

手征超介质光频段超宽带不对称传输特性研究

王 川, 汪会波, 潘威康, 康园园, 董建峰*

(宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 提出了一种三层手征超介质结构, 可在光频段实现线极化波的超宽带类二极管效应的不对称传输, 同时能实现高效率的交叉极化转换. 数值模拟结果显示, 该结构实现的线极化波不对称传输参数最高为 0.93, 而且在 111~198 THz 频率范围内达到 0.9 以上, 同时交叉极化转换率在该频段上达到 97%以上. 此外, 为更好地理解不对称传输和极化转换, 研究了极化旋转角、椭圆偏度和电场分布情况. 研究结果在极化转换器、光学二极管等光学器件中有潜在的应用价值.

关键词: 手征超介质; 不对称传输; 超宽带; 极化转换

中图分类号: TN29

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 05-0051-05

使用人工结构来控制微波和光波的极化和传输是现代微波和光电子学研究的关键问题之一. 手征超介质具有自然界物质所不具备的独特性质, 如负折射率^[1-2]、巨大的旋光性^[3-4]和圆二色性^[5-6]等特性. 在过去十几年中, 不对称传输作为手征超介质的另一种新颖特性, 以及在光学和信息处理中具有的应用前景, 引起了人们的极大兴趣. 因平面手征效应, 相反方向入射的极化波具有不同透射波强度, 即不对称传输^[7-8]. 这种特性类似于电子二极管, 它只允许电流单一方向通过而反向时阻断^[9]. 近期, 越来越多的结构被提出来以实现微波波段^[10-12]、太赫兹波段^[13-15]和光频段^[16-21]的圆极化波或线极化波的不对称传输. Menzel 等^[16]提出 L-I 型三层手征结构, 在光频段同时实现圆极化波和线极化波的不对称传输, 但不对称传输参数小于 0.25. Song 等^[12]提出了光栅-圆环组合的三层手征结构, 该结构能在微波段实现多带宽线极化波的不对称传输. 同年, Xu 等^[19]提出了双层 Π 型结构, 此结构在光波段实现了线极化波的双带不对称传输和相互极化转换, 但实现的线极化波的不对称传输参数小于 0.5. Liu 等^[20]提出了一种双 L 结构, 实现了光频段宽带线极化波的不对称传输, 但不对称传输参数大于 0.8 的相对带宽不到 20%. Wang

等^[21]提出了一种 T 型三层手征结构, 实现了光频段超宽带线极化波的不对称传输, 其交叉极化传输系数最高为 0.96, 并且在很大带宽内达到 0.9 以上, 但是不对称传输参数只有 0.8.

综上所述, 在光频段关于高效率 and 超宽带的线极化波的不对称传输报道仍然很少. 因此, 笔者提出了一种三层光栅结构, 该结构可以实现的线极化波不对称传输参数最大值可达到 0.93, 而且在 111~198 THz 的频率范围内达到 0.9 以上, 其相对带宽达到 57%, 所实现的不对称传输为超宽带. 该结构在将近 90 THz 的超宽带上达到了 0.9 以上的不对称传输参数, 同时也实现了 y 极化波将近 100%的极化转换效率, 相比之前的文献报道结果有了显著提高. 此外, 极化旋转角、椭圆偏度和电场分布的研究结果验证了不对称传输和极化转换的正确性.

1 手征结构和模拟方法

图 1 是手征超介质的基本结构单元. 为方便分析, 此手征结构可分为 3 个组成单元: A 层、B 层和 C 层. A 层结构是一个平行于 x 轴的亚波长金属光栅, 它可以透射 y 方向的极化波, 同时阻碍 x 方向的极化波传输; B 层是沿 y 轴倾斜 45°的亚波长金属

收稿日期: 2018-02-28.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(61475079).

第一作者: 王川(1992-), 男, 山东聊城人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 手征超介质的新颖传输特性. E-mail: 280891536@qq.com

*通信作者: 董建峰(1964-), 男, 浙江余姚人, 教授, 主要研究方向: 负折射率材料和手征介质波导. E-mail: dongjianfeng@nbu.edu.cn

光栅; C 层结构与 A 层相同, 但旋转了 90° , 是一个平行于 y 轴的亚波长金属光栅, 它可透射 x 方向极化波, 同时阻碍 y 方向的极化波传输. 手征结构单元几何参数如下: $a = 460 \text{ nm}$, $b = 460 \text{ nm}$, $h = 25 \text{ nm}$, $s = 60 \text{ nm}$, $g = 141 \text{ nm}$, $w = 50 \text{ nm}$, 金属层厚度 $t = 50 \text{ nm}$, 介质层厚度 $d = 220 \text{ nm}$.

