

光频段双层手征结构光学特性及负折射率研究

刘锦景 罗孝阳 刘道亚 董建峰

(宁波大学光纤通信与网络技术研究所, 浙江 宁波 315211)

摘要 设计了一种工作在光波段的新四重对称的双层手征结构,通过数值模拟得到透射系数和反射系数,反演计算了结构的圆二色性、旋光角、手征参数和折射率。结果表明该结构在谐振波长附近具有很强的旋光性,并且在椭圆度为零时,即透射光变成完全线偏振光时,旋光角达到了 55° ;在一定波段内可以实现左旋圆偏振光(LCP)和右旋圆偏振光(RCP)的负折射率,且不需要介电常数和磁导率同时为负,更重要的是,实现负折射率的左旋圆偏振光(LCP)具有较宽的频带,不局限于谐振波长附近,在椭圆度为零时,折射率也为负。考虑到具体的实验制作,对加衬底的手征结构进行了数值模拟,结果表明谐振波长向长波长方向产生了偏移,完全线性偏振光的旋光角仍然有 40° 。

关键词 材料;手征;手征参数;负折射率

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0116003

Investigation on Optical Property and Negative Refractive Index in Double-Layer Chiral Structure of Optical Region

Liu Jinjing Luo Xiaoyang Liu Daoya Dong Jianfeng

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

Abstract A new four-fold symmetry double-layer chiral structure is designed, of which the operating wavelength band is in optical region. The transmission and reflection coefficients are obtained by numerical simulation, then the circular dichroism, polarization azimuth rotation angle, chiral parameter, refractive index of the structure are calculated. The results show that giant optical activity is found at the resonance wavelength region, and when the ellipticity is zero, the transmitted light becomes linearly polarized light completely, the polarization azimuth rotation angle reaches 55° . It is found that the negative indexes of the left-handed circularly polarized (LCP) and right-handed circularly polarized (RCP) waves can be realized without negative permittivity and permeability simultaneously. Most importantly, the negative index of the LCP can be achieved in wide band, which is not limited at resonance wavelength region. When the ellipticity is zero, the negative index also can be achieved. Taking into account the experimental manufacture, the substrate is added in the chiral structure. The simulated results demonstrate that resonance wavelength regions shift to long wavelength, and the polarization azimuth rotation angle still has 40° when the transmitted light becomes linearly polarized light completely.

Key words materials; optical region; chiral parameter; negative refractive index

OCIS codes 160.3918; 160.1585; 160.4760

1 引言

负折射率介质在通信、光信息存储、亚波长成像^[1-2]、电磁隐身^[3]和光波导^[4-5]等许多领域有广

泛的应用前景。最近,手征负折射^[6-7]的研究成为负折射率研究领域重要的热点之一。手征结构因缺乏镜像对称性,具有很好的光学活性,即光波经过手

收稿日期: 2013-07-30; 收到修改稿日期: 2013-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(61078060)、宁波市科技创新团队(2009B21007)、宁波大学王宽诚幸福基金

作者简介: 刘锦景(1988—),男,硕士研究生,主要从事手征负折射材料方面的研究。E-mail: jin395669598@163.com

导师简介: 董建峰(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事负折射率材料和手征介质波导等方面的研究。

E-mail: dongjianfeng@nbu.edu.cn(通信联系人)

征介质后产生了旋光性。要利用手征介质实现负折射, 必须要有大的旋光性和手征参数, 而自然界中物质的手征参数都很小, 因此需要进行人工合成大手征参数的手征介质。与此同时, 其他方法在光频段得到负折射率比较困难, 因此对光频段手征负折射率介质进行研究更具有实际意义。

