

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЛОМЛЯЮЩИХ СВОЙСТВ ДВУХМЕРНОГО МИКРОВОЛНОВОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

И. А. Карпов

Институт Физики твёрдого тела РАН, Черноголовка

Статья получена 28 мая 2015 г.

Аннотация. В данной работе рассматривается прохождение микроволнового излучения сквозь двухмерный микроволновый фотонный кристалл при различных его ориентациях на плоскости по отношению к направлению падающего на него потока микроволн. Проводится сравнительный анализ ожидаемого поведения микроволн при прохождении ими изучаемого объекта с точки зрения геометрической оптики, а также понятия эффективного показателя преломления среды, и полученных экспериментально картин распределения электрического микроволнового поля. Показано, что исследуемый образец при определённой ориентации на некоторых частотах демонстрирует отрицательный эффективный показатель преломления.

Ключевые слова: микроволновый фотонный кристалл, геометрическая оптика, эффективный показатель преломления, визуализация микроволнового поля.

Abstract. This paper presents microwave experiment demonstrating waves passing through a two-dimensional microwave photonic crystal at its different plane orientations. The comparison study of expected microwave transmission behaviour from ray optics standpoint as well as conception of an effective refractive index is carried out. The electric microwave field distribution pattern, available from experiments, is also analyzed. It is shown that the sample studied has a negative effective refractive index at certain orientations and frequencies.

Keywords: microwave photonic crystal, ray optics, effective refractive index, microwave field visualization.

Введение

Интерес исследователей к микроволновым фотонным кристаллам возник достаточно давно [1 – 3]. Такие материалы первоначально изготавливались

исключительно из металла и назывались «искусственные диэлектрики». Уже относительно недавно исследователи вернулись к этой теме, появился термин «микроволновый фотонный кристалл», а сами структуры стали изготавливать не только из металлических [4 – 6], но и исключительно из диэлектрических элементов [7 – 9].

В этой работе исследуются картины электрической составляющей микроволнового поля вокруг двухмерного микроволнового фотонного кристалла. Структуры, подобные описываемой здесь, исследовались и раньше [3], но они были более простой геометрии, чем изучаемая в данной работе.

Объект изучения и методика измерений

Исследуемое изделие изготавливалось из тонкого алюминиевого листа на поддерживающем диэлектрическом основании, необходимом лишь для того, чтобы изделие не деформировалось при работе с ним. Внешний вид изделия схематически представлен на рисунке 1.

Измерения проводились по разработанной американскими авторами методике [10] на созданной в нашей лаборатории установке [11].

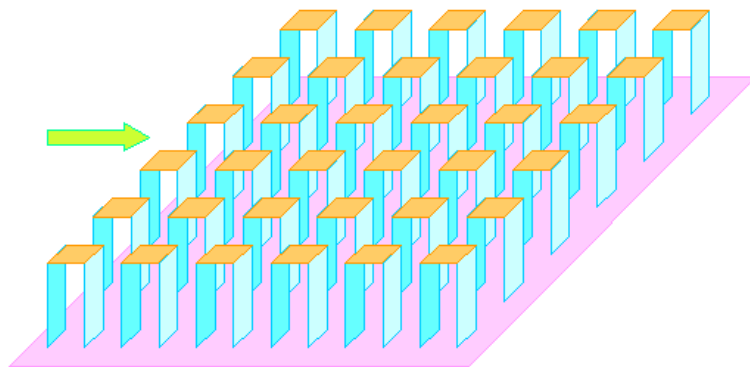


Рис. 1. Схематический рисунок двухмерного микроволнового фотонного кристалла. Зелёная стрелка показывает направление потока микроволн, совпадающее с основной осью изделия.

Вне всякого сомнения, массив двумерного микроволнового фотонного кристалла можно представить как равный по форме и размерам нашей структуре квадратный объект из сплошной среды с эффективным показателем преломления n , зависящим как от частоты, так и от направления распространяющегося через образец излучения. Совершенно очевидно, что периодическая металлическая структура меняет свои преломляющие свойства с частотой. Описываемая здесь решётка периодических столбиков имеет квадратную симметрию, подобную [3], что уже создаёт неоднородность её показателя преломления для различных направлений. Более того, так как описываемая здесь структура имеет полые, П-образные столбики, то её свойства в двух взаимно перпендикулярных направлениях будут различными, в отличие от описываемой в [3], что ещё более усложняет картину зависимости показателя преломления n данной структуры от направления распространения микроволн внутри неё.

