

УДК. 621.396.961

Результаты численного моделирования электромагнитных кристаллов

10, октябрь 2012

Барашков Н.И.

Студент,
кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства»

Научный руководитель: Ахияров В.В.,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы и устройства»

МГТУ им. Н.Э. Баумана
bauman@bmstu.ru

Метаматериалы - это искусственно сформированные среды, обладающие уникальными электрофизическими, радиофизическими и оптическими свойствами, отсутствующими в природных материалах. Приставка "мета" переводится с греческого как "вне", что позволяет трактовать термин "метаматериалы" как структуры, чьи эффективные электромагнитные свойства выходят за пределы свойств образующих их компонентов. Все многообразие естественных и искусственных сред можно классифицировать в зависимости от их эффективных значений диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемостей (см. рис.1). У почти всех встречающихся в природе веществ диэлектрическая и магнитная проницаемости больше нуля. Существенно, что у подавляющего большинства сред в наиболее интересных для практического использования диапазонах частот эти параметры больше (ϵ) или равны (μ) единице.

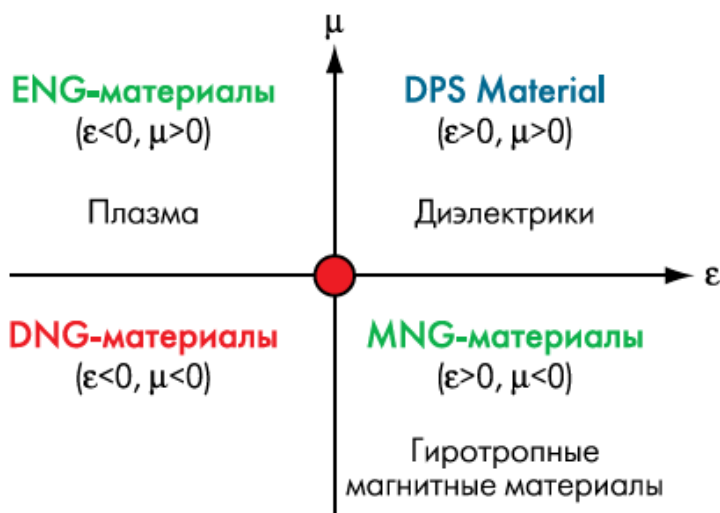


Рис.1 Классификация физических сред в зависимости от знака величин диэлектрической (ϵ) и магнитной (μ) проницаемостей

В данной работе были рассмотрены ϵ -негативные материалы, которые относятся к ENG-Исредам. Наиболее известным примером естественной ENG-среды, которая может

быть либо прозрачной, либо непрозрачной для электромагнитных волн в зависимости от частоты ω , является плазма, диэлектрическая проницаемость которой в отсутствие внешнего магнитного поля определяется по формуле:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (1)$$

где ω_p – радиальная плазменная частота, которая зависит от плотности, заряда и массы частиц. Наиболее известным примером плазмы является ионосфера Земли.

Первой искусственной средой с отрицательным значением ε , рассмотренной в литературе, была система из тонких параллельных металлических проводов (см. рис.2). Формула для плазменной частоты такой структуры была получена Дж. Брауном в 1953 [1]:

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln\left(\frac{a}{2\pi r}\right)} \quad (2)$$

где c_0 – скорость света, a – интервал между проводниками, r – радиус проводника. Далее были получены уточненные формулы:

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \left[\ln\left(\frac{a}{2\pi r}\right) + 0,5275 \right]} \quad \text{при } r < 0,01a, \quad (4)$$

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 \ln\left(\frac{a^2}{4r(a-r)}\right)} \quad \text{при } 0,05a < r < 0,2a. \quad (5)$$

