

## 频率可切换太赫兹涡旋波束产生器\*

仲敏 李九生†

(中国计量大学太赫兹研究所, 杭州 310018)

(2022 年 6 月 15 日收到; 2022 年 7 月 14 日收到修改稿)

已报道的太赫兹涡旋波束产生器大多数是在固定频率产生涡旋波束, 限制了它的实际应用场景. 本文提出一种频率可切换太赫兹涡旋波束超表面, 通过改变外部温度, 二氧化钒相态也随之改变, 该超表面可以实现单频模式和双频模式的自由切换. 室温下, 所设计的超表面在频率 1.1 THz 处可以产生具有不同拓扑电荷数的涡旋波束, 而且它们的模式纯度均在 85% 以上. 外部温度变为 68 °C 时, 该超表面工作频率切换到两个频率点 0.7 和 1.23 THz, 产生不同拓扑电荷数的涡旋波束, 模式纯度均大于 60%. 设计的频率可切换太赫兹涡旋产生器为无线太赫兹通信中工作频率调制提供了一个新的设计思路.

**关键词:** 太赫兹涡旋, 可切换, 频率调控**PACS:** 74.25.Uv, 81.05.Xj, 87.50.U-**DOI:** 10.7498/aps.71.20221184

## 1 引言

太赫兹技术在全息投影<sup>[1,2]</sup>、生物成像<sup>[3,4]</sup>、光谱检测<sup>[5]</sup>和雷达检测<sup>[6]</sup>等方面具有广泛的潜在应用而受到世界各国研究人员关注. 有效产生携带轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 的涡旋波束也是近年来科学工作者的热门研究主题<sup>[7-12]</sup>. 如 2019 年, Akram 等<sup>[13]</sup>设计了一种微频段高效的透射超表面产生携带轨道角动量的涡旋光束, 传输效率达到 55%. 同年, Liu 等<sup>[14]</sup>设计一种由 I 形棒和分裂环谐振器复合超表面, 实现微波双频率下辐射方向可控的双模涡旋光束. 2020 年, Xin 等<sup>[15]</sup>利用单层编码超表面实现微波段双频率涡旋波束生成. 2021 年, Xie 等<sup>[16]</sup>提出了基于传播相位超表面在光学频段产生完美的涡流光束, 效率大于 83.5%. 2022 年, Cheng 等<sup>[17]</sup>提出了一种可以在微波段工作的单层超表面涡旋波束发生器, 产生反射涡旋波束. 上数报道的绝大多数超表面产生的涡旋波束主要

工作在单频上或双频上, 工作频点固定且不可调, 造成这些涡旋波束生成器应用受到限制, 因此探索可以主动调控工作频率的涡旋波束产生器成为必然.

本文提出频率可切换太赫兹涡旋波束超表面来产生可调涡旋波束. 该器件由上下两层金属图案层, 中间聚乙酰胺介质层作为基底构成, 其中金属图案层均由双 C 型开口环、中间方形金属片嵌入 VO<sub>2</sub> 构成. 通过改变外部温度, 该结构可以实现在单频模式和双频模式产生涡旋波束自由切换. 作为可灵活切换工作频点的涡旋波束产生器, 本研究结果有可能在未来太赫兹波分复用通信系统中进行实际应用.

## 2 单元结构设计

提出的频率可切换太赫兹涡旋波束产生器如图 1 所示, 该超表面单元结构有三层: 上下两层均为相同的金属图案层, 是由双 C 型开口环, 中间方

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61871355, 61831012)、浙江省科技厅人才工程 (批准号: 2018R52043) 和浙江省重点研发项目 (批准号: 2021C03153, 2022C03166) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lijsh2008@126.com

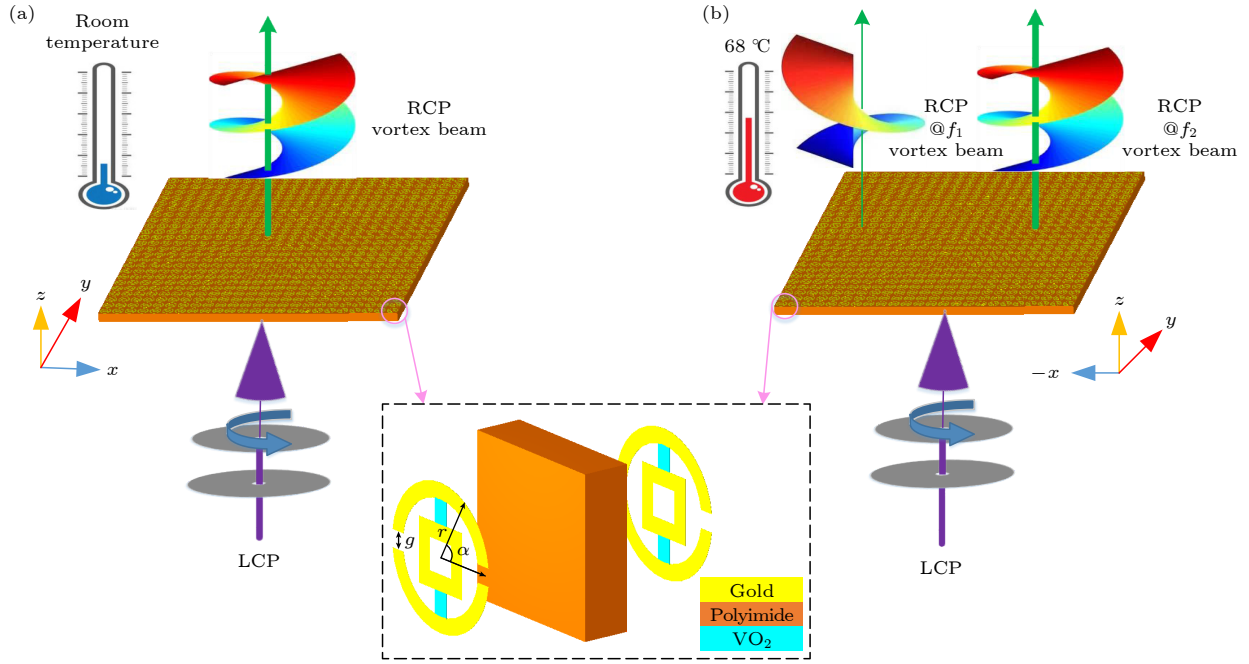


图1 频率可切换太赫兹涡旋波束调控示意图 (a) 25 °C 时, LCP 波入射、RCP 涡旋波输出; (b) 68 °C 时, LCP 波入射、两个频率的 RCP 涡旋波输出

