

基于级联涡旋半波片的高阶柱矢量光束产生及其偏振检测

孙汝生¹, 刘通^{1*}, 王琛¹, 李瑞健¹, 任元²

¹航天工程大学宇航科学与技术系, 北京 101416;

²航天工程大学基础部, 北京 101416

摘要 涡旋半波片(VHP)是一种快轴取向在空间分布上呈特定角向变化规律的偏振光学元件。通过级联两个或多个低阶VHP可以产生任意高阶柱矢量光束(CVB)。基于单个VHP的琼斯矩阵,推导了VHP级联后的等效琼斯矩阵,从理论上解释了VHP级联后等效阶数的变化规律。实验上,利用 $m=-1$ 和 $m=2$ 的两个VHP级联产生1阶和3阶径向偏振和角向偏振CVB,计算斯托克斯参数并绘制矢量光束偏振态分布图,并与 $m=1$ 的单个VHP直接生成的CVB进行比较,证明了级联方法的可靠性。在级联VHP产生相同高阶CVB时,VHP的不同级联顺序能够影响由于中心错位而造成光束畸变程度。经实验对比分析,得到了级联应用中能够稳定产生高质量、高阶CVB的方法,并通过级联多个VHP产生了100阶以内任意CVB。

关键词 物理光学; 柱矢量光束; 涡旋半波片; 琼斯矩阵; 斯托克斯参数; 偏振检测

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1326001

High-Order Cylindrical Vector Beam Generation and Its Polarization Detection Based on Cascade Vortex Half-Wave Plates

Sun Rusheng¹, Liu Tong^{1*}, Wang Chen¹, Li Ruijian¹, Ren Yuan²

¹Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

²Basic Ministry, Space Engineering University, Beijing 101416, China

Abstract The vortex half-wave plate (VHP) is a polarized optical element whose fast axis orientation changes in a specific angular direction in the spatial distribution. By cascading two or more low-order VHPs, any high-order cylindrical vector beam (CVB) can be generated. Based on the Jones matrix of a single VHP, the equivalent Jones matrix of the VHP cascaded is derived, and the change of the equivalent order after the VHP cascaded is theoretically explained. In the experiment, the two VHPs of $m=-1$ and $m=2$, are used to cascade to generate the one-order and three-order radial polarization and angular polarization CVBs, to calculate the Stokes parameters and draw the vector beam polarization distribution diagram, and to be compared with one-order CVBs that directly generated by the VHP of $m=1$, which proves the reliability of the cascade method. When the cascade produces the same high-order CVB, the different cascading sequence of the VHPs can affect the degree of beam distortion caused by the center misalignment. After experimental comparison and analysis, it is obtained that high-quality and high-order CVBs can be stably produced in the cascade application. By cascading multiple VHPs, the CVBs within 100 orders are generated.

Key words physical optics; cylindrical vector beam; vortex half-wave plate; Jones matrix; Stokes parameter; polarization detection

1 引言

矢量光束是指偏振态在空间上非均匀分布的光

束,柱矢量光束(CVB)是一种偏振态呈轴对称分布的特殊矢量光束^[1-2],由于存在偏振奇点所以形成中空暗核^[3-4],表现为形状如同甜甜圈的环形光斑^[5-6],其中径

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2021-12-20; 录用日期: 2022-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(61805283,11772001)

通信作者: *liutong719@163.com

向偏振(RP)矢量光束和角向偏振(AP)矢量光束作为 CVB 的典型代表,在紧聚焦和激光材料加工^[7-8]、粒子加速和捕获^[9-10]、超分辨率成像^[11-12]和光学计量^[13-15]等领域得到了广泛的应用。

现有多种成熟技术和方法产生 CVB,主要分为腔内转换(主动)和腔外转换(被动)两类^[16]。腔内转换法通过改变激光器谐振腔结构或加入特定器件,经过泵浦光的泵浦作用直接生成 CVB,具有光束质量好和能量转化效率高的优点,但是激光器谐振腔空间受限且激光器搭建复杂,使用不够灵活。腔外转换法是指通过某些相位或偏振器件,将标量偏振光束转换为 CVB,常用的外部器件包括各向异性晶体^[17-18]、特殊结构相位板^[19-20]、空间光调制器^[21-22]、衍射光学元件^[23]、亚波长光栅^[24-25]和超表面^[26-27],但是腔外转换法存在设计成本高、转化效率低以及光路对准精度要求高等问题。此外,在很多实际应用场合比如模分复用光通信系统中,需要同时产生大量不同阶数的 CVB。目前产生 CVB 的方法通常要设计好相应阶数的转换器件,这种方式成本高并且无法实现矢量光束阶数的连续调节。因此,使用简单的光路实现阶数可调的 CVB 能有效降低成本,具有重要的实际应用价值。

涡旋半波片(VHP)是一种常用于产生 CVB 的偏振光学元件^[3]。VHP 在整个有效作用区域内具有一致的相位延迟 π ,但其快轴的方向围绕中心按照一定规律不断变化,因此可以认为是一种特殊的半波片。相比于液晶 Q 板^[28-29]、超表面等具有类似功能的器件,VHP 具有较高的透射率和转换效率,在使用便捷性方面的优势也很突出。文献[30]中通过级联两个或多个低阶 VHP,能够灵活地产生高阶 CVB,并做了等离子源的实验。在现有方案的基础上,想要进一步提高矢量光束制备阶数,存在以下几个方面的困难。首先仅利用低阶 VHP 级联制备高阶 CVB 需要利用大量半波片,使矢量光束制备系统复杂、成本较高。其次参与级联的 VHP 越多,光路对准越困难,容易导致光束质量下降。此外过多波片级联容易产生较多的能量损耗,影响制备效率。目前还缺少高阶 VHP 级联制备

