

基于金属结构单元间耦合的左手材料的设计及实验验证*

王甲富¹⁾ 屈绍波^{1)2)†} 徐卓²⁾ 张介秋¹⁾ 马华¹⁾²⁾ 杨一鸣¹⁾ 吴翔¹⁾ 鲁磊¹⁾

1) (空军工程大学理学院, 西安 710051)

2) (西安交通大学电子陶瓷与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

(2009 年 5 月 27 日收到; 2009 年 11 月 24 日收到修改稿)

提出了基于金属结构单元间耦合进行左手材料设计的思想, 并建立了理论分析模型. 通过合理选择结构单元的结构参数并通过单元之间的耦合, 使电谐振等效电路的谐振频率与磁谐振等效电路的谐振频率相等, 从而最大限度地实现宽左手频带. 加工、制作并测试了基于金属结构单元间耦合的左手材料. 实验结果表明, 测试样品具有相等的电谐振频率和磁谐振频率, 其左手频带的带宽为 2.4 GHz. 实验结果与理论分析一致, 验证了基于金属结构单元间耦合的左手材料设计思想.

关键词: 左手材料, 单元间耦合, 等谐振频率, 宽频带

PACC: 4270Y, 7430G, 7785

1. 引 言

左手材料自其问世以来, 一直是国际学术界的研究热点之一. 基于 Pendry 等^[1]的理论工作, Smith 研究小组^[2]用开口谐振环和金属线首次实现了磁导率和介电常数同时为负的左手材料. 左手材料具有不同于常规材料的奇异电磁特性, 在光学成像^[3]、微波器件^[4]、天线系统^[5]、电磁隐身^[6]等领域具有广阔的应用前景.

目前, 宽频带、低损耗左手材料的物理机制、设计及实现仍是左手材料研究的核心问题. 最早的左手材料设计思想是通过连续金属线的等离子体振荡实现负介电常数, 通过磁谐振器响应磁场的磁谐振实现负磁导率, 研究初期涌现出的左手材料大都基于这一设计思想^[7-9]. 第二种设计思想是通过电谐振器响应电场的电谐振实现负介电常数, 通过磁谐振器响应磁场的磁谐振实现负磁导率, 避免连续金属线带来的诸多不便^[10, 11]. 第三种设计思想是通过同时具有电谐振和磁谐振的金属结构单元实现负介电常数和负磁导率^[12-14]. 以上三种设计思想都

是在忽略结构单元间耦合的前提下, 通过不同金属结构单元或同一个金属结构单元本身的电谐振和磁谐振来实现左手材料. 实际上, 金属结构单元间总是存在着耦合, 这些耦合作用对左手材料的性质具有不可忽略的影响^[15].

本文提出了基于金属结构单元间耦合进行左手材料设计的思想, 通过相邻金属结构单元之间的耦合实现同时发生的电谐振和磁谐振, 从而实现同时为负的介电常数和磁导率. 通过合理选择金属结构单元的结构参数, 可以使电谐振等效电路和磁谐振等效电路的谐振频率相等, 最大限度地拓展双负区域, 从而实现宽频带左手材料. 加工、制作并测试了基于金属结构单元间耦合的左手材料, 验证了其宽达 2.4 GHz 的左手频带, 从而验证了基于金属结构单元间耦合的左手材料设计思想.

2. 设计和理论

为实现同时为负的介电常数和磁导率, 左手材料结构需要在某个频段内同时产生电谐振和磁谐振, 这就要求电谐振频率接近或等于磁谐振频率.

* 国家自然科学基金(批准号:50632030, 60871027)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2009CB613306)和陕西省自然科学基金(批准号: SJ08F01)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn

由于左手频带是负介电常数区域与负磁导率区域的重合部分,所以当电谐振频率与磁谐振频率相等时,左手频带最宽. 在 LC 谐振回路中,谐振频率 $\omega = 1/\sqrt{LC}$, 其中 L 和 C 分别为等效电路的电感和电容. 为实现相等的电谐振频率和磁谐振频率,应设法使两种等效电路电感和电容的乘积相等,最理想的情况是使电谐振等效电路的电感和电容分别等于磁谐振等效电路的电感和电容.