Fig. 1. Schematic diagram of switchable frequency terahertz vortex beam regulation: (a) At room temperature, the LCP wave incidence and RCP vortex wave output; (b) at 68 °C, the LCP wave is incidence and RCP vortex wave output under two frequencies.

形金属环嵌入  $\text{VO}_2$  构成, 厚度为  $0.2 \mu\text{m}$ ; 中间为聚酰亚胺介质层 ( $\epsilon_r = 3.5$ ,  $\tan\delta = 0.0027$ , 厚度为  $30 \mu\text{m}$ ). 其中金属层双 C 型开口环外径  $r = 45 \mu\text{m}$ , 宽度为  $10 \mu\text{m}$ , 开口宽度  $g = 11 \mu\text{m}$ , 中间方形金属环边长为  $20 \mu\text{m}$ , 单元周期为  $100 \mu\text{m}$ ; 顶层和底层金属图案层结构与  $+x$  方向的夹角为  $\alpha$ . 25 °C 时,

左旋圆偏振 (left-handed circularly polarized, LCP) 波入射, 右旋圆偏振 (right-handed circularly polarized, RCP) 涡旋波输出. 68 °C 时, LCP 波入射、两个频率的 RCP 涡旋波输出.

根据 Pancharatnam-Berry (P-B) 相位原理, 入射波与透射波之间的关联透射矩阵  $\mathbf{T}$  可表示为

$$\mathbf{T}_{\text{CP}} = \begin{pmatrix} T_{\text{LL}} & T_{\text{LR}} \\ T_{\text{RL}} & T_{\text{RR}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{t_{xx} + t_{yy} + i(t_{xy} - t_{yx})}{2} & \frac{t_{xx} - t_{yy} - i(t_{xy} + t_{yx})}{2} \\ \frac{t_{xx} - t_{yy} + i(t_{xy} + t_{yx})}{2} & \frac{t_{xx} + t_{yy} - i(t_{xy} - t_{yx})}{2} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中,  $t_{xx}$ ,  $t_{xy}$ ,  $t_{yx}$  和  $t_{yy}$  对应于线偏振波的透射系数, 第一下脚标表示透射波的偏振态, 第二下标表示入射波的偏振态. 旋转角度为  $\theta$  时的旋转矩阵可表示为

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

(1) 式传输矩阵可以表达为

$$\mathbf{T}_{\text{CP}}^* = \mathbf{R}(-\theta) \mathbf{T}_{\text{CP}} \mathbf{R}(\theta) =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{t_{xx} + t_{yy} - (t_{xx} - t_{yy}) \sin 2\theta + i(t_{xy} - t_{yx}) \cos 2\theta}{2} & \frac{(t_{xx} - t_{yy}) \cos 2\theta - i(t_{xy} + t_{yx}) + i(t_{xy} - t_{yx}) \sin 2\theta}{2} \\ \frac{(t_{xx} - t_{yy}) \cos 2\theta + i(t_{xy} + t_{yx}) + i(t_{xy} - t_{yx}) \sin 2\theta}{2} & \frac{t_{xx} + t_{yy} + (t_{xx} - t_{yy}) \sin 2\theta - i(t_{xy} - t_{yx}) \cos 2\theta}{2} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

入射波太赫兹电场可以表示为

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

式中, “+”为左旋圆偏振波垂直入射, “-”为右旋圆偏振波入射. 超表面单元的透射场可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{out}}^t = \mathbf{T}_{\text{CP}}^* \times \mathbf{E}_{\text{in}} = & \frac{1}{2}(t_{xx} + t_{yy} + t_{xy} + t_{yx}) \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \\ & + \frac{1}{2}(t_{xx} - t_{yy} - t_{yx}) e^{i2\theta} \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

同理, 反射场也可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{\text{out}}^r = & \frac{1}{2}(r_{xx} + r_{yy} + r_{xy} + r_{yx}) \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix} \\ & + \frac{1}{2}(r_{xx} - r_{yy} - r_{yx}) e^{i2\theta} \begin{pmatrix} i \\ 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

可见, 出射波第一项是未引入相位因子的共极化偏振波, 第二项是携带附加相位的交叉极化偏振波.

外部温度变化将引起 VO<sub>2</sub> 从绝缘态过渡到金

属态, 而且随着温度升高, VO<sub>2</sub> 电导率提高几个数量级. 利用 VO<sub>2</sub> 这变相特性<sup>[18,19]</sup>, 通过改变外部温度可以实现超表面结构不同工作频率切换. VO<sub>2</sub> 介电常数可以用 Drude 模型表示为  $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_\infty - (\omega_p^2(\sigma))/(\omega^2 + i\gamma\omega)$ , 其中无限频率下的介电常数  $\varepsilon_\infty = 12$ , 碰撞频率  $\gamma = 5.75 \times 10^{13}$  rad/s; 等离子频率  $\omega_p(\sigma) = \omega_p(\sigma_0) \sqrt{\frac{\sigma}{\sigma_0}}$ ,  $\sigma$  是电导率,  $\sigma_0 = 30$  S/m,  $\omega_p(\sigma_0) = 1.4 \times 10^{15}$  rad/s. 计算过程中, VO<sub>2</sub> 从绝缘态到金属态相变, 不同的相变状态对应不同的介电常数, 其电导率由 0 S/m 增加到  $2 \times 10^5$  S/m. 图 2(a) 和图 2(b) 表示室温下, 所设计超表面单元结构在 1.1 THz 处的透射振幅和相位. 图 2(c) 和图 2(d) 为 68 °C 时, 所提出的超表面单元结构在 0.7 和 1.23 THz 双频点处的透射振幅和相位.