2001年, Svirko等^[8]首次对双层平面手征金属微结构的耦合进行了研究, 并从理论上预言了其结构的强旋光性。2009年, Plum等^[9-10]对毫米级的双层旋转玫瑰和十字型结构进行了研究, 设计出了具有良好旋光性和圆二色性的手征结构, 并实现了负折射率。随后, Dong等^[11]则将双层旋转十字手征结构的设计扩展到光波频段, 数值模拟结果表明该结构在 $1.55\ \mu\text{m}$ 的红外通信波段具有负磁导率和负折射率特性以及极大的旋光性。杨方清等^[12]设计了纳米级的双层旋转共轭希腊十字手征结构, 得到大的旋光性和手征参数, 并使负折射率达到了 10^{-6} 量级。最近, 一些新的在光波段实现大旋光性甚至负折射率的手征结构被提出, 如“L”形结构^[13]、“U”形结构^[14-15]等, 并在实验上也取得了一定的进展^[16-20]。

本文设计了一种工作在光波段的新四重对称性的双层手征结构, 通过数值模拟得到了透射系数和反射系数, 反演计算了结构的圆二色性、旋光角、椭圆偏度、手征参数及负折射率等, 发现这一新型手征结构在光频段具有极强的旋光性和负折射率, 特别

是透射光变成完全线性偏振光时(椭圆偏度为零时), 旋光角达到了 55° , 且此时左旋圆偏振光(LCP)折射率为负。考虑到具体的实验制作, 对加衬底的手征结构进行了数值模拟, 发现谐振波长点会向长波长方向产生偏移。

2 结构描述

设计的双层平面手征结构为周期性结构, 其中周期常数 $L=900\ \text{nm}$, 每个单元结构如图1所示, 它是由分布在介质层两面的半圆形金属线构成, 顶层由4个半圆金属线组成, 按照四重对称的位置排列, 底层每个半圆金属线则是相对于顶层翻转 180° 。其具体参数如下: 半圆金属线宽 $w=60\ \text{nm}$, 内半圆直径 $D_1=360\ \text{nm}$, 外半圆直径 $D_2=480\ \text{nm}$, $l=740\ \text{nm}$, 金属结构和介质层的厚度都为 $t=40\ \text{nm}$, 需要说明的是以上参数都是经过大量数值模拟优化后的结果。其中金属层为银, 介质层采用的是氟化镁(MgF_2 , 折射率 $n=1.38$, 不考虑色散), 采用频域有限元方法^[12-13]进行模拟计算, 计算时银采用有损耗的Drude色散介质模型近似($\omega_p=2\pi\times 2175\ \text{THz}$, $\omega_c=2\pi\times 4.35\ \text{THz}$, ω_p 为等离子体谐振频率, ω_c 为碰撞频率)。光波(入射光为平面线性偏振光)沿 z 轴方向垂直入射到手征结构表面, 在垂直于波传播方向上采用了周期性边界条件。

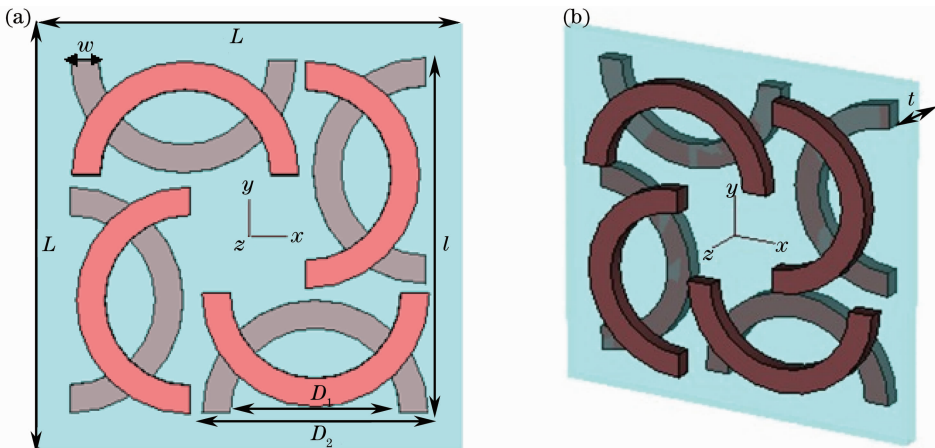


图1 双层手征结构模型

Fig. 1 Model of the double-layer chiral structure

3 结果和讨论

为了说明手征结构的光学特性, 给出了该结构的透射和反射谱[图2(a), 图中 T 表示透射系数, R

表示反射系数], 在谐振波长附近, 右旋圆偏振光(RCP)透射谱(T_{++})和左旋圆偏振光(LCP)透射谱(T_{--})有很大的不同。而两个透射谱幅度的区别可

