

## 基于光束偏移器的光的轨道角动量分束器\*

张卓 张景风 孔令军†

(北京理工大学物理学院, 先进光电量子结构设计与测量教育部重点实验室,

纳米光子学与超精密光电系统北京市重点实验室, 北京 100081)

(2023 年 11 月 29 日收到; 2023 年 12 月 21 日收到修改稿)

近年来, 光的轨道角动量自由度的高维度特性引起了广泛的关注. 该自由度在许多科学领域得到了研究和应用, 特别是在光通讯和量子信息领域. 为了充分利用轨道角动量的高维特性, 不同的轨道角动量态的非破坏分离成为一个最基本的要求. 然而, 目前已有的轨道角动量分束系统, 要么在稳定性和级联拓展性方面有所不足; 要么分离后的轨道角动量态的特性遭到严重破坏, 无法参与进一步的相互作用过程. 本文基于光束偏移器构建微型 Mach-Zehnder 干涉仪, 设计了一个稳定且紧凑的轨道角动量分束器, 实现了轨道角动量模式的非破坏分束. 设计中由于只存在光束的全反射, 因此理论上能量损耗为零. 在微型 Mach-Zehnder 干涉仪中的光束经过的光学元件相同, 且光束的空间偏移量较小, 所以该轨道角动量分束器具有很好的稳定性. 此外, 由于被分开的轨道角动量态与入射的轨道角动量态具有相同的传播方向, 因此该分束器具有很好的可拓展性, 便于级联使用. 本研究对轨道角动量这一高维自由度在光通讯等相关领域的应用有重要意义.

**关键词:** 轨道角动量, 态识别, 光通讯**PACS:** 42.15.Eq, 42.30.Sy, 42.79.Bh, 42.79.Sz**DOI:** 10.7498/aps.73.20231874

## 1 引言

1989 年, Couillet 等<sup>[1]</sup>基于 Maxwell-Bloch 模型首次提出了光学涡旋的概念. 1992 年, Allen 等<sup>[2]</sup>进一步指出, 具有旋转相位梯度的涡旋光场可以携带轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM). 自此, 光的 OAM 自由度受到广泛关注. 至今, OAM 已经扩展到几乎所有的光学领域, 例如非线性光学<sup>[3-9]</sup>、原子光学<sup>[10]</sup>、光学微操作<sup>[11,12]</sup>、光霍尔效应<sup>[13]</sup>、光学涡旋结<sup>[14-17]</sup>、超衍射极限成像<sup>[18,19]</sup>、光全息<sup>[20,21]</sup>、生物科学<sup>[22]</sup>, 甚至天文学<sup>[23]</sup>; 并带来了一系列的应用, 如微纳加工、微粒操控<sup>[11,24-27]</sup>、传感测量<sup>[28-31]</sup>和信息加密<sup>[20,21]</sup>等. 更重要的是, 由于 OAM 自由度原则上可具有无限维度, 因此可用于构建高维 Hilbert 空间, 进而提高每个光子编码

信息的能力. 这一特性使得 OAM 在光通讯<sup>[32-36]</sup>、高维量子纠缠<sup>[37-44]</sup>等领域有一系列应用. 而在光通讯过程中, 信道容量一方面取决于信息发送端所用于携带信息的光子 OAM 态的维度, 另一方面还取决于信息接收端能够识别的携带信息的光子 OAM 态的维度. 相比于前者, 信息接收端携带信息的光子 OAM 态的识别难度更大, 特别是非破坏性的 OAM 态的识别.

目前已有的 OAM 态的识别方法主要分两类. 一类是破坏型的, 比如基于对数极坐标变换, 将输入平面中的对数极坐标映射到输出平面中的笛卡尔坐标, 把输出光束聚焦到不同的横向位置进而判断 OAM 的数值<sup>[45,46]</sup>. 后来, 通过引入螺旋变换克服了对数极坐标变换 OAM 模式分束方案的局限性, 并显著地获得了更高的分辨率<sup>[47]</sup>. 在这些方法中, 分离的 OAM 态被严重破坏, 无法应用于进一

\* 国家自然科学基金 (批准号: 12004038) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: konglj@bit.edu.cn

步的相互作用中. 这大大限制了此类方法在许多量子光学研究中的应用 [38,39,48–52]. 另一类为非破坏型. 2002 年, Leach 等 [53] 提出了一种基于一对 Dove 棱镜来引入一个 OAM 模式相关的相移的方法, 并将这一对 Dove 棱镜置于一个 Mach-Zehnder 干涉仪中, 实现了 OAM 态的非破坏分束. 整个分束装置由两个分光棱镜、两个反射镜和两个 Dove 棱镜组成 [54,55]. 后来, 该方法得到进一步优化. 然而, Dove 棱镜的使用给这种方法带来了许多缺点 [49–51]. 例如, 两个 Dove 棱镜的四次折射导致能量损失, 整个装置的调节有一定的困难, 装置的集成化难度较大等. 此外, 干涉仪的设计框架, 使得该分束装置的稳定性受到了极大的限制; 同时也增加了多级级联的困难.

