

doi:10.3788/gzxb20134205.0576

# 基于双层金属开口环谐振器结构的 U 波段左手材料

易强, 周辅坤, 骆兴芳

(江西师范大学 物理与通信电子学院; 江西省光电子重点实验室, 南昌 330022)

**摘 要:** 基于左手介质的传输线理论, 经过估算尺寸后设计出相应的结构并仿真得到散射参量, 然后利用 Smith 的参量提取方法提取有效介电常量、有效磁导率和折射率, 对一种双层金属开口环谐振器结构的 U 波段左手材料的传输特性和电磁参量特性进行分析. 数值仿真结果表明, 该结构在 48.8~59.9 GHz 频带内有效介电常量和有效磁导率均为负值, 同时在该频率范围内具有负折射特性, 从而证实了该结构在 U 波段的左手特性, 对左手介质在更高波段的研究具有一定的参考意义.

**关键词:** 双层金属开口环谐振器; 负折射; U 波段; 左手材料

中图分类号: TN015

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2013)05-0576-4

## A U-band Left-handed Metamaterial Based on Two-layered SRR Structure

YI Qiang, ZHOU Fu-kun, LUO Xing-fang

(School of Physics, Communication and Electronics, Jiangxi Normal University; Key Laboratory of Photoelectronics & Telecommunication of Jiangxi Province, Nanchang 330022, China)

**Abstract:** A U-band left-handed metamaterial is designed and simulated to obtain the scattering parameters after the dimensions are estimated according to the transmission line theory of the left-handed metamaterial. Furthermore, the properties of transmission and the negative electromagnetic parameters are analyzed after effective permittivity; effective permeability and refraction index are calculated by the Smith parameter retrieval method. The results show that the proposed left-handed metamaterial structure behaviours the negative refraction characteristic while the real parts of effective permittivity and effective permeability are both negative in 48.8~59.9 GHz band. Thus, the existence of the left-handed metamaterial in U-band is demonstrated, and it is of great reference significance to research on metamaterials in higher band.

**Key words:** Two-layered SRR; Negative refraction; U band; Left-handed metamaterial

## 0 引言

左手材料 (Left-Handed Metamaterial, LHM) 是一种介电常量和磁导率同时为负的人工周期性结构材料, 由于在其中传播的电磁波的相速度和群速度方向相反, 因而表现出一系列反常的电磁特性<sup>[1]</sup>, 如反常 Doppler 效应、负折射效应和完美透镜效应

等. 左手材料的发现以及基于左手材料理论制备的“隐身斗篷”<sup>[2]</sup>, 分别在 2003 年和 2006 年被美国《科学》杂志评为年度十大科技突破之一, 从而使得左手材料研究成为当前物理学、材料科学与电磁学等领域中的前沿与热点问题. 2001 年, Shelby 等<sup>[3]</sup> 人将金属开口环谐振器 (Split Ring Resonator, SRR) 阵列和金属杆阵列组合在一起, 在微波段第一次从实

基金项目: 江西省教育厅基金 (No. GJJ11074)、江西省科技支撑项目 (No. 20121BBE50028)、江西省自然科学基金 (No. 20122BAB201027) 和江西省研究生创新基金 (No. YC2012-S051) 资助

第一作者: 易强 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为左手材料. Email: yiqiang315895250@126.com

通讯作者: 骆兴芳 (1976-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为频率选择表面、左手材料、电磁计算方法、优化算法. Email: xlfluo@jxnu.edu.cn

收稿日期: 2012-08-14; 录用日期: 2013-01-15

验上制备出左手材料,并观察到了负折射现象.随后几年里,基于这种经典的构型,许多其他微结构形式的左手材料也相继被提出,如 Huangfu Jiangtao 等人提出了  $\Omega$  形状的结构<sup>[4]</sup>,Chen 等人设计出了结构更加简单的 S 形和双 S 形结构单元<sup>[5-6]</sup>,以及 Zhang 等人<sup>[7]</sup>和姚远等<sup>[8]</sup>人分别提出的对称和非对称的开口六边形磁谐振结构单元,等等.

