

# 基于超表面结构的高效轨道角动量发生器研究

唐李光 高喜

(桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004)

**摘要** 提出一种能够灵活调控电磁波相位且具有高透射率的新型超表面单元,该结构单元是在介质层的两边对称刻蚀具有相同几何参数的M型结构构成.通过旋转结构单元,能够在 $0-2\pi$ 的范围内调控透射电磁波的相位,且不影响电磁波的透射率.基于这一特性,进一步设计了一种高传输效率的超表面,该超表面能够产生携带轨道角动量(OAM)特性的波束.仿真与实验结果表明,该超表面在10 GHz附近工作性能良好.

**关键词** 超表面;轨道角动量;相位调控

**中图分类号** TB34;O441

**文献标识码** A

## 0 引言

1992年,荷兰物理学家L. Allen首次提出Laguerre-Gaussian激光束携带轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)的概念<sup>[1]</sup>.此后,对轨道角动量的相关研究不断增多.轨道角动量波束由于其特殊的螺旋相位分布特性,被广泛用于粒子操控、信息传输、光学成像和光刻技术等方面<sup>[2-6]</sup>.在微波频段,不同模态的轨道角动量的电磁波具有正交性,在传播过程中互不干扰,且每一种模态的电磁波在独立携带信号传输的过程中相位分布保持稳定.因此,采用具有不同模态的OAM波传输信号,可以实现无限多的信号传输通道,从而大幅度提高频谱容量<sup>[7,8]</sup>.这一新技术的应用,为解决目前频谱资源紧缺的问题提供了有效途径,因此在通信领域中极具广阔的应用前景.

超表面是一个新兴的研究方向,是一种平面二维阵列,通过调节单元结构的形状、结构参数和排列方式,可以得到自然媒质所不具备的奇异电磁特性,从而对电磁波进行任意调控<sup>[9]</sup>.利用超表面能有效调控电磁波的特点,科学家们研制了多种新型功能器件,如偏振转换器<sup>[10]</sup>、吸波器<sup>[11]</sup>、平面透镜<sup>[12]</sup>和全息成像等<sup>[13]</sup>.近年来,超表面又被用来产生OAM波束<sup>[14-16]</sup>.目前的研究主要是采用反射型超表面来形成OAM波束,而在实际应用中,透射型超表面往往更具应用价值.基于此,本文提出一种透射型超表面,该结构是在介质板的两面分别刻蚀M型超表面形成,通过旋转单元结构,形成OAM发生器,能在10 GHz附近产生OAM波束,且传输效率高.

## 1 基本原理

我们首先考虑一束均匀平面波垂直入射到超表面上.对于任意极化方向的入射波,其电场可以分解为两个分量,即 $x$ 方向上的分量 $E_{ix}$ 和 $y$ 方向上的分量 $E_{iy}$ .透射场 $E_{tx}$ 和 $E_{ty}$ 与入射场 $E_{ix}$ 和 $E_{iy}$ 的关系可以用传输矩阵来表示

$$\begin{bmatrix} E_{tx} \\ E_{ty} \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} E_{ix} \\ E_{iy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{xx} & t_{xy} \\ t_{yx} & t_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{ix} \\ E_{iy} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

收稿日期:2020-02-02

基金项目:国家自然科学基金项目(61761010);广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA281193)资助

通讯作者:高喜,男,汉族,博士,教授,研究方向:电磁超材料理论及应用,E-mail:gao\_xi76@163.com.

若将单元结构沿  $z$  轴旋转  $\alpha$  角,则传输矩阵可以通过方程(2)来获得

$$\mathbf{T}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} t_{xx} & t_{xy} \\ t_{yx} & t_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

同时,为了将线极化传输矩阵转换为圆极化传输矩阵,利用变换矩阵

$$\mathbf{A} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ j & -j \end{bmatrix}. \quad (3)$$

从而得到相应的圆极化传输矩阵

$$\mathbf{T}^*(\alpha) = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{T}(\alpha) \mathbf{A}. \quad (4)$$

令交叉极化透射系数  $t_{yx} = t_{xy} = 0$ ,且同极化透射系数  $t_{xx} = -t_{yy} = 1$ ,则上述传输矩阵可以写为

$$\mathbf{T}^*(\alpha) = \begin{bmatrix} 0 & \exp(-i2\alpha) \\ \exp(i2\alpha) & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

上式表明,通过旋转超表面单元,能够对电磁波的相位进行调控.若单元结构旋转  $\alpha$  角,则透射波将产生  $2\alpha$  的附加相位.