以用圆二色性表示($\Delta = |T_{++}| - |T_{--}|$),其中 Δ 的值越大表明结构的光学特性越好;而旋光角($\theta = \frac{1}{2}[\arg(T_{++}) - \arg(T_{--})]$)和椭圆偏度($\eta = \frac{1}{2}\arcsin\left(\frac{|T_{++}|^2 - |T_{--}|^2}{|T_{++}|^2 + |T_{--}|^2}\right)$)也是手征结构反映光学特性的重要参量,特别是大的旋光角更有利于手征结构负折射率的实现。

由圆二色性谱如图 2(b)所示,手征结构在波长 1.05 μm 和 1.18 μm 处透射谱有明显的谐振,其中

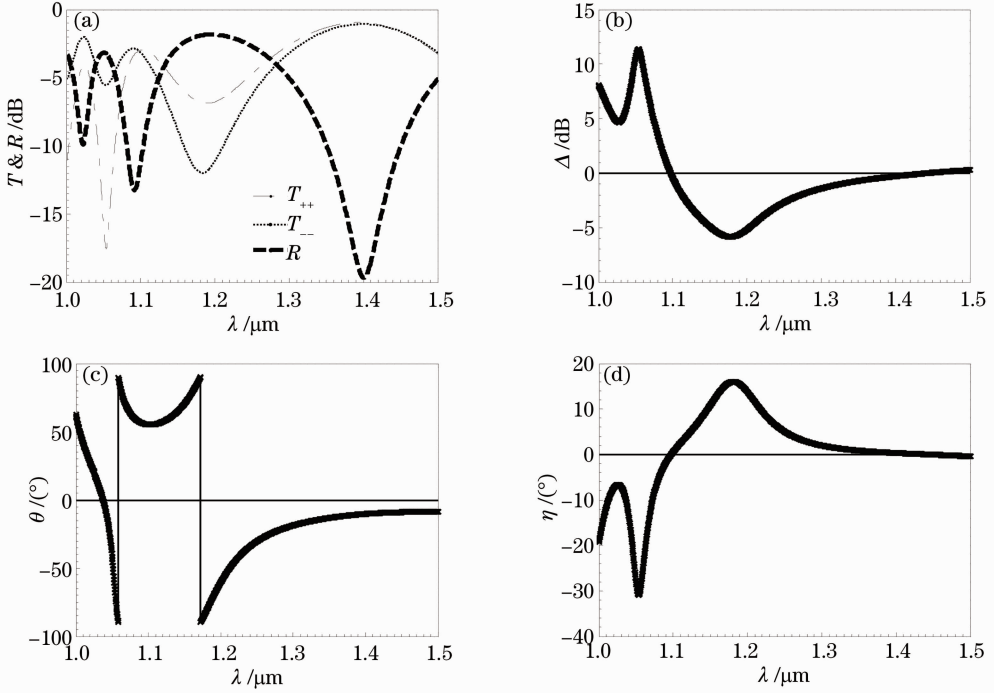


图 2 手征结构的(a)透射反射谱,(b)圆二色性谱,(c)旋光角和(d)椭圆偏度

Fig. 2 (a) Transmission and reflection spectra, (b) circular dichroism spectrum, (c) polarization azimuth rotation angle and (d) ellipticity of chiral structure

