

复合结构螺旋超材料对光波前的高效调控

汪肇坤 杨振宇 陶欢 赵茗

High-efficiency wavefront control with based on helical metamaterials

Wang Zhao-Kun Yang Zhen-Yu Tao Huan Zhao Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 217802 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.217802

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.217802>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

宽入射角度偏振不敏感高效异常反射梯度超表面

Polarization-insensitive and broad-angle gradient metasurface with high-efficiency anomalous reflection

物理学报.2015, 64(23): 237802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.237802>

工字形太赫兹超材料吸波体的传感特性研究

Study on sensing characteristics of I-shaped terahertz metamaterial absorber

物理学报.2015, 64(11): 117801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.117801>

用最小结构单元频率选择表面实现大入射角宽频带的透波材料

Wideband and large incident angle wave transparent material based on frequency selective surface with miniaturized elements

物理学报.2014, 63(13): 137803 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.137803>

基于加权实数编码遗传算法的超材料优化设计

Optimization of metamaterial based weighted real-coded genetic algorithm

物理学报.2014, 63(8): 087804 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.087804>

基于集总元件和负微分元件的有源可调谐超材料传输线

Active tunable metamaterial transmission line based on lumped elements and negative differential devices

物理学报.2014, 63(2): 027802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.027802>

复合结构螺旋超材料对光波前的高效调控*

汪肇坤¹⁾ 杨振宇^{1)2)†} 陶欢¹⁾ 赵茗¹⁾

1)(华中科技大学光学与电子信息学院, 武汉 430074)

2)(华中科技大学深圳研究院, 深圳 518057)

(2016年7月4日收到; 2016年8月3日收到修改稿)

近年来, 超材料和超表面因为一些不同于传统材料的新奇性质一直被广泛研究, 而基于超材料或者是超表面的波前控制也是其中的一个热门研究领域. 迄今为止, 已经提出了很多不同的结构来对反射光和透射光的波前进行调控, 在已知的结构中, 反射光的波前调控效率已经可以达到较高数值, 但是很少有报道能够使用超材料简单高效地调制透射光的波前. 本文提出了一种由相同几何结构的左旋和右旋结构复合而成的螺旋超材料. 通过使用时域有限差分方法进行仿真, 发现这种螺旋结构将会在入射光和透射光之间引入一个可控的相位变化, 从而可直接对透射光波前进行调控. 仿真结果还表明, 该复合结构螺旋超材料在较宽的波长范围内可以达到近64%的透射率. 最后通过将该螺旋材料沿着X轴排布成有着连续相位变化的阵列, 可以在近红外区域(1.0—1.4 μm)观察到反常折射现象, 仿真结果与理论计算得出的反常折射角十分符合.

关键词: 超材料, 螺旋结构, 波前控制, 圆偏光转换

PACS: 78.67.pt, 61.46.-w, 81.05.Xj, 42.70.-a

DOI: 10.7498/aps.65.217802

1 引言

超材料作为一种新型的纳米材料, 由于具有一些不同于传统材料的新奇性质一直被广泛研究, 而如何高效控制光波前则是其中的热门研究领域. 近年来, 科学家依据超材料能够调控波前的性质已经设计出了很多结构来对入射光的传播进行调制. 例如有一种V形天线阵列可以对线偏光的传播方向进行任意调制^[1], 而另外一种棒状天线结构则能够控制圆偏振光的波前^[2]. 除上面提到的两种结构外, 还有许多超材料结构被设计出来, 并就其对透射光或反射光传播的影响进行了研究^[3–13]. 在这些已知的工作中, 针对反射光的波前控制已经较成熟, 有些超材料的反射效率最高已经可以达到80%^[14]. 但是很少有如何能够对透射光的传播进行高效调制的报道.

不同于常用的通过少层超表面的干涉和近场

耦合作用来对光场进行调控^[15], 螺旋超材料因为在螺旋线之间有着强烈的耦合作用从而为高效控制波前提供了一种可能的方法. 在以前的工作中, 我们曾提出了一种新颖的复合螺旋结构^[16], 这种复合螺旋由有着相同几何结构的左旋螺旋和右旋螺旋组合而成. 单一旋向的螺旋超材料有着较好的圆二向色性(circular dichroism)^[17], 即左旋光和右旋光分别入射时它们的透过率不同而转换率相同, 可以用来设计圆偏振器. 而我们提出的这种复合螺旋则是拥有较高的圆转换二向色性(circular conversion dichroism), 即两种旋向的圆偏光入射后转换率不同, 可以应用于圆偏振转换等器件, 而同时这种高的圆偏光转换效率为得到高效的透射光波前调控提供了可能. 本文进一步研究这种复合螺旋结构对透射光波前的调控作用. 通过使用时域有限差分(finite-difference time-domain, FDTD)算法, 我们发现这种结构会在透射光和入射光之间

