

**基于双开口谐振环超表面的宽带太赫兹涡旋光束产生**

周璐 赵国忠 李晓楠

**Broadband terahertz vortex beam generation based on metasurface of double-split resonant rings**

Zhou Lu Zhao Guo-Zhong Li Xiao-Nan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 108701 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182147

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182147>

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

---

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

**基于谐振环的太赫兹宽带偏振转换器件研究**

A broadband polarization converter based on resonant ring in terahertz region

物理学报. 2017, 66(18): 180701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.180701>

**基于石墨烯的太赫兹波散射可调谐超表面**

Graphene based tunable metasurface for terahertz scattering manipulation

物理学报. 2017, 66(20): 204101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.204101>

**多功能太赫兹超表面偏振控制器**

Multifunctional metasurfaces for terahertz polarization controller

物理学报. 2016, 65(8): 080702 <https://doi.org/10.7498/aps.65.080702>

**基于编码超表面的太赫兹宽频段雷达散射截面缩减的研究**

A coding metasurfaces used for wideband radar cross section reduction in terahertz frequencies

物理学报. 2015, 64(15): 158101 <https://doi.org/10.7498/aps.64.158101>

**基于石墨烯互补超表面的可调谐太赫兹吸波体**

Tunable terahertz absorber based on complementary graphene meta-surface

物理学报. 2016, 65(1): 018101 <https://doi.org/10.7498/aps.65.018101>

# 基于双开口谐振环超表面的宽带太赫兹 涡旋光束产生\*

周璐<sup>1)2)3)</sup> 赵国忠<sup>1)2)3)†</sup> 李晓楠<sup>1)2)3)</sup>

1) (首都师范大学物理系, 北京 100048)

2) (北京市成像理论与技术高精尖创新中心, 北京 100048)

3) (太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

(2018年11月7日收到; 2019年3月12日收到修改稿)

提出了一种基于双开口谐振环单元结构超表面的太赫兹宽带涡旋光束产生器. 该结构由金属-电介质两层构成, 位于顶层的是基于双开口谐振环单元结构的超表面, 底层为介质层. 对单元结构阵列进行数值仿真, 圆偏振的入射光可以被转换成相应的交叉偏振透射光, 通过旋转表层金属谐振环, 可以控制交叉偏振透射光具有相同的振幅和不同的相位. 这些单元结构按照特定的规律排列, 可以形成用以产生不同拓扑荷数的涡旋光束的涡旋相位板. 以拓扑荷数 1 和 2 为例, 设计了两种涡旋相位板, 数值分析了圆偏振波垂直入射到该涡旋相位板生成交叉圆偏振涡旋光束的特性. 结果表明, 在 1.39—1.91 THz 的频率范围内产生了比较理想的不同拓扑荷数的涡旋光束, 且透过率高于 20%, 最高可达到 24%, 接近单层透射式超表面的理论极限值.

**关键词:** 太赫兹, 超表面, 宽带, 涡旋光束产生

**PACS:** 87.50.U-, 74.25.Uv, 03.65.Vf, 07.05.Tp

**DOI:** 10.7498/aps.68.20182147

## 1 引言

近年来, 太赫兹技术在光谱<sup>[1]</sup>、成像<sup>[2]</sup>、无损检测<sup>[3]</sup>等领域有了越来越广泛的应用. 而携带轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 的涡旋光束又是近年来的热门研究课题<sup>[4–6]</sup>. 研究太赫兹波段的涡旋光束是具有深远意义的, 这种光束具有中心为零的独特强度分布和螺旋相位波前, 可以用来操控颗粒的旋转或者对光通信系统的信息进行编码, 因此它在光学微操控<sup>[7]</sup>、光通信<sup>[8]</sup>等领域都具有潜在的应用前景. 以往, 人们通常使用螺旋相位板<sup>[9]</sup>、空间光调制器 (spatial light modulator, SLM)<sup>[10]</sup>、计算机全息法<sup>[11]</sup>等方法来产生涡旋光束. 比如, 由聚四氟乙烯、TPX 等材料制成的螺旋

相位板是通过厚度螺旋式增加而积累不同的光程差来产生涡旋光束, 其厚度较厚, 体积较大, 不利于器件的集成化应用. 因此, 作为一种人造复合材料的超表面引起了广大学者的关注. 超表面则是通过相位突变来改变光程差, 可以通过人为的设计来实现对电磁波性能的调控. 基于超表面的涡旋相位板不但降低了器件的厚度, 还提高了性能, 促进了其集成化发展.

最近, 越来越多的研究人员尝试利用超表面产生太赫兹波段的涡旋光束<sup>[12,13]</sup>. 2013年, He 等<sup>[14]</sup>提出了基于 V 形结构的超表面产生太赫兹涡旋光束, 但该超表面仅在 0.75 THz 的单一频率下产生涡旋光束, 且透过率较低, 仅达到 5% 左右. 2017年, 李瑶等<sup>[15]</sup>提出了基于 L 形结构的超表面产生太赫兹涡旋光束, 采用聚丙烯作衬底, 有效提高了

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61575130) 资助课题.