Ожидаемое поведение изучаемого объекта и экспериментальный результат

Для упрощения рассуждений, рассмотрим квадратный плоский объект с изотропным эффективным показателем преломления n , который может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Направим основную ось нашего двумерного микроволнового фотонного кристалла параллельно плоскостям П-образных столбиков-петель, а следовательно, перпендикулярно оси этих П-образных петель-столбиков.

Используя правила геометрической оптики, рассмотрим на модели квадратного объекта с эффективным показателем преломления n несколько случаев прохождения излучения сквозь такой объект для различной его ориентации на плоскости по отношению к падающему на него излучению и для различных значений показателя преломления n , как положительных, так и отрицательных.

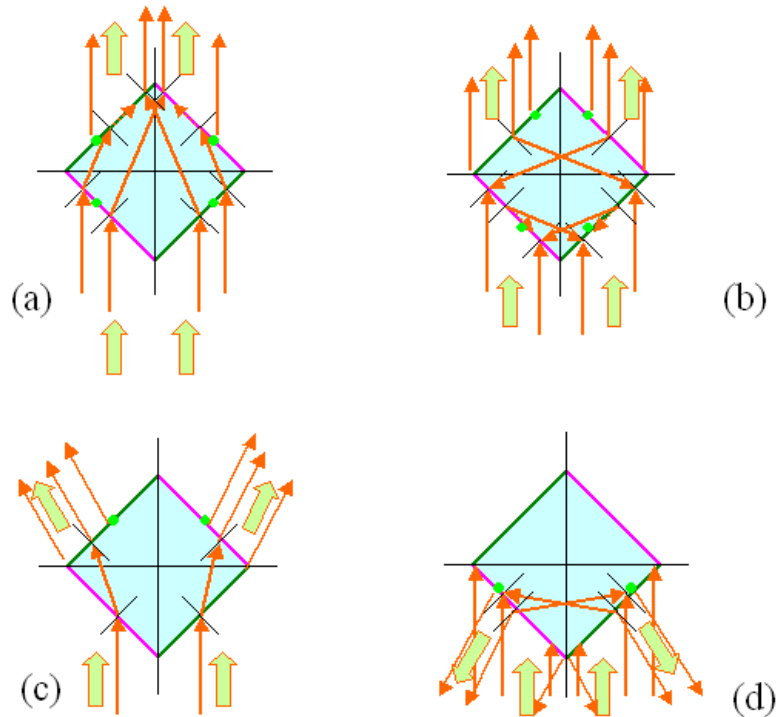


Рис. 2. Прохождение микроволн через образец, повёрнутый влево на 45° относительно его «прямого» положения:
 (a) – для $n = +2$; (b) – для $n = -2$; (c) – для $n = +0,8$; (d) – для $n = -0,8$.
 Оранжевые стрелки указывают направление движения фазовых фронтов, зелёные – потока мощности.

Для материала с $n = +2$ при его ориентации -45° (образец повёрнут влево на 45° относительно его «прямого» положения, когда основная ось образца направлена вдоль падающего на образец излучения) излучение выходит из материала ближе к центральной линии, как это показано на рисунке 2а, с участка длиной около $0,62a$, где a – длина образца. Излучение, входящее в образец вблизи «боковых» его вершин, с участка длиной $0,38a$, испытывает полное внутреннее отражение и может породить краевую волну. Граница участка выхода излучения показана на рисунке зелёной точкой. Такой же точкой отмечен участок для входящего излучения, испытывающего полное внутреннее отражение.

Для материала с $n = -2$ при его ориентации -45° излучение не выходит из материала вблизи от центральной линии (Рисунок 2b), с участка длиной около $0,38a$, где a – длина образца. Входящее в образец излучение вблизи центральной линии, с участка длиной около $0,38a$, испытывает полное внутреннее отражение с возможным образованием краевой волны. Граница участка выхода излучения показана на рисунке зелёной точкой. Такой же точкой отмечен участок, входящее с которого излучение может породить краевую волну.

Случай материала с $n = -1$ при его ориентации -45° является не интересным для рассмотрения, так как всё излучение, вошедшее в образец, выходит из него в том же направлении, что и вошло, как при прямом падении на зеркало, с той лишь разницей, что вошедшее через левую от центральной линии грань образца излучение выйдет через правую его грань, а вошедшее через правую грань излучение, наоборот, выйдет через левую от центральной линии грань образца.

