

电谐振器和磁谐振器构成的左手材料的实验验证^{*}

王甲富¹⁾ 屈绍波¹⁾²⁾ 徐 卓²⁾ 夏 颂²⁾ 张介秋¹⁾ 马 华¹⁾ 杨一鸣¹⁾ 吴 翔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 18 日收到;2009 年 6 月 16 日收到修改稿)

加工、制作和测试了由电谐振器和磁谐振器构成的左手材料. 首先分别测试了电谐振器、磁谐振器各自的传输频谱,得到各自的负参数区域,然后测试了由电谐振器和磁谐振器构成的左手材料的传输频谱,并提取了其等效介电常数和磁导率. 实验结果表明,在电谐振器和磁谐振器各自传输禁带的重合区域,出现了一个通带,在该通带内,等效介电常数和磁导率同时为负,验证了材料的左手特性.

关键词: 左手材料, 电谐振器, 磁谐振器

PACC: 4270Y, 7430G, 7785

1. 引 言

左手材料是指在电磁波某些频段具有同时为负的介电常数和磁导率的新材料. 自 Veselago^[1] 提出左手材料的概念后,由于自然界中不存在介电常数和磁导率均为负的材料,左手材料一直未受到应有的重视. 1996 年, Pendry 提出用金属细导线和开口谐振环组成的周期结构实现同时为负的介电常数和磁导率^[2-4]. Smith 等人通过实验^[5]证实了 Pendry 的设想,制备出同时具有负介电常数和负磁导率的左手材料,并由此引发了左手材料的研究热潮.

目前,左手材料研究所要解决的核心问题仍然是左手材料的物理机理、设计与实现. 现已涌现出了大量的左手材料,概括起来主要有:一是基于电谐振器(或金属线)和磁谐振器的左手材料^[4, 5],二是基于 L - C 回路传输线的左手材料^[6, 7],三是基于金属结构的平面左手材料^[8, 9],四是基于高介电常数电介质的全介质左手材料^[10, 11]. 其中,基于电谐振器和磁谐振器的左手材料一直是左手材料的主流,引起了世界各国研究者的重视. Smith 课题组^[12]提出了通过平行放置的电谐振器和磁谐振器阵列实现具有双负特性的左手材料. 西北工业大学左手材料课题组基于 H 形谐振器^[13]、六边形磁谐振器^[14]实现了左手材料. 空军工程大学左手材料课题

组^[15]提出了电谐振器和磁谐振器的设计原理,并进而提出了由电谐振器和磁谐振器构成的左手材料的设计原理,并通过仿真验证了所提出的设计原理.

本文通过实验验证了由电谐振器和磁谐振器构成的左手材料的左手特性. 首先分别测试了电谐振器阵列、磁谐振器阵列的传输频谱,验证了它们的单负特性. 然后测试了由电谐振器和磁谐振器构成的左手材料的传输频谱,并提取了其等效介电常数和磁导率,验证了其左手特性. 实验结果与理论、仿真结果取得很好的一致,进一步验证了由电谐振器和磁谐振器构成的左手材料的设计原理.

2. 实验样品及实验设备

图 1(a), (b), (c) 分别为测试样品的电谐振器单元、磁谐振器单元和实验测试设备的实物照片. 在实际加工过程中,将宽度为 0.2 mm,厚度为 0.017 mm 的铜线构成的金属结构图案刻蚀在厚度为 0.4 mm、边长为 5 mm 的正方形 FR4 环氧树脂玻璃(相对介电常数为 4.2)基板上. 所加工的电谐振器和磁谐振器结构单元的尺寸分别如图 1(a) 和 (b) 所示. 图 1(c) 为矩形波导测试设备的实物照片. 在测试过程中,将测试样品放到 BJ100 标准波导中,用 HP8720ES 矢量网络分析仪测试出样品散射参数的大小和相位. 根据测试得到的散射参数,可

^{*} 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(973)项目(批准号:2009CB613306),陕西省自然科学基金(批准号:SJ08F01)资助的课题.

