

# 旋转共轭希腊十字型手征结构特性研究

杨方清 李 杰 王 战 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** 提出了一种新型的纳米级旋转共轭希腊十字型手征结构, 并对该结构上下两层希腊十字的旋转角度进行了优化; 数值模拟了该结构对不同频率入射波的透射和反射响应, 发现透射谱在频率为 145 和 300 THz 处存在两个明显的谐振点。通过对透射反射谱的反演, 计算了结构的圆二色性、旋光角, 得出该结构在谐振频率附近具有很强的旋光性, 最大旋光角达到了  $95^\circ$ 。分析了折射率、相对介电常数、相对磁导率和手征参数, 发现这一结构在谐振频率附近分别实现了左旋圆极化波和右旋圆极化波的负折射率, 且进一步证明了手征结构实现负折射率的主要原因是大的手征参数。

**关键词** 材料; 手征; 旋光性; 圆二色性; 负折射率

**中图分类号** TN25; O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1016002

## Characteristics of the Twisted Conjugated Gammadion Chiral Structure

Yang Fangqing Li Jie Wang Zhan Dong Jianfeng

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

**Abstract** A new nanometer twisted conjugated gammadion chiral structure is proposed, and the twisted angle of upper and lower layers of the structure is optimized. The transmission and reflection spectra for the incident wave with different frequencies are obtained from numerical simulations. The resonance dips of the transmission spectra at the frequencies of 145 and 300 THz are observed. The circular dichroism, polarization azimuth rotation angle are calculated from simulated transmission and reflection spectra. The results show that the larger circular dichroism and exceptionally strong optical activity are found at the resonance frequency region. The maximum polarization azimuth rotation angle  $\theta$  can reach  $95^\circ$ . Then the effective parameters of the structure, including relative permittivity, relative permeability, chiral parameter and refractive indexes, are retrieved from simulated transmission and reflection spectra. It is found that the negative refractive indexes of the right-handed circularly polarized and left-handed circularly polarized waves of the structure can be realized at the resonance frequency region. The numerical results demonstrate that the negative refractive index of the chiral metamaterial is due to the large chiral parameter.

**Key words** materials; chirality; optical activity; circular dichroism; negative refractive index

**OCIS codes** 160.1585; 160.3918; 160.4670

## 1 引 言

最近, Pendry 等<sup>[1,2]</sup>提出了利用结构的手征性实现负折射率的方法。所谓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, 手征性强弱主要由结构的手征参数大小表征。研究已经表明只要手征参数足够大, 在手征结构中就能存在后向波<sup>[2]</sup>, 这点与左手结构中相速度与能量速度方向相反的特性正好吻合。在电磁响应

**收稿日期**: 2011-04-01; **收到修改稿日期**: 2011-05-10

**基金项目**: 国家自然科学基金(61078060)、浙江省自然科学基金(Y1091139)、宁波市科技局工业攻关(2008B10042)、宁波市新型光电功能材料及器件创新团队(2009B21007)和宁波大学王宽诚幸福基金资助课题。

**作者简介**: 杨方清(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事手征负折射率材料方面的研究。

E-mail: yangfangqing321@sina.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)

方面,手征结构的特征是电偶极子和磁偶极子的交叉耦合<sup>[3]</sup>。经过数值模拟和实验研究,结果表明手征结构可以实现负折射率。手征结构的旋光性主要体现在旋光度、圆二色性和椭圆偏度上。旋光度是指结构对入射光的极化偏振面经过单位长度的旋转角度;圆二色性表征的是右旋圆极化(RCP)波和左旋圆极化(LCP)波透射谱线之间幅度的差异;椭圆偏度反映了极化状态由原来的线极化改变为椭圆极化的程度。