† 通信作者. E-mail: guozhong-zhao@126.com

透过率, 可达到 25%, 但该结构仍只能在 0.1 THz 的单一频率下产生线偏振的标量涡旋光束. 2017 年, Shi 和 Zhang<sup>[16]</sup> 提出了一种基于多层石墨烯结构的反射式超表面, 可在 1.8—2.8 THz 的频率范围内产生涡旋光束, 但反射式的器件在实验中较难操作, 不利于实际应用. 本文提出的基于矩形开口谐振单元结构的超表面可在约 0.52 THz 的较宽频率范围内产生任意拓扑荷数的圆偏振涡旋光束, 透过率超过 20%, 最高可达 24%. 该研究结果为利用超表面实现太赫兹涡旋光束的产生提供了参考, 有望成为一款实用化的太赫兹涡旋光束产生器件.

## 2 理论分析

圆偏振光束携带的角动量包含与偏振相关的自旋角动量 (spin angular momentum, SAM) 和与空间相位分布相关的轨道角动量 (OAM). 一个光子自旋角动量为  $\pm \hbar$ , 但轨道角动量具有  $l\hbar$  的无限值, 其中  $l$  为轨道角动量的拓扑荷数,  $\hbar = h/2\pi$ ,  $h$  为普朗克常量. 在光束通过各向异性的超表面时, 这两个原本独立的动量相互作用, 从而可以改变光束的偏振和相位<sup>[6]</sup>. 根据动量守恒定律和 Pancharatnam-Berry 相位原理, 自旋角动量可以转换为轨道角动量, 因此产生了涡旋光束. 由于轨道角动量取值的无限性, 涡旋光束可以用于通信系统, 能够有效地提高通信容量, 并且具有更高的保密性.

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_t = \mathbf{T}_r \cdot \mathbf{E}_i &= \frac{1}{2} \cdot \mathbf{E}_0 \cdot \begin{pmatrix} (T_{xy} + T_{yx}) [(\pm i) e^{\pm i2\theta_r}] + (T_{xx} - T_{yy}) e^{\pm i2\theta_r} + T_{xx} + T_{yy} \pm i(T_{xy} - T_{yx}) \\ (T_{xy} + T_{yx}) e^{\pm i2\theta_r} + (T_{yy} - T_{xx}) [(\pm i) e^{\pm i2\theta_r}] \pm i(T_{xx} + T_{yy}) - (T_{xy} - T_{yx}) \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{2} \cdot \mathbf{E}_0 \cdot (T_{xx} + T_{yy} \pm iT_{xy} \mp iT_{yx}) \begin{pmatrix} 1 \\ \pm i \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \cdot \mathbf{E}_0 \cdot (T_{xx} - T_{yy} \pm iT_{xy} \pm iT_{yx}) \cdot e^{\pm i2\theta_r} \begin{pmatrix} 1 \\ \mp i \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

由 (5) 式可以看出, 透射波束中含有共偏振波和交叉偏振波两项, 共偏振项并未引入相位因子, 仅交叉偏振项引入了额外的相位因子  $\exp(\pm i2\theta_r)$ , 其中“ $\pm$ ”取决于入射的圆偏振波的手性. 该相位因子与涡旋光束具有的方位相位依赖性因子  $\exp(i\theta)$  形式相似. 因此, 可以用  $\theta_r = \theta/2$  的方式排布单元结构, 从而在交叉偏振的透射光束中引入轨道角动量, 产生拓扑荷数为  $l$  的涡旋光束, 其中,  $\theta$  为每个

光学涡旋是一种特殊类型的光束, 具有甜甜圈状的强度分布和方位相位依赖性 ( $\exp(i\theta)$ ), 即相对于光束轴呈现螺旋形波前<sup>[17]</sup>, 其中  $l$  被称为涡旋光束的拓扑荷数,  $\theta$  为方位角. 对于不同的拓扑荷数  $l$ , 在一个波长的传播距离上, 波前围绕中心旋转一周, 相位改变  $l \cdot 2\pi$ .

