

# 基于斜三角开口对环的宽带低耗左手材料\*

李文强<sup>†</sup> 曹祥玉 高军 刘涛 姚旭 马嘉俊

(空军工程大学电讯工程学院, 西安 710077)

(2011年9月25日收到; 2011年12月6日收到修改稿)

本文将磁谐振环-金属线共面结构与磁谐振环相结合, 提出了一种基于斜三角开口对环结构的新型宽频带低耗左手材料结构. 该结构能产生两个磁谐振, 实现两个双负频段. 研究表明, 调节单元尺寸可使两个双负频段移动重合形成一个宽频带. 理论分析、仿真和测试结果均表明, 本文提出的新形结构在 9.3—13.2 GHz 频段同时具有负的磁导率和负的介电常数, 相对带宽 34.7%, 损耗性能系数 347.9, 实现了宽带低耗左手材料. 其研究结果对多频段、宽带低耗左手材料的设计具有重要的指导意义.

**关键词:** 左手材料, 双频段, 宽频带, 低损耗

**PACS:** 41.20.Jb, 73.20.Mf

## 1 引言

左手材料是介电常数  $\epsilon$  和磁导率  $\mu$  在一定的电磁波频段内同时为负的一种新型人工电磁材料, 具有不同于常规材料的奇异电磁特性, 在光学成像、微波器件、天线系统、电磁隐身等领域具有广阔的应用前景. 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. 2000年 Smith 研究小组用开口谐振环和金属线实现了磁导率和介电常数同时为负的左手材料<sup>[1]</sup>, 引起了国内外学者的广泛关注并积极展开研究, 但是带宽窄、损耗高限制了左手材料的应用. 文献 [2,3] 分别提出的网格形和渔网形左手材料, 其优点是能使电磁波垂直于基板平面入射, 缺点是容易导致屏蔽效应 (screening effects) 和较大的吸收损耗 (absorption loss). Chen 等提出的 S 形<sup>[4]</sup> 和 Simovski 提出的  $\Omega$  形<sup>[5]</sup> 左手材料结构新颖, 但最大相对带宽仅为 19.3%, 且损耗高. Zhu 等<sup>[6]</sup> 提出了一种基于三角谐振单元的宽带左手材料, Nasrin 等<sup>[7]</sup> 提出了一种基于十字金属线对的极化独立单面宽带左手材料, 但是它们的相对带宽仍有待提高. 陈春晖等<sup>[8]</sup> 提出的单面金属

结构的宽带左手材料, 相对带宽有很大提高, 目前文献报道左手材料大多都只有一个传输通带, 关于多频段左手材料的研究则比较少. Chen 等<sup>[9]</sup> 提出的基于 S 形谐振器的双频段左手材料结构简单, 但最大相对带宽仅为 13.6%, 且损耗高. Zhu 等<sup>[10]</sup> 提出了一种基于多重树枝状结构的多频段的左手材料, Wang 等<sup>[11]</sup> 通过将不同尺寸的左手材料结构单元组合在一起实现了多频段的左手材料, 但结构复杂、不易加工, 且损耗大. Li 等<sup>[12]</sup> 提出了一种电磁波可垂直于基板入射的双频段平面左手材料, 但是该结构的双负频段不易调节, 且损耗大.

本文提出了一种左手材料新结构, 该结构将斜三角开口对环-金属线共面结构与斜三角开口对环相结合, 能产生两个双负频段, 通过调节单元尺寸可改变双负频段工作范围, 实现宽带低耗左手材料的设计.

## 2 左手材料的结构设计与仿真分析

对于磁谐振器, 由于电磁感应, 当电磁波平行入射时, 磁场会在磁谐振器上产生感应电流并形成电流回路, 产生的等效电容和等效电感形成 LC

\* 陕西省自然科学基金研究重点项目 (批准号: 2010JZ010) 和陕西省自然科学基金基础研究 (批准号: SJ08-ZT06, 2012JM8003) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: lfjwmymlwq@126.com

