

基于超构表面多通大容量完美矢量 涡旋光束的产生及调控研究*

张胜蓝 田喜敏[†] 许军伟[‡] 徐亚宁 李亮 刘杰龙

(郑州航空工业管理学院材料学院, 郑州 450046)

(2024 年 12 月 14 日收到; 2025 年 1 月 8 日收到修改稿)

完美矢量涡旋光束除具有螺旋相位、环状强度分布及非均匀偏振分布外, 其亮环半径及环宽度恒定, 不受拓扑荷数变化的影响, 且同时携带自旋角动量和轨道角动量, 因此在很多光学领域具有重要应用. 超构表面作为一种亚波长结构排列而成的平面光学器件, 能够精准调控电磁波的相位、偏振和振幅, 为集成化矢量光场调控器件的实现提供变革性解决方案. 然而, 现有超构表面在生成产生多通大容量、偏振和轨道角动量独立操控的完美矢量涡旋光束方面仍面临严峻挑战. 为此, 本文基于超构表面平台, 利用纯几何相位调制的自旋多路复用方案, 通过叠加两正交偏振完美涡旋光束, 实现了多通大容量完美矢量涡旋光束. 通过调控两正交偏振完美涡旋光束的初始相位差、振幅比及拓扑荷数, 实现了具备任意偏振阶次和偏振分布特性的完美矢量涡旋光束; 通过精心设计超构表面相位分布及光束传播路径, 生成了多重完美矢量涡旋光束阵列. 此外, 基于完美矢量涡旋光束偏振阶次和偏振态两个并行维度, 本文成功演示了一种兼具安全性高和强鲁棒性的光学信息加密方案. 该工作旨在建立一个超紧凑、稳健的平台, 以在中红外波段生成多通大容量完美矢量涡旋光束, 推动其在光学加密、粒子操控和量子光学等领域的应用.

关键词: 超构表面, 完美矢量涡旋光束, 完美涡旋光束, 自旋角动量, 轨道角动量

PACS: 41.20.Jb

DOI: 10.7498/aps.74.20241725

CSTR: 32037.14.aps.74.20241725

1 引言

偏振和相位是光的固有特性, 灵活操纵这些特性可生成多种形式同时携带自旋角动量 (spin angular momentum, SAM) 和轨道角动量^[1,2] (orbital angular momentum, OAM) 的结构化光束. 光学涡旋光束 (vortex beams, VBs), 作为一种典型结构化光束, 因其螺旋相位波前、环状强度分布及携带定量轨道角动量等特性, 吸引了众多研究者对其

进行深入探索. 在光学涡旋广义存在形式中, 矢量涡旋光束 (vector vortex beams, VVBs) 因 SAM 和 OAM 相互作用而具有各向异性波面和偏振分布, 同时兼具涡旋光束和矢量光束特性. 对于具有不同偏振态与相位分布的矢量涡旋光束, 研究者们一般选择混合阶庞加莱球 (hybrid-order poincaré sphere, HyOPS) 对其进行表征^[3,4], 其中南北极代表两正交圆偏振 (circularly polarized, CP) 涡旋光束, 球面上的点代表特定偏振态矢量涡旋光束. 相比于标量涡旋光束, 矢量涡旋光束具有更复杂的光

* 国家自然科学基金 (批准号: 12004347)、河南省科技攻关 (批准号: 242102211081, 232102320057)、河南省青年骨干工程 (批准号: 2023GGJS113)、河南省高等学校重点科研项目 (批准号: 24A140025, 25B140009) 和航空科学基金 (批准号: 2020Z073055002) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: xmtian007@zua.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: xujunwei001@zua.edu.cn

场分布和波前结构, 在粒子操纵^[5,6]、光通信^[7]和量子信息^[8]等领域具有重要应用。

然而, 传统 VVBs 亮环半径及环宽度通常与光束所携带拓扑荷数 (topological charge, TC) 密切相关, 过大的拓扑荷数会导致涡旋光束中心相位奇点不稳, 强度分布明显畸变和扩散, 多模态复合传输和整体光束半径受限^[9]。2013 年, Ostrovsky 等^[10]首次提出完美涡旋光束 (perfect vortex beams, PVBs) 的概念, 除具有螺旋相位及环状强度分布外, PVBs 亮环半径及环宽度恒定, 不受拓扑荷数变化的影响, 且同时携带自旋角动量和轨道角动量。2015 年, Vaity 和 Rusch^[11]证实了对贝塞尔光束进行傅里叶变换可得到 PVBs。至此, 完美涡旋光束因其理想化且更独立的存在形式被人们广泛接受且应用到各个领域研究中。实现矢量光场产生与调控的传统方法通常需要级联多个光学元件, 如螺旋相位板、偏振片、1/4 波片、涡旋波片、空间光调制器等, 导致器件体积庞大, 缺乏灵活性, 不符合未来光子器件集成化需求。此外, 不同光学元件之间的错位还会造成光学像差, 进而降低 PVBs 质量。

超构表面, 一种由亚波长尺度超构原子周期性排列组成的二维平面结构, 能够对光场各种光学属性如振幅、偏振和相位等进行灵活高效的调控, 为光学器件小型化和集成化提供了崭新的平台, 目前已被广泛应用于成像^[12,13]、光学隐身^[14,15]、全息显示^[16-18]及量子信息^[8]等领域。超构表面的快速发展, 为集成化矢量光场调控器件的实现提供了变革性解决方案。如 2017 年, Liu 等^[19]通过级联 3 个具有不同相位机制的几何超构表面, 实现了单个 PVBs。2018 年, Zhang 等^[20]将螺旋相位、锥透镜相位及傅里叶变换透镜相位融合进单个等离子体超构表面, 成功实现了三维聚焦 PVBs。2020 年, Liu 等^[4]利用传输相位和几何相位共同设计超构表面, 实现了宽波段 PVBs。2022 年, Tian 等^[21]通过单层几何相位超构表面实现了具有偏振旋转功能的 PVBs。2022 年, Liu 等^[22]利用 1/4 波片超构原子构建超构表面, 实现了多通道 PVBs。完美矢量涡旋光束 (perfect vector vortex beam, PVVBs) 可由两正交偏振 PVBs 线性叠加而成, 因此同时携带自旋角动量和轨道角动量且偏振分布呈现各向异性特性。2023 年, Vogliardi 等^[23]利用单个超构表面, 通过巧妙设计成功实现了紧凑的单环 PVVBs 和双环 PVVBs。Gu 等^[24]通过介质复合元胞超构

表面实现了高效聚焦的高阶 PVVBs。然而, 由于设计机理的固有限制, 现有超构表面往往只能生成单一或少数 PVBs 或 PVVBs, 光束集成度低、通道少, 且 PVBs 或 PVVBs 偏振和 OAM 难以实现多样化且独立调控。如何突破现有设计机制的限制, 利用单一超构表面生成多通大容量、偏振和 OAM 独立调控的 PVBs 或 PVVBs 仍面临很大挑战。