另一方面, 近年来, 光束偏移器 (beam displacer, BD) 被大量应用于调控光子的空间和偏振自由度 [24,56–60]. BD 是一种双折射晶体, 能够将入射光分成水平和竖直偏振的两束光, 也可以将水平和竖直偏振的两束光合并成一束光. 因此, BD 可以用于设计微型的 Mach-Zehnder 干涉仪. 由于两束光分开的距离很小, 且都经过同一块 BD, 所以这类微型 Mach-Zehnder 干涉仪具有非常好的稳定性. 此外, 由于 BD 不改变光的传播方向, 所以这类微型 Mach-Zehnder 干涉仪具有很好的可级联特性. 这使得 BD 在很多光学研究领域有着广泛的应用. 最典型的例子是在量子行走领域的应用. 2015 年, Xue 等 [56] 基于 BD 通过多级级联构建微型 Mach-Zehnder 干涉仪实验演示了在  $11 \times 11$  二维空间上的十步量子行走, 最终实现了局部行走状态.

本文基于 BD 设计了一个 OAM 分束器. 整个分束器由一个 BD, 一个直角棱镜和一个双 Porro 棱镜 (double Porro prism, D-PP) 等线性光学元件组成. 其中 D-PP 用于引入一个 OAM 模式相关的相移. 通过构建微型 Mach-Zehnder 干涉仪, 实现了 OAM 模式的非破坏分束. 在本文设计的 OAM 分束器中, 由于只存在光束的全反射, 因此理论上能量损耗为零. 由于所使用的几个光学元件彼此紧密地贴合在一起, 微型 Mach-Zehnder 干涉仪中的光束经过的光学元件相同, 且光束的空间偏移量较小, 所以该 OAM 分束器具有很好的稳定性. 此外, 由于被分开的 OAM 态与入射的 OAM 态具有相同的传播方向, 因此该分束器具有很好的可拓展性, 便于级联使用. 这对 OAM 这一高维光自由度

在光通讯等领域的应用有重要意义.

## 2 OAM 分束器的原理和设计

### 2.1 基于 D-PP 引入 OAM 模式相关的相移

将不同 OAM 态的光场分开的关键是找到一种能够引入 OAM 模式相关相移的方法. 在文献 [53–55] 所提出的方案中, OAM 模式相关的相移是通过两个相对旋转的 Dove 棱镜引入的. 本文通过使用一个 D-PP 来引入 OAM 模式相关相移. 如图 1(a) 展示了一束携带物体 (字母 R) 信息的光场垂直入射到一个水平放置的 PP, 经过两次全反射前后的情况. 有趣的是, 当以图 1(b) 所示的方式旋转 PP 时, 出射的光场也将会发生旋转. 出射的光场旋转的角度  $\beta$  与 PP 被旋转的角度  $\alpha$  之间的关系计算过程如下. 定义光束的传播方向为  $+\hat{z}$ , 物体位于  $xoy$  平面, 在二维 Hilbert 空间中, 旋转操作算符  $\hat{R}(\alpha)$  和镜像操作算符  $\hat{M}$  的矩阵为

$$\hat{R}(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}, \quad \hat{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

经历两次全内反射后, 物体由  $|O(x, y_{in})\rangle$  演化为  $|O(x, y_{out})\rangle$ , 如下所示:

$$\begin{aligned} |O(x, y_{out})\rangle &= \hat{M}\hat{R}(\pi - \alpha)\hat{M}\hat{R}(\alpha)|O(x, y_{in})\rangle \\ &= \hat{R}(2\alpha)|O(x, y_{in})\rangle. \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 式表明出射光场被旋转的角度为  $2\alpha$ , 即  $\beta = 2\alpha$ . 图 1(c) 给出了 PP 的旋转角度  $\alpha$  和出射光场被旋转的角度  $\beta$  之间关系的理论 (黑实线) 和实验 (黄色填充的红圈) 结果. 因此, 当入射光场携带 OAM 且拓扑荷数为  $l$  时, 将会引入  $e^{2il\alpha}$  的相移. 由于该相移与 OAM 的拓扑荷数  $l$  相关, 故称为 OAM 模式相关的相移.

在我们设计的 OAM 分束器中需要用到两个 PP. 一个 PP 相对于水平放置旋转  $\alpha$ , 将拓扑荷数为  $l$  的 OAM 入射光场旋转  $2\alpha$ , 而另一个 PP 需要相对于水平放置旋转  $-\alpha$ , 将另一束拓扑荷数为  $l$  的 OAM 入射光场旋转  $-2\alpha$ , 如图 1(d) 所示. 为了提高 OAM 分束器的稳定性和紧凑性, 这里设计了一个特殊的双 Porro 棱镜, 将两个 PP 的功能集成起来. 因此, D-PP 可以在两束具有相同拓扑荷数  $l$  的 OAM 入射光场中引入一个  $e^{4il\alpha}$  的相对相移. 我们正是巧妙地利用这一特点, 设计了一款紧凑的 OAM 分束器.