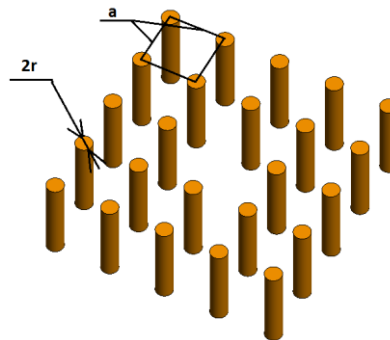


Рис.2. Электромагнитный кристалл из тонких металлических проводников

Подставим значения ω_p из формул (4) и (5) для «тонкого» и «толстого» провода в (1). Полученные зависимости относительной диэлектрической проницаемости ε от длины волны λ представлены на рис.3. Данный график использовался для выбора длины волны при численном электродинамическом моделировании ENG – материала (электромагнитного кристалла), показанного на рис.2. Для моделирования использовалась программа САПР СВЧ-устройств FEKO, в которой реализован численный метод решения интегрального уравнения относительно неизвестной плотности тока на поверхности рассеивателей (метод моментов) [2,3].

В качестве примера была рассмотрена задача возбуждения плоской волной длиной $\lambda = 3$ см структуры из цилиндров с параметрами: размер - 7×7 , $r = 0,28$ мм, $a = 10$ мм. Структура обладала дефектом, который заключался в удалении центрального цилиндра. Результаты расчетов представлены на рис.4 (стрелкой показано направление падения плоской волны). Видно, что при выбранной геометрии задачи кристалл образует «запрещенную зону» для электромагнитных волн, а в зоне дефекта наблюдается локализация поля [4]. Данный эффект ранее был получен в оптическом диапазоне и в настоящее время используется на практике в производстве оптоволокна. В данной работе аналогичное явление было получено в радиодиапазоне при численном решении электродинамической задачи.

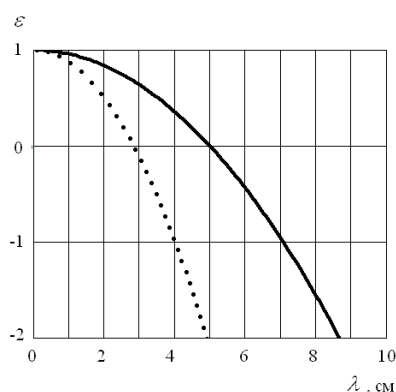


Рис.3. Зависимость относительной диэлектрической проницаемости ε от длины волны λ .
Сплошная линия – тонкий провод, точки – толстый провод

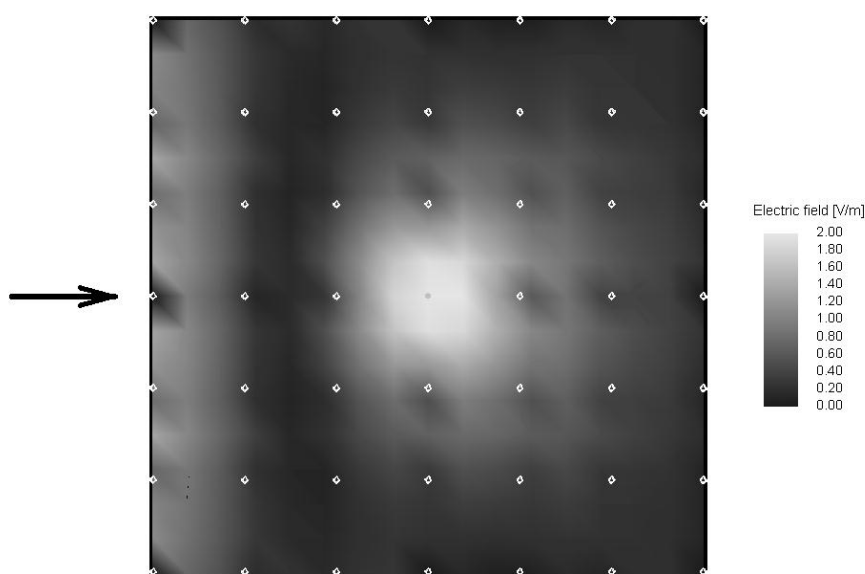


Рис.4. Явление локализации поля в области дефекта структуры

Далее была рассмотрена структура на основе прямоугольного волновода размером 12×28 мм (рабочая полоса частот – $6,57 \dots 9,99$ ГГц). В данном случае использование метаматериала позволяет решить две задачи:

- понижение критической частоты (просветление волновода);
- формирование запрещенной зоны в рабочей полосе частот.

