

由同时具有磁谐振和电谐振结构组成的左手材料*

杨一鸣^{1)†} 屈绍波^{1)‡} 王甲富¹⁾ 徐卓²⁾

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)

(2008 年 6 月 18 日收到, 2008 年 7 月 12 日收到修改稿)

为了在同一结构中同时实现负介电常数和负磁导率(双负),采用一种“巨”字形结构,利用丝网印刷技术在氧化铝基板上进行加工制作,并通过仿真和实验测试证实了这种结构的“双负”特性.与利用磁谐振器和电谐振器组阵实现左手材料的方法相比,这种单一结构可以同时实现负介电常数和负磁导率,制作方便,等效电路简单,双负频段较宽.利用丝网印刷技术进行样品的制作,工艺简单,成本低廉.

关键词:左手材料,磁谐振,电谐振

PACC:4270Y,7430G,7785

1. 引 言

1968 年,前苏联科学家 Veselago 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^[1].1999 年,Pendry 等^[2]提出实现负介电常数和负磁导率的理论模型.2000 年,Smith 等^[3]首次利用开口谐振环(SRR)和金属线组成的阵列实现了“双负”材料(负介电常数和负磁导率).此后,对具有“双负”特性材料的研究成为一个热点并日趋深入.

目前,关于左手材料的实现大多数是利用磁谐振器(如 SRR 环)和电谐振器(如开口金属线)分别实现负磁导率和负介电常数,通过组成阵列来同时实现“双负”^[4,5].这种组阵方式具有一定的缺陷,其复杂性增加了制作的困难和实用性.事实上,可以通过单一结构同时实现“双负”,已见诸报道的包括浙江大学的“S”形^[6],复旦大学的“工”形^[7],西北工业大学的“H”形^[8]等.在更为简单和实用的单一结构中实现“双负”的原理在于,结构同时对两种外场,即外加磁场和电场都有响应^[9].因为谐振环中的开口为容性,金属线为感性,当外加电磁场时,两种成分都对外场有响应,其中沿着电场方向的容性成分响应外加电场,与磁场方向垂直的感性成分响应外

加磁场,这两种响应分别引起电谐振和磁谐振,当这两种谐振的谐振区域完全或部分重合且为负值时,便可实现“双负”.

但是已报道的单一结构左手材料也存在着结构谐振不强;“双负”频段过窄等缺点.此外,有的结构需要在同一介质板的两侧进行结构刻蚀,增加了制作难度.针对以上问题,本文采用了一种能同时出现磁谐振和电谐振的结构,在模拟和实验中都发现其具有双负特性,且双负频段较宽.此外,这种结构等效电路简单,便于分析,利用这种结构只需在介质板的一面进行结构制作.采用丝网印刷技术进行样品制作,工艺简单,成本低廉,便于大规模制作.

2. 等效电路和数值仿真

2.1. 谐振环的结构和等效电路

图 1 为本文采用的“巨”字形结构单元及其等效电路图.根据 Liu 等^[5]和王甲富等^[10]的研究,当电磁波入射到结构单元时,由于结构既具有电容性部分又具有电感性部分,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.当结构发生谐振时,谐振负区域的等效磁导率为负.为了抑制其电响应,排除电谐振的干扰,结

* 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:2005E115)资助的课题.

† E-mail: yangyimingkgl@sohu.com

构的等效电路必须为镜像对称的单回路,所以我们称实现负磁导率结构的设计原理为单回路镜像对称设计原理.按照这一结论,当电磁波平行于“巨”字形结构平面入射且电场分量平行于开口方向时,这种结构是只能出现磁谐振,也就是只能实现负的磁导率的.然而,当通过结构的电磁波的电场垂直于开口,磁场垂直于平面时,结果就完全不同.一方面,外加电场通过结构中的开口感生出电流,从而产生电谐振;另一方面,由于结构是用金属制作的,具有一定的电感,从而结构可以响应入射电磁波的磁场,这正是结构磁谐振的来源.