基于此, 本研究提出一种用于产生多通大容量、偏振和 OAM 独立操控 PVVBs 的全新方案。该方案将螺旋相位、锥透镜相位及双曲聚焦相位集成到单一超构表面, 基于纯几何相位调制的自旋多路复用方案, 通过叠加两正交偏振 PVBs, 实现了多通大容量 PVVBs。通过精准操控两正交偏振 PVBs 的初始相位差和振幅比, 可实现任意偏振态 PVVBs; 通过调控两正交 PVBs 拓扑荷数, 可生成任意偏振阶次 PVVBs。为验证方案可行性, 本工作精心设计了两组超构表面: 第 1 组包含 4 个超构表面样品, 证明了所设计超构表面能够生成具备任意偏振阶次和偏振分布特性的 PVVBs; 第 2 组为一个超构表面样品, 证明了通过精心设计超构表面相位分布及光束传播路径, 可在完全错开的聚焦平面上生成 PVVBs 阵列, 且每个 PVVB 具备特定偏振分布和偏振阶次。此外, 作为概念性验证, 我们还设计演示了一种全新光学信息加密方案, 通过将偏振态和轨道角动量并行编码到多重 PVVBs 中, 实现了信息的多重加密。该工作旨在建立一个超紧凑、稳健的超构表面平台, 以在中红外波段生成多通大容量 PVVBs, 推动其在光学加密、粒子操控和量子光学等领域的应用。

2 基本原理及设计方案

图 1(a) 显示了利用超构表面生成多通大容量 PVVBs 示意图。在线偏振光 (linearly polarized light, LP light) 照射下, 该超构表面能够生成多重携带个性化偏振态和偏振阶次的 PVVBs, 且这些 PVVBs 通过预设的三维空间传播路径分布到两个完全错开的焦平面上 (一个焦平面占据一二象限, 焦距为 f_1 ; 另一个焦平面占据三四象限, 焦距为 f_2)。图 1(b) 是混合阶庞加莱球, 用来表征相位和偏振各向异性的 PVVBs 空间分布, 其中南北极代表两正交圆偏振 PVBs, 其余点代表特定偏振分布的 PVVB。PVVB 可由两正交圆偏振 PVBs 线性

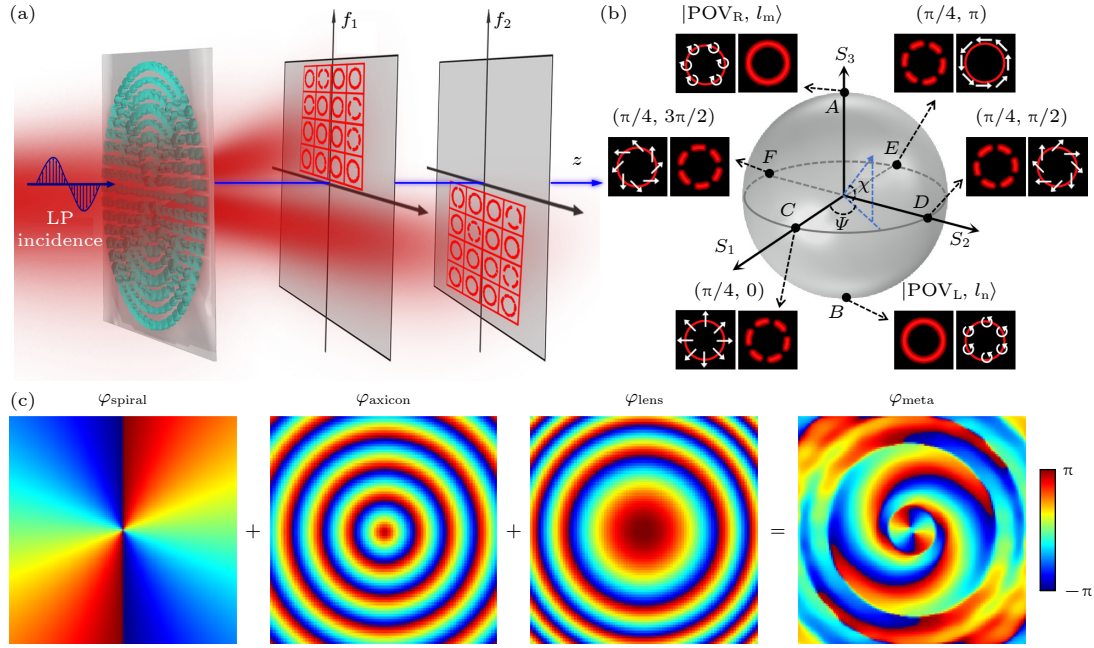


图 1 (a) 基于超构表面生成多通道大容量 PVVBs 的效果示意图; (b) HyOPS 模型; (c) 螺旋相位、锥透镜相位和双曲透镜相位叠加而成的超构表面相位剖面

Fig. 1. (a) Schematic illustration of the metasurface-enabled generation of multi-channel high-capacity PVVBs; (b) the HyOPS model; (c) the phase profile of the metasurface obtained by combining the phases of a spiral phase plate, an axicon, and a hyperbolic metalens.

叠加而成:

$$|D_{m,n}\rangle = \cos(\chi/2) \exp(i\psi/2) |\text{PVB}_R, l_m\rangle + \sin(\chi/2) \exp(-i\psi/2) |\text{PVB}_L, l_n\rangle, \quad (1)$$

式中 $|D_{m,n}\rangle$ 代表 PVVB; $|\text{PVB}_R, l_m\rangle$ 和 $|\text{PVB}_L, l_n\rangle$ 代表右旋和左旋圆偏振 PVBs; l_m, l_n 是各自携带的拓扑荷数; $\cos(\chi/2)$ 与 $\sin(\chi/2)$ 代表两正交圆偏振 PVBs 振幅, ψ 是两正交圆偏振 PVBs 之间的相位差, 其中 $\chi \in [0, \pi]$, $\psi \in [0, 2\pi]$.

完美涡旋光束是一种光束半径与拓扑电荷无关的环形涡旋光束, 往往由高斯光束依次经过螺旋相位板、锥透镜和傅里叶变换透镜 (或双曲聚焦透镜) 而获得. 因此, 利用单个超构表面获取完美涡旋光束, 其相位需同时满足螺旋相位、锥透镜相位和双曲聚焦透镜相位, 如图 1(c) 所示. 对于自旋复用超构表面, 当右旋圆偏振光 (right-handed circular polarized light, RCP light) 照射时, 生成的左旋圆偏振 PVB 相位分布为 [25]

$$\varphi_{\text{PVB}_L} = \frac{2\pi}{\lambda} \left[f - \sqrt{(x - x_L)^2 + (y - y_L)^2 + f^2} \right] + l_n \vartheta + \frac{2\pi}{d} (\sqrt{x^2 + y^2}) + \Delta\delta, \quad (2)$$

式中 (x_L, y_L, f) 为左旋圆偏振 PVB 焦点位置,

λ 为入射波长, l_n 为左旋圆偏振 PVB 拓扑荷数, $\vartheta = \arctan(y/x)$ 为方位角, 参数 d 为锥透镜周期, $\Delta\delta$ 表示左旋和右旋圆偏振 PVBs 分量间初始相位差. 通过调控参数 d 可控制 PVBs 亮环半径大小; 通过调控初始相位差 $\Delta\delta$, 可使生成的 PVVB 呈现不同的偏振分布.

当左旋圆偏振光 (left-handed circular polarized light, LCP light) 照射该自旋复用超构表面时, 生成的右旋圆偏振 PVB 相位分布为

$$\varphi_{\text{PVB}_R} = - \left[\frac{2\pi}{\lambda} (f - \sqrt{(x - x_R)^2 + (y - y_R)^2 + f^2}) + l_m \vartheta + \frac{2\pi}{d} (\sqrt{x^2 + y^2}) \right], \quad (3)$$

式中 (x_R, y_R, f) 为右旋圆偏振 PVB 焦点位置, l_m 表示右旋圆偏振 PVB 拓扑荷数. 由于 PVVB 是由两正交圆偏振 PVBs 叠加而成的, 欲获得 PVVB, 自旋复用超构表面须同时调控 LCP 和 RCP 入射光, 此时超构表面总相位 φ_{total} 可表示为 [26]

$$\varphi_{\text{total}} = \arg [\exp(i\varphi_{\text{PVB}_L}) + \exp(i\varphi_{\text{PVB}_R})], \quad (4)$$

式中 $x_L = x_R = \Delta x$, $y_L = y_R = \Delta y$.

