

一种新型宽频带低损耗小单元左手材料的设计与实现

何政蕊 耿友林

Design and analysis of a new type of wideband low-loss and small size left-handed materials

He Zheng-Rui Geng You-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 094101 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.094101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I9>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单层超薄高效圆极化超表面透镜

Ultra-thin single-layered high-efficiency focusing metasurface lens

物理学报.2016, 65(7): 074101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074101>

一种基于石墨烯的超宽带吸波器

An ultra-wideband absorber based on graphene

物理学报.2016, 65(5): 054101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054101>

Ku 波段编码式电控超薄周期单元设计与验证

Design and verification of an electronically controllable ultrathin coding periodic element in Ku band

物理学报.2016, 65(5): 054102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054102>

基于极化旋转超表面的圆极化天线设计

A circular polarization antenna designed based on the polarization conversion metasurface

物理学报.2016, 65(2): 024101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024101>

一种基于开口谐振环的高增益端射天线设计

A design of high-gain end-fire antenna based on split-ring resonator structures

物理学报.2015, 64(23): 234101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234101>

# 一种新型宽频带低损耗小单元左手材料的设计与实现\*

何政蕊 耿友林†

(杭州电子科技大学天线与微波研究所, 杭州 310018)

(2015年11月21日收到; 2015年12月29日收到修改稿)

设计了一种结构简单、可在电路板单面上印刷的新型左手材料. 该结构由周期性排列的“**II**”组成, 具有频带宽、损耗低、尺寸小等优点. 该材料在一定频段内具有介电常数和磁导率同时为负的特性. 仿真结果表明: 在8.79—15.57 GHz频率范围内, 折射率实部为负, 而虚部接近于零; 同时在该频段内的波阻抗实部大于零. 从而说明该材料具有左手特性, 在此基础上对该结构进行了制作、加工、并通过矩形波导法进行了验证. 同时, 该左手材料的相对带宽达到55.74%, 而最大单元损耗仅是0.27 dB, 远远优于传统的左手材料.

**关键词:** “**II**”形结构, 左手材料, 宽频带, 低损耗

**PACS:** 41.20.Jb, 78.20.Ci

**DOI:** 10.7498/aps.65.094101

## 1 引言

左手材料是一种介电常数 $\epsilon$ 和磁导率 $\mu$ 同时为负的新型人工合成周期性结构. 与传统材料不同的是: 左手材料的电场 $\mathbf{E}$ 、磁场 $\mathbf{H}$ 和波矢量 $\mathbf{k}$ 遵循左手定则, 相速度和群速度的方向相反. 早在1968年, 前苏联科学家 Veselago<sup>[1]</sup>就对此类材料开展了理论研究, 但由于在自然界中没有找到该类材料, 在随后的近三十年内, 左手材料的研究几乎没有任何进展. 直到1996年, 英国科学家 Pendry等<sup>[2]</sup>提出了一种通过细金属棒(Rod)阵列和金属谐振环(SRR)产生负的等效介电常数和负的等效磁导率的方法. 美国科学家 Smith等<sup>[3]</sup>在2001年成功制作出X波段等效介电常数和等效磁导率同时为负的左手材料, 首次从实验上证明了左手材料的存在. 此后, 该方面的研究成为热点. 近年来, 左手材料的研究主要有两个方面: 一是左手材料的新型结构的实现和性能优化, 如双十字架形<sup>[4]</sup>、双三角形金属条<sup>[5]</sup>、正六边形多开口结构<sup>[6]</sup>; 二是左手材料

在微波<sup>[7]</sup>、天线<sup>[8]</sup>领域内的应用.

本文设计出一种基于“**II**”形状的新型左手材料结构, 这种结构只需在介质板的单侧采用电路板刻蚀技术刻蚀出周期性排列的“**II**”形金属图案, 这种结构简单并且易于制作. 本文首先通过商业仿真软件HFSS (high frequency structure simulator)得到仿真的 $S$ 参数<sup>[9]</sup>; 再通过MATLAB软件和 $S$ 参数提取法提取出有关的等效电磁参数<sup>[10,11]</sup>; 在上述工作的基础上, 制作出实物, 并使用矢量网络分析仪进行实验测试, 验证了该结构具有左手特性. 通过仿真和测试结果可知: “**II**”形结构在8.79—15.57 GHz频段范围内等效介电常数和等效磁导率同时为负, 并且具有结构简单、体积小、频带宽、损耗小等优点, 在微波、天线等领域有广阔的应用前景.

