопластовую пластину. Радиус металлической медной сердцевины 3 мм, толщина внешней оболочки 2.2 мм и ее диэлектрическая постоянная 7.0, постоянная треугольной элементарной ячейки 12 мм. В экспериментах использована ТМ-мода

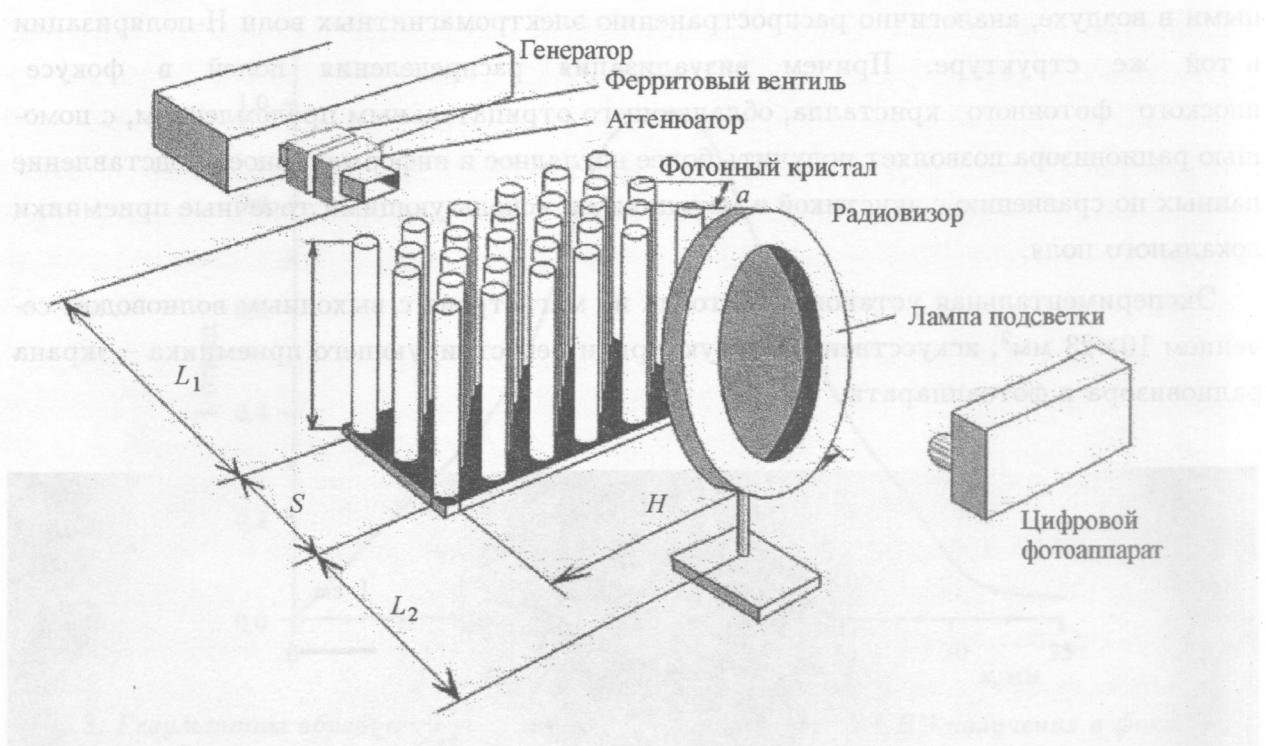


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

СВЧ излучения на частоте 12.7 ГГц. В качестве источника и приемника излучения служили монопольные антенны, изготовленные из коаксиального кабеля, у которого внутренняя проводящая жила (0.8 мм в диаметре) была соединена с медным стержнем (около 3 мм диаметром и 10 мм высотой). Кристаллическая структура имела высоту 110 мм, ширину 400 мм и толщину 75 мм. Измеренный отрицательный показатель преломления был близок к  $-1$  и структура фокусировала изображение источника излучения в дальней зоне с поперечной полушириной центрального пика распределения интенсивности  $\sim 0.5\lambda$ .

Эти работы, а также некоторые аналогичные им, объединяют одно обстоятельство – дискретные системы измерения пространственного распределения интенсивности электромагнитного излучения, которые обладают рядом недостатков.

