

# 基于折线形手征负折射介质结构的设计与仿真\*

李杰 杨方清 王战 董建峰†

(宁波大学光纤通信与网络技术研究所, 宁波 315211)

(2011年4月24日收到; 2011年5月17日收到修改稿)

分别设计和仿真了一种新型的工作在微波段和光波段的折线形手征介质结构. 利用仿真得到的透射系数和反射系数反演计算了该结构的旋光角、椭圆度、相对介电常数、相对磁导率、手征参数以及折射率等参数. 结果表明该结构在这两种波段下都显示出极大的旋光角和椭圆度, 且因具有大的手征参数, 而不再需要介电常数和磁导率同时为负就可实现左旋圆极化波(LCP)和右旋圆极化波(RCP)的负折射率.

**关键词:** 手征介质, 旋光角, 椭圆度, 负折射率

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs, 42.25.Ja, 78.20.Ek

## 1. 引言

负折射介质因具有反常 Cerenkov 辐射效应、逆 Doppler 效应及负折射现象等诸多新颖的特性<sup>[1]</sup>, 成为近年来科学研究领域的一大热点. 目前通过人工介质实现负折射的方法主要有 Smith 等<sup>[2,3]</sup>提出的双负方法、Caloz 等<sup>[4]</sup>和 Eleftheriades 等<sup>[5]</sup>提出的传输线方法以及 Cubukcu 等<sup>[6]</sup>和 Parimi 等<sup>[7]</sup>提出的光子晶体方法. 和上述方法不同, 最近 Tretyakov 等<sup>[8]</sup>和 Pendry<sup>[9]</sup>提出了通过手征性来实现负折射的新方法.

手征性是指物体经过平移、旋转等任意空间操作均不能与其镜像完全重合的特性, 它是分子产生旋光性的必要条件, 而具有光学活性则是手征介质最主要的特性之一. 手征结构中光学活性的产生主要是表面等离子体共振的结果, 它主要体现在旋光度和椭圆度上, 旋光度指的是出射波偏振面相对于入射波在单位长度下的旋转角度, 椭圆度则表征了出射波相对于入射波偏振状态的改变程度. 如果手征介质具有大的手征参数, 则理论上可以实现负折射率<sup>[10,11]</sup>.

与用双负方法实现负折射率相比, 利用手征介质实现负折射率有很大的不同. 首先, 手征介质不

需要同时存在负的介电常数和负的磁导率就可实现负折射率, 而双负介质必须满足这两个条件. 其次, 手征介质对圆偏振波存在负折射率, 而双负介质则对线偏振波存在负折射率.

近年来, 许多研究人员提出了一些微波段和光波段的手征介质结构, 如“十字”形结构<sup>[10,12]</sup>、“旋转玫瑰”形结构<sup>[11,13,14]</sup>以及“U”形结构<sup>[15-17]</sup>等, 这些结构都具有较强的旋光性和较大的负折射率. 同时, 董建峰等<sup>[18,19]</sup>也对平面手征结构和手征负折射的近期研究进展进行了总结. 本文设计和仿真了一种新型的工作在微波段和光波段的折线形手征介质结构, 该结构与前面文献的结果相比具有更强的旋光性和较大的负折射率, 且结构较为简单, 易于制作, 在新型材料器件中具有潜在的应用价值<sup>[20-24]</sup>.

## 2. 手征负折射理论及反演方法

在双各向同性介质中除了通常的介电常数和磁导率之外, 还有两个表示电场和磁场交叉耦合的参数. 而手征介质中电场和磁场的交叉耦合是互易的, 因此交叉耦合只要一个参数  $\kappa$  描述即可. 各向同性手征介质中的本构关系为 (时间因子为  $\exp(j\omega t)$ )

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61078060)、浙江省自然科学基金 (批准号: Y1091139)、宁波市工业攻关 (批准号: 2008B10042)、宁波市科技创新团队 (批准号: 2009B21007) 和宁波大学王宽诚幸福基金资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: dongjianfeng@nbu.edu.cn

$$D = \varepsilon\varepsilon_0 E - j\kappa \sqrt{\mu_0\varepsilon_0} H,$$

$$B = \mu\mu_0 H + j\kappa \sqrt{\mu_0\varepsilon_0} E, \quad (1)$$

其中  $\kappa$  为介质的手征参数,  $\varepsilon$  和  $\mu$  分别为手征介质的相对介电常数和相对磁导率,  $\varepsilon_0$  和  $\mu_0$  分别为真空的介电常数和磁导率. 在手征介质中存在右旋圆极化波(RCP, +)和左旋圆极化波(LCP, -)两个本征波, 手征介质中的电磁场可以表示为