当一束平面波垂直照射到超表面单元结构上, 将透射场与入射场相关联的透射矩阵 (transmission matrix) 可用矩阵  $\mathbf{T}$  表示:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中  $T_{yx}$  表示沿水平  $x$  方向的线偏振波入射时, 沿垂直  $y$  方向的线偏振波出射的透射系数, 矩阵中其他参数具有类似的定义. 当单元结构以其中心为旋转中心, 以波束的传播方向为旋转轴, 逆时针旋转角度  $\theta_r$  时, 旋转矩阵表示为  $\mathbf{R}(\theta_r)$ :

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

此时可以得到一个新的传输矩阵  $\mathbf{T}_r$ , 表示如下:

$$\mathbf{T}_r = \mathbf{R}(-\theta_r) \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{R}(\theta_r). \quad (3)$$

本文讨论的是圆偏振波垂直入射到超表面的情况, 因此入射波可以表示为

$$\mathbf{E}_i = \mathbf{E}_0 \begin{pmatrix} 1 \pm i \\ \pm i \end{pmatrix}^T, \quad (4)$$

其中“+”表示左旋圆偏振波垂直入射; “-”表示右旋圆偏振波入射. 因此经过超表面单元的出射波为  $\mathbf{E}_t$ , 表示如下:

单元结构的方位位置.

## 3 单元结构设计

本文所设计的结构由金属-电介质两层结构构成, 顶层为双开口谐振环, 底层为介质层, 材料为聚酰亚胺 (polyimide, PI), 单元结构的组成和几何结构参数定义如图 1 所示. 设计的用于产生太赫兹

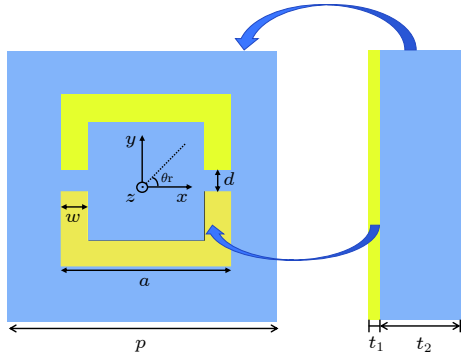


图 1 单元结构示意图

Fig. 1. Schematic of the unit cell structure.

涡旋光束的超表面是由若干个相同的顶层金属单元结构通过旋转不同角度布阵得到的。

采用 CST MICROWAVE STUDIO (2014) 软件对其进行仿真, 同时考虑样品制备方面的条件, 经优化后最终选择的结构参数列于表 1。

表 1 双开口谐振环单元结构仿真优化后的结构参数

Table 1. Optimized parameters of structure based on the double-split resonant rings.

结构参数	结构参数意义	优化值/ $\mu\text{m}$
$p$	单元结构周期	90
$a$	表层金属谐振环边长	58
$d$	开口谐振环的开口宽度	11
$w$	双开口谐振环的金属线宽	11
$t_1$	顶层金属层厚度	0.2
$t_2$	底层介质层厚度	50

确定几何结构参数后, 采用 CST 软件进行数值模拟, 分析顶层金属谐振环单元以其中心为原点,  $z$  轴为旋转轴, 旋转不同角度  $\theta_r$  情况下的透射特性. 在模拟中, 对单元结构采用周期性边界条件, 采用左旋圆偏振波垂直于结构入射。

如图 2(a) 所示, 在 1.39—1.98 THz 的宽带范围内, 交叉偏振波的透射系数高于 0.4 且相近. 在 1.7 THz 处, 幅度最为相近且达到最高值 0.49, 接近单层透射式超表面的理论极限值 [18,19]. 在 1.39—1.91 THz 的宽带频率范围内, 交叉偏振波的透射系数高于 0.45, 且随单元旋转基本没有变化. 也就是说, 透射率在 0.52 THz 的宽带频率范围内始终高于 20%。

根据 Pancharatnam-Berry (P-B) 相位原理 [20,21], 在单元结构旋转角度和透射交叉偏振波的相位变

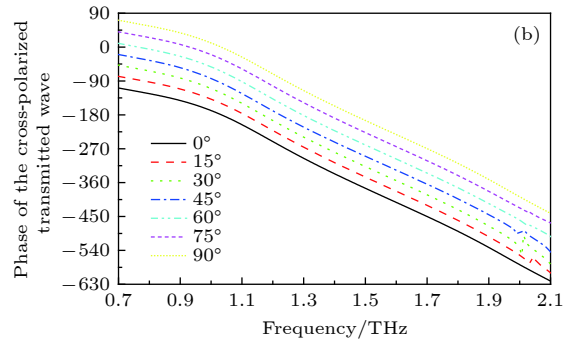
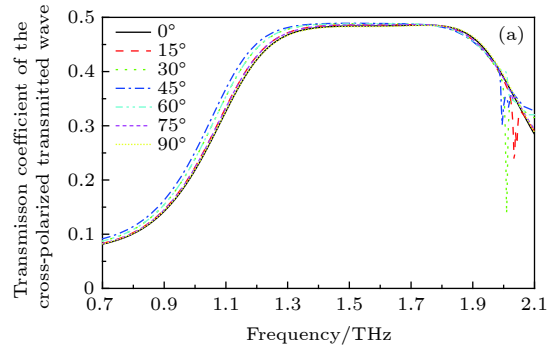


图 2 在左旋圆偏振波入射下不同旋转角度双开口谐振环单元结构的太赫兹透射特性模拟结果 (a) 交叉偏振分量的透射系数; (b) 交叉偏振分量的相位改变

Fig. 2. Transmission characteristic of the unit cells with different rotation angle of double-split resonant rings under the left circularly polarized incidence: (a) Transmission coefficients of the cross-polarized component; (b) phase shift of the cross-polarized component.