## 2 超表面单元结构的设计

提出的超表面单元结构如图 1 所示,其中图 1(a)为正视图,图 1(b)为三维结构图,该结构单元是在介质板的两面对称刻蚀具有相同几何参数的 M 型结构.介质层的材料是 F4B,相对介电常数为 2.65,损耗角正切为 0.002,厚度为  $h = 2$  mm;金属层的材料为铜,厚度为 0.035 mm.将单元结构沿  $x$  和  $y$  方向周期性排列形成超表面,且  $x$  和  $y$  方向的周期相等.在参数设计过程中,首先根据器件的工作频率范围,选定 M 型结构的初始参数,使得超表面结构在  $x$  和  $y$  方向的透射率达到最大,且它们的相位差接近  $180^\circ$ ;然后利用 CST 软件中的“协方差矩阵自适应进化策略(CMA-ES)”优化算法对结构参数进行优化,优化的目标函数为

$$T = ||t_{xx}|e^{i\varphi_{xx}} - |t_{yy}|e^{i\varphi_{yy}}||, \\ g(f) = \begin{cases} 1 + 0.3T, T \geq 0.8, \\ 0, T < 0.8, \end{cases} \quad (6)$$

$$Fitness = \sum -g(f), 9 \text{ GHz} < f < 11 \text{ GHz},$$

式中  $T$  为透射率, $f$  为这一频段的均匀采样.最后得到的优化参数为: $P = 10$  mm,  $L_x = 6$  mm,  $L_y = 7.8$  mm,  $\theta = 100^\circ$ ,  $w_1 = 0.2$  mm,  $w_2 = 2.4$  mm,  $C_x = 1.4$  mm,  $C_y = 4.4$  mm,  $D_x = 0.5$  mm,  $D_y = 4.8$  mm.

利用电磁仿真软件(CST2017)对超表面单元结构进行仿真分析.模拟中,将  $x$  和  $y$  方向设为周期边界条件(unit cell),电磁波沿  $z$  方向传播,分别用  $x$  极化和  $y$  极化的均匀平面波激励单元结构,模拟得到的透射系数如图 2 所示,可知,在 9.4-10.4 GHz 频率范围内, $x$  和  $y$  极化波都具有较高的透射率( $>0.8$ ),尤其在 10 GHz 附近,透射率都接近于 1;而在相同的频率范围内,它们的相位差处于  $120^\circ$  至  $170^\circ$  之间,如图 2(b)所示.

