

基于双十字架型宽带低耗小单元左手材料的设计与实验验证

董怀景 耿友林

Double cross-shape broadband low-loss and small units left-handed metamaterials based design and experimental verification

Dong Huai-Jing Geng You-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 024102 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.024102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于双三角形金属条的二维可衍生超材料性能分析

Performance analysis of double incidence derivative metamaterial based on double-triangular structure

物理学报.2015, 64(3): 034101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.34101>

热防护层覆盖弹体目标雷达散射截面的修正的等效电流近似法和图形电磁学法分析

Modified equivalent current approximation and graphical electromagnetic computing method of analyzing radar cross section of missile target scatterer covered with thermal protection layer

物理学报.2014, 63(24): 244101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244101>

一种新型宽带定向性贴片天线设计

Design of a novel wideband directivity patch antenna

物理学报.2014, 63(24): 244102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244102>

同轴交错圆盘加载波导慢波结构高频特性的研究

Dispersion characteristics of the coaxial interlaced disk-loaded waveguide slow-wave structure

物理学报.2014, 63(22): 224101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224101>

一种兼具宽带增益改善和宽带、宽角度低雷达散射截面的微带天线

A broad-band gain improvement and wide-band, wide-angle low radar cross section microstrip antenna

物理学报.2014, 63(22): 224102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224102>

基于双十字架型宽带低耗小单元左手材料的设计与实验验证*

董怀景 耿友林†

(杭州电子科技大学电子信息学院, 杭州 310018)

(2014年6月9日收到; 2014年7月10日收到修改稿)

提出了一种利用电谐振器与磁谐振器集成于一体的单面左手介质结构设计方案, 该方案采用两个十字架型金属结构镜像并列放置在介质基板的同一侧形成一个左手单元, 并将其排列成周期结构. 软件仿真和优化提取了一系列有效电磁参数, 结果表明, 该结构在9.4—16 GHz的频率范围内等效介电常数和等效磁导率同时为负, 其相对带宽达到了52%, 并且单元电长度和损耗都小于同类型的结构. 对该结构进行了加工、制作并通过波导法测试再次证明了其优良左手特性的存在性. 为左手材料的广泛应用打下了基础.

关键词: 左手材料, 双十字架, 宽频带, 低损耗

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci

DOI: 10.7498/aps.64.024102

1 引言

Veselago在1968年提出了左手材料的概念^[1], 并指出其介电常数和磁导率在一定电磁波频段内同时为负, 且具有诸如负折射现象^[2]、完美透镜效应^[3]、逆Doppler效应^[4]等很多奇异的电磁特性. 正是由于这些特殊的电磁特性, 才使得左手材料在光学成像^[3]、天线系统^[5]、微波器件^[6]以及电磁隐身^[7]等领域具有广泛且重要的应用. 然而这一理论直到三十年后才由Smith等^[8]通过金属导线和开口谐振环结合体的形式首次实现. 自此以后, 左手材料的研究走上了飞速发展的快车道.

在近十几年的时间里, 左手材料得到了长足的发展, 各种不同设计类型不断地被提出. 大体上, 这些结构可根据电磁波的入射方向分为两种类型: 一种是电磁波平行入射介质基板形式, 如H形结构^[9]、对称环结构^[10]、“巨”字形结构^[11]、欧米伽结构^[12]等; 另一种是电磁波垂直入射介质基板形式, 如金属线对结构^[13]、渔网结构^[14]、网格形结构^[15]

等. 但是垂直入射结构相对于平行入射有着明显的缺点, 例如容易导致屏蔽效应, 吸收损耗较大等. 而这些缺点都是实用环境所尽量避免的. 在平行入射结构中, 又可按结构类型分为单面和双面两种. 双面结构由于要在介质基板的两侧都进行结构蚀刻, 增加了制作的难度, 同时损耗也普遍偏大, 也不是实用结构的首选. 所以, 现阶段单面平行入射的左手材料结构是研究的主要方向. 目前已经出现了多种单面结构, 如Nasrin等^[16]的十字金属线对结构的左手材料, 陈春晖等^[17]的磁谐振器与共面短金属导线相结合的左手材料, 杨晨等^[18]的十字环形结构以及孙永志等^[19]的双S型结构等. 而这些结构普遍存在着结构复杂、带宽窄、损耗大以及体积大等一系列问题, 严重限制了左手材料的应用和发展. 所以, 结构简单、频带宽和损耗小的单面左手单元设计成为该领域的研究热点.

