

文章编号: 1672-2892(2010)04-0407-04

一种基于介质谐振器的新型电磁超材料

李悬雷, 刘长军

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要: 文章设计了一种基于介质谐振器的新型混合左右手结构。该结构由工作在横电模式 TE 的介质谐振器嵌入到平行平板波导中组成。数值分析表明: 工作频带为 12 GHz~14 GHz, 在 13.15 GHz 频率下相移为零。该结构在整个通带内插入损耗低于 0.6 dB, 同时具有极低的通带波纹, 表现出了良好的传输特性。与普通的混合左右手结构相比, 其结构简单, 插入损耗较低, 在高频时导体损耗也较低, 在超级透镜、天线等领域具有很好的应用前景。

关键词: 超材料; 介质谐振器; 平行平板波导

中图分类号: TN826

文献标识码: A

A novel kind of metamaterial based on dielectric resonator

LI Xuan-lei, LIU Chang-jun

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China)

Abstract: In recent years, left-handed metamaterials have been extensively studied due to their unique properties. A new kind of structure with left-handed electromagnetic characteristics was designed and analyzed. It was composed of dielectric resonators working at transverse electric resonant mode, which were embedded into a parallel plate waveguide. It worked well from 12 GHz to 14 GHz, and the transition frequency was at 13.15 GHz. The proposed metamaterial demonstrated a good transmission performance with insertion loss less than 0.6 dB and low pass-band ripples. Compared with conventional CRLH structures, the structure is simple and with low insertion loss, low conductor loss at high frequency band. It can be applied to super lens and antennas in future.

Key words: metamaterial; dielectric resonator; parallel plate waveguide

左手材料同时具有负介电常数和负导磁率, 支持后向波传播^[1], 可以突破常规材料在许多问题中的限制。左手材料又称为超材料, 在微波、太赫兹和光学方面具有良好的应用前景。自从 Veselago 于 1967 年提出左手材料的概念以来, 多个研究小组分别实现了不同的左手结构。目前实现的左手结构, 总体上可以分为 2 类: 第 1 类是利用平面传输线构造串联电容和并联电感, 来实现负介电常数和负导磁率, 例如, 基于 CRLH-TL 传输特性的微带巴伦^[2]; 第 2 类是由高 Q 值极化选择的磁谐振器和电谐振器混合组成, 例如, Gingrich 等人实现的开口谐振环 SRRs 结构^[3]。他们通过开口环谐振器和细铜棒来实现负介电常数和负导磁率。由于它们都是由金属构造而来, 当频率较高时会呈现较大的导体损耗。

本文源于第 2 类左手材料结构, 设计了一种基于介质谐振的新型结构。这种结构是由相互耦合的介质谐振器组成晶格, 嵌入到平行平板波导内构成。

1 基本原理

平行平板的 TE_n 模式的等效介电常数的表达式可近似表示为^[4]:

$$\varepsilon_{\text{eff},n}(\omega) = \varepsilon_{\text{hm}} \left[1 - \left(\frac{\omega_{c,n}}{\omega} \right)^2 \right] \quad (1)$$

收稿日期: 2009-12-10; 修回日期: 2010-05-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60971051); 四川省青年基金资助项目(09ZQ026-016)

式中: ω 为角频率; $\omega_{c,n} = \frac{nc\pi}{d\sqrt{\epsilon_{\text{hm}}}}$ 为 TE_n 模式的截止频率, d 为两平行平板之间的间隔; ϵ_{hm} 为填充到平行平板之间介质的介电常数; n 为 TE 工作模式的阶数; c 为真空中的光速。由式(1)可以看出: 当工作频率 ω 低于 TE_n 模式的截止频率 $\omega_{c,n}$ 时, 平行平板的 TE_n 模式的等效介电常数为负值。

方形介质谐振器最低 TE 模式为 $\text{TE}_{01\sigma}$ 。该模式的场分布就像一个磁偶极子的场分布, 所以有时也称之为磁偶极子模^[5]。当入射波的磁场方向平行于介质谐振器的侧面, 并且工作频率高于介质谐振器的谐振频率时, 可以用其组成的晶格来产生等效的负导磁率^[6]。该左手材料为周期性结构, 入射电磁波为 TEM (Transverse Electro Magnetic)模式, 如图 1 所示。