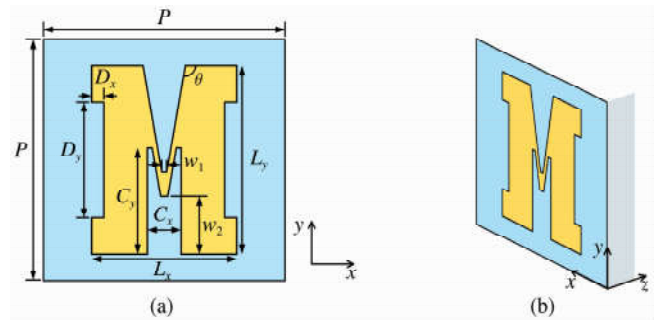


图 1 单元结构的(a)正视图与(b)三维结构

由前述理论可知,通过旋转单元结构,能够对圆极化波的相位进行有效调控.为了研究这一特性,在单元结构不同的旋转角度下,采用右旋圆极化电磁波激励结构单元,分析透射波的传输特性,结果如图 3 所示.由图 3(a)可知,单元结构的旋转角度对电磁波的透射率没有什么影响;而图 3(b)显示,透射波的相位发生了变化,且透射波的相位差  $\Delta\varphi$  与旋转角度  $\theta$  近似满足  $\Delta\varphi = 2\theta$  的关系.由此可知,将结构单元从  $0^\circ$  旋转到  $180^\circ$ ,则能够在  $0-360^\circ$  的范围内调控电磁波的相位.进一步观察图 3(b)发现,在 9-11 GHz 的宽频带范围内,不同旋转角度的单元之间保持着稳定的相位差,说明该结构具有很好的宽带特性.这一特性为进一步设计宽带

OAM 超表面提供了物理条件.

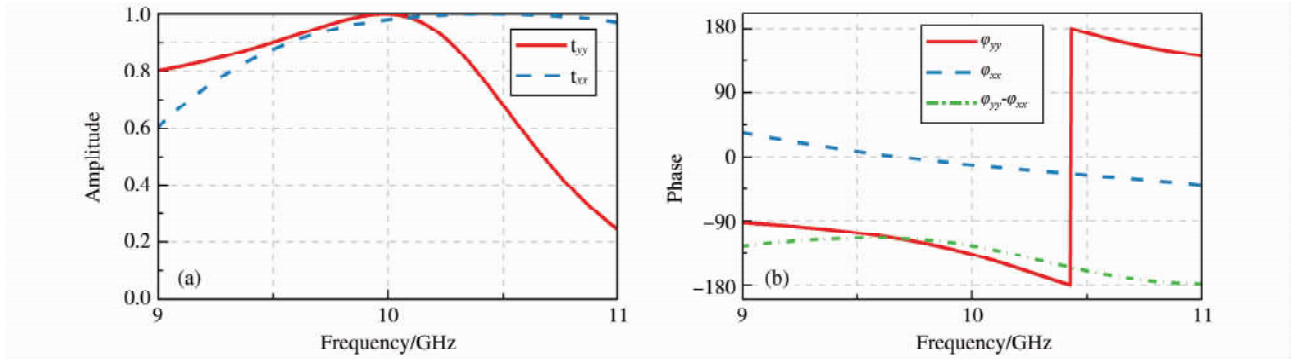


图2  $y$  极化与  $x$  极化的透射系数(a)振幅;(b)相位

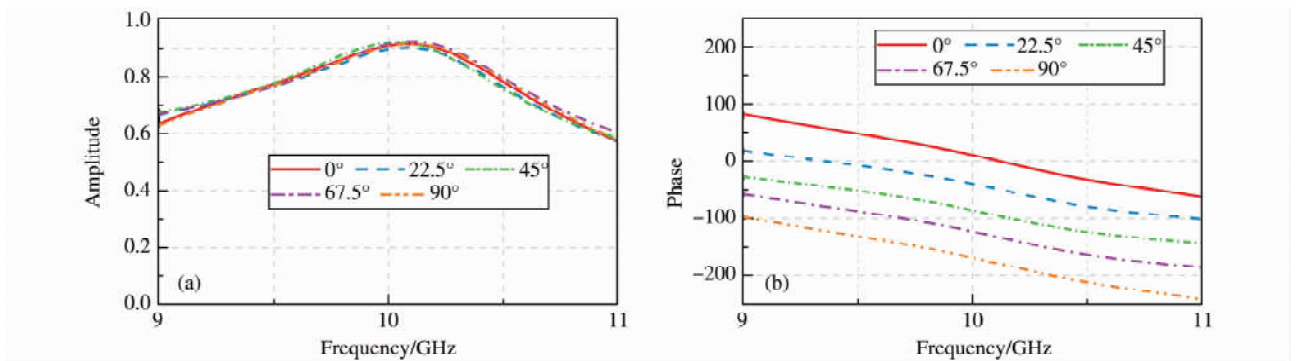


图3 结构单元在不同旋转角度下的(a)透射幅值及(b)相位

### 3 透射型超表面相位的设计及仿真

我们知道,携带轨道角动量的电磁波束在与传播方向垂直的平面上具有  $\exp(il\varphi)$  的分布,其中  $i$  为拓扑荷,  $\varphi$  为角坐标<sup>[1]</sup>. 因此,为了获得具有特定拓扑荷  $l$  的 OAM 波束,则在位置坐标  $(x, y)$  处引入的相位突变为