化之间存在一定的数值关系, 即后者是前者的两倍. 如图 2(b) 所示, 在 1.39—1.98 THz 的宽带频率范围内, 相位变化始终近似于旋转角度的两倍, 很好地符合了 P-B 相位原理. 另外, 数值模拟结果显示, 采用右旋圆偏振波垂直于结构入射时, 振幅和相位的模拟结果与上述结果一致。

## 4 产生涡旋光束的超表面设计

假设在本文设计的涡旋相位板 (vortex phase plate, VPP) 平面中, 以超表面中心为原点, 各单元中心的坐标为  $(x_p, y_p)$ , 则各单元具有一个相对于原点的方位角  $\theta = \arctan(y/x)$ ,  $p$  是单元周期的长度,  $\theta$  的范围是  $0-2\pi$ . 根据超表面所需实现的功能进行相位排布, 可以设计任意位置上的单元旋转角度. 为了产生不同拓扑荷数的涡旋光束, 根据 P-B 相位原理, 每个单元具有不同的旋转角  $\theta_r = (1/2) \cdot l \cdot \theta$ ,

$$\theta_r(x, y) = \begin{cases} (1/2) \cdot l \cdot (\arctan(y/x)), & x \geq 0, y > 0, \\ (1/2) \cdot l \cdot (\arctan(y/x) + \pi), & x < 0, \\ (1/2) \cdot l \cdot (\arctan(y/x) + 2\pi), & x > 0, y \leq 0, \end{cases} \quad (6)$$

其中  $l$  为拓扑荷数,  $(x, y)$  描述了每个单元在超表面内的位置,  $\theta_r$  为每个单元结构的旋转角. 改变  $l$  的值, 可以设计用于产生任意不同拓扑荷数涡旋光束的超表面, 这相比于之前八阶量化<sup>[22]</sup> 等排布方式有了很大的改进.

本文以产生拓扑荷数为 1 和 2 的涡旋光束为例设计了两个涡旋相位板, 如图 3 所示. 每个超表面具有  $23 \times 23$  个单元结构, 总大小为  $2.07 \text{ mm} \times 2.07 \text{ mm}$ . 由于超表面产生涡旋光束的有效工作频率为  $1.39\text{--}1.98 \text{ THz}$ , 对应波长为  $151.5\text{--}215.8 \mu\text{m}$ , 因此涡旋相位板有效层的厚度仅约为波长的  $1/1000$ . 当左旋圆偏振的太赫兹波束通过涡旋相位板时, 透射的交叉圆偏振太赫兹波束在每个单元上具有相同的强度和相应的相位调制, 因此产生了太赫兹涡旋场.

## 5 数值模拟结果及分析

在 CST MICROWAVE STUDIO 软件中, 对上述两个超表面进行电磁仿真. 采用左旋圆偏振的高斯光束垂直入射到图 3 中的两个超表面上. 将高斯光束的频率设定为可产生涡旋光束的工作频率, 电场的  $x$  和  $y$  分量的振幅为  $1 \text{ V/m}$ , 并且焦斑位于整个超表面的中心, 束腰半径设置为  $1500 \mu\text{m}$  (直径大于整个超表面, 图 3 中超表面的对角线为  $2927 \mu\text{m}$ ). 可以认为光束是均匀入射到整个超表面上的.

对应于图 3 所示的涡旋相位板, 模拟产生了拓扑荷数分别为 1 和 2 的两种涡旋光束. 以  $1.7 \text{ THz}$  为例, 给出了出射交叉圆偏振波的振幅和相应的相位分布图, 如图 4 所示. 图 4(a)—图 4(d) 分别表示了左旋圆偏振波垂直入射到图 3(a) 所示的涡旋相位板上, 沿波束传播方向距超表面  $500$  和  $1000 \mu\text{m}$  处的透射交叉偏振波的振幅和相位分布. 可以看出, 如我们所预期的, 出射光场产生了中心为暗环的振幅分布, 并且相位呈现覆盖  $2\pi$  的螺旋分布. 图 4(e)—图 4(h) 则分别表示了左旋圆偏振波垂直入射到图 3(b) 所示的涡旋相位板上, 沿波束传播方向距超表面  $500$  和  $1000 \mu\text{m}$  处的透射交叉偏振波的振幅和相位分布. 对比图 4(a) 和图 4(c), 图 4(e) 和图 4(g) 可见, 随着传播距离的增加, 光束会有扩散, 但仍能够保持良好的涡旋光的特性. 对图 4 进行综合分析, 如我们所预期的, 出射光场产生了中心为暗环的振幅分布, 并且拓扑荷数越大, 中心暗环的半径越大. 同时, 相应的相位呈现  $l \cdot 2\pi$  的螺旋分布, 很好地与理论值符合. 经过数值模拟, 也验证了在右旋圆偏振波入射到超表面的情况下, 出射的交叉圆偏振波具有中心为零的振幅分布以及与图 4 相反的相位分布, 证实了它具有良好的涡旋光束的性质.