为了更好地理解手征介质负折射率实现的原理,这里给出了理论说明。在各向同性手征介质中^[11-13]的本征关系可以表示为[时间因子为 $\exp(j\omega t)$]^[7]:

$$\mathbf{D} = \epsilon\epsilon_0\mathbf{E} - j\kappa\sqrt{\mu_0\epsilon_0}\mathbf{H}, \quad \mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H} + j\kappa\sqrt{\mu_0\epsilon_0}\mathbf{E}, \quad (1)$$

式中 ϵ 和 μ 分别为手征介质的相对介电常数和相对磁导率, μ_0 和 ϵ_0 分别为真空的介电常数和磁导率, κ 为介质的手征参数。在手征介质中,存在着 RCP 和 LCP 两个圆极化本征波,分别用“+”和“-”来表征特征参数。而它们的折射率则为 $n_{\pm} = n \pm \kappa$, $n = \sqrt{\mu\epsilon}$,由此可以看出,只要手征参数的绝对值足够大,手征结构中的左旋圆偏振光或右旋圆偏振光就

在谐振波长 1.05 μm 处,RCP 的透射谱曲线峰值比 LCP 高 11 dB,而在 1.18 μm 附近,LCP 的透射谱曲线峰值则比 RCP 高了 6 dB,说明在这两个波长附近结构具有大的圆二色性。从图 2(c)和图 2(d)给出的旋光角和椭圆偏度曲线可以看到,在两个谐振波长中间 1.1 μm 处,椭圆偏度 $\eta=0^\circ$,说明此时结构的圆二色性消失,透射光变成完全线性偏振光,而此时的旋光角达到了 55° ,这一结果与之前报道的光频段手征结构^[11,13]相比有了很大的提高。

可以实现负折射率。利用得到的透射和反射系数反演计算,可以得到该手征结构的波阻抗 z 和折射率 n_{\pm} 为^[9]

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

$$n_{\pm} = \frac{-j}{k_0 d} \ln \left[\frac{1}{T_{\pm\pm}} \left(1 - \frac{z-1}{z+1} R \right) \right], \quad (3)$$

式中 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,即

$$\begin{aligned} \kappa &= (n_+ - n_-)/2, & \mu &= z(n_+ + n_-)/2, \\ \epsilon &= (n_+ + n_-)/(2z). \end{aligned} \quad (4)$$

利用(2)~(4)式,如图 3 所示,给出了该手征结构的手征参数 κ 、RCP(LCP)折射率 n_+ (n_-)以及传统定义

的折射率 n 的曲线。从图 3 可以看出, n_+ 和 n_- 分别在 $1.02 \sim 1.05 \mu\text{m}$ 处和 $1.09 \sim 1.22 \mu\text{m}$ 处实现了负折射率, 它们的最大负折射率分别达到 -4.4 和 -5.1 。同时可以发现在两共振波长附近结构具有很大的手征参数, 其最大值分别达到 -2.3 和 3.8 。更重要的是从图 3 中可看到 n_- 实现负折射率的频带范围较宽, 不仅在谐振波长附近, 而且在两共振波长之间, 椭圆度为零处, 即透射光波变成完全线性偏振光时 n_- 也为负。

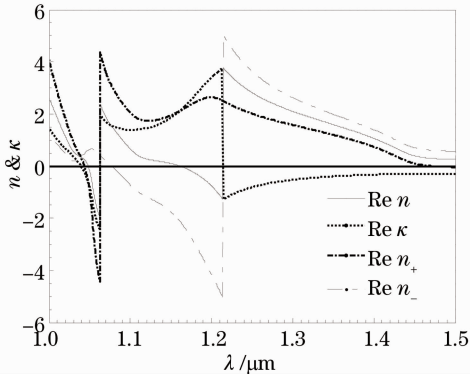


图 3 折射率和手征参数

Fig. 3 Refractive index and chiral parameter

由于具有大的手征参数和旋光角, 该手征结构在光频段实现了负折射率, 并有了较大的提升。为了进一步说明该手征结构的负折射率主要是由于大的手征参数, 而不用相对介电常数和相对磁导率同时为负, 在图 4 中给出了这一结构的相对介电常数和相对磁导率曲线。从图中可以看出结构在实现负折射率的一定波长范围内相对介电常数和相对磁导率并不同时为负值, 在波长 $1.02 \sim 1.05 \mu\text{m}$ 处和 $1.1 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 处相对介电常数为负而相对磁导率则为正, 说明了该手征结构的负折射率主要是由于足够大的手征参数实现了 LCP 波和 RCP 波的负折射率, 在实现负折射率的大部分波段不再要求 ϵ 和 μ