## 2 新型左手材料结构设计

本文中的左手材料是构建在介质基板单侧的“**II**”形周期性排列结构, 单元结构如图1所示.

\* 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

FR4 基质介电常数为 4.4, 宽度  $a = 0.909$  mm, 厚度  $b = 1.35$  mm, 高度  $c = 3.36$  mm, 其他参数标注在图 1 中.

通过仿真软件 HFSS 得到  $S$  参数时, 需要在沿  $Y$  轴方向的两侧设置两个波端口激励, 电场矢量  $\mathbf{E}$  和磁场矢量  $\mathbf{H}$  方向设置如图 2.

“II”形左手材料结构由  $12 \times 5 \times 3$  个单元结构组成.

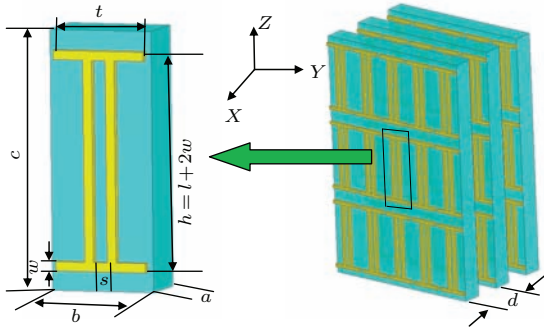


图 1 “II”形结构的几何参数  $t = 1.2$  mm,  $l = 2.6$  mm,  $w = 0.12$  mm,  $s = 0.18$  mm,  $d = 1$  mm.  
Fig. 1. Geometry of the “II” shaped structure:  $t = 1.2$  mm,  $l = 2.6$  mm,  $w = 0.12$  mm,  $s = 0.18$  mm,  $d = 1$  mm.

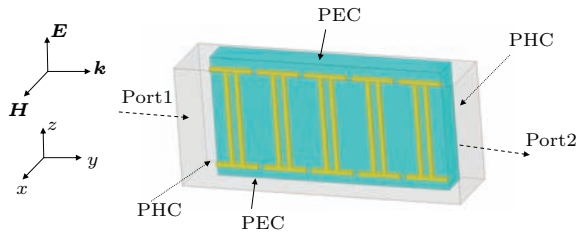


图 2 “II”形左手材料单元仿真模型  
Fig. 2. The simulation unit cell of the “II” shaped structure.

### 3 电磁仿真与结果分析

#### 3.1 电磁仿真分析

通过电磁仿真得到的  $S$  参数幅度曲线和相位曲线如图 3 所示. 仿真时最低频率设为 6 GHz, 最高频率设为 18 GHz, 频率间隔为 0.01 GHz.

从图 3(a) 中可以看出,  $S_{11}$  和  $S_{21}$  谐振点位于 8.79 GHz 和 15.57 GHz, 回波损耗为  $-37.2$  dB.  $S_{21}$  的相位在 8.88 GHz 处开始下降, 标志着双负区域的开始<sup>[12]</sup>, 且在通带内  $S_{21}$  的幅度大于  $-1.35$  dB, 说明平均每个单元结构的传输损耗小于 0.27 dB.

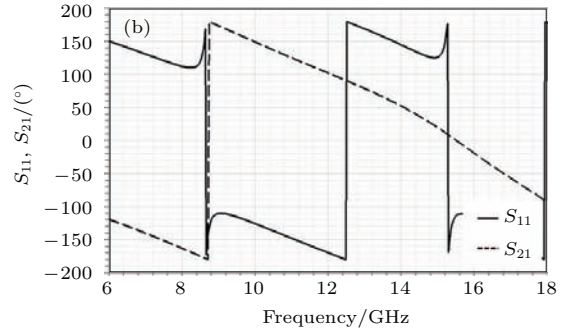
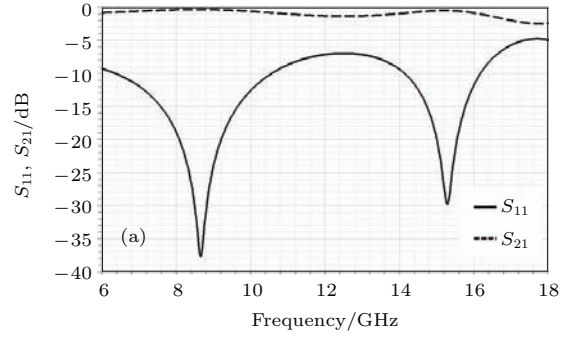