谐振电路,在谐振区域实现负的等效磁导率.本文提出的斜三角开口对环磁谐振单元如图 1(a)所示.根据 Pendry 的理论<sup>[13]</sup>,由金属导线阵列可实现负等效介电常数.而当电磁波在传统的磁谐振器加金属线结构中传播时,位于介质板两侧的磁谐振器和金属导线会产生耦合,增大了电磁波传播时的损耗.为了降低损耗,将金属导线与磁谐振器设置在介质板的同侧,形成斜三角开口对环-金属线的共面结构,如图 1(b)所示.建立两者的等效电路模型,如图 2 所示,斜三角开口对环结构的磁谐振频率为  $f_{m1} = 1/2\pi\sqrt{L_{m1}C_{m1}}$ ,其中  $L_{m1} = 8L_1$ ,  $C_{m1} = C/2$ ,  $L_1$  为斜三角开口对环产生的电感,  $C$  为对环间产生的等效电容.所以

$$f_{m1} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(8L_1)(C/2)}} = \frac{1}{4\pi\sqrt{L_1C}}, \quad (1)$$

斜三角开口对环-金属线共面结构产生磁谐振频率

为  $f_{m2} = 1/2\pi\sqrt{L_{m2}C_{m2}}$ ,其中  $L_{m2} = 2(L_1 + L_2)$ ,  $C_{m2} = 2C$ ,  $L_2$  为短金属导线产生的电感.所以

$$f_{m2} = \frac{1}{2\pi\sqrt{4(L_1 + L_2)C}} = \frac{1}{4\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}}. \quad (2)$$

显然  $f_{m1} > f_{m2}$ . 本文将这两种结构分别刻蚀在介质基板的正反两面,如图 1(c)所示.该结构能产生两个磁谐振,从而得到两个双负频段.基板采用介电常数  $\epsilon = 2.65$  的聚四氟乙烯,尺寸为  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ .在介质基板的正面刻蚀斜三角开口对环-金属线共面结构,如图 1(b)所示,其中  $a_1 = 3\text{ mm}$ ,  $b_1 = 4\text{ mm}$ ,  $w = 0.2\text{ mm}$ ,  $l = 1.0\text{ mm}$ ,  $d = 0.2\text{ mm}$ .在介质基板的背面刻蚀斜三角开口对环结构,如图 1(a)所示,其中  $a_2 = 2.6\text{ mm}$ ,  $w = 0.2\text{ mm}$ ,  $l = 1.0\text{ mm}$ ,  $d = 0.2\text{ mm}$ .

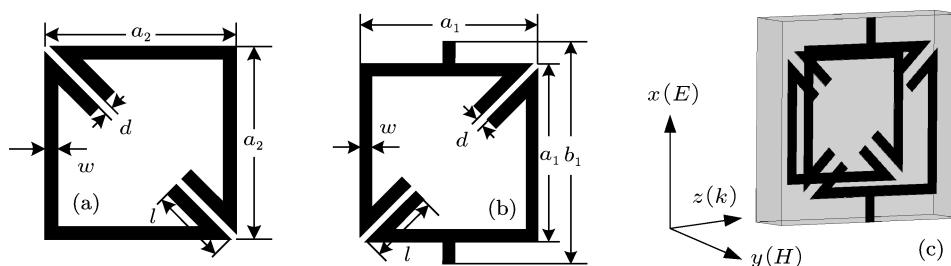


图 1 左手材料单元模型及结构示意图 (a) 斜三角开口对环结构; (b) 斜三角开口对环-金属线共面结构; (c) 左手材料单元模型

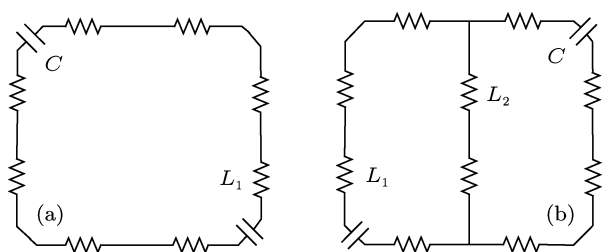


图 2 等效电路图 (a) 磁谐振器单元; (b) 共面结构

采用商业电磁仿真软件 Ansoft HFSS 对该结构进行仿真. TEM 波从模形的左端入射,电场、磁场方向如图 1(c)中所示.与电场方向垂直的两个边界设置为理想电边界 (PEC),与磁场方向垂直的两个边界设置为理想磁边界 (PMC).通过参数提取方法<sup>[14,15]</sup>提取的等效媒质参数如图 3.图 3(a)

表明新结构在 9.6—11.3 GHz 和 15.4—16.3 GHz 具有负的等效磁导率,在 9.6—16.4 GHz 具有负的等效介电常数.图 3(b)表明新结构在 9.6—16.3 GHz 具有负的等效折射率.因此新结构在 9.6—11.3 GHz 和 15.4—16.3 GHz 为双负频段.