欲获得多重 PVVBs, 自旋多路复用超构表面总相位 Φ_{total} 可表示为 [26]

$$\Phi_{\text{total}} = \arg \left\{ \sum_{s=1}^S C_s [M_s \exp(i\varphi_{\text{PVB}_L}^s) + N_s \exp(i\varphi_{\text{PVB}_R}^s)] \right\},$$

$$\varphi_{\text{LCP}}^s = \frac{2\pi}{\lambda} \left[f_s - \sqrt{(x - x_{L,s})^2 + (y - y_{L,s})^2 + f_s^2} \right] + l_{n,s}\vartheta + \frac{2\pi}{d_s} \sqrt{x^2 + y^2} + \Delta\delta_s,$$

$$\varphi_{\text{RCP}}^s = - \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} \left[f_s - \sqrt{(x - x_{R,s})^2 + (y - y_{R,s})^2 + f_s^2} \right] + l_{m,s}\vartheta + \frac{2\pi}{d_s} \sqrt{x^2 + y^2} \right\}, \quad (5)$$

式中 M_s 和 N_s 对应于两正交圆偏振 PVBs 幅值; S 为正整数, 表示自旋复用阶数; C_s 是分配给 PVVBs 的振幅比重因子. 需要说明的是: 1) 当 $M_s = N_s$ 即两正交圆偏振 PVBs 振幅相等叠加时, 生成圆偏振 PVVB, 对应 HyOPS 赤道上的点, 当 $M_s \neq N_s$ 即两正交圆偏振 PVBs 振幅不等叠加时, 生成椭圆偏振 PVVB, 对应 HyOPS 南北极与赤道之间的点; 2) 通过调控振幅比重因子 C_s 值, 可使生成的多重 PVVBs 亮环强度保持大致相同; 3) 通过设计两正

交圆偏振 PVBs 焦点位置, 可调控 PVVB 空间传播路径, 生成多通大容量 PVVBs, 如图 1(a) 所示 PVVBs 阵列.

本文基于纯几何相位调制的自旋多路复用超构表面生成多通大容量 PVVBs. 当 RCP 光入射时, 生成左旋圆偏振 PVB; 当 LCP 光入射时, 生成右旋圆偏振 PVB; 当 LP 光入射时, RCP 和 LCP PVBs 叠加即会生成 PVVB, 如图 2(a) 所示. 图 2(d) 插图

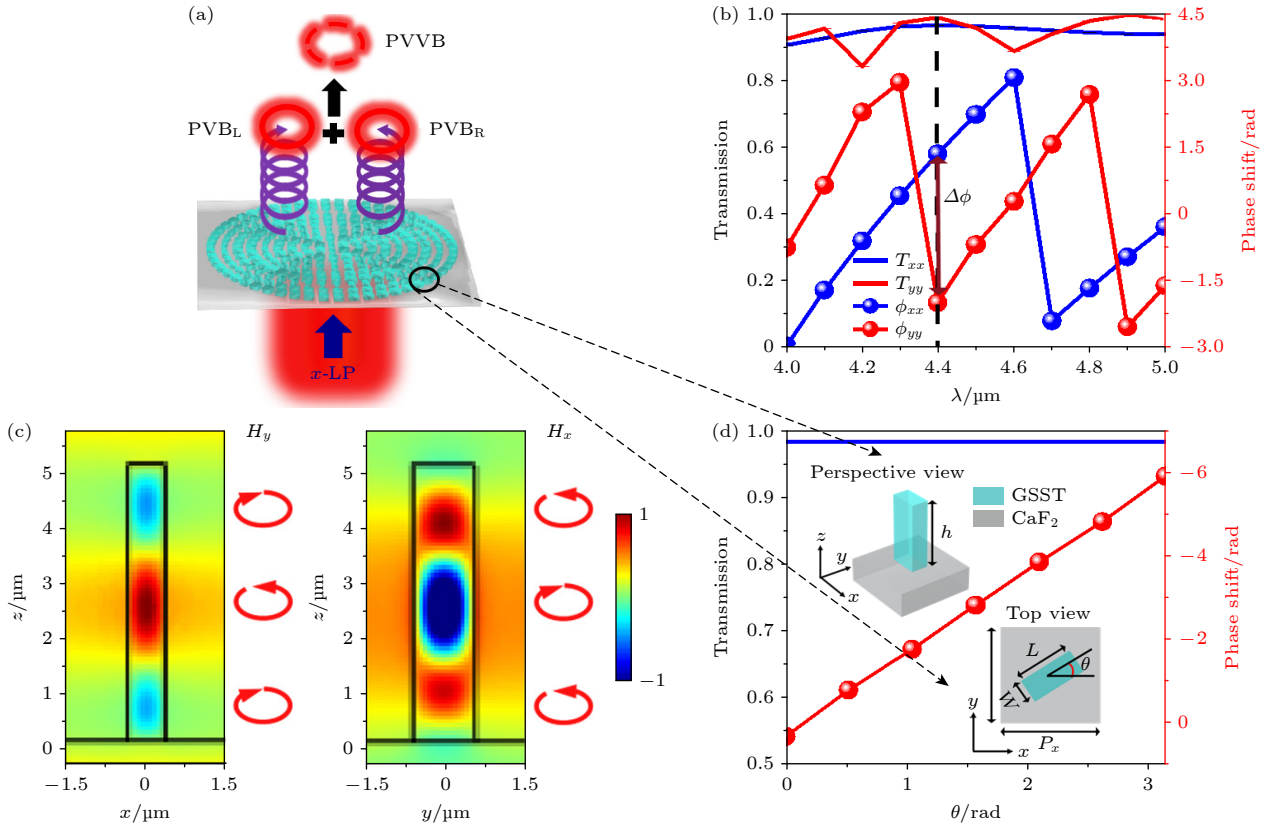


图 2 (a) 基于纯几何相位调制的自旋多路复用超构表面生成 PVVB 原理图; (b) 最优单元结构在不同波长 x 、 y -LP 光入射下的透射率 (T_{xx} , T_{yy}) 和相移 (ϕ_{xx} , ϕ_{yy}); (c) 超构原子在波长为 $4.4 \mu\text{m}$ x -LP、和 y -LP 光入射下产生的磁场 H_y 和 H_x 分布剖面图; (d) 当 GSST 纳米柱处于不同旋向角时, 最优单元结构在圆偏振光入射下的透射率和相移, 插图为纳米柱单元结构透视图和俯视图

Fig. 2. (a) Operating principle for generating multi-channel high-capacity PVVBs by using a spin-multiplexed metasurface based on pure geometric phase modulation; (b) simulated transmission (T_{xx} , T_{yy}) and phase shift (ϕ_{xx} , ϕ_{yy}) of the optimized unit cell under x and y -polarized illumination at different wavelengths; (c) magnetic components H_y and H_x existing in GSST nanopillar excited by x -polarized and y -polarized incident light of $\lambda = 4.4 \mu\text{m}$; (d) calculated transmission and phase shift of the optimized unit cell under circularly polarized illumination as a function of the rotation angle of the anisotropic GSST nanopillars, with insets showing the perspective and top views of unit cells.