图 3 单元结构仿真 (a)  $S$  参数幅度曲线; (b)  $S$  参数相位曲线  
Fig. 3. Single simulation unit cell: (a) Magnitude of  $S$  parameters curve; (b) phase of  $S$  parameters curve.

#### 3.2 $S$ 参数提取法

根据 HFSS 软件仿真得到的散射参数, 提取出等效电磁参数. 首先由  $S$  参数计算出该左手材料结构的特性阻抗  $z$  和折射率  $n$ , 然后计算出等效介电常数  $\epsilon$  和等效磁导率  $\mu$ , 具体表达式如下<sup>[13]</sup>:

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}}, \quad (1)$$

$$n = \frac{1}{k_0 d} \cos^{-1} \left[ \frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right], \quad (2)$$

式中  $n$  为折射率,  $k_0$  为入射波矢量的波数,  $d$  为介质板厚度,  $z$  为波阻抗. 其本构关系<sup>[14]</sup>:

$$\epsilon = n/z, \quad \mu = n \cdot z. \quad (3)$$

由上述 (1), (2) 和 (3) 式可知, 当折射率  $n < 0$  和  $\text{Re}(z) > 0$  时, 介电常数和磁导率均为负.

#### 3.3 等效电磁参数分析

利用基于  $S$  参数提取法和一段 MATLAB 代码从转移矩阵和反射矩阵中提取出等效电磁参数 ( $\epsilon, \mu, n, z$ ), 如图 4 所示.