该结构在第一个谐振点处表面电流及电场强度分布如图 4 所示.由图 4(a)可以看出,斜三角开口对环-金属线共面结构中金属线上的电流方向同时向上,表现出电响应.而斜三角开口对环和斜三角开口对环-金属线共面结构上的强环路电流形成一个自电感.由图 4(b)可以看出,对环之间的强电场形成一个自电容,因此两者结合形成自谐振电路,表现为负的磁响应,而且斜三角开口对环-金属线共面结构相对于斜三角开口对环形成了更强的电流回路,对磁响应影响更大.

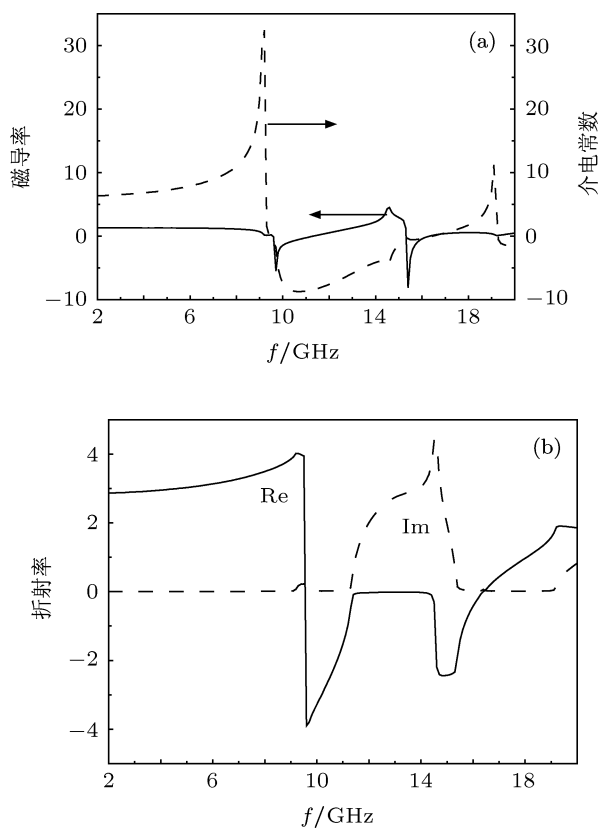


图3 等效媒质参数 (a) 介电常数和磁导率; (b) 折射率

该结构在第二个谐振点处表面电流及电场强度分布如图 5 所示. 由图 5(a) 可以看出斜三角开口对环 - 金属线共面结构上的电流自下而上相当于长金属线上的电流, 表现为电响应. 结合图 5(b) 可知, 斜三角开口对环上的强环路电流形成的自电感与对环间的强电场形成的自电容相结合构成自谐振电路, 表现为负的磁响应, 因此其磁响应是由斜三角开口对环结构决定的. 以上的分析和理论分析取得了很好的一致.

### 3 宽频带低损耗左手材料的实现

由上述分析可知, 该左手材料结构的第一个双负频段由斜三角开口对环和斜三角开口对环 - 金属线共面结构共同决定, 其中斜三角开口对环 - 金属线共面结构影响更大. 而第二个双负频段主要由斜三角开口对环结构决定. 因此可以通过调节斜三角开口对环 - 金属线共面结构和斜三角开口对环结构的单元尺寸来实现二个双负频段的移动.