CVB 和提高 VHP 级联系统容错率方面的研究。

本文通过简单的光路设计,利用 $m_1 = -1$ 与 $m_2 = 2$ 的两种 VHP 级联产生了阶数为 1 的 CVB,并与使用 $m = 1$ 的单个 VHP 产生的 CVB 进行比较。在矢量光束的检测方面,首先利用线偏振片对径向偏振和角向偏振两种光束进行偏振态分布检测,通过测量不同偏振方向对应的光斑形状,证明级联应用的可行性;其次,设计高效的斯托克斯参数的测量方法,获得两种不同方式所产生 CVB 的斯托克斯参数并进行对比,证明级联方式的可靠性。通过对级联 VHP 的琼斯矩阵的推导进一步发现,为了产生高阶数的 CVB 可以采用多种 VHP 排布顺序,而不同阶数 VHP 放置的前后顺序能够影响 CVB 的光束质量。

2 基本原理

2.1 VHP

VHP 通常由双折射液晶聚合物制作而成,在任意位置处均有与半波片类似的快轴,与普通半波片的区别在于其快轴方向沿着周向均匀变化,具体的快轴分布可以表示为

$$\theta = \frac{m}{2}\varphi + \sigma, \quad (1)$$

式中: φ 为 VHP 方位角; θ 为一定方位角下的 VHP 快轴方向; 带参数 m 和 σ 的 VHP 可以表示为 $VHP(m, \sigma)$, 其中 σ 是 $\varphi = 0$ 时快轴的初始角度, 只影响 VHP 快轴的整体旋转角, 阶数 m 为固定数值, 通常为整数, 阶数 m 直接决定了 VHP 的快轴分布, 通常取 $\sigma = 0$ 。但旋转 VHP, 初始角度 σ 会发生变化, $m = 2$ 的 VHP 不受此影响。设转动角度为 δ , 顺时针为正, 逆时针为负。那么 σ 与 δ 关系式为

$$\frac{m}{2}\delta - \delta = \sigma. \quad (2)$$

图 1 直观地给出了 $VHP(-1, 0)$ 、 $VHP(1, 0)$ 、 $VHP(1, -45^\circ)$ 和 $VHP(3, 0)$ 的快轴分布规律, 其中箭头表示快轴, x 轴为 $\varphi = 0$ 初始方向。

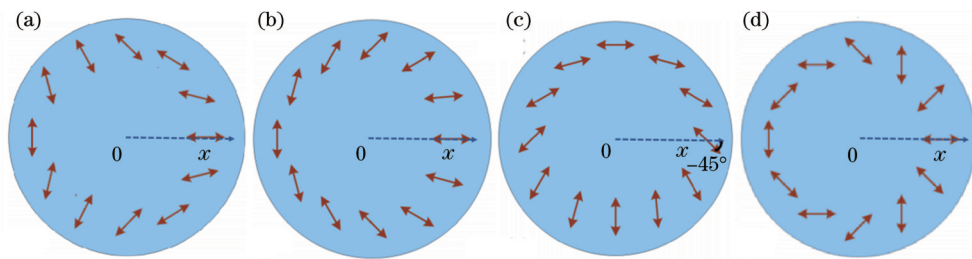


图 1 VHP 的快轴分布规律示意图。(a) $VHP(-1, 0)$; (b) $VHP(1, 0)$; (c) $VHP(1, -45^\circ)$; (d) $VHP(3, 0)$

Fig. 1 Schematic diagram of fast axis distributions of VHP. (a) $VHP(-1, 0)$; (b) $VHP(1, 0)$; (c) $VHP(1, -45^\circ)$; (d) $VHP(3, 0)$

2.2 CVB 的产生

VHP 的琼斯矩阵^[3]表示为

$$J_{m,\sigma} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & -\cos 2\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(m\varphi + 2\sigma) & \sin(m\varphi + 2\sigma) \\ \sin(m\varphi + 2\sigma) & -\cos(m\varphi + 2\sigma) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

当入射光为水平线偏振光束 $E_{//} = [1 \ 0]^T$ 时, 通过 VHP(1, 0) 后产生径向偏振光束。入射光为垂直线偏振光时 $E_{\perp} = [0 \ 1]^T$, 通过 VHP(1, 0) 产生角向偏振光束。具体公式推导如下:

$$E_{RP} = J_{1,0} E_{//} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ \sin \varphi & -\cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$E_{AP} = J_{1,0} E_{\perp} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ \sin \varphi & -\cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \varphi \\ -\cos \varphi \end{bmatrix}. \quad (5)$$

2.3 VHP 的级联应用

现有的 VHP 制作完成后其阶数 m 就已固定, 为了能够获得更多阶数的 CVB, 可将两个或多个 VHP 级联使用, 该方法能够充分利用低阶 VHP 产生任意高阶 CVB。两个阶数分别为 $m_1=1, m_2=2$ 的 VHP 组合后(光束先入射 m_1 后入射 m_2), 其等效琼斯矩阵可以表示为

$$J_2 J_1 = \begin{bmatrix} \cos(m_2 \varphi + 2\sigma) & \sin(m_2 \varphi + 2\sigma) \\ \sin(m_2 \varphi + 2\sigma) & -\cos(m_2 \varphi + 2\sigma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(m_1 \varphi + 2\sigma) & \sin(m_1 \varphi + 2\sigma) \\ \sin(m_1 \varphi + 2\sigma) & -\cos(m_1 \varphi + 2\sigma) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos[(m_2 - m_1)\varphi + 2\sigma] & -\sin[(m_2 - m_1)\varphi + 2\sigma] \\ \sin[(m_2 - m_1)\varphi + 2\sigma] & \cos[(m_2 - m_1)\varphi + 2\sigma] \end{bmatrix}. \quad (6)$$