由于在  $1.39\text{--}1.91 \text{ THz}$  的宽带范围内, 交叉圆偏振波的透射系数高于  $0.45$  且相近, 同时, 其相位变化满足 P-B 相位原理. 因此, 该结构在  $1.39\text{--}1.91 \text{ THz}$  的宽带频率范围内能够产生涡旋光束, 且透过率高于  $20\%$ . 如图 5 所示, 给出了  $1.4$  和  $1.9 \text{ THz}$  的频率下, 左旋圆偏振波经过图 3(a) 所示的超表面后, 在距超表面  $500 \mu\text{m}$  处产生的交叉圆偏振涡旋光束的振幅和相位分布. 由图可见, 在

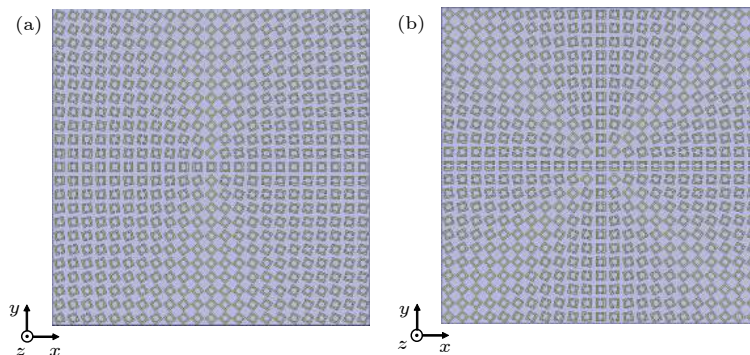


图 3 两种用于产生拓扑荷数分别为 (a)  $l = 1$  和 (b)  $l = 2$  的涡旋光束超表面

Fig. 3. Schematic of two different designed metasurface for generating vortex beams with topological charges of (a)  $l = 1$  and (b)  $l = 2$ .

