

磁谐振和电谐振结构构成的左手材料设计*

王甲富¹⁾ 屈绍波^{1,2)} 徐卓²⁾ 张介秋¹⁾ 杨一鸣¹⁾ 马华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)

(2007 年 12 月 7 日收到; 2008 年 2 月 29 日收到修改稿)

用磁谐振器和电谐振器组合构成左手材料是设计左手材料的一个重要方法. 基于这一设计方法, 提出了能够抑制双各向异性的磁谐振器和电谐振器设计原理, 即单回路镜像对称设计原理和双(四)回路镜像对称设计原理. 根据这两个设计原理, 设计了具有双负特性(负介电常数和负磁导率)的新结构, 并通过实验仿真验证了结构的双负特性, 从而验证了两种设计原理的正确性. 所提出的两个设计原理以及新结构对于设计新型左手材料具有重要的实际意义和指导意义.

关键词: 左手材料, 单回路镜像对称, 双回路镜像对称

PACC: 4270Y, 7430G, 7785

1. 引 言

1968 年, 前苏联科学家 Veselago^[1]对电磁波在介电常数和磁导率同时为负的媒质中的传播特点作了理论研究. 1999 年, 英国皇家学院的 Pendry 等^[2]提出了具有双负特性的左手材料结构理论, 即用金属线来实现负介电常数, 用开口谐振环(split ring resonator, 简记为 SRR)的磁谐振来实现负磁导率, 并提出了相应的理论. Smith 等^[3]根据 Pendry 等提出的理论模型, 设计出了 SRR 和金属线阵列构成的左手材料结构, 并通过棱镜实验验证了这种结构的负折射系数. 此后, 对左手材料的研究不断深入, Marques 等^[4]深入研究了 SRR 的极化率, 并提出了可以避免双各向异性(bianisotropy)的宽边耦合开口谐振环. Sauviac 等^[5]系统地建立了 SRR 的理论模型, 通过此理论模型具体分析了 SRR 的准静态极化率以及谐振极化率, 并且提出了决定 SRR 谐振频率的电容和电感的计算公式. 张富利等^[6]研究了谐振频率可调的环状 SRR 及其效应, 通过金属短杆与 SRR 之间的附加电容来调节传统磁谐振器的谐振频率. Padilla 等^[7]提出了取代金属线用以实现负介电常数的各种结构, 并称这些结构为电谐振器(electric resonators). 刘亚红等^[8]用 H 形结构单元同时实现了负磁导率

和负介电常数, 这种结构单元结构简单、制作方便, 但是由于采用同一个结构实现负磁导率和负介电常数, 因而不易对磁导率和介电常数进行分析和调节. 2007 年, Liu 等^[9]提出了通过使电谐振器和磁谐振器(magnetic resonators)的谐振区域重合来实现双负特性的左手材料结构, 为设计左手材料提出了一种很好的思路.

虽然各国研究者们对左手材料的研究非常广泛, 但是主要集中于磁谐振器的研究上, 而关于电谐振器的研究和文献都非常少, 没有具体的设计理论. 基于用电谐振器和磁谐振器构成左手材料的设计思想, 本文提出了磁谐振器和电谐振器的设计原理, 设计了新结构, 并通过实验仿真验证了所设计的左手材料结构的双负特性.

2. 磁谐振器和电谐振器的设计原理

2.1. 磁谐振器的单回路镜像对称设计原理

用磁谐振器实现负磁导率的原理如下: 由于磁谐振器既具有电容性部分又具有电感性部分, 当电磁波入射到磁谐振器上时, 由电磁感应定律可知, 入射电磁波的磁场会在其上产生感应电流, 形成 RLC 谐振回路. 当磁谐振器发生谐振时, 谐振负区域的等

* 国家自然科学基金(批准号: 10474077, 50632030)和陕西省基础研究计划(批准号: 2005E15)资助的课题.

效磁导率为负. 为克服磁谐振器结构的双各向异性, 即抑制其电响应, 磁谐振器的等效电路必须为镜像对称的单回路, 所以我们称磁谐振器的设计原理为单回路镜像对称设计原理.