将该器件组合放到光路中, 入射光为水平偏振或垂直偏振时分别产生 $m_2 - m_1 = 1$ 阶径向矢量光束和角向矢量光束, 实现了两个阶数的相减。值得注意的是, 当产生角向矢量光束时, 其偏振方向与单独一个 1 阶 VHP 产生的角向矢量光束之间有的相位差 π , 但依然可以认为, 当光束先通过 m_1 阶 VHP 再通过 m_2 阶 VHP 时可以等效成光束直接通过 $m_2 - m_1 = 1$ 阶的 VHP。

如果在此基础上再级联一个 m_3 阶的 VHP, 并取 $\sigma = 0$, 则总的等效琼斯矩阵为

$$J_3(J_2 J_1) = \begin{bmatrix} \cos(m_3 \varphi) & \sin(m_3 \varphi) \\ \sin(m_3 \varphi) & -\cos(m_3 \varphi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(m_2 - m_1)\varphi & \sin(m_2 - m_1)\varphi \\ \sin(m_2 - m_1)\varphi & -\cos(m_2 - m_1)\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(m_3 - m_2 + m_1)\varphi & \sin(m_3 - m_2 + m_1)\varphi \\ \sin(m_3 - m_2 + m_1)\varphi & -\cos(m_3 - m_2 + m_1)\varphi \end{bmatrix}. \quad (7)$$

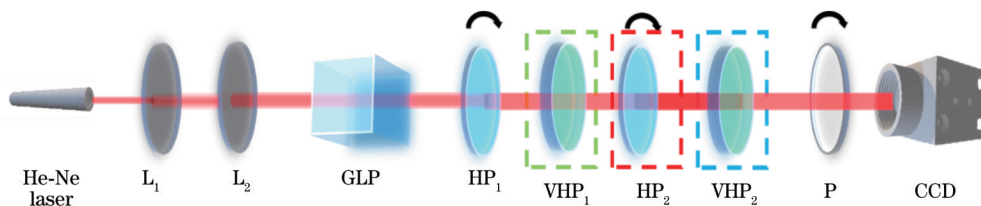
当 $m_2 = 0$ 时, 级联后的等效阶数为 $m_3 + m_1$, 这就实现了两个 VHP 阶数的相加。普通半波片可以认为是 $m = 0$ 的 VHP, 因此在 m_3 和 m_1 阶 VHP 中间加入半波片即可实现阶数的相加。

综上, 级联方式能够实现 VHP 阶数的相加以及相减, 该方法也适用于更多 VHP 级联的情况, 能够根据需要生成任意阶 CVB。

3 实验装置与测量方法

实验装置如图 2 所示。He-Ne 激光器发射出的光束经过两个透镜 (L_1 和 L_2) 构成的望远镜系统进行扩束

准直, 再经过格兰偏振棱镜 (GLP) 起偏, 通过旋转棱镜可以改变透射光束的偏振态并且提高光束的偏振纯度。起偏后的光束经过半波片 (HP_1), 通过旋转 HP_1 改变快轴方向能够改变入射到级联 VHP 系统中光束的偏振方向, 用于产生不同类型的 CVB。从左至右第一和第三个虚线框中可根据需要加入不同阶数的 VHP, 可以产生多种不同阶数的 CVB。中间虚线框中为快轴沿水平方向的半波片, 当中间虚线框添加 HP_2 时可以实现阶数相加, 不添加则实现阶数相减。产生的矢量光束最终通过可旋转的偏振片 P, 再用 CCD 相机采集其光强分布并进行处理和分析。



L: lens; GLP: Glan polarizing prism; HP: half-wave plate; VHP: vortex half-wave plate; P: linear polarizer; CCD: camera

图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental device

对矢量光束的检测主要通过两种方式进行。首先利用偏振片检测光斑形状: 改变偏振片 P 的透光轴方向, 分别选择 $0^\circ, 45^\circ, 135^\circ$ 观察采集到的光斑形状, 比较级联产生的 1 阶 CVB 与直接产生的 CVB 的光斑是

否一致, 从而定性验证级联方法产生矢量光束的可行性。其次进行斯托克斯参数分布的测量: 在偏振片 P 与 VHP_2 之间添加 $1/4$ 波片, 通过旋转 $1/4$ 波片的快轴以及偏振片透光轴的方向, 再用 CCD 相机记录相应的

光强分布,利用如下公式得到光束的斯托克斯参数 S_1 、 S_2 、 S_3 以及偏振方向角 ϕ 和偏振椭圆率 ψ ^[2]:

$$S_1 = I_x - I_y = \frac{I_{0^\circ} - I_{90^\circ}}{I_{0^\circ} + I_{90^\circ}}, \quad (8)$$

$$S_2 = I_{45^\circ} - I_{135^\circ} = \frac{I_{45^\circ} - I_{135^\circ}}{I_{45^\circ} + I_{135^\circ}}, \quad (9)$$

$$S_3 = I_R - I_L = \frac{I_{0^\circ}^{135^\circ} - I_{0^\circ}^{45^\circ}}{I_{0^\circ}^{135^\circ} + I_{0^\circ}^{45^\circ}}, \quad (10)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{S_2}{S_1} \right), \quad (11)$$

$$\psi = \frac{1}{2} \arctan \frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}, \quad (12)$$