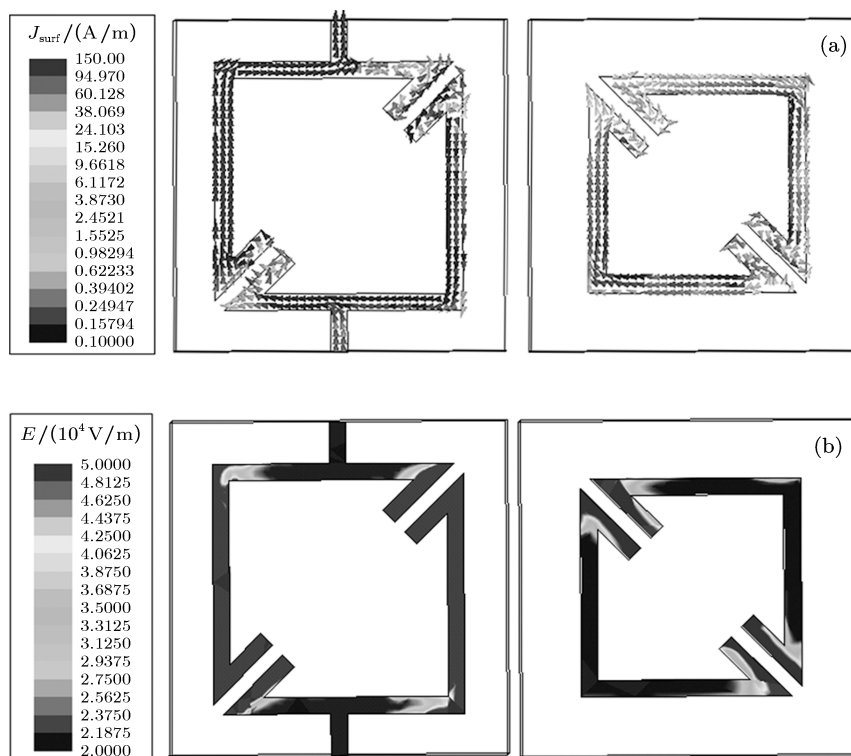


图4 第一个谐振点处的表面电流以及电场强度分布图 (a) 电流分布; (b) 电场分布

当斜三角开口对环结构单元尺寸  $a_2 = 3.6 \text{ mm}$  保持不变, 斜三角开口对环 - 金属线共面结构单元尺寸  $a_1$  从  $1.6 \text{ mm}$  变化到  $3.6 \text{ mm}$  时, 结构的  $S_{21}$  参数曲线如图 6 所示. 从图中可以看出, 随着单元尺寸  $a_1$  的减小, 第一个谐振频点往高频方向移动, 而第二个谐振频点变化不是很大. 这是由于斜三角开口对环 - 金属线共面结构对第一个谐振频点处产生的磁响应影响更大. 由于斜三角开

口对环结构尺寸保持不变, 因此第二个谐振频点变化不大. 通过参数提取方法, 得到其双负频段如表 1 所示. 随着  $a_1$  的减小, 由于第一个谐振频点往高频方向移动, 而第二个谐振频点变化很小. 当  $a_1 = 2.4 \text{ mm}$  时, 两个双负频段重合呈现宽带双负频段. 随着  $a_1$  的继续减小, 由于第一个双负频段继续往高频方向移动, 因此双负频段的带宽逐渐缩小.