$$E = E_+ + E_-,$$

$$H = H_+ + H_-,$$

$$H_{\pm} = \pm jE_{\pm} / \eta, \quad (2)$$

其中  $\eta = \sqrt{\mu\mu_0/\varepsilon\varepsilon_0}$  为手征介质中的波阻抗. 根据 Maxwell 方程和本构关系可以推出手征介质中电场  $E_{\pm}$  的波动方程

$$(\nabla^2 + k_{\pm}^2)E_{\pm} = 0, \quad (3)$$

其中  $k_{\pm} = n_{\pm}k_0$ ,  $n_{\pm}$  为手征介质中对应于右(+)、左(-)旋圆极化本征波的有效折射率

$$n_{\pm} = n \pm \kappa, \quad (4)$$

其中  $n = \sqrt{\varepsilon\mu}$ . 由(4)式可以看出, 当满足条件  $n < |\kappa|$  时手征介质中的左旋圆极化波或右旋圆极化波就可以实现负折射率. 因此利用手征介质来实现负折射率, 介电常数和磁导率不必同时为负值.

而利用模拟计算得到的透射系数和反射系数  $T_{++}, T_{--}$  和  $R$ , 可以反演得到手征介质的波阻抗  $z$  和折射率  $n_{\pm}^{[11]}$

$$z = \sqrt{\frac{(1+R)^2 - T_{++}T_{--}}{(1-R)^2 - T_{++}T_{--}}}, \quad (5)$$

$$n_{\pm} = \frac{-j \ln \left[ \frac{1}{T_{\pm}} \left( 1 - \frac{z-1}{z+1} R \right) \right]}{k_0 d}. \quad (6)$$

这里  $k_0$  为真空中的波数,  $d$  为结构的厚度. 对于手征结构中的手征参数、相对磁导率和相对介电常数可以由以上几个量表示出来:

$$\kappa = (n_+ - n_-)/2,$$

$$\mu = z(n_+ + n_-)/2,$$

$$\varepsilon = (n_+ + n_-)/2z. \quad (7)$$

### 3. 微波段手征负折射介质结构的设计与仿真分析

设计的手征结构为周期性结构, 每个单元结构如图 1 所示, 它是由分布在基板两侧且每侧结构由 4 个依次旋转  $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  和  $270^\circ$  的折线形铜片 ( $\sigma = 5.8 \times 10^7$  S/m) 构成, Cu 在微波段下具有较小的

损耗. 底层的每条折线相对于顶层结构翻转  $180^\circ$ , 该结构具有四重对称特性, 因此对于垂直入射波无线性双折射. 其具体结构参数如下: 折线形边长  $a = 4.5$  mm, 线宽  $w = 0.8$  mm, 两折线之间的间距  $d = 0.7$  mm, 铜片厚度为 0.03 mm, 折线角度  $\varphi = 135^\circ$ . 将该折线形结构印制在厚度  $t = 1.6$  mm 的 FR-4 基板两侧, 周期  $L = 18$  mm, 基板的介电常数  $\varepsilon_r = 4$ , 介质损耗为 0.025<sup>[17]</sup>. 对该周期结构采用频域有限元方法模拟计算, 平面波沿着  $-z$  方向垂直入射到手征结构表面, 在垂直于  $z$  的方向上采用周期性边界条件. 由于该结构在平面上缺乏镜像对称性, 因此具有手征性.