式中, I 为光强, I_n^m 的上标 m 为 1/4 波片的快轴方向, 下标 n 为偏振片的透光轴方向。

4 实验结果与讨论

4.1 级联原理的验证

实验中, 首先选取 $m_1 = -1$ 、 $m_2 = 2$ 的两个 VHP

进行级联产生 1 阶 CVB, 同时还选用 $m = 1$ 的 VHP 直接产生 1 阶 CVB, 与 $m_2 + m_1$ 、 $m_1 + m_2$ 两种级联方式产生的 1 阶 CVB 进行比较 ($m_2 + m_1$ 的级联方式表示光束先经过 m_1 再经过 m_2 , $m_1 + m_2$ 与之相反)。先利用偏振片比较不同方法产生的 RP 与 AP 光束光斑形状是否一致, 再通过测量斯托克斯参数对比其偏振态分布。

图 3 是通过旋转线偏振片得到的归一化后的光斑测量结果, 图 3(a)~3(e) 分别为 1 阶 RP、1 阶 AP、 $m_2 + m_1$ 的 RP、 $m_2 + m_1$ 的 AP、 $m_1 + m_2$ 的 RP、 $m_1 + m_2$ 的 AP, 白色箭头表示偏振片透光轴方向。图 3(a1)~3(e3) 中偏振片透光轴角度依次为 0° 、 45° 、 135° 。从光斑形状上看, 直接产生的 CVB 和两种级联方式产生的 CVB, 阶数一致, 偏振态分布基本一致, 能够说明通过 VHP 级联实现了阶数相加的效果, 初步验证了等效阶数计算的正确性。

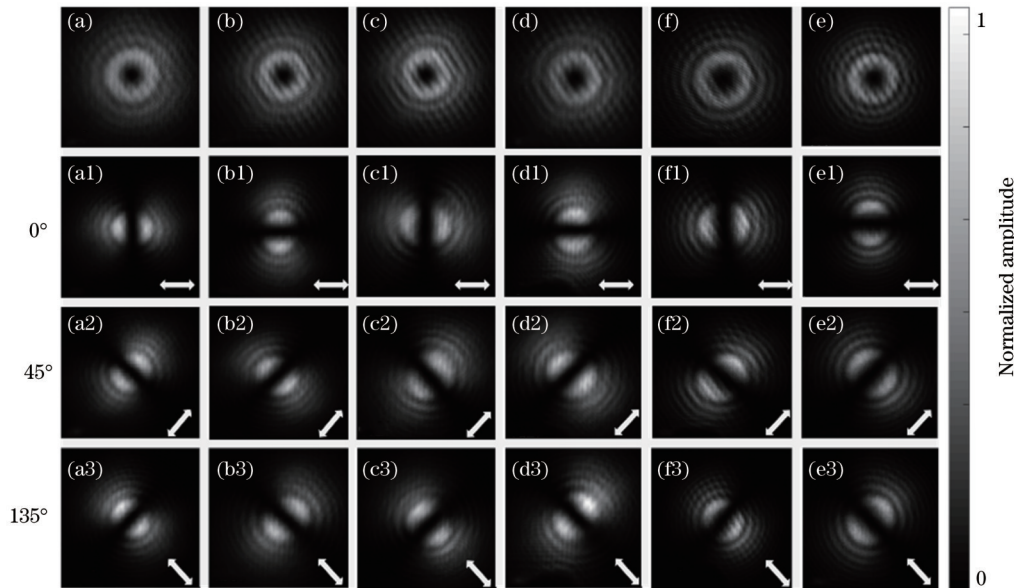


图 3 不同方法产生的 1 阶径向偏振和角向偏振 CVBs。(a)~(e) 分别为 1 阶 RP、1 阶 AP、 $m_2 + m_1$ 的 RP、 $m_2 + m_1$ 的 AP、 $m_1 + m_2$ 的 RP、 $m_1 + m_2$ 的 AP;(a1)~(e3) 分别为经过传输方向为 0° 、 45° 、 135° 偏振片后的光强

Fig. 3 One-order RP and AP CVBs generated by different methods. (a)~(e) are 1-order RP, 1-order AP, $m_2 + m_1$ RP, $m_2 + m_1$ AP, $m_1 + m_2$ RP, $m_1 + m_2$ AP, respectively; (a1)~(e3) are light intensities after passing through polarizing plate in transmission direction of 0° , 45° and 135° , respectively

为进一步验证级联原理的正确性, 对上述光束进行斯托克斯参数的测量以及矢量偏振态的绘制。图 4 是采用以上 3 种方法产生的 1 阶 RP 和 AP 经过归一化处理后的斯托克斯参数测量结果。其中图 4(a)、4(d) 是由 1 阶 VHP 单独生成的 CVB, 图 4(b)、4(e) 是 $m_2 + m_1$ 级联产生的 CVB, 图 4(c)、4(f) 是 $m_1 + m_2$ 级联产生的 CVB。 S_0 表示完整光强, 图 4(a1)~4(f3) 分别是不同光束的斯托克斯参数。 S_1 、 S_2 、 S_3 分别表示光束中水平偏振分量较垂直偏振分量比重、对角方向偏振分量较反对角偏振分量比重、右旋圆偏振分量较左旋圆偏

振分量的比重。式(4)、式(5)表明 RP 与 AP 光束不应存在圆偏分量, 即 S_3 应为 0, 故在误差允许范围内可定量佐证级联系统的可靠性。

通过比较图 4(a)~4(f) 光斑信息可以发现, 在传输距离相同情况下 $m_1 + m_2$ 级联方式与单个 $m = 1$ VHP 产生的 CVB 中空暗核占比不同, $m_1 + m_2$ 级联方式中空暗核占比大于后者, 这启发了进行后续关于优化级联顺序, 提高制备光束容错率的研究。