若通过单个金属结构单元本身所同时具有的电谐振和磁谐振来实现左手材料,由于电谐振和磁谐振之间复杂强烈的相互作用,很难建立有效的分析模型. 另外,结构参数的微小变化很可能会导致负介电常数区域和负磁导率区域的彼此偏离,致使左手频带变窄甚至消失. 另一方面,相邻结构单元间的耦合也可以形成等效 LC 谐振电路,而且耦合形成的电谐振等效电路和磁谐振等效电路之间的相互作用较弱. 这样,我们可以利用结构单元间耦合来实现同时发生的电谐振和磁谐振,从而实现易于理论分析的宽频带左手材料.

对于左手材料结构单元,若沿着电场方向结构单元既具有容性部分,也具有感性部分,通过等效电容和等效电感响应电场的 LC 谐振可以实现电谐振. 同样,若在磁场穿过的平面内结构单元同时具有容性和感性部分,通过等效电容和等效电感响应磁场构成的 LC 谐振回路可以实现磁谐振. 图 1(a) 给出了一种基于金属结构单元间耦合左手材料的两个相邻结构单元. 将宽度为 0.2 mm 的铜线构成的金属结构单元刻蚀在 FR-4 环氧玻璃布层压板上(相对介电常数 $\epsilon_r = 4.2$, 厚度 $t = 0.4\text{ mm}$), 金属结构单元的结构参数 $a = 3.1\text{ mm}$, $l = 1.4\text{ mm}$, $d = 0.2\text{ mm}$. 图 1(b) 为两相邻结构单元在响应外加电磁场时的耦合等效电路,其中 L_0 是长度为 $a/2$ 的铜线的电感, C_0 是长度为 l 、距离为 d 的两条铜线之间的电容. 根据法拉第电磁感应定律,对于磁场中的闭合回路,当穿过由回路所限定的曲面的磁通量发生变化时,回路中会产生感应电动势,从而引起感应电流. 另外,沿着金属线的电场驱动金属线中的电子运动产生电流. 图 1(b) 中 I_e 和 I_m 分别为两相邻结

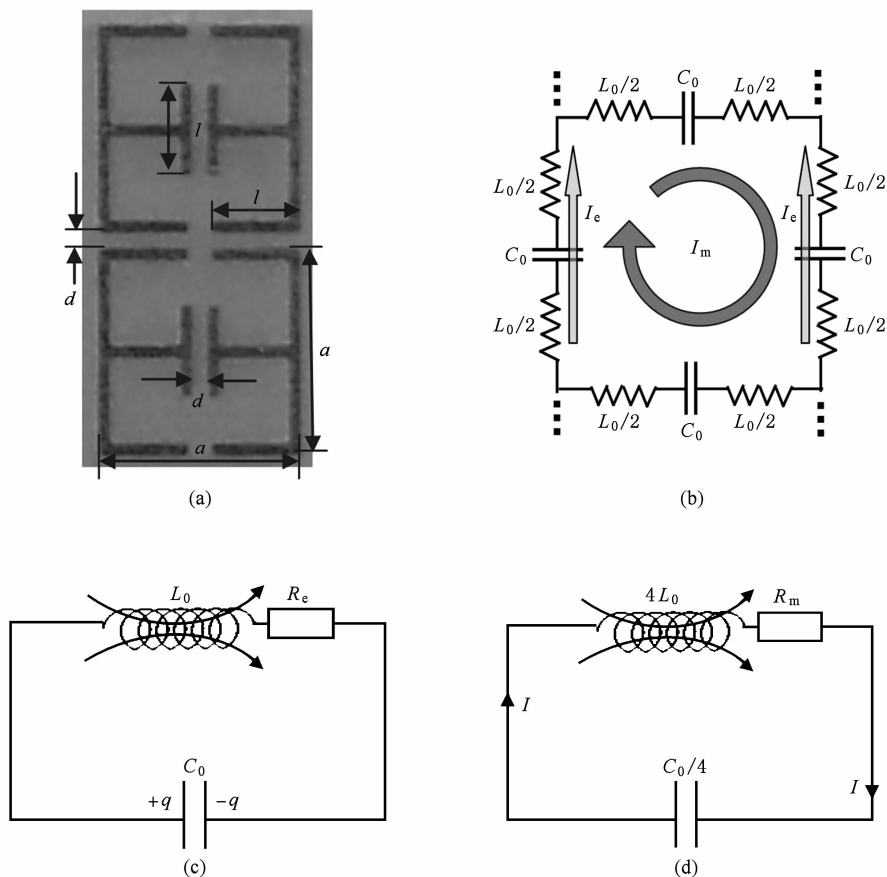


图 1 两个相邻结构单元的实物照片及等效电路 (a) 相邻结构单元的实物照片, (b) 相邻结构单元的耦合等效电路, (c) 电谐振等效电路, (d) 磁谐振等效电路