(超构原子)由排列在 CaF_2 方形衬底上各向异性 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ (GSST) 纳米柱组成,其中超构原子周期 $P_x = P_y$, GSST 纳米柱面内尺寸为 L (长度)和 W (宽度),高为 h ,面内旋转角 $\theta = \varphi_{\text{total}} (\Phi_{\text{total}}) / 2$. 为提高整个超构表面器件透射率,超构表面需由半波片功能的超构原子构成,即满足 $|\phi_{xx} - \phi_{yy}| \approx \pi$,同时保持 $T_{xx} \approx T_{yy} \approx 1$, ϕ_{xx} 和 ϕ_{yy} 表示超构原子在线偏振光照射下沿长轴和短轴的透射相位, T_{xx} 和 T_{yy} 表示对应的透射率. 为验证所提方案可行性,本文采用有限元法对超构原子进行了优化,得到当入射波长 $\lambda = 4.4 \mu\text{m}$, 超构原子尺寸为 $P_x = P_y = 3 \mu\text{m}$, $L = 1.1 \mu\text{m}$, $W = 0.65 \mu\text{m}$ 及 $h = 4.8 \mu\text{m}$ 时,超构原子可实现半波片性能,即当圆偏振光入射时,超构原子可将其完全转化为相反手性的圆偏振透射光,如图 2(d) 所示. 图 2(d) 还给出了当圆偏振光照射超构原子,GSST 纳米柱旋转角从 0 变到 π 时,相反手性圆偏振透射光相位从 0 变到 2π ,振幅始终保持 ~ 1 ,这进一步证实所选单元结构可实现半波片性能. 为了揭示该超构原子实现高偏振转换效率的内在机制,图 2(c) 给出了该超构原子在波长 $\lambda = 4.4 \mu\text{m}$, x 线偏振 (x -LP) 和 y 线偏振 (y -LP) 光入射时的磁场 H_y 和 H_x 分布剖面图. 可观察到,对于 x -LP 光入射, H_y 磁场出现 3 个顺时针和逆时针交替的环形位移电流,这对应于沿 z 轴垂直排列的 3 个反平行磁偶极子;而对于 y -LP 光入射, H_x 磁场出现 3 个沿 z 轴方向的反平行磁偶极子;这种具有相反平行磁偶极子的类波导模式会产生 π 相位延迟,从而使该纳米柱具有高效半波片特性^[27].

3 结果与讨论

3.1 超构表面生成单模 PVVB

本文首先设计了 4 个超构表面样品 (MF1, MF2, MF3 和 MF4),用以产生 4 个不同模式 PVVBs (mode 1, mode 2, mode 3 和 mode 4). 4 个超构表

面设计参数见表 1. 将设计参数代入 (2) 式—(5) 式,可推导出每个超构原子的取向角,进而建立超构表面. 为验证所设计方法的可行性,本文采用 FDTD 构建超构表面,并对其性能进行了模拟仿真,如图 3 所示. 图 3(a) 是 4 个超构表面样品在波长 $\lambda = 4.4 \mu\text{m}$ 水平线偏振光照射下,生成的 PVVBs 在 x - z 平面上的电场强度分布. 可以看到,4 种模式 PVVBs 在传输空间场强轮廓几乎完全相同,与偏振阶次和拓扑荷数均无关,说明生成了完美涡旋光束. 图 3(b) 是 4 种模式 PVVBs 在 $z = 200 \mu\text{m}$ 横截面电场强度分布曲线. 两峰值间距可表示 PVVBs 亮环直径大小,可得 4 种模式 PVVBs 亮环半径分别为: $R_1 = 27 \mu\text{m}$, $R_2 = 28.4 \mu\text{m}$, $R_3 = 29 \mu\text{m}$ 和 $R_4 = 31.2 \mu\text{m}$,与设计理论半径值 $R_{1-4} = f \times NA = f\lambda/d = 29.3 \mu\text{m}$ 基本相符,如图 3(c) 所示. 图 3(d) 是 4 种模式 PVVBs 沿 $z = 140 \mu\text{m}$ 和 $z = 260 \mu\text{m}$ 两个横截面的亮环半径. 可看到,4 种模式 PVVBs 亮环半径在传输过程中保持基本一致. 图 3(e) 给出了 4 种模式 PVVBs 在焦距 $z = 200 \mu\text{m}$ 处亮环宽度,其被定义为 PVVBs 电场强度分布曲线每个峰值半高全宽 (full width at half-maximum, FWHM). 可看到,4 种模式 PVVBs 亮环宽度基本相同,与偏振阶次和拓扑荷数均无关. 因此,通过精心设计,所设计超构表面在线偏振光入射下可生成不同模式的 PVVBs,且不同模式的 PVVBs 亮环半径和环宽均与偏振阶次和拓扑荷数无关. 转化效率可有效衡量 PVVB 光束发生器的性能,其被定义为亮环强度 (在焦平面上,半径为 3 倍 FWHM 的圆上的电场强度) 与入射光束强度的比值^[28,29]. 如图 3(f) 所示,在设计波长 $\lambda = 4.4 \mu\text{m}$ 时,4 种模式的 PVVBs 转化效率均保持在 73% 以上,其中 mode 1 PVVB 的转化效率更是高达 89%. 这充分说明了所设计超构表面具有出色的高效转化性能.

为确定偏振态,本文采用不同偏振器捕获 4 种模式 PVVBs 在聚焦平面上场强分布,如图 3(h)

表 1 Mode 1—4 PVVBs 对应的具体参数
Table 1. Specific parameters of the mode 1—4 PVVBs.

Mode	$M:N$	l_n	l_m	$(\Delta x, \Delta y)/\mu\text{m}$	$f/\mu\text{m}$	$\Delta\delta$
1	2:1	-1	1	(0, 0)	200	0
2	1:2	-3	3	(0, 0)	200	$\pi/2$
3	1:1	3	-3	(0, 0)	200	π
4	1:1	-6	6	(0, 0)	200	$3\pi/2$