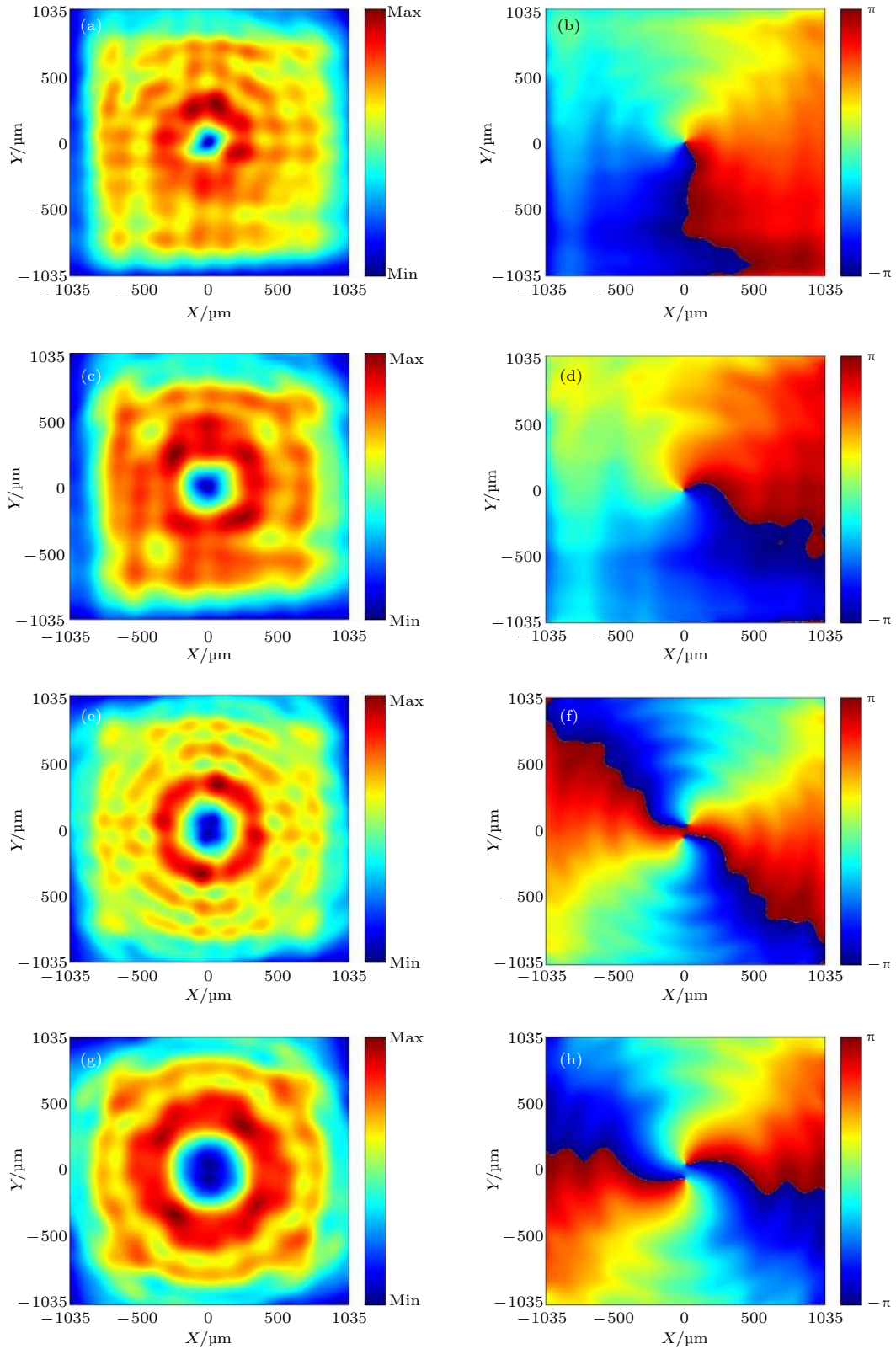


图 4 通过超表面产生拓扑荷数为 1 和 2 的涡旋光束的振幅和相位分布. 对于  $l=1$ , 在  $z=-500 \mu\text{m}$  平面处的 (a) 振幅和 (b) 相位分布. 对于  $l=1$ , 在  $z=-1000 \mu\text{m}$  平面处的 (c) 振幅和 (d) 相位分布. 对于  $l=2$ , 在  $z=-500 \mu\text{m}$  平面处的 (e) 振幅和 (f) 相位分布. 对于  $l=2$ , 在  $z=-1000 \mu\text{m}$  平面处的 (g) 振幅和 (h) 相位分布

Fig. 4. Distributions of the amplitude and phase of the two metasurfaces for generating vortex beams with topological charges of 1 and 2 at 1.7 THz: (a) Amplitude and (b) phase distributions at the plane of  $z=-500 \mu\text{m}$  for  $l=1$ ; (c) amplitude and (d) phase distributions at the plane of  $z=-1000 \mu\text{m}$  for  $l=1$ ; (e) amplitude and (f) phase distributions at the plane of  $z=-500 \mu\text{m}$  for  $l=2$ ; (g) amplitude and (h) phase distributions at the plane of  $z=-1000 \mu\text{m}$  for  $l=2$ .