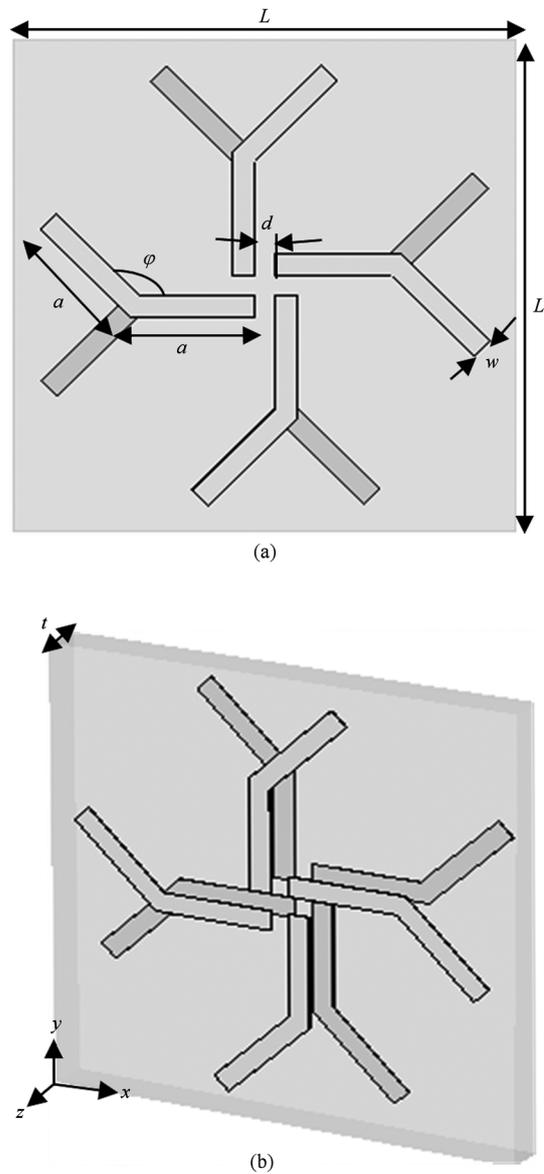


图 1 微波段折线形手征负折射结构示意图

首先我们给出了该结构的透射谱、圆二色性谱、椭圆度和旋光角曲线,如图 2 所示. 从图 2(a) 中可以发现该结构存在两个明显的谐振频率,分别是 8.7 GHz 和 10.7 GHz,且在较低谐振频率处左旋圆极化波透射谱( $T_{--}$ )峰值强于右旋圆极化波透射谱( $T_{++}$ ),两者最大相差约 7 dB,而在另一谐振点处 RCP( $T_{++}$ )峰值强于 LCP( $T_{--}$ ),两者最大相差 4dB. 这显示了该结构在这两个谐振点处具有良好的圆二色性( $\Delta = |T_{++}| - |T_{--}|$ ,如图 2(a)中小图),因此可以预测该结构具有很好的光学特性. 利用椭圆度  $\eta = \frac{1}{2} \arcsin\left(\frac{|T_{++}|^2 - |T_{--}|^2}{|T_{++}|^2 + |T_{--}|^2}\right)$  及旋光角  $\theta = \frac{1}{2} [\arg(T_{++}) - \arg(T_{--})]$ , 我们进一步研究了该手征结构的光学性能. 从图 2(b) 中看出,在两个谐振频率处其椭圆度(图中虚线)达到了最大值( $22^\circ$ 和 $-13^\circ$ ). 而图 2(b)中大的旋光角(图中实线)表明了该结构对入射波的极化响应非常明显,其最大旋光角分别达到了 $110^\circ$ 和 $-101^\circ$ ,这一结果与文献[11]和[17]设计的微波段结构相比其旋光角得到很大提高,因此该结构具有更好的光学性能. 特别地,当  $\eta = 0^\circ$  时对应着完全的旋光性,即对入射的线极化波其出射波仍为线极化波,但发生了一定角度的旋转,从图中我们看到此时的旋光角  $\theta$  约为  $31^\circ$ ,其值为文献[11]所设计结构值的 4 倍.

利用前面的反演公式(5)–(7),图 3 给出了该手征结构的手征参数  $\kappa$ 、右旋 RCP(左旋 LCP)圆极化波折射率  $n_+$  ( $n_-$ ) 以及传统定义的折射率  $n$  的曲线. 从图 3(a) 中可以看出,在两共振频率附近结构具有很大的手征参数,其最大值分别达到 6 和  $-4.2$ ,并且此时  $n < |\kappa|$ ,从而使得 LCP( $n_-$ ) 在 8.7–9.4 GHz 频段和 RCP( $n_+$ ) 在 10.7–12 GHz 频段实现了负折射率,它们的最大负折射率分别达到了  $-7.3$  和  $-6.3$ . 为了证明该负折射率是由大的手征参数引起的,而非介电常数和磁导率同时为负造成的,我们计算了该结构的相对介电常数和相对磁导率(图 3(b)). 图中显示在整个频段内其相对磁导率基本都为正值,而相对介电常数在谐振点附近为负值,而此时在谐振点附近左旋圆极化波或右旋圆极化波实现了负折射率. 这说明利用手征介质来实现负折射率,其介电常数和磁导率不必都为负值,与我们之前的理论假设相对应. 这与用双负方法<sup>[2,3]</sup>实现负折射率有着本质的区别,因为手征介

质只需足够大的手征参数,就可实现 RCP 或 LCP 的负折射率.