Для материала с $n = +0,8$ при его ориентации -45° излучение не выходит из материала вблизи от центральной линии (Рисунок 2c), с участка длиной около $0,47a$, где a – длина образца. Граница участка выхода излучения показана на рисунке зелёной точкой.

Для материала с $n = -0,8$ при его ориентации -45° излучение выходит из материала вблизи от центральной линии (Рисунок 2d), с участка длиной около $0,53a$, где a – длина образца. Граница участка выхода излучения показана на рисунке зелёной точкой.

Для материала с показателем преломления n , численно равным $|\sin 45^\circ|$, или меньшим этого значения ($n < |\sin 45^\circ|$), при попадании излучения на образец наступает полное отражение с возможностью образования краевой волны, распространяющейся внутри образца, вблизи его наружной поверхности.

Таким образом, для значений показателя преломления n материала, лежащих в интервале $-1 < n < +1$, при данной ориентации образца, излучение выходит из образца всё более узким пучком по мере движения значения

показателя преломления n в направлении нуля. При этом в случае положительных значений показателя преломления направление выхода излучения через верхние грани на рисунке всё более отклоняется от центральной линии, и при значении показателя преломления, численно равном величине $+\sin 45^\circ$, наступает полное отражение, с возможностью образования краевой волны, направленной вдоль нижних граней образца в сторону от центральной линии. В случае отрицательных значений показателя преломления направление выхода излучения через нижние грани на рисунке будет всё более отклоняться в сторону от центральной линии, но сужение пучка выходящего излучения будет происходить в сторону центральной линии, а не от неё, как это было при положительных значениях показателя преломления. При значении показателя преломления, численно равном величине $-\sin 45^\circ$, наступает полное отражение, с возможностью образования краевой волны, направленной вдоль нижних граней образца в сторону центральной линии.

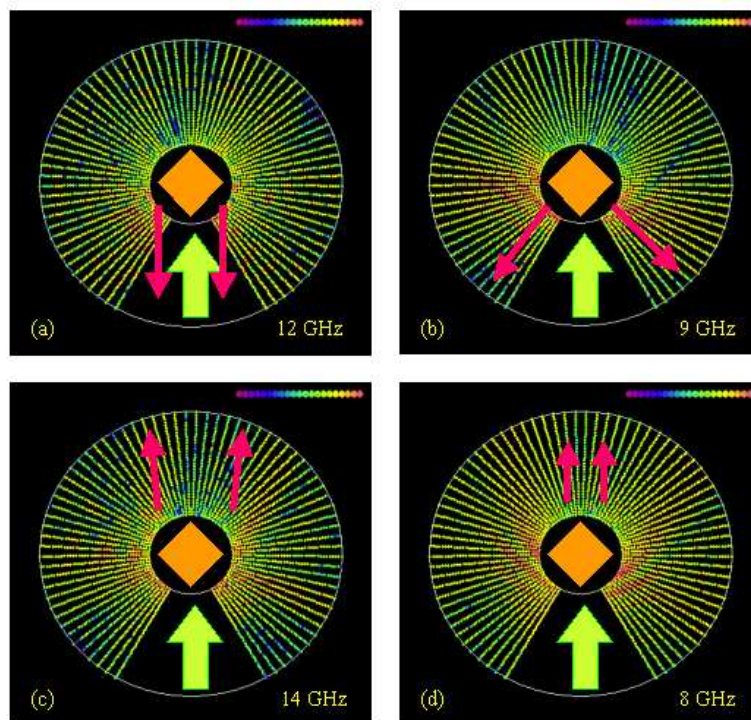


Рис. 3. Экспериментальные картины распределения амплитуды СВЧ поля вокруг образца (показан оранжевым квадратом). Зелёная стрелка показывает падающую СВЧ мощность, малиновые – преломлённую. Шкала уровня сигнала приведена к единице и дана в углу изображений.