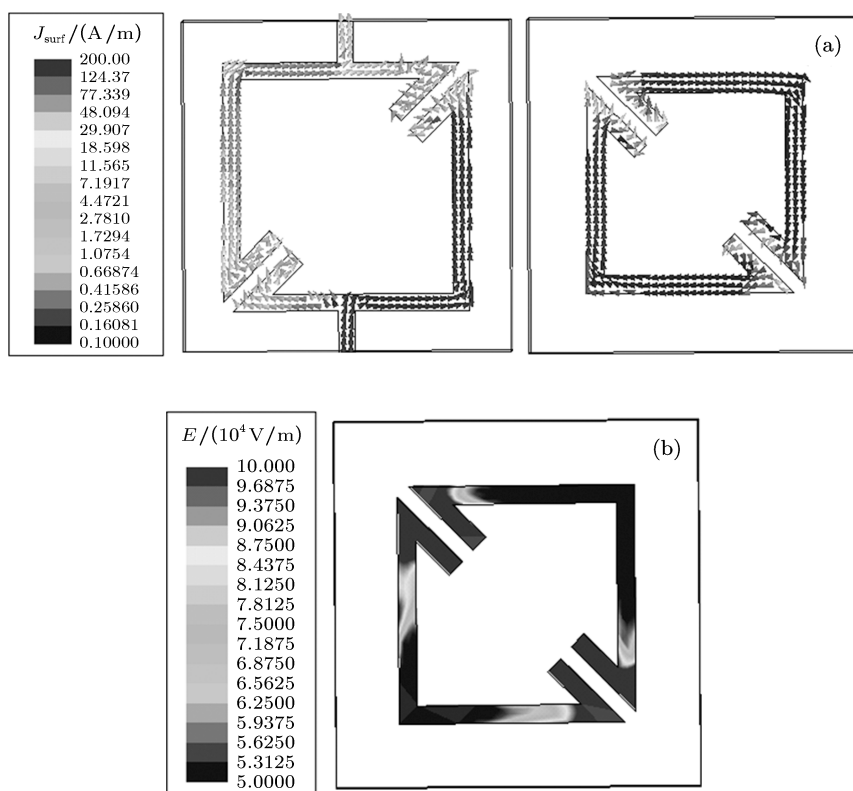


图 5 第二个谐振频点处的表面电流以及电场强度分布图 (a) 电流分布 (b) 电场分布

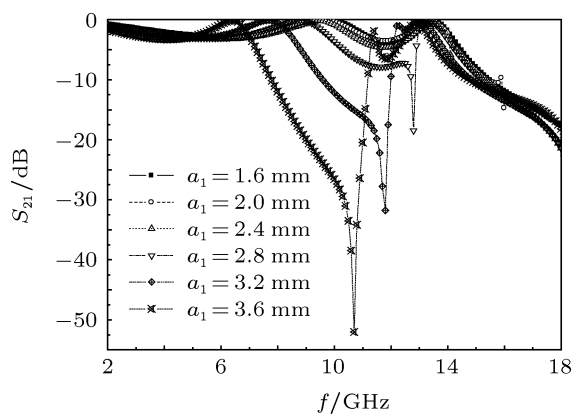


图 6 斜三角开口对环 - 金属线共面结构参数与  $S_{21}$  的关系

表 1 结构参数与双负频段的关系

$a_1/\text{mm}$	$a_2/\text{mm}$	双负频段 /mm	
1.6	3.6	9.8—13.2	
2.0	3.6	9.4—13.2	
2.4	3.6	9.3—13.2	
2.8	3.6	9.2—11.8	12.8—13.4
3.2	3.6	9.1—10.6	11.8—12.6

从表 1 可以看出, 当  $a_1 = 2.4 \text{ mm}$ ,  $a_2 = 3.6 \text{ mm}$

时, 该结构的双负频段为 9.3—13.2 GHz, 相对带宽达到 34.7%, 用参数提取方法提取等效媒质参数如图 7 所示.

#### 4 左手材料低损耗的物理机理

众所周知, 通常谐振点处的损耗很高. 但是从图 7(b) 可以看出, 使  $\text{Re}(n) = -1$  的频点远离了谐振频点, 因此使得左手频段内的损耗很小 [16].

为了比较损耗性能, 将新结构与典型的 SRR+wire 双负媒质结构进行对比. 图 8 给出了新结构和 SRR+wire 结构在各自谐振频点处的电流分布和电场分布. 由图 8(a) 可以看出, 斜三角开口对环 - 金属线结构上的电流自上而下, 其作用相当于金属线, 表现出电响应. 结合图 8(b) 可知, 斜三角开口对环上的强环路电流形成的自电感与对环间的强电场形成的自电容相结合构成自谐振电路, 表现为负的磁响应, 而 SRR+wire 结构的磁响应主要是由 SRR 环决定.

对于产生磁响应的斜三角开口对环结构和 SRR 结构, 其等效电路图都可由图 9 所示.