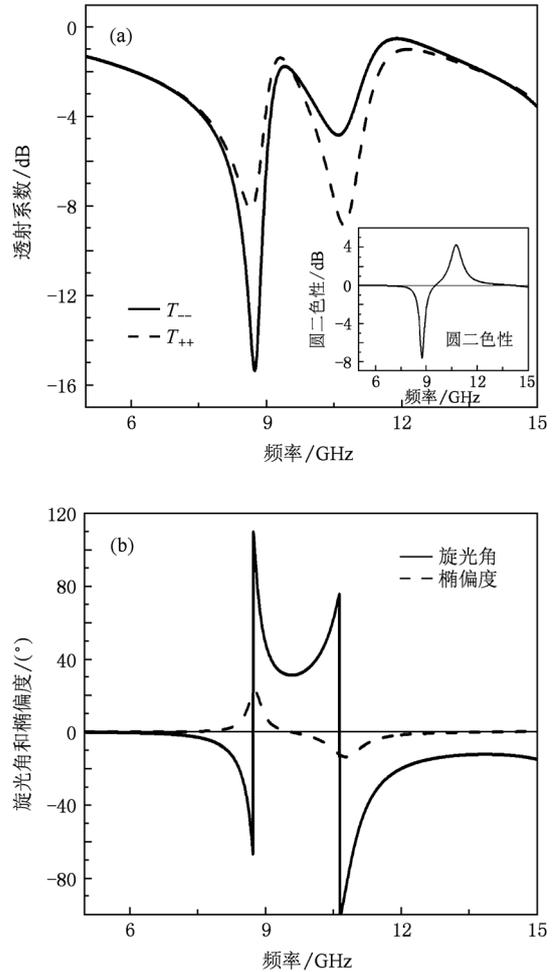


图 2 微波段手征负折射结构的透射谱(a)和圆二色性谱(图(a)中的小图)以及旋光角和椭圆度(b)

为了进一步了解该手征结构的谐振机理,我们研究了该结构的表面电流分布情况(如图 4). 图中实线表示第一层金属中的电流方向,虚线表示第二层金属中的电流方向. 图 4(a) 显示当谐振频率为 8.7 GHz 时,对应的上下两层电流流动方向一致,使得结构表现出类似电偶极子的特征,从而产生电谐振. 而在图 4(b) 中,当谐振频率为 10.7 GHz 时,上下两层的电流流动方向相反,使得结构表现出类似磁偶极子的特征,产生磁谐振. 这种不同的谐振形式导致了 LCP 和 RCP 出现透射谱吸收峰的峰值不同,从而使得该结构具有旋光性. 折线形手征结构的这一作用机制与之前的“十字”形结构<sup>[10]</sup>和“U”形结构<sup>[16,17]</sup>等相类似.

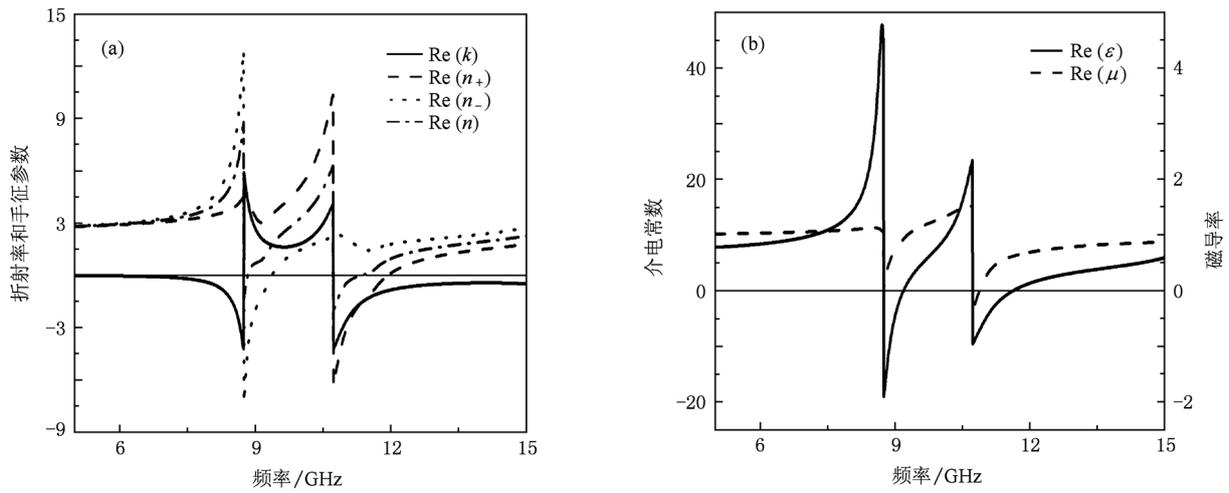


图3 微波段手征负折射结构的折射率和手征参数(a)以及相对介电常数和相对磁导率(b)