### 3 结果仿真与器件性能分析

根据本文提出的单元结构, 通过不同拓扑荷数的相位分布来设计超表面的排布. 为了满足涡旋光

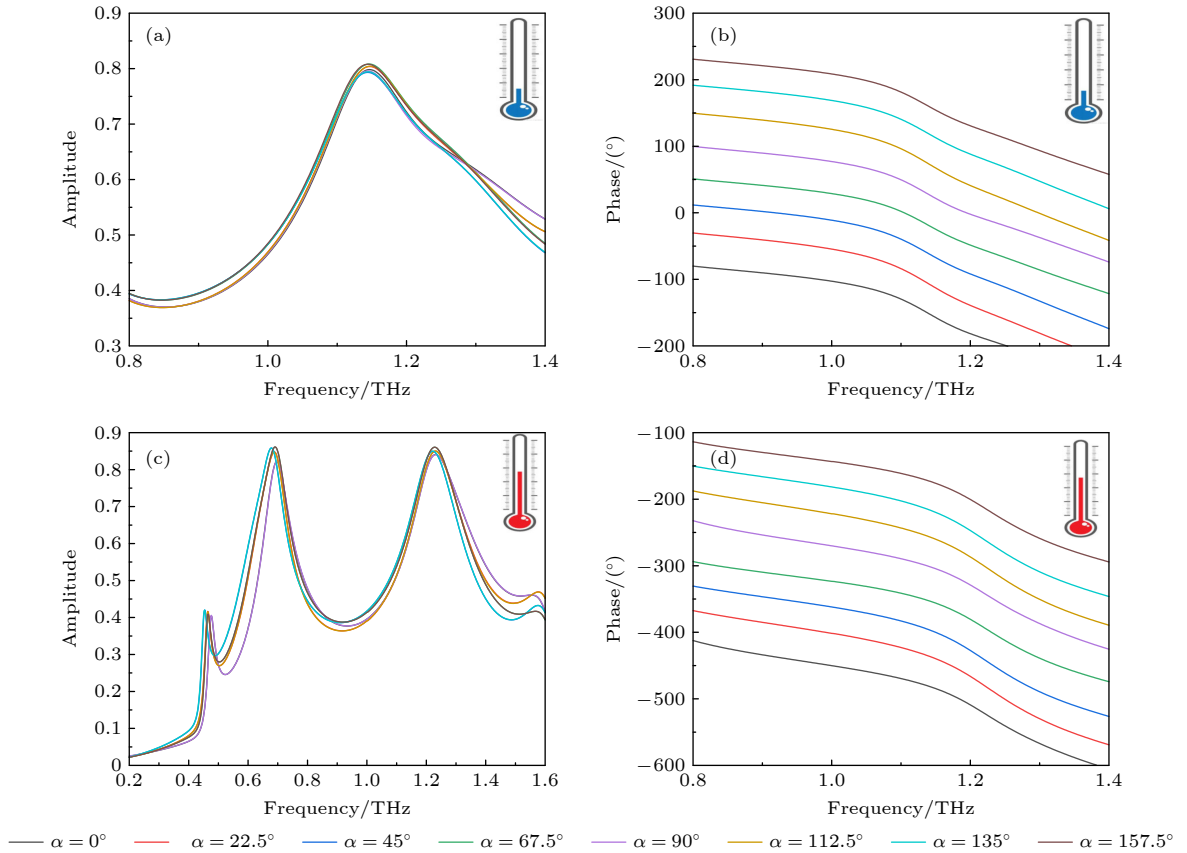


图 2 不同温度下超表面单元结构的 (a), (c) 透射振幅和 (b), (d) 相位 (a), (b) 室温; (c), (d) 68 °C

Fig. 2. (a), (c) Transmission amplitudes and (b), (d) phases of metasurface cell structure under different temperatures: (a), (b) Room temperature; (c), (d) 68 °C.

束的  $\exp(il\varphi)$  相位, 超表面每个位置  $(x, y)$  的相位分布可由下式计算<sup>[20]</sup>:

$$\varphi_m(x, y) = l \cdot \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right), \quad (7)$$

式中,  $l$  为涡旋波束的拓扑荷数. 为了简化设计, 提出的超表面可以划分为  $N$  个三角形区域, 每个区域的相位分布可通过下式计算<sup>[21]</sup>:

$$\varphi_m(x, y) = \frac{2\pi}{N} \left[ \frac{l \cdot \tan^{-1}(y/x)}{2\pi/N} + 1 \right], \quad (8)$$

式中,  $N$  是超表面被划分的区域数. 本文生成拓扑荷数分别为  $l = 1, 2$  和  $3$  的涡旋波束, 波前相位的覆盖范围是  $0-2\pi$ ,  $0-4\pi$  和  $0-6\pi$ . 图 3 给出了生成不同拓扑荷数 ( $l = 1, 2$  和  $3$ ) 涡旋波束的超表面相位分布及其相对应排布而成的超表面结构. 图 3(a)—(c) 表示拓扑荷数分别为  $l = 1, 2, 3$  时涡旋超表面相位分布, 对应单元结构阵列排布获得超表面如图 3(d)—(f) 所示.