$$\varphi_l(x, y) = l \cdot \arctan\left(\frac{y}{x}\right). \quad (7)$$

同时,为了能对 OAM 波束进行聚焦,还需要在位置  $(x, y)$  处引入附加相位突变量

$$\varphi_f(x, y) = k_0 (\sqrt{d^2 + x^2 + y^2} - d), \quad (8)$$

式中,  $k_0$  为自由空间波数,  $d$  为焦距. 由相位叠加原理可知,为了将平面波转换为具有携带 OAM 的电磁波束,同时对电磁波进行聚焦,则在  $(x, y)$  处需要引入的相位为  $\varphi_l(x, y) + \varphi_f(x, y)$ , 而这一相位是通过旋转超表面的单位结构来获得,由相位与旋转角  $\theta$  的关系可知,坐标  $(x, y)$  处的超表面单元的旋转角  $\theta$  需要满足

$$\theta(x, y) = \frac{1}{2} [\varphi_l(x, y) + \varphi_f(x, y)] = \frac{1}{2} \left[ l \cdot \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + k_0 (\sqrt{d^2 + x^2 + y^2} - d) \right]. \quad (9)$$

根据方程(9),我们假定  $l = 1$ , 并且焦距  $d = 300$  mm, 对超表面进行设计,得到超表面的具体结构以及相位分布如图 4(a)和图 4(b)所示. 该结构在  $x$  及  $y$  方向均包含 20 个结构单元,整个超表面结构的大小为  $200$  mm  $\times$   $200$  mm. 为了研究超表面的电磁特性,在仿真中采用右旋圆极化均匀平面波激励超表面,通过观察透射波的强度以及相位分布情况分析超表面的功能. 研究发现,透射波为左旋圆极化波,且透射波的振幅和相位分布如图 5 所示. 图 5(a)为距离超表面 30 mm 处的电场强度分布. 由图可知,在中心位置处,电磁波束的振幅为零. 进一步从图 5(b)的相位分布可以看出,在  $2\pi$  的方位角范围内,相位从 0 变到  $2\pi$ . 综合图 5(a), (b), 我们可以推断透射波为携带拓扑荷  $l = 1$  的 OAM 波束. 同时,由图 3(a)可知器件的透射率高于 80% 的带宽为 9.4-10.4 GHz, 相对带宽为 8%.