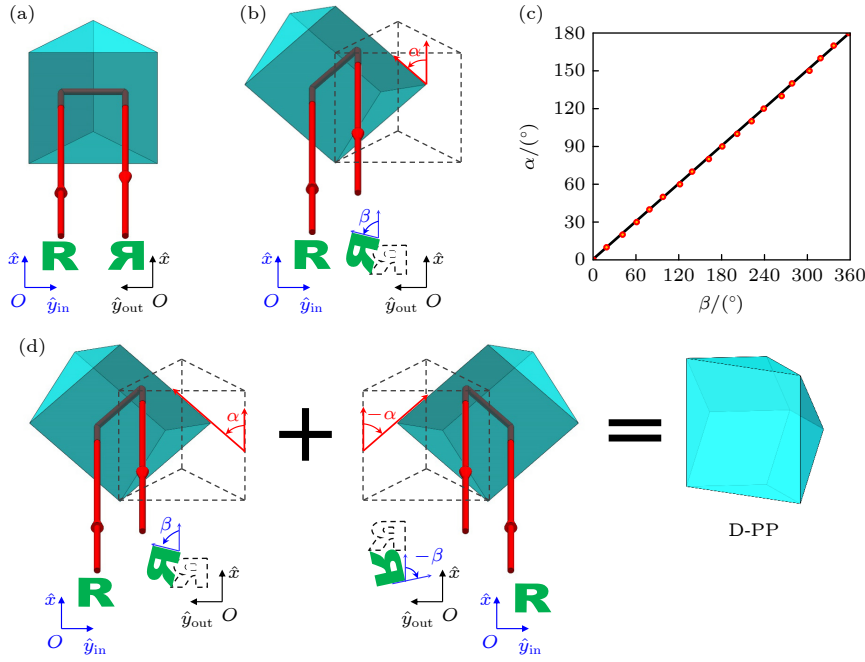


图 1 D-PP 对图像的旋转作用 (a) 水平放置的 PP 对图像 (绿色字母 R) 两次反射的情况. 这里, 光束垂直入射到 PP 的前表面; (b) PP 的旋转对图像旋转的影响. 这里, 光束垂直入射到 PP 的前表面, PP 的旋转轴平行于入射光束传播的方向; (c) 以平行于入射光束传播方向为旋转轴, PP 相对于水平放置的旋转角度  $\alpha$  和经过两次反射之后的图像的旋转角度  $\beta$  之间的关系, 黑色实线为理论结果, 黄色填充的红圈为实验结果; (d) D-PP 的构成, 由两个 PP 构成. 其中一个 PP 相对于水平放置旋转角度为  $\alpha$ ; 另一个 PP 相对于水平放置旋转角度为  $-\alpha$

Fig. 1. Rotation effect of D-PP on image: (a) Situation where the image (green letter R) experience two reflections in PP placed horizontally, here, the light field is vertically incident on the front surface of PP; (b) the impact of PP rotation on image rotation, here, the light field is vertically incident on the front surface of PP, and the rotation axis of PP is parallel to the direction of propagation of the incident light field; (c) the relationship between the rotation angle  $\alpha$  of the PP and the rotation angle  $\beta$  of the image after two reflections, the rotation axis is parallel to the propagation direction of the incident light field, the solid black line represents the theoretical results, and the red circles filled in yellow represent the experimental results; (d) composition of D-PP, a D-PP can be seen as a combination of two PPs, the rotation angle of one PP is  $\alpha$ , and the rotation angle of another PP is  $-\alpha$ .

## 2.2 基于 BD 设计的 OAM 分束器

基于 BD 设计的 OAM 分束器如图 2(a) 所示. 整个分束器由一个 BD, 一个直角棱镜、一个 D-PP 和几个偏振补偿波片等线性光学元件组成. 拓扑荷数为  $l$  的 OAM 入射光场经过偏振补偿波片 WP1 被调节为  $(|H\rangle_a + e^{j\delta}|V\rangle_a)|l\rangle_a$ . 其中  $|H\rangle$  ( $|V\rangle$ ) 表示水平 (竖直) 偏振,  $|l\rangle$  表示拓扑荷数为  $l$  的 OAM 态,  $\delta$  是水平偏振和竖直偏振之间的相位差, 下角标  $a$  表示光场所在的位置. 进入 BD 后, 水平偏振分量  $|H\rangle_a|l\rangle_a$  和竖直偏振分量  $|V\rangle_a|l\rangle_a$  分别走路径  $a1$  和  $a2$ . 在 BD 和 D-PP 之间有一个偏振补偿波片 WP2, 用于调节两束光的偏振态, 使得光束  $a1(a2)$  依次经过 WP2 的透射、D-PP 的两次全反射和 WP2 的再次透射之后, 偏振态由水平偏振 (竖直偏振) 变成竖直偏振 (水平偏振). 这样, 再次经过 BD 时, 水平偏振的光束  $a1$  变成了光束竖直偏振的  $b2$ , 竖直偏振的光束  $a2$  变成了光束水平偏振的  $b1$ . 同