为了表征所产生的涡旋波束的质量, 分析了不同拓扑电荷的模式纯度. 一般 OAM 模式纯度越大, 其相对应的涡旋波束质量越高. 如文中所述, 利用 LCP 波作为入射光, 当  $E_{\text{LCP}}$  投影到螺旋谐波  $\exp(il\varphi)$  中时, 通过傅里叶光谱分析, 模拟涡旋波束在不同拓扑电荷下的主次模功率, 可以得到透射涡旋电场分布  $E_{\text{LCP}}$ . 方位角  $\varphi$  是一个周期函数, 相应的傅里叶共轭是涡旋光束谱. 这种关系可以表

示为<sup>[22]</sup>

$$\begin{cases} \alpha(\varphi) = \sum_{l=-\infty}^{+\infty} A_l \cdot \exp(il\varphi), \\ A_l = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\varphi \alpha(\varphi) \cdot \exp(il\varphi), \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\alpha(\varphi)$  是相位的采样,  $\exp(il\varphi)$  是螺旋谐波相位. 这里产生涡旋波束的模式纯度定义为主模功率与所有模的总功率之比.

室温下, 在频率  $f = 1.1$  THz 的 LCP 波束垂直入射到超表面时, 所设计超表面结构产生单频涡旋波束, 如图 4 所示. 图 4(a) 为拓扑荷数  $l = 1$  超表面产生的透射太赫兹涡旋波束的远场强度、远场相位、电场相位和电场振幅, 图中的中空环形振幅和  $2\pi$  螺旋相位分布表明该超表面结构产生的涡旋波束拓扑荷数为 1. 同样地, 图 4(b) 表示所设计的拓扑荷数  $l = 2$  超表面产生的透射太赫兹涡旋波束的远场强度、远场相位、电场相位和电场振幅, 可以看出产生的  $l = 2$  涡旋波束与预设排布相符合. 图 4(c) 为拓扑荷数  $l = 3$  涡旋超表面产生的透射太赫兹涡旋波束的远场强度、远场相位、电场相位和电场振幅. 振幅分布和  $6\pi$  螺旋相位分布表明该超表面结构产生拓扑荷数为 3 的涡旋波束, 是与预设相位排布相吻合. 对比不同拓扑荷数的涡旋波束仿真结果, 可见随着拓扑荷数  $l$  增大, 透射场振幅的中心暗环半径越来越大, 且相位呈  $2\pi l$  的螺旋

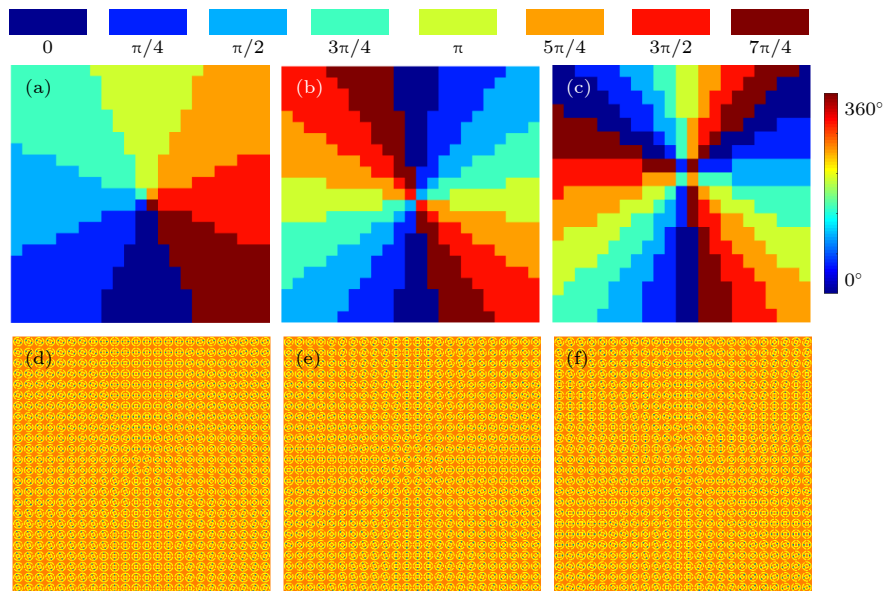


图 3  $l = 1, 2, 3$  时, 频率可切换太赫兹涡旋波束超表面的 (a)—(c) 相位分布与 (d)—(f) 单元阵列排布 (a), (d)  $l = 1$ ; (b), (e)  $l = 2$ ; (c), (f)  $l = 3$

Fig. 3. Phase distribution (a)—(c) and cell array arrangement (d)—(f) of switchable frequency terahertz vortex beam metasurface ( $l = 1, 2, 3$ ): (a), (d)  $l = 1$ ; (b), (e)  $l = 2$ ; (c), (f)  $l = 3$ .