将斯托克斯参数 S_1 、 S_2 、 S_3 带入式(11)、式(12)中可以获得 CVB 在任意位置处的偏振方向角 ϕ 和偏振

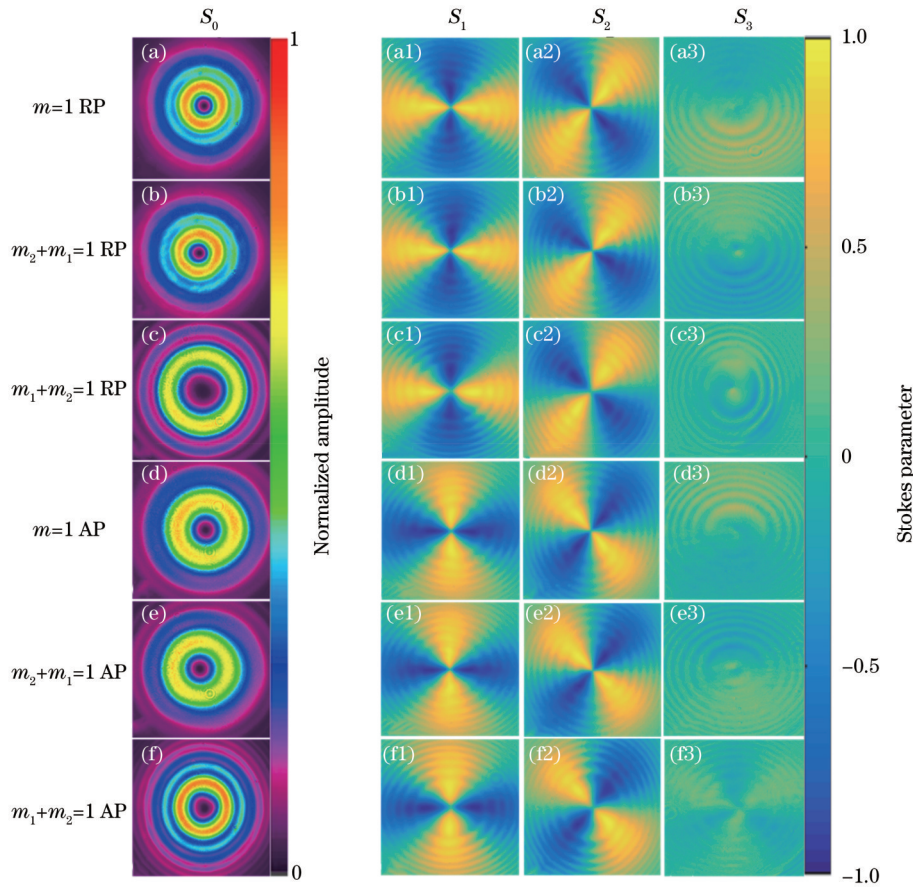


图 4 不同级联方法产生 CVB 的斯托克斯参数测量结果。(a)~(c) 为 1 阶 RP; (d)~(f) 为 1 阶 AP; (a1)~(f3) 为斯托克斯参数 S_1 、 S_2 、 S_3

Fig. 4 Stokes parameter measurement results of CVBs produced by different cascade methods. (a)~(c) are 1-order RPs; (d)~(f) are one-order APs; (a1)~(f3) are Stokes parameters S_1 、 S_2 、 S_3

椭圆率 ψ 。依此绘制 CVB 偏振态分布图。由于不同级联方法测得的斯托克斯参数大致相同, 为避免赘述, 这里以 $m_1 + m_2$ 级联为例绘制偏振方向角和偏振态分布

图。图 5 为 1 阶 CVB 偏振态分布图。其中图 5(a1)、5(a2) 分别是 RP 光束偏振态、偏振方向角分布图, 图 5(b1)、5(b2) 分别为 AP 光束偏振态、偏振方向角分布图。

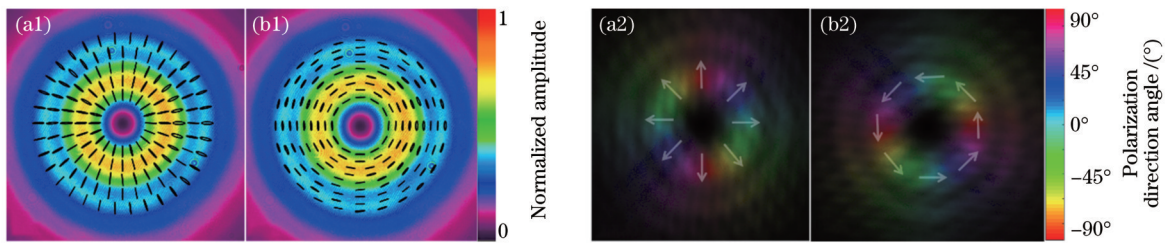


图 5 1 阶 CVB 偏振态分布图。(a1)(a2) 分别为 RP 光束偏振态、偏振方向角的分布; (b1)(b2) 分别为 AP 光束偏振态、偏振方向角的分布

Fig. 5 Polarization distribution diagram of one-order CVB. (a1) and (a2) are distributions of polarization state and polarization direction angle of RP, respectively; (b1) and (b2) are distributions of polarization state and polarization direction angle of AP, respectively

级联的最终目的是为了突破 VHP 阶数限制, 大幅度提高 CVB 制备范围, 选取 $m_2 - m_1 = 3$ 、 $-(m_1 - m_2) = 3$ 两种级联方式获得 3 阶 CVB, 并按上述方法进行偏振态的检测。以 $m_2 - m_1$ 级联方式为例, 展示 3 阶 CVB 偏振态分布、偏振方向角的测量结果。如图 6 所示, 其中图 6(a1)、6(a2) 分别是 RP 光束偏振态、偏振方向角分布图, 图 6(b1)、6(b2) 分别是 AP 光束偏振态、偏振