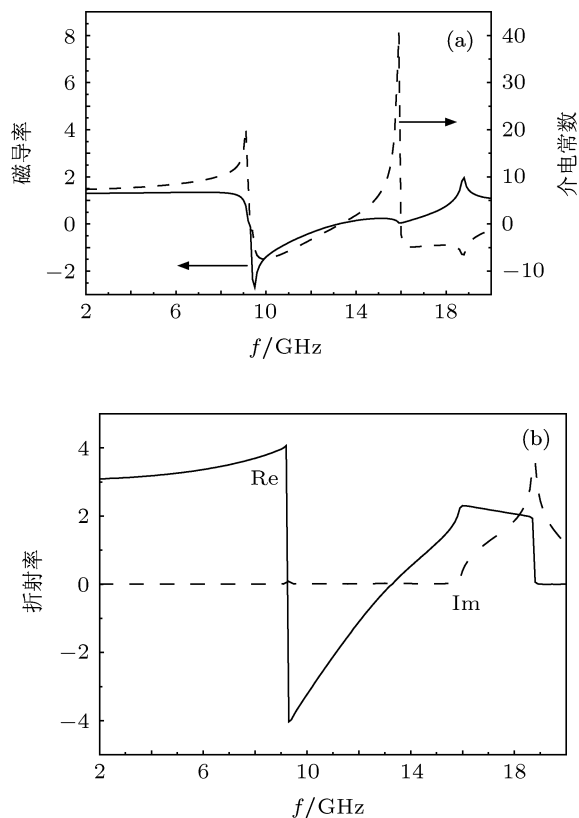


图 7 等效媒质参数 (a) 介电常数和磁导率; (b) 折射率

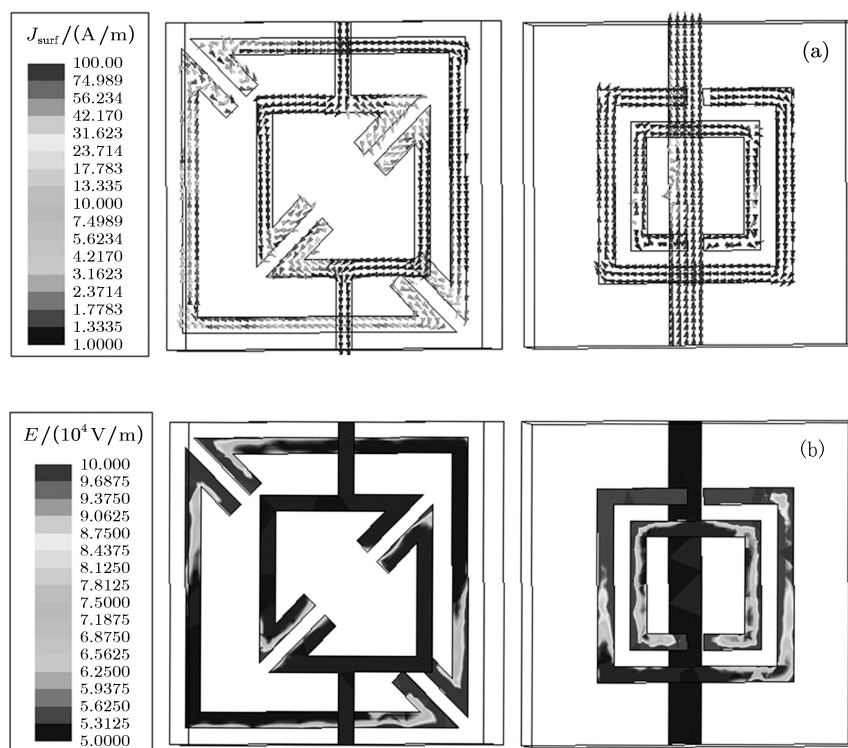


图 8 新结构和 SRR+wire 在各自谐振频点处的电流分布和电场分布图 (a) 电流分布 (b) 电场分布

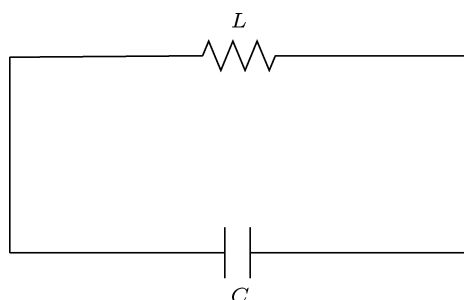


图9 等效电路图

已知  $RLC$  电路的损耗与每个电路元件和品质因数  $Q$  有关,  $Q = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ ,  $Q$  越大损耗越小. 因此可以通过增加电感或减小电阻和电容来增大  $Q$  值减小损耗. 又因为  $\mu = 1 - A\omega^2 / (\omega^2 - \omega_m^2 + i\omega\Gamma_m)$ , 其中  $A$  为单元结构与介质大小的面积比,  $\omega_m$  为磁谐振频率,  $\Gamma_m \propto R/L$  为损耗系数且与电感成反比<sup>[17]</sup>, 因此可以通过增加结构的电感来减小损耗. 在斜三角开口对环和 **SRR** 结构中, 等效电感是由各自结构所围的面积决定的, 显然斜三角开口对环结构所产生的等效电感更大. 而斜三角开口对环结构的等效电容主要由开口处的电容决定, 而 **SRR** 结构的等效电容是由内外环之间的电容决定, 显然 **SRR** 结构的等效电容要大于斜三角开口对环结构的等效电容. 对于产生电响应的斜三角开口对环 - 金属线结构, 因为环状金属结构比等长度金属线结构能产生更大的电感<sup>[18]</sup>, 所以斜三角开口对环 - 金属线结构产生的等效电感远大于金属线产生的等效电感. 从上述的分析可知, 新结构相对于 **SRR+wire** 结构有更低的损耗.

为了进一步说明该结构的损耗特性, 定义损耗性能系数, 它等于提取的等效折射率的实部与虚部之比的负值, 即  $FOM = -\text{Re}(n)/\text{Im}(n)$ . 用它来度量人工媒质的损耗, **FOM** 值越大, 损耗越小. 如图 10 所示, 本文提出新结构的 **FOM** 最大值达到

了 347.9, 而传统 **SRR-wire** 的 **FOM** 最大值则为 38, 表明本文提出的左手材料具有更小的损耗.