Цель настоящей работы – исследование пространственной структуры распределения полей в фокусе фотонного кристалла, аналогичного акустическому [4], с помощью радиовизора, позволяющего получить распределение полей электромагнитного излучения СВЧ-диапазона в реальном масштабе времени. Распространение волн в акустическом кристалле, образованном металлическими цилиндрическими стержнями, расположены

ными в воздухе, аналогично распространению электромагнитных волн Н-поляризации в той же структуре. Причем визуализация распределения полей в фокусе плоского фотонного кристалла, обладающего отрицательным преломлением, с помощью радиовизора позволяет получить более наглядное и информативное представление данных по сравнению с акустикой и методиками, использующими точечные приемники локального поля.

Экспериментальная установка состояла из магнетрона с выходным волноводом сечением  $10 \times 23 \text{ мм}^2$ , искусственной структуры и регистрирующего приемника – экрана радиовизора и фотоаппарата.

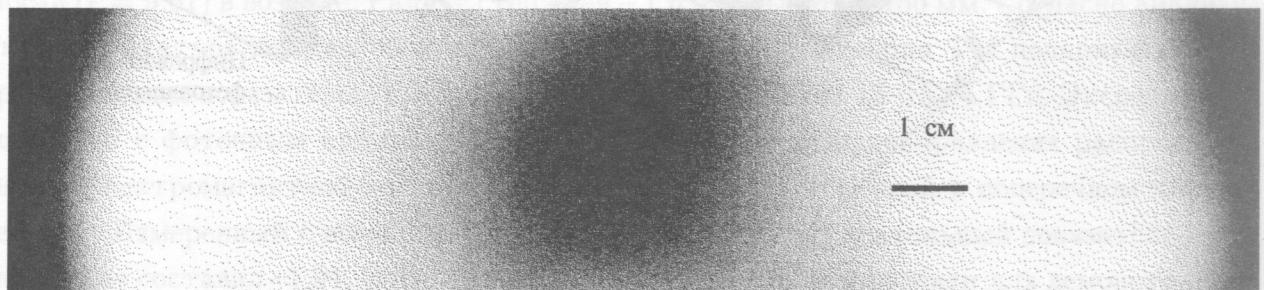


Рис. 2. Фотография изображения фокального пятна, полученного на экране радиовизора.

Источником СВЧ излучения с длиной волны 3 см служил магнетрон с выходной мощностью около 1 Вт, рис. 1. Выходной волновод магнетрона со стандартным сечением 10 на 23 мм был присоединен к ферритовому вентилю, служившему развязкой. Вентиль был соединен с прецизионным аттенюатором с максимальным коэффициентом ослабления до 35 дБ, к выходу которого был присоединен отрезок волновода без выходного фланца. Волна излучалась в свободное пространство из открытого волноводного выхода, который являлся точечным источником электромагнитного излучения. Весь волноводный тракт передачи излучения был собран из стандартных волноводных элементов с прямоугольным сечением волноводов  $10 \times 23 \text{ мм}^2$ . Фотонный кристалл размещали между выходным волноводом и приемником излучения – радиовизором. Расстояния  $L_1$ , между выходным торцом волновода и входной поверхностью фотонного кристалла, и  $L_2$ , между выходной поверхностью кристалла и радиовизором, подбирали экспериментально, исходя из визуальной оценки изображения на экране радиовизора, добиваясь оптимальной фокусировки изображения точечного источника излучения. Изображение, получаемое на экране радиовизора, регистрировали цифровым фотоаппаратом Sony и в дальнейшем обрабатывали на компьютере с помощью специальной программы.