时, D-PP 给光束  $b1$  和  $b2$  分别引入了 OAM 模式相关相移  $e^{2jl\alpha}$  和  $e^{-2jl\alpha}$ . 因此, WP2 和 D-PP 的作用可描述为:  $|H\rangle_{a1}|l\rangle_{a1} \xrightarrow{\text{WP2+D-PP}} e^{-2jl\alpha}|V\rangle_{b2}|l\rangle_{b2}$ ,  $|V\rangle_{a2}|l\rangle_{a2} \xrightarrow{\text{WP2+D-PP}} e^{2jl\alpha}|H\rangle_{b1}|l\rangle_{b1}$ . 经过 BD 后, 光束  $b1$  和  $b2$  在 BD 的另一端面处以相干叠加的形式完全重合在一起, 变成光束  $b$ ,  $(e^{-2jl\alpha}|V\rangle_b + e^{2jl\alpha}e^{j\delta}|H\rangle_b)|l\rangle_b$ . 随后, 透过第 3 个偏振补偿波片 WP3, 在一个直角棱镜 RP 中被全反射两次, 再次透过 WP3, 光束  $b$  变为光束  $c$ . 这里, WP3 的作用是将光束  $b$  中的水平 (竖直) 偏振变为光束  $c$  的  $+45^\circ$  ( $-45^\circ$ ) 偏振, 也即  $|H\rangle_b \xrightarrow{\text{WP3+RP}} |H\rangle_c + |V\rangle_c$ ,  $|V\rangle_b \xrightarrow{\text{WP3+RP}} |H\rangle_c - |V\rangle_c$ . 最后, 光束  $c$  再次经过 BD, 其中水平偏振分量  $(e^{-2jl\alpha} + e^{2jl\alpha}e^{j\delta})|H\rangle_c|l\rangle_c$  从输出端口  $o1$  出射, 而竖直偏振分量  $(-e^{-2jl\alpha} + e^{2jl\alpha}e^{j\delta})|V\rangle_c|l\rangle_c$  从输出端口  $o2$  出射. 相应的出射功率为

$$P_{o1}(l) \propto |e^{-2jl\alpha} + e^{2jl\alpha}e^{j\delta}|^2 \propto 1 + \cos(4l\alpha + \delta), \quad (3a)$$

$$P_{o2}(l) \propto | -e^{-2jl\alpha} + e^{2jl\alpha} e^{j\delta} |^2 \propto 1 - \cos(4l\alpha + \delta). \quad (3b)$$

(3) 式表明, 出射功率  $P_{o1}$  和  $P_{o2}$  由  $\alpha$ ,  $\delta$  和  $l$  共同决定. 图 2(b) 给出了参数  $(\alpha, \delta)$ , OAM 状态  $|l\rangle$  和输出功率  $P_{o1}$ ,  $P_{o2}$  之间的关系, 当参数  $(\alpha, \delta)$  取合适的值时, 不同的 OAM 态可以被完全分开. 当  $(\alpha, \delta) = (\pi/4, 0)$  时,  $P_{o1}(l = 2m - 1) = 0$ ,  $P_{o2}(l =$

$2m - 1) = 1$ ,  $P_{o1}(l = 2m) = 1$ ,  $P_{o2}(l = 2m) = 0$ . 这里  $m$  为整数. 这些结果表明: 拓扑荷数为偶数的 OAM 态  $|2m\rangle$  与拓扑荷数为奇数的 OAM 态  $|2m - 1\rangle$  将彼此分开, 且分别从输出端  $o1$ ,  $o2$  输出. 当  $(\alpha, \delta) = (\pi/8, \pi/2)$  时,  $P_{o1}(l = 4m - 3) = 0$ ,  $P_{o2}(l = 4m - 3) = 1$ ,  $P_{o1}(l = 4m - 1) = 1$ ,  $P_{o2}$

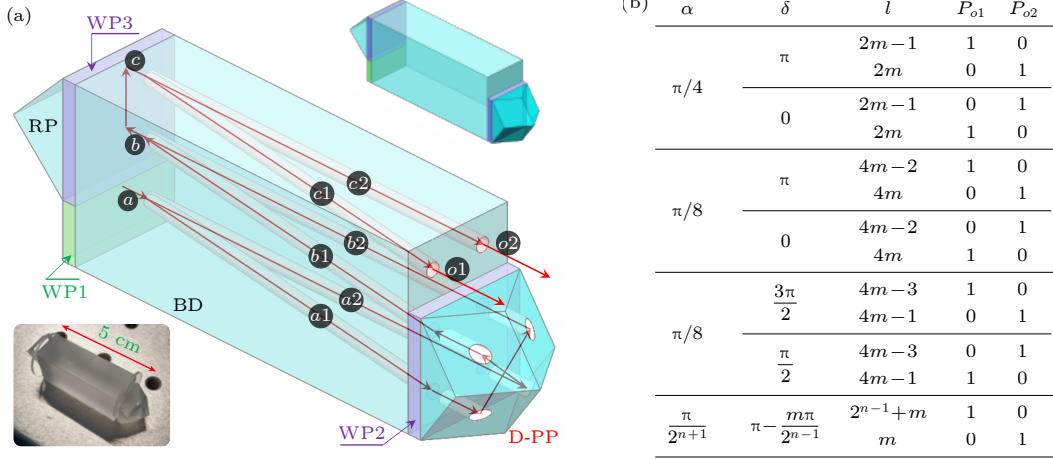


图 2 基于 BD 设计的 OAM 分束器以及不同参数设置下的分束情况 (a) OAM 分束器的构成和光路图, 其中, WP1, WP2, WP3 表示偏振补偿波片, RP 代表直角棱镜,  $a, a1, a2, b, b1, b2, c, c1, c2, o1, o2$  表示光束在分束器中所走的路径, 右上角为装置的整体效果图, 左下角为装置的实物图; (b) 不同参数情况下的分束情况,  $\alpha$  为 PP 旋转的角度,  $\delta$  为 WP1 引入的两束正交偏振光之间的相对相位差,  $l$  为 OAM 拓扑荷数,  $P_{o1}$  和  $P_{o2}$  为输出端口  $o1$  和  $o2$  的输出功率