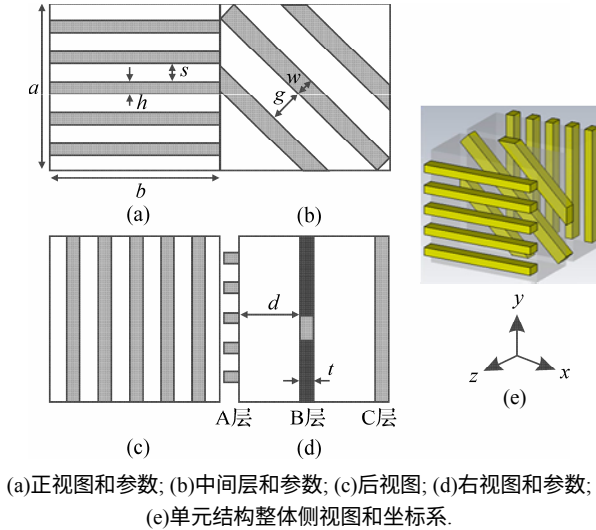


图 1 手征结构单元示意图

该手征结构的传输特性采用频域有限积分技术来进行数值模拟, 设计的结构在 x 和 y 方向采用周期性边界条件, z 方向用 2 个极化方向正交的线极化波(x 和 y 极化)入射. 在数值模拟中, 石英作为介质层, 其相对介电常数 $\epsilon_r = 2.1$, 介质的损耗正切 $\tan \delta = 0.00013$. 同时金属采用金, 相对介电常数用 Drude 模型描述: $\epsilon(\omega) = 1 - \omega_p^2 / (\omega(\omega + i\omega_c))$, 其中 ω_p 和 ω_c 为其等离子体频率和碰撞频率, $\omega_p = 2\pi \times 2.175 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, $\omega_c = 2\pi \times 6.5 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ [22].

为更好地描述入射场和透射场的极化性质, 我们引用琼斯矩阵 [23]:

$$\begin{pmatrix} T_x \\ T_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_x \\ I_y \end{pmatrix} = T_{\text{lin}}^f \begin{pmatrix} I_x \\ I_y \end{pmatrix}, \quad (1)$$

显然, 琼斯矩阵是一个 2×2 的传输矩阵, 其中元素为 T_{ij} , 下标 j 和 i 分别表示入射场和透射场的线极化状态, 下标 lin 表示线极化波, 上标 f 表示前向 (+ z 方向) 传输.

不对称传输参数 Δ 描述的是在相反传输方向上透射强度的差别. 根据琼斯矩阵, 线极化波的不对称传输参数可以表示为 [23]:

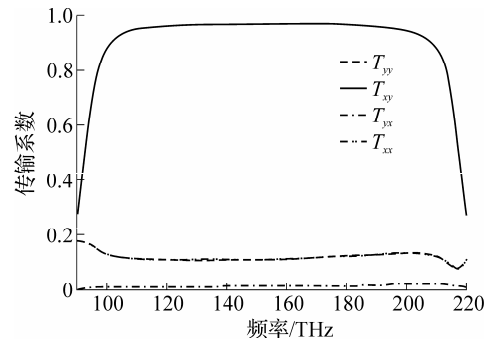
$$\Delta_{\text{lin}}^x = |T_{yx}|^2 - |T_{xy}|^2 = -\Delta_{\text{lin}}^y, \quad (2)$$

从上式可以看出, 只要满足条件 $|T_{xy}| \neq |T_{yx}|$, 就能实现线极化波的不对称传输.