构单元响应电场和磁场产生的电流. 根据 I_e 流向以及左手材料结构的周期性, 电谐振等效电路的总电感 L_e 和总电容 C_e 分别为

$$\begin{aligned} L_e &= L_0/2 + L_0/2 \\ &= L_0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$C_e = C_0. \quad (2)$$

由于结构单元左右两侧由电场驱动的电场 I_e 大小相等、方向相同, 从总体上看, 左右两侧的 I_e 对磁谐振等效电路的影响相互抵消. 由 I_m 流向可知, 磁谐振等效电路的总电感 L_m 和总电容 C_m 分别为

$$\begin{aligned} L_m &= 8 \times L_0/2 \\ &= 4L_0, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} C_m &= \frac{1}{1/C_0 + 1/C_0 + 1/C_0 + 1/C_0} \\ &= C_0/4. \end{aligned} \quad (4)$$

所以, 电谐振和磁谐振的等效电路可分别由图 1(c) 和 (d) 表示. 由 (1)–(4) 式可知, 电谐振频率 ω_e 和磁谐振频率 ω_m 分别为

$$\omega_e = 1/\sqrt{L_0 C_0}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \omega_m &= 1/\sqrt{4L_0 \times C_0/4} \\ &= 1/\sqrt{L_0 C_0}. \end{aligned} \quad (6)$$

由 (5), (6) 式可知, 电谐振频率和磁谐振频率相等. 这样, 通过结构单元之间的耦合可以最大限度地拓展左手带宽, 实现宽频带左手材料.

3. 实 验

为验证基于金属结构单元间耦合的左手材料设计思想, 加工了由图 1(a) 中结构单元构成的左手材料并进行了测试. 测试样品如图 2(a) 所示, 为了将样品固定并构成周期阵列, 将样品嵌入到泡沫塑料中. 由于泡沫塑料的介电常数和磁导率都与空气非常接近, 可近似认为样品置于空气中. 图 2(b) 为矩形波导测试系统的实物照片. 在测试中, 将测试样品放到 BJ100 标准波导中, 用 HP8720ES 型矢量网络分析仪测出样品散射参数的大小和相位. 根据测试散射参数以及由其提取的等效介电常数和磁导率^[16], 可以确定测试样品是否具有左手特性. 图 3 给出了测试散射参数 S_{11} 和 S_{21} 的大小. 由图 3 可知, 在 11.75 GHz 附近有一个明显的通带, 该通带可能是左手通带, 也可能是右手通带, 需要提取等效参数加以确定.

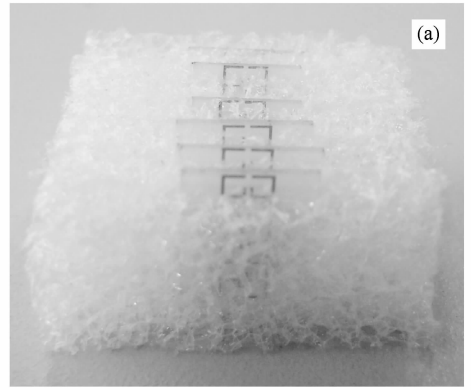


图 2 测试样品和测试系统 (a) 测试样品, (b) 波导测试系统

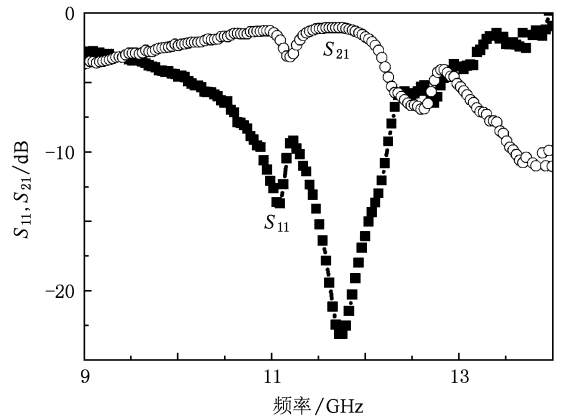


图 3 测试散射参数 S_{11} 和 S_{21}

图 4 给出了由测试散射参数提取的等效参数. 由图 4(a) 和 (b) 可知, 样品的等效磁导率和等效介电常数的实部在 11.5 GHz 同时由正变为负, 这验证了样品的电谐振频率与磁谐振频率相等, 与理论分析一致. 样品等效磁导率的实部在 11.5–13.9 GHz 频率范围内为负, 等效介电常数的实部在 11.5–14.0 GHz 频率范围内为负. 在两个频率范围的重合