Fig. 2. OAM beam splitter based on BD and beam splitting under different parameter conditions: (a) Composition of the OAM beam splitter and optical path diagram in it. Here, WP1, WP2, and WP3 represent polarization compensation waveplates; RP represents a right-angle prism.  $a, a1, a2, b, b1, b2, c, c1, c2, o1, o2$  indicate the path of the beam in the beam splitter, the upper right corner shows the overall rendering of the device, the lower left corner shows the physical image of the device; (b) beam splitting under different parameter conditions,  $\alpha$  is the rotation angle of PP,  $\delta$  is the relative phase difference between the two orthogonal polarized beams introduced by WP1,  $l$  is the topological charge of OAM,  $P_{o1}$  and  $P_{o2}$  are the output powers of the output ports  $o1$  and  $o2$ .

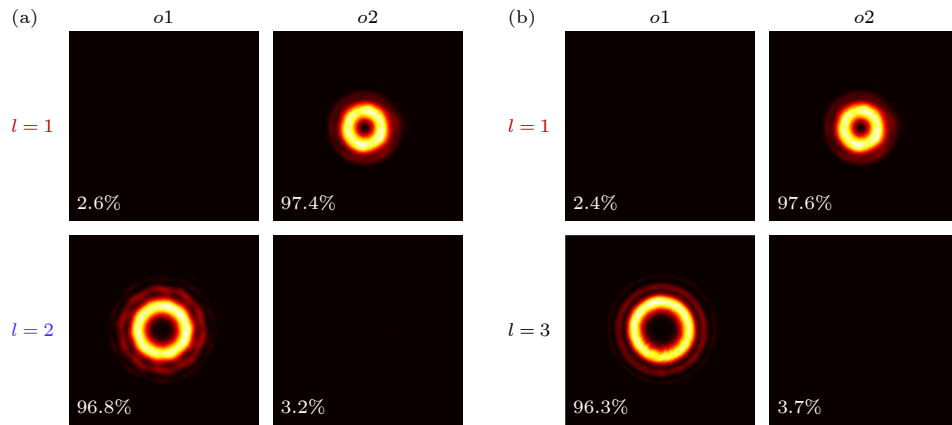


图 3 不同参数下不同拓扑荷数 OAM 态分束的实验结果 (a) 参数设置为  $(\alpha, \delta) = (\pi/4, 0)$  时, OAM 态  $|1\rangle$  和  $|2\rangle$  分束的结果; (b) 参数设置为  $(\alpha, \delta) = (\pi/8, \pi/2)$  时, OAM 态  $|1\rangle$  和  $|3\rangle$  分束的结果, 图中的百分数表示对某种入射 OAM 态, 不同端口的输出功率相对于所有端口输出的总功率的比值

Fig. 3. Experimental results of beam splitting of OAM states with different topological charges in OAM sorter with different parameters: (a) Results of beam splitting of OAM states  $|1\rangle$  and  $|2\rangle$  when the parameters are set as  $(\alpha, \delta) = (\pi/4, 0)$ ; (b) results of beam splitting of OAM states  $|1\rangle$  and  $|3\rangle$  when the parameters are set as  $(\alpha, \delta) = (\pi/8, \pi/2)$ , each percentage represents the ratio of each output power to the total output power of all ports for a certain incident OAM state.



( $l = 4m - 1$ ) = 0. 这些结果表明 OAM 态  $|4m - 1\rangle$  与  $|4m - 3\rangle$  将彼此分开, 且分别从输出端  $o1$  和  $o2$  输出.

### 3 实验结果

实验搭建了 OAM 分束器装置, 验证了设计的 OAM 分束器的可行性. 实验中, 先用一束基模高斯光束入射在一个空间光调制器上, 以制备出我们想要的 OAM 态. 然后, 将制备好的 OAM 光束入射到搭建好的 OAM 分束器上. 然后探测从

OAM 分束器的两个输出端出射的光场的功率和模式. 实验结果如图 3 所示. 当  $(\alpha, \delta) = (\pi/4, 0)$  时,  $P_{o1}(1) = 0$ ,  $P_{o2}(1) = 1$ ,  $P_{o1}(2) = 1$ ,  $P_{o2}(2) = 0$ ; 此时, OAM  $|1\rangle$  态从输出端  $o2$  输出, OAM  $|2\rangle$  态从输出端  $o1$  输出 (图 3(a)). 当  $(\alpha, \delta) = (\pi/8, \pi/2)$  时,  $P_{o1}(1) = 0$ ,  $P_{o2}(1) = 1$ ,  $P_{o1}(3) = 1$ ,  $P_{o2}(3) = 0$ ; 此时, OAM  $|1\rangle$  态从输出端  $o2$  输出, OAM  $|3\rangle$  态从输出端  $o1$  输出, 如图 3(b) 所示. 定义对比度为  $V(l) = P_{\max}(l)/P_{\text{tot}}(l)$ , 其中  $P_{\text{tot}}(l)$  表示当入射 OAM 态为  $|l\rangle$  时, 所有输出端的出射光场功率之和;