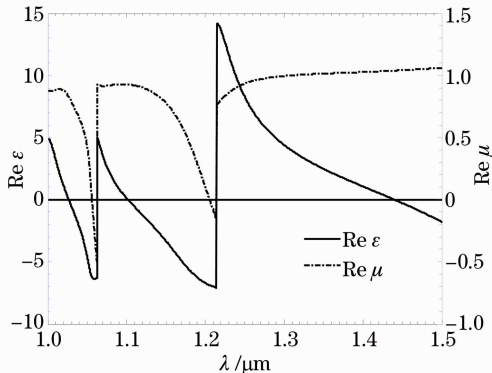


图 4 相对介电常数和相对磁导率

Fig. 4 Relative permittivity and relative permeability

同时为负。

考虑到两金属层之间的间距可能会对结构的旋光角、折射率大小产生影响, 对不同金属层间距的情况进行了大量的数值模拟, 发现当间距增大时, 低频共振位置会向长波长方向偏移, 高频共振位置会向短波长方向偏移, 旋光角会变大, 但负折射率会变小; 当间距减小时, 低频共振位置会向短波长方向偏移, 而高频共振位置会向长波长方向偏移, 旋光角会减小, 但负折射率会变大。前面图形给出的是综合考虑优化的结果。

4 加衬底的手征结构

考虑到实际实验制作的手征样品带有衬底, 对这种带有衬底的手征结构进行了对比分析, 图 5 为加了衬底的手征结构图, 衬底材质为 SiO_2 。

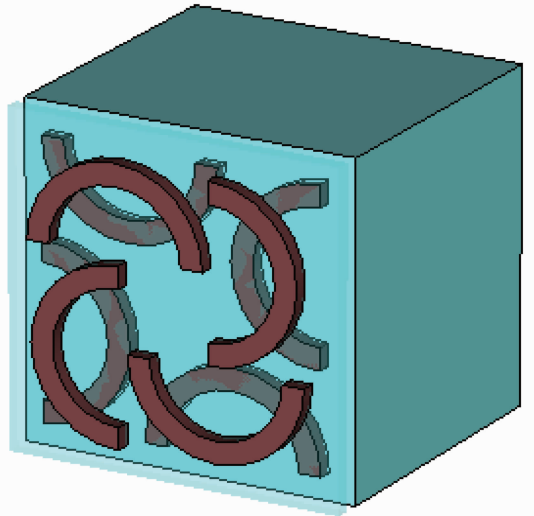


图 5 加衬底的双层手征结构模型

Fig. 5 Model of the double-layer chiral structure with substrate

图 6(a) 为没加衬底的手征结构通过数值计算得到的透射和反射系数曲线, 图 6(b) 为其旋光角随波长度化曲线, 图 7(a) 为加衬底的手征结构的透射和反射系数, 图 7(b) 也同为其旋光角。由图 6、7 可看出在手征结构加了衬底之后, 谐振波长点向长波长方向产生了偏移, 但两个谐振波长点之间的带宽基本上没有发生改变。计算发现在椭圆度为零时, 加衬底的手征结构旋光角依然有 40° , 虽然比没加衬底时有了一定程度的减小, 但仍然较大。