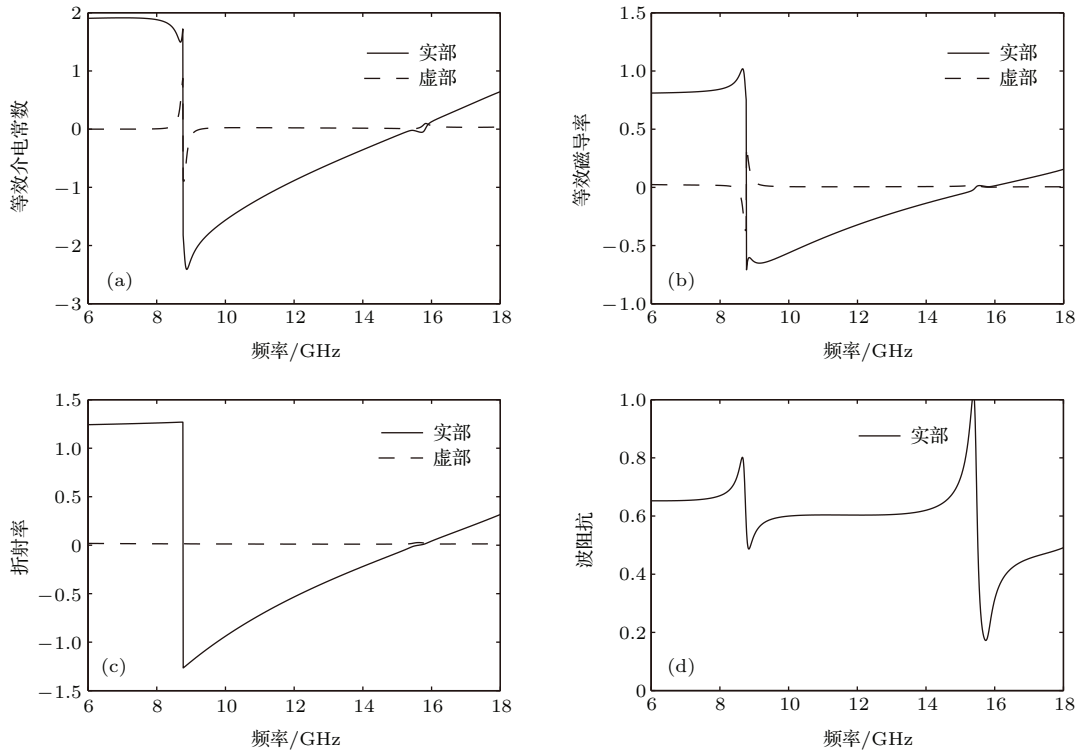


图4 等效电磁参数曲线 (a) 介电常数  $\epsilon$ ; (b) 磁导率  $\mu$ ; (c) 折射率  $n$ ; (d) 波阻抗  $z$

Fig. 4. Retrieved effective material parameters: (a) Relative permittivity  $\epsilon$ ; (b) relative permeability  $\mu$ ; (c) index of refraction  $n$ ; (d) wave impedance curve  $z$ .

从上面的曲线可以看出, 该“**II**”形左手材料存在折射率为负, 阻抗实部为正, 介电常数和磁导率为负的频带, 具体电磁参数随频率变化的分布如表1所列.

表1 电磁参数随频率变化的分布情况  
Table 1. Distribution of effective material parameters versus frequency.

等效电磁参数	频率/GHz
$\epsilon < 0$	8.79—15.84
$\mu < 0$	8.79—15.57
$n < 0$	8.79—15.88
$\text{Re}(z) > 0$	6—18

从表1中可以看出, “**II**”形左手材料存在一个从8.79—15.57 GHz的双负通带, 其绝对带宽为6.78 GHz, 相对带宽为55.74%.

FOM (figure of merit) 是衡量结构损耗的一个参数, 定义如(4)式, FOM越大, 证明损耗越小<sup>[15]</sup>.

$$FOM = |\text{Re}(n)/\text{Im}(n)|. \quad (4)$$

“**II**”形结构的损耗如图5所示, FOM值在左手频带内从96到3之间波动. 在双负频段外, FOM接近于0, 由此可知“**II**”型结构是低损耗结构.

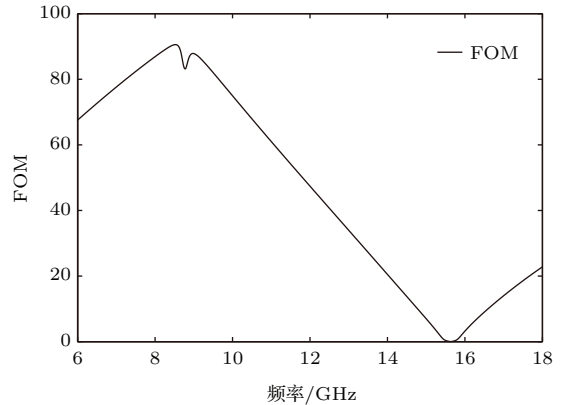


图5 左手区域的损耗

Fig. 5. Fig of merit for the negative band.

## 4 实验装置与测试结果

### 4.1 实验仪器与装置

S参数提取法和矩形波导法除了对待测样品的形状有要求外, 没有其他严格的要求<sup>[16]</sup>, 并且已经广泛应用于非磁性材料的本构参数的提取<sup>[17]</sup>.

左手材料的测试方式有多种, 本文采用的是矩形波导法: 利用矢量网络分析仪N5230C和矩形波导BJ100测试出所制备样品

在8.2—12.5 GHz的 $S$ 参数. 标准波导BJ100的工作频段是: 8.2—12.5 GHz, 横截面积尺寸是22.86 mm × 10.16 mm. 待测样品放置在矩形波导中央.

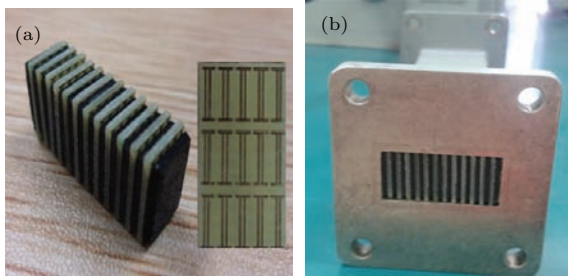


图6 (a) 待测样品实物图; (b) 待测样品在波导内的放置方式

Fig. 6. (a) The sample under measure; (b) the placement of under measure sample within the waveguide.



图7 实验测试装置

Fig. 7. The experiment equipment.