本文提出了一种双十字架镜像并列放置的新型左手结构, 该结构为电谐振器和磁谐振器集成于一体置于介质基板同一侧的单面结构. 利用商业电磁软件HFSS对该结构进行软件仿真、NRW算

* 国家自然科学基金(批准号: 60971047)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gengyoulin@aliyun.com

法^[20,21]提取等效参数以及波导法实验验证,结果一致表明在9.4—16 GHz的频段上有效介电常数和有效磁导率同时为负,相对带宽可达52%,而中心频率单元电长度仅为0.06. 真正实现了宽带低耗小单元左手材料的设计.

2 单元设计与仿真分析

左手特性的实现,需要其等效介电常数和磁导率同时为负. 根据左手介质的传输线理论^[22–24],只要在电磁波传播方向上同时出现并联电感和串联电容,就可以产生左手特性,并且这种并联电感和串联电容产生的方式越简单直接,产生的左手特性的带宽越宽、损耗越小、体积也越小. 根据这一理论,本文设计了一种电谐振器与磁谐振器集成于一体的左手单元结构. 如图1(a)所示,该单元由两个十字架形金属线镜像并列放置在厚度为0.5 mm介电常数为4.4的FR4介质基板上组合而成. 其中,短横金属线长1.4 mm,长竖金属线长2.8 mm,两个十字架的横向间距为0.18 mm,纵向间距为2.6 mm,所有金属线宽0.12 mm,厚0.035 mm.

为了验证所构造的结构具有左手特性,采用高频仿真软件HFSS对所构造的结构进行电磁仿真和优化. 图1(b)即为四个结构单元放置在波导中央的仿真模型,单元的间距为0.15 mm. 波导壁由两对对称的理想电壁(PEC)和理想磁壁(PMC)组成,上下两PEC的间距为3.36 mm,前后两PMC的间距为1.524 mm. 电磁波沿+y方向从1端口向2端口传播. 这样,该仿真模型可以模拟平面电磁波从1端口经左手介质传播到2端口的反射和透射特性. 经仿真分析可以得到该二端口波导的反射及透射系数幅度与相位随频率变化的曲线. 如图2所示,在9.4和16 GHz两个频点上幅值和相位同时发生了突变且在这个频段内为通带. 通过NRW算法从中提取出该左手介质的等效介电常数、等效磁导率、折射率,进一步可判断其左手特性. 如图3所示,在仿真频段内结构阵列在9.4—16 GHz范围内有等效介电常数、等效磁导率以及折射率同时为负,体现了双十字架型结构的左手特性. 且在通带内 S_{21} 的幅度大于-0.6 dB,这说明平均每个结构单元的传输损耗小于0.15 dB.