* 国家自然科学基金(批准号: 61475058)、武汉科学技术资金(批准号: 2015010101010001)、深圳基础研究项目基金(批准号: JCYJ20140419131733980)和高性能复杂制造国家重点实验室开放基金(批准号: Kfkt2013-07)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zyang@mail.hust.edu.cn

引入一个可控的相位变化(ϕ), 而这个相位变化和螺旋的起始角(θ)之间有一个近似的线性关系, 即 $\phi = \pm 2\theta$. 并且在波长为1—1.4 μm 的宽谱工作区域内, 通过仿真计算, 可以发现这种螺旋结构的透射率平均超过50%, 最大的透射率能够达到64%. 基于上面螺旋结构与透射光相位变化间的关系, 我们设计了一个由12个结构相同的复合螺旋组成的螺旋阵列, 将这12个螺旋沿着 X 轴排列, 改变它们的起始角, 使之在分界面处形成稳定的相位变化梯度. 接着以圆偏光正入射到该螺旋阵列上, 观察到了反常折射现象, 该反常折射角与经过计算的理论值匹配得很好.

表1 本文中一些性能参数的定义

Table 1. Definitions of the performance parameters used in this paper.

参数	定义
圆偏光转换率	$A_{\text{out}}^{\text{LCP}}/A_{\text{in}}^{\text{RCP}}$ 或 $A_{\text{out}}^{\text{RCP}}/A_{\text{in}}^{\text{LCP}}$
透射率	$I_{\text{out}}^{\text{LCP}}/I_{\text{in}}^{\text{RCP}}$ 或 $I_{\text{out}}^{\text{RCP}}/I_{\text{in}}^{\text{LCP}}$
相位变化 ϕ	$Ph_{\text{out}}^{\text{LCP}} - Ph_{\text{in}}^{\text{RCP}}$ 或 $Ph_{\text{out}}^{\text{RCP}} - Ph_{\text{in}}^{\text{LCP}}$

注: $A_{\text{out/in}}^{\text{LCP/RCP}}$, $I_{\text{out/in}}^{\text{LCP/RCP}}$ 和 $Ph_{\text{out/in}}^{\text{LCP/RCP}}$ 分别代表透射光或入射光中左旋光或右旋光分量的振幅、光强和相位.

我们提出的复合螺旋超材料, 尽管结构相较于一般的超表面较为复杂, 但是如今通过三维激光直写、掠射角沉积和分子自组装技术^[18–20]等方法已经可以制备出微米尺寸的螺旋结构. 随着纳米技术

的发展以及结合动态光场调控技术, 我们相信这种螺旋结构超材料在传统光学^[21]、生物探测^[22]和药物学^[23]等领域会有很好的应用前景.

在本文中用到了一些性能参数, 为了确保它们清晰易懂, 表1给出了它们的定义.

2 仿真模型

本文提出的超材料实际上是由相同几何结构的复合螺旋组成的阵列, 如图1所示. 单个的复合螺旋结构由一部分左螺旋和一部分右螺旋连接而成, 两种螺旋的材料同为金, 具有相同的尺寸, 由一个小球连接. 在我们的设计中, 如果复合螺旋的左螺旋部分更为接近入射光, 那么就将其定义为左右螺旋. 如果右螺旋部分更接近入射光, 那么将其定义为右左螺旋. 在图1中, 复合螺旋的螺旋直径 DH 为110 nm, 螺旋线直径 DW 为40 nm, 螺旋的周期 NH 为3, 螺旋节距 LH 和周期间距 SG 均为330 nm.

在FDTD仿真中, 两种类型的圆偏光, 左旋圆偏光(LCP)和右旋圆偏光(RCP)被分别用作光源沿着 Z 轴正方向入射. 在 Z 方向上, 使用完美匹配层(PMLs)作为边界条件来避免透射光被反射回计算区域. 在 X 和 Y 方向上, 因为螺旋材料的周期性, 我们使用了周期性边界条件(PBC). 仿真中金材料的介电常数采用的是洛伦兹-杜德模型^[24,25].