2.2. 谐振环的仿真

利用商业软件 CST 进行仿真.仿真的结构参数

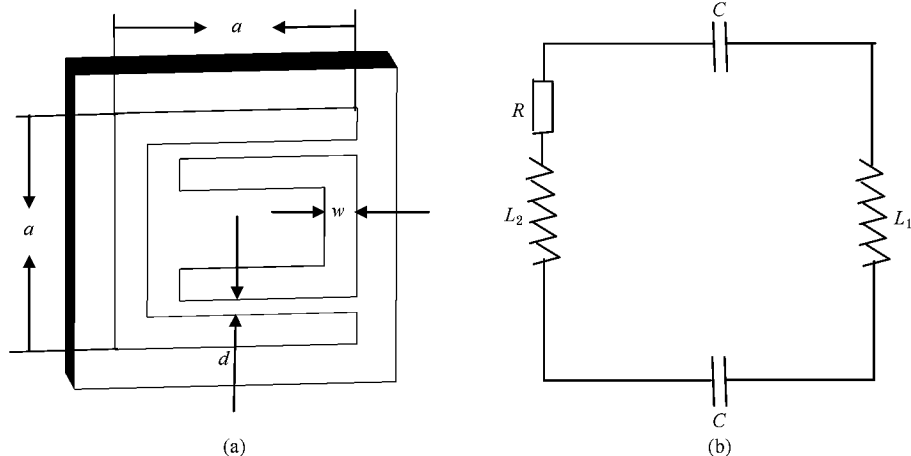


图 1 (a) 结构示意图 (b) 等效电路

为: $a = 3 \text{ mm}$, $w = 0.4 \text{ mm}$, $d = 0.2 \text{ mm}$. 边界条件的设置为垂直于电场的边界为电边界,垂直于磁场的边界为磁边界,波的入射方向设置为开放边界.结构的金属材料设为 PEC, 底板材料选择为 Rogers 5870.

图 2 为模拟得到的散射参数(S 参数),图 3 为通过 S 参数计算得到的等效介电常数和磁导率.从 S 参数可以看出,在模拟的整个频段内,电磁波的透射率还是比较高的,只是在 8.3 GHz 附近,也就是谐振时, S_{21} 降到 -20 dB . 而从等效参数图中可以看出,在 8.3 GHz 附近只有介电常数为负,磁导率大于 0 ,在这种“单负”的情况下,入射电磁波大部分被反射,透射率很低.并且在模拟频段内,介电常数和磁导率都谐振到了负区,并且在 $9.5\text{--}13.5 \text{ GHz}$ 形成了“双负”区域.

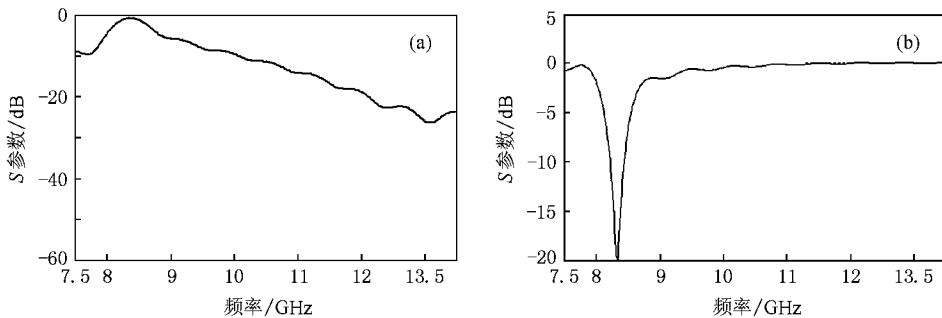


图 2 模拟得到的 S 参数 (a) S_{11} (b) S_{21}

3. 样品制备与测试分析

按照仿真的结构参数,采用丝网印刷技术进行

样品制作.为了加强结构的金属性和增强其谐振,选用可以进行高温热处理的高温银浆和 96% 氧化铝陶瓷进行样品制作,并且在每一个底板上印制了两个结构.氧化铝陶瓷底板的厚度、长度和宽度分