Для возбуждения волновода на частотах $f < 6,57$ ГГц использовались волноводные переходы (см. рис.5), а в качестве метаматериала были выбраны металлические полоски шириной $d = 1$ мм и высотой $h = 10$ мм, расположенные симметрично относительно узкой стенки волновода, расстояние между полосками $l = 10$ мм. Результаты расчетов представлены на рис.6. Видно, что использование

метаматериала позволяет понизить рабочую частоту волновода (расширить полосу рабочих частот) примерно на 1 ГГц. Платой за это являются осцилляции коэффициента прохождения S_{12} , т.е. появляется неравномерность АЧХ волноводного тракта.

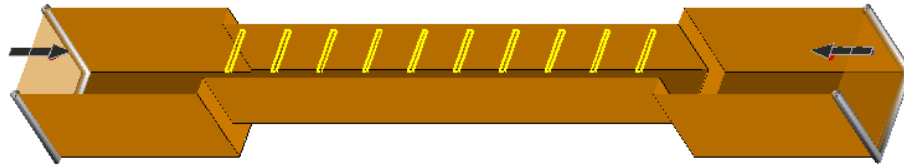


Рис.5. Геометрия задачи понижения рабочей частоты

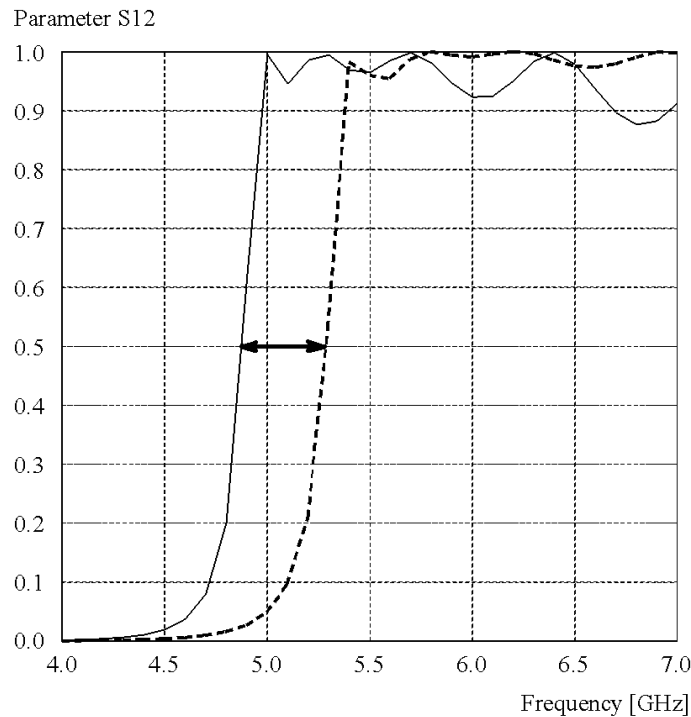


Рис.6. Зависимость коэффициента прохождения S_{12} от частоты.

Пунктир – исходный волновод,
сплошная линия – волновод с метаматериалом

Для формирования запрещенной зоны использовался такой же волновод, что и в предыдущем случае. Поскольку расчеты выполнялись в рабочей полосе, волноводные переходы не использовались. В качестве метаматериала были выбраны те же металлические полоски, что и на рис.5, выбранное расстояние между ними $l = 20$ мм позволило эффективно реализовать запрещенную зону в рабочей полосе волновода. Как видно из рис.8.а, б, в диапазоне 8,4...9 ГГц появилась полоса запираания. Данное явление характерно для фотонных кристаллов - искусственных периодических диэлектрических структур с запрещенной зоной, препятствующей распространению света в определенном частотном диапазоне. Физический механизм образования фотонных запрещенных зон в кристаллах такой же, как и для электронов в диэлектриках или полупроводниках. В его основе лежит явление распространения волны в среде с периодическим полем [5, 6]. В данной работе запрещенная зона была смоделирована в радиодиапазоне, т.е. был получен радиочастотный аналог фотонного кристалла – электромагнитный кристалл.