2003年,Papakostas等<sup>[4]</sup>首次在金属刻蚀的希腊十字阵列中观察到非零级衍射光的极化面旋转现象,证明这一手征结构存在旋光性。此后,Zhou等<sup>[5]</sup>研究了毫米级的双层旋转十字型结构,并在微波段实验实现了负折射率,同时结构具有良好的旋光性和圆二色性。随后,Dong等<sup>[6]</sup>将双层旋转十字型手征结构的设计扩展到光频段,通过优化结构的几何参数和材料参数,得到了该结构在红外通信波段的负磁导率和极大的旋光性,在波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处厚度为 $150\ \text{nm}$ 的结构中获得了 $70^\circ$ 的旋转角度。最近,Decker等<sup>[7]</sup>设计了纳米级的双层旋转十字手征结构,实验结果显示该结构具有极大旋光性(达到 $45714^\circ/\text{mm}$ )和良好的圆二色性,表明双层旋转十字具有良好的旋光性。而Zhao等<sup>[8]</sup>研究的毫米级的共轭希腊十字结构,从实验上证明了此结构具有极大的旋光性和圆二色性以及微波段的负折射,在 $1.6\ \text{mm}$ 厚的结构中其旋光角达到了 $30^\circ$ ,相应的手征参数为 $\kappa=2.35$ 。近期,一些新的具有强旋光性和负折射率的手征结构被提出,如玫瑰型结构<sup>[9~12]</sup>以及U型结构<sup>[13~15]</sup>等。此外,光子晶体实现负折射同样被广泛研究<sup>[16~18]</sup>。由于负折射结构制成的透镜可以实现对倏逝波的成像<sup>[19]</sup>,不仅突破了传统透镜的最大分辨率受制于电磁波波长的局限,而且能够实现“二次会聚效应”等,在通信、光信息存储<sup>[19]</sup>、电磁隐身<sup>[20]</sup>和光波导<sup>[21~22]</sup>等许多领域有广泛的潜在应用前景,因此负折射结构的研究已经成为科学界最重要的热点之一。

平面手征结构的旋光性主要是表面等离子体共振的结果<sup>[23]</sup>;光在手征结构的第一个界面转化为等离子体波,然后在第二个界面恢复,而这两个界面处的耦合是不对称的,正是这种界面耦合效应的不对称导致了很强的电场矢量旋转,因此用这类结构可以对光的极化进行控制。本文提出了一种新型纳米级的手征结构,其基本结构类似文献<sup>[8]</sup>中提出的共轭希腊十字型结构,对结构的上下两层希腊十字进行了一

定角度的旋转,从而增大了耦合效应的不对称性,并对旋转角度进行了优化。通过仿真计算发现这一新型手征结构与之前已被广泛研究的希腊十字手征结构相比,具有更大的旋光角,且该结构能够在红外频段实现负折射率,负折射率最大值达到了 $-6$ 。

## 2 结构描述

图1为单元结构示意图,设计的旋转共轭双层手征结构为周期性的,周期常数为 $600\ \text{nm}$ 。模型采用的是由金属-介质-金属排列的三层结构,具体结构参数为:长度 $L=500\ \text{nm}$ ,宽度 $w=120\ \text{nm}$ ,每层的厚度 $d=60\ \text{nm}$ , $\alpha$ 为上下两层十字结构分别向顺时针和逆时针方向旋转的角度, $\alpha=10^\circ$ 。这里有必要说明的是, $\alpha$ 是优化后得出的结果。 $\alpha=10^\circ$ 时结构的旋光性比 $0^\circ$ 时要大很多,证明通过对共轭希腊十字的旋转可以增大结构的旋光性。数值模拟采用频域有限元方法,介质层采用的是氟化镁( $\text{MgF}_2$ ,折射率 $n=1.38$ ),金属采用的是金( $\text{Au}$ ), $\text{Au}$ 采用的是有损耗的Drude色散媒质模型( $\omega_p=2\pi\times 2081\ \text{THz}$ , $\omega_c=2\pi\times 35\ \text{THz}$ ,其中 $\omega_p$ 为离子谐振频率,而 $\omega_c$ 是离子碰撞频率)近似,平面入射波沿 $-z$ 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。

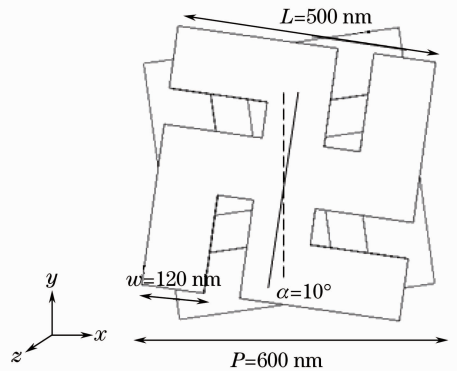


图1 旋转共轭希腊十字型手征超常材料的结构  
Fig. 1 Structure of twisted conjugated gammadion chiral metamaterial