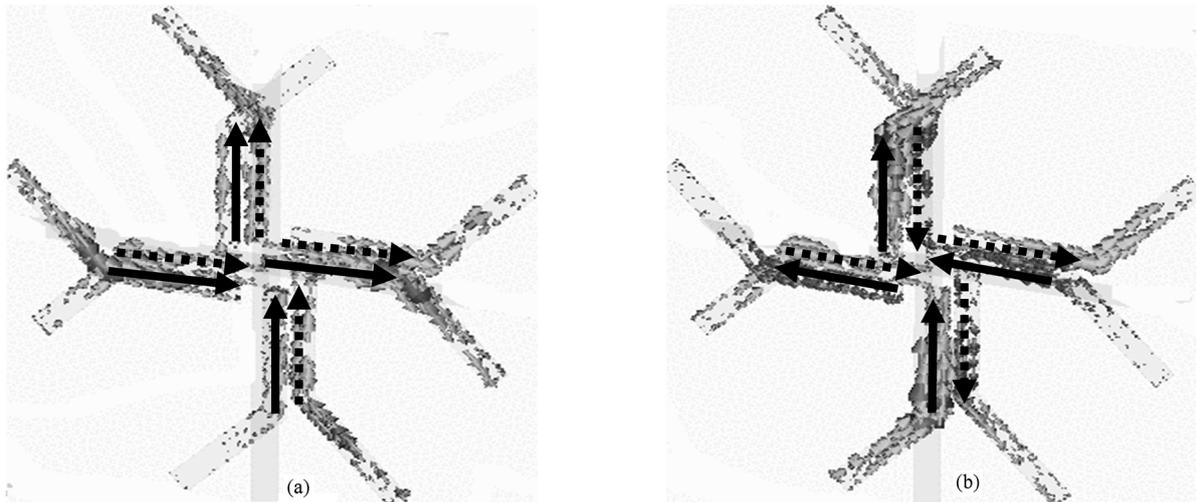


图4 微波段手征结构在(a) $f=8.7$  GHz和(b) $f=10.7$  GHz处的表面电流分布示意图

#### 4. 光波段手征负折射介质结构的设计与仿真分析

图5给出了我们设计的光波段手征负折射介质单元结构示意图,它与图1不同之处在于其金属结构厚度与介质层的厚度相当,且上下两层结构发生了对调.其具体参数如下:晶格周期 $L=600$  nm,折线形边长 $a=150$  nm,边宽 $w=100$  nm,两折线之间的间距 $d=50$  nm,角度 $\varphi=135^\circ$ ,金属结构和介质层的厚度都为 $t=40$  nm.金属采用低损耗的银,银的介电常数随频率的变化关系采用色散Drude模型,其

等离子频率为 $\omega_p=2\pi\times 2175$  THz,电子碰撞频率为 $\omega_c=2\pi\times 4.35$  THz<sup>[12]</sup>,利用频域有限元方法模拟计算.介质层采用的是氟化镁( $\text{MgF}_2$ ,折射率 $n=1.38$ ),它具有较小的介质损耗,且有效的透过范围覆盖红外波段.平面入射波沿 $-z$ 方向垂直入射到手征介质结构表面,在垂直于波传播方向上采用了周期性边界条件.

与上面微波段的分析一样,我们首先给出了该结构的透射谱线,如图6(a).从图中可以看到手征结构在272 THz和313 THz处透射谱存在着明显的谐振,且在272 THz谐振处的LCP( $T_{--}$ )与RCP( $T_{++}$ )的峰值差达7 dB以上,而在313 THz谐振处RCP与LCP的峰值差为9 dB以上,表明在这两个