部分(11.5—13.9 GHz), 样品的等效磁导率和等效介电常数同时为负. 所以, 样品的左手频带为 11.5—13.9 GHz, 带宽为 2.4 GHz, 相对带宽达到了 19%. 在左手频带内, 等效折射率的实部为负, 如图 4(d) 所示. 图 4(c) 给出了样品相对于空气的阻抗, 11.5—12.2 GHz 频率范围内的阻抗匹配较好, 相应

的反射率较低, 而 12.2—13.9 GHz 频率范围内的阻抗匹配较差, 相应的反射率较高(见图 3). 另外, 注意图 4(a) 和 (b) 中的等效磁导率虚部与等效介电常数虚部符号始终相反, 并且在若干频段内出现了负虚部, 这是由结构单元的有限尺寸及左手材料的周期性所致^[15,17].

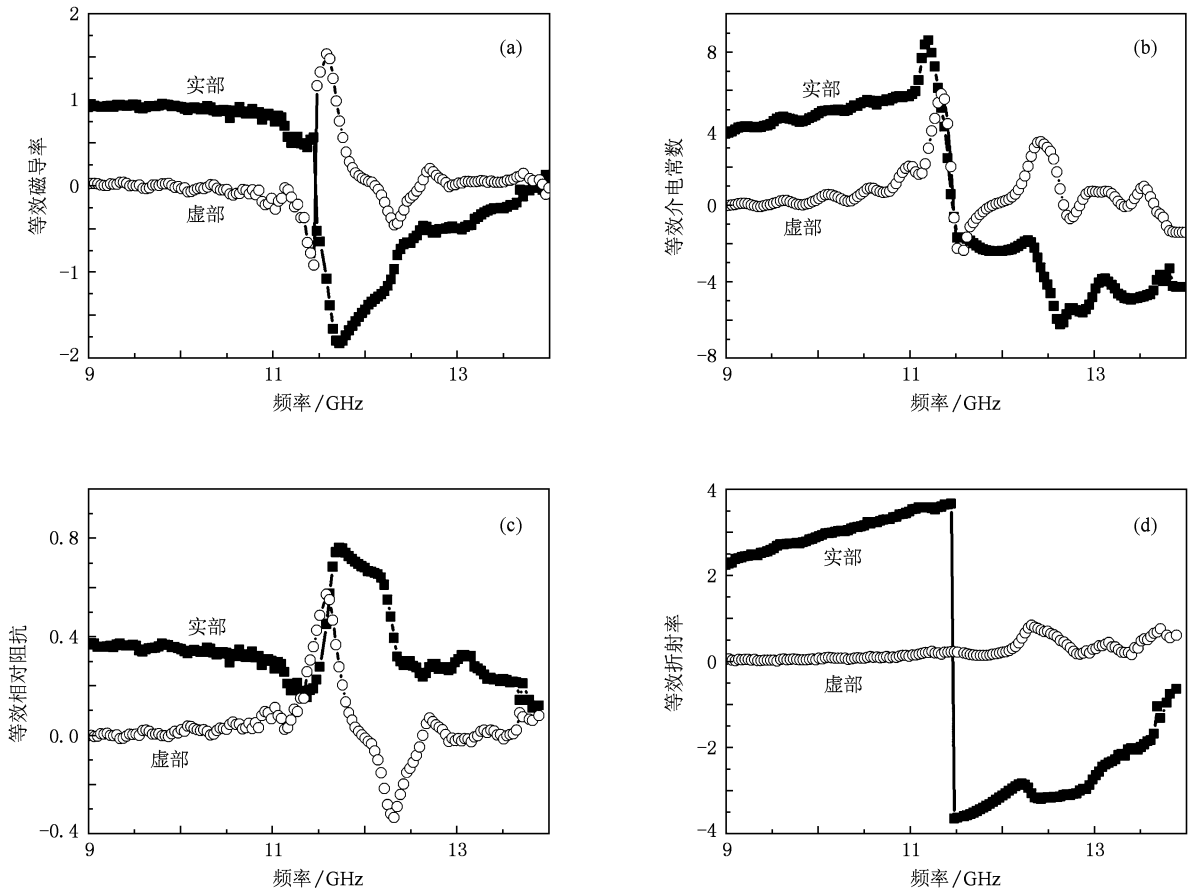


图 4 根据测试散射参数提取的等效参数 (a) 等效磁导率, (b) 等效介电常数, (c) 等效相对阻抗, (d) 等效折射率

4. 结 论

本文提出了基于金属结构单元间耦合的左手材料设计思想, 根据等效电路理论建立了理论分析模型, 最后通过实验验证了这一设计思想. 通过合

理选择结构单元的结构参数, 利用结构单元之间的耦合可以实现同时发生的电谐振和磁谐振, 从而实现同时为负的介电常数和磁导率. 电谐振频率和磁谐振频率相等保证了左手频带的存在, 并且最大限度地拓展了左手频带的带宽. 基于金属结构单元间耦合的左手材料结构简单、频带宽, 为新型左手材料的设计提供了一种很好的思路.

- [1] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* **47** 2075
- [2] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184

- [3] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [4] Ma H, Qu S B, Xu Z, Wang J F 2008 *Opt. Express* **16** 15449
- [5] Zhou H, Pei Z B, Qu S B, Zhang S, Wang J F, Li Q, Xu Z 2009 *J. Electromagn. Waves Appl.* **23** 953

- [6] Ma H, Qu S B, Xu Z, Zhang J Q, Chen B W, Wang J F 2008 *Phys. Rev. A* **78** 036608
- [7] Zhang F L, Zhao X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4661 (in Chinese) [张富利、赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 4661]
- [8] Zheng Q, Zhao X P, Fu Q H, Zhao Q, Kang L, Li M M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5683 (in Chinese) [郑 晴、赵晓鹏、付全红、赵 乾、康 雷、李明明 2005 物理学报 **54** 5683]
- [9] Cai X B, Zhou X M, Hu G K 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 348
- [10] Liu R P, Degiron A, Mock J J, Smith D R 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 263504
- [11] Wang J F, Qu S B, Xu Z, Zhang J Q, Yang Y M, Ma H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5015 (in Chinese) [王甲富、屈绍波、徐卓、张介秋、杨一鸣、马 华 2008 物理学报 **57** 5015]
- [12] Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5883 (in Chinese) [刘亚红、罗春荣、赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 5883]