## 3 电磁特性参数计算与分析

为了说明结构的旋光性,首先来看旋转共轭希腊十字结构的透射反射谱线(图2),在谐振频率附近,右旋圆极化波(RCP)透射谱( $T_{++}$ )和左旋圆极化波(LCP)透射谱( $T_{--}$ )有很大的不同,事实上这种不同相比于Decker等<sup>[7]</sup>设计的纳米级的双层旋转十字结构要明显很多,说明结构的旋光性得到了

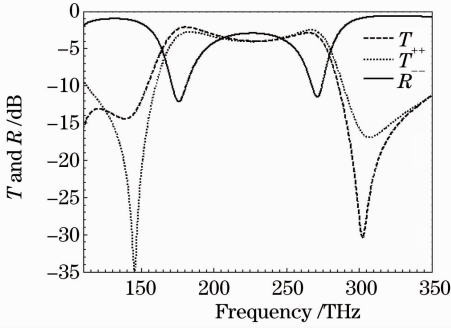


图2 共轭希腊十字型结构透射反射谱

Fig. 2 Transmission and reflection spectra of the conjugated swastika structure

很大的提升。两个透射谱幅度的区别可以表征为圆二色性,即

$$\Delta = |T_{++}| - |T_{--}|, \quad (1)$$

两个透射谱相位之间的区别可以表征为旋光角,即

$$\theta = \frac{1}{2} [\arg(T_{++}) - \arg(T_{--})], \quad (2)$$

手征结构对入射光极化状态的改变能力可以表征为椭圆度,即

$$\eta = \frac{1}{2} \arcsin \left( \frac{|T_{++}|^2 - |T_{--}|^2}{|T_{++}|^2 + |T_{--}|^2} \right). \quad (3)$$

由图3可见,结构在频率为145和300 THz处有明显的谐振,其中在谐振频率145 THz处,RCP的透射谱曲线比LCP高21 dB,而在300 THz附近,RCP的透射谱曲线比LCP低约14 dB,说明谐振频率附近具有很强的圆二色性。为进一步表明结构的旋光度,图4,5给出了结构的旋光角和椭圆度曲线。令人特别感兴趣的是在两个谐振频率中间  $f=240$  THz处,椭圆度  $\eta=0$ ,说明此处结构的圆二色性消失,透射光变成完全线性偏振光,而此时的旋光角也达到了  $10^\circ$ ,即在240 THz的红外频段该结构具有极大旋光性(达到了  $55000^\circ/\text{mm}$ )。而从图4中可以看到在谐振频率附近结构的旋光角达到了极值(最大旋光角达到了  $95^\circ$ )。