在设计磁谐振器结构时, 应该注意其等效电路的单回路镜像对称性. 图 1 为根据单回路镜像对称设计原理设计的一种磁谐振结构及其等效电路. 此结构由厚度 $t = 0.5 \text{ mm}$ 、边长 $a = 6 \text{ mm}$ 的正方形基板(相对介电常数 $\epsilon_r = 2.65$)以及刻蚀在基板上宽度 $w = 0.4 \text{ mm}$ 、厚度可忽略不计的铜线构成, 如图 1(a) 所示. 铜线间的间距 $d = 0.2 \text{ mm}$, 开口宽度 $c = 0.2 \text{ mm}$, 正方形铜环的边长 $b = 4.1 \text{ mm}$, 环内外的铜线长度 $l = 2.2 \text{ mm}$. 图 1(b) 为此结构的等效电路, 图中 C_0 为铜环与环外(或环内)铜线之间的电容, C_s 为正方形铜环上开口的电容. 由图 1(b) 可知, 结构的等效电路在 x 方向和 y 方向都具有镜像对称性, 所以此结构不具有双各向异性.

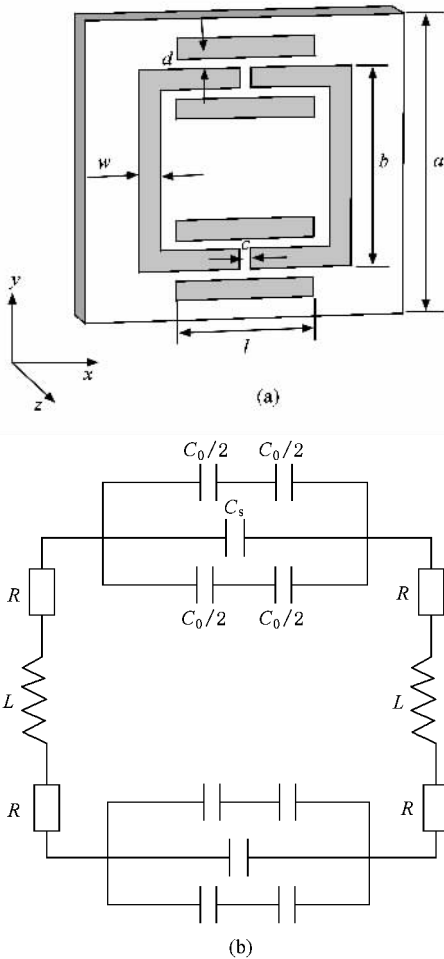


图 1 磁谐振器结构及其等效电路 (a) 磁谐振器结构, (b) 等效电路

2.2. 电谐振器的双(四)回路镜像对称设计原理

用电谐振器实现负介电常数的原理如下: 当电磁波入射到电谐振器上时, 在入射电磁波的电场作用下, 电谐振器上会产生电流. 由于电谐振器既具有电容性部分又具有电感性部分, 电谐振器的等效电路为一个 RLC 谐振回路. 当电谐振器发生谐振时, 谐振负区域的等效介电常数为负. 为克服电谐振器结构的双各向异性, 即抑制其磁响应, 电谐振器的等效电路必须等效为镜像对称的双回路或四回路, 因此我们称电谐振器的设计原理为双(四)回路镜像对称设计原理. 由于双回路是镜像对称的, 入射电磁波的磁场在电谐振器等效电路的两个回路产生的电流方向相反, 电谐振器结构的总磁通量为零, 由此抑制了结构的磁响应, 整个结构在入射电磁场的作用下只有电响应.