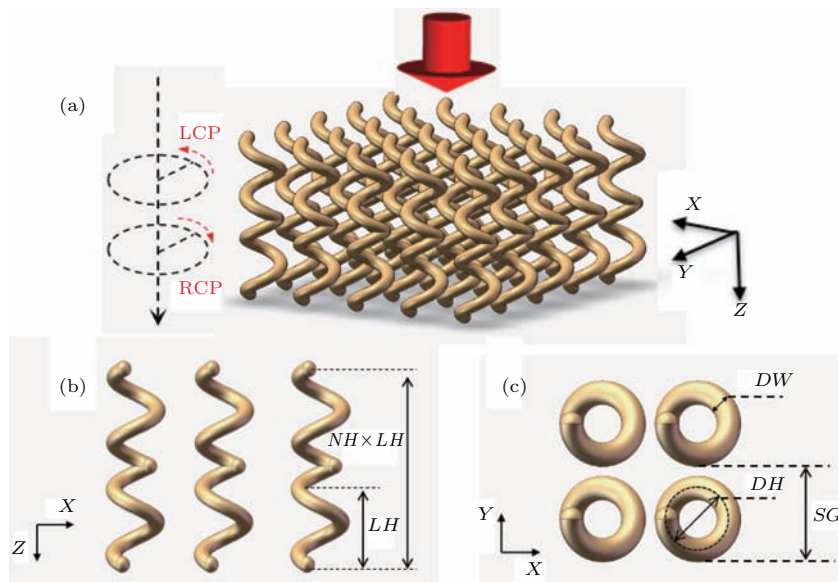


图1 (网刊彩色) 单个复合螺旋超材料的结构示意图 (a) 三维(3D)视图; (b) 侧视图; (c) 俯视图

Fig. 1. (color online) Schematic diagrams of the single composite helical metamaterials: (a) Three-dimensional (3D) view; (b) side view; (c) top view.

3 仿真结果与分析

3.1 相位变化关系和高圆偏光转换率

在仿真中, 为了方便观察, 我们将起始角定义为螺旋起点所在的半径与 X 轴正半轴之间的夹角. 图 2(a)—(d) 分别表示了起始角为 0° , 90° , 180° 和 270° 的复合螺旋.

接下来, 我们分别对起始角从 0° — 360° 变化的右左螺旋和左右螺旋进行了仿真. 首先, 使用左旋圆偏光正入射到右左螺旋上, 然后探测透射光的振幅和相位信息, 经过计算得出透射光和入射光之间的圆偏光转换率和相位变化. 图 3(a) 和图 3(b) 分别显示了右左螺旋在不同起始角情况下的圆偏光转换率和相位变化. 同样, 使用右旋圆偏光正入射到左右螺旋上, 相应的结果显示在图 3(c) 和图 3(d) 中. 从这几幅图中很明显地可以观察到相位变化 ϕ 和螺旋起始角 θ 之间存在一个近似线性的

关系, 即 $\phi = \pm 2\theta$. 同时不管起始角如何变化, 左右螺旋和右左螺旋的圆偏光转换率都稳定在 80% 左右. 值得注意的是相位变化和圆偏光转换率都与工作波长无关, 在波长为 1.0 — $1.4 \mu\text{m}$ 的范围内, 上述结论都是成立的.

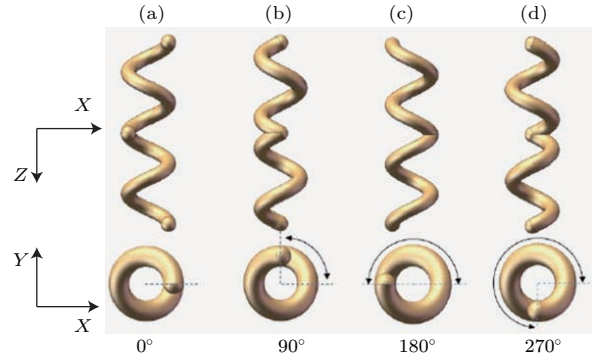


图 2 (网刊彩色) 不同起始角的螺旋的结构示意图 (a) $\theta = 0^\circ$; (b) $\theta = 90^\circ$; (c) $\theta = 180^\circ$; (d) $\theta = 270^\circ$
 Fig. 2. (color online) Schematic diagrams of the helices with different initial angles: (a) $\theta = 0^\circ$; (b) $\theta = 90^\circ$; (c) $\theta = 180^\circ$; (d) $\theta = 270^\circ$.