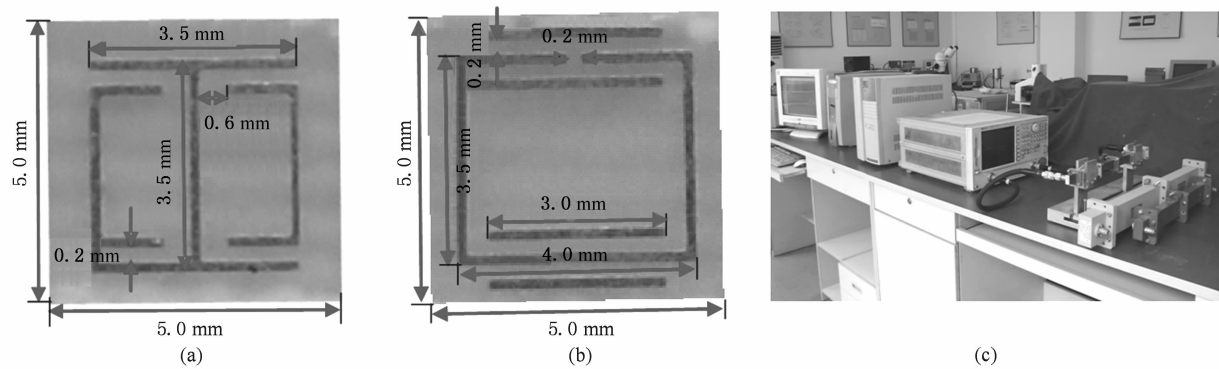


图 1 测试样品结构单元及实验测试设备 (a)电谐振器单元;(b)磁谐振器单元;(c)实验测试设备

以提取样品的等效介电常数和磁导率^[16]. 根据实验测试得到的散射参数以及由其提取的等效介电常数和磁导率,可以确定测试样品是否具有左手特性.

3. 测试结果及分析

图 2(a),(b)分别给出了测试得到的电谐振器和磁谐振器阵列的传输频谱. 图 2(a),(b)中的插图分别给出了电谐振器和磁谐振器阵列样品的实物照片以及入射电磁波的极化方向. BJ100 标准波导的横截面尺寸为 22.86 mm × 10.16 mm,为了能将测试样品放置在波导中,测试样品阵列由 4 × 2 × 4 个单元组成. 由图 2(a)和(b)可知,单独的电谐振器和磁谐振器阵列在 11 GHz 处都有一个禁带,这表

明两个测试样品的等效介电常数或磁导率为负,导致入射电磁波绝大部分被反射,从而造成透射率极低. 也就是说,单独的电谐振器和磁谐振器阵列都表现出了单负特性. 但是,仅由透射频谱的禁带不能确定等效介电常数为负还是等效磁导率为负,必须提取测试样品的等效参数. 图 3(a),(b)分别给出了由测试散射参数提取的电谐振器阵列的等效介电常数和磁谐振器阵列的等效磁导率. 由两图可知,电谐振器阵列的等效介电常数在 10.45—11.9 GHz 为负,磁谐振器阵列的等效磁导率在 10.4—11.9 GHz 为负. 所以,电谐振器阵列禁带的出现是由于其等效介电常数为负,而磁谐振器阵列禁带的出现是由于其等效磁导率为负,这同时也验证了文献[15]中所提出电谐振器和磁谐振器的设计原理.