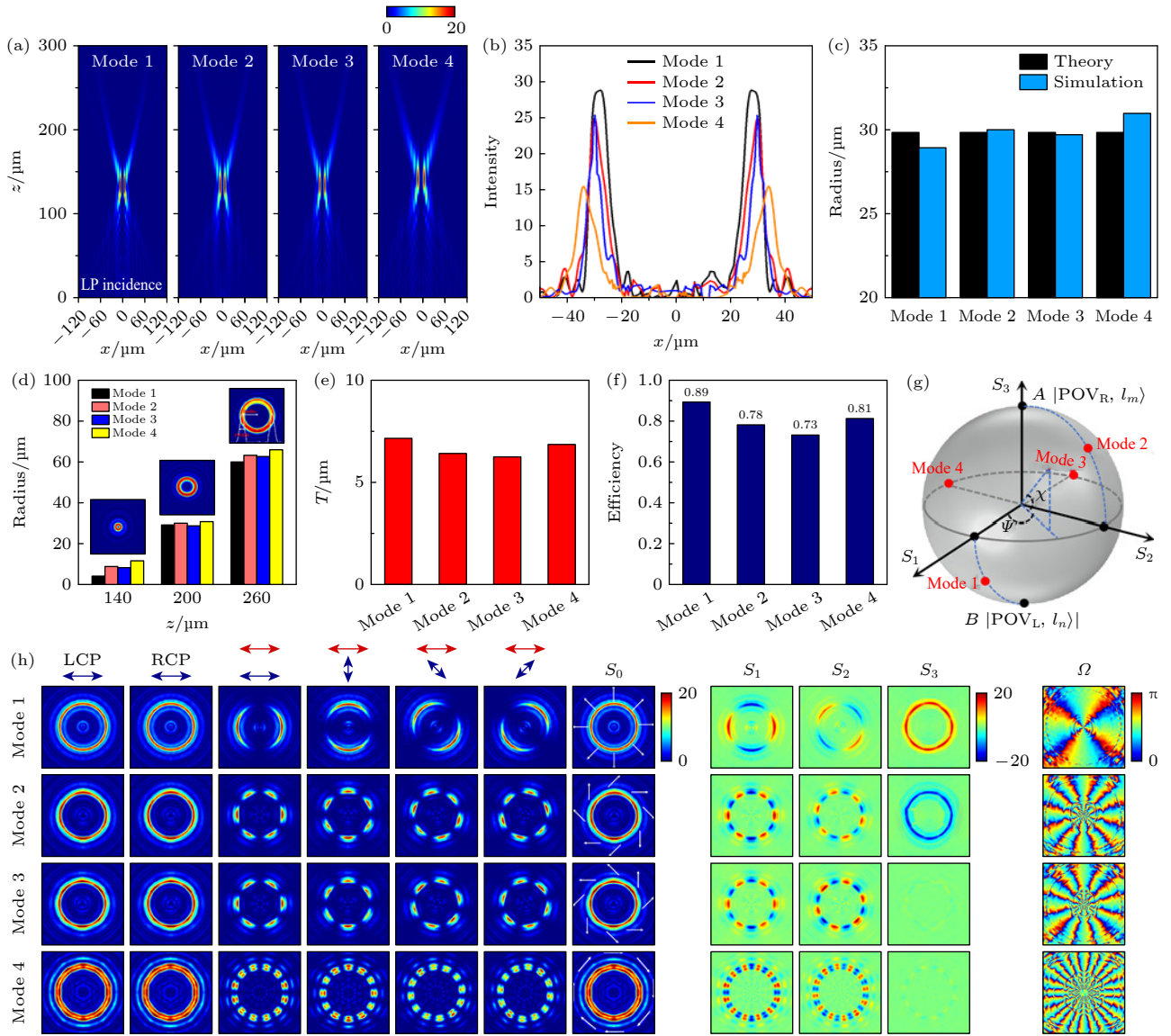


图 3 在 x -LP 光照射下, (a) 4 种模式 PVVBs 在 x - z 平面上电场强度分布; (b) 在焦平面上电场强度分布曲线; (c) 在焦平面上亮环半径; (d) 在 $z = 140, 200$ 和 $260 \mu\text{m}$ 三个横截面上的亮环半径; (e) 在焦平面上的亮环宽度; (f) 转化效率; (g) 在 HyOPS 上位置分布; (h) x -LP 光照射下, 4 种模式 PVVBs 在不同偏振片下对应的电场强度分布, 斯托克斯参数 (S_0, S_1, S_2 和 S_3) 及偏振方向 (Ω)

Fig. 3. Under x -LP illumination, (a) the electric field intensity distributions of the four mode PVVBs in the x - z plane; (b) the intensity profiles at the focal plane; (c) the radii of the bright rings at the focal plane; (d) the radii of the bright rings at $z = 140, 200$ and $260 \mu\text{m}$ cross-sections; (e) the widths of the bright rings at the focal plane; (f) conversion efficiency; (g) their spatial distributions on the HyOPS; (h) under x -LP illumination, the electric field intensity distributions, Stokes parameters (S_0, S_1, S_2 and S_3) and polarization orientations (Ω) of the four mode PVVBs under different polarizers.

所示. 在 x -LP 光照射下, 在出射端捕获的左旋或右旋偏振 PVBs 电场均呈环状场强分布, 且半径大小近似相等 (图 3(h)1-2 列); 当采用水平 (x -)、垂直 (y -)、对角线 ($\pi/4$) 和反对角线 ($3\pi/4$) 方向的线偏振器捕获时, 4 种模式 PVVBs 亮环轮廓大致相等, 但呈现出与线偏振器相关的各向异性偏振分布和特定数量光斑花瓣数 (图 3(h) 3—6 列). PVVBs 偏振阶次描述了在一个往返周期内光束偏振的旋转次数, 可表示为 $p = (l_m - l_n)/2$, 其中 l_m 和 l_n 表

示左旋和右旋偏振 PVBs 的拓扑荷数. 经验证实, 使用线性偏振器进行 PVVBs 电场捕获时, 光斑花瓣数等于 2 倍偏振阶次 $|p|$. 通过观察, 4 种模式 PVVBs 光斑花瓣数分别为 2, 6, 6 和 12, 故偏振阶次 $|p|$ 为 1, 3, 3 和 6, 与所设计左旋和右旋 PVBs 分量的拓扑荷数完全对应. 为进一步确定 4 种模式 PVVBs 偏振态, 图 3(h) 还给出了相应 Stokes 参数 (S_0, S_1, S_2 和 S_3) 分布和偏振方向 (Ω) 分布. 其中 $S_0 = I_L + I_R, S_1 = I_x - I_y, S_2 = I_{\pi/4} - I_{3\pi/4}$ 和

$S_3 = I_L - I_R$, I_L , I_R , I_x , I_y , $I_{\pi/4}$ 和 $I_{3\pi/4}$ 分别代表 PVVBs 的 LCP, RCP, x -, y -, $\pi/4$ 和 $3\pi/4$ 分量场强. 由图 3(h) 可知, 参数 S_1 和 S_2 均有偶数个光斑花瓣, 且环状光斑轮廓均由最大和最小强度的光斑花瓣依次交替组成, 最大和最小强度的光斑花瓣数均为 $2|p|$ 个. 参数 S_3 反映了 PVVBs 是否由等量 LCP 和 RCP PVBs 分量叠加而成. 由图 3(h) 可知, mode 1 和 mode 2 PVVBs Stokes 参数 $S_3 \neq 0$, 表明 mode 1 和 mode 2 PVVBs 由不等 LCP 和 RCP PVBs 叠加而成, 为椭圆偏振特性, 分别对应 HyOPS 上半球面和下半球面上的点; 而 mode 3 和 mode 4 PVVBs Stokes 参数 $S_3 = 0$, 表明组成 mode 3 和 mode 4 PVVBs 的 LCP 和 RCP PVBs 权重相等, 表现为圆偏振特性, 对应于 HyOPS 赤道上的点. 偏振角度 $\Omega = \arctan(S_2/S_1)/2$, 反映 PVVBs 偏振态. 经计算可得, 4 种模式 PVVBs 偏振角度依次为 $0, \pi/2, \pi$ 和 $3\pi/2$, 对应 HyOPS 面上 4 个不同位置, 如图 3(g) 所示. 总之, 通过精心设计超构表面结构, 可生成具备任意偏振阶次和偏振分布特性的完美矢量涡旋光束.

3.2 基于超构表面生成 PVVB 阵列

基于上述研究, 我们扩展了超构表面的功能, 设计出基于纯 PB 相位调制的超构表面样品 MF5, 不仅可同时生成多重 (32 重) PVVBs, 而且还可精准调控每个 PVVB 偏振态和偏振阶次. MF5 所需相位可由 (5) 式得到, 其中入射波长 $\lambda = 4.4 \mu\text{m}$, 自旋多路复用阶数 $S = 32$, 组成 PVVBs 的两正交偏振 PVBs 分量振幅比均为 $M_{1-32} : N_{1-32} = 1:1$. 为确保生成的 32 重 PVVBs 具备特定的偏振阶次和偏振分布, 且能在两个完全错开的焦平面以 4×4 矩阵形式排列, 我们对相关参数, 包括焦斑位置 ($\Delta x, \Delta y, f$)、振幅比重因子 C_s , 左旋和右旋偏振 PVBs 拓扑荷数 l_n 和 l_m , 及初始相位差 $\Delta\delta_s$ 进行精心设置, 如表 2 所列. 同时为保证 32 重 PVVBs 亮环半径一致 ($R \approx 30 \mu\text{m}$), 对参数 d_s 进行调整; 第 1 个焦平面上 ($f = 200 \mu\text{m}$) 16 重 PVVBs 对应 $d_{1-16} = \lambda f_{1-16}/R \approx 4.4 \times 200/30 = 29.33 \mu\text{m}$, 第 2 个焦平面上 ($f = 300 \mu\text{m}$) 16 重 PVVBs 对应 $d_{17-32} = \lambda f_{17-32}/R \approx 4.4 \times 300/30 = 44 \mu\text{m}$.