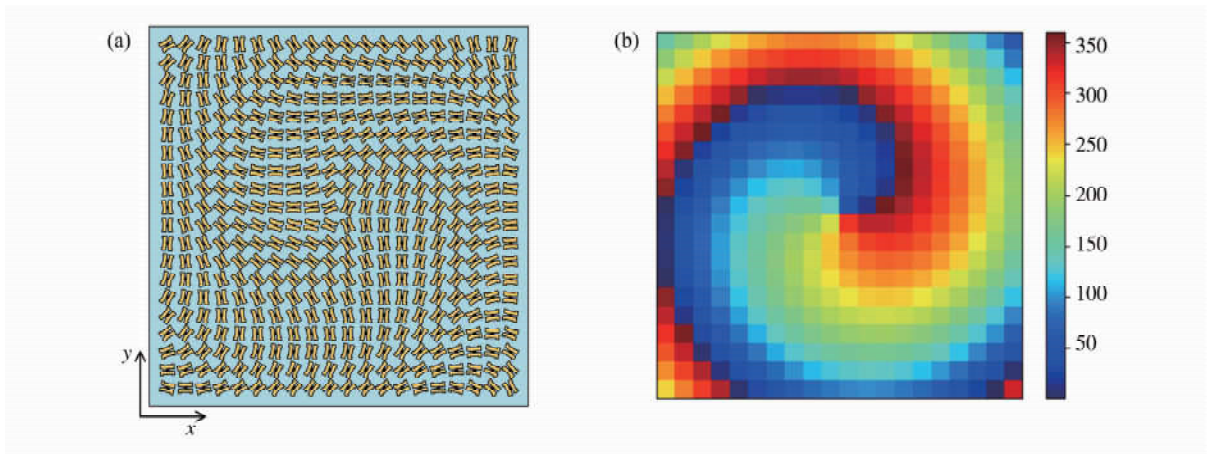
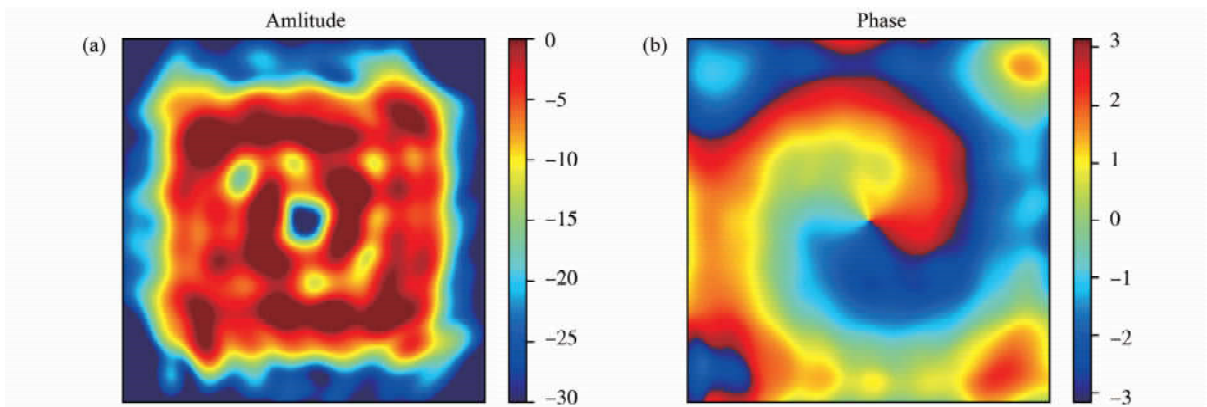


图 4 超表面的(a)整体几何结构图和(b)整体相位分布图

图 5  $z=30$  mm 处的左旋圆极化波的(a)电场能量分布及(b)相位分布仿真结果

## 4 实验结果及对比

为了证实超表面的电磁特性,对器件进行了加工测试.实验样品的尺寸以及材料与仿真中的设置一致,采用近场扫描仪测试样品的场分布.图 6(a)为实验测试系统,在距离样品 1000 mm 处放置一个右旋圆极化螺旋天线,以产生右旋圆极化均匀平面波,并以此平面波激励测试样品;在样品的另一侧,且距离样品 30 mm 处放置探针,用于记录该处的电场强度及相位,通过在水平面内移动探针,以获得电场的空间分布.测量中,将矢量网络分析仪的两个端口分别与发射天线以及同轴探针链接,通过测量  $S_{21}$  参数来获得空间各点的电场强度和相位.由于透射波为圆极化波,我们需要分两次测试.首先,让探针与  $x$  轴平行测量  $E_x$  分量;然后,让探针与  $y$  轴平行,测量  $E_y$  分量;最后,将测量的  $E_x$  和  $E_y$  合成得到总的电场分布,结果如图 6 所示.从图 6(b)(d)(f)中可以看出,在 9.5、10、10.5 GHz 处,电场强度呈现中空的环状分布;图 6(c)(e)(g)显示,当角坐标旋转一周时,相位改变  $2\pi$ .该特性与图 5 中的仿真结果具有很好的一致性,充分证实了所提出的超表面能在宽频带范围内产生携带  $i=1$  的 OAM 波束.表 1 为本文提出的结构与已发表的相关工作的比较,可以看出,本文提出的结构的整体性能较好,尤其是工作带宽(8%),明显高于其它器件.

