

双层金属线平面手征结构的强旋光性和负折射率研究*

李杰 杨方清 董建峰[†]

(宁波大学光纤通信与网络技术研究所, 宁波 315211)

(2011年1月12日收到; 2011年7月5日收到修改稿)

提出一种由四重对称的金属线构成的双层平面手征结构, 并对两层金属线之间旋转角 θ 和介质层厚度 h 进行了优化. 数值模拟结果显示, 在一定的 θ 和 h 下, 该结构在近红外波段具有极强的旋光性和大的手征参数, 且在一定的波段范围内具有负折射率.

关键词: 手征介质, 旋光性, 手征参数, 负折射率

PACS: 42.25.Bs, 78.20.Ek

1. 引言

手征结构缺乏镜像对称性, 因此具有很好的光学活性, 即电磁波经过手征介质后产生了旋光性. 自然界中手征介质的旋光性由具有内在螺旋特性的分子引起或由原子分子的螺旋排列引起, 其旋光性的根源是圆双折射, 强度一般很弱. 而对于人工手征介质, 旋光性不是由分子手征性引起而是由结构手征性引起, 因此其旋光性的根源是结构手征引起的光学空间色散, 与自然介质相比, 人工手征介质具有更大的旋光性和手征参数. 手征介质中传播的电磁波存在右旋圆极化 (RCP) 和左旋圆极化 (LCP) 两个本征波, 且这两个本征波的折射率是不同的, 在介质谐振频率附近手征参数变大, 而大的手征参数为实现手征介质的负折射率提供了可能^[1-4].

Svirko 等^[5]在 2001 年首先研究了双层平面手征金属微结构的耦合, 从理论上预言了双层结构的强旋光性. Kwon 等^[6]对工作波长在近红外的希腊十字形手征结构进行了模拟计算, 得到了最大为

90°的旋光角, 随后又设计了在近红外波段具有负折射率的网状结构^[7], 而徐超等^[8]依据上述结构提出了三层手征网格结构, 模拟结果显示该结构在可见光波段具有强的旋光性. 最近, 一些新的具有强旋光性和负折射率的双层手征结构被提出, 如双层玫瑰结构^[3,9,10]、十字形结构^[4,11]、U 形结构^[12-14]、L 形结构^[15]以及扭转金属片结构^[16]等, 在实验上也验证了双层平面手征结构可以得到强旋光性和圆极化波的负折射率^[3,4,14]. 董建峰等^[17,18]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.

本文设计了在近红外波段具有极强旋光性和负折射率的平面手征结构, 其基本单元结构通过旋转两层金属线使得原本四重对称的结构产生手征性. 对其旋转角和介质层厚度两项关键参数进行了优化, 利用模拟结果得到的透射系数和反射系数, 反演计算了结构的圆二色性、旋光角、手征参数、相对磁导率、相对介电常数和折射率等. 结果表明, 该结构在近红外波段具有极强的旋光性和大的手征参数, 并能够实现负折射率. 由于该结构较为简单, 为以后的实验验证提供了便利.

* 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)、宁波市科技创新团队计划 (批准号: 2009B21007)、宁波市工业攻关计划 (批准号: 2008B10042) 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

2. 结构描述和模拟方法

设计的平面手征结构为周期性结构,每个单元结构如图 1 所示. 它是由分布在介质层两面的金属线构成,底层由四条依次旋转 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° 的金属线按一定的位置排列,顶层的每条金属线对应于底层金属线顺时针旋转 θ 的角度,如图 1 所示. 具体结构参数如下:周期 $L = 800 \text{ nm}$,金属线的长度 $a = 300 \text{ nm}$,宽度 $w = 100 \text{ nm}$,厚度 $t = 50 \text{ nm}$,介质层的厚度 $h = 40 \text{ nm}$. 其中金属层为 Au,介质层采用的是 MgF_2 (折射率 $n = 1.38$). 对周期结构采用频域有限元方法进行模拟计算. 模拟计算时, Au 用 Drude

模型 ($\omega_p = 2\pi \times 2081 \text{ THz}, \omega_c = 2\pi \times 35 \text{ THz}$) 近似,平面波垂直于结构表面入射,垂直于波的传播方向上采用周期性边界条件.

圆二色性表征了 RCP 波与 LCP 波之间的透射谱差异, $\Delta = |T_{++}| - |T_{--}|$, Δ 的值越大表明结构的光学活性越好. 而旋光角 $\varphi = \frac{[\arg(T_{--}) - \arg(T_{++})]}{2}$ 的大小进一步表明了结构光学活性的优劣,这里 T_{++} 和 T_{--} 分别表示 RCP 波和 LCP 波传播时介质的透射系数. 利用得到的透射系数和反射系数,反演计算结构的手征参数 κ 、相对磁导率 μ 、相对介电常数 ϵ 及折射率 n 等,通过这些参数的对比来获得最优的结果.