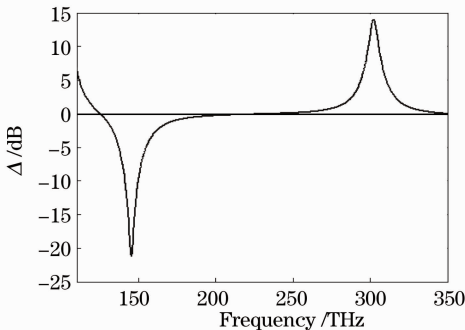


图3 圆二色性谱

Fig. 3 Circular dichroism spectrum

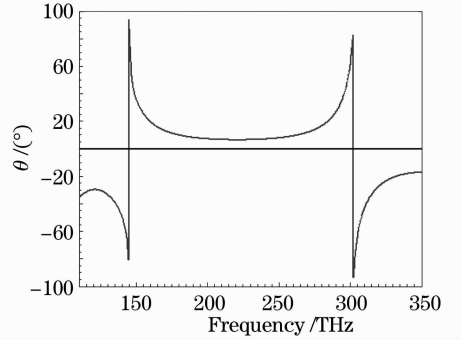


图4 旋光角

Fig. 4 Polarization azimuth rotation angle

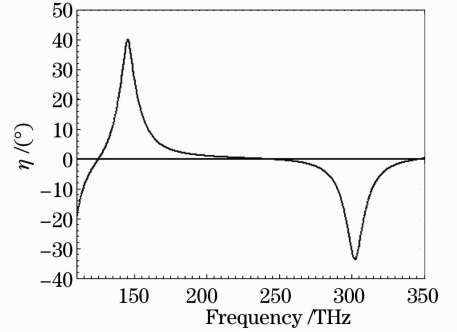


图5 椭圆度

Fig. 5 Ellipticity

利用手征性实现负折射的原理,在各向同性的手征介质中,本构关系<sup>[9]</sup>可以写成[时间因子为  $\exp(i\omega t)$ ],

$$\begin{bmatrix} \mathbf{D} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_0 \epsilon & -i\kappa/c \\ i\kappa/c & \mu_0 \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E} \\ \mathbf{H} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中  $c, \epsilon_0$  和  $\mu_0$  分别表示真空中的光速、介电常数和磁导率,  $\epsilon$  和  $\mu$  为介质的相对介电常数和相对磁导率,  $\kappa$  为介质的手征参数。在手征介质中,波动方程的本征解存在左旋(LCP,  $-$ )和右旋(RCP,  $+$ )两个圆极化本征波(沿着能流方向看过去)<sup>[2,5,24]</sup>,它们的折射率为  $n_{\pm} = n \pm \kappa$ ,  $n = \sqrt{\mu \epsilon}$ 。当  $n < \kappa$  时,  $n_-$  为负值,当  $n < -\kappa$  时,  $n_+$  为负值。通过对透射反射谱的反演计算,能够得到该手征介质结构的本征阻抗  $z$  和折射率<sup>[10,25]</sup> 为

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

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

式中  $k_0$  为真空中的波数,  $d$  为手征结构的厚度。通过得到的本征阻抗  $z$  和折射率,可以计算出该手征介质结构的手征参数、相对介电常数和相对磁导率<sup>[10,25]</sup> 为

$$\begin{aligned} \kappa &= (n_+ - n_-)/2, & \mu &= z(n_+ + n_-)/2, \\ \epsilon &= (n_+ + n_-)/2z. \end{aligned} \quad (7)$$

图 6 表示该结构 LCP (RCP) 的折射率  $n_-$  ( $n_+$ )、折射率  $n$  以及手征参数  $\kappa$  曲线图。显然,在整个频率范围内折射率  $n$  为正。然而,LCP 的折射率( $n_-$ )在 145~165 THz 频率范围内为负,RCP 的折射率( $n_+$ )在 300~305 THz 频率范围内为负,其最大负折射率分别达到了-6 和-0.8。同时,手征参数在谐振频率点分别达到了 3 和-1.2。在第一个谐振点附近,手征参数为正值且大于折射率  $n$ ,使得在此谐振频率附近  $n_- < 0$ ;而在第二个谐振点附近,手征参数为负且手征参数的绝对值大于折射率  $n$ ,使得在此谐振频率附近  $n_+ < 0$ 。

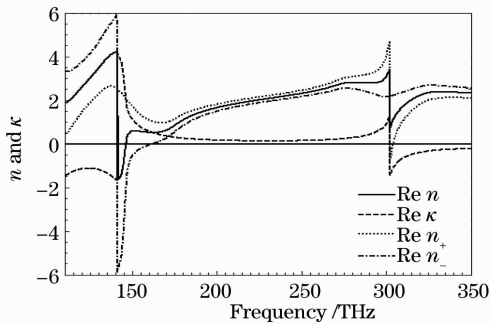


图 6 折射率和手征参数

Fig. 6 Refractive index and chiral parameter

图 7 和图 8 表示的是该结构的相对介电常数和磁导率。在 145~165 THz 频率范围内,相对介电常数为负;而相对磁导率在整个频率范围内为正。因此对于传统的负折射率结构来说,该结构的相对介电常数和磁导率特性不能使结构实现负折射率。所以该结构实现负折射率是由于结构大的手征参数。