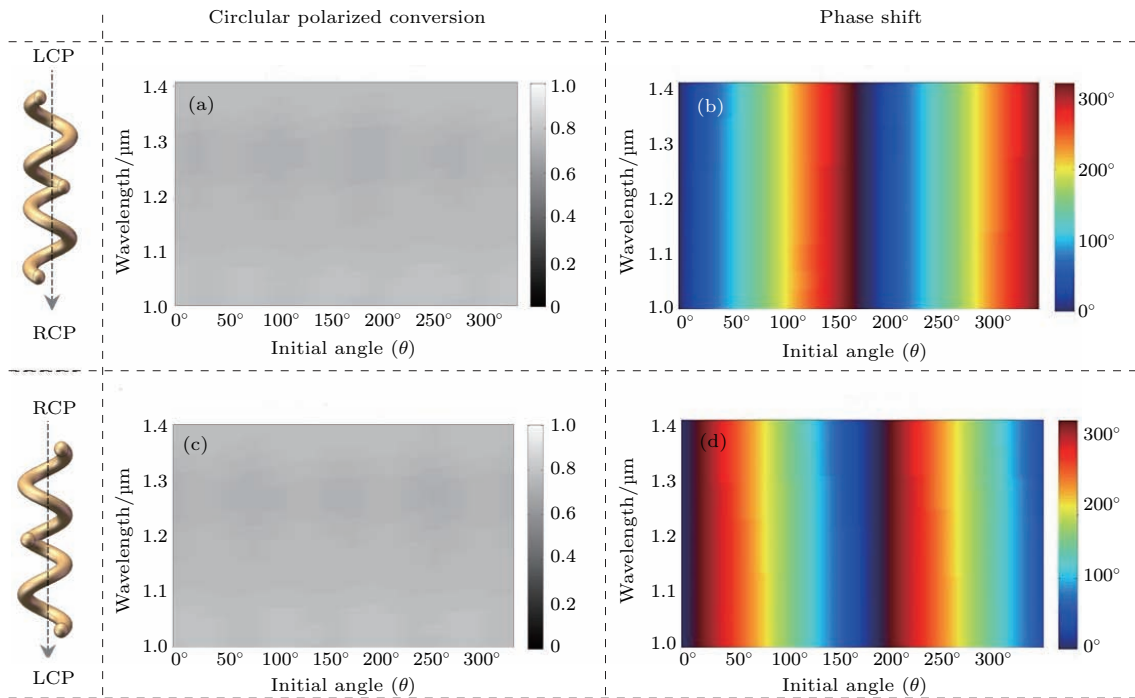


图 3 (网刊彩色) 波长为 1.0 — $1.4 \mu\text{m}$ 时不同起始角的复合螺旋透射光的圆偏光转换率和相位变化 (a), (b) 左旋光入射探测透射的右旋光; (c), (d) 右旋光入射探测透射的左旋光
 Fig. 3. (color online) The circular polarized conversion and the phase shift of the helices with different initial angles in the ranges 1.0 — $1.4 \mu\text{m}$: (a), (b) The transmitted RCP light with the LCP light incidence; (c), (d) the transmitted LCP light with the RCP light incidence.

复合螺旋结构的这种高圆偏光转换率的性质可以通过螺旋的表面电流来解释. 图 4 显示了圆偏光通过左右螺旋时产生的表面电流以及透射光和

反射光的光谱, 图 4(a) 和图 4(b) 分别是两种圆偏光的透过率和反射率光谱, 图 4(c) 和图 4(d) 分别是右旋光和左旋光入射时复合螺旋结构上产生的

表面电流. 以左右螺旋为例, 从图 4(b) 可以看出, 当入射光的旋向和螺旋的旋向相同时, 会发生强烈相互作用, 从而大部分光会以相同旋向反射. 当左旋圆偏光入射时, 入射光首先与左螺旋部分接触, 可以看出复合螺旋顶部的能量很大, 大部分光被反射, 因此我们可以发现透射光中两种旋向的圆偏光

都很弱. 而当右旋圆偏光入射时, 它与左螺旋间的相互作用较小, 因此大部分的能量将会通过复合螺旋的上部分, 然后右旋光会与下部分的右螺旋产生较强的相互作用形成左旋光出射, 如图 4 所示. 这也是我们能得到 64% 的透射率的原因. 当然, 上述的结论对右左螺旋也适用.