表 1 与其他的传输型超表面的性能对比

文献	设计原理	单元的透射系数	相对带宽 (透射系数 $>0.8$ )	厚度( $\lambda_c$ )
[16]	PB 相位	91%	3%	0.05
[17]	PB 相位	92%	5%	0.05
[18]	PB 相位	91%	5%	0.05
[19]	PB 相位	92%	6%	0.07
本文	PB 相位	92%	8%	0.07

注: $\lambda_c$  为中心频率对应的波长.

## 5 结论

提出了一种新型双层超表面,该结构将两层几何参数完全一致的 M 型超表面对称刻蚀在介质板两侧形成. 结合 P-B 相位原理,设计了一种 OAM 发生器,实验和仿真结果证明,在 9.4-10.4 GHz 的宽频带范围内,该器件能够将右旋圆极化平面波转换成具有携带 OAM( $i=1$ )的左旋圆极化透射波,且器件厚度超薄. 本文的研究结果为发展厚度超薄的新型 OAM 发生器提供了新途径.

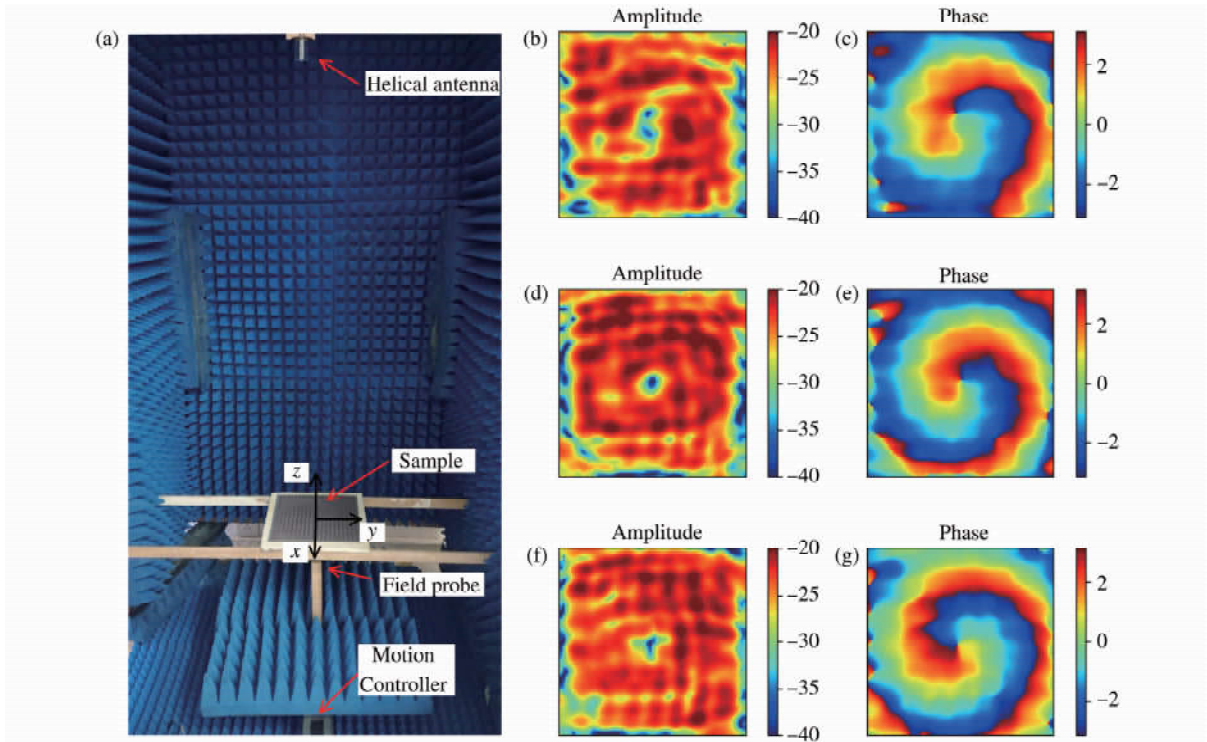


图 6 (a)实验装置;(b)-(g)  $z=30$  mm 处  $xoy$  内的电场强度及相位分布;  
(b)-(c):9.5 GHz;(d)-(e): 10 GHz;(f)-(g): 10.5 GHz