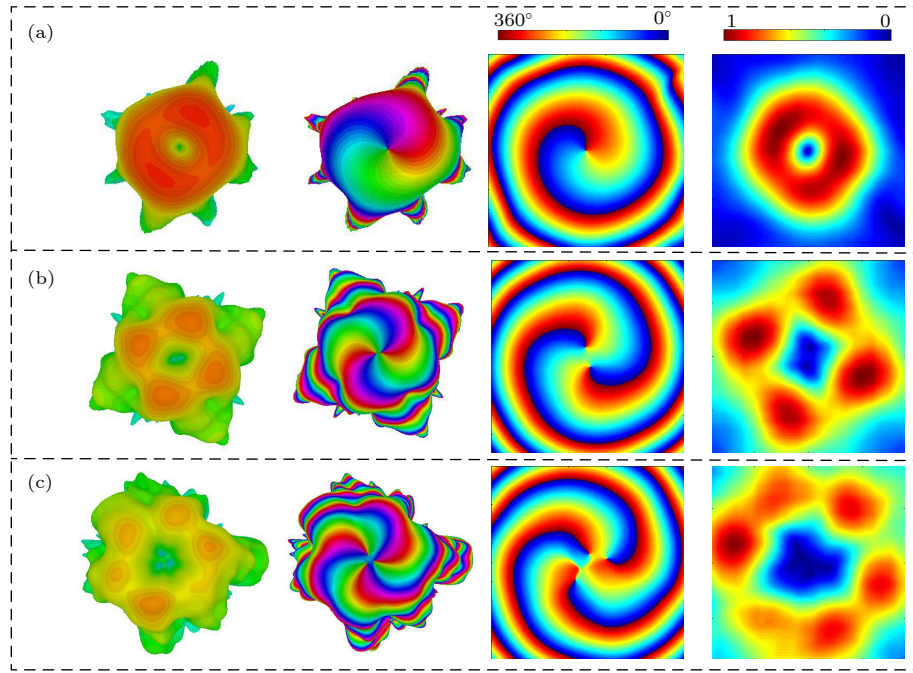


图4 室温下,  $f = 1.1$  THz 涡旋波束在不同拓扑荷数下的远场强度、远场相位、电场相位和振幅图 (a)  $l = 1$ ; (b)  $l = 2$ ; (c)  $l = 3$

Fig. 4. At room temperature, far-field intensity, far-field phase, electric field phase and amplitude of vortex beam with different topological charges at a frequency of 1.1 THz: (a)  $l = 1$ ; (b)  $l = 2$ ; (c)  $l = 3$ .

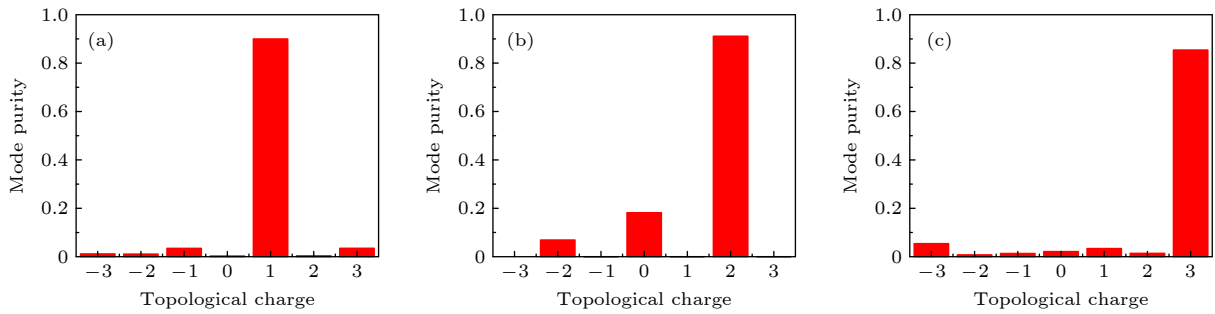


图5 室温下,  $f = 1.1$  THz 涡旋波束在不同拓扑荷数下的模式纯度 (a)  $l = 1$ ; (b)  $l = 2$ ; (c)  $l = 3$

Fig. 5. At room temperature, mode purity of vortex beam with different topological charges at a frequency of 1.1 THz: (a)  $l = 1$ ; (b)  $l = 2$ ; (c)  $l = 3$ .

分布. 本文进一步计算拓扑荷数  $l = 1, 2, 3$  时超表面产生涡旋波束的模式纯度, 如图5所示. 可以清楚地看到, 当拓扑荷数  $l = 1$  时, 涡旋波束模式纯度为 90%,  $l = 2$  和 3 时, 涡旋波束的模式纯度分别为 91.1% 和 85.4%.

当温度为 68 °C 时, 所设计的超表面切换为双频率涡旋波束发生器. 图6表示所设计的拓扑荷数  $l = 1$  超表面在 0.7 和 1.23 THz 两个频率产生的透射太赫兹涡旋波束的远场强度、远场相位、电场相位和电场振幅. 由此可见, 该超表面能够在 0.7 和 1.23 THz 两个频点处均产生拓扑荷数为 1 的涡旋波束. 计算得到在两个频率产生的涡旋波束

模式纯度分别为 89.1% 和 71.6%, 如图7所示.

图8表示所设计拓扑荷数  $l = 2$  超表面在 0.7 和 1.23 THz 两个频率处产生的透射太赫兹涡旋波束的远场强度、远场相位、电场相位和电场振幅, 对应的涡旋波束模式纯度分别为 83.2% 和 94.4%, 如图9所示. 计算结果表明, 该超表面在两个频率处均具有  $4\pi$  螺旋相位分布和中空的环形振幅分布, 与拓扑荷数为 2 的涡旋波束特征完全相符.

图10表示所设计的拓扑荷数  $l = 3$  超表面在 0.7 和 1.23 THz 两个频率处产生的透射太赫兹涡旋波束远场强度、远场相位、电场相位和电场振幅.

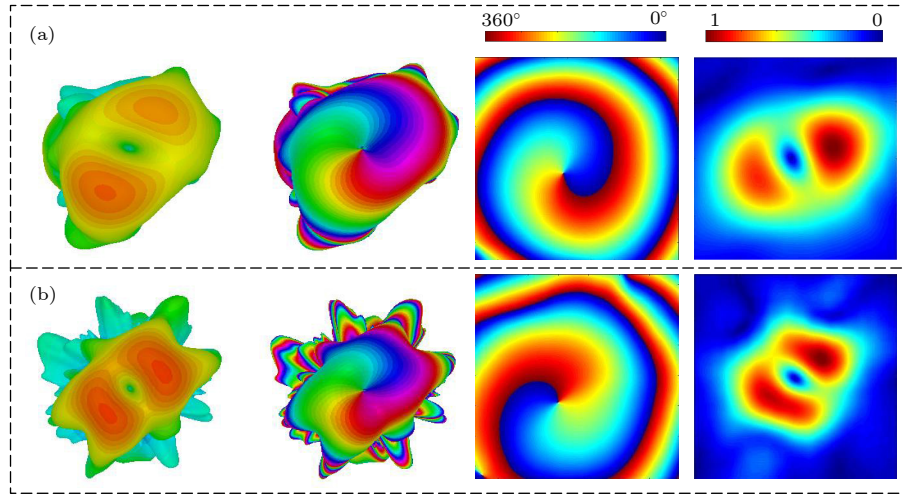


图 6 温度为 68 °C 时, 拓扑荷数  $l=1$  的涡旋波束的远场强度、远场相位、电场相位和振幅图 (a)  $f=0.7$  THz; (b)  $f=1.23$  THz  
Fig. 6. Far-field intensity, far-field phase, electric field phase and amplitude of vortex beam with topological charge  $l=1$  at 68 °C: (a)  $f=0.7$  THz; (b)  $f=1.23$  THz.