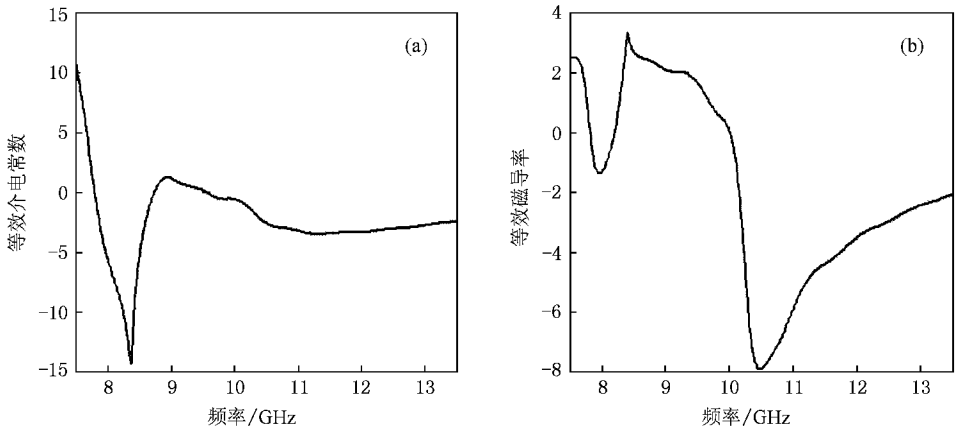


图3 计算得到的等效参数 (a)等效介电常数 (b)等效磁导率

别为 1,10 和 10 mm. 制作完成后的样品如图 4 所示.

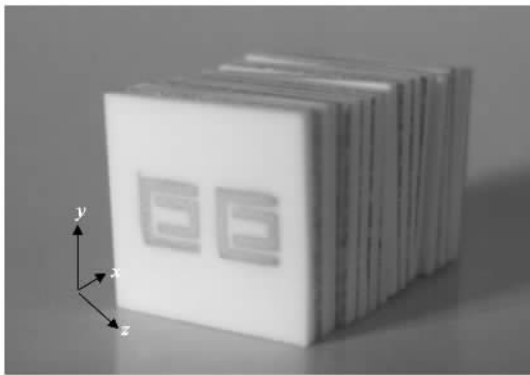


图4 氧化铝基板测试样品

用 HP-8720ES 矢量网络分析仪测试其 S 参数. 测试中,波的传播方向为 z 轴方向,磁场方向为 x 轴方向,电场方向为 y 轴方向. 根据文献 [11] 给出的方法,通过其 S 参数计算其等效磁导率和等效介电常数. 图 5 为根据测试的 S 参数计算出的等效介电常数和等效磁导率. 从图中可以看出,介电常数在 9.6 GHz 处,磁导率在 11.5 GHz 处分别发生谐振,并且在 8.2—9.6 GHz 和 11.5—12.23 GHz 之间形成了两个“双负”通带. 这一结果充分说明了“巨”字形结构是可以实现“双负”的.

SRR 具有磁电耦合这一点已经被证实^[12]. 换句话说,外加电场在环中同时感生出电偶极子和磁偶极子,外加磁场同样可以感生出电偶极子和磁偶极子. 也就是说理论上,任意一个谐振环结构都是同时具有电谐振和磁谐振的,但是通常由于这两个谐振频率相差很远,使得谐振区域不能重合而形成“双

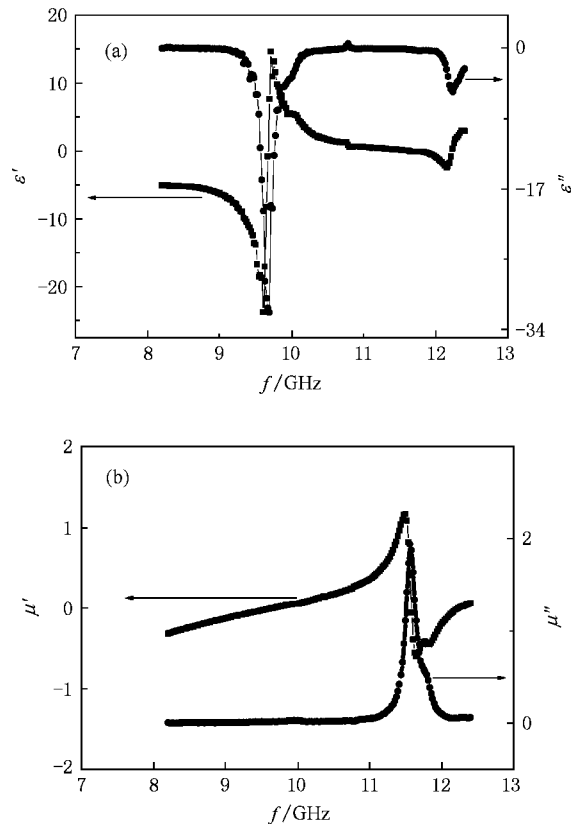


图5 实验测得的等效参数 (a)等效介电常数(ϵ' 为实部, ϵ'' 为虚部)(b)等效磁导率(μ' 为实部, μ'' 为虚部)

负”. 比如对于单环的 SRR 结构来说,其磁谐振频率很高,所以采用通过加入内环增大其电容的方式来降低其磁谐振频率. 那么,对于单一结构实现“双负”,其关键在于调节电谐振和磁谐振的频率,使这两个频率处在一个频段内,这样才能满足实现“双负”的基本条件.