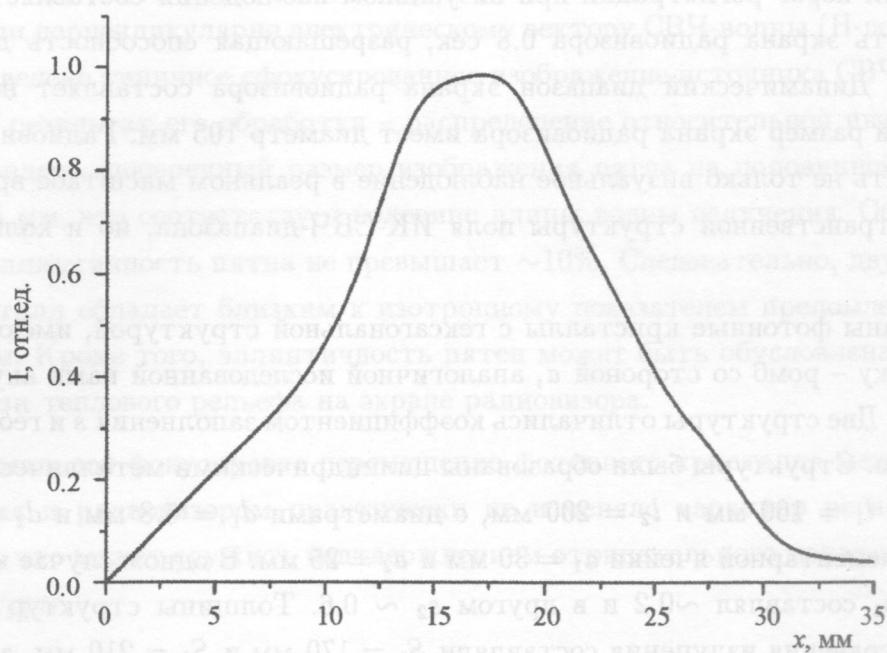


Рис. 3. Результаты обработки распределения интенсивности СВЧ излучения в фокальном пятне плоской линзы.

Радиовизор был разработан, создан и исследован в стенах ФИАН СССР в 1968 году для регистрации пространственных распределений полей излучения в широком диапазоне ИК-СВЧ-волн [8, 9]. Такие возможности прибора обеспечиваются благодаря совместному применению термочувствительного люминофора с высокой температурной чувствительностью и эффективного неселективного поглотителя ИК-СВЧ излучения.

Приемный экран радиовизора представляет трехслойную структуру – подложка (обычно лавсан толщиной несколько микрон), поглотитель излучения (тонкая металлическая пленка, с эффективной толщиной менее 100 Å и поверхностным сопротивлением, близким к сопротивлению свободного пространства  $\sim 377$  Ом), слой температурочувствительного люминофора ( $ZnSCd$ -люминофор, активированный Ag и Ni, толщиной  $\sim 3$  мкм). Изображение на экране радиовизора возникает вследствие температурного тушения яркости свечения люминофора, возбуждаемого тороидальным источником ультрафиолетового излучения ( $\lambda \sim 365$  нм), обеспечивающим однородное освещение экрана. Поглотитель излучения можно изготавливать с заранее заданным коэффициентом поглощения (до 50%). Максимальная температурная чувствительность люминофора, определяемая как относительное изменение яркости свечения при изменении температуры люминофора на  $1^{\circ}\text{C}$ , достигает 30% при интенсивности свечения  $0.05 \text{ Вт}\cdot\text{см}^2$ .

Минимальный порог регистрации при визуальном наблюдении составляет  $1 \text{ мВт}\cdot\text{см}^2$ . Инерционность экрана радиовизора 0.8 сек, разрешающая способность достигает  $10 \text{ штрих}\cdot\text{мм}^{-1}$ . Динамический диапазон экрана радиовизора составляет не менее  $3D$ . Стандартный размер экрана радиовизора имеет диаметр 105 мм. Радиовизор позволяет производить не только визуальное наблюдение в реальном масштабе времени двухмерной пространственной структуры поля ИК-СВЧ-диапазона, но и количественные измерения.

Исследованы фотонные кристаллы с гексагональной структурой, имеющей элементарную ячейку – ромб со стороной  $a$ , аналогичной исследованной нами акустическими методами [4]. Две структуры отличались коэффициентом заполнения  $s$  и геометрическими размерами. Структуры были образованы цилиндрическими металлическими стержнями длиной  $l_1 = 160$  мм и  $l_2 = 200$  мм, с диаметрами  $d_1 = 5.8$  мм и  $d_2 = 16$  мм и с размерами элементарной ячейки  $a_1 = 30$  мм и  $a_2 = 25$  мм. В одном случае коэффициент заполнения  $s_1$  составлял  $\sim 0.2$  и в другом  $s_2 \sim 0.6$ . Толщины структур в направлении распространения излучения составляли  $S_1 = 170$  мм и  $S_2 = 210$  мм, а поперечные размеры структур равны  $H_1 = 280$  мм и  $H_2 = 210$  мм. При выбранных параметрах постоянных решеток и длины волны СВЧ излучения эти обе структуры описываются отрицательным законом дисперсии во второй зоне Бриллюэна, аналогично ситуации в [5]. Для получения корректных результатов измерений пространственных распределений получаемых изображений на экране радиовизора были проведены взаимосвязанные калибровки СВЧ и оптического трактов.