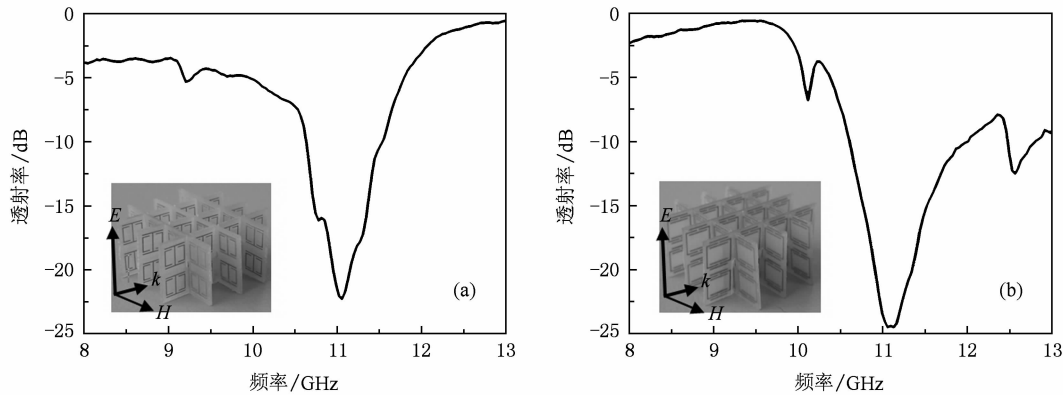


图 2 电谐振器阵列和磁谐振器阵列的传输频谱 (a)电谐振器阵列的传输频谱,(b)磁谐振器阵列的传输频谱

图 4 给出了由电谐振器和磁谐振器构成的左手材料的测试传输频谱,其中的插图给出了左手材料样品的实物照片以及入射电磁波的极化方向. 由图 4 可见,在电谐振器阵列和磁谐振器阵列禁带的重

合区域 10.45—11.15 GHz,出现了一个明显的通带(图 4 中的阴影部分). 与图 2(a)和(b)中的两个禁带对比可知,此通带即为左手材料样品的左手通带,其带宽为 0.7 GHz. 注意,图 4 中的左手带宽比

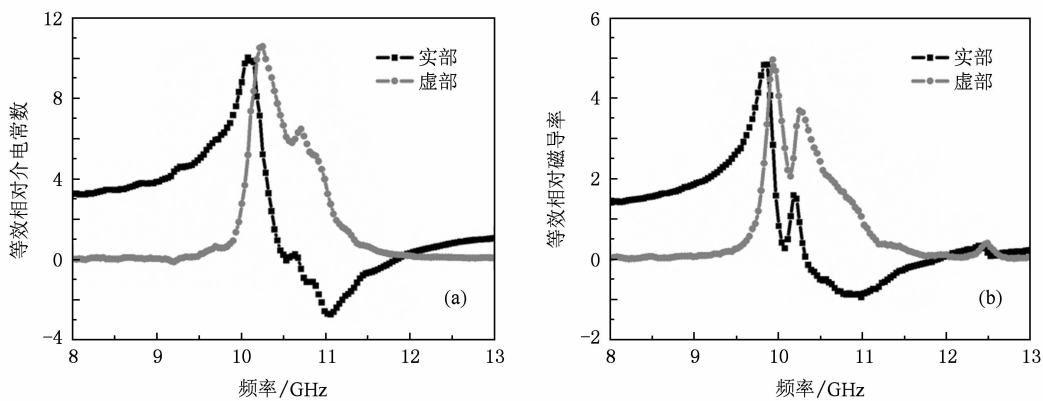


图3 电谐振器阵列和磁谐振器阵列的等效参数 (a)电谐振器阵列的等效介电常数,(b)磁谐振器阵列的等效磁导率

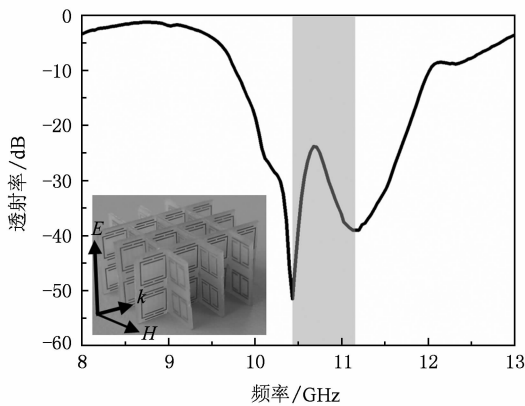


图4 由电谐振器和磁谐振器构成的左手材料的传输频谱

图 3(a) 中的负介电常数区域和图 3(b) 负磁导率区域的重合部分 (10.45—11.9 GHz) 窄, 这是由左手

材料中电谐振器和磁谐振器之间的相互作用使双负区域变窄引起的.