为了进一步说明结构在两个谐振频率处响应的不同,图 9 给出了该结构在两个谐振频率附近的体电流分布图,在图中可以清楚地看到,在低频

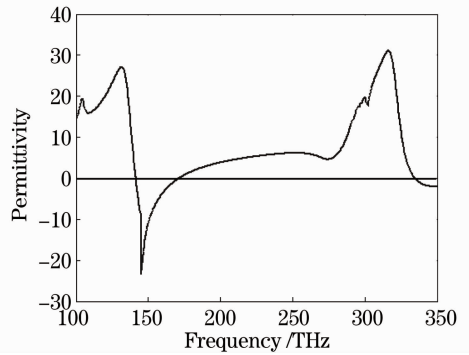


图 7 相对介电常数

Fig. 7 Relative permittivity

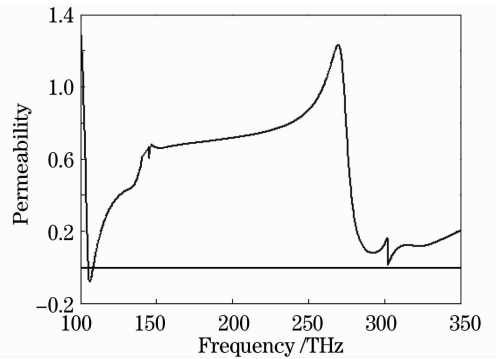


图 8 相对磁导率

Fig. 8 Relative permeability

145 THz 处,上下两层的电流分布方向是一致的,表明两层结构间发生平行电流共振,使得整体结构表现为一个电偶极子,发生电共振,这也是相对介电常数在此处发生共振的原因;相反地,在高频 300 THz 处,它们的方向不一致,产生逆向电流共振而形成环形电流,使得整个结构表现为一个磁偶极子,发生磁共振,这也是磁导率在此处发生共振的原因。明显地,上下两层希腊十字之间的耦合效应是旋光性产生的根本原因。

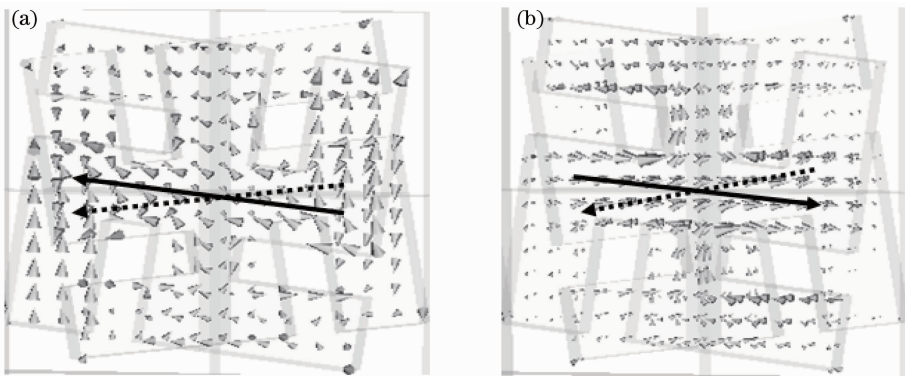


图 9 手征结构在频率 145 THz(a)和 300 THz(b)处的体电流分布(实线代表上表面,虚线代表下表面的体电流方向)  
Fig. 9 Volume current distribution of the chiral structure at frequencies 145 THz (a) and 300 THz (b) (real, dashed lines correspond to the direction of the volume currents at upper and lower layers, respectively)

上面的结果都是在没有基底的情况下计算得到的,同样计算了存在基底时的透射反射谱和电磁参数,结果与没有基底时相比没有本质变化,只是该介质的两个谐振点稍微向右偏移。

## 4 结 论

提出了一种新型的纳米级共轭希腊十字型手征结构,通过对该结构上下两层希腊十字在一定的旋转角度下的模拟计算,得出了这一结构的透射反射谱。对透射反射谱的反演计算出了该结构的电磁特性参数,结果表明该结构与之前研究的类似结构相比,其圆二色性和旋光度都有了很大的提高,其旋光度达到了  $55000^\circ/\text{mm}$ 。通过对手征参数和折射率分析,该结构在谐振频率 145 THz 处左旋圆极化波(LCP)实现了负折射率,且负折射率将近为  $-6$ ;在谐振频率 300 THz 处,右旋圆极化波(RCP)同样实现了负折射率。同时,在谐振频率附近其手征参数都达到了峰值( $\kappa$  最大时达到了 3)。这一新型结构在红外频段具有良好的旋光性,为今后进一步在实验上研究红外频段的负折射打下了基础。