在设计电谐振器结构时, 应注意设计结构等效电路的双回路镜像对称性. 图 2 为根据双回路镜像对称设计原理设计的一种电谐振结构及其等效电路. 此结构由厚度 $t = 0.5 \text{ mm}$ 、边长 $a = 6 \text{ mm}$ 的正方

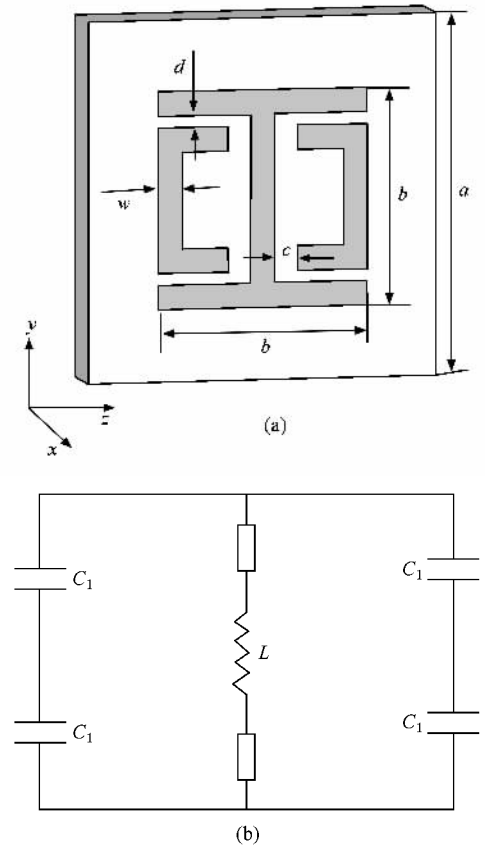


图 2 电谐振器结构及其等效电路 (a) 电谐振器结构, (b) 等效电路

形基板(相对介电常数 $\epsilon_r = 2.65$)以及刻蚀在基板上的宽度 $w = 0.4 \text{ mm}$ 、厚度可忽略不计的铜线构成,如图 3(a)所示.铜线间的间距 $d = 0.2 \text{ mm}$,开口宽度 $c = 0.4 \text{ mm}$;"工"字形结构的铜线长 $b = 3 \text{ mm}$.图 3(b)为此结构的等效电路,图中 C_1 为"工"字形结构的铜线与"C"字形结构的铜线之间的电容.由图 3(b)可知,此结构的等效电路在 x 方向和 y 方向都具有镜像对称性,所以此结构不具有双各向异性.

3. 左手材料结构的设计及实验仿真

将磁谐振结构和电谐振结构组合,通过调节它们的谐振频率,使它们的谐振频率区域全部或部分重合,就可以得到由磁谐振结构和电谐振结构构成的左手材料结构.

图 3 为图 2 中的电谐振结构所组成的阵列及其透射频谱.图 3(a)中,每排结构之间的距离为 6 mm .电磁波垂直于谐振器平面入射,其电场和磁场方向如图 3(a)所示.图 3(b)为此电谐振结构阵列的透射频谱的实验仿真结果.由图 3(b)可知,电谐振结构阵列在 $8.7\text{--}9.7 \text{ GHz}$ 之间出现负谐振.在此频率范围内,整个结构的等效介电常数为负值,而其等效磁