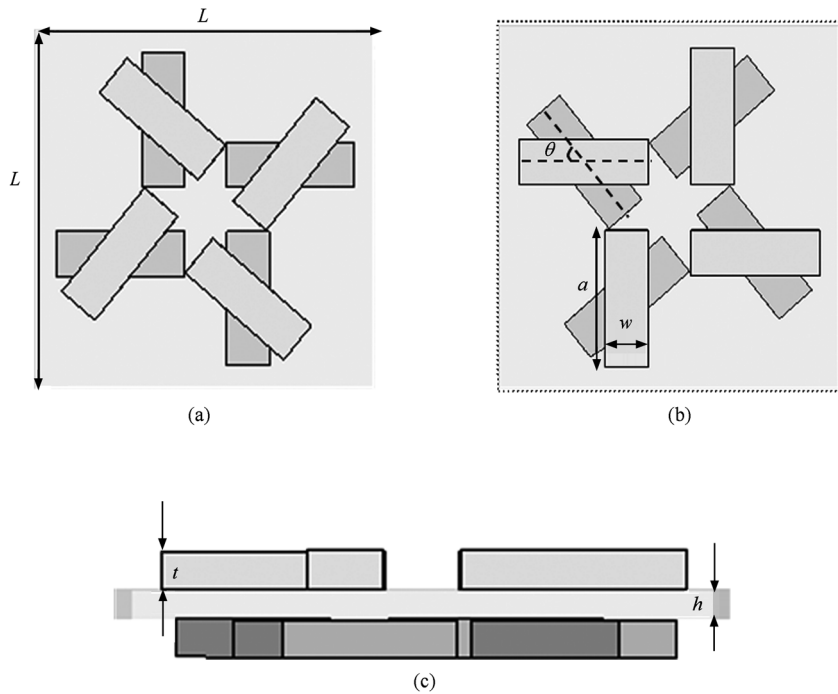


图 1 双层金属线平面手征结构示意图 (a) 正视图, (b) 背视图, (c) 仰视图

3. 模拟计算和分析

3.1. 不同旋转角的分析

图 2 给出了金属线分别旋转 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ 和 150° 后 LCP 波和 RCP 波传播时的透射谱. 从图 2 (a) 可以看出:对于 LCP 波,当旋转角 θ 在 $0^\circ-60^\circ$ 之间时存在两个谐振点,且随 θ 的增大,较短波长处谐振点逐渐消失. 对于较长波长处谐振

点,随着 θ 的增加谐振峰值不断地增加,且谐振波长从 $1.4 \mu\text{m}$ 向 $1.1 \mu\text{m}$ 移动,当 $\theta > 90^\circ$ 时,谐振波长基本维持在 $1.1 \mu\text{m}$ 左右. 从图 2 (b) 可以看出:对于 RCP 波,当 θ 为 $30^\circ-90^\circ$ 之间时透射曲线只存在一个谐振点,其谐振波长在 $1.1 \mu\text{m}$ 附近. 而当 $\theta > 90^\circ$ 时存在着两个谐振点,较短波长处谐振点在 $1.1 \mu\text{m}$ 附近,较长波长处谐振点随 θ 的增加其谐振峰值不断减小,且谐振波长从 $1.1 \mu\text{m}$ 移向 $1.4 \mu\text{m}$. 从以上分析可知,LCP 波的透射谱与 RCP 波的透射谱谐振情况刚好相反.