方向角分布图。

4.2 高阶 VHP 级联系统优化

通过上述对比, 验证了通过级联的方法可以实现任意 VHP 阶数的相加或相减。在上述大量实验中发现, 随着实验光路中 VHP 数量增加, 实验误差也逐渐增加, 产生误差的主要因素是级联 VHP 中心发生相对偏移, 影响光束偏振、光强的均匀性, 从而导致光束质

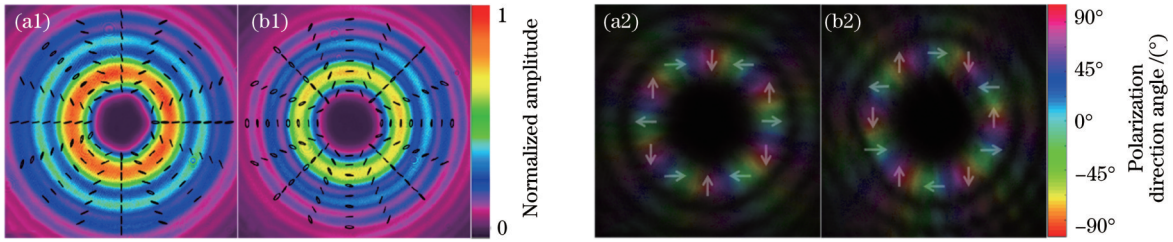


图6 3阶CVB偏振态分布图。(a1)(a2)分别为RP光束偏振态、偏振方向角的分布;(b1)(b2)分别为AP光束偏振态、偏振方向角的分布

Fig. 6 Polarization distribution diagram of three-order CVB. (a1) and (a2) are distributions of polarization state and polarization direction angle of RP, respectively; (b1) and (b2) are distributions of polarization state and polarization direction angle of AP, respectively

量下降。VHP级联顺序不同时,中心错位对制备光束质量的影响程度也不同。为获得最佳的级联方案,设计了实验,保持级联VHP间距15 cm,光束传输距离1 m不变。分别用2阶VHP与8、16、32阶VHP级联。改变级联VHP的前后顺序。在0~1.5 mm之间改变级联波片的中心错位偏移距离(通过二维位移装置调控VHP中心横向移动,实现对错位距离的控制),并在

相机前布置水平偏振片以测量矢量光束光强分布。图7是中心错位对级联制备CVB质量影响的实验结果。以2阶VHP与8、16、32阶VHP级联,横向位置偏移 $\Delta = 0.75$ mm为例,展示由于中心错位对级联制备CVB质量影响的实验结果。其中 m_i 分别取8、16、32阶VHP, $2 + m_i$ 表示高阶VHP在前、2阶VHP在后, $m_i + 2$ 表示2阶VHP在前、高阶VHP在后。

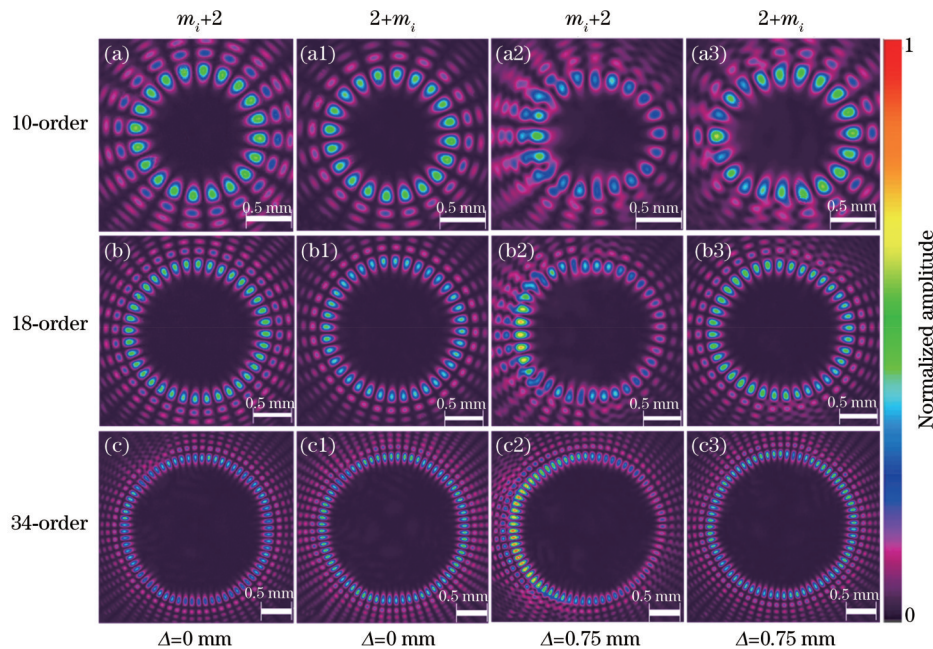


图7 中心错位对级联VHP制备CVB影响的实验结果。(a)~(c)分别是 $m_i + 2$ 级联的10、18、34阶RP;(a1)~(c1)分别是 $2 + m_i$ 级联的10、18、34阶RP;(a2)~(c2)分别是 $m_i + 2$ 级联、中心偏移 $\Delta = 0.75$ mm的10、18、34阶RP;(a3)~(c3)分别是 $2 + m_i$ 级联、中心偏移 $\Delta = 0.75$ mm的10、18、34阶RP