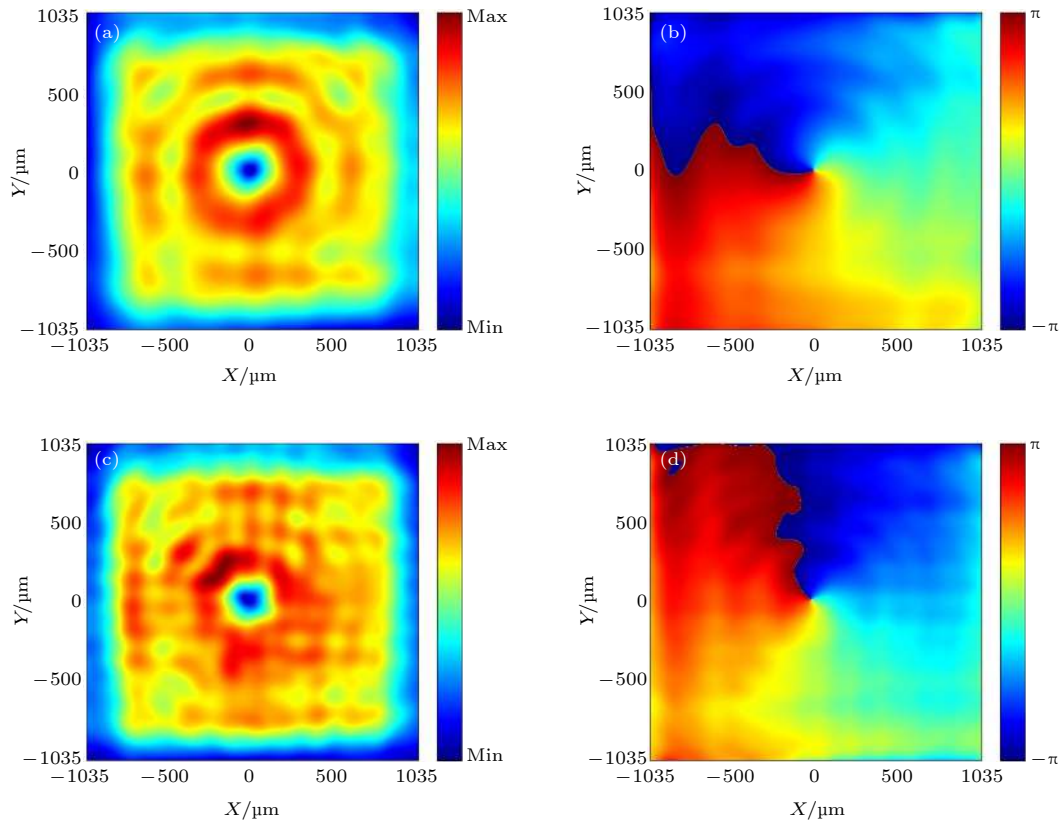


图 5 超表面产生拓扑荷数为 1 的涡旋光束的振幅和相位分布. 在 1.4 THz 下, 对于  $l = 1$ , 在  $z = -500 \mu\text{m}$  平面处的 (a) 振幅和 (b) 相位分布; 在 1.9 THz 下, 对于  $l = 1$ , 在  $z = -500 \mu\text{m}$  平面处的 (c) 振幅和 (d) 相位分布

Fig. 5. Distributions of the amplitude and phase of metasurface for generating vortex beam with topological charge of 1: (a) Amplitude and (b) phase distributions at the plane of  $z = -500 \mu\text{m}$  for  $l = 1$  at 1.4 THz; (c) amplitude and (d) phase distributions at the plane of  $z = -500 \mu\text{m}$  for  $l = 1$  at 1.9 THz.

1.4 和 1.9 THz 频率下, 经过超表面出射的交叉圆偏振波具有中心为暗环的振幅分布和相位变化为  $2\pi$  的螺旋相位分布, 具有良好的涡旋光束的性质.

综合分析图 4 和图 5 给出的数值模拟结果, 可以看出, 在 1.4, 1.7 和 1.9 THz 的频率下, 所设计的超表面在圆偏振波垂直入射的条件下, 出射的交叉圆偏振波携带了轨道角动量, 能够产生涡旋光束. 因此, 基本验证了所提出的超表面在 1.39—1.91 THz 的较宽频率范围内可产生性质良好的涡旋光束.

## 6 结 论

本文提出了一种基于双开口谐振环单元结构超表面产生太赫兹涡旋光束的方法. 根据 P-B 相位原理, 通过旋转单元结构获得不同的相位变化, 对具有不同旋转角度的单元结构进行排布, 设计了用于产生太赫兹涡旋光束的超表面. 以拓扑荷数 1 和 2 为例, 设计了两种涡旋相位板, 振幅分布和

相位分布的仿真结果表明, 这种超表面能够成功地产生不同拓扑荷数的太赫兹圆偏振涡旋光束. 本文设计的涡旋相位板可在 1.39—1.98 THz 的较宽频率范围内产生涡旋光束, 其工作带宽远远高于以往的透射式太赫兹涡旋相位板; 其透过率在 0.52 THz 的频率范围内高于 20%, 最高可达 24%, 与同类太赫兹涡旋光束产生器相比效率较高. 因此, 所提出的太赫兹涡旋光束产生器具有潜在的应用价值.

## 参考文献

- [1] Kou K, Zhao G Z, Liu Y, Shen Y C 2015 *Chin. J. Las.* **42** 0815001 (in Chinese) [寇宽, 赵国忠, 刘英, 申彦春 2015 中国激光 **42** 0815001]
- [2] Jansen C, Wietzke S, Peters O, Scheller M, Vieweg N, Salhi M, Krumbholz N, Jördens C, Hochrein T, Koch M 2010 *Appl. Opt.* **49** E48
- [3] Zhou X D, Li L J, Zhao D, Ren J J 2016 *Infrared and Laser Engineering* **45** 0825001-1
- [4] Wang W, Guo Z Y, Sun Y X, Shen F, Li Y, Liu Y, Wang X S, Qu S L 2015 *Opt. Commun.* **355** 321
- [5] Tan Y H, Li Y L, Ruan H X 2015 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **57** 1708