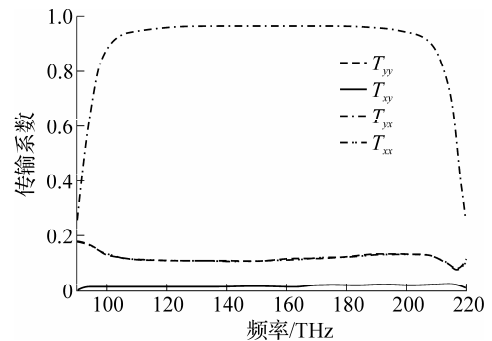
2 结果和讨论

2.1 传输系数

当线极化波垂直入射该手征结构时, 数值模拟了该结构的传输矩阵系数 (T_{yy} , T_{xy} , T_{yx} , T_{xx}). 其中图 2(a) 为线极化波的后向 (- z 方向) 传输系数(幅度), 图 2(b) 为前向 (+ z 方向) 传输系数(幅度). 从图 2 可以看出, 无论线极化波后向传输还是前向传输, 同向极化传输系数 (T_{yy} , T_{xx}) 完全一致, 但是交叉极化传输系数 (T_{xy} , T_{yx}) 却显著不同. 当线极化波后向传输时, 交叉极化传输系数 T_{xy} 在 $111 \sim 198 \text{ THz}$ 的频率范围达到 0.95 以上, 而 T_{yx} 始终小于 0.02. 当入射方向相反时, T_{xy} 和 T_{yx} 相互交换. 因此, 当 y 极化波后向 (- z 方向) 垂直入射到设计的手征结构上时, 光波可以充分地耦合进入该结构, 进而转换为 x 极化波. 而当传输方向相反时, y 极化波很难耦合进入该结构, 交叉极化转换效率很低.



(a) 后向传输系数(幅度)



(b) 前向传输系数(幅度)

图 2 正交的线极化波垂直入射到手征结构的传输系数

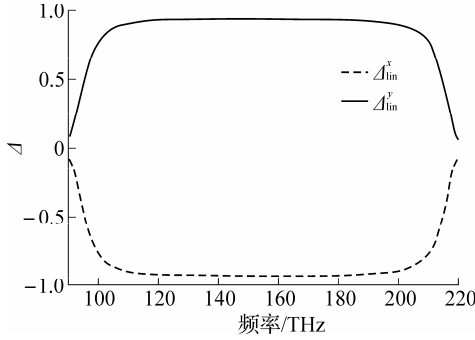
2.2 不对称传输参数和极化转换率

根据式(2)可计算出光波后向 (- z 方向) 传输时, 该手征结构的不对称传输参数. 图 3(a) 是 x 极化波

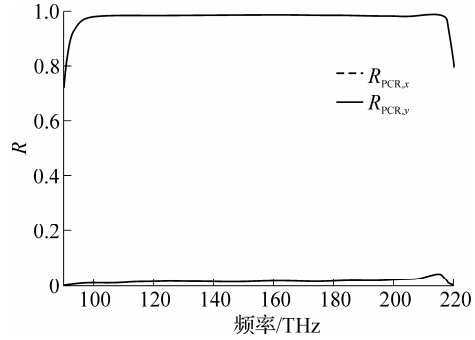
和 y 极化波的不对称传输参数曲线图. 根据图示, y 极化波不对称参数 (Δ_{lin}^y) 最大值可以达到 0.93, 而且在 111~198 THz 的频率范围内超过了 0.9. 此结果表明, y 极化波在正向传输中可以被该手征结构透射, 但是在相反的方向上被阻断. 图 3(b) 是 x 极化波和 y 极化波的交叉极化转换率曲线图. 极化转换率定义如下^[24]:

$$R_{\text{PCR},x} = |T_{yx}|^2 / (|T_{xx}|^2 + |T_{yx}|^2), \quad (3)$$

$$R_{\text{PCR},y} = |T_{xy}|^2 / (|T_{yy}|^2 + |T_{xy}|^2). \quad (4)$$



(a) 不对称传输参数



(b) 极化转换率

图3 线极化波的不对称传输参数和极化转换率

如图 3(b) 所示, y 极化波极化转换率在 110~210 THz 频率范围超过了 0.97, 另外在相同频率范围内 x 极化波的极化转换率小于 0.03. 表明在 110~210 THz 频率范围中, x 极化波几乎不能转化为 y 极化波, 而 y 极化波转化为 x 极化波的比率达到 97% 以上, 实现了几乎纯粹的 y 极化波的极化转换. 根据以上结果, 该结构能实现高透射而且超宽带的不对称传输, 同时能实现高效率的极化转换.