图 4(a) 为在 LCP 光照射下, MF5 在两个焦平面上生成的 RCP PVBs 阵列场分布图. 可观察

到这些 PVVBs 亮环半径和环宽基本一致. 图 4(b), (c) 是在 x -LP 光入射下, MF5 生成的 32 重 PVVBs E_x 和 E_y 分量场分布图, 可观察到这些 PVVBs 亮环轮廓仍保持基本一致, 但却由不同数量花瓣状光斑围绕而成, 且光斑分布不同, 说明这 32 重 PVVBs 偏振阶次不同且具备矢量特性. 通过计数花瓣状光斑数量, 可知模拟结果与理论设置完全吻合. 值得一提的是, E_x 或 E_y 场分布图中某些 PVVBs 光斑数相同, 但光斑分布不同, 如图 4(c) 所示, 说明这些 PVVBs 具有相同偏振阶次和不同偏振态. 图 4(d) 还给出了对应模式 PVVBs 的矢量场分布和偏振角度分布. 可知, 位于 $f = 200 \mu\text{m}$ 焦平面上的为一阶径向偏振分布 PVVB, 位于 $f = 300 \mu\text{m}$ 焦平面上的为一阶横向偏振分布 PVVB.

表 2 MF5 的具体参数

Table 2. Specific parameters of the MF5.

S	C_s	l_n	l_m	$\Delta x/\mu\text{m}$	$\Delta y/\mu\text{m}$	$f/\mu\text{m}$	$\Delta\delta$
1	1	-8	9	-150	350	200	$\pi/15$
2	1/8	-1	2	-50	350	200	$7\pi/15$
3	1/4	-4	4	50	350	200	$10\pi/15$
4	1	-8	8	150	350	200	$2\pi/15$
5	1/2	-5	6	-150	250	200	$15\pi/15$
6	1/2	-6	6	-50	250	200	$6\pi/15$
7	1/8	-1	1	50	250	200	0
8	1/8	-2	2	150	250	200	$14\pi/15$
9	1/4	-3	3	-150	150	200	$9\pi/15$
10	1/2	-5	5	-50	150	200	$8\pi/15$
11	1/2	-6	7	50	150	200	$5\pi/15$
12	1/8	-2	3	150	150	200	$13\pi/15$
13	1	-7	8	-150	50	200	$3\pi/15$
14	1/4	-3	4	-50	50	200	$12\pi/15$
15	1/4	-4	5	50	50	200	$11\pi/15$
16	1	-7	7	150	50	200	$4\pi/15$
17	1/8	-1	1	-150	-50	300	$12\pi/15$
18	1/4	-4	4	-50	-50	300	$3\pi/15$
19	1/4	-4	5	50	-50	300	$2\pi/15$
20	1/8	-1	2	150	-50	300	$8\pi/15$
21	1/2	-5	6	-150	-150	300	$14\pi/15$
22	1/8	-2	3	-50	-150	300	$5\pi/15$
23	1/2	-6	6	50	-150	300	$6\pi/15$
24	1/2	-5	5	150	-150	300	$7\pi/15$
25	1	-7	7	-150	-250	300	$\pi/15$
26	1	-7	8	-50	-250	300	$4\pi/15$
27	1	-8	9	50	-250	300	$11\pi/15$
28	1/8	-2	2	150	-250	300	$14\pi/15$
29	1/4	-3	3	-150	-350	300	$10\pi/15$
30	1	-8	8	-50	-350	300	$15\pi/15$
31	1/2	-6	7	50	-350	300	$13\pi/15$
32	1/4	-3	4	150	-350	300	$9\pi/15$

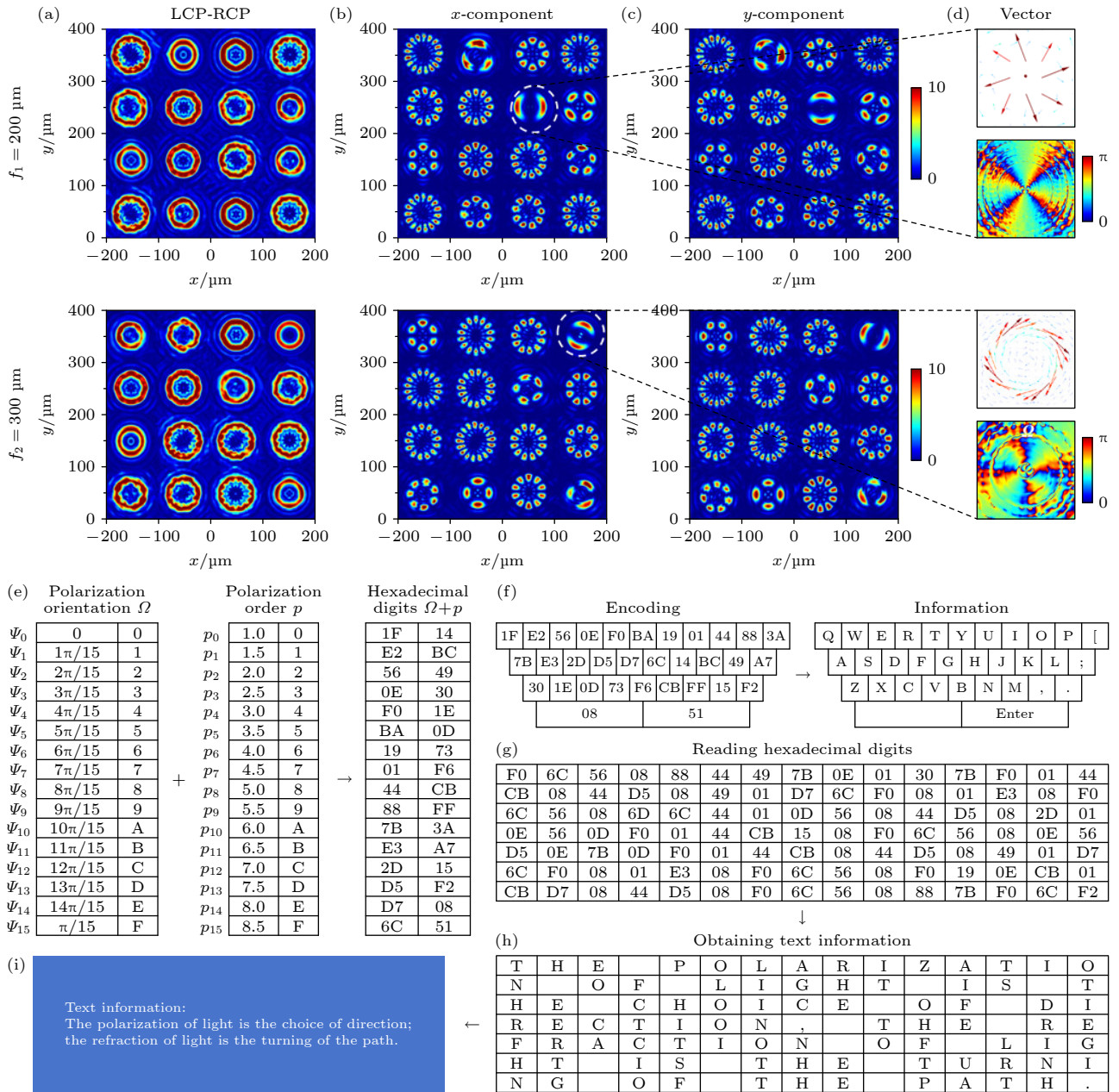


图 4 超构表面 MF5 在 LCP 光下生成 RCP PVBs 阵列的电场强度分布图 (a) 及在 LP 光下生成的 32 重 PVVBs E_x 分布图 (b) 和 E_y 分布图 (c); (d) 对应模式 PVVBs 的矢量场分布和偏振角度分布; (e) PVVBs 代码表; (f) 编码方法和编码表; (g) 105 个包含两字节的十六进制数字序列; (h), (i) 解密的文本信息