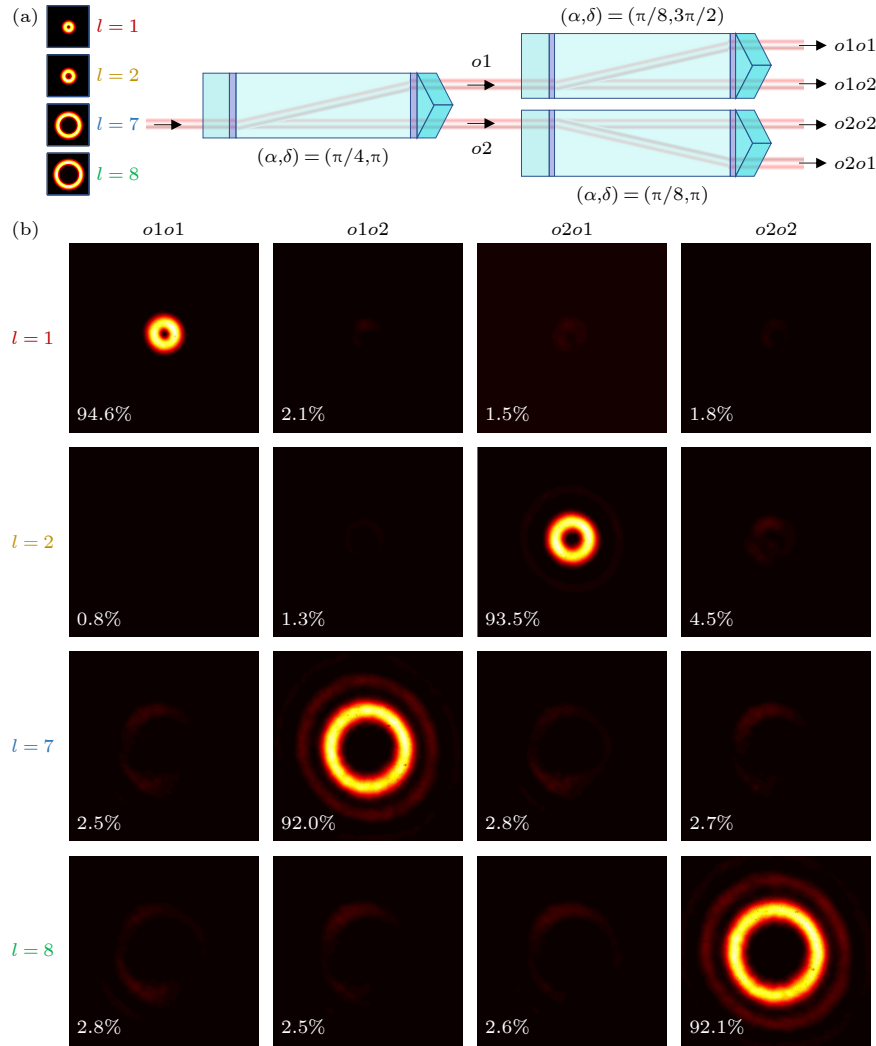


图 4 级联情况下的分束情况 (a) 级联 OAM 分束器. 针对要分开的 OAM 态为  $|1\rangle$ ,  $|2\rangle$ ,  $|7\rangle$  和  $|8\rangle$ , 第 1 级的 OAM 分束器参数设为  $(\alpha, \delta) = (\pi/4, \pi)$ , 第 2 级的两个 OAM 分束器分别设置为  $(\alpha, \delta) = (\pi/8, 3\pi/2)$  和  $(\alpha, \delta) = (\pi/8, \pi)$ , 级联后, 有  $o1o1$ ,  $o1o2$ ,  $o2o1$  和  $o2o2$  四个输出端口; (b) 级联 OAM 分束器对 OAM 态  $|1\rangle$ ,  $|2\rangle$ ,  $|7\rangle$  和  $|8\rangle$  分束的实验结果, 图中的百分数表示对某种入射 OAM 态, 不同端口的输出功率相对于所有端口输出的总功率的比值

Fig. 4. Beam splitting in the cascading case: (a) Cascaded OAM beam splitters. Due to that the OAM states to be separated are  $|1\rangle$ ,  $|2\rangle$ ,  $|7\rangle$  and  $|8\rangle$ , the parameters of the first stage OAM splitter are set as  $(\alpha, \delta) = (\pi/4, \pi)$ , and the two OAM splitters of the second stage are set as  $(\alpha, \delta) = (\pi/8, 3\pi/2)$  and  $(\alpha, \delta) = (\pi/8, \pi)$ , respectively, after cascading, there are four output ports,  $o1o1$ ,  $o1o2$ ,  $o2o1$ , and  $o2o2$ ; (b) experimental results of cascading OAM beam splitters for OAM states  $|1\rangle$ ,  $|2\rangle$ ,  $|7\rangle$  and  $|8\rangle$ , each percentage represents the ratio of each output power to the total output power of all ports for a certain incident OAM state.

$P_{\max}(l)$  表示多个输出端口输出功率的最大功率. 实验结果表明, 所有对比度均超过 96%, 证明我们的 OAM 分束器具有良好的分束效果.