## 参 考 文 献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. Phys Rev A, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [2] Babiker M, Power W L, Allen L. Light-induced torque on moving atoms [J]. Phys Rev Lett, 1994, 73(9): 1239-1242.
- [3] Tennant A, Allen B. Generation of OAM radio waves using circular time-switched array antenna [J]. Electronics Letters, 2012, 48(21): 1365-1371.
- [4] Fahrbach F O, Simon P, Rohrbach A. Microscopy with self-reconstructing beams [J]. Nature Photonics, 2010, 4(11): 780-785.
- [5] Yao A M, Padgett M J. Orbital angular momentum: origins, behavior and applications [J]. Advances in Optics and Photonics, 2011, 3(2): 1-6.
- [6] Duocastella M, Arnold C B. Bessel and annular beams for materials processing [J]. Laser & Photonics Reviews, 2012, 6(5): 607-621.
- [7] Thidé B, Then H, Sjöholm J, et al. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain [J]. Physical review letters, 2007, 99(8): 087701.
- [8] Tamburini F, Mari E, Thidé B, et al. Experimental verification of photon angular momentum and vorticity with radio techniques [J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(20): 204102.
- [9] Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces [J]. Science, 2013, 339(6125): 1232009.
- [10] Momeni Hasan Abadi S M A, Behdad N. Wideband Linear-to-Circular Polarization Converters Based on Miniaturized-Element Frequency Selective Surfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(2): 525-34.
- [11] Wakatsuchi H, Kim S, Rushton J J, et al. Waveform-dependent absorbing metasurfaces [J]. Physical review letters, 2013, 111(24): 245501.
- [12] West P R, Stewart J L, Kildishev A V, et al. All-dielectric subwavelength metasurface focusing lens [J]. Optics express, 2014, 22(21): 26212.

- [13] Ni X, Kildishev A V, Shalaev V M. Metasurface holograms for visible light [J]. Nature communications, 2013, 4(1):1-6.
- [14] Yu S, Li L, Shi G, et al. Generating multiple orbital angular momentum vortex beams using a metasurface in radio frequency domain [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(24):241901.
- [15] Achouri K, Lavigne G, Caloz C. Comparison of two synthesis methods for birefringent metasurfaces [J]. Journal of Applied Physics, 2016, 120(23):235305.
- [16] Chen M L N, Li J J, Sha W E I. Ultrathin Complementary Metasurface for Orbital Angular Momentum Generation at Microwave Frequencies (accepted) [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2017, 65(1):396-400.
- [17] Akram M R, Mehmood M Q, Bai X, et al. High Efficiency Ultrathin Transmissive Metasurfaces [J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(11):1801628.
- [18] Akram M R, Bai X, Jin R, et al. Photon spin Hall effect-based ultra-thin transmissive metasurface for efficient generation of OAM waves [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(7):4650-8.
- [19] Tang S, Cai T, Liang J-G, et al. High-efficiency transparent vortex beam generator based on ultrathin Pancharatnam-Berry metasurfaces [J]. Optics express, 2019, 27(3):1816-24.

# Research on Orbital Angular Momentum Generator Based on Ultrathin Metasurface

TANG Li-guang GAO Xi

(School of Information and Communication Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract** A novel metasurface unit cell formed by symmetrically etching M-type structure on both sides of a dielectric plate is proposed. The proposed structure can freely control the phase of electromagnetic waves by simply rotate its azimuth angle. Fortunately, it has high transmission efficiency for different azimuth angle. Attributing to these properties, the metasurface unit cell can arrange into an OAM generator with high transmission efficiency. Simulation and experimental results reveal that the designed metasurface can converter a right circular polarized wave into a left circular polarized wave carrying orbital angular momentum (OAM) with topological charge  $i=1$ , in the frequency range of 9.5 GHz to 10.5 GHz.

**Key words** metasurface; OAM; phase control