- [6] Karimi E, Schulz S A, Leon I D, Qassim H, Upham J, Boyd R W 2014 *Light-Sci. Appl.* **3** 1
- [7] Skidanov R V, Ganchevskaya S V 2016 *Proc. SPIE Saratov, September 26-30, 2016* 103370R-1
- [8] Kirilenko M S, Khonina S N 2013 *Optical Memory and Neural Networks* **22** 81
- [9] Lee W M, Yuan X C, Cheong W C 2004 *Opt. Lett.* **29** 1796
- [10] Ostrovsky A S, Rickenstorff-Parrao C, Arrizón V 2013 *Opt. Lett.* **38** 534
- [11] Liu Y J, Sun X W, Wang Q, Luo D 2007 *Opt. Express* **15** 16645
- [12] Zhou H L, Dong J J, Yan S Q, Zhou Y F, Zhang X L 2014 *IEEE Photonics J* **6** 5900107
- [13] Zhang H F, Zhang X Q, Xu Q, Wang Q, Xu Y H, Wei M G, Li Y F, Gu J Q, Tian Z, Ouyang C M, Zhang X X, Hu C, Han J G, Zhang W L 2018 *Photonics Res.* **6** 24
- [14] He J W, Wang X K, Hu D, Ye J S, Feng S F, Kan Q, Zhang Y 2013 *Opt. Express* **21** 20230
- [15] Li Y, Mo W C, Yang Z G, Liu J S, Wang K J 2017 *Laser Technol.* **41** 644 (in Chinese) [李瑶, 莫伟成, 杨振刚, 刘劲松, 王可嘉 2017 *激光技术* **41** 644]
- [16] Shi Y, Zhang Y 2018 *IEEE Access* **6** 5341
- [17] Genevet P, Yu N F, Aieta F, Lin J, Kats M A, Blanchard R, Scully M O, Gaburro Z, Capasso F 2012 *Appl. Phys. Lett.* **100** 013101-1
- [18] Ding X M, Monticone F, Zhang K, Zhang L, Gao D L, Burokur S N, Lustrac A D, Wu Q, Qiu C W, Alù A 2015 *Adv. Mater.* **27** 1195
- [19] Ding X M, Yu H, Zhang S Q, Wu Y M, Zhang K, Wu Q 2015 *IEEE Trans. Magn.* **51** 1
- [20] Hasman E, Kleiner V, Biener G, Niv A 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 328
- [21] Xu H X, Liu H W, Ling X H, Sun Y M, Yuan F 2017 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **65** 7378
- [22] Wang W, Li Y, Guo Z Y, Li R Z, Zhang J R, Zhang A J, Qu S L 2015 *J. Opt.* **17** 045102-1



# Broadband terahertz vortex beam generation based on metasurface of double-split resonant rings\*

Zhou Lu<sup>1)2)3)</sup> Zhao Guo-Zhong<sup>1)2)3)†</sup> Li Xiao-Nan<sup>1)2)3)</sup>

1) (*Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China*)

2) (*Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Theory and Technology, Beijing 100048, China*)

3) (*Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing 100048, China*)

( Received 7 November 2018; revised manuscript received 12 March 2019 )

## Abstract

Terahertz vortex beam generators have potential applications in optical micro-manipulation, terahertz communications and many other fields. A broadband vortex beam generator in a terahertz frequency range is proposed based on the metasurface of double-split resonant rings' array. The designed structure consists of two layers, i.e., the top layer, which is a metasurface of double-split resonant rings, and the bottom layer, which is the dielectric layer of polyimide. The numerical simulation of the cell structure array is performed by using the CST microwave studio. In order to obtain the best performance, the structure parameters of metasurface are continuously optimized and a set of optimal geometric parameters is finally determined. The simulation results show that the circularly polarized incident light can be converted into corresponding cross-polarized transmitted light. By rotating the metal resonant ring on the top layer, the cross-polarized transmitted light can be controlled to have the same amplitude and correspondingly different phases. The relationship between the phase change and the angle of rotation conforms to the P-B phase principle. These cell structures are arranged according to a specific order and can form the vortex phase plates for generating the vortex beams with different topological charges. Taking the topological charge numbers 1 and 2 for example, two kinds of vortex phase plates are designed. The characteristics of the circularly cross-polarized vortex beams generated by a circularly polarized wave perpendicularly incident on the vortex phase plates are numerically analyzed. The results show that the ideal vortex beams with different topological charge numbers are generated. The characteristics of vortex beams appear to be consistent with those theoretical results. Moreover, the vortex beams can be generated in a frequency range from 1.39 THz to 1.91 THz. The operating bandwidth is much wider than the previously obtained result of the transmission terahertz vortex phase plates. The transmission is higher than 20%, and the maximum value of transmission can reach 24%, which is close to the theoretical limit value of the single-layered transmission-type metasurface. This work provides a reference for generating the terahertz vortex beams based on metasurface. It is expected to possess a practical application in generating the device of terahertz vortex beam.

**Keywords:** terahertz, metasurface, broadband, vortex beam generation

**PACS:** 87.50.U-, 74.25.Uv, 03.65.Vf, 07.05.Tp

**DOI:** 10.7498/aps.68.20182147

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61575130).

† Corresponding author. E-mail: guozhong-zhao@126.com