### 4.2 实验结果与分析

将制备的“II”形左手材料样品放置于矩形波导的中央, 利用矢量网络分析仪测其 $S$ 参数曲线, 与仿真结果的对比见图8.

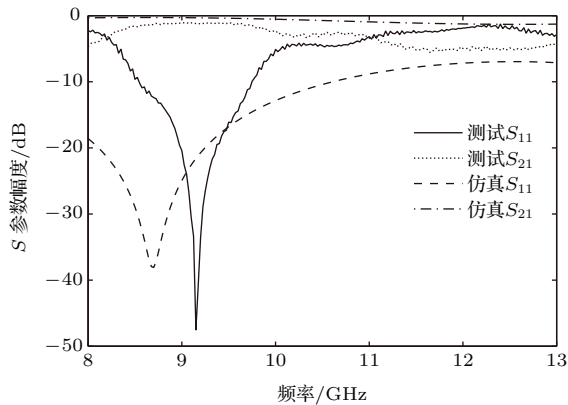


图8 测试与仿真 $S$ 参数对比图

Fig. 8. The measurement and simulation contrast figure of  $S$  parameters.

通过图8可以看出, 测试的谐振点比仿真的谐振点向右下方平移了. 由于仿真时没有考虑材料的损耗和介质板介电常数与样品基板的误差, 样品之间的EVA海绵填充物也是导致误差存在的原因之一. 测试与仿真的等效电磁参数实部的对比如图9所示, 产生的误差主要是由于实验测量中 $S$ 参数相位变化的误差引起的, 虽然测试结果有所偏差, 但是在左手区域内其折射率仍为负值, 证明了“II”形结构具有左手特性.

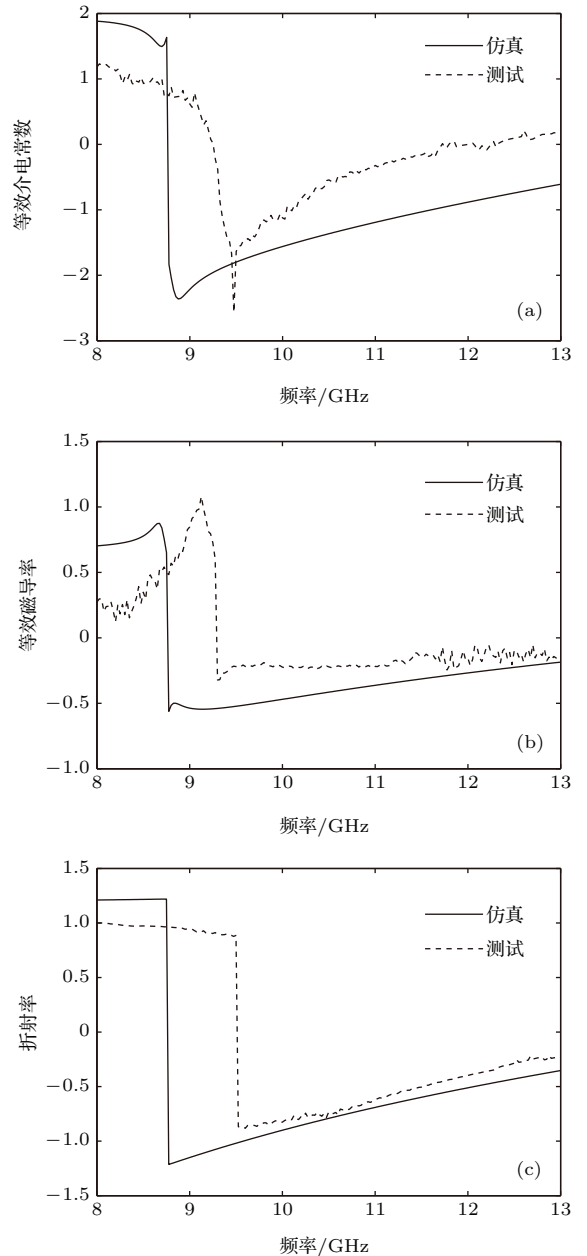


图9 测试与仿真电磁参数(实部)对比图 (a) 介电常数 $\epsilon$ ; (b) 磁导率 $\mu$ ; (c) 折射率 $n$

Fig. 9. The measurement and simulation chart of electromagnetic parameters(the real part): (a) Relative permittivity  $\epsilon$ ; (b) relative permeability  $\mu$ ; (c) index of refraction  $n$ .