实现单个结构的负有效介电常量和负有效磁导率是最早 Pendry 教授提出的理论基础,用 SRRs 和金属棒(Rod)组合的结构是最早从理论和实验实现负折射率的左手材料结构<sup>[9]</sup>.随着单元尺寸比例变化,目前,基于嵌套 SRR 结构的左手材料已经在微波、THz、红外以及声波波段被证实<sup>[10-14]</sup>.然而对于左手介质设计而言,不但要求带宽较宽、损耗较低,还要求其结构简单便于制造、均匀各向同性等特点,而现有的左手介质几乎都难以同时满足这些要求;且目前对左手介质的研究大多都集中在 C 波段和 X 波段等,对于更高波段的研究仍然比较少见.

本文针对上述问题展开研究,旨在通过左手介质激发机理的深入研究,设计出一种宽频带并且体积小的左手介质,并对其左手特性进行验证.研究中首先运用电磁仿真软件设计出一种双层 SRR 对置结构的左手材料,而后进行数值仿真得到相应所需的传输特性曲线,并且利用 Smith 的参量提取方法提取出了该左手介质的有效介电常量和有效磁导率、有效折射率等电磁参量.计算和仿真结果表明:在 48.8~59.9 GHz 频率范围内,有效介电常量及有效磁导率同时为负,且在该频率范围内有效折射率同样为负值,从而验证了所设计的左手材料在 U 波段具有左手特性.

## 1 双层 SRR 结构的分析与设计

双层 SRR 单元结构如图 1.

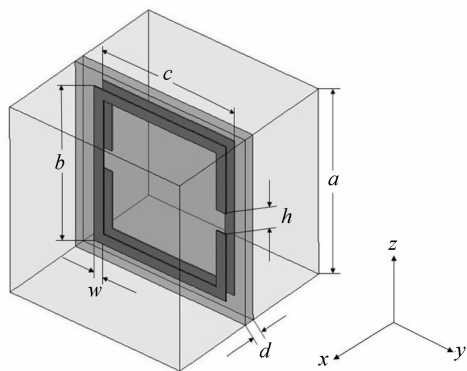


图 1 双层 SRR 单元结构

Fig. 1 The structure of unit cell of two-layered SRR

两个开口金属环分别在介质基板的两边,当电磁波沿  $y$  轴方向传播且电场极化方向平行于  $z$  轴

时,磁场垂直入射到左手介质单元上,在两环的上下相对位置处,电场沿着相反的方向,使得单个开口环上下边形成电势差.所以当两个开口环中有电流通过,并带有异种电荷时,在介质板两侧的金属片类似于平行板电容器具有电容效应.同时,根据电磁感应定律可知在磁场的激励下,SRR 环上产生感应电流,从而引入电感.所以双层 SRR 的等效电路模型和传统 SRRs 相似,如图 2 所示,这样的电荷分布不会造成静电偶极子.因此,双层 SRR 可以避免传统 SRRs 结构的双各向异性,并且拥有更小的电尺寸.

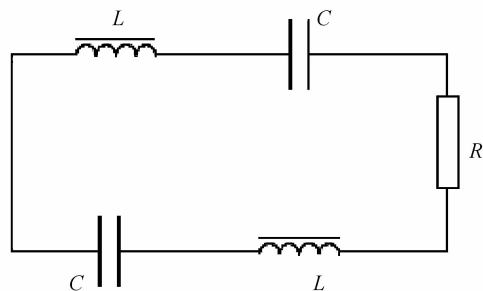


图 2 双层 SRR 结构的 LC 等效电路

Fig. 2 LC equivalent circuit model of the two-layered SRR structure

从图 2 中的双层 SRR 结构等效电路模型可以看出等效谐振频率  $\omega_0$  为

$$\omega_0 = 1/LC \quad (1)$$

由于介质基板两侧金属带耦合产生的电容远大于矩形金属环上下两端开口形成的电容,所以电容值可以近似为平行板电容,用

$$C = \frac{\epsilon S}{\epsilon_0 d} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0 d} [\omega(b+c) - 2\omega^2 - 2h\omega] \quad (2)$$