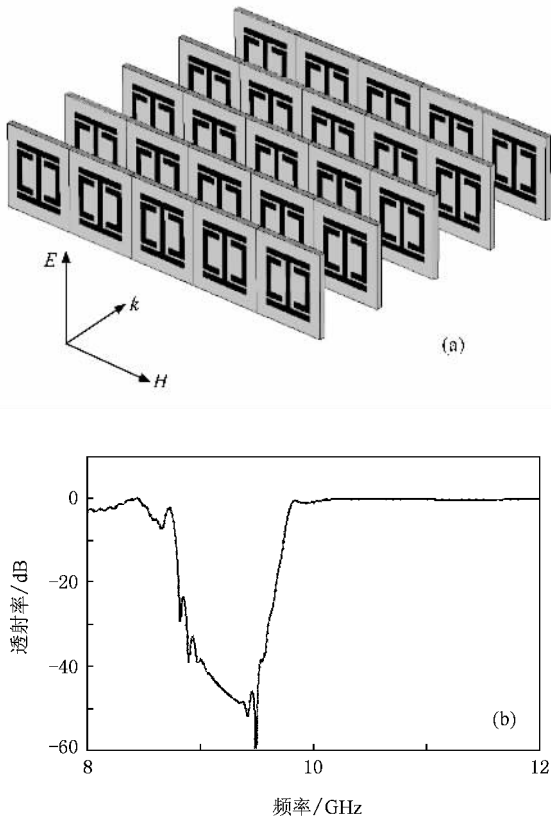


图 3 电谐振结构阵列及其透射频谱 (a)电谐振结构阵列, (b)透射频谱

导率为正值,电磁波基本被反射,所以电磁波的透射率很小($-50\text{--}-40 \text{ dB}$).

图 4 为图 1 所示的磁谐振结构所组成的阵列及其透射频谱.图 4(a)中,每排结构之间的距离为 6 mm .图 4(b)为此磁谐振结构阵列的透射频谱的实验仿真结果.由图 4(b)可知,此电谐振结构阵列在 $8.8\text{--}10.3 \text{ GHz}$ 之间出现负谐振.在此频率范围内,整个结构的等效磁导率为负值,而其等效介电常数为正值,电磁波的能量基本被反射,所以透射率很小($-65\text{--}-55 \text{ dB}$).

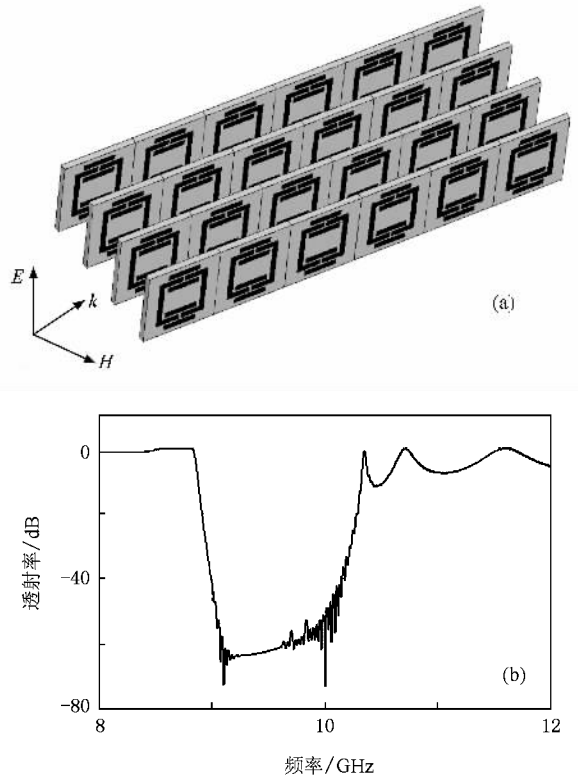


图 4 磁谐振结构及其透射频谱 (a)磁谐振结构 (b)透射频谱

图 5 为图 3(a)和图 4(a)的两种结构组合所构成的左手材料结构及其透射频谱.如图 5(b)所示,在电谐振结构阵列和磁谐振结构阵列谐振频率区域的重合部分出现了一个通带($9.2\text{--}9.4 \text{ GHz}$).通带的带宽大约为 0.2 GHz ,通带内电磁波的透射率为 $-10\text{--}-7 \text{ dB}$.由于电谐振结构和磁谐振结构的谐振频率区域重合,整个结构的等效磁导率和等效介电常数都为负值,具有了双负特性,从而电磁波能够透过结构,且透射率较大.上述仿真结果很好地验证了这种左手材料结构的双负特性,并且说明了所设计的电谐振结构、磁谐振结构以及由它们构成的左手材料结构的正确性.