此外, 还测试了级联情况下的分束情况. 实验中, 将第 1 级的一个 OAM 分束器的参数设为  $(\alpha, \delta) = (\pi/4, \pi)$ , 将第 2 级的两个 OAM 分束器的参数分别设为  $(\alpha, \delta) = (\pi/8, 3\pi/2)$  和  $(\alpha, \delta) = (\pi/8, \pi)$ . 选用  $|1\rangle$ ,  $|2\rangle$ ,  $|7\rangle$  和  $|8\rangle$  作为入射的 OAM 态. 实验结果如图 4 所示, 可以看到 4 个不同的 OAM 态被非破坏地分开, 之后从不同的输出端口输出, 且对比度在 92% 以上.

这里需要说明的是, 在我们的实验结果中, 被探测的 OAM 态的光场强度分布除了中心亮环外, 还有一个或多个更大的外环, 这是由于空间光调制器的调制效果的不完美导致的<sup>[61]</sup>.

## 4 结 论

本文首先讨论了如何基于 D-PP 引入 OAM 模式相关的相移, 进而基于 BD 设计了一种稳定、紧凑、无损的 OAM 分束器. 整个分束器由一块 BD、一个直角棱镜、一块 D-PP、几块偏振补偿晶体等线性光学元件组成. 我们加工出相应的光学元件, 组建了 OAM 分束器. 实验中, 当参数设置为  $(\alpha, \delta) = (\pi/4, \pi)$  时, 实现了 OAM 态  $|1\rangle$  和  $|2\rangle$  的分束; 当参数设置为  $(\alpha, \delta) = (\pi/8, \pi/2)$  时, 实现了 OAM 态  $|1\rangle$  和  $|3\rangle$  的分束; 对比度均超过 96%. 此外, 还测试了级联情况下的分束情况. 当第 1 级的分束器的参数设为  $(\alpha, \delta) = (\pi/4, \pi)$ , 第 2 级的两个 OAM 分束器的参数分别设为  $(\alpha, \delta) = (\pi/8, 3\pi/2)$  和  $(\alpha, \delta) = (\pi/8, \pi)$  时, 实现了 OAM 态  $|1\rangle$ ,  $|2\rangle$ ,  $|7\rangle$  和  $|8\rangle$  的分束, 且对比度都在 92% 以上. 实验结果验证了设计的可行性. 和基于一对 Dove 棱镜设计的 OAM 分束器相比, 在我们设计的 OAM 分束器中, 所使用的光学元件彼此紧密地贴合在一起, 微型 Mach-Zehnder 干涉仪中的光束经过的光学元件完全相同, 且光束的空间偏移量较小, 因此 OAM 分束器具有更好的稳定性. 此外, 由于被分开的 OAM 态与入射的 OAM 态具有相同的传播方向, 因此该分束器具有很好的可拓展性, 便于级联使用. 我们的设计对 OAM 这一高维自由度在光通讯等领域的应用具有重要意义.

## 参考文献

- [1] Couillet P, Gil L, Rocca F 1989 *Opt. Commun.* **73** 403
- [2] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [3] Li S M, Kong L J, Ren Z C, Li Y, Tu C, Wang H T 2013 *Phys. Rev. A* **88** 035801
- [4] Neshev D N, Alexander T J, Ostrovskaya E A, Kivshar Y S, Martin H, Makasyuk I, Chen Z 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 123903
- [5] Swartzlander G A, Law C T 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 2503
- [6] Tikhonenko V, Christou J, Luther-Daves B 1995 *J. Opt. Soc. Am. B* **12** 2046
- [7] Firth W J, Skryabin D V 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 2450
- [8] Dholakia K, Simpson N B, Padgett M J, Allen L 1996 *Phys. Rev. A* **54** R3742
- [9] Courtial J, Dholakia K, Allen L, Padgett M J 1997 *Phys. Rev. A* **56** 4193
- [10] Andersen M F, Ryu C, Cladé P, Natarajan V, Vaziri A, Hermerson K, Phillips W D 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 170406
- [11] Grier D G 2003 *Nature* **424** 810
- [12] Paterson L, MacDonald M P, Arlt J, Sibbett W, Bryant P E, Dholakia K 2001 *Science* **292** 912
- [13] Kong L J, Qian S X, Ren Z C, Wang X L, Wang H T 2012 *Phys. Rev. A* **85** 035804
- [14] Dennis M R, King R P, Jack B, O'Holleran K, Padgett M J 2010 *Nat. Phys.* **6** 118
- [15] Larocque H, Sugic D, Mortimer D, Taylor A J, Fickler R, Boyd R W, Dennis M R, Karimi E 2018 *Nat. Phys.* **14** 1079
- [16] Wang L, Zhang W X, Yin H X, Zhang X D 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1900263
- [17] Kong L J, Zhang W, Li P, Guo X, Zhang J, Zhang F, Zhao J, Zhang X 2022 *Nat. Commun.* **13** 2705
- [18] Fürhapter S, Jesacher A, Bernet S, Ritsch-Marte M 2005 *Opt. Express* **13** 689
- [19] Kozawa Y, Matsunaga D, Sato S 2018 *Optica* **5** 86
- [20] Fang X, Ren H, Gu M 2020 *Nat. Photonics* **14** 102
- [21] Kong L J, Sun Y, Zhang F, Zhang J, Zhang X 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 053602
- [22] Zhuang X 2004 *Science* **305** 188
- [23] Berkhout G C G, Beijersbergen M W 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 100801
- [24] Ke Z J, Wang Y T, Yu S, Liu W, Meng Y, Li Z P, Wang H, Li Q, Xu J S, Xiao Y, Tang J S, Li C F, Guo G C 2020 *Chin. Phys. B* **29** 080301
- [25] Friese M E J, Nieminen T A, Heckenberg N R, Rubinsztein-Dunlop H 1998 *Nature* **394** 348
- [26] Friese M E J, Enger J, Rubinsztein-Dunlop H, Heckenberg N R 1996 *Phys. Rev. A* **54** 1593
- [27] Simpson N B, Dholakia K, Allen L, Padgett M J 1997 *Opt. Lett.* **22** 52
- [28] Bialynicki-Birula I, Bialynicka-Birula Z 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2539
- [29] Courtial J, Dholakia K, Robertson D A, Allen L, Padgett M J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 3217
- [30] Courtial J, Robertson D A, Dholakia K, Allen L, Padgett M J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4828
- [31] Lavery M P J, Speirits F C, Barnett S M, Padgett M J 2013 *Science* **341** 537
- [32] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, Ahmed N, Yan Y, Huang H, Ren Y, Yue Y, Dolinar S, Tur M, Willner A E 2012 *Nat. Photonics* **6** 488
- [33] Huang H, Xie G, Yan Y, Ahmed N, Ren Y, Yue Y, Rogawski