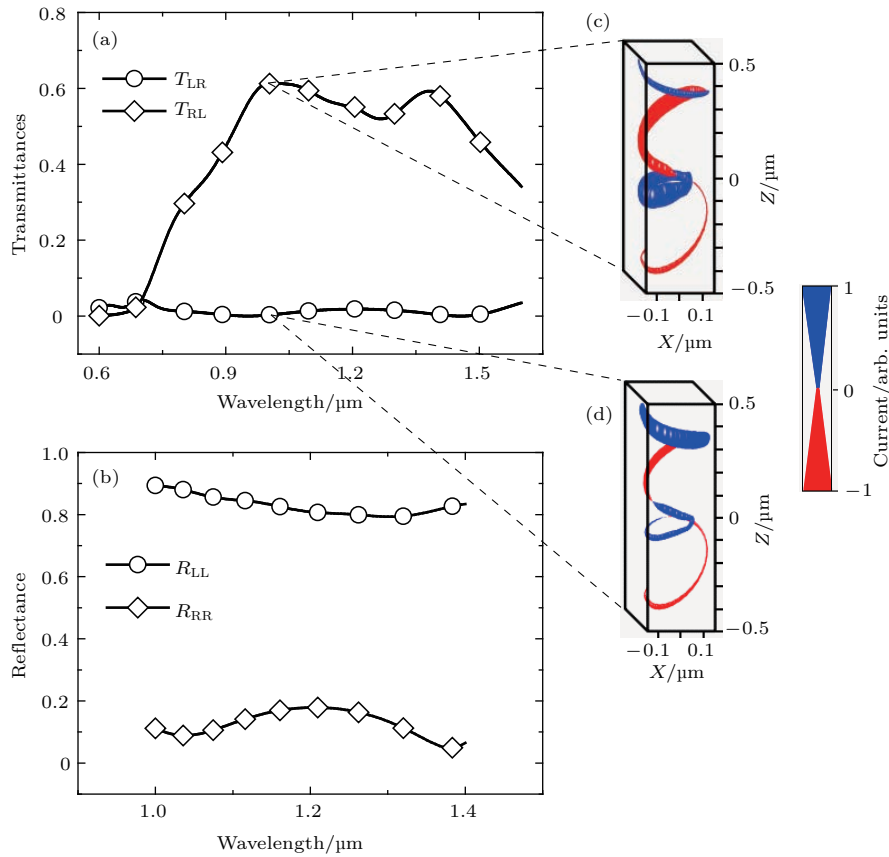


图 4 (网刊彩色) 圆偏光通过左右螺旋时的表面电流以及透射光和反射光光谱 (a) 两种圆偏光的透射率光谱; (b) 两种圆偏光的反射光谱; (c) 右旋光入射时的表面电流; (d) 左旋光入射时的表面电流
 Fig. 4. (color online) The transmittance and reflectance spectra for both circular polarized lights and the surface current density of L-R helix: (a) Transmittance spectra for both circular polarized lights; (b) reflectance spectra for both circular polarized lights; (c) the surface current with RCP light incidence; (d) the surface current with LCP light incidence.

值得注意的是, 我们提出的复合螺旋超材料有很多的结构参数, 如螺旋节距 LH 、螺旋周期 NH 、螺旋直径 DH 和螺旋线直径 DW 等. 图 5 选取了其中两个对效率影响较大的参数, 图 5(a) 是保持其他参数不变, 分别改变螺旋节距 LH 为 250, 300, 350 和 400 nm 所得到的圆偏光转换率, 而图 5(b) 则是改变螺旋的周期 NH , 使之分别为 2, 3 和 4. 从图 5 可以看出, 当螺旋节距约为 350 nm、螺旋周期为 3 时复合螺旋的圆偏光转换率较高. 所以在设计螺旋的结构参数时, 合理地考虑这些参数能够有效地提高螺旋的圆偏光转换率.

而透射光的相位变化和螺旋起始角之间的线性关系则可以通过琼斯矩阵来解释^[7]. 一个各向异性的单元结构的琼斯矩阵一般可以写为

$$M = \mathbf{R}(-\theta) \begin{pmatrix} t_o & t_{o'} \\ t_{e'} & t_e \end{pmatrix} \mathbf{R}(\theta), \quad (1)$$

其中, t_o , $t_{o'}$, $t_{e'}$ 和 t_e 分别是线偏振光沿着各向异性结构的两个轴入射时的复数传输系数.

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

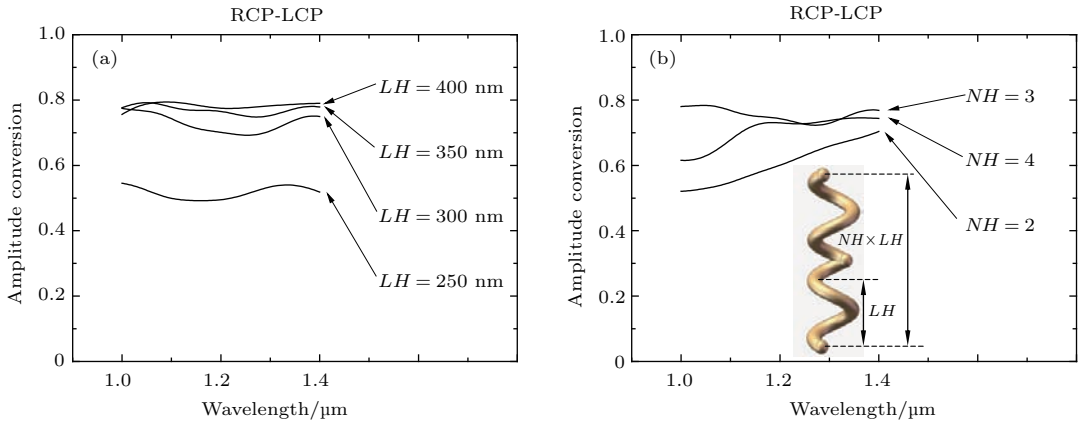


图5 (网刊彩色) 不同结构参数下的圆偏光转换率 (a) 不同的螺旋节距; (b) 不同的螺旋周期

Fig. 5. (color online) The amplitude conversion with different structure parameters: (a) Different LH ; (b) different NH .