Рис.7. Геометрия задачи формирования запрещенной зоны в рабочей полосе частот волновода

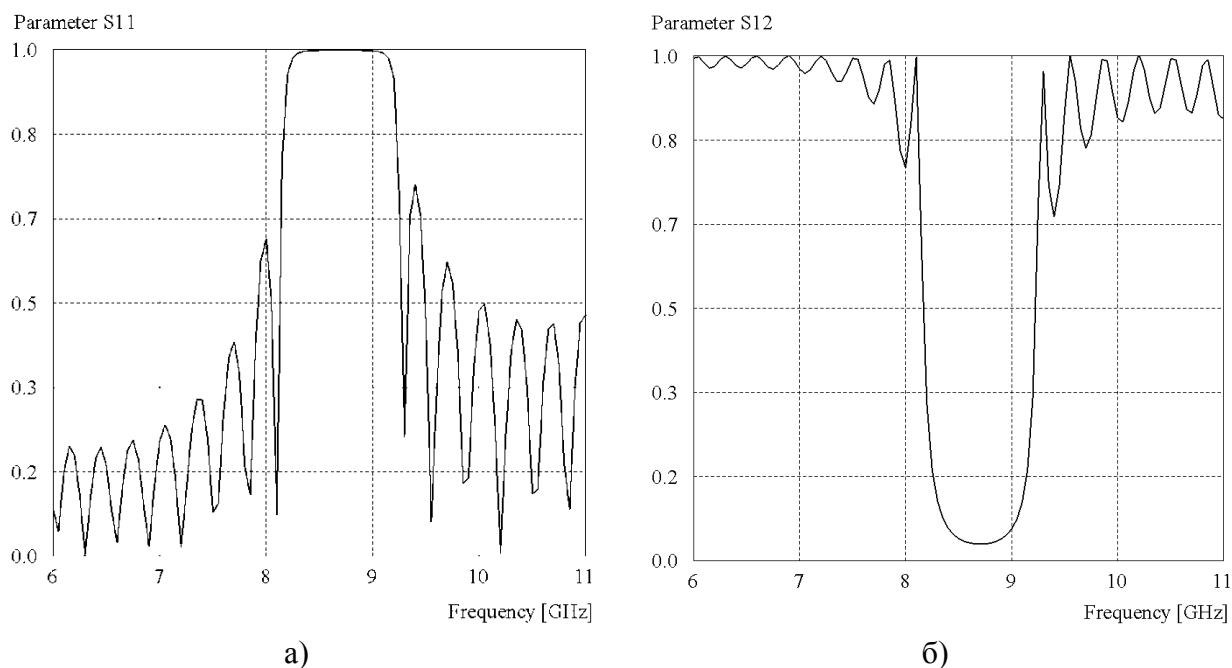


Рис.8. Зависимость коэффициентов отражения S_{11} (а) и прохождения S_{12} (б) от частоты

Литература

1. Слюсар В.И. Метаматериалы в антенной технике. Электроника: Наука, Технология, Бизнес 7/2009.
2. <http://www.feko.info>.
3. Банков С.Е., Курушин А.А. Электродинамика и техника СВЧ для пользователей САПР.
4. Ветлужский А.Ю.. О резонансных свойствах фотонных кристаллов. Письма в ЖТФ, 2010, том 36, вып. 12.
5. Жувикин Г. Лабиринты фотонных кристаллов: Опубликовано 13.08.2001.
6. Слепов Н. Фотонные кристаллы – будущее вычислительной техники и связи. Электроника: Наука, Технология, Бизнес.2000. №2.