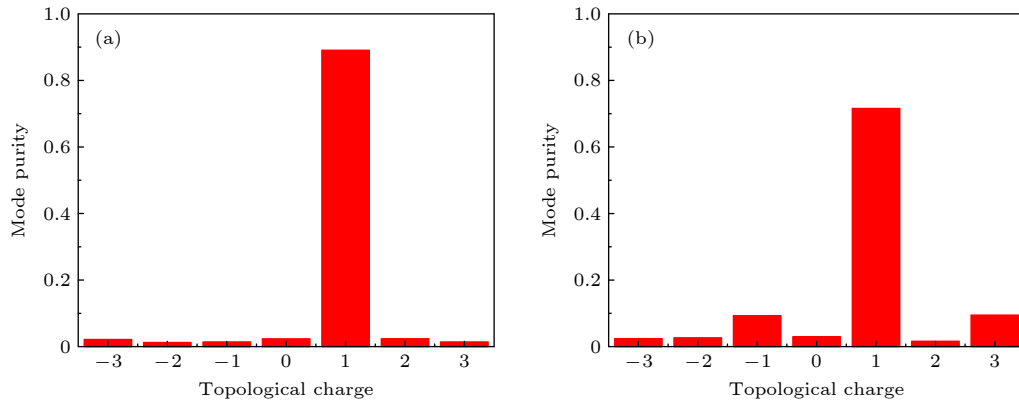


图 7 温度为 68 °C 时, 拓扑荷数  $l=1$  的涡旋波束的模式纯度 (a)  $f=0.7$  THz; (b)  $f=1.23$  THz  
Fig. 7. Mode purity of vortex beam with topological charge  $l=1$  at 68 °C: (a)  $f=0.7$  THz; (b)  $f=1.23$  THz.

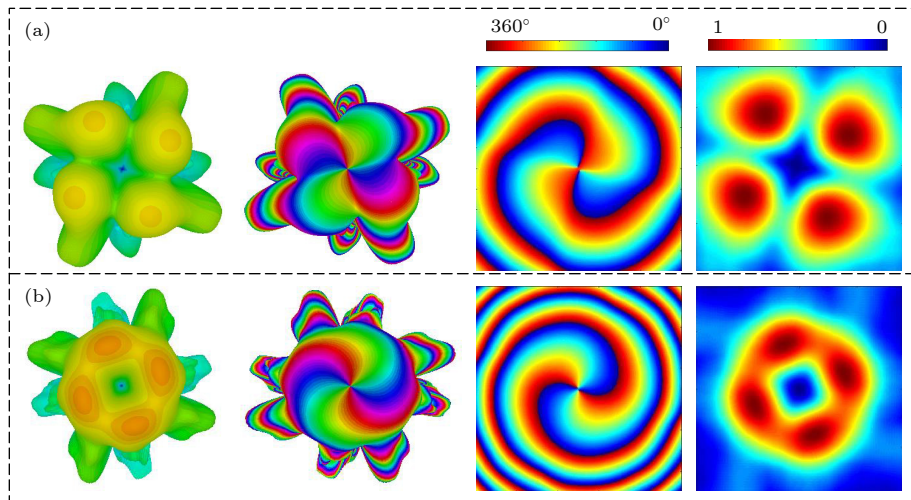


图 8 温度为 68 °C 时, 拓扑荷数  $l=2$  的涡旋波束远场强度、远场相位、电场相位和振幅图 (a)  $f=0.7$  THz; (b)  $f=1.23$  THz  
Fig. 8. Far-field intensity, far-field phase, electric field phase and amplitude of vortex beam with topological charge  $l=2$  at 68 °C: (a)  $f=0.7$  THz; (b)  $f=1.23$  THz.

两个频率上的涡旋波束模式纯度分别为 62.4% 和 68.2%, 如图 11 所示. 对比不同拓扑荷数的涡旋波束仿真结果, 随着拓扑荷数  $l$  的增大, 透射场的甜

圈状的中心暗环半径越来越大, 且相位呈  $2\pi l$  的螺旋分布, 这与拓扑荷数为 3 的涡旋波束理论预期相符合.

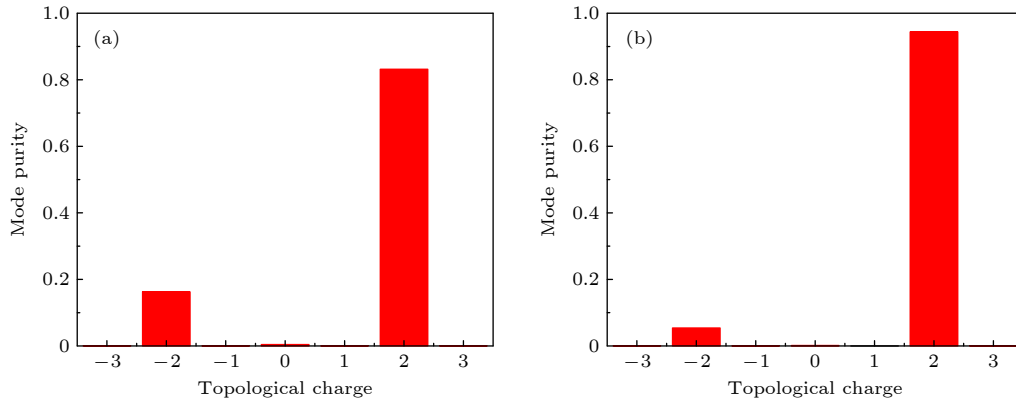


图 9 68 °C 时, 拓扑荷数  $l = 2$  的涡旋波束的模式纯度 (a)  $f = 0.7$  THz; (b)  $f = 1.23$  THz

Fig. 9. Mode purity of vortex beam with topological charge  $l = 2$  at 68 °C: (a)  $f = 0.7$  THz; (b)  $f = 1.23$  THz.