是旋转矩阵, 其中 θ 是旋转角度, 也就是我们螺旋设定中的起始角. 因此, 当入射光为左旋圆偏光或者是右旋圆偏光时, 透射光的琼斯矩阵可以写为

$$\begin{aligned}
 E_{tr}^{LCP} &= M \cdot E_{in}^{LCP} \\
 &= M \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} = \frac{(t_o + t_e) + i(t_{o'} - t_{e'})}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \\
 &\quad + \frac{(t_o - t_e) + i(t_{o'} + t_{e'})}{2} \exp(i2\theta) \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}, \tag{3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 E_{tr}^{RCP} &= M \cdot E_{in}^{RCP} \\
 &= M \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} = \frac{(t_o + t_e) - i(t_{o'} - t_{e'})}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix} \\
 &\quad + \frac{(t_o - t_e) - i(t_{o'} + t_{e'})}{2} \exp(-i2\theta) \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}. \tag{4}
 \end{aligned}$$

由 (3) 和 (4) 式可以看出, 当圆偏光入射到螺旋结构之后产生的透射光可以分为两个部分: 第一部分是与入射光有相同旋向的圆偏光; 第二部分是与入射光的旋向相反的圆偏光. 很明显螺旋结构将会在入射光和有相反旋向的透射光之间引入一个额外的相位变化. 相位变化和螺旋的起始角有一个线性关系, 即 $\phi = \pm 2\theta$.

3.2 螺旋阵列的反常折射现象

正如上面所提到的, 超材料可以通过在光传播路径上引入相位突变来调制波前. 正是这引入的相位突变, 使我们可以重新来定义折射定律. 在引入

相位突变之后, 广义的斯涅耳定律可以表示为^[1]

$$\sin(\theta_t)n_t - \sin(\theta_i)n_i = \frac{\lambda_0}{2\pi} \frac{d\phi}{dx}, \tag{5}$$

其中, λ_0 是入射光的波长; θ_i 和 θ_t 分别代表入射角和折射角; n_i 和 n_t 分别代表入射面和折射面的折射率; $d\phi/dx$ 是沿着界面引入的相位不连续梯度.

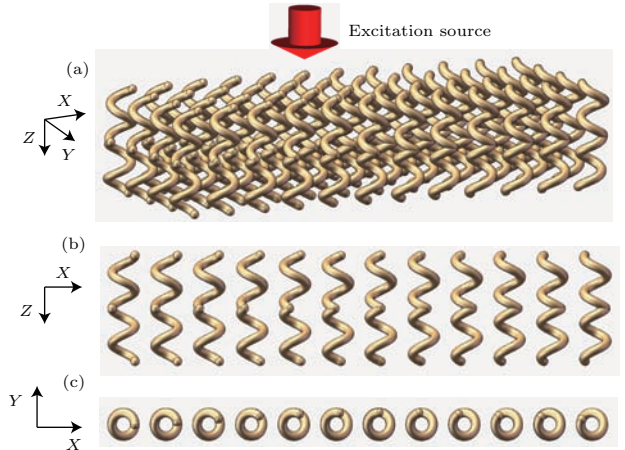


图6 (网刊彩色) 不同起始角的复合螺旋组成的螺旋阵列的结构示意图 (a) 3D 视图; (b), (c) 一个阵列单元的侧视图和俯视图

Fig. 6. (color online) Schematic diagrams of the helical metamaterials with different initial angles: (a) 3D view; (b), (c) unit cell of the metamaterials.

(5) 式表明, 当入射角和两个界面的折射率都固定之后, 我们可以通过设计一个合适的相位变化梯度来得到任意的折射角. 因此, 根据之前我们得到的复合螺旋结构的透射光与螺旋起始角之间的关系 ($\phi = \pm 2\theta$), 可以将有着不同起始角的螺旋排列成阵列来得到所需要的相位变化梯度. 图6是该螺旋阵列的结构示意图. 一个阵列周期包含了12个左右螺旋, 相邻的两个螺旋之间的起始角相差

$\pi/12$, 这样整体的相位变化可以覆盖 0 到 2π , 从而对波前进行完全的调制. 螺旋在 X 和 Y 方向上的间距都是 330 nm, 因此得到的相位梯度 $d\phi/dx$ 为 $0.5\pi \text{ rad}/\mu\text{m}$, 然后我们可以根据广义折射定律计算出反常折射角.

图 7 是透射光电场的相位分布, 其中图 7(a)—(c) 分别是在波长为 1, 1.2 和 1.4 μm 的右旋光正入射的情况下进行的仿真. 从图 7 可以很明显的看出, 透射光的波前不再与交界面平行, 而是向着右下方传输. 由图 7 还可以看出光正入射到螺旋阵列之后, 确实发生了反常折射现象. 表 2 将通过广义折射定律计算出的和仿真中测量出的反常折射角进行了对比, 结果显示仿真结果与理论值匹

配得很好, 设计的这种螺旋阵列结构实现了我们所预期的调制波前的功能.

表 2 仿真测量和通过广义斯涅尔定律计算出的反常折射角
Table 2. The anomalous refraction angles measured in the simulation and derived by the generalized Snell's law.