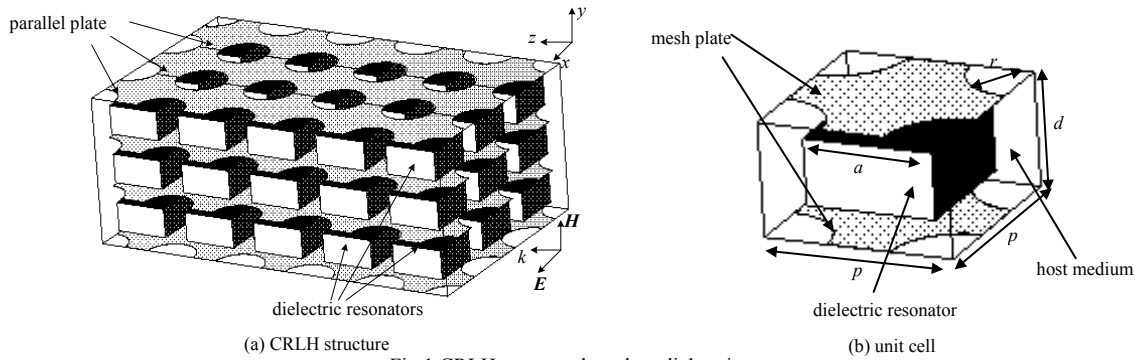


Fig.1 CRLH structure based on dielectric resonator

图 1 基于介质谐振器的混合左右手结构

单个单元格的等效电路模型如图 2(a)所示。 TE_n 模式的平行平板波导可以等效为串联的电感 L_0 和由 L_c 及 C_c 组成的并联谐振电路, 其中 L_c 和 C_c 组成的并联谐振电路的谐振频率为 ω_c ; $\text{TE}_{01\sigma}$ 模式的介质谐振器可以等效为 L_r 和 C_r 组成的并联谐振电路, 其谐振频率为 $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$, 整个波导的有效导磁率是由 $\text{TE}_{01\sigma}$ 模式的介质谐振器与 TE 模式截止的平行平板波导的磁互耦合 L_m 共同决定的。整个结构的等效电路如图 2(b)所示。

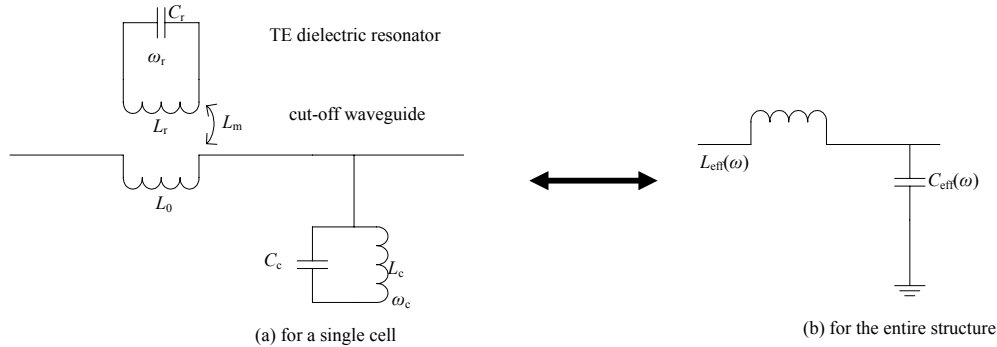


Fig.2 Equivalent circuit model

图 2 单元格的等效电路图

等效串联电感与并联电容都会随频率而变化, 其变化趋势如图 3 所示^[7], 其中 $\omega_s = \frac{1}{\sqrt{C_r L_r (1 - k_m^2)}} = \frac{\omega_r}{\sqrt{1 - k_m^2}}$,

$k_m = \frac{L_m}{\sqrt{L_0 L_r}}$ 为耦合系数。当角频率低于谐振频率 ω_s 且大于谐振频率 ω_r 时, 串联的等效电感 L_{eff} 呈现容性, 在传输线结构中等效于串联电容, 则材料的等效导磁率为负值; 当角频率低于谐振频率 ω_c 时, 并联的 L_c 和 C_c 呈现感性, 在传输线结构中等效于并联电感, 材料的等效介电常数为负值。因此, 选取参数合适时, 在 ω_r 和 $\min(\omega_s, \omega_c)$ 之间就会出现等效介电常数和等效导磁率同时为负值的情况, 材料会呈现左电磁特性; 在 $\omega < \omega_r$ 和 $\min(\omega_s, \omega_c) < \omega < \max(\omega_s, \omega_c)$ 时, 等效介电常数与等效导磁率的乘积会小于零, 材料的特征阻抗将会为一纯虚数; 当 $\omega_s = \omega_c$ 时, 被称为平衡状态^[8-9], 此时 β 将随 ω 连续变化。