来估算,其中  $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^9}$  (F/m) 代表自由空间中的介电常量, $S$  为两层 SRR 正对面积的一半, $d$  为介质基板的厚度, $b$  与  $c$  分别表示金属环的宽和长, $\omega$  为金属部分的宽度, $h$  代表开口长度, $\epsilon$  为介质基板的介电常量.

而单个 SRR 结构的集总等效电感值为

$$L = \varphi/I = \mu_0 (b-w)(c-w)/d \quad (3)$$

$\mu_0$  为真空中的磁导率.

当电磁波沿  $y$  方向入射到左手介质单元上的时候,尽管整个双层 SRR 单元结构中的总电感值,除了每个 SRR 的集总等效电感值之外,还有两个环之间的互感,但是这并不影响本文分析结构参量对单元谐振频率的调节.

谐振频率会被 SRR 结构的尺寸和基板厚度  $d$  所影响,并与介质基板的介电常量  $\epsilon$  的平方根呈负相关.因此,基于左手介质的传输线理论<sup>[15]</sup>和对上述左手介质单元等效电路的分析,可以预料到通过

对图 1 所示的结构合理设计和布局可以设计出预定波段的宽频段左手介质。

首先利用式(1)~(3)以及左手传输线理论,根据预定设计的左手介质工作频段估算结构单元的尺寸,然后利用电磁仿真软件确定上述参量.运用上述方法,经过对其尺寸的不断调整和优化,最终确定的能够在 U 波段产生左手介质的结构单元尺寸.选取单胞的边长  $a$  为 2.5 mm,在单胞的中间放置厚度  $d$  为 0.2 mm,介电常量  $\epsilon$  为 2.2 的 Rogers 5880 作为介质基板.单个 SRR 环的宽  $b$  为 0.8 mm 和长  $c$  为 1.0 mm,开口长度  $h$  为 0.3 mm.此外,金属部分的宽度  $w$  为 0.2 mm,厚度为 0.013 mm.将单胞中平行于  $x$ - $y$  轴的平面设为理想电边界 PEC,平行于  $y$ - $z$  轴的平面设为理想磁边界 PMC,电磁波沿  $y$  方向入射.

## 2 参量提取和电磁特性分析

通过计算机对上述结构参量进行数值仿真,得到反射参量  $S_{21}$  和透射参量  $S_{11}$  随频率变化曲线如图 3,实线  $S_{11}$  和虚线  $S_{21}$  分别表示反射系数和透射系数.根据获得的  $S_{11}$  曲线和  $S_{21}$  曲线可以看到两个明显的谐振频率点,在 44.2~57.8 GHz 附近频段存在一个明显的通带,回波损耗  $S_{11}$  大于 10 dB,而插入损耗  $S_{21}$  小于 1.2 dB.但是仅仅通过观察传输特性曲线没法确定该通带是左手通带还是右手通带,以及左手介质存在的具体频段,还必须提取出该结构的等效参量加以确定.

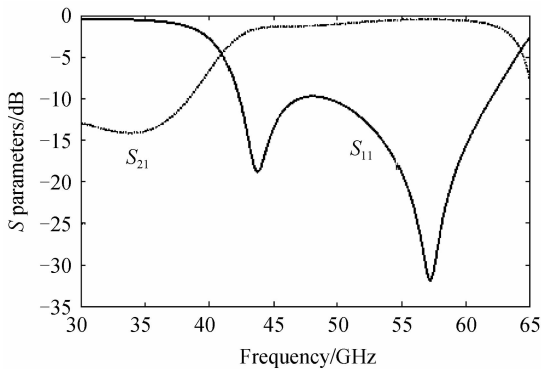


图 3 S 参量幅度曲线  
Fig. 3 Magnitude of S parameter

为了验证该结构的左手特性,利用得到的  $S$  参量,运用 Smith 参量提取方法<sup>[16]</sup>得

$$n = \frac{1}{ka} \arccos \left[ \frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right] \quad (4)$$