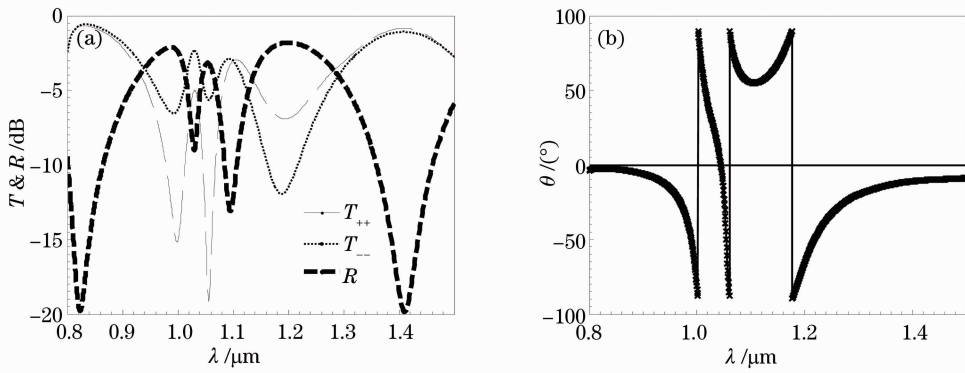


图6 无衬底情况下手征结构的(a)透射反射谱和(b)旋光角

Fig. 6 (a) Transmission and reflection spectra and (b) polarization azimuth rotation angle of the chiral structure without substrate

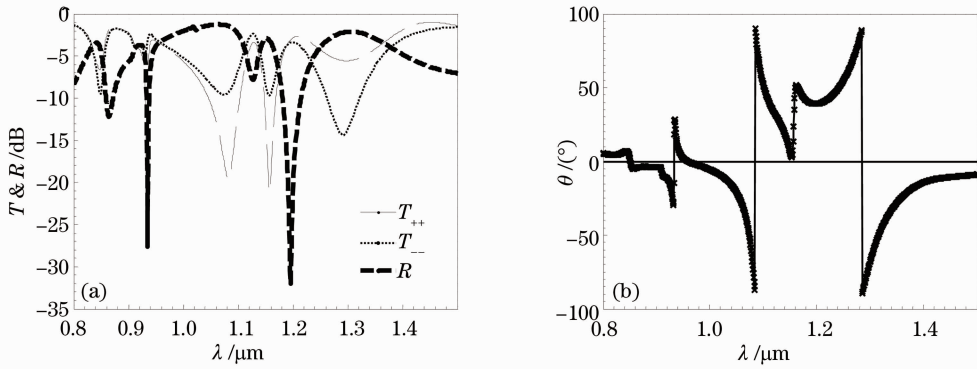


图7 加衬底情况下手征结构的(a)透射反射谱和(b)旋光角

Fig. 7 (a) Transmission and reflection spectra and (b) polarization azimuth rotation angle of the chiral structure with substrate

5 结 论

设计了一种新型的双层的工作波长在光波段的手征结构,通过数值模拟计算,得到了该结构的透射系数和反射系数。再由透射系数和反射系数反演计算了这种结构的电磁参数,结果表明该结构与之前研究的光频段的类似结构相比,光学特性有了很大的提高,尤其在椭圆度 $\eta=0^\circ$ 时,即透射光变成完全线性偏振光时,旋光角达到了 55° 。且对于 RCP 和 LCP 波结构,介质的负折射率 n_+ 和 n_- 分别达到了 -4.4 和 -5.1 , 相较之前文献的工作波长在同等波段的手征结构,负折射率有了较大的提高,更重要的是左旋圆偏振光实现负折射率的频带比较宽,不局限于谐振波长附近,在椭圆度为零时,透射光变成完全线性偏振光时也出现了折射率为负的情况。模拟结果还表明,手征结构中 RCP 和 LCP 实现负折射率主要是由于大的手征参数,在此条件下不用介电常数和磁导率同时为负。上述设计的手征结构简单,且工作波长在光频段,使其更具有实际意义,并