4. 结 论

通过实验测试, 验证了由电谐振器和磁谐振器构成的左手材料的左手特性, 从而验证了基于电谐振器和磁谐振器进行左手材料设计的方法以及设计原理. 电谐振器的等效介电常数在传输禁带为负, 而磁谐振器的等效磁导率在传输禁带内为负. 在两个传输禁带的重合区域, 出现左手通带. 另外, 实验结果还表明, 由于电谐振器和磁谐振器之间的相互影响, 左手带宽要比负介电常数区域和负磁导率区域的重合部分窄.

[1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509

[2] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, Youngs I 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773

[3] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966

[4] Pentry J B, Holden A L, Robins D J, Stewart W J 1999 *IEEE Trans. MTT* **47** 2075

[5] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77

[6] Anthony L, Caloz C, Itoh T 2004 *IEEE Microwave Magazine* **9** 34

[7] Li H Y, Zhang Y W, Wang P C, Li G Q 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6480 (in Chinese) [李海洋、张治文、王蓬春、李贵泉 2007 物理学报 **56** 6480]

[8] Zhou J F, Zhang L, Tuttle G, Koschny Th, Soukoulis C M 2006 *Phys. Rev. B* **73** 041101

[9] Wang J F, Qu S B, Xu Z, Zhang J Q, Ma H, Yang Y M, Gu C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** [王甲富、屈绍波、徐卓、张介秋、杨一鸣、马华 2009 物理学报 **58**]

[10] Holloway C L, Kuester E F, Baker-Jarvis J, Kabos P 2003 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **51** 2596

[11] Zhao Q, Kang L, Du B, Zhao H, Xie Q, Huang X, Li B, Zhou J, Li L 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 027402

[12] Liu R P, Degiron A, Mock J J, Smith D R 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 263504

[13] 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]

[14] Zhang F L, Zhao Q, Liu Y H, Luo C R, Zhao X P 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1330

[15] 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]

[16] Chen H S, Zhang J J, Bai Y, Luo Y, Ran L X, Jiang Q, Kong
J A 2006 *Opt. Express* **14** 12944

Experimental verification of left-handed metamaterials
composed of electric and magnetic resonators^{*}

Wang Jia-Fu¹⁾ Qu Shao-Bo¹⁾²⁾ Xu Zhuo²⁾ Xia Song²⁾ Zhang Jie-Qiu¹⁾ Ma Hua¹⁾ Yang Yi-Ming¹⁾ Wu Xiang¹⁾

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

2) (Electronic Materials Research Laboratory, Key Laboratory of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(Received 18 May 2009; revised manuscript received 16 June 2009)

Abstract

Left-handed metamaterials were fabricated and tested. As the first step in the test, the transmission spectra of electric resonator array and magnetic resonator array were measured, from which their respective negative parameter regions can be determined. Then, the transmission spectra of the left-handed metamaterial composed of electric and magnetic resonators were obtained. From the measured scattering parameters, effective permittivity and permeability can be retrieved. The experiment results show that there is a pass-band in the overlapping region where there is a respective stop-band for both the electric and magnetic arrays. In this pass-band, both the effective permittivity and permeability are negative, which verifies the validity of left-handed metamaterials composed of electric and magnetic resonators.

Keywords: left-handed metamaterials, electric resonators, magnetic resonators

PACC: 4270Y, 7430G, 7785

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