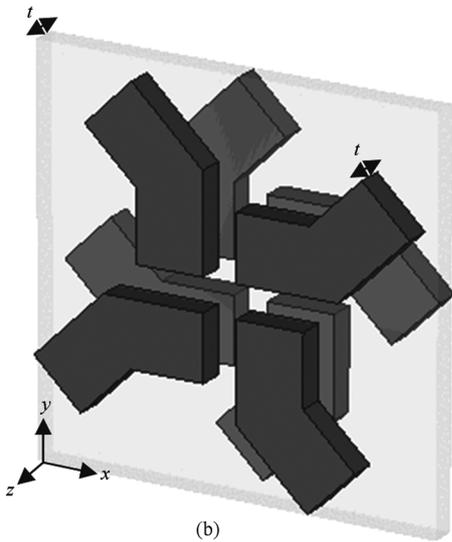
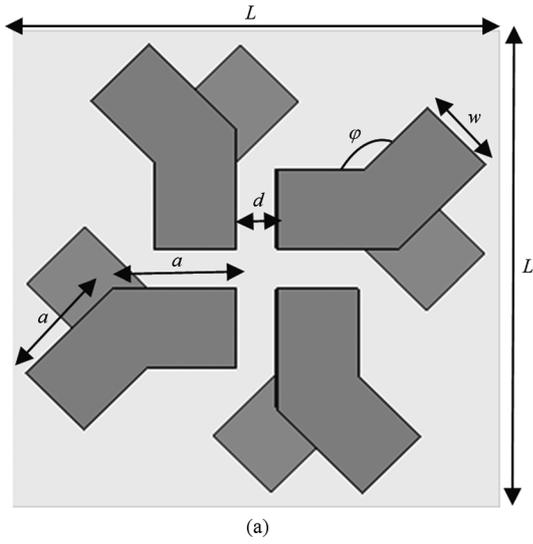


图5 光波段折线形手征负折射结构示意图

频率区域附近,结构具有大的圆二色性(图6(a)中的小图).良好的圆二色性表明该结构具有良好的光学特性,结构的椭偏度和旋光角曲线同样证明了这一点(图6(b)).其中椭偏度(图中虚线)在272 THz处达到了 $21.7^\circ$ ,在313 THz处达到了 $-24.9^\circ$ ,而旋光角(图中实线)在这两个谐振频率附近也都达到了最大值.且在 $\eta=0^\circ$ 处,其旋光角达到了 $15^\circ$ ,这一结果与之前报道的光波段手征结构<sup>[12,14]</sup>相比有了很大的提高.

从我们反演计算得到的手征参数图谱上(图7(a)中的实线)可以看到 $\kappa$ 在谐振频率附近分别为1.8和-2.1,且折射率 $n$ 在整个频段内都为正值.由前面的手征负折射理论可知,若LCP产生负折射

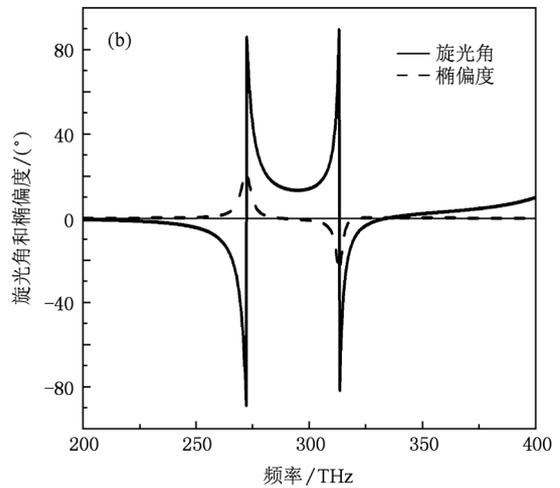
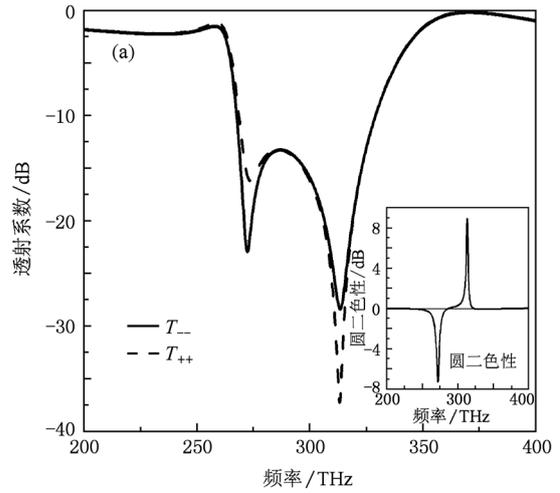


图6 光波段手征负折射结构的透射谱(a)和圆二色性谱(图(a)中的小图)以及旋光角和椭偏度(b)