波长/ μm	反常折射角/($^\circ$)			
	左右螺旋		右左螺旋	
	仿真	理论	仿真	理论
1.0	-14.5	-14.5	14.4	14.5
1.2	-17	-17.5	17.2	17.5
1.4	-20.2	-20.5	20.3	20.5

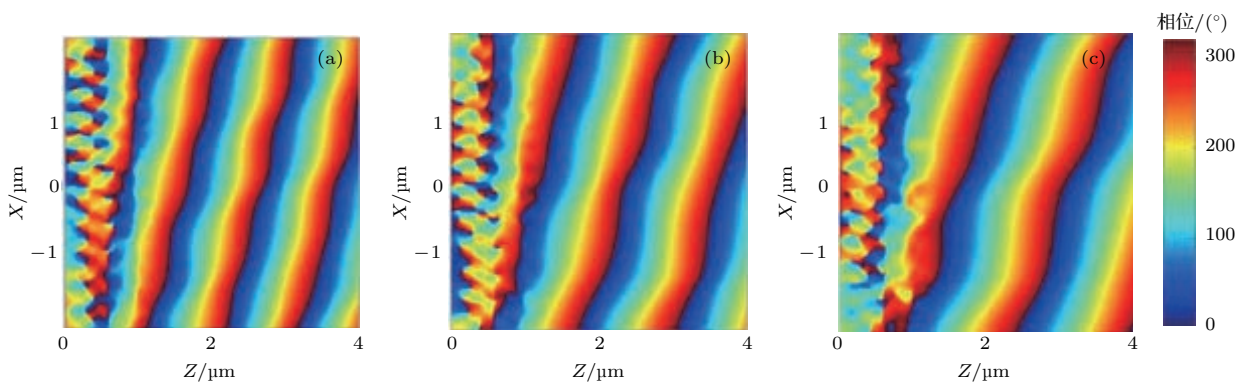


图 7 (网刊彩色) 反常折射时电场的相位分布 (a), (b) 和 (c) 分别是波长为 1, 1.2 和 1.4 μm 的右旋光入射时探测左旋光的相位分布图

Fig. 7. (color online) The phase distribution of the electrical field in the anomalous refraction: (a), (b), and (c) LCP transmitted waves with the RCP wave excitations whose wavelengths are 1, 1.2, and 1.4 μm , respectively.

4 结 论

本文提出了一种由复合螺旋组成的新型超材料结构. 经过研究发现这种结构将会在透射光和入射光之间引入一个可控的相位突变, 这种相位突变与螺旋的起始角有线性关系, 即 $\phi = \pm 2\theta$. 然后将不同起始角的复合螺旋排列成螺旋阵列, 通过分析透射光波前的振幅和相位分布, 我们观察到了光通过螺旋阵列发生的反常折射现象, 并且在宽带工作区域内有近 64% 的高透射率.

与之前提出的超表面结构相比, 螺旋超材料是有着相对复杂的结构. 但是随着纳米制造技术的发展, 目前已经有一种方法可以实现纳米螺旋结构的制备, 如三维激光直写、掠射角沉积和分子自组装技术 [18–20] 等. 虽然本文设计的螺旋结构工作波长

是 1.0–1.4 μm , 但是通过合理地设计螺旋结构的各种参数和改变螺旋的材料, 这种复合螺旋结构超材料应该可以工作在任意需要的带宽上.

参考文献

- [1] Yu N, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [2] Huang L, Chen X, Muehlenbernd H, Li G, Bai B, Tan Q, Jin G, Zentgraf T, Zhang S 2012 *Nano Lett.* **12** 5750
- [3] Zhao Y, Alu A 2013 *Nano Lett.* **13** 1086
- [4] Yang Y, Wang W, Moitra P, Kravchenko I I, Briggs D P, Valentine J 2014 *Nano Lett.* **14** 1394
- [5] Li Y, Liang B, Gu Z M, Zou X Y, Cheng J C 2013 *Sci. Rep.* **3** 2546
- [6] Yu N, Genevet P, Aieta F, Kats M A, Blanchard R, Aoust G, Tetienne J P, Gaburro Z, Capasso F 2013 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **19** 4700423
- [7] Yu N, Capasso F 2014 *Nat. Mater.* **13** 139