和

$$z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (5)$$

式中  $k$  为入射波的波数,  $a$  为结构的单胞尺寸,  $S_{ij}$  为

散射参量.得到复折射率  $n$  和波阻抗  $z$  后,再依据本构关系

$$\epsilon_{\text{eff}} = n/z \quad (6)$$

$$\mu_{\text{eff}} = nz \quad (7)$$

获得有效介电常量  $\epsilon_{\text{eff}}$  和有效磁导率  $\mu_{\text{eff}}$ .得到频率扫描范围在 35~65 GHz 内的有效磁导率实部和有效介电常量实部曲线如图 4,有效折射率实部和虚部曲线如图 5.

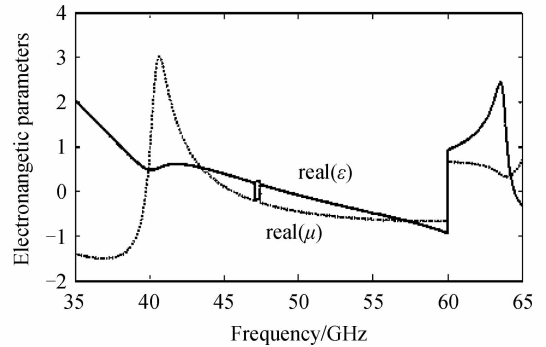


图 4 有效磁导率和有效介电常量的实部随频率变化曲线  
Fig. 4 Real parts of the effective permittivity  $\epsilon$  and the permeability  $\mu$  vs. frequency

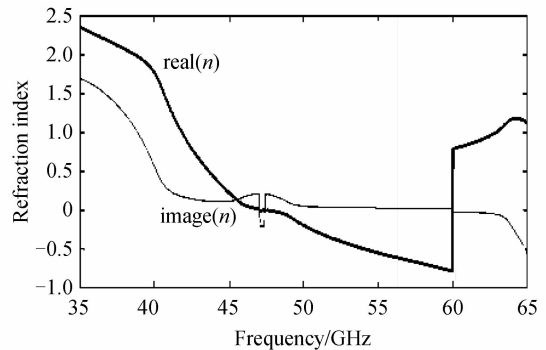


图 5 有效折射率随频率变化曲线  
Fig. 5 Effective index of refraction vs. frequency

根据提取到的电磁参量,由图 4 可以看到在频率为 48.8~59.9 GHz 范围内有效介电常量和有效磁导率的实部同时均为负值,这正是左手介质特有的电磁特性——双负特性;并且,图 3 的  $S_{21}$  曲线在该频率范围内接近于 0.此外,由图 5 可知,在 48.8~59.9 GHz 频带上折射率实部为负值,而虚部近似为零,由以上结论所得的各个有效电磁参量随频率变化的分布情况如表 1.结果说明了在该频率范围内,此左手介质的优越的负折射特性,进一步肯表 1 在特定尺寸下,有效电磁参量随频率变化的分布情况

Table 1 The distribution of effective electromagnetic parameters vs. frequency at certain dimensions

Effective electromagnetic parameters	Frequency/GHz
$\text{Re}(\mu) < 0$	45.7~59.9
$\text{Re}(\epsilon) < 0$	48.8~59.9
$\text{Re}(n) < 0$ & $\text{Im}(n) \approx 0$	48.8~59.9

定了该结构在 U 波段的左手特性.