## 5 结 论

本文设计了一个新型的低损耗、宽频带、小单元的“II”形左手材料结构, 它的绝对频宽是 6.79 GHz, 相对带宽为 55.74%, 远远优于传统的左手材料. 通过软件仿真和实验测试证明了其左手特性, 该结构单元只需刻蚀在介质板的单面, 易于加工, 制作简单, 可以方便地应用于滤波器、天线等领域.

感谢东南大学毫米波重点实验室崔铁军教授、程强教授和白冰同学提供了本文中实物参数测试时所需的仪器和设备.

## 参考文献

- [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] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [4] Dong H J, Geng Y L 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 024102 (in Chinese) [董怀景, 耿友林 2015 物理学报 **64** 024102]
- [5] Tian Z J, Li W X, Fan J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 034102 (in Chinese) [田子健, 李玮祥, 樊京 2015 物理学报 **64** 034102]
- [6] Yang H, Wang C H, Guo X F 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 014103 (in Chinese) [杨怀, 王春华, 郭小蓉 2014 物理学报 **63** 014103]
- [7] Yi Q, Zhou F K, Zhang M, Luo X F 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 0416003 (in Chinese) [易强, 周辅坤, 张蒙, 洛兴芳 2014 光学学报 **34** 0416003]
- [8] Zhao Y J, Wang D H, Li B Y, Wang P, Zhou B C, Jiang B 2015 *High Power Laser and Particle Beams* **27** 103254 (in Chinese) [赵亚娟, 王东红, 李宝毅, 王蓬, 周必成, 江波 2015 强激光与粒子束 **27** 103254]
- [9] Markos P, Soukoulis C M 2002 *Phys. Rev. E* **65** 036622
- [10] Smith D R, Vier D C, Koschny T, Soukoulis C M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036617
- [11] Chen X D, Grzegorzczak T M, Wu B I, Pacheco Jr J, Kong J A 2004 *Phys. Rev. E* **70** 016608
- [12] Ma M Z, Qin W P 2011 *J. Nanjing Univ. Posts and Telecommun. (Natural Science)* **31** 113 (in Chinese) [马明张, 秦卫平 2011 南京邮电大学学报(自然科学版) **31** 113]
- [13] Sipe J E, van Kranendonk J 1974 *Phys. Rev. A* **9** 1806
- [14] Belov P A, Tretyakov S A, Viitanen A J 2002 *Phys. Rev. E* **66** 016608
- [15] Jing D L 2013 *M. S. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [金大琳 2013 硕士学位论文(成都: 电子科技大学)]
- [16] Damascos N J, Mack R B, Maffett A L, Parmon W, Uslenghi P L E 1984 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **32** 400
- [17] Akhtar M J, Feher L E, Thumm M 2006 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **54** 2011

# Design and analysis of a new type of wideband low-loss and small size left-handed materials\*

He Zheng-Rui Geng You-Lin<sup>†</sup>

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

( Received 21 November 2015; revised manuscript received 29 December 2015 )

## Abstract

A single-side and one-dimensional left handed-material on the basis of periodic “**II**” structure is designed in this paper. The “**II**” structure of left-handed material is very simple and has some advantages, such as large bandwidth, small size and low loss. The results of simulation with the software HFSS show that for this structure in a frequency range from 8.79 GHz to 15.75 GHz, the real part and imaginary part of refraction index are less than 0 and approximately 0 respectively, and the real part of wave impedance is greater than 0, the largest loss per unit is 0.27 dB, and the relative bandwidth is 55.78%, showing that this “**II**” periodic structure has the negative character. Based on the simulation results, this periodic “**II**” structure is fabricated and measured with the vector network analyzer and wave guide method. The measurements are in agreement with the simulations. All these results prove that this left-handed material has some better characters than traditional meta-materials.

**Keywords:** “**II**” shaped structure, left-handed materials, wide band, low-loss

**PACS:** 41.20.Jb, 78.20.Ci

**DOI:** [10.7498/aps.65.094101](https://doi.org/10.7498/aps.65.094101)

---

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

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [gengyoulin@aliyun.com](mailto:gengyoulin@aliyun.com)