- [8] Blanchard R, Aoust G, Genevet P, Yu N, Kats M A, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Phys. Rev. B* **85** 155457
- [9] Pendry J B, Schurig D, Smith D R 2006 *Science* **312** 1780
- [10] Shalaev V M, Cai W S, Chettiar U K, Yuan H K, Sarychev A K, Drachev V P, Kildishev A V 2005 *Opt. Lett.* **30** 3356
- [11] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire M C K 2004 *Science* **305** 788
- [12] Valentine J, Zhang S, Zentgraf T, Ulin-Avila E, Genov D A, Bartal G, Zhang X 2008 *Nature* **455** 376
- [13] Meinzer N, Barnes W L, Hooper I R 2014 *Nat. Photon.* **8** 889
- [14] Zheng G X, Muhlenbernd H, Kenney M, Li G X, Zentgraf T, Zhang S 2015 *Nat. Nanotechnol.* **10** 308
- [15] Cheng H, Liu Z C, Chen S Q, Tian J G 2015 *Adv. Mater.* **27** 5410
- [16] Kaschke J, Blume L, Wu L, Thiel M, Bade K, Yang Z, Wegener M 2015 *Adv. Opt. Mater.* **3** 1411
- [17] Gansel J K, Thiel M, Rill M S, Decker M, Bade K, Saile V, Freymann G, Linden S, Wegener M 2009 *Science* **325** 1513
- [18] Kaschke J, Wegener M 2015 *Opt. Lett.* **40** 3986
- [19] Robbie K, Beydaghyan G, Brown T, Dean C, Adams J, Buzea C 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 1089
- [20] Kuzyk A, Schreiber R, Fan Z, Pardatscher G, Roller E M, Hoesgele A, Simmel F C, Govorov A O, Liedl T 2012 *Nature* **483** 311
- [21] Smith D R, Mock J J, Starr A F, Schurig D 2005 *Phys. Rev. E* **71** 036609
- [22] Kabashin A V, Evans P, Pastkovsky S, Hendren W, Wurtz G A, Atkinson R, Pollard R, Podolskiy V A, Zayats A V 2009 *Nat. Mater.* **8** 867
- [23] Luo X G, Qiu T, Lu W B, Ni Z H 2013 *Mater. Sci. Eng. R-Rep.* **74** 351
- [24] Rakic A D, Djurisic A B, Elazar J M, Majewski M L 1998 *Appl. Opt.* **37** 5271
- [25] Yang Z Y, Zhao M, Lu P X, Lu Y F 2010 *Opt. Lett.* **35** 2588

High-efficiency wavefront control with based on helical metamaterials*

Wang Zhao-Kun¹⁾ Yang Zhen-Yu^{1)2)†} Tao Huan¹⁾ Zhao Ming¹⁾

1) (School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

2) (Shenzhen Research Institute of Huazhong University of Science and Technology, Shenzhen 518057, China)

(Received 4 July 2016; revised manuscript received 3 August 2016)

Abstract

Metamaterials or metasurfaces have been widely studied to manipulate the propagation of light by controlling the wavefront. In previous work, more and more structures were designed to study the reflected or the transmitted light. However, as far as we know, it is rarely reported how to efficiency tailor the wavefront, especially for transmitted light. Helical metamaterial, which has a relatively strong coupling effect among the helical nanowires, may provide an alternative to the wavefront control. In this study, a kind of complementary helical metamaterial with a left-handedness and a right-handedness helixes coupled to each other is proposed. The complementary helical metamaterial has a strong circular conversion dichroism, and it is expected to be a good candidate for generating phase shift and controlling wavefront with high efficiency. Using the finite-difference time-domain method, we find that this kind of helix has a high circular polarization conversion in a broadband, which often implies a high efficiency of the transmitted light. Moreover, it is also found that the structure will introduce a controllable phase shift (ϕ) between the incident and the transmitted light whose polarizations are orthogonal to each other. By calculating the surface current density of the helix, the performance of high circular polarization conversion is explained. Meanwhile, we also find that the phase shift has a linear relationship with the initial angle of the helix (θ), which is $\phi = \pm 2\theta$. This relationship can be explained exactly by Jones calculus. According to the generalized Snell's law, the refracted beam can have an arbitrary direction by designing a suitable constant gradient of phase discontinuity. And then, by arranging 12 helixes in an array with a constant phase gradient along the X -axis, the phenomenon of anomalous refraction with a high efficiency (64%) is observed in the near infrared range (1.0–1.4 μm). The angle of the anomalous refraction is in good agreement with the theoretical value. Compared with the metasurface, the helical metamaterial has a relatively complex structure. But with the development of the nanotechnology, there are several methods that can complete the propagations of nano helical structures, such as the direct laser writing, the glancing angle deposition, and the molecular self-assembly techniques. And by carefully designing the structure parameters of the helix, this kind of complementary helical metamaterial is expected to be an ideal candidate not only for traditional optics but also for biological detection and medical science.

Keywords: metamaterials, helical structure, wavefront controlling, circular polarization light

PACS: 78.67.pt, 61.46.-w, 81.05.Xj, 42.70.-a

DOI: 10.7498/aps.65.217802

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61475058), the Wuhan Science and Technology Project, China (Grant No. 2015010101010001), the Shenzhen Basic Research Project, China (Grant No. JCYJ20140419131733980), and the Open Fund of the State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, China (Grant No. Kfkt2013-07).

† Corresponding author. E-mail: zyang@mail.hust.edu.cn