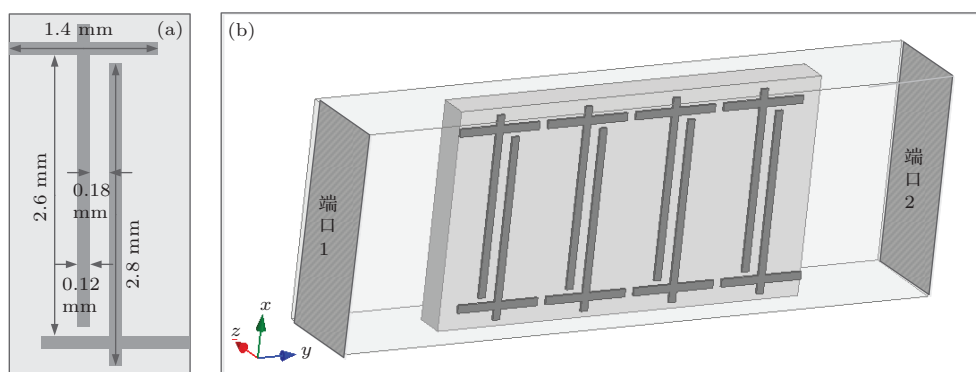


图1 (a) 单元结构尺寸; (b) 软件仿真模型

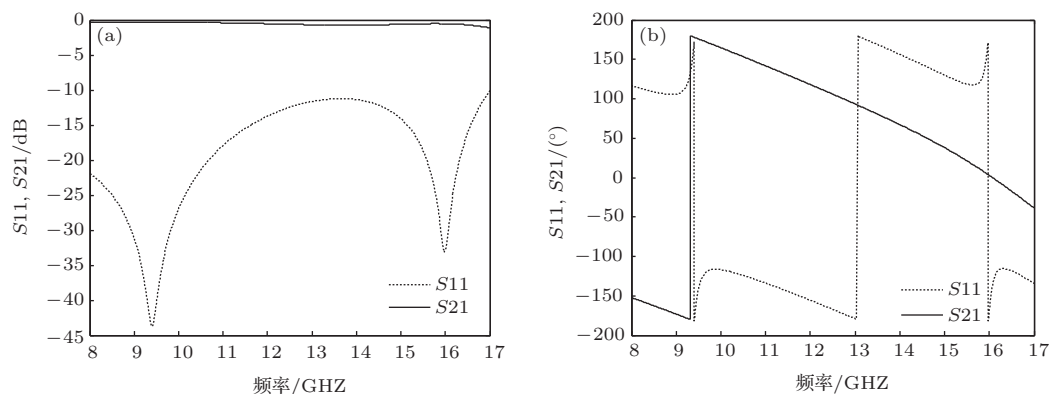


图2 (a) S 参数幅度; (b) S 参数相位

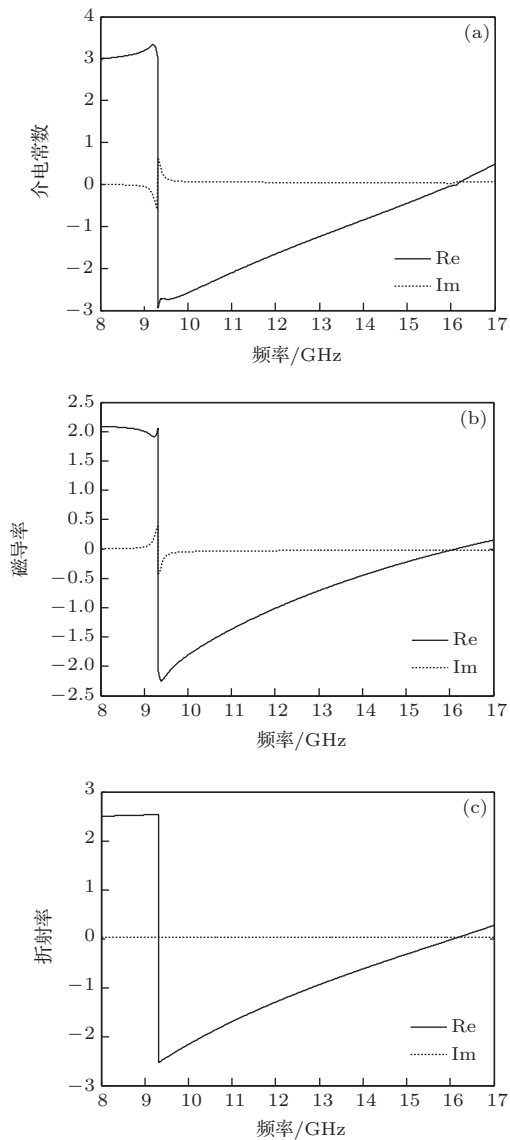


图3 (a) 等效介电常数; (b) 等效磁导率; (c) 折射率

3 实验系统及测量结果

通常的实验测试方法有两种, 一种是采用波

导和矢量网络分析仪; 另一种是利用标准喇叭和矢量网络分析仪. 本文采用第一种波导和矢量网络分析仪相结合的测试方式, 利用波导同轴转接头连接矢量网络分析仪与波导. S 参数由安捷伦的矢量网络分析仪 N5230C 测得, 测试设备如图 4 所示. 实际测量中将 4×3 的样品沿 z 方向堆积起来, 堆积成一个 $6.35 \text{ mm} \times 10.08 \text{ mm} \times 22.86 \text{ mm}$ 的立方体侧放在标准波导 BJ100 里面, 样品及实物照片如图 5 所示. BJ100 标准波导的横截面尺寸为 $22.86 \text{ mm} \times 10.16 \text{ mm}$, 考虑到制作和加工精度的问题也为方便将样品送入波导, 本文在 x 方向选择了小于 10.16 mm 的 10.08 mm . 测试与仿真的 S 参数结果对比图以及由其提取出的等效介电常数和磁导率实部对比图如图 6 和图 7 所示. 必须指出的是, 标准波导 BJ100 的工作频率范围是 $8\text{--}12 \text{ GHz}$, 所以测试的结果只放置了该频段范围内的结果, 但是这并不影响实验的验证. 通过对比我们发现测试出的左手特性频带比仿真结果向上平移了一点, 这是由于加工和制作误差、片与片之间的填充物 EVA 海绵的介电常数不等于空气的介电常数以及单元结构没有很好地接触波导壁等因素导致的.



