

УДК 535.63, 537.874

ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ ПРЕЛОМЛЕНИЕ ИЛИ РЕЗОНАНС ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГАРМОНИКИ?

А. Ю. Ветлужский

Институт физического материаловедения СО РАН

Статья поступила в редакцию 17 декабря 2015 г.

Аннотация: Из рассмотрения дифракции волн на одномерных решетках предлагается объяснение физического механизма, приводящего к эффектам отрицательного преломления волн на границе фотонных кристаллов.

Ключевые слова: электромагнитные кристаллы, показатель преломления, отрицательное преломление, дифракция.

Abstract: From a consideration of the diffraction of waves on one-dimensional arrays it is explained the physical mechanism leading to the effects of negative refraction at the boundary of photonic crystals.

Keywords: electromagnetic crystals, refractive index, negative refraction, diffraction.

В работе [1] (Павлов Д.А. и др.) были представлены результаты численного и экспериментального исследования металлических электромагнитных кристаллов. Исследования проводились в СВЧ диапазоне, рассматривался случай E – поляризации. Целью работы являлась демонстрация возможности отрицательного преломления при взаимодействии излучения с границей квадратной двумерной решетки, образованной системой параллельно ориентированных медных круговых цилиндров.

В последние годы данная тематика вызывает большой интерес, поскольку электромагнитные (фотонные) кристаллы с необычными преломляющими свойствами являются возможной альтернативой метаматериалам с отрицательным показателем преломления при создании перспективных устройств передачи и обработки изображений.

Что касается физического механизма, лежащего в основе наблюдаемых в [1] эффектов, хотелось бы обратить внимание на еще одну возможную его трактовку. Прежде всего, отметим, что в работе исследуется композит, представляющий собой металлическую решетку, погруженную в диэлектрическую матрицу $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Диэлектрическая проницаемость гипса не указывается, справочные же данные варьируются от 2 до 4. Полагая $\varepsilon = 3$, получаем, что для заданных в работе периода кристалла $d = 1,2$ см и частотах из второй разрешенной зоны, на которых наблюдаются эффекты преломления, лежащих в диапазоне 12,3 – 12,9 ГГц, эквивалентный период структуры $d\sqrt{\varepsilon}$ оказывается сопоставим с длиной волны излучения.

Известно, что при дифракции волн на решетке рассеивателей, расположенных на границе сред с разными показателями преломления, возможно – для достаточно редкой структуры – формирование пространственного спектра волн, распространяющихся под разными углами к плоскости решетки. Условие формирования таких гармоник определяется выражением:

$$m\lambda = d(n_2 \sin \theta - n_1 \sin \varphi), \quad (1)$$

где $m = 0, \pm 1, \pm 2$ и т.д. – порядок дифракции, λ – длина волны, φ и θ – соответственно углы падения и преломления, n_1 и n_2 – показатели преломления первой и второй сред (рис. 1).

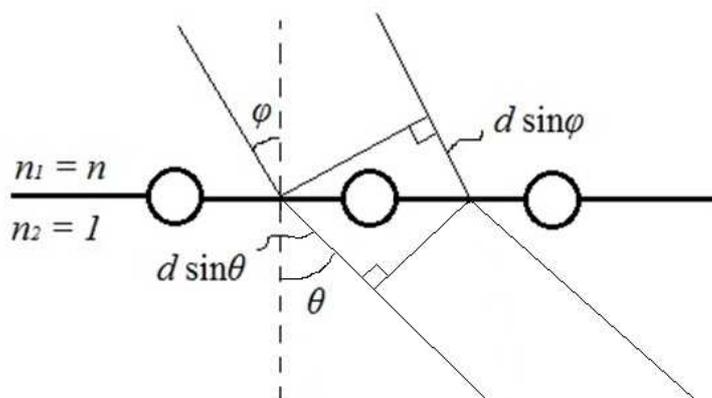


Рис.1

Отсюда следует, что при малых d/λ на границе структуры, в общем случае, формируется только нулевая гармоника, направление распространения которой определяется законом Снеллиуса. Если волна приходит из оптически более плотной среды на границу с воздухом, то при определенных углах падения нулевая гармоника исчезает (полное внутреннее отражение), однако с увеличением периода, при выполнении условия

$$n \sin \varphi \geq \lambda/d - 1,$$

сформируется первая отрицательная гармоника, распространяющаяся под отрицательными углами относительно нормали к границе.