2.3 极化旋转角和椭偏度

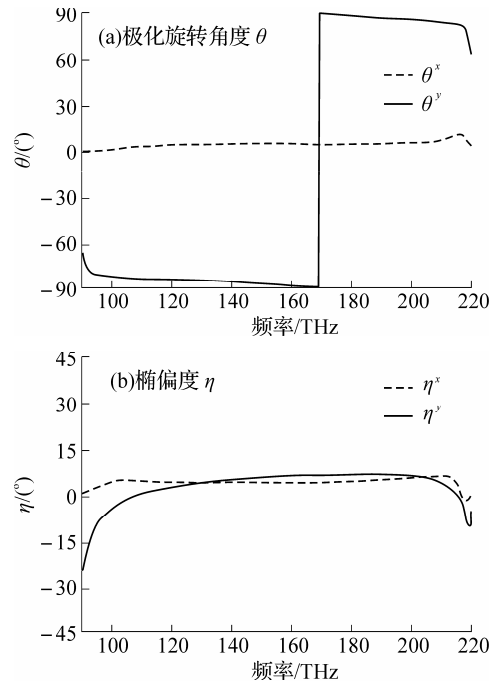
为进一步说明设计的手征结构对于光波的旋光性, 研究了线极化波极化旋转角和椭偏度. 光波极化旋转状态可用斯托克斯公式来描述. 对于 x 极化波入射, 斯托克斯公式可表示为^[25]:

$$\begin{cases} S_0 = |T_{xx}|^2 + |T_{yx}|^2, \\ S_1 = |T_{xx}|^2 - |T_{yx}|^2, \\ S_2 = 2|T_{xx}||T_{yx}|\cos\varphi, \\ S_3 = 2|T_{xx}||T_{yx}|\sin\varphi, \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\varphi = \arg(T_{yx}) - \arg(T_{xx})$, 极化旋转角 θ 和椭偏度 η 可以表示为^[25]:

$$\begin{cases} \theta = (\arctan(S_2 / S_1)) / 2, \\ \eta = (\arcsin(S_3 / S_0)) / 2. \end{cases} \quad (6)$$

根据以上公式, 计算出线极化波的极化旋转角 θ 和椭偏度 η . 图 4(a) 显示的是极化旋转角曲线图. 从图中可见, 在 169.4 THz 频率处, y 极化波的极化旋转角达到最大值 89.98°, 但对于 x 极化波在 90~220 THz 的频率范围, 极化旋转角小于 12°. 以上结果意味着 y 极化波可以转化为 x 极化波, 但大部分的 x 极化波不能转化成 y 极化波. 这与我们在图 2 得到的较高传输系数 T_{xy} 相一致, 同时与图 3 中很高的极化转换率相一致. 图 4(b) 显示的是 x 极化波和 y 极化波在整个频带的椭偏度. 在 111~198 THz 的频率范围, x 极化波和 y 极化波的椭偏度都小于 7°. 众所周知, 对于线极化波, $\eta = 0^\circ$, 对于圆极化波, $\eta = \pm 45^\circ$. 因此, 图 4(b) 显示的结果意味着在 111~198 THz 频率范围, 光波的线极化程度较高.

图4 x 极化入射波和 y 极化入射波的极化旋转角和椭偏度

整个图 4 表明, y 极化入射波的极化旋转角达到了将近 90° , 同时椭圆度都小于 7° , 这些结果意味着 y 极化波能够转变成 x 极化波. 因此, 本文中提出的手征结构能够实现色散很小的旋光性, 对于无色散的偏振器设计具有潜在应用价值.

2.4 电场分布

为更加深入地验证以上的分析和更好地理解以上结果, 分析了在不同谐振频率下(120, 140, 160, 180 THz)电场分布情况, 具体如图 5 所示. 图 5(a)、(c)、(e)和(g)显示, 在 120, 140, 160, 180 THz 频率处, x 极化波的电场方向转变了 0° 或者 180° , 这意味着 x 极化波的极化状态没有发生改变. 同时, 图 5(b)、(d)、(f)和(h)显示, 在相同频率下, y 极化波的电场方向发生了 90° 或者 -90° 的改变, 这表示在这些频率处, y 极化波转变为 x 极化波. 这些结果同以上结论相吻合.