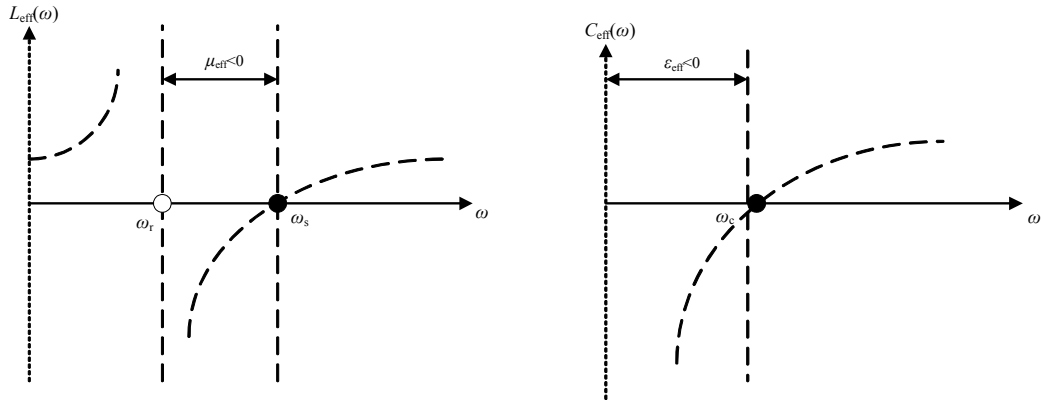


Fig.3 Negative effective permittivity and negative effective permeability varying with frequency
图3 负等效介电常数与负等效磁率随频率的变化

2 设计与仿真结果

在2个平行金属平板之间,镶嵌的介质谐振器的相对介电常数 $\epsilon_{\text{DR}} = 38$, 高度 $h = 2.04 \text{ mm}$, 边长 $a = 4.1 \text{ mm}$, 相邻的两介质谐振器的间隔 $p = 6 \text{ mm}$, 上下两层的金属平板的间隔 $d = 3.5 \text{ mm}$, 金属平板上开的圆形窗口的半径 $r = 2 \text{ mm}$, 金属平板的厚度为 $t = 9 \mu\text{m}$, 两层金属平板中间填充的介质的介电常数为 $\epsilon_{\text{hm}} = 2.2$ 。

本文使用 CST 进行电磁场数值仿真。CST 是以有限积分技术为算法基础的通用电磁场仿真软件, 可满足于从静态到高频、从时域到频域等的模拟计算。本文使用其时域高频计算进行数值仿真。在 $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 是电壁, $y_{\min}$ 和 $y_{\max}$ 是磁壁的边界条件下, 考虑具有1个单元格宽和5个单元格长的结构, 数值计算得到的色散曲线如图4所示。 Γ 点表示波矢量的起始点($k_x p = k_y p = 0$), X 点表示布里渊区的边界是沿着 x 方向($k_x p = \pi, k_y p = 0$), M 点表示布里渊区的边界是沿着 x - y 面的对角线方向($k_x p = k_y p = \pi$)。从图5可以看出: 在 $f_0 = 13.15 \text{ GHz}$ 处, 该结构引入的相移恰好为零, 即该频率点呈现为左手特性和右手特性的中间点。当频率低于 f_0 时, 该结构的左手模式占主导。随着频率的增加, 波长在增加, 与传统的右手媒质特性相反。当频率高于 f_0 时, 该结构的右手模式占主导。同时从图中可以看到, 从左手模式到右手模式的过渡比较平滑。

在此基础上, 进一步分析结构的传输特性。仍然考虑1个单元格宽和5个单元格长的结构, 利用同样的边界条件, 入射的平面波的方向和极化方式如图1所示, 得到的 S 参数如图5所示。

从图5中可以看出, 该结构的传输特性良好。带宽为 $12 \text{ GHz} \sim 14 \text{ GHz}$, 在通带内的回波损耗大于 10 dB , 插入损耗始终低于 0.6 dB 。在频率低于 12 GHz 时, 等效介电常数和等效导磁率的乘积小于零, 结构的特征阻抗

$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_{\text{eff}}}{\epsilon_{\text{eff}}}} = \sqrt{\frac{L_{\text{eff}}}{C_{\text{eff}}}}$ [10] 为纯虚数, 则结构在频率低于 12 GHz