Fig. 4. Electric field intensity distributions of the RCP PVB array generated by the metasurface MF5 under LCP illumination (a), and E_x (b) and E_y (c) intensity distributions of 32-fold PVVBs generated by the metasurface MF5 under LP illumination; (d) vector field distributions and polarization orientation of the corresponding mode PVVBs; (e) codebook of the PVVBs; (f) encoding method and the encoding diagram; (g) a sequence of 105 hexadecimal numbers consisting of two bytes; (h), (i) the decrypted text information.

上述结果证明可在不同位置定制任意偏振分布和偏振阶次 PVVBs, 且每个 PVVB 可独立调控, 这为光学信息传输提供了一种新加密方法. 利用 PVVBs 偏振态 (偏振角度 Ω) 和偏振阶次 (p) 两个并行维度, 可编码出各种包含两个字节的十六进制数, 其中偏振方向 Ω 代表第 1 个字节, 偏振阶次

p 代表第 2 个字节, 因此每个 PVVB 代表一个包含两个字节的十六进制数. 通过设计携带 n_1 个不同 Ω 值和 n_2 个不同 p 值的多重 PVVBs, 理论上可编码出 $n_1 \times n_2$ 个包含两个字节的十六进制数. 为验证该加密方法的可行性, 图 4(e) 给出了包含两个字节的十六进制数的编码表. 为简单起见, 偏振方

向 Ω 范围设置为 $0-\pi$, 步长为 $\pi/15$, 代表十六进制数第 1 个字节 0 到 F; 偏振阶次 p 范围设置为 $1-8.5$, 步长为 0.5, 代表十六进制数第 2 个字节 0 到 F, 将偏振方向 Ω 和偏振阶次 p 任意组合, 可得到 256 个包含两个字节的十六进制数. MF5 产生的 32 重 PVVBs 可代表 32 个不同的包含两个字节的十六进制数. 对这 32 个十六进制数值进行编码, 可覆盖标准键盘上 26 个英文字母和 6 个功能键, 如图 4(f) 所示. 理论上, 上述编码方法可支持任何文本信息的加密和传输, 在信息安全和通信领域具备鲁棒适用性和通用性.

作为概念性验证, 图 4(g), (h) 演示了利用上述编码方法进行信息加密与传输. 用户 1 将明文转换为多个包含两个字节的十六进制数的密文 (图 4(g) 所示), 并将密文、精心设计的超构表面样品 (加密信息载体) 及线偏振器 (密钥) 一并发送给用户 2. 用户 2 收到后, 利用波长为 $4.4 \mu\text{m}$ 的 x -LP 光照射超构表面样品, 用线偏振器捕获两个焦平面上 PVVBs 阵列场分布 (如图 4(b) 所示), 通过分析每个 PVVBs 偏振方向和偏振阶次, 得到 32 个包含两个字节的十六进制数, 对照如图 4(f) 所示的代码表, 可轻松破译每个十六进制数对应的具体加密信息. 根据双方共享的密码本, 用户 2 可轻松地将接收到的密文破译成文本信息, 如图 4(h), (i) 所示. 这种将光的轨道角动量和偏振特性通过并行通道同时整合到 PVVBs 阵列的加密和解密过程, 可有效隐藏被加密的信息, 避免信息外泄, 极大地增强了光学信息加密系统的安全性. 任何人想获得加密信息都需要同时具备加密信息载体 (超构表面样品), 定制化密钥 (线偏振片), 字符编码系统和密码本. 即使某人非法获得了加密信息载体和密钥, 并获得 PVVBs 阵列的偏振阶次和偏振角度, 但由于密码本和字符编码系统是定制化的, 也无法准确获取被加密的明文信息. 这种定制化的密码本和字符编码系统进一步增强了该光学信息加密系统的安全性.

4 总 结

综上所述, 本文提出并验证了基于纯 PB 相位调制的单层全介质超构表面在中红外波段可生成多通大容量 PVVBs, 且每个 PVVB 可独立调控, 互不干扰. PVVBs 是由两正交圆偏振 PVBs 空间

叠加而成的, 通过调控两 PVBs 的轨道角动量, 可实现任意偏振阶次的 PVVBs; 通过调整两 PVBs 分量之间的相位差和振幅比, PVVBs 偏振态可覆盖整个庞加莱球面. 此外, 基于 PVVBs 偏振阶次和偏振态两个并行维度, 本文实现了光信息加密的概念性演示. 这项工作为利用超紧凑平面纳米光子元件实现结构化光束的高效生成与控制, 并促进其在光通信、光加密、光数据存储和量子信息等应用领域奠定了基础. 需要指出的是, 这种基于纯 PB 相位调制的单层全介质超构表面生成多通大容量 PVVBs 的技术除了针对中红外单一波长外, 利用纯 PB 相位固有的宽带属性, 还可拓展至整个可见光波段乃至更宽的光谱范围内, 实现多光谱多通大容量 PVVBs 阵列; 且由于每个 PVVB 可独立调控, 互不干扰, 通过数学化手段还可调控 PVVBs 三维传输轨迹, 进一步提高集成度和信道容量; 此外, 这项技术还可与其他光学元件如全光纤、微光学阵列等进行集成, 形成更加紧凑高效的光学系统, 为利用结构化光束在其他领域如光微操作、三维光显示、光传感、光成像等方面的应用开辟新的可能性.

参考文献

- [1] Guo Y H, Zhang S C, Pu M B, He Q, Jin J J, Xu M F, Zhang Y X, Gao P, Luo X G 2021 *Light: Sci. Appl.* **10** 63
- [2] Shen Y J, Yang X L, Naidoo D, Fu X, Forbes A 2020 *Optica* **7** 820
- [3] Liu Z X, Liu Y Y, Ke Y G, Liu Y C, Shu W X, Luo H L, Wen S C 2016 *Photonics Res.* **5** 15
- [4] Liu M Z, Huo P C, Zhu W Q, Zhang C, Zhang S, Song M W, Zhang S, Zhou Q W, Chen L, Lezec H 2021 *Nat. Commun.* **12** 2230
- [5] Xu Y N, Tian X M, Xu J W, Zhang S L, Huang Y F, Li L, Liu J L, Xu K, Yu Z J, Li Z Y 2024 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **57** 425104
- [6] Ma Y B, Rui G H, Gu B, Cui Y P 2017 *Sci. Rep.* **7** 14611
- [7] Shao W, Huang S J, Liu X P, Chen M S 2018 *Opt. Commun.* **427** 545
- [8] Xu Y, Su X R, Chai Z, Li J L 2024 *Laser Photon. Rev.* **18** 2300355
- [9] Niv A A, Biener G, Kleiner V, Hasman E 2006 *Opt. Express* **14** 4208
- [10] Ostrovsky A S, Rickenstorff-Parrao C, Arrizón V 2013 *Opt. Lett.* **38** 534
- [11] Vaity P, Rusch L 2015 *Opt. Lett.* **40** 597
- [12] Li D L, Feng S T, Nie S P, Chang C L, Ma J, Yuan C J 2019 *J. Appl. Phys.* **125** 073105
- [13] Zou X J, Zheng G G, Yuan Q, Zang W B, Chen R, Li T Y, Li L, Wang S M, Wang Z L, Zhu S N 2020 *Photonix* **1** 1
- [14] Zhang C Y, Zhang B F, Ge S K, Han C X, Wang S Z, Han Q Y, Gao W, Chu T S, Dong J, Zhang M D 2024 *Opt. Express*