Полученные экспериментально картины поля вокруг нашего образца двумерного микроволнового фотонного кристалла наводят на мысль, что при ориентации его основной оси -45° (когда эта ось была повернута влево на 45° по отношению к падающему излучению) структура имеет отрицательную величину показателя преломления, близкую к $n = -1$ (на частотах 11 ГГц – 13 ГГц) и лежащую в интервале $-1 < n < 0$ при частотах от 9 ГГц до 10 ГГц. На частотах 14 ГГц и выше эффективный показатель преломления $n < -1$. Положительные значения эффективного показателя преломления $0 > n > +1$ для данной ориентации образца можно наблюдать на частотах 7 ГГц – 8 ГГц. Результаты некоторых таких измерений с указанием частоты, при которых проводилась визуализация микроволнового поля, приводятся на рисунке 3.

При ориентации образца $+45^\circ$, когда его основная ось была повернута вправо на 45° относительно направления падающего на образец излучения, были получены похожие экспериментальные результаты. На частотах 7 ГГц – 8 ГГц эффективный показатель преломления лежит в интервале $0 > n > +1$. На частотах 9 ГГц – 10 ГГц эффективный показатель преломления лежит в интервале $-1 < n < 0$. На частотах 11 ГГц – 13 ГГц эффективный показатель преломления $n = -1$, а на частотах 14 ГГц и выше эффективный показатель преломления в данном направлении $n < -1$.

Для материала с $n = +2$ при его ориентации $+30^\circ$ (при повороте образца вправо на 30° относительно его «прямого» положения, когда основная ось образца направлена вдоль падающего на образец излучения) излучение выходит из материала вблизи от центральной линии (Рисунок 4а), с участка длиной около $0,52a$ (слева от центральной линии) и около $0,74a$ (справа от центральной линии), где a – длина образца. Граница участка выхода излучения показана на рисунке зелёной точкой. Излучение, входящее в образец левее зелёной точки на левой нижней грани и правее зелёной точки на правой нижней грани, испытывает полное внутреннее отражение с возможностью образования краевой волны.

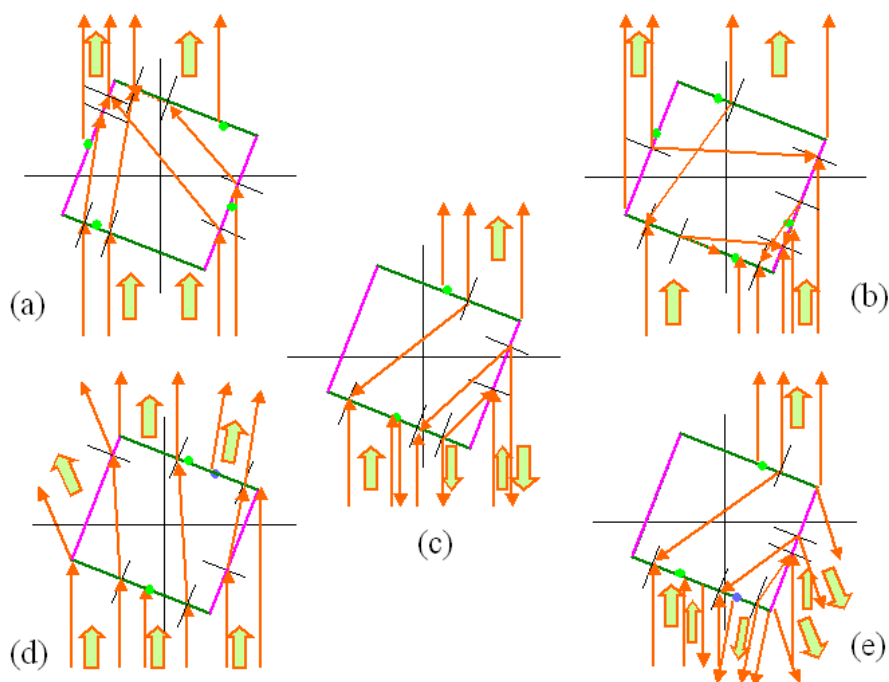


Рис. 4. Прохождение микроволн через образец, повернутый вправо на 30° относительно его «прямого» положения:

(a) – для $n = +2$; (b) – для $n = -2$; (c) – для $n = -1$;

(d) – для $n = +0,9$; (e) – для $n = -0,9$.

Оранжевые стрелки указывают направление движения фазовых фронтов, зелёные – потока мощности.

Для материала с $n = -2$ при его ориентации $+30^\circ$ излучение выходит из материала вдали от центральной линии (Рисунок 4b), с участка длиной около $0,52a$ (нижняя часть левой верхней грани образца) и около $0,74a$ (справа от центральной линии), где a – длина образца. Граница участка выхода излучения показана на рисунке зелёной точкой. Излучение, входящее в образец правее зелёной точки на левой нижней грани и левее зелёной точки на правой нижней грани, испытывает полное внутреннее отражение с возможностью образования краевой волны.