时处于截止状态。

从上面数值计算的结果可以看出, 这种由介质谐振器和

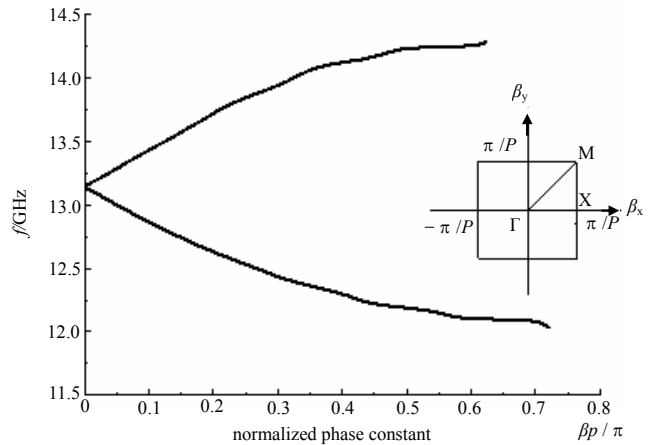


Fig.4 Dispersion diagram
图4 色散图

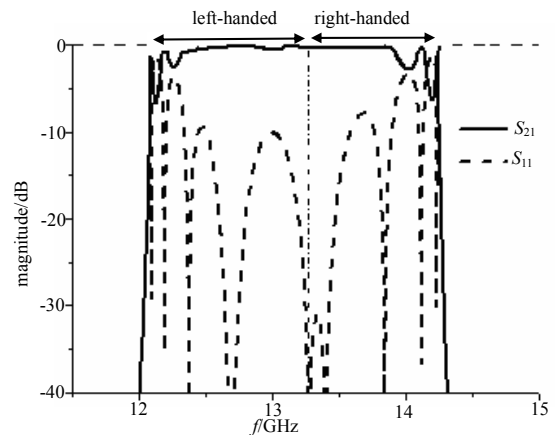


Fig.5 S-parameter of a 1×5 unit cell
图5 1×5 单元结构的 S 参数

平行平板构成的左手结构与传统的左手材料结构相比,设计方便,结构简单,易于实现,且插入损耗小,尤其适合于工作在频率较高的波段。

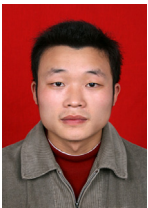
3 结论

本文利用平行平板波导和介质谐振器构造了一种混合左右手结构。该结构的插入损耗在工作频带内始终低于 0.6 dB。在 12 GHz~13 GHz 的频率范围内工作在左手模式。该结构使用了介质谐振器取代了金属环和金属棒的结构,利用低损耗介质构造的左手材料插入损耗很低,可以克服目前左手材料插入损耗高的缺点,在微波技术领域具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] Veselago V. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968,10(4): 509-514.
- [2] Liu C, Menzel W. Broadband via-free microstrip balun using metamaterial transmission lines [J]. IEEE Microwave & Wireless Components Letters, 2008,18(7):437-439.
- [3] Gingrich M A, Werner D H. Synthesis of low/zero index of refraction metamaterials from frequency selective surfaces using genetic algorithms [J]. Electron. Lett., 2005,41(23):1266-1267.
- [4] Tetsuya Ueda, Anthony Lai, Tatsuo Itoh. Demonstration of negative refraction in a cutoff parallel-plate waveguide loaded with 2-D square lattice of dielectric resonators [J]. IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 2007,55(6):1280-1287.
- [5] 廖承恩. 微波技术基础 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1994.
- [6] Lewin L. The electrical constants of a material loaded with spherical particles [J]. Proc. Inst. Elec. Eng., 1947,94(3):65-68.
- [7] Tetsuya Ueda, Anthony Lai, Tatsuo Itoh. Composite right/left handed metamaterial structures composed of dielectric resonators and parallel mesh plates [C]// IEEE MIT-S Int. Microw. Symp. Dig., Honolulu: [s.n.], 2007:1823-1826.
- [8] 赵丽蓉, 杨滔, 王文磊, 等. 一种基于零阶谐振特性的新型微带阵列天线 [J]. 信息与电子工程, 2009,7(2):107-109. (ZHAO Li-rong, YANG Tao, WANG Wen-lei, et al. A novel microstrip array antenna based on zeroth-order resonance [J]. Information and Electronic Engineering, 2009,7(2):107-109)
- [9] 范如东, 刘长军. 基于 CRLH-TL 零阶谐振特性的新型串联功分器 [J]. 工程设计学报, 2008,15(3):213. (FAN Ru-dong, LIU Chang-jun. Novel series power divider based on zeroth-order resonance of the composite right left-handed transmission line [J]. Journal of Engineering Design, 2008,15(3):213)
- [10] 刘长军, 黄卡玛, 闫丽萍. 射频通信电路设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.

作者简介:



李悬雷(1986-), 男, 河南省禹州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为射频无线通信, email:solixuanlei@163.com.

刘长军(1973-), 男, 河北省邢台市人, 教授, 博士, 主要研究方向为电磁场与微波技术.