### 3 结论

本文设计了一种基于双层 SRR 结构的 U 波段左手材料,然后运用 Smith 的参量提取方法对其左手特性进行了验证.结果表明,在 48.8~59.9 GHz 频率范围内,有效介电常量及有效磁导率同时为负,且在该频率范围内折射率同样为负值.该结构单元尺寸较小、频带较宽,符合平面结构的微波电路与器件上的应用需求,这对于设计红外及太赫兹等高频率范围下的左手材料具有参考价值,同时对左手材料在军用和民用方面也具有一定的应用价值.

#### 参考文献

- [1] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of permittivity and permeability [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1968, **10**(4): 517-526.
- [2] MILLER D A B. On perfect cloaking[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(25): 12457-12466.
- [3] SHELBY R A, SMITH D R, SCHULTZ S. Experimental verification of a negative index of refraction [J]. *Science*, 2001, **292**(6): 77-79.
- [4] HUANGFU J, RAN L, CHEN H, *et al.* Experimental confirmation of negative refractive index of metamaterial composed of Omega-like metallic patterns [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(9): 1537-1539.
- [5] CHEN H, RAN L, HUANGFU J, *et al.* Magnetic properties of S-shaped split ring resonators [J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2005, **51**(7): 231-247.
- [6] CHEN H S, RAN L X, HUANGFU J T. Experimental confirmation of guidance prosperities using planar anisotropic left-handed metamaterial slabs based on s-ring resonators[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2008, **84**(1): 279-287.
- [7] ZHANG F L, ZHAO Q, LIU Y H, *et al.* Behavior of hexagon split ring resonators and left-handed metamaterials [J]. *Chinese Physics Letters*, 2004, **21**(7): 1330-1332.
- [8] YAO Yuan, ZHAO Xiao-peng, ZHAO Jing, *et al.* Microwave transmission behavior of the single dissymmetrical hexagonal split-ring resonators[J]. *Chinese Physics Letters*, 2006, **55**(12): 6435-6440.
- [9] 姚远, 赵晓鹏, 赵晶, 等. 非对称开口六边形谐振单环的微波透射特性[J]. *物理学报*, 2006, **55**(12): 6435-6440.
- [9] PENDRY J B, HOLDEN H J, ROBBINS D J, *et al.* Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1999, **47**(11): 2075-2084.
- [10] DOLLING G, ENKRICH C, WEGENER M, *et al.* Low-loss negative-index metamaterial at telecommunication wavelengths[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(12):1800-1802.
- [11] GARCÍA-MECA C, ORTUÑO R, SALVADOR R, *et al.* Low-loss single-layer metamaterial with negative index of refraction at visible wavelengths[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(15): 9320-9325.
- [12] CHETTIAR U K, KILDISHEV A V, YUAN H K, *et al.* Dual-band negative index metamaterial: double negative at 813 nm and single negative at 772 nm[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(10): 1671-1673.
- [13] LÜ Jun, LIU Yu, ZHAO Xiao-peng. Fabrication of infrared left-handed metamaterials on the flexible film using electrochemical deposition and their optical properties [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2010, **31**(7):1158-1162.
- [13] 吕军, 刘宇, 赵晓鹏. 柔性基底红外波段左手材料制备及光学特性[J]. *光子学报*, 2010, **31**(7): 1158-1162.
- [14] YEN T J, PADILLA W J, FANG N, *et al.* Terahertz magnetic response from artificial materials [J]. *Science*. 2004, **303**: 1494-1496.
- [15] ZHANG Dong-ke, ZHANG Ye-wen, HAO Li, *et al.* Experimental verification of the characteristic of one-dimensional metamaterials by use of lumped-elements L-C [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2005, **54**(2): 768-772.
- [15] 张东科, 张冶文, 赫丽, 等. 利用集总 L-C 元件构造的一维 metamaterials 特性的实验研究[J]. *光子学报*, 2005, **54**(2): 768-772.
- [16] SMITH D R, VIER D C, KOSCHNY Th, *et al.* Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials[J]. *Physical Review E*, 2005, **71**(036617): 1-11.