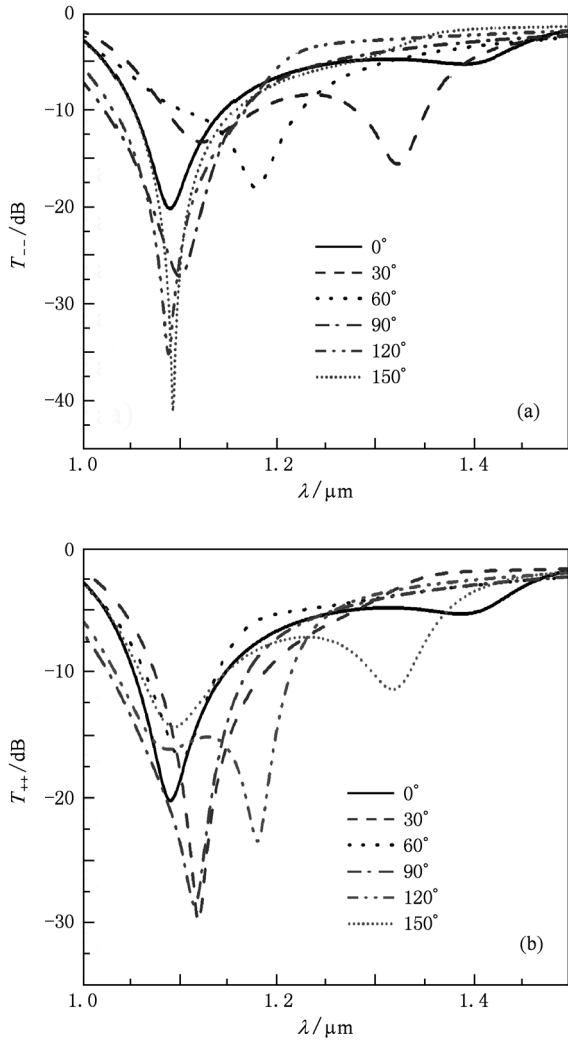


图2 不同旋转角 θ 下 LCP 波和 RCP 波传播时的透射谱 (a) LCP 波, (b) RCP 波

平面手征结构的光学活性主要体现在结构的圆二色性和旋光角 φ 上,其中圆二色性表征的是手征介质中传播的 RCP 波与 LCP 波透射谱之间的差异,而旋光角 φ 则指手征介质对入射光偏振面的旋转能力,它们产生的机理是由于双层平面手征金属微结构之间的电磁耦合^[5,9]. 图 3(a) 给出了该结构旋转不同角度后的圆二色性谱. 从图 3(a) 可以看出:当 $\theta = 0^\circ$ 时,圆二色性值 $\Delta = 0$ dB,因为此时该结构不具有手征性;而当 $\theta \neq 0^\circ$ 时,该结构表现出很好的圆二色性; θ 为 $90^\circ-180^\circ$ 和 $0^\circ-90^\circ$ 时的圆二色性谱具有对称性. 这与上述对透射谱的分析相符合. 图 3(b) 所示的旋光角曲线更进一步表明了旋转不同角度后结构光学活性的变化情况. 从图 3(b) 可以看到,旋光角出现跳变点的位置与透射谱出现谐振点的位置相对应,且 $\theta < 90^\circ$ 时,随 θ 的增加旋

光角 φ 呈增大趋势,当 $\theta = 60^\circ$ 时,旋光角 φ 最大达到了 -150° ,这与文献[6,8,11,13,14]所提出的结构相比有了很大的提高. 然而,随着 θ 的增加具有较大旋光角的波段宽度也在减小,因此设计时必须综合考虑. 总体上看,当 $\theta < 90^\circ$ 时比与其互补的角度拥有更大的旋光角.

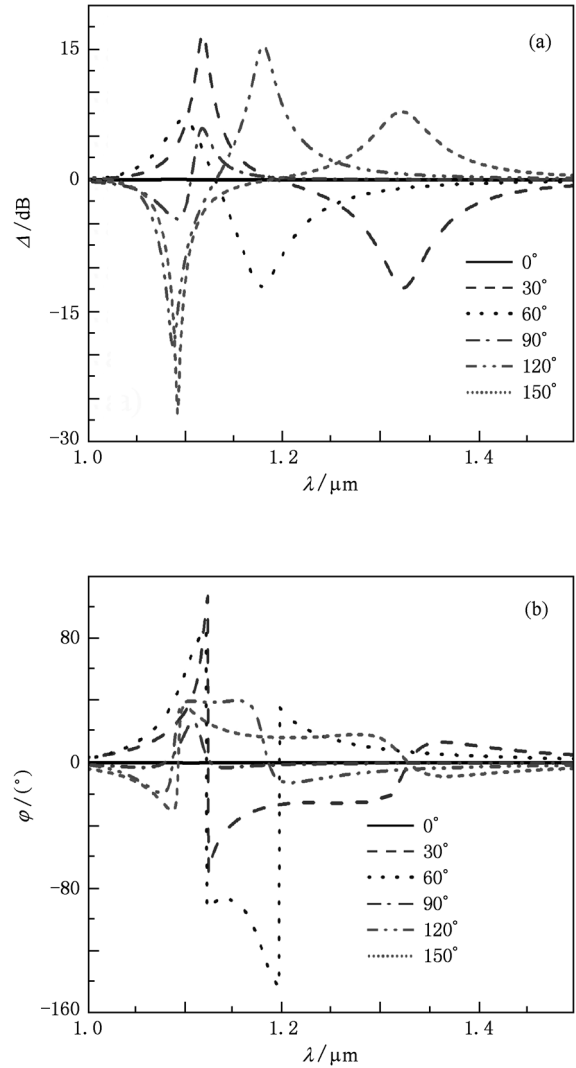


图3 不同旋转角 θ 下的圆二色性谱和旋光角曲线 (a) 圆二色性谱, (b) 旋光角曲线

当 RCP 波和 LCP 波在手征介质中传播时,折射率

$$n_{\pm} = \sqrt{\epsilon\mu \pm \kappa},$$

其中正负号分别表示 RCP 波和 LCP 波. 由此可以看出,只要手征参数的绝对值足够大,就可实现 RCP 波或 LCP 波的负折射. 由模拟计算得出的透射系数 T_{++}, T_{--} 和反射系数 R , 反演得到的介质波阻抗 Z 和折射率 n_{\pm} 可分别表示为^[3]

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

$$n_{\pm} = \frac{-i}{k_0 d} \ln \left[\frac{1}{T_{\pm}} \left(1 - \frac{z-1}{z+1} R \right) \right]. \quad (2)$$