Для материала с $n = -1$ при его ориентации $+30^\circ$ вошедшее через левую нижнюю грань образца излучение (Рисунок 4c): левее зелёной точки, с участка длиной около $0,42a$, выйдет через правую верхнюю грань, правее зелёной точки, с участка длиной также около $0,42a$; вошедшее правее зелёной точки, с участка

длиной около $0,58a$, выйдет через правую нижнюю грань, навстречу входящему излучению. Вошедшее через правую нижнюю грань образца излучение выйдет через левую нижнюю грань, правее зелёной точки, с участка длиной около $0,58a$, навстречу входящему излучению. Всюду здесь a – длина образца.

Для материала с $n = +0,9$ при его ориентации $+30^\circ$ вошедшее через левую нижнюю грань образца излучение (Рисунок 4d): левее зелёной точки, с участка длиной около $0,67a$, выйдет через левую верхнюю грань; вошедшее правее зелёной точки, с участка длиной около $0,33a$, выйдет через правую верхнюю грань, левее зелёной точки, с участка длиной около $0,33a$. Вошедшее через правую нижнюю грань образца излучение выйдет через правую верхнюю грань, правее фиолетовой точки, с участка длиной около $0,28a$. Всюду здесь a – длина образца.

Для материала с $n = -0,9$ при его ориентации $+30^\circ$ вошедшее через левую нижнюю грань образца излучение (Рисунок 4e): левее зелёной точки, с участка длиной около $0,33a$, выйдет через правую верхнюю грань, правее зелёной точки, с участка длиной также около $0,33a$; вошедшее правее зелёной точки, с участка длиной около $0,67a$, выйдет через правую нижнюю грань, почти навстречу входящему излучению. Вошедшее через правую нижнюю грань образца излучение выйдет через левую нижнюю грань, правее фиолетовой точки, с участка длиной около $0,28a$, почти навстречу входящему излучению. Всюду здесь a – длина образца.

Здесь следует отметить, что для положительно преломляющей среды, при уменьшении численного значения эффективного показателя преломления среды n до величины $n = 0,70711$ и менее, излучение, вошедшее через левую нижнюю грань, перестает выходить через правую верхнюю грань. Выходящее через левую верхнюю грань излучение с уменьшением величины n выходит всё более узким пучком, направление которого стремится к нормали, проведённой к этой грани, а сам пучок смещается к нижней части грани. При достижении показателем преломления значения, численно равного величине $n = \sin 30^\circ = 0,5$, входящее через левую нижнюю грань излучение начинает испытывать

полное отражение с возможностью образования краевой волны. При этом внутрь образца излучение перестаёт проникать. Для излучения, входящего через правую нижнюю грань, полное отражение от этой грани начинает происходить уже при величинах n , численно равных величине $n = \sin 60^\circ = 0,866$. При этом излучение перестаёт проникать в образец через эту грань.

Для отрицательно преломляющей среды излучение перестанет выходить через правую верхнюю грань при значениях n , равных или больших $-0,70711$ ($n = -0,70711$ или $n > -0,70711$). Через правую нижнюю грань излучение будет продолжать выходить, причём при уменьшении величины $|n|$, пучок выходящего через эту грань излучения будет сужаться, смещаться к нижнему концу данной грани, а его направление будет всё более стремиться к направлению нормали к данной грани. При достижении показателем преломления значения, численно равного величине $n = -\sin 30^\circ = -0,5$, входящее через левую нижнюю грань излучение начинает испытывать полное отражение с возможностью образования краевой волны. При этом внутрь образца излучение перестаёт проникать. Для излучения, входящего через правую нижнюю грань, полное отражение от этой грани начинает происходить уже при величинах n , численно равных величине $n = -\sin 60^\circ = -0,866$. При этом излучение перестаёт проникать в образец через эту грань.

Таким образом, излучение проникает в образец через обе нижних грани при значениях n : $+0,866 < n < -0,866$. При величинах $+0,5 < n < +0,866$ или $-0,5 > n > -0,866$ излучение может проникать в образец только через левую нижнюю грань. При $-0,5 < n < +0,5$ излучение не может проникать в образец, испытывая полное отражение на обеих нижних гранях с возможностью образования краевой волны, распространяющейся вдоль этих граней.