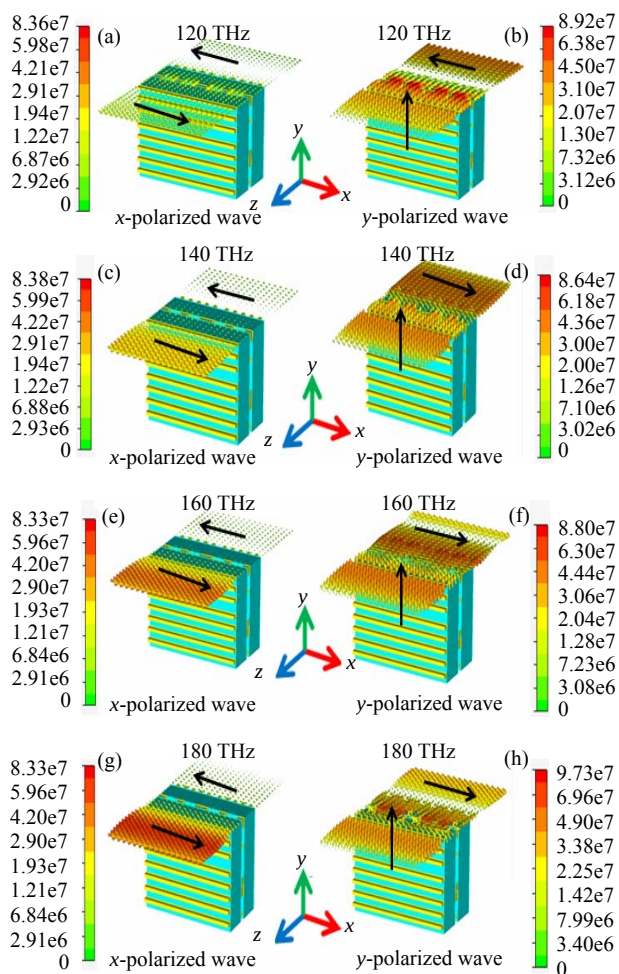


图 5 不同频率下 x 极化入射波(a, c, e 和 g)和 y 极化入射波的电场分布(b, d, f 和 h)

3 结语

提出了一种结构简单的三层光栅手征超介质结构, 该结构在光频段能同时实现超带宽、高效率的线极化波的不对称传输和极化转换. 利用频域有限积分技术, 通过数值模拟, 从不同角度验证了不对称传输参数的正确性. 该结构能实现不对称传输参数在 111~198 THz 的频带范围内达到 0.9 以上, 同时在该频段内实现的交叉极化转换率达到 97% 以上, 这些结果比之前的文献报道结果有显著改进. 最后, 极化旋转角、椭圆度和不同频率处电场分布情况的研究也验证了不对称传输和极化转换结果的正确性. 该手征结构在极化转换器和光学二极管等光学器件中有潜在的实际应用价值.

参考文献:

- [1] Zhou J F, Dong J F, Wang B N, et al. Negative refractive index due to chirality[J]. *Physical Review B*, 2009, 79 (12):121104.
- [2] 李杰, 董建峰. 光轴平行于界面的单轴手征介质中的负折射研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(11):214-220.
- [3] Decker M, Ruther M, Kriegler C E, et al. Strong optical activity from twisted-cross photonic metamaterials[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(16):2501-2503.
- [4] Hannam K, Powell D A, Shadrivov I V, et al. Broadband chiral metamaterials with large optical activity[J]. *Physical Review B*, 2014, 89(12):125105.
- [5] Gorkunov M V, Ezhov A A, Artemov V V, et al. Extreme optical activity and circular dichroism of chiral metal hole arrays[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(22):221102.
- [6] Shao J, Li J, Wang Y H, et al. Enhanced circular dichroism based on the dual-chiral metamaterial in terahertz regime[J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(5):418-422.
- [7] Fedotov V A, Mladyonov P L, Prosvirnin S L, et al. Asymmetric propagation of electromagnetic waves through a planar chiral structure[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(16):167401.
- [8] 刘道亚, 董建峰. 平面手征超介质不对称传输特性研究进展[J]. *材料导报*, 2013, 27(19):117-121.
- [9] Mutlu M, Akosman A E, Serebryannikov A E, et al. Diode-like asymmetric transmission of linearly polarized waves using magnetoelectric coupling and electromagnetic wave tunneling[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108 (21):213905.
- [10] Huang C, Feng Y, Zhao J, et al. Asymmetric electro-magnetic wave transmission of linear polarization via