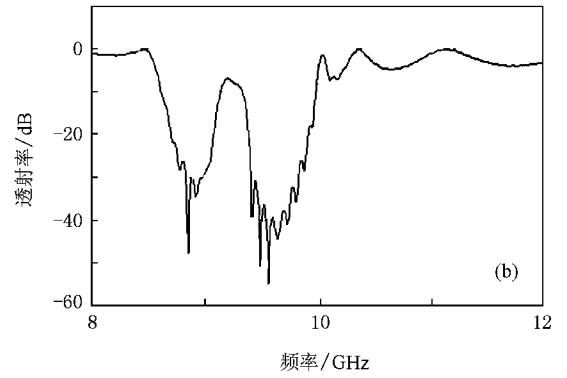
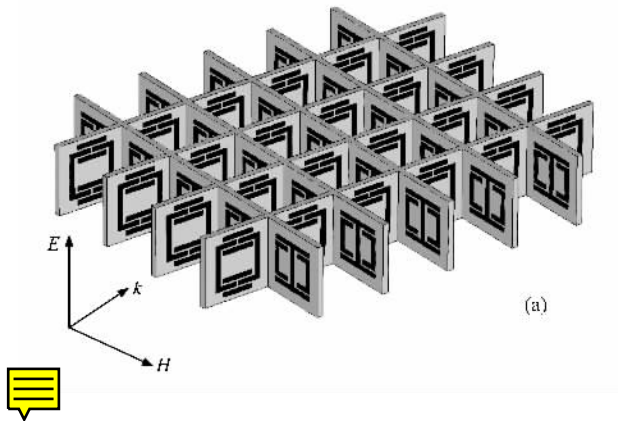


图5 电谐振结构与磁谐振结构组成的左手材料结构及其透射频谱 (a)电谐振结构与磁谐振结构组成的左手材料结构 (b)透射频谱

4. 结 论

磁谐振器和电谐振器组合可以构成左手材料。在设计磁谐振器时,为消除双各向异性,磁谐振器结构的等效电路等效为镜像对称的单回路,即遵循单回路镜像对称设计原理。在设计电谐振器时,电谐振

器结构的等效电路为镜像对称的双(四)回路,即遵循双(四)回路镜像对称设计原理。通过实验仿真,验证了根据两个设计原理所设计的左手材料结构的双负特性,同时也验证了这两个设计原理的正确性。本文所提出的两个设计原理以及左手材料结构对于设计新型左手材料结构具有重要的指导意义。

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* **47** 2075
- [3] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [4] Marques R, Medina F, Rafii-El-Edrissi R 2002 *Phys. Rev. B* **65** 144440
- [5] Sauviac B, Simovski C R, Tretyakov S A 2004 *Electromagnetics* **24** 317
- [6] Zhang F L, Zhao X P 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4662 (in Chinese) [张富利、赵晓鹏 2007 物理学报 **56** 4662]
- [7] Padilla W J, Arosson M T, Highstreet C, Mark L, Taylor A J, Averitt R D 2007 *Phys. Rev. B* **75** 041102
- [8] 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]
- [9] Liu R P, Degiron A, Mock J J, Smith D R 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 263504

The design of left-handed metamaterials composed of magnetic resonators and electric resonators *

Wang Jia-Fu¹⁾ Qu Shao-Bo^{1,2)} Xu Zhuo²⁾ Zhang Jie-Qiu¹⁾ Yang Yi-Ying¹⁾ Ma Hua¹⁾

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 7 December 2007 ; revised manuscript received 29 February 2008)

Abstract

In designing left-handed metamaterials composed of magnetic resonators and electric resonators, two design principles, that is, the single-loop mirror-symmetry design principle and double-loop (quadruple-loop) mirror-symmetry design principle, were respectively proposed for the design of magnetic resonators and electric resonators. Based on the two principles, new structures with simultaneously negative permeability and permittivity were designed. By means of simulation experiments, the double-negative property of the proposed structure as well as the two design principles was verified. The two design principles and structures proposed in this paper are of great practical values in designing new types of left-handed metamaterials.

Keywords : left-handed metamaterials, single-loop mirror-symmetry, double-loop mirror-symmetry

PACC : 4270Y, 7430G, 7785

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10474077, 50632030) and the Program for Basic Research of Shaanxi Province, China (Grant No. 2005E15).