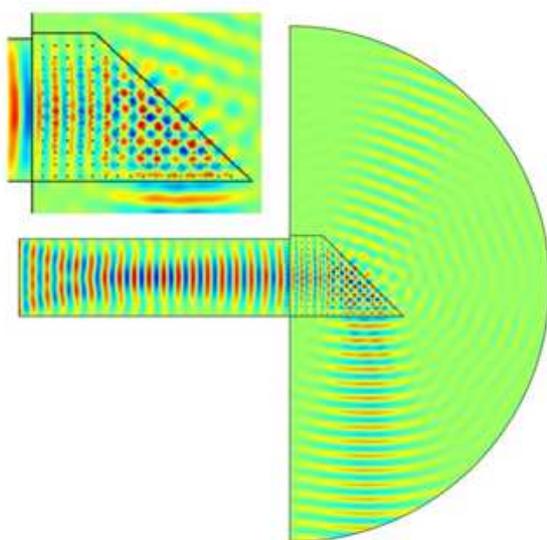


Рис. 2

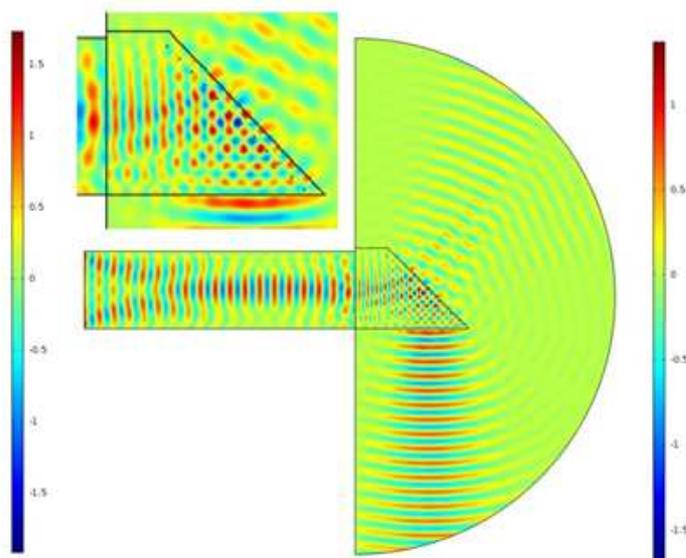


Рис. 3

На наш взгляд, именно эта ситуация и наблюдается в [1]. Для подтверждения этого, нами, с использованием метода конечных элементов, выполнено численное моделирование взаимодействия излучения с электромагнитным кристаллом, погруженным в призматическую гипсовую матрицу, т.е. в постановке задачи и с сохранением параметров, указанных в этой работе. Результаты расчета, представленные на рис. 2 и полученные на частоте 11,5 ГГц, оказались близки к результатам на рис. 8 из [1].

Действительно, наблюдается преломленный луч, располагающийся с той же стороны от нормали к границе призмы, что и падающая волна, т.е. имеет место «отрицательное преломление». Однако, изображенная на рис. 3 картина распределения поля, практически полностью совпадающая с предыдущей, относится уже к ситуации, когда вдоль внешней границы диэлектрической призмы располагалась единственная плоская решетка цилиндрических элементов.

Резюмируя сказанное, следует заключить, что наблюдение эффекта отрицательного преломления на границах электромагнитных (фотонных) кристаллов, в ряде случаев может быть объяснено формированием пространственного спектра волн, обязанных своим появлением дифракции на решетке рассеивателей, образующих внешнюю поверхность кристалла.

Литература

1. Д. А. Павлов, Л. Н. Бутько, А. А. Федий, А. П. Анзулевич, И. В. Бычков, В. Д. Бучельников, В. Г. Шавров. Проволочная структура с эффектом отрицательного преломления в СВЧ диапазоне // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2015. № 11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov15/1/text.html>.