### 5 能量传输实验

为了验证该设计的正确性, 我们采用平面波导测试系统<sup>[19]</sup>测试了该材料的能量传输特性, 实验装置如图 11 所示. 位于平板波导里的一对探针作为发射端口和接收端口, 吸波泡沫置于探针和待测样品的两侧, 其目的是为了固定待测样品并有效地吸收电磁波, 并且防止边缘不连续产生的反射波. 待测样品置于两个探针之间的区域. 由于电场沿  $x$  方向极化, 磁场沿  $y$  方向极化, 所以整个平板波导系统的设置是与仿真设置基本一致的. 将  $2 \times 12$  单元的阵列置于平板波导中, 通过矢量网络分析仪 (AgilentN5230A) 测其传输特性, 由图 12 可知, 该左手材料能量传输曲线的实测结果和仿真结果基本一致. 但是在低频区域出现了明显的戴上, 这是由于该波导测试系统是通高频阻低频造成的. 另外该测试系统是一个半开放式的测试系统, 对外界的电磁环境敏感度比较高, 再加上结构的加工精度, 导致实测结果跟理想的仿真环境相比还是有一定

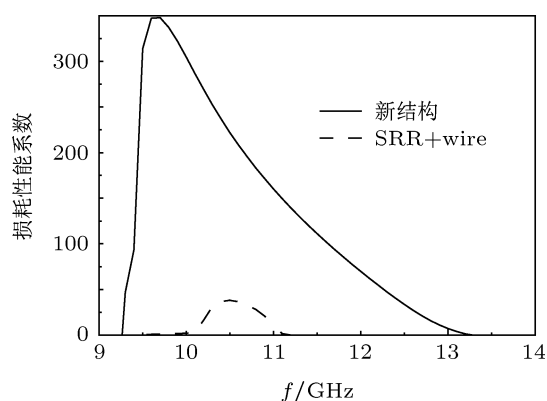


图 10 损耗性能系数及谐振频点处的电场分布图

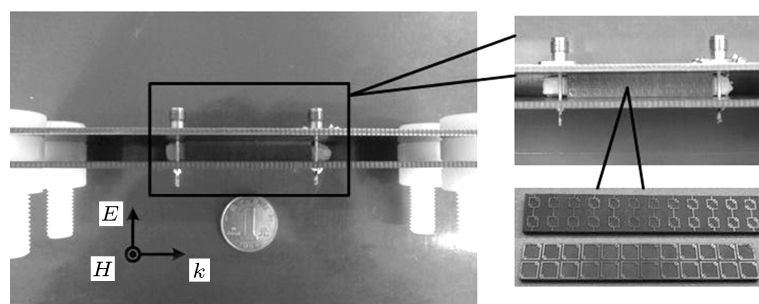


图 11 平板波导实验实物图

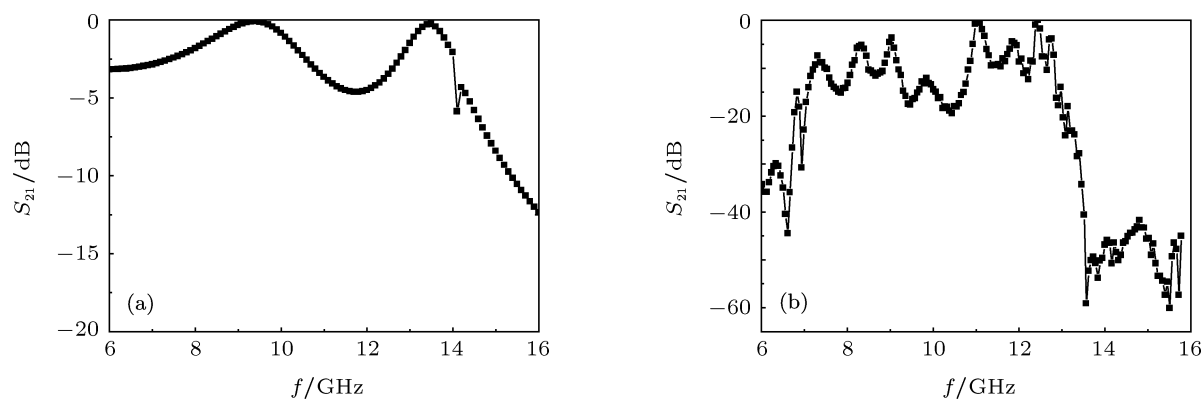


图 12 仿真和实测能量传输曲线图 (a) 仿真曲线 (b) 实测曲线

的差异. 但是我们关注的是通带范围的电磁波传播曲线的变化规律. 由此可以看出, 该左手材料能量传输曲线的实测结果和仿真结果基本一致, 验证了设计的正确性.