- polarization conversion through chiral metamaterial structures[J]. *Physical Review B*, 2012, 85(19):195131.
- [11] Liu D Y, Li M H, Zhai X M, et al. Enhanced asymmetric transmission due to Fabry-Perot-like cavity[J]. *Optics Express*, 2014, 22(10):11707-11712.
- [12] Song K, Liu Y H, Luo C R, et al. High-efficiency broadband and multiband cross-polarization conversion using chiral metamaterial[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2014, 47(50):505104.
- [13] Singh R, Plum E, Menzel C, et al. Terahertz metamaterial with asymmetric transmission[J]. *Physical Review B*, 2009, 80(15):153104.
- [14] Zhai X M, Zhou X, Yao L F, et al. Complementary chiral metamaterial with multi-band asymmetric transmission and mutual conversion[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Application*, 2016, 30(8):1005-1020.
- [15] Cheng Y Z, Gong R Z, Wu L. Ultra-broadband linear polarization conversion via diode-like asymmetric transmission with composite metamaterial for terahertz waves[J]. *Plasmonics*, 2016, 12(4):1113-1120.
- [16] Menzel C, Helgert C, Rockstuhl C, et al. Asymmetric transmission of linearly polarized light at optical metamaterials[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(25):253902.
- [17] Liu D Y, Luo X Y, Liu J J, et al. A planar chiral nanostructure with asymmetric transmission of linearly polarized wave and huge optical activity in near-infrared band[J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(12):256-261.
- [18] Li Z C, Chen S Q, Tang C C, et al. Broadband diodelike asymmetric transmission of linearly polarized light in ultrathin hybrid metamaterial[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(20):201103.
- [19] Xu Y Q, Shi Q C, Zhu Z, et al. Mutual conversion and asymmetric transmission of linearly polarized light in bilayered chiral metamaterial[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21):25679-25688.
- [20] Liu D J, Xiao Z Y, Ma X L, et al. Asymmetric transmission of chiral metamaterial slab with double L resonators[J]. *Optics Communications*, 2015, 338(3):359-365.
- [21] Wang H B, Zhou X, Tang D F, et al. Diode-like broadband asymmetric transmission of linearly polarized waves based on Fabry-Perot-like resonators[J]. *Optica Acta International Journal of Optics*, 2017, 64(7):750-759.
- [22] Ordal M A, Long L L, Bell R J, et al. Ward Optical properties of the metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the infrared and far infrared[J]. *Applied Optics*, 1983, 22(7):1099-1119.
- [23] Menzel C, Rockstuhl C, Lederer F. An advanced Jones calculus for the classification of periodic metamaterials[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(5):3464-3467.
- [24] Xiao Z Y, Liu D J, Ma X L, et al. Multi-band transmissions of chiral metamaterials based on Fabry-Perot like resonators[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6):7053-7061.
- [25] Cong L Q, Cao W, Tian Z, et al. Manipulating polarization states of terahertz radiation using metamaterials[J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(11):115013.

Ultra-broad band asymmetric transmission based on chiral metamaterials in optical region

WANG Chuan, WANG Hui-bo, PAN Wei-kang, KANG Yuan-yuan, DONG Jian-feng*
(Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In this paper, a genre of three-layered chiral metamaterial is proposed to realize ultra-broad band diode-like asymmetric transmission of linearly polarized waves and high-efficiency polarization conversion in the optical region. The chiral structure consists of three layers of sub-wavelength gratings. Numerical results reveal that the asymmetric transmission parameter enables to achieve the maximum of 0.93 and surpass 0.9 ranging from 111 to 198 THz for linearly polarized waves. Meanwhile, the polarization conversion ratio can exceed 97% in the same region. In addition, the rotation angle, ellipticity and electric field distributions are analyzed to better understand the asymmetric transmission and polarization conversion. The work in this study will offer a new opportunity in many optical applications of optical devices such as polarization transformers and diode-like devices.

Key words: chiral metamaterial; asymmetric transmission; ultra-broad band; polarization conversion

(责任编辑 章践立)