- D, Willner M J, Erkmen B I, Birnbaum K M, Dolinar S J, Lavery M P J, Padgett M J, Tur M, Willner A E 2014 *Opt. Lett.* **39** 197
- [34] Krenn M, Handsteiner J, Fink M, Fickler R, Ursin R, Malik M, Zeilinger A 2016 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **113** 13648
- [35] Watkins R J, Dai K, White G, Li W, Miller J K, Morgan K S, Johnson E G 2020 *Opt. Express* **28** 924
- [36] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, Tur M, Kristensen P, Huang H, Willner A E, Ramachandran S 2013 *Science* **340** 1545
- [37] Mair A, Vaziri A, Weihs G, Zeilinger A 2001 *Nature* **412** 313
- [38] Kong L J, Li Y, Liu R, Qi W R, Wang Q, Wang Z X, Huang S Y, Si Y, Tu C, Hu W, Xu F, Lu Y Q, Wang H T 2019 *Phys. Rev. A* **100** 023822
- [39] Kong L J, Liu R, Qi W R, Wang Z X, Huang S Y, Wang Q, Tu C, Li Y, Wang H T 2019 *Sci. Adv.* **5** eaat9206
- [40] Romero J, Giovannini D, Franke-Arnold S, Barnett S M, Padgett M J 2012 *Phys. Rev. A* **86** 012334
- [41] Vaziri A, Weihs G, Zeilinger A 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 240401
- [42] Kong L J, Liu R, Qi W R, Wang Z X, Huang S Y, Tu C, Li Y, Wang H T 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 034204
- [43] Zhang Y, Agnew M, Roger T, Roux F S, Konrad T, Faccio D, Leach J, Forbes A 2017 *Nat. Commun.* **8** 632
- [44] Dada A C, Leach J, Buller G S, Padgett M J, Andersson E 2011 *Nat. Phys.* **7** 677
- [45] Berkhout G C G, Lavery M P J, Courtial J, Beijersbergen M W, Padgett M J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 153601
- [46] Wan C, Chen J, Zhan Q 2017 *APL Photonics* **2** 031302
- [47] Wen Y, Chremmos I, Chen Y, Zhu J, Zhang Y, Yu S 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 193904
- [48] Malik M, Erhard M, Huber M, Krenn M, Fickler R, Zeilinger A 2016 *Nat. Photonics* **10** 248
- [49] Wang F, Erhard M, Babazadeh A, Malik M, Krenn M, Zeilinger A 2017 *Optica* **4** 1462
- [50] Babazadeh A, Erhard M, Wang F, Malik M, Nouroozi R, Krenn M, Zeilinger A 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 180510
- [51] Wang X L, Luo Y H, Huang H L, Chen M C, Su Z E, Liu C, Chen C, Li W, Fang Y Q, Jiang X, Zhang J, Li L, Liu N L, Lu C Y, Pan J W 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 260502
- [52] Cao H, Gao S C, Zhang C, Wang J, He D Y, Liu B H, Zhou Z W, Chen Y J, Li Z H, Yu S Y, Romero J, Huang Y F, Li C F, Guo G C 2020 *Optica* **7** 232
- [53] Leach J, Padgett M J, Barnett S M, Franke-Arnold S, Courtial J 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 257901
- [54] Wang F X, Chen W, Yin Z Q, Wang S, Guo G C, Han Z F 2016 *Phys. Rev. A* **94** 033847
- [55] Zhang W, Qi Q, Zhou J, Chen L 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 153601
- [56] Xue P, Zhang R, Bian Z, Zhan X, Qin H, Sanders B C 2015 *Phys. Rev. A* **92** 042316
- [57] Guo P, Wang S 2022 *Photonics* **10** 1
- [58] Narushima T, Okamoto H 