Fig. 7 Experimental results of influence of center misalignment on preparation of CVB from cascade VHP. (a)~(c) are 10, 18, and 34-order RPs of $m_i + 2$ cascade, respectively; (a1)~(c1) are 10, 18, and 34-order RPs of $2 + m_i$ cascade, respectively; (a2)~(c2) are $m_i + 2$ cascade, center is offset from $\Delta = 0.75$ mm, 10, 18, 34-order RPs, respectively; (a3)~(c3) are $2 + m_i$ cascade, center is offset from $\Delta = 0.75$ mm, 10, 18, 34-order RPs, respectively

通过图7光强信息的对比可以看出,在级联VHP中心发生 $\Delta = 0.75$ mm偏移时, $2 + m_i$ 这种级联方式所制备光束的偏振、光强分布均匀性明显优于 $m_i + 2$ 级联方式制备的CVB。保证级联顺序($m_i + 2$ 或 $2 + m_i$)和中心错位偏移量不变,当2阶VHP与 m_i 阶VHP级联时, m_i 数值越大制备光束的鲁棒性越好。制备高阶

CVB时,不同的级联顺序对制备光束质量有影响,光束质量受级联中较大阶数VHP置于光路的前后顺序影响明显。当高阶VHP先接入光路且级联中的两个VHP阶数相差越大,制备光束的鲁棒性越好,即级联制备光束方法的容错率越高。当多个VHP级联制备高阶矢量光束时,通过调整级联过程中最高阶VHP的

位置,使其先接入光路,可以提高制备光束的鲁棒性、制备光路的稳定性和提高实验容错率。

4.3 多个 VHP 级联制备高阶 CVB

进一步地,用阶数为 1、2、4、8、16、32、64 的 VHP 进行级联实验,发现只用这 7 个中的 4 个 VHP 就可以制备 100 阶以内任意 CVB。 n 个 VHP 级联等效阶数计算公式如下:

$$m_s = m_n \pm \dots \left\{ m_4 \pm \left[m_3 \pm (m_2 \pm m_1) \right] \right\}, \quad (13)$$

式中 n 最大取 7,正负号的选择需要用半波片来完成,级联的两个 VHP 中添加半波片则式中相应位置取加号否则取减号。根据上述高阶 VHP 级联系统优化方法,进行了 100 阶以内任意阶 CVB 的制备。有 44 种

不同阶 CVB 需要级联 3 个 VHP,有 18 种不同阶 CVB 需要级联 4 个 VHP。

图 8 是多 VHP 级联制备高阶 CVB 的结果。其中图 8(a1)是由 3 个 VHP 级联等效阶数 $m_s = 4 + (32 + 64) = 100$ 的级联系统制备的 100 阶 RP 光束,图 8(a2)是该光束通过水平偏振片后的光强图。图 8(b1)是由 4 个 VHP 级联等效阶数 $m_s = 1 + [4 + (8 + 32)] = 45$ 的级联系统制备的 45 阶 RP 光束,图 8(b2)是该光束通过水平偏振片后的光强图。通过 1/4 波片将入射到级联系统的线偏振光束变为圆偏振,则可以产生拓扑荷数与等效阶数一致的涡旋光束,即该系统对大拓扑荷数涡旋光制备具有指导意义。

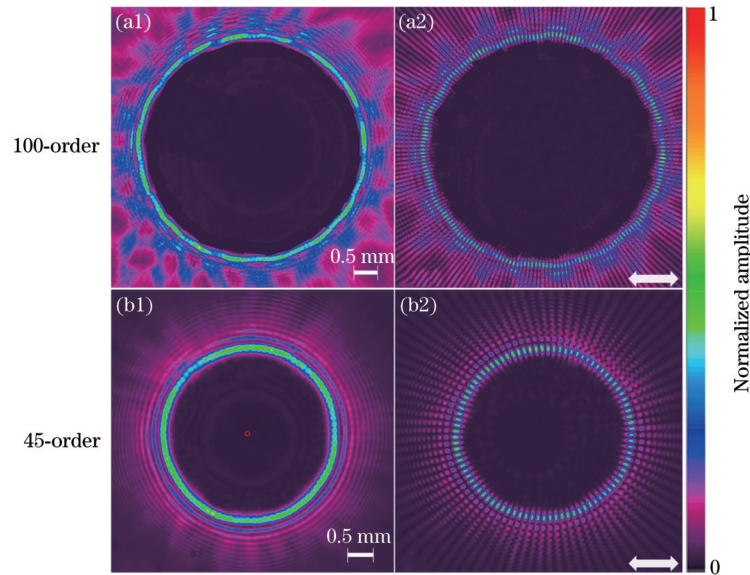


图 8 多个 VHP 级联制备高阶 CVB 的结果。(a1) 3 个 VHP 级联系统制备的 100 阶 RP 光束和 (a2) 该光束通过水平偏振片后的光强图;(b1) 4 个 VHP 级联系统制备的 45 阶 RP 光束和 (b2) 该光束通过水平偏振片后的光强图

Fig. 8 High-order CVB results prepared by cascading multiple VHPs. (a1) 100-order RP beam prepared by 3 VHPs cascade systems and (a2) light intensity diagram after beam passes through horizontal polarizer; (b1) 45-order RP beam prepared by 4 VHPs cascade systems and (b2) light intensity diagram after beam passes through horizontal polarizer

5 结 论

理论分析表明,VHP 级联可以实现任意两个 VHP 阶数的相加或者相减。通过推导等效琼斯矩阵得出,两个 VHP 直接级联时其等效阶数是后面的 VHP 阶数减去前面的 VHP 阶数,而如果在两个 VHP 之间再添加一个半波片,则等效阶数就是两个 VHP 阶数之和。在该原理的支持下,只使用阶数为 1、2、4、8、16、32、64 中的 4 个 VHP 就可以制备 100 阶以内任意 CVB。通过级联方式产生相同阶数的 CVB 时,光束先通过高阶 VHP 再通过低阶 VHP 能够使制备光束具有较好的鲁棒性和良好的系统稳定性,比相反排布顺序的级联方式容错率更高,更容易获得光强分布均匀、偏振分布对称的高质量 CVB。在更多 VHP 级联产生更高阶 CVB 时,也可以参考此规律安排 VHP 的布置顺序。