率则只需 $n < \kappa$  ( $\kappa$ 为正值),而RCP产生负折射率则需 $n < |\kappa|$  ( $\kappa$ 为负值).而图7(a)显示此时 $n_-$ 和 $n_+$ 分别在272—280 THz和313—317 THz频段内实现了负折射率,负折射率的值最大可达到-1.2和-2.1,且图中的各项值满足之前的负折射理论假设.图7(b)给出了这一结构的相对介电常数和相对磁导率曲线.对比透射谱的峰值我们发现,结构在272 THz处相对磁导率发生共振,证明此处的透射谱吸收峰是由磁共振引起;而在313 THz处相对介电常数有明显共振,说明透射谱线中造成该处吸收峰的主要原因是发生电共振.我们还发现在两个共振频率处相对介电常数和相对磁导率并不同时为负值,进一步说明了利用手征方法实现负折射与用双负方法是不同的.

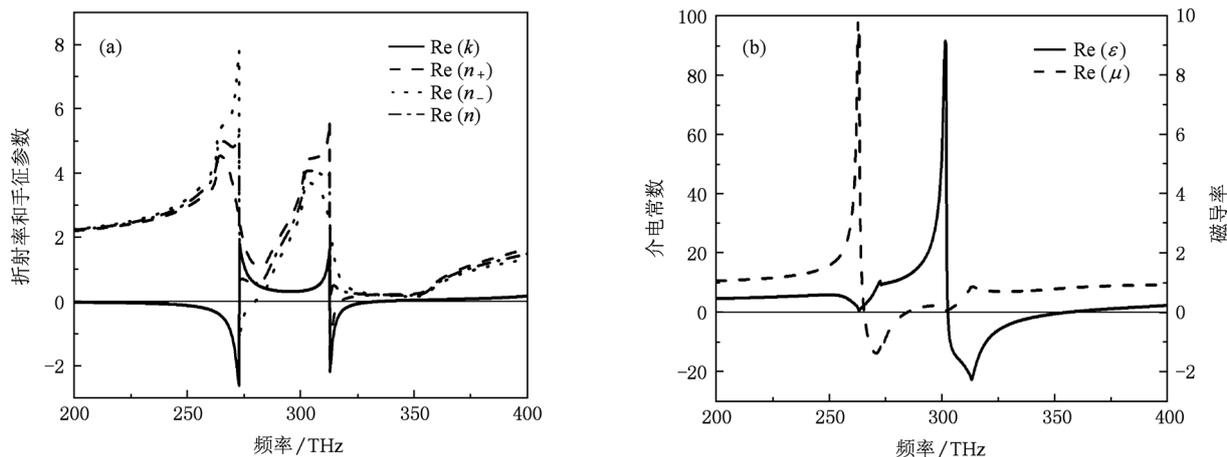


图7 光波段手征负折射结构的折射率和手征参数(a)以及相对介电常数和相对磁导率(b)

## 5. 结 论

1. 微波段折线形手征负折射结构在 8.7 GHz 和 10.7 GHz 附近具有很大的旋光角和椭圆偏度,且在 8.7—9.4 GHz 和 10.7—12 GHz 频段内分别产生了左旋圆极化波(LCP)和右旋圆极化波(RCP)的负折射率.

2. 光波段折线形手征负折射结构在 272 THz 和 313 THz 附近具有很大的旋光角和椭圆偏度,并在 272—280 THz 和 313—317 THz 频段内分别实现了 LCP 和 RCP 的负折射率.

3. 利用手征介质实现负折射率,其介电常数和磁导率不必都为负值,只要手征参数足够大,就可

实现负折射率.

由于该手征负折射结构的几何图形简单,易于加工(如微波段手征结构可利用 PCB 制作,光波段结构可利用电子束光刻技术(EBL)来制作).且该结构具有良好的光学性能,特别地,在  $\eta = 0^\circ$  时其旋光角在微波段和光波段分别达到了  $31^\circ$  和  $15^\circ$ ,这一结果与文献[11,12,14]相比有明显的提高,因此在新型的光功能材料及光子器件等方面具有潜在的应用价值,如极大旋光性的手征介质可应用于集成纳米尺度光子器件中来控制光的偏振态,制作偏振元器件如完全线偏振旋转器、半波片等.同时因存在负折射率,因此在高指向性天线、电磁波隐形、吸收器等方面也具有广阔的潜在应用前景.

