## МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

## УДК 621.396.961

Изучение свойств электромагнитных кристаллов на примере структуры из тонких металлических проводников

## # 12, декабрь 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 barashkov.nickolay@rambler.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 ( $\varepsilon$ ) и магнитной ( $\mu$ ) проницаемостей.

В данной работе рассматривается искусственная среда с отрицательным значением относительной диэлектрической проницаемости и  $\mu = 1$ , что соответствует мнимому значению показателя преломления  $n = \sqrt{\varepsilon}$ . В литературе такие среды называют є-отрицательными или ENG-средами. Наиболее известным примером естественной ENG-среды является плазма, диэлектрическая проницаемость которой в отсутствие внешнего магнитного поля определяется по формуле:

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

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

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

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

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

$$\omega_p^2 = \frac{2\pi c_0^2}{a^2 [\ln(\frac{a}{2\pi r}) + 0,5275]} \quad \text{при} \quad r < 0,01a,$$
(3)

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





Рис.1. ENG – среда из тонких металлических проводников

Рис.2. Зависимость  $\varepsilon$  от длины волны  $\lambda$ 

На рис.2 представлена зависимость є от длины электромагнитной волны  $\lambda$ , которая была получена по формулам (1) и (4) для решетки цилиндров радиусом r = 1,5 мм и расстоянием между ними a = 10 мм. Выберем значение  $\lambda = 3$  см (при этом  $\varepsilon \approx -1,1$ ) и выполним численные расчеты ослабления поля в решетке 4x7 с прямоугольным расположением цилиндров при тех же параметрах (r = 1,5 мм и a = 10 мм). В этом случае ширина прямоугольной решетки равна длине волны в свободном пространстве.

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].

Результаты расчетов напряженности электрического поля представлены на рис.3. Видно, что падающее поле практически полностью отражается, ослабление

поля внутри структуры определяется множителем  $e^{j\frac{2\pi}{\lambda}x\sqrt{\varepsilon}} \cong e^{-2\pi}$ , что дает  $20\log(e^{-2\pi}) \approx -54.6$  дБ на расстоянии, равном длине волны.

Далее выполним расчеты для волновода, стенки которого образованы тонкими металлическими цилиндрами. На рис.4 показаны результаты расчетов напряженности электрического поля в исследуемой структуре, которая возбуждается плоской волной на частоте 10 ГГц ( $\lambda = 3$  см). Геометрия прямоугольных решеток, образующих стенки волноводов, такая же, как и на рис.3 (r = 1,5 мм и a = 10 мм). Волновод получен удалением центральных элементов, т.е. его ширина равна 20 мм. Видно, что поле в рассматриваемой структуре имеет вид, характерный для основной волны H<sub>10</sub> прямоугольного волновода. В этом случае длина волны в волноводе определяется формулой:

$$\Lambda = \lambda / \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\kappa p}}\right)} , \qquad (6)$$

где  $\lambda_{\kappa p}$  - критическая длина волны в волноводе.

Из формулы (6) следует, что для волны основного типа  $\lambda_{\kappa p} = 2a = 4 \text{ см} (a -$ ширина волновода) и в этом случае расчеты по формуле (6) дают  $\Lambda = 4,536 \text{ см}$ , что примерно соответствует результату, представленным на рис.4.





Рис.3. Отражение электромагнитной волны от решентки цилиндров



Следующий вычислительный эксперимент проводился для решетки цилиндров 7х7 с дефектом структуры, который заключался в удалении центрального цилиндра. Исходные данные для рассматриваемой задачи были взяты из работы [4]: ka = 1,675, r = a/28. При длине волны  $\lambda = 3$  см это соответствует расстоянию между элементами  $a \approx 8$  мм и радиусу цилиндров  $r \approx 0,29$  мм. Результаты расчетов представлены на рис.5 (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.

Далее была рассмотрена структура на основе прямоугольного волновода размером 12х28 мм (рабочая полоса частот – 6,57...9,99 ГГц). Использование периодической структуры в волноводе позволяет решить две задачи:

77-51038/474680

- понижение критической частоты (просветление волновода);

- формирование запрещенной зоны в рабочей полосе частот.

Вначале рассмотрим задачу понижения критической частоты с использованием продольной пластины, как это показано на рис.6.в. Для возбуждения на частотах  $f < 6,57 \Gamma \Gamma \mu$  использовались волноводные переходы (см. рис.6.б, в). Также была рассмотрена задача с продольной пластиной и без волноводных переходов (рис.6.а). Исходные данные для расчетов: сечение волновода 12х28 мм, волноводных переходов – 20х40 мм, ширина пластины, замкнутой на широкую стенку волновода - 3,5 мм.



Рис.5. Локализация поля в области дефекта структуры

Результаты вычислительных экспериментов, представленные на рис.7, свидетельствуют о том, что использование даже такой узкой полоски приводит к снижению критической частоты примерно на 200 МГц. Следует отметить, что без использования волноводных переходов АЧХ тракта практически не искажается, поскольку  $S_{21} \approx 1$  (точки на рис.7). Таким образом, наблюдаемые осцилляции на рис.7 (сплошная и пунктирная линии, соответствующие наличию и отсутствию продольной пластины), обусловлены влиянием волноводных переходов.





Рис.6. Геометрия задачи: пустой волновод (а), волновод с волноводным переходом (б), волновод



с переходом и продольной пластиной (в)

сплошная линия – волновод с переходами и периодической структурой, точки – возбуждение волновода без использования переходов

Представленные результаты показывают возможность снижения критической частоты волновода. В случае, когда требуется дальнейшее снижение частоты отсечки, необходимо изменить геометрию самой структуры внутри волновода. Для этого вместо продольной пластины следует использовать ENG-среду из тонких металлических полосок. Данная структура была сформирована из полосок шириной  $d = 1 \ MM$  и высотой  $h = 10 \ MM$ , расположенных симметрично по центру вдоль узкой стенки волновода, расстояние между полосками  $l = 10 \ MM$  (см. рис.8). Результаты расчетов, представленные на рис.9, показывают, что использование ENG-среды позволяет понизить критическую частоту волновода примерно на 500 МГц. Платой за это являются аналогичные предыдущему случаю осцилляции коэффициента прохождения  $S_{21}$ , т.е. появляется неравномерность АЧХ волноводного тракта. Распределение поля на трех частотах (4,5 ГГц, 5 ГГц и 5,5 ГГц) для волновода с рассмотренной ENG-средой представлено на рис.10.



Рис.8. Волновод с переходами и периодической структурой



Рис.9. Зависимость коэффициента прохождения S<sub>21</sub> от частоты. Пунктир – исходный волновод с переходами, сплошная линия – волновод с переходами и периодической структурой,



Для формирования запрещенной зоны использовался такой же волновод 12х28 мм, что и в предыдущих случаях (поскольку расчеты выполнялись в рабочей полосе, волноводные переходы не использовались). В качестве периодической структуры были выбраны металлические полоски шириной  $d = 1 \, MM$  и высотой  $h = 10 \, MM$  с расстоянием между ними  $l = 20 \, MM$  (см. рис.11). Результаты расчетов коэффициентов отражения  $S_{11}$  и прохождения  $S_{21}$  представленные на рис.12 свидетельствуют о том, что в диапазоне ~8,2...9,2 ГГц появилась полоса запирания. 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.11. Геометрия задачи формирование запрещенной зоны в рабочей полосе частот волновода



Рис.12. Зависимость коэффициентов отражения  $S_{11}$  (а) и прохождения  $S_{21}$  (б) от частоты

## Литература:

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