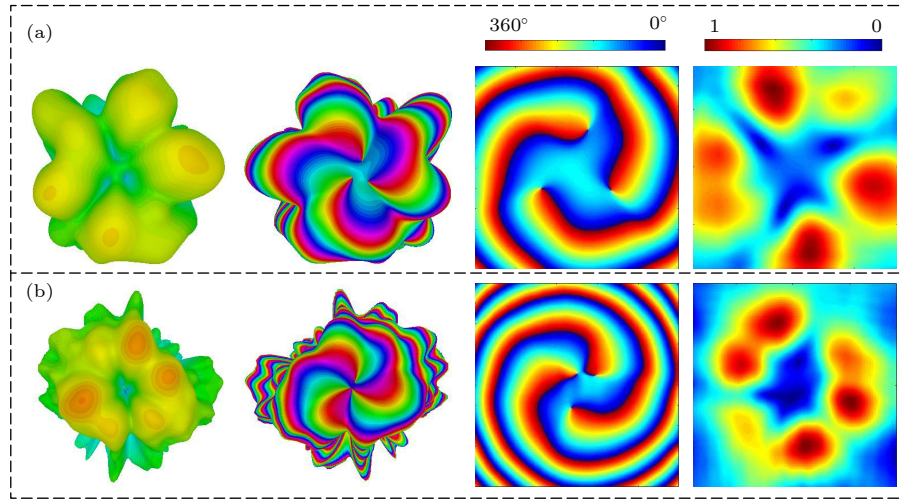


图 10 温度为 68 °C 时, 拓扑荷数  $l = 3$  的涡旋波束远场强度、远场相位、电场相位和振幅图 (a)  $f = 0.7$  THz; (b)  $f = 1.23$  THz

Fig. 10. Far-field intensity, far-field phase, electric field phase and amplitude of vortex beam with topological charge  $l = 3$  at 68 °C: (a)  $f = 0.7$  THz; (b)  $f = 1.23$  THz.

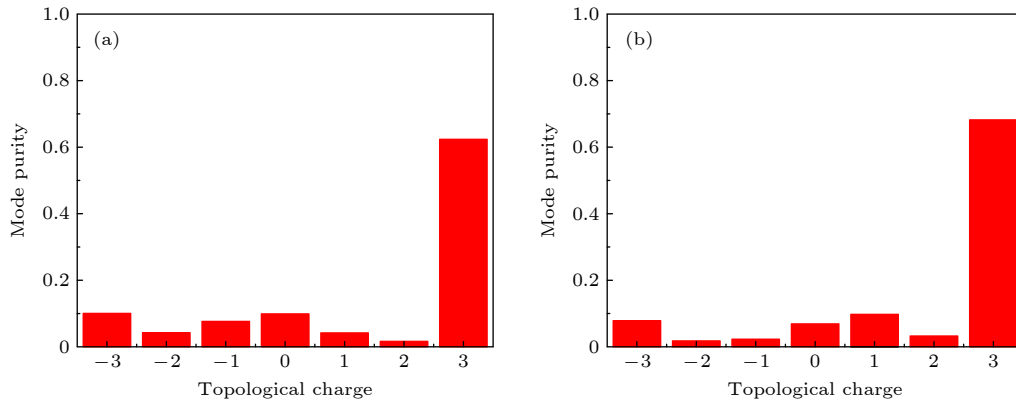


图 11 温度为 68 °C 时, 拓扑荷数  $l = 3$  的涡旋波束的模式纯度 (a)  $f = 0.7$  THz; (b)  $f = 1.23$  THz

Fig. 11. Mode purity of vortex beam with topological charge  $l = 3$  at 68 °C: (a)  $f = 0.7$  THz; (b)  $f = 1.23$  THz.

## 4 结 论

本文提出了一种频率可切换的太赫兹涡旋波束超表面, 通过改变外部温度实现不同频率涡旋波束的自由切换. 室温工作时, 该超表面成为了单频太赫兹涡旋产生器, 并且能够产生不同拓扑电荷数的涡旋波束. 当温度为 68 °C 时, 所设计的超表面变为双频率太赫兹涡旋产生器, 在 0.7 和 1.23 THz 两个工作频率点, 均能够产生不同拓扑电荷数的涡旋波束. 设计的频率可切换太赫兹涡旋产生器为未来太赫兹通信系统中太赫兹波主动调控提供了一个有效的方法.