Полученные экспериментально картины поля вокруг нашего образца двумерного микроволнового фотонного кристалла наводят на мысль, что при ориентации его основной оси $+30^\circ$ по отношению к падающему излучению структура имеет отрицательную величину показателя преломления, лежащую в интервале $-1 < n < 0$ при частотах 9 ГГц – 10 ГГц. На частотах 11 ГГц – 17

ГГц картина микроволнового поля вокруг образца наводит на мысль о том, что его показатель преломления $n < -1$. В то же время на частотах 7 ГГц – 8 ГГц картина поля вокруг образца больше подходит для случая $0 > n > +1$. Результаты некоторых таких измерений с указанием частоты, при которых проводилась визуализация микроволнового поля, приводятся на рисунке 5.

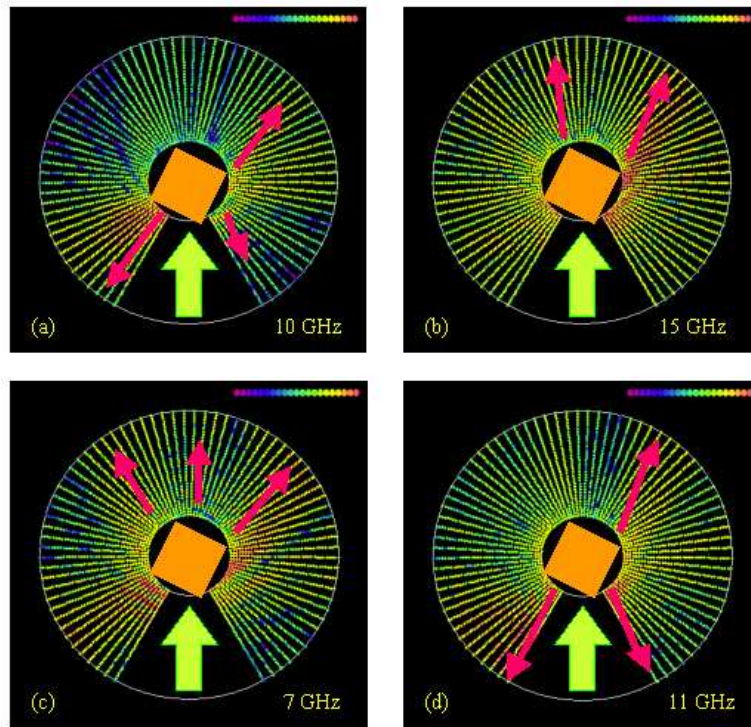


Рис. 5. Экспериментальные картины распределения амплитуды СВЧ поля вокруг образца (показан оранжевым квадратом). Зелёная стрелка показывает падающую СВЧ мощность, малиновые – преломлённую. Шкала уровня сигнала приведена к единице и дана в углу изображений.

Несложно представить, что картина выходящего из образца излучения для случая $+60^\circ$ будет зеркально симметричной относительно вертикальной средней линии рисунка картине излучения для случая $+30^\circ$, представленной на рисунках 4а – 4е. При ориентации образца $+60^\circ$, когда его основная ось была повернута вправо на 60° относительно направления падающего на образец излучения, были получены экспериментальные результаты, показанные на рисунке б, с указанием частоты, на которой проводилась визуализация микроволнового поля. Из этого рисунка можно

сделать вывод, что на частотах 7 ГГц – 9 ГГц эффективный показатель преломления образца в данном направлении лежит в интервале $0 > n > +1$. На частотах около 10 ГГц эффективный показатель преломления для данного направления становится отрицательным и лежит в интервале $-1 < n < 0$, а на частотах 11 ГГц и выше эффективный показатель преломления $n < -1$.