这里 k_0 为真空中的波数, d 为结构的厚度 ($d = 2 \times t + h$). 而手征结构的手征参数、相对磁导率和相对介电常数可由 Z 和 n_{\pm} 表示为

$$\kappa = (n_+ - n_-)/2, \quad (3)$$

$$\mu = Z(n_+ + n_-)/2, \quad (4)$$

$$\varepsilon = (n_+ + n_-)/(2Z). \quad (5)$$

从图 3(b) 可以看出, 当金属线分别旋转 $30^\circ, 60^\circ$ 和 120° 时该手征结构具有较强的旋光性, 且具有各自的特点. 为了更进一步了解该结构的物理特性, 我们给出了 θ 为 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 和 120° 时折射率、手征参数、相对磁导率和相对介电常数随波长 λ 的变化关系. 从图 4(a) 可以看到: 当 $\theta = 0^\circ$ 时, LCP 波与 RCP 波在手征介质中传播时的折射率曲线相一致, 且都为正值, 导致 κ

$= 0$ (图 5(a)), 说明该结构不旋转时缺乏手征性. 而当旋转一定角度后, LCP 和 RCP 波两条折射率曲线不再重合 (图 4(b)–(d)), 其手征参数也具有较大的值 (图 5(b)–(d)). 大的手征参数意味着 LCP 波和 RCP 波可以实现负折射, 图 4(b) 中 RCP 波的折射率曲线在对应图 5(b) 手征参数峰值 A 点处出现了负值, 此时手征参数为负值, 与推论 $n_{\pm} = \sqrt{\varepsilon\mu} + \kappa < 0$ 相一致. 而图 4(c) 中的 RCP 波和 LCP 波在对应图 5(c) 手征参数峰值 B 点和 C 点处分别出现了负折射率, 此时手征参数分别为负值和正值, 与推论 $n_{\pm} = \sqrt{\varepsilon\mu} \pm \kappa < 0$ 相一致. 而当 $\theta = 120^\circ$ 时, 由于手征参数相对较小 (图 5(d)), 未能实现负折射率 (图 4(d)). 我们通过大量的模拟计算后发现, 在旋转角 θ 超过 90° 后, 该结构并没有负折射率产生. 以上分析清晰地表明, 该结构中 RCP 波和 LCP 波出现负折射的根源是具有大的手征参数.

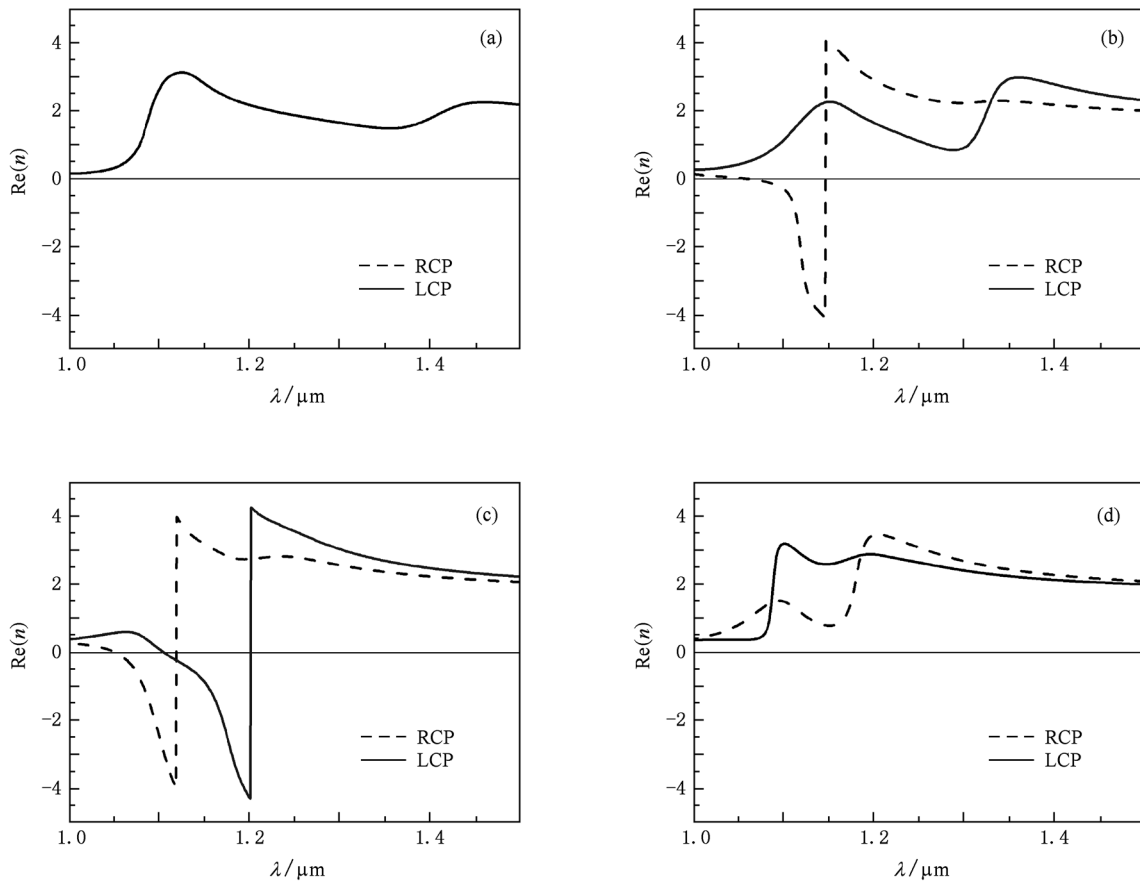


图 4 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 和 120° 时的折射率曲线 (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 30^\circ$, (c) $\theta = 60^\circ$, (d) $\theta = 120^\circ$

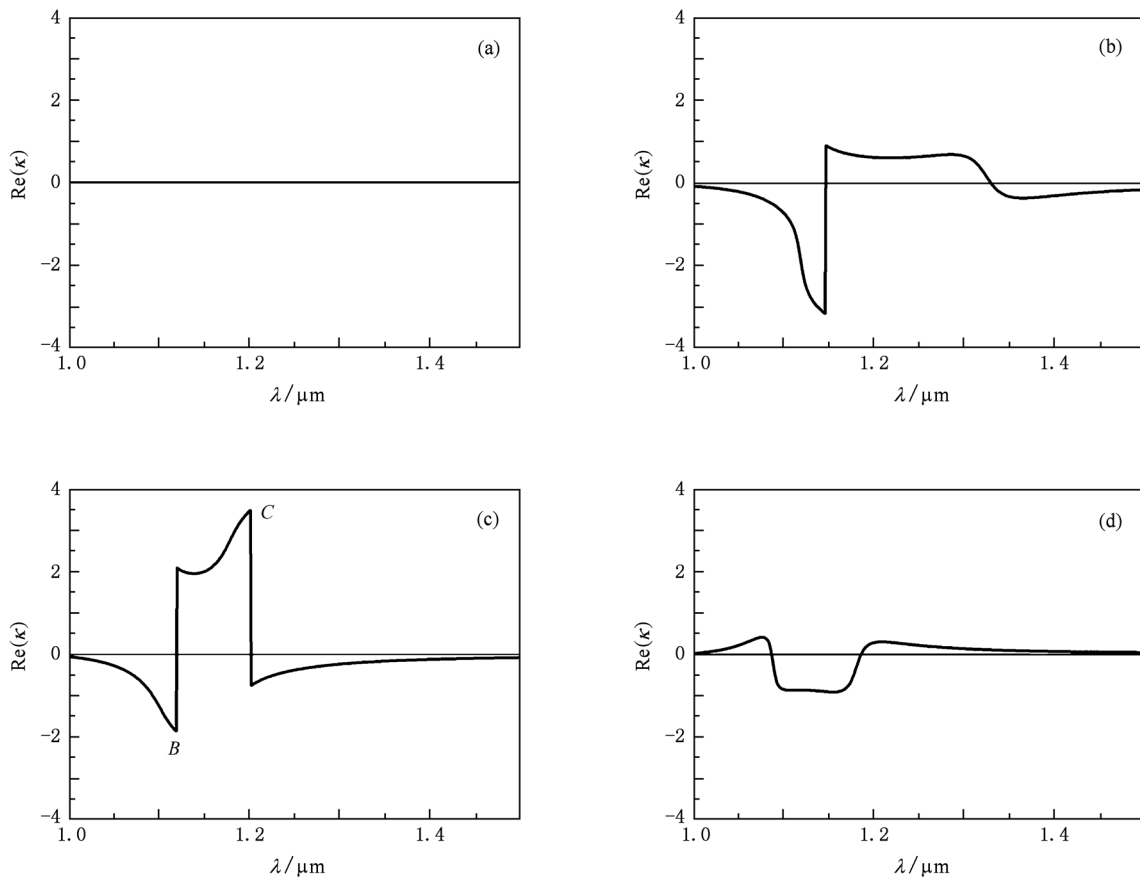


图5 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 和 120° 时的手征参数曲线 (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 30^\circ$, (c) $\theta = 60^\circ$, (d) $\theta = 120^\circ$

图6为反演计算得到的相对磁导率 $\text{Re}(\mu)$ 和相对介电常数 $\text{Re}(\epsilon)$ 曲线. 从图6可以看出, 在RCP波和LCP波发生负折射的峰值点处, $\text{Re}(\epsilon)$ 曲线存在着明显的谐振且为负值(图6(b), (c)), 而 $\text{Re}(\mu)$ 曲线在 $\text{Re}(\epsilon)$ 曲线谐振点处也发生了谐振, 但谐振微弱, 且 $\text{Re}(\mu)$ 的值在整个频段内基本都为正值. 这与用双负方法^[19-23]实现负折射率有着本质的区别, 因为它不再要求 $\text{Re}(\epsilon)$ 和 $\text{Re}(\mu)$ 同时为负, 只要有足够大的手征参数就可实现RCP波和LCP波的负折射.

3.2. 不同介质层厚度的分析

通过以上分析并综合考虑, 当 $\theta = 55^\circ$ 时双层金属线平面手征结构具有较大的旋光角和负折射率, 因此我们选择在这个角度下分析不同介质层厚度 h 对这两个参数的影响. 首先给出 $h = 40, 80, 130, 160, 320$ nm 下的圆二色性谱和旋光角曲线. 从圆二色性谱(图7(a))可以看出: 当 $h < 130$ nm 时, 随着 h 增加, 峰值不断减小; 当 $h > 130$ nm 时, 随着 h 增

加, 其峰值呈增大的趋势. 对比 $h < 130$ nm 和 $h > 130$ nm 时的圆二色性谱峰值, 我们发现它们发生了反转. 从旋光角曲线(图7(b))可以看出: 当 $h < 130$ nm 时, 旋光角随着 h 的增加而增大, 但是存在较大旋光角的波长宽度却逐渐变窄; 当 $h = 130$ nm 时旋光角基本为零; 而当 $h > 130$ nm 时, 随着 h 的增加, 旋光角也随之增大. 从图7(b)还可以看出, 当 $h = 320$ nm 时, 其旋光角与 $h = 80$ nm 时基本相等.

我们还对不同 h 下的相对磁导率和折射率进行了反演计算. 结果表明, $\text{Re}(\mu)$ 的谐振点随着 h 的增加向长波长方向移动, 并在 $\text{Re}(\mu)$ 发生的谐振处具有最大的负折射率. 经对比可以发现, 当 $h = 40$ nm 时, 具有最大的负折射率. 图8给出了 $\theta = 55^\circ$, $h = 40$ nm 下的相对介电常数、相对磁导率、折射率和手征参数曲线. 从图8(a)可以看到, 在波长为 1.12 和 1.22 μm 处 $\text{Re}(\epsilon)$ 和 $\text{Re}(\mu)$ 发生了明显的谐振, 且在谐振点附近 $\text{Re}(\epsilon)$ 都为负值, 而 $\text{Re}(\mu)$ 在整个波段内基本都为正值. 从图8(b)可以看到, 在波长

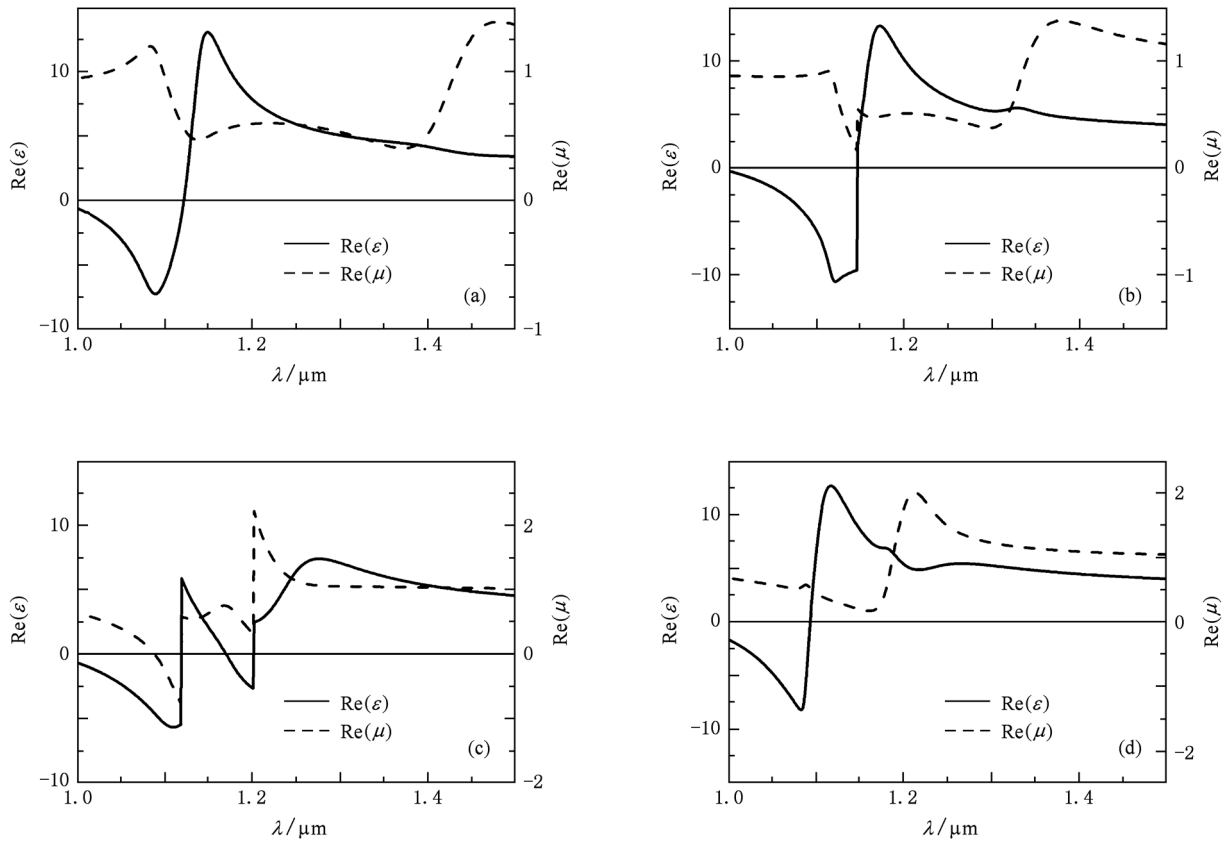


图6 $\theta = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 和 120° 时的相对介电常数和相对磁导率 (a) $\theta = 0^\circ$, (b) $\theta = 30^\circ$, (c) $\theta = 60^\circ$, (d) $\theta = 120^\circ$

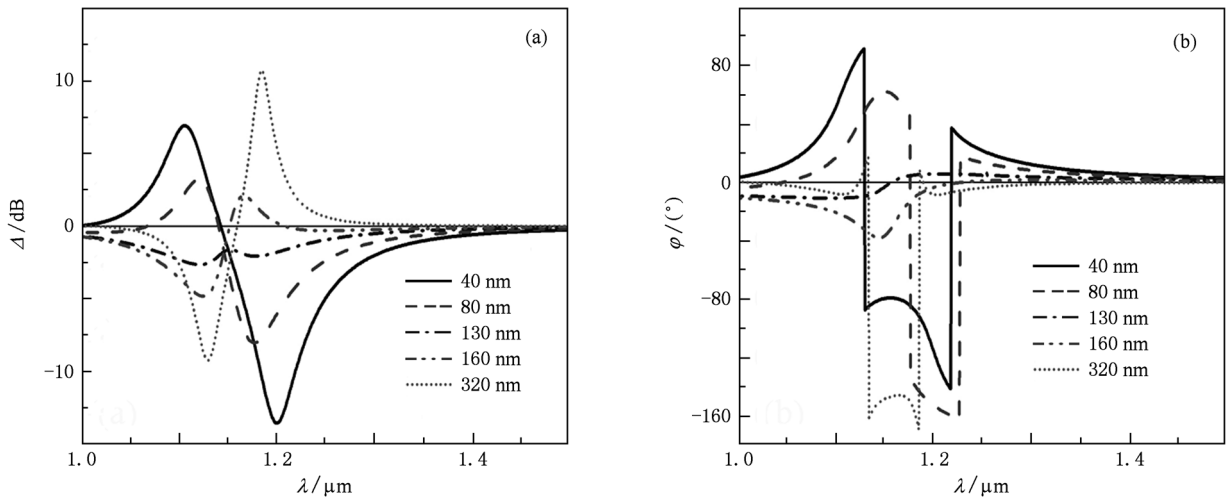


图7 不同介质层厚度 h 下的圆二色性谱和旋光角曲线 (a) 圆二色性谱, (b) 旋光角曲线

$\lambda = 1.12 \mu\text{m}$ 的谐振点处 RCP 波的折射率达到了 -4 , 此时手征参数具有最小值 -2 , 而在波长 $\lambda = 1.22 \mu\text{m}$ 的谐振点处 LCP 波的折射率为 -4.5 , 此时

的手征参数具有最大值 4 . 通过以上分析可知, 大的手征参数是手征介质实现负折射率的主要因素, 而不再要求 $\text{Re}(\epsilon)$ 和 $\text{Re}(\mu)$ 同时为负来实现负折射率.

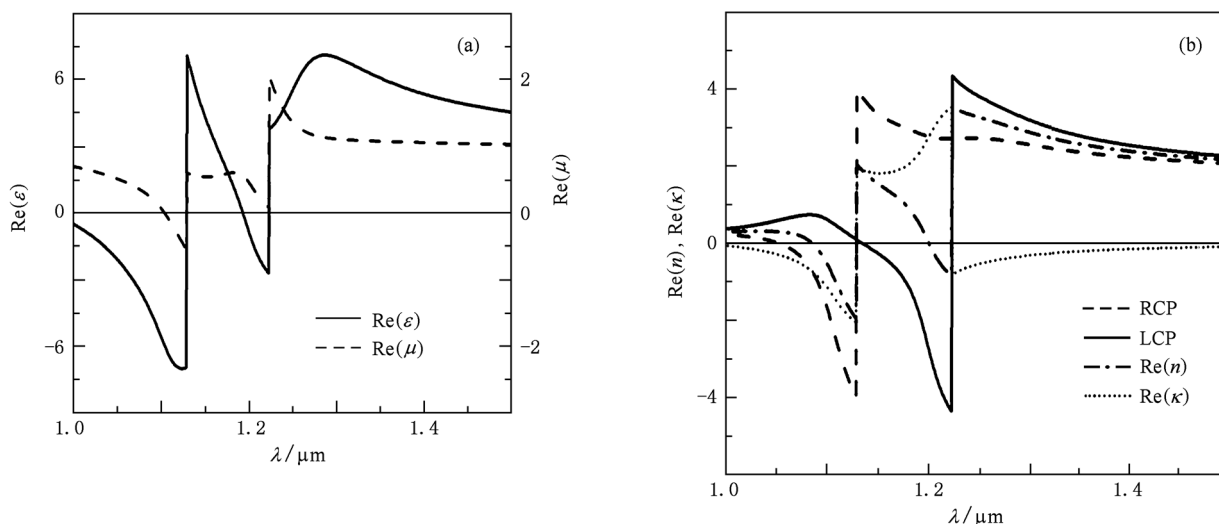


图8 $\theta = 55^\circ$, $h = 40$ nm 时的相对介电常数、相对磁导率、折射率和手征参数曲线 (a) 相对介电常数和相对磁导率曲线, (b) 折射率和手征参数曲线