## 6 结论

本文将磁谐振环 - 金属线共面结构与磁谐振环

相结合, 提出了一种基于斜三角开口对环的新形左手材料结构, 理论分析、仿真和测量结果均表明该结构不仅损耗低, 而且能产生两个双负频段. 通过调节单元尺寸, 可以使两个双负频段移动形成一个宽的双负频段, 相对带宽达 34.7%, 实现宽频带、低损耗左手材料, 这对推动左手材料的实际应用具有重要的意义.

- [1] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [2] Zhou J, Zhang L, Tuttle G, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Phys. Rev. B* **73** 041101
- [3] Kafesaki M, Tsiapa I, Katsarakis N, Koschny T, Soukoulis C M, Economou E N 2007 *Phys. Rev. B* **75** 235114
- [4] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T, Zhang X M, Chen K S, Grzegorzczak T M, Grzegorzczak, Kong J A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 151909
- [5] Simovski R, He S L 2003 *Phys. Lett. A* **311** 254
- [6] Zhu C, Liang C H, Li L 2010 *Int. J. Electron Commun.* **10** 004
- [7] Nasrin A, Keyvan Forooraighi, Zahra Atlasbaf 2011 *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* **10** 524
- [8] Chen C H, Qu S B, Xu Z, Wang J F, Ma H, Zhou H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 024101 (in Chinese) [陈春晖, 屈绍波, 徐卓, 王甲富, 马华, 周航 2011 物理学报 **60** 024101]
- [9] Chen H S, Ran L X, Huangfu J T, Zhang X M, Chen K S, Grzegorzczak T M, Kong J A 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 5338
- [10] Zhu W R, Zhao X P, Guo J Q 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 241116
- [11] Wang J F, Qu S B, Yang Y M, Ma H, Wu X, Xu Z 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 014105
- [12] Li M H, Yang H L, Tian Y, Hou D Y 2011 *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* **323** 607
- [13] Pendry J B, Holden A J, Stewart W J 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4773
- [14] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [15] Zsolt Szabo, Park G H, Ravi Hedge, Li E P 2010 *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques.* **58** 2646
- [16] Zhou J, Koschny T, Soukoulis C M 2008 *Opt. Express* **15** 11147
- [17] Gorkunov M, Lapine M, Shamonina E, Ringhofer K H 2002 *Eur. Phys. J. B* **28** 263
- [18] Gao R J, Shi P F, Liu S T, Duan Y P, Tang Z A 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8566 (in Chinese) [高仁璟, 史鹏飞, 刘书田, 段玉平, 唐祯安 2010 物理学报 **59** 8566]
- [19] Zhu C, Ma J J, Li L, Liang C H 2010 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **9** 99

# Broadband and low-loss left-handed metamaterial composed of oblique triangular open-loop pairs resonator\*

Li Wen-Qiang<sup>†</sup> Cao Xiang-Yu Gao Jun Liu Tao Yao Xu Ma Jia-Jun

(Telecommunication Engineering Institute of Air Force Engineering University, Xi'an Shanxi 710077, China)

(Received 25 September 2011; revised manuscript received 6 December 2011)

## Abstract

A method of realizing multiband and broadband left-handed metamaterials with low-loss is presented. By integrating oblique triangular open-loop pair resonator plus wire (OTOR-wire) with oblique triangular open-loop pair resonator (OTOR), the combined structure exhibits double LH passbands, which can form broad LH passband by adjusting the unit cell geometrical dimension. Simulation and experimental results and analysis demonstrate that this structure exhibits negative effective permittivity and permeability simultaneously in a frequency range from 9.3 GHz to 13.2 GHz, its relative negative refraction passband reaches 347%, and the figure of merit reaches 347.9. The idea can help us to design multiband and broadband left-handed metamaterials with low-loss

**Keywords:** left-handed metamaterials, multiband, broadband, transmission experiments

**PACS:** 41.20.Jb, 73.20.Mf

---

\* Project supported by the Key Program of Natural Science Foundation of Shanxi Province, China (Grant No. 2010JZ010), and the Natural Science Basic Research of Shanxi Province, China (Grant Nos. SJ08-ZT06, 2012JM8003).

<sup>†</sup> E-mail: lfjwylwq@126.com