对于本文中采用的“巨”字形结构,在电磁波的入射方向如上所述时,电场和磁场可以同时环中感生出电流.在电场方向上,两条狭缝形成两个平板电容,由于缝隙狭长,其电容值很大,这有利于降低结构的电谐振频率.同时,外磁场可以在结构形成的回路中感生出电流,在电流的回路中,这两个电容同样有利于降低结构的磁谐振频率.通过降低结构的磁谐振和电谐振频率,使得二者处在同一频段,从而实现了“双负”.

从图中还可以看出,磁导率出现的是谐振,但是介电常数出现的却是反谐振,这与 Smith 等^[13]的研究是一致的.其原因在于:由于 $n^2 = \epsilon(\omega) \cdot \mu(\omega)$, 对于一种特定的结构,当频率 ω 一定时, n 也就一定,那么显然此时 ϵ 和 μ 的变化趋势应该是相反的,也就是当 ϵ 出现谐振, μ 一定出现反谐振;反之亦然.

此外,在谐振时,介电常数的虚部为负好像与物

理机制是不符的,实际则不然.介电常数或磁导率的虚部在只有一种外场(电场或磁场)时应该为正,然而,本文讨论的情况是两种场同时加载在介质上的情况,此时其耗散能的表达式^[14]应为

$$W = \frac{1}{4\pi} \int d\omega \omega [\epsilon''(\omega) |E(\omega)|^2 + \mu''(\omega) |H(\omega)|^2].$$

从上式可以看出, $W > 0$ 并不要求 μ'' 和 ϵ'' 应同时为负.

4. 结 论

同一结构同时出现负介电常数和负磁导率的前提是其在某一频率范围内应同时出现磁谐振和电谐振.本文采用一种单回路结构,利用丝网印刷技术进行样品制作,通过数字模拟并结合实验测试,结果表明,这一结构中能同时出现电谐振和磁谐振,并且由于谐振负区的重合而形成“双负”区域.

-
- [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 Tech.* **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] Woodley J F, Wheeler M S 2005 *Phys. Rev. E* **71** 066605
- [5] Liu R P, Degiron A 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 263504
- [6] Wang D X, Ran L X 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 254103
- [7] Hao J M, Yuan Y, Ran L X, Jiang T, Kong J A, Chan C T, Zhou L 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 063908
- [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] Schurig D, Mock J J, Smith D R 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 041109
- [10] 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]
- [11] Chen X D, Tomasz M, Wu B I, Pacheco J, Kong J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 016608
- [12] Sauviac B, Simovski C R 2004 *Electromagnetics* **24** 317
- [13] Smith D R, Schultz S, Markos P, Soukoulis C M *Phys. Rev. B* **65** 195104
- [14] Koschny T, Markos P, Smith D R 2003 *Phys. Rev. E* **68** 065602

A left-handed metamaterial composed of structures with both magnetic resonance and electric resonance *

Yang Yi-Ming^{1)†} Qu Shao-Bo¹⁾²⁾ Wang Jia-Fu¹⁾ Xu Zhuo²⁾

¹⁾ School 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 18 June 2008; revised manuscript received 12 July 2008)

Abstract

To realise simultaneously negative permittivity and negative permeability in one structure, there must exist both electric resonance and magnetic resonance in the same band for the structure. Based on this principle, we fabricated a structure and investigated its "double-negative" characteristics by means of numerical simulation and experimental test. Compared with other left-handed metamaterials, this structure exhibits simultaneously negative permittivity and negative permeability and its equivalent circuit is much simpler. Moreover, it has much broader left-handed pass-band in which both the permittivity and the permeability are negative. The structures were fabricated by using screen-printing technology, which is much easier and economical.

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

PACC : 4270Y, 7430G, 7785

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10474077, 50632030) and the Shaanxi Provincial Research Foundation for Basic Research, China (Grant No. 2005E115).

† E-mail: yangyimingkgl@sohu.com