- [1] Veselago V G 1968 *Sov. Phys. Usp.* **10** 509
- [2] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [3] Shelby R A, Smith D R, Schultz S 2001 *Science* **292** 77
- [4] Caloz C, Itoh T 2002 *IEEE Ante. Prop. Soci. Int. Symp.* **2** 412
- [5] Eleftheriades G V, Iyer A K, Kremer P C 2002 *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.* **50** 2702
- [6] Cubukcu E, Aydin K, Ozbay E, Foteinopoulou S, Soukoulis C M 2003 *Nature* **423** 604
- [7] Parimi P V, Lu W T, Vodo P, Srinivas S 2003 *Nature* **426** 404
- [8] Tretyakov S, Nefedov I, Sihvola A, Maslovski S, Simovski C 2003 *J. Electromag. Wave Appl.* **17** 695
- [9] Pendry J B 2004 *Science* **306** 1353
- [10] Zhou J, Dong J, Wang B, Koschny T, Kafesaki M, Soukoulis C M 2009 *Phys. Rev. B* **79** 121104(R)
- [11] Plum E, Zhou J, Dong J, Fedotov V A, Koschny T, Soukoulis C M, Zheludev N I 2009 *Phys. Rev. B* **79** 035407
- [12] Dong J, Zhou J, Koschny T, Soukoulis C M 2009 *Opt. Express* **17** 14172
- [13] Rogacheva A V, Fedotov V A, Schwanecke A S, Zheludev N I 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 177401
- [14] Plum E, Fedotov V A, Schwanecke A S, Zheludev N I, Chen Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 223113
- [15] Decker M, Zhao R, Soukoulis C M, Linden S, Wegener M 2010 *Opt. Lett.* **35** 1593
- [16] Xiong X, Sun W, Bao Y, Wang M, Peng R, Sun C, Lu X, Shao J, Li Z, Ming N 2010 *Phys. Rev. B* **81** 075119
- [17] Li Z, Zhao R, Koschny T, Kafesaki M, Alici K B, Colak E, Caglayan H, Ozbay E, Soukoulis C M 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 081901

- [18] Dong J F, Xu C, Xu J 2009 *Mater. Rev.* **23** 84 (in Chinese) [董建峰、徐超、徐键 2009 材料导报 **23** 84]
- [19] Dong J F, Xu C, Xu J 2009 *Chin. J. Quant. Electr.* **26** 385 (in Chinese) [董建峰、徐超、徐键 2009 量子电子学报 **26** 385]
- [20] Tang M C, Xiao S Q, Guan J, Bai Y Y, Gao S S, Wang B Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 074214
- [21] Bao S, Luo C R, Zhao X P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 014101 (in Chinese) [保石、罗春荣、赵晓鹏 2011 物理学报 **60** 014101]
- [22] Ma H, Qu S B, Xu Z, Zhang J Q, Wang J F 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1025
- [23] Wen R M, Li L Y, Han K W, Sun X W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4607 (in Chinese) [闻孺铭、李凌云、韩克武、孙晓玮 2010 物理学报 **59** 4607]
- [24] Zhang Y P, Zhao X P, Bao S, Luo C R 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6078 (in Chinese) [张燕萍、赵晓鹏、保石、罗春荣 2010 物理学报 **59** 6078]

## Design and simulation of chiral negative refractive structure based on folded-wire<sup>\*</sup>

Li Jie Yang Fang-Qing Wang Zhan Dong Jian-Feng<sup>†</sup>

(Institute of Optical Fiber Communication and Network Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

(Received 24 April 2011; revised manuscript received 17 May 2011)

### Abstract

A new chiral structure working in microwave and optical frequency bands based on folded-wire is designed and simulated. Effective parameters of this structure, including polarization azimuth rotation angle, ellipticity angle, relative permittivity, relative permeability, chiral parameter and refractive index are obtained from simulated transmission and reflection spectra. The results show that the exceptionally strong polarization azimuth rotation angle and the ellipticity angle are found in microwave and optical frequency bands. Because this structure has a large chiral parameter, negative refractive index of a circularly polarized wave can be obtained without requiring permittivity and permeability to be negative simultaneously.

**Keywords:** chiral media, polarization azimuth rotation angle, ellipticity angle, negative refraction index

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs, 42.25.Ja, 78.20.Ek

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61078060), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. Y1091139), the Key Industrial Program of Ningbo, China (Grant No. 2008B10042), the Innovative Research Team Program of Ningbo, China (Grant No. 2009B21007) and the K. C. Wong Magna Fund in Ningbo University, China.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: dongjianfeng@nbu.edu.cn