- 32 31359
- [15] Zhang X L, Gong Y H, Li M, Li H 2024 *Opt. Express* **32** 8069
- [16] Kim I, Ansari M A, Mehmood M Q, Kim W Q, Jang J, Zubair M, Kim Y K, Rho J 2020 *Adv. Mater.* **32** 2004664
- [17] Huang Y F, Tian X M, Zhang S L, Xu Y N, Xu J W, Yu Z J, Jiang T, Li Z Y 2024 *Opt. Lasers Eng.* **183** 108523
- [18] He H R, Peng M Y, Cao G T, Li Y B, Liu H, Yang H 2024 *Opt. Laser Technol.* **180** 111555
- [19] Liu Y C, Ke Y G, Zhou J X, Liu Y Y, Luo H L, Wen S C, Fan D Y 2017 *Sci. Rep.* **7** 44096
- [20] Zhang Y C, Liu W W, Gao J, Yang X D 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1701228
- [21] Tian S N, Qian, Z H, Guo H M 2022 *Opt. Express* **30** 21808
- [22] Liu Y, Zhou C X, Guo K L, Wei Z C, Liu H Z 2022 *Opt. Express* **30** 30881
- [23] Vogliardi A, Ruffato G, Bonaldo D, Zilio S D, Romanato F 2023 *Opt. Lett.* **48** 4925
- [24] Gu M N, Cheng C, Zhan Z J, Zhang Z H, Cui G S, Zhou Y X, Zeng X Y, Gao S, Choi D Y, Cheng C F 2024 *ACS Photonics* **11** 204
- [25] He J N, Wan M L, Zhang X P, Yuan S Q, Zhang L F, Wang J Q 2022 *Opt. Express* **30** 4806
- [26] Zhou T, Liu Q, Liu Y S, Zang X F 2020 *Opt. Lett.* **45** 5941
- [27] Huang K, Deng J, Leong H S, Yap S L K, Yang R B, Teng J H, Liu H 2019 *Laser Photonics Rev.* **13** 1800289
- [28] Xie J F, Guo H M, Zhuang S L, Hu J B 2021 *Opt. Express* **29** 3081
- [29] Zhang Z H, Li T, Jiao X F, Song G F, Xu Y 2020 *Appl. Sci.* **10** 5716

Generation and independent-manipulation of multi-channel high-capacity perfect vector vortex beams based on geometric metasurfaces*

ZHANG Shenglan TIAN Ximin[†] XU Junwei[‡]
 XU Yaning LI Liang LIU Jielong

(School of Materials Science and Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China)

(Received 14 December 2024; revised manuscript received 8 January 2025)

Abstract

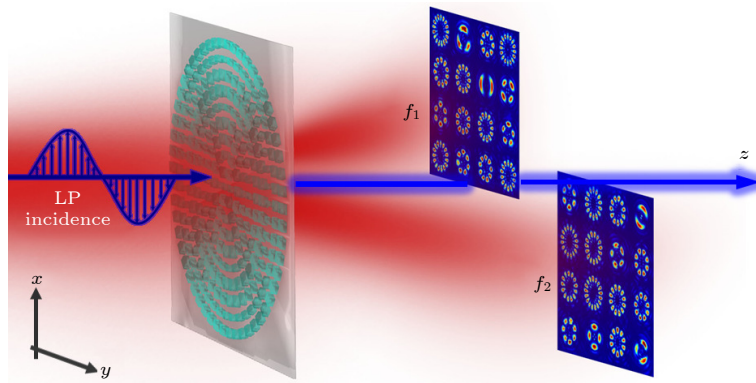
Perfect vector vortex beams (PVVBs), which are characterized by spiral phase, donut-shaped intensity profile and inhomogeneous polarization of a light beam carrying spin angular momentum (SAM) and orbital angular momentum (OAM), have a constant bright ring radius and ring width which are unaffected by the changes of their carrying topological charge (TC), thus making them highly valuable in many optical fields. Metasurfaces, as planar optical devices composed of subwavelength nanostructures, can precisely control the phase, polarization, and amplitude of electromagnetic waves, providing a revolutionary solution for integrated vector field manipulation devices. However, existing metasurfaces still encounter significant challenges in generating high-capacity, polarization- and orbital angular momentum-independent controlled perfect vector vortex beams. In order to solve this problem, in this work a spin-multiplexing scheme based on pure geometric phase modulation on a metasurface platform is used to achieve high-capacity polarization- and OAM-independent controlled PVVBs. The metasurfaces with a combined phase profile of a spiral phase plate, an axicon, and a focusing (Fourier) lens are spatially encoded by rectangular $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Se}_4\text{Te}_1$ (GSST) nanopillar with various orientations on a CaF_2 square substrate. When illuminated by circularly polarized light with opposite chirality, the metasurfaces can generate various perfect vector vortex beams (PVBs) with arbitrary topological

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12004347), the Scientific and Technological Project in Henan Province, China (Grant Nos. 242102211081, 232102320057), the Youth Backbone Project in Henan Province, China (Grant No. 2023GGJS113), the Key Scientific Research Projects of Colleges and Universities in Henan Province, China (Grant Nos. 24A140025, 25B140009), and the Aeronautical Science Foundation of China (Grant No. 2020Z073055002).

[†] Corresponding author. E-mail: xmtian007@zua.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: xjunwei001@zua.edu.cn

charges. For linearly polarized incidence, the metasurface is employed to induce PVVBs by coherently superposing PVBs with spin-opposite OAM modes. The polarization states and polarization orders of the generated PVVBs can be flexibly customized by controlling the initial phase difference, amplitude ratio, and topological charges of the two orthogonal PVB components. Notably, through precisely designing the metasurface's phase distribution and the propagation path of the generated beams, the space and polarization multiplexing can be realized in a compact manner of spatial PVVB arrays, significantly increasing both information channels and dimensions for the development of vortex communication capacity. With these findings, we demonstrate an innovative optical information encryption scheme by using a single metasurface to encode personalized polarization states and OAM in parallel channels embedded within multiple PVVBs. This work aims to establish an ultra-compact, robust platform for generating multi-channel high-capacity polarization- and OAM-independent controlled PVVBs in the mid-infrared range, and promote their applications in optical encryption, particle manipulation, and quantum optics.



Keywords: metasurface, perfect vector vortex beams, perfect vortex beams, spin angular momentum, orbital angular momentum

PACS: 41.20.Jb

DOI: [10.7498/aps.74.20241725](https://doi.org/10.7498/aps.74.20241725)

CSTR: [32037.14.aps.74.20241725](https://cstr.net.cn/detail/32037.14.aps.74.20241725)