- [13] Wang D X, Ran L X, Chen H S, Mu M K, Kong J A, Wu B I 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 254103
- [14] Huangfu J T, Ran L X, Chen H S 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1537
- [15] Koschny T, Markos P, Economou E N, Smith D R, Vier D C, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. B* **71** 245105
- [16] Chen H S, Zhang J J, Bai Y, Luo Y, Ran L X, Jiang Q, Kong J A 2006 *Opt. Express* **14** 12944
- [17] Koschny T, Markos P, Smith D R, Soukoulis C M 2003 *Phys. Rev. E* **68** 065602

Design and experimental verification of left-handed metamaterials based on inter-unit-cell coupling *

Wang Jia-Fu¹⁾ Qu Shao-Bo^{1)2)†} Xu Zhuo²⁾ Zhang Jie-Qiu¹⁾ Ma Hua¹⁾²⁾
Yang Yi-Ming¹⁾ Wu Xiang¹⁾ Lu Lei¹⁾

1) (College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

2) (Key Laboratory of Electronic Ceramics and Devices of Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 27 May 2009; revised manuscript received 24 November 2009)

Abstract

A method of designing left-handed metamaterials based on inter-unit-cell coupling was proposed in this paper. A theoretical model was established using equivalent circuit theory. By properly setting the geometrical parameters of adjacent unit cells, the electric resonance frequency can be made equal to the magnetic resonance frequency. Thus, the left-handed bandwidth reaches its maximum. A typical left-handed metamaterial based on inter-unit-cell coupling was fabricated and tested. The experimental results show that the test sample has equal electric and magnetic resonance frequencies and the left-handed bandwidth is 2.4 GHz. This verifies the design method proposed in this paper.

Keywords: left-handed metamaterials, inter-unit-cell couplings, equal resonance frequencies, broadband

PACC: 4270Y, 7430G, 7785

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50632030, 60871027), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2009CB613306) and the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. SJ08F01).

† Corresponding author. E-mail: qushaobo@mail.xjtu.edu.cn