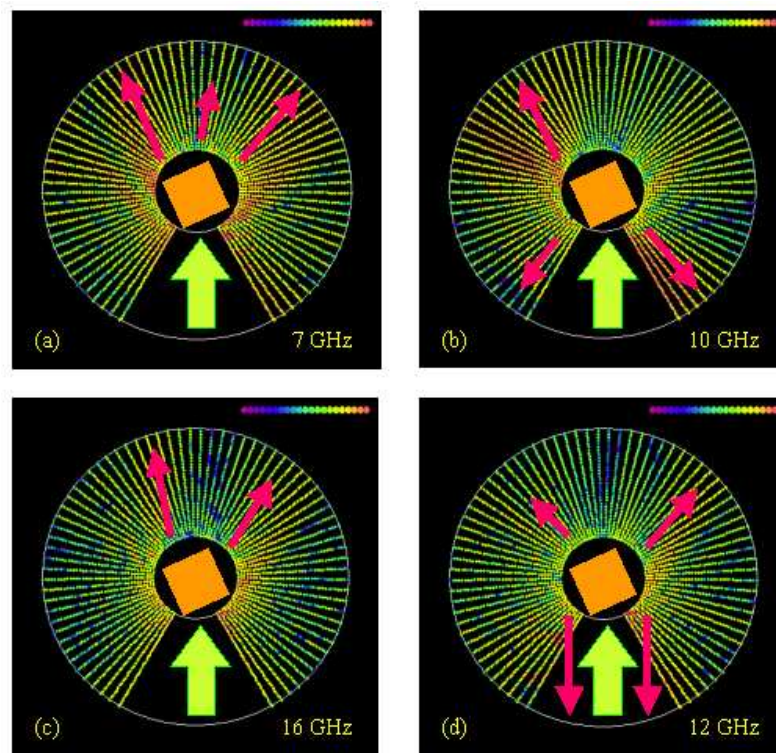


Рис. 6. Экспериментальные картины распределения амплитуды СВЧ поля вокруг образца (показан оранжевым квадратом). Зелёная стрелка показывает падающую СВЧ мощность, малиновые – преломлённую. Шкала уровня сигнала приведена к единице и дана в углу изображений.

Выводы

В результате проведённых экспериментов были получены картины распределения электрической компоненты микроволнового поля в диапазоне частот от 7 ГГц до 20 ГГц вокруг структуры двумерного микроволнового фотонного кристалла при различной его ориентации по отношению к падающему на него потоку СВЧ-излучения, что позволяет судить о преломляющих свойствах данной структуры. Проведённый анализ полученных

изображений картин поля с применением правил геометрической оптики и понятия эффективного показателя преломления среды показывает, что на определённых частотах и при определённой ориентации образца двумерного микроволнового фотонного кристалла относительно падающего на него микроволнового излучения можно наблюдать отрицательный эффективный показатель преломления для данной искусственной среды.

Литература

1. Силин Р. А. О дисперсионных свойствах двумерно- и трёхмерно-периодических систем (искусственные диэлектрики). Радиотехника и электроника, 1960, 5(4), с. 688 – 691.
2. Силин Р. А. Оптические свойства искусственных диэлектриков. Изв. Высш. учебных заведений, Радиофизика, 1972, 15(6), с. 809 – 820.
3. Силин Р. А. Необычные законы преломления и отражения. М.: «Фазис», 1999, 80с.
4. W. T. Lu, S. Savo, B. Didier, F. Casse, and S. Sridhar, *Microwave Opt. Technol. Lett.* 51(11), 2705 – 2709 (2009).
5. P. V. Parimi, W. T. Lu, P. Vodo, J. Sokoloff, J. S. Derov, and S. Sridhar, “Negative Refraction and Left-Handed Electromagnetism in Microwave Photonic Crystals”, *Phys. Rev. Lett.* 92, N 12, 127401 (2004).
6. P. Vodo, P. V. Parimi, W. T. Lu, and S. Sridhar, R. Wing, “Microwave photonic crystal with tailor-made negative refractive index”, *Appl. Phys. Lett.* 85, N 10, 1858 – 1860 (2004).
7. E. D. Gennaro, P. V. Parimi, W. T. Lu, S. Sridhar, J. S. Derov, and B. Turchinets, “Slow microwaves in left-handed materials”, *Phys. Rev. B* 72, 033110 (2005).
8. P. Vodo, P. V. Parimi, W. T. Lu, and S. Sridhar, “Focusing by planoconcave lens using negative refraction”, *Appl. Phys. Lett.* 86, 201108 (2005).
9. P. V. Parimi, W. T. Lu, P. Vodo, S. Sridhar, “Imaging by flat lens using negative refraction”, *Nature* 426, 404 (2003).

10. 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).
11. I. A. Karpov, E. D. Shoo, “New equipment for microwave electric field visualization”, *Review of Scientific Instruments* 83, 074704 (2012).