图4 实验测试设备

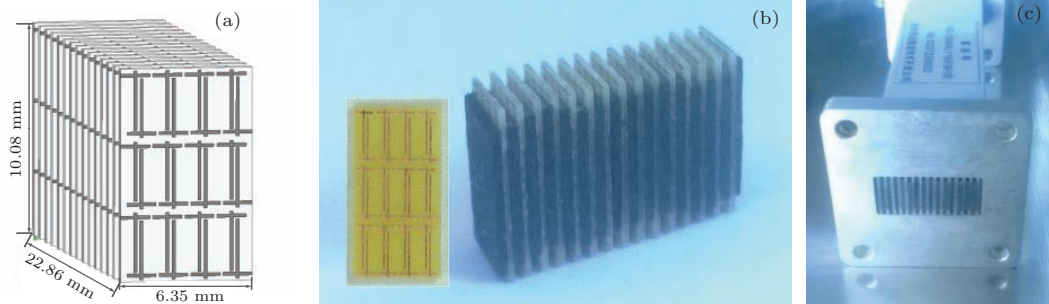


图5 (a) 测试样品模型图; (b) 测试样品实物照片; (c) 波导内部测试样品放置图

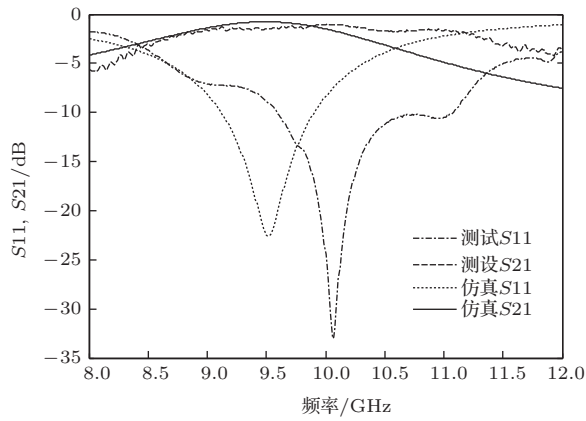


图6 测试与仿真S参数对比图

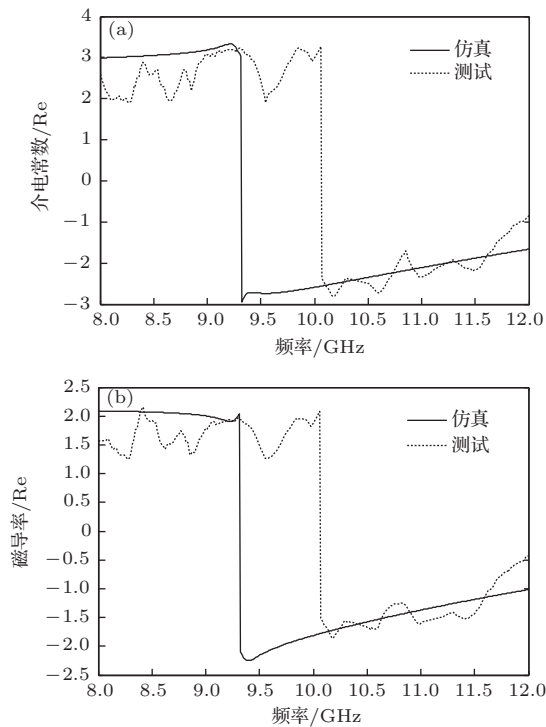


图7 (a) 测试与仿真等效介电常数对比; (b) 测试与仿真等效磁导率对比

4 结 论

根据传输线理论, 本文提出了一种双十字架型的新型左手结构. 通过软件仿真和实物测量证明: 该结构在9.4—16 GHz的空间上具有左手特性, 绝对带宽6.6 GHz, 相对带宽52%, 在中心频率上的单元电长度约为0.06, 且平均单元的传输损耗低于0.15 dB. 相对于其他结构而言, 该结构既减小了损耗, 又减小了由于点尺寸过大所带来的各向异性, 同时又很大程度地扩大了带宽. 宽带低耗小单元左手材料设计的实现具有广泛的应用前景.