## 参 考 文 献

- 1 J. B. Pendry. A chiral route to negative refraction[J]. *Science*, 2004, **306**(5700): 1353~1355
- 2 S. Tretyakov, A. Sihvola, L. Jylhä. Backward-wave regime and negative refraction in chiral composites [J]. *Photonics and Nanostructures*, 2005, **3**(2-3): 107~115
- 3 K. Konishi, T. Sugimoto, B. Bai *et al.*. Effect of surface plasmon resonance on the optical activity of chiral metal nanogratings[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(15): 9575~9583
- 4 A. Papakostas, A. Potts, D. M. Bagnall *et al.*. Optical manifestations of planar chirality[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(10): 107404
- 5 J. F. Zhou, J. F. Dong, B. N. Wang *et al.*. Negative refractive index due to chirality[J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **79**(12): 121104
- 6 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
- 7 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
- 8 R. Zhao, L. Zhang, J. F. Zhou *et al.*. Conjugated swastika chiral metamaterial with uniaxial optical activity and negative refractive index[J]. *Phys. Rev. B*, 2010, **83**(3): 035105
- 9 I. V. Lindell, A. H. Sihvola, S. A. Tretyakov *et al.*. Electromagnetic Waves in Chiral and Bi-Isotropic Media[M]. Boston, Artech House: 1994
- 10 E. Plum, J. F. Zhou, J. F. Dong *et al.*. Metamaterial with

- negative index due to chirality[J]. *Phys. Rev. B*, 2009, **79**(3): 035407
- 11 A. V. Rogacheva, A. V. Fedotov, A. S. Schwanecke *et al.*. Giant gyrotropy due to electromagnetic-field coupling in a bilayered chiral structure[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(17): 177401
- 12 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
- 13 X. Xiong, W. H. Sun, Y. J. Bao *et al.*. Construction of a chiral metamaterials with a U-shape resonator assembly [J]. *Phys. Rev. B*, 2010, **81**(7): 075119
- 14 M. Decker, R. Zhao, C. M. Soukoulis *et al.*. Twisted splitting-resonator photonic metamaterial with huge optical activity [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(10): 1593~1595
- 15 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
- 16 E. Cubukcu, K. Aydin, E. Ozbay *et al.*. Negative refraction by photonic crystals [J]. *Nature*, 2003, **423**(6940): 604~605
- 17 Ao Ling, Feng Shuai, Wang Yiquan. Near-field imaging properties of two-dimensional square-lattice photonic crystal slabs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1092~1095
- 敖玲,冯帅,王义全. 二维正方形格光子晶体平板的近场成像特性[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1092~1095
- 18 Ren Kum, Ren Xiaobin. Focus achieved by a slab lens of quasiperiodic photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2317~2319
- 任坤,任晓斌. 准周期光子晶体平板透镜的光会聚[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2317~2319
- 19 J. B. Pendry. Negative refraction makes a perfect lens [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**(18): 3966~3969
- 20 D. Schuring, J. J. Mock, B. J. Justice *et al.*. Experimental electromagnetic cloak at microwave frequencies [J]. *Science*, 2006, **314**(5801): 977~980
- 21 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
- 22 Jiang Meiping, Chen Xianfeng, Ni Chongwen. Propagation properties of a left material slab waveguide [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 193~197
- 蒋美萍,陈宪锋,倪重文. 左手材料平板波导的传输特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 193~197
- 23 M. Kuwata-Gonokami, N. Saito, Y. Ino *et al.*. Giant optical activity in quasi-two-dimensional planar nanostructures [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(22): 227401
- 24 D. H. Kwon, P. L. Werner, D. H. Werner. Optical planar chiral metamaterial designs for strong circular dichroism and polarization rotation [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(16): 11802~11807
- 25 D. H. Kwon, D. H. Werner, V. K. Alexander *et al.*. Material parameter retrieval procedure for general bi-isotropic metamaterials and its application to optical chiral negative-index metamaterial design [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(16): 11822~11829