## 参考文献

- [1] Wang D, Li N N, Li Z S, Chen C, Lee B, Wang Q H 2022 *Opt. Express* **30** 3157
- [2] Inoue K, Anand A, Cho M 2021 *Opt. Lett.* **46** 1470
- [3] Yang Z B, Tang D Y, Hu J, Tang M J, Zhang M K, Cui H L, Wang L H, Chang C, Fan C H, Li J, Wang H B 2021 *Small* **17** 2005814
- [4] Oda N 2010 *C. R. Physique* **11** 496
- [5] Zhou J, Wang X M, Wang Y X, Huang G R, Yang X, Zhang Y, Xiong Y, Liu L, Zhao X, Fu W L 2021 *Talanta* **228** 122213
- [6] Zhou Z, Cao Z J, Pi Y M 2018 *Sensors* **18** 10
- [7] Han J Q, Li L, Yi H, Shi Y 2018 *Opt. Mater. Express* **8** 3470
- [8] Bao L, Fu X J, Wu R Y, Ma Q, Cui T J 2021 *Adv. Mater. Technol.* **6** 2001032
- [9] Li X N, Zhou L, Zhao G Z 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 238101 (in Chinese) [李晓楠, 周璐, 赵国 2019 物理学报 **68** 238101]
- [10] Li W Y, Zhao G Z, Meng T H, Sun R, Guo J Y 2021 *Chin. Phys. B* **30** 058103
- [11] Zhang X D, Kong D P, Yuan Y, Mei S, Wang L L, Wang G X 2020 *Opt. Commun.* **465** 125561
- [12] Tang S W, Li X K, Pan W K, Zhou J, Jiang T, Ding F 2019 *Opt. Express* **27** 4281
- [13] Akram M R, Mehmood M Q, Bai X D, Jin R H, Premaratne M, Zhu W R 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1801628
- [14] Liu KY, Wang G M, Cai T, Dai B J, Xia Y, Li H P, Guo W L 2019 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52** 255002
- [15] Xin M B, Xie R S, Zhai G H, Gao J J, Zhang D J, Wang X, An S S, Zheng B W, Zhang H L, Ding J 2020 *Opt. Express* **28** 17374
- [16] Xie J F, Guo H M, Zhuang S L, Hu J B 2021 *Opt. Express* **29** 3081
- [17] Cheng K X, Hu Z D, Kong X L, Shen X P, Wang J C 2022 *Opt. Commun.* **507** 127631
- [18] Ding F, Zhong S M, Bozhevolnyi S I 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1701204
- [19] Liu X B, Wang Q, Zhang X Q, Li H, Xu Q, Xu Y H, Chen X Y, Li S X, Liu M, Tian Z, Zhang C H, Zou C W, Han J G, Zhang W L 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1900175
- [20] Fan J P, Cheng Y Z 2020 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53** 025109
- [21] Bi F, Ba Z L, Wang X 2018 *Opt. Express* **26** 25693
- [22] Jiang S, Chen C, Zhang H L, Chen W D 2018 *Opt. Express* **26** 6466



# Switchable frequency terahertz vortex beam generator<sup>\*</sup>

Zhong Min    Li Jiu-Sheng<sup>†</sup>

(Center for THz Research, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

(Received 15 June 2022; revised manuscript received 14 July 2022)

## Abstract

Most of the reported vortex beam generators generate vortex beams at a fixed frequency, which limits the practical applications. Therefore, it is inevitable to explore a vortex beam generator, which can actively control the operating frequency. We propose a switchable frequency terahertz vortex beam metasurface, it is freely switchable under single-frequency mode and dual-frequency mode by changing the external temperature, the phase state of vanadium dioxide ( $\text{VO}_2$ ) is also changeable. External temperature changes will cause  $\text{VO}_2$  to transform from insulating state to metallic state. Generally,  $\text{VO}_2$  conductivity can increase by several orders of magnitude as operating temperature changes. By using the phase change property of  $\text{VO}_2$ , we can obtain a metasurface with switchable operating frequencies. For operating at room temperature, the proposed metasurface behaves as a single-frequency terahertz vortex generator. When (left-handed circularly polarized, LCP) terahertz wave is vertically incident on the metasurface, it generates vortex beams with different topological charge numbers at a frequency of 1.1 THz, and the mode purity is above 85%. The simulation results show that the mode purity of the vortex beam with the topological charge  $l = 1$  is 90%, and the mode purity is about 91.1% for the vortex beam with  $l = 2$ , and 85.4% for the vortex beam with  $l = 3$ . When the external temperature is of 68 °C, the designed metasurface becomes a dual-frequency vortex beam generator. At this time, the operating frequencies of vortex beams with different topological charges ( $l = 1, 2, 3$ ) are 0.7 and 1.23 THz, whose mode purities are both above 60%. That is to say, the corresponding mode purities at topological charge with  $l = 1$  for two operating frequencies are 89.1% and 71.6%, respectively. The mode purities are 83.2% and 94.4% with topological charge  $l = 2$ , respectively. The mode purities are 62.4% and 68.2% with topological charge  $l = 3$ , respectively. Therefore, the proposed switchable frequency terahertz vortex generator provides a new design idea for working frequency modulation in wireless terahertz communication.

**Keywords:** terahertz vortex, switchable, frequency regulation

**PACS:** 74.25.Uv, 81.05.Xj, 87.50.U–

**DOI:** 10.7498/aps.71.20221184

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61871355, 61831012), the Talent Project of Department of Science and Technology of Zhejiang Province, China (Grant No. 2018R52043), and the Zhejiang Provincial Key R & D Project of China (Grant Nos. 2021C03153, 2022C03166).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [lijsh2008@126.com](mailto:lijsh2008@126.com)

## 频率可切换太赫兹涡旋波束产生器

仲敏 李九生

### Switchable frequency terahertz vortex beam generator

Zhong Min Li Jiu-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 217401 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221184

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221184>

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

基于超表面的多波束多模态太赫兹涡旋波产生

Multi-beam multi-mode vortex beams generation based on metasurface in terahertz band

物理学报. 2021, 70(18): 188701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210897>

基于反射超表面产生太赫兹涡旋波束

Terahertz vortex beam generation based on reflective metasurface

物理学报. 2019, 68(23): 238101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191055>

自拉曼混频黄绿波段三波长可切换激光

Triple wavelength-switchable lasing in yellow-green based on frequency mixing of self-Raman operation

物理学报. 2020, 69(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200324>

太赫兹频率编码器

Terahertz frequency coding metasurface

物理学报. 2019, 68(10): 104203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190032>

基于双开口谐振环超表面的宽带太赫兹涡旋光束产生

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

物理学报. 2019, 68(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182147>

暗态多极局域等离子模式的太赫兹涡旋光激发

Interaction between spoof localized surface plasmon and terahertz vortex beam

物理学报. 2020, 69(18): 184203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200695>