感谢东南大学毫米波国家重点实验室中崔铁军教授、程强教授和赵捷博士提供的测试条件, 完成了本文的测试.

参考文献

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [3] Pendry J B 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [4] Seddon N, Bearpark T 2003 *Science* **302** 1537
- [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, Wang J F 2008 *Opt. Express* **16** 15449
- [7] Ma H, Qu S B, Xu Z, Zhang J Q, Chen B W, Wang J F 2008 *Phys. Rev. A* **78** 036608
- [8] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 418
- [9] 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]
- [10] Grzegorzczak T M, Moss C D, Lu J, Chen X D, Pacheco Jr J, Kong J A 2005 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **53** 2956
- [11] Yang Y M, Qu S B 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1031 (in Chinese) [杨一鸣, 屈绍波 2009 物理学报 **58** 1031]
- [12] Ran L, Huangfu J, Chen H, Li Y, Zhang X, Chen K, Kong J A 2004 *Phys. Rev. B* **70** 073102
- [13] Zhang S, Qu S B, Ma H, Xie F, Xu Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3961 (in Chinese) [张松, 屈绍波, 马华, 谢峰, 徐卓 2009 物理学报 **58** 3961]
- [14] Kafesaki M, Tsiapa I, Katsarakis N, Koschny T 2007 *Phys. Rev. B* **75** 235114
- [15] Zhou J F, Zhang L, Tuttle G, Koschny T, Soukoulis C M 2006 *Phys. Rev. B* **73** 041101
- [16] Nasrin A, Forooraghi K, Atlasbaf Z 2011 *IEEE Antenn. Wirel. Propag. Lett.* **10** 524
- [17] 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]
- [18] Yang C, Zhang H X, Wang H X, Xu N, Xu Y Y, Huang L Y, Zhang K X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 164101 (in Chinese) [杨晨, 张洪欣, 王海侠, 徐楠, 许媛媛, 黄丽玉, 张可欣 2012 物理学报 **61** 164101]
- [19] Sun Y Z, Ran L X, Wang D X, Wang W G, Chen Q L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4602 (in Chinese) [孙永志, 冉立新, 王东兴, 王伟光, 陈秋林 2010 物理学报 **59** 4602]
- [20] Zilokowski E W 2003 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **51** 1516
- [21] Chen H S, Zhang J J, Bai Y, Luo Y, Ran L X, Jiang Q, Kong J A 2006 *Opt. Express* **14** 12944
- [22] Caloz C, Itoh T 2002 *IEEE Ante. Prop. Soci. Int. Symp.* **2** 412
- [23] Zhang D K, Zhang Y W, He L, Li H Q, Chen H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 772 (in Chinese) [张东科, 张治文, 赫丽, 李宏强, 陈鸿 2005 物理学报 **54** 772]
- [24] Grbic A, Eleftheriades G V 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 5930

Double cross-shape broadband low-loss and small units left-handed metamaterials based design and experimental verification^{*}

Dong Huai-Jing Geng You-Lin[†]

(*Institute of Antenna and Microwaves, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China*)

(Received 9 June 2014; revised manuscript received 10 July 2014)

Abstract

A method of designing a single side left-handed structure based on the integration of electric resonator and magnetic resonator is proposed in this paper. The left-handed units are composed of two cross types of metal mirrors that are parallel-placed on the same side of the substrate and then arranged into a periodic structure. The results of HFSS software simulation and a series of effective electromagnetic parameters extraction show that the left-handed structure exhibits negative effective permittivity and permeability simultaneously in a frequency range from 9.4 GHz to 16 GHz. Its relative passband reaches 52%, and the unit electrical length and loss are less than those of the same type of structures. The periodic structure is fabricated and tested using the waveguide method. The fine left-handed feature is proved again. This new structure lays a foundation for the wide applications of left-handed metamaterials.

Keywords: left-handed metamaterials, double cross-shaped, broadband, low-loss

PACS: 41.20.Jb, 78.20.Ci

DOI: [10.7498/aps.64.024102](https://doi.org/10.7498/aps.64.024102)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60971047).

[†] Corresponding author. E-mail: gengyoulin@aliyun.com