Чтобы оценить качество фокусировки искусственной структуры, проведена калибровка экрана радиовизора с помощью ступенчатого клина. С этой целью осуществлена съемка цифровым фотоаппаратом светящегося экрана радиовизора через ступенчатый ослабитель на кварцевых подложках. По результатам измерений построена калибровочная кривая.

Калибровка чувствительности радиовизора к СВЧ излучению осуществлена введением фиксированных значений коэффициентов ослабления прецизионного аттенюатора и по полученным данным построена калибровочная кривая. Кроме того, перед каждой серией экспериментов экран радиовизора фотографировали в отсутствие СВЧ излучения, полученные изображения использовали в качестве опорных при цифровой обработке результатов измерений.

Результаты измерений показали, что все структуры обладают отрицательным преломлением и плоский слой таких структур обладает безбарьерационными фокусирующими

щими свойствами. Первую и вторую структуры с меньшим коэффициентом заполнения ориентировали перпендикулярно электрическому вектору СВЧ-волны (Н-поляризация). На рис. 2 приведено типичное сфокусированное изображение источника СВЧ излучения, а на рис. 3 – результат его обработки – распределение относительной интенсивности. Как можно видеть, поперечный размер изображения пятна на половинной высоте составляет  $\sim 14$  мм, что соответствует половине длины волны излучения. Обработка показала, что эллиптичность пятна не превышает  $\sim 10\%$ . Следовательно, двумерный фотонный кристалл обладает близким к изотропному показателю преломления по всем направлениям. Кроме того, эллиптичность пятен может быть обусловлена конвекцией воздуха вблизи теплового рельефа на экране радиовизора.

При оптимальной фокусировке перемещение фотонного кристалла между источником излучения и радиовизором практически не изменяло характер регистрируемого изображения, что может служить подтверждением отрицательного показателя преломления структуры.

Таким образом, результаты измерений подтвердили полученные в [4] результаты измерений, проведенных с аналогичным по структуре акустическим кристаллом, где поперечные размеры сфокусированного пятна изображения также составляли половину длины волны акустического излучения, так как волна Н-поляризации электромагнитного излучения в фотонном кристалле эквивалентна акустической волне в фононном кристалле.

Наглядность, достоверность и возможность оцифровки изображений в реальном масштабе времени стала возможной в результате применения радиовизора, который дает значительные преимущества по сравнению с обычно применяемыми сканирующими зондовыми методами. Радиовизор практически не вносит искажений в исследуемые распределения полей и обеспечивает высокое разрешение, ограничиваемое лишь размерами кристаллитов люминофора, с размерами  $\sim 3\text{--}5$  мкм, поэтому он может быть применен для подобных исследований вплоть до длин волн, соответствующих среднему и ближнему ИК диапазону.

Фотонные и фононные кристаллы помимо применения в качестве без aberrационных фокусирующих элементов с высоким разрешением могут использоваться как фильтры высоких пространственных частот излучения.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, гранты N 06-02-16830 и N 07-02-00233а.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. Г. Веселаго, УФН **92**, 517 (1967).
  - [2] J. Li et al., Phys. Rev. E **70**, 055602 (2004).
  - [3] Z. Lui et al., Science **289**, 1734 (2000).
  - [4] E. A. Vinogradov et al., Physics of Wave Phenomena **15**, 126 (2007).
  - [5] P. V. Parimi et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 127401 (2004).
  - [6] E. Ozbay et al., Japanese Journ. of Appl. Phys., **45**, 6064 (2006).
  - [7] Zh. Peng et al., Phys. Rev. B **73**, 075118 (2006).
  - [8] А. П. Бажулин и др., Письма в ЖЭТФ **8**, 261 (1968).
  - [9] А. П. Бажулин и др., Труды ФИАН **117**, 122 (1980).

## Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

Поступила в редакцию 17 ноября 2008 г.