参 考 文 献

- [1] 张建强,翟焱望,付时尧,等. 径向偏振矢量光束在大气湍流下的传输分析[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1101001.
Zhang J Q, Zhai Y W, Fu S Y, et al. Propagation properties of radially-polarized vector beams under a turbulent atmosphere[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40 (11): 1101001.
- [2] Rosales-Guzmán C, Ndagano B, Forbes A. A review of complex vector light fields and their applications[J]. Journal of Optics, 2018, 20(12): 123001.
- [3] Qi J L, Wang W H, Shi B, et al. Concise and efficient direct-view generation of arbitrary cylindrical vector beams by a vortex half-wave plate[J]. Photonics Research, 2021, 9(5): 803-813.
- [4] Xu X B, Di Z, Gao F Y, et al. Transmission of a dark hollow beam by hollow-core anti-resonant fiber[J]. Optics

- Communications, 2020, 462: 125239.
- [5] Lan C P, Zhou Z W, Ren H W. Tight focusing of laser light using a polarization converter and an adaptive lens [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57: 067106.
- [6] Guo L N, Tang Z L, Wu Y B, et al. Tight focusing of radially polarized vortex laser pulse[J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2013, 62(3): 031101.
- [7] Cai M Q, Li P P, Feng D, et al. Microstructures fabricated by dynamically controlled femtosecond patterned vector optical fields[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1474-1477.
- [8] Meier M, Romano V, Feurer T. Material processing with pulsed radially and azimuthally polarized laser radiation[J]. *Applied Physics A*, 2007, 86(3): 329-334.
- [9] Maragò O M, Jones P H, Gucciardi P G, et al. Optical trapping and manipulation of nanostructures[J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8(11): 807-819.
- [10] Kozawa Y, Sato S. Optical trapping of micrometer-sized dielectric particles by cylindrical vector beams[J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10828-10833.
- [11] Török P, Munro P R T. The use of Gauss-Laguerre vector beams in STED microscopy[J]. *Optics Express*, 2004, 12(15): 3605-3617.
- [12] Segawa S, Kozawa Y, Sato S. Resolution enhancement of confocal microscopy by subtraction method with vector beams[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3118-3121.
- [13] Kozawa Y, Sato S. Numerical analysis of resolution enhancement in laser scanning microscopy using a radially polarized beam[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2076-2084.
- [14] Berg-Johansen S, Töppel F, Stiller B, et al. Classically entangled optical beams for high-speed kinematic sensing [J]. *Optica*, 2015, 2(10): 864-868.
- [15] Roy S, Ushakova K, van den Berg Q, et al. Radially polarized light for detection and nanolocalization of dielectric particles on a planar substrate[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(10): 103903.
- [16] Qi J L, Yi W J, Fu M C, et al. Practical generation of arbitrary high-order cylindrical vector beams by cascading vortex half-wave plates[J]. *Optics Express*, 2021, 29(16): 25365-25376.
- [17] Loussert C, Brasselet E. Efficient scalar and vectorial singular beam shaping using homogeneous anisotropic media[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(1): 7-9.
- [18] Fadeyeva T, Shvedov V, Shostka N, et al. Natural shaping of the cylindrically polarized beams[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(22): 3787-3789.
- [19] Moh K J, Yuan X C, Bu J, et al. Direct noninterference cylindrical vector beam generation applied in the femtosecond regime[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(25): 251114.
- [20] Zhang Z G, Zhang Q C, Cheng T, et al. Wave-plate phase shifting method[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(10): 103109.
- [21] Han W, Yang Y F, Cheng W, et al. Vectorial optical field generator for the creation of arbitrarily complex fields [J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 20692-20706.
- [22] Fu S Y, Gao C Q, Wang T L, et al. Simultaneous generation of multiple perfect polarization vortices with selective spatial states in various diffraction orders[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(23): 5454-5457.
- [23] Kim H, Lee B. Calculation of the transmittance function of a multilevel diffractive optical element considering multiple internal reflections[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43: 2671-2682.
- [24] Liu A J, Fu F Y, Wang Y F, et al. Polarization-insensitive subwavelength grating reflector based on a semiconductor-insulator-metal structure[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 14991-15000.
- [25] 刘山峰, 袁沫娟, 孙钰淇, 等. 亚波长光栅负折射透镜的柱矢量光束聚焦特性[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1105001.
- Liu S F, Yuan S J, Sun Y Q, et al. Focusing properties of cylindrical vector beams through subwavelength grating lenses with negative refractive indices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1105001.
- [26] Wang J. Metasurfaces enabling structured light manipulation: advances and perspectives[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(5): 050006.
- [27] Yi X N, Huang P L, Huang X Z, et al. Operation of polarization order of vector beams with cascaded metasurfaces[J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(9): 243.
- [28] Moreno I, Sanchez-Lopez M M, Badham K, et al. Generation of integer and fractional vector beams with q-plates encoded onto a spatial light modulator[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1305-1308.
- [29] Badham K T, Delaney S W, Hashimoto N, et al. Generation of vector beams at 1550 nm telecommunications wavelength using a segmented q-plate[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(3): 030502.
- [30] Weng X Y, Du L P, Yang A P, et al. Generating arbitrary order cylindrical vector beams with inherent transform mechanism[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 6100208.