4. 结 论

本文提出了一种由呈一定角度的两层金属线构成的新型双层平面手征结构. 分别对不同旋转角度 θ 和不同介质层厚度 h 下的周期结构进行了模拟计算, 由得出的透射系数和反射系数反演计算了这种结构的电磁特性参数. 结果表明, 在一定的 θ 和 h 下, 该结构在近红外波段拥有极强的旋光性和大的负折射率, 且不同的 θ 和 h 导致其旋光角和负折射

率出现的波段和大小不同. 当 $\theta = 55^\circ$, $h = 40$ nm 时, 该结构的旋光角最大达到 150° , 且对于 RCP 波和 LCP 波结构, 介质的折射率分别达到了 -4 和 -4.5 . 与文献报道的红外波段手征结构相比, 光学活性和负折射率得到明显提升. 模拟结果进一步表明, 手征介质中 RCP 波和 LCP 波实现负折射的主要原因是具有大的手征参数. 由于该结构完全由金属线和介质层构成, 因此在制作上更为简便, 这为以后的实验验证提供了方便.

- [1] Pendry J B 2004 *Science* **306** 1353
- [2] Tretyakov S, Sihvola A, Jylha L 2005 *Photon. Nanostruct. Fundam. Appl.* **3** 107
- [3] Plum E, Zhou J, Dong J, Fedotov V A, Koschny T, Soukoulis C M, Zheludev N I 2009 *Phys. Rev. B* **79** 035407
- [4] Zhou J, Dong J, Wang B, Koschny T, Kafesaki M, Soukoulis C M 2009 *Phys. Rev. B* **79** 121104(R)
- [5] Svirko Y, Zheludev N, Osipov M 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 498
- [6] Kwon D H, Werner P L, Werner D H 2008 *Opt. Express* **16** 11802
- [7] Kwon D H, Werner D H, Kildishev A V, Shalaev V M 2008 *Opt. Express* **16** 11822
- [8] Xu C, Dong J F 2010 *J. Optoelectron. Laser* **21** 1528 (in Chinese) [徐超、董建峰 2010 光电子·激光 **21** 1528]
- [9] Rogacheva A V, Fedotov V A, Schwanecke A S, Zheludev N I 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 177401
- [10] Plum E, Fedotov V A, Schwanecke A S, Zheludev N I, Chen Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 223113
- [11] Dong J, Zhou J, Koschny T, Soukoulis C M 2009 *Opt. Express* **17** 14172
- [12] 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
- [13] Decker M, Zhao R, Soukoulis C M, Linden S, Wegener M 2010 *Opt. Lett.* **35** 1593
- [14] 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
- [15] Li J, Yang F Q, Dong J F 2011 *Prog. Electromagn. Res.* **116** 395
- [16] Wu Z, Zeng B Q, Zhong S 2010 *J. Electromagn. Waves Appl.* **24** 983
- [17] 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]
- [18] Dong J F, Xu C, Xu J 2009 *Chin. J. Quantum Electron.* **26** 385 (in Chinese) [董建峰、徐超、徐键 2009 量子电子学报 **26** 385]

- [19] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, Nemat-Nasser S C, Schultz S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4184
- [20] 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]
- [21] 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]
- [22] Yang Y M, Qu S B, Wang J F, Xu Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1031 (in Chinese) [杨一鸣、屈绍波、王甲富、徐卓 2009 物理学报 **58** 1031]
- [23] Zhuo S C, Yan C C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 360 (in Chinese) [卓士创、闫长春 2010 物理学报 **59** 360]

Investigation on strong optical activity and negative refractive index in double-layer metallic wires planar chiral structure*

Li Jie Yang Fang-Qing Dong Jian-Feng[†]

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

(Received 12 January 2011; revised manuscript received 5 July 2011)

Abstract

A planar chiral structure composed of double-layer metallic wires with fourfold symmetry is proposed. The rotation angle and the dielectric layer thickness between double-layer metallic wires is optimized. The numerical simulation results show that the exceptionally strong polarization rotation and the large chiral parameter are found at the infrared wavelength, and show a negative refraction index in a certain band.

Keywords: chiral media, optical activity, chiral parameter, negative refraction index

PACS: 42.25.Bs, 78.20.Ek

* 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 Science and Technology Research Innovation Team Program of Ningbo, China (Grant No. 2009B21007), the Industry Key Program of Ningbo, China (Grant No. 2008B10042), and the K. C. Wong Magna Foundation of Ningbo University, China.

[†] Corresponding author. E-mail: dongjianfeng@nbu.edu.cn