对其加衬底的结构透射、反射谱和旋光角进行了分析,发现在椭圆度为零时,旋光角依然有 40° , 为在双层手征结构实验上实现负折射打下了很好的基础。

参 考 文 献

- 1 J B Pendry. Negative refraction makes a perfect lens [J]. Phys Rev Lett, 2000, 85(18): 3966–3969.
- 2 Chen Xuchong, Feng Shuai, Zhang Beibei, *et al.*. Subwavelength imaging characteristics of the near-infrared silicon-based metallic photonic crystal slabs [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0123003.
陈霄冲, 冯 帅, 张贝贝, 等. 近红外波段硅基金属光子晶体平板的亚波长成像特性[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0123003.
- 3 D Schuring, J J Mock, B J Justice, *et al.*. Experiment electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. Science, 2006, 314(5801): 977–980.
- 4 Zhang Jing, He Ying, Li Chunfang, *et al.*. Guided modes in a four-layer slab waveguide with the LHM core [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2673–2680.
张 静, 何 英, 李春芳, 等. 包含左手材料的四层平板波导中的光导模[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2673–2680.
- 5 Hou Shanglin, Zhang Shujun, Li Suoping, *et al.*. Investigation on transmission characteristics of doubly cladding fiber with an

- inner cladding made of negative refractive-index material [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0506004.
- 侯尚林, 张书军, 黎锁平, 等. 内包层为负折射率介质双包层光纤的传输特性的研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0506004.
- 6 J B Pendry. A chiral route to negative refraction [J]. *Science*, 2004, 306(5700): 1353–1355.
- 7 S Tretyakov, A Sihvola, L Jylha. Backward-wave regime and negative refraction in chiral composites [J]. *Photonics and Nanostructures*, 2005, 3(2–3): 107–115.
- 8 Y Svirko, N Zheludev, M Osipov. Layered chiral metallic microstructures with inductive coupling [J]. *Appl Phys Lett*, 2001, 78(4): 498–450.
- 9 E Plum, J Zhou, J Dong, *et al.*. Metamaterial with negative index due to chirality [J]. *Phys Rev B*, 2009, 79(3): 035407.
- 10 J Zhou, J Dong, B Wang, *et al.*. Negative refractive index due to chirality [J]. *Phys Rev B*, 2009, 79 (12): 121104.
- 11 J F Dong, J F Zhou, T Koschny, *et al.*. Bi-layer cross chiral structure with strong optical activity and negative refractive index [J]. *Opt Express*, 2009, 17(16): 14172–14179.
- 12 Yang Fangqing, Li Jie, Wang Zhan, *et al.*. Characteristics of the twisted conjugated gammadion chiral structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1016002.
- 杨方清, 李 杰, 王 战, 等. 旋转共轭希腊十字型手征结构特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1016002.
- 13 J Li, F Q Yang, J F Dong. Design and simulation of L-shaped chiral negative refractive index structure [J]. *Prog Electromagn Res*, 2011, 116: 395–408.
- 14 Z Li, R Zhao, T Koschny, *et al.*. Chiral metamaterials with negative refractive index based on four “U” split ring resonators [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 97(8): 081901.
- 15 M Decker, R Zhao, C M Soukoulis, *et al.*. Twisted split-ring-resonator photonic metamaterial with huge optical activity [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(10): 1593–1595.
- 16 X Xiong, W Sun, Y Bao, *et al.*. Construction of a chiral metamaterial with a U-shaped resonator assembly [J]. *Phys Rev B*, 2010, 81(7): 075119.
- 17 E Plum, V A Fedotov, A S Schwanecke, *et al.*. Giant optical gyrotropy due to electromagnetic coupling [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(22): 223113.
- 18 M Decker, M Ruther, C E Kriegler, *et al.*. Strong optical activity from twisted-cross photonic metamaterials [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(16): 2501–2503.
- 19 W Huang, Y Zhang, X Tang, *et al.*. Optical properties of a planar metamaterial with chiral symmetry breaking [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(17): 3359–3361.
- 20 K Song, X P Zhao, Q H Fu, *et al.*. Wide-angle 90-polarization rotator using chiral metamaterial with negative refractive index [J]. *J Electromagn Waves Appl*, 2012, 26(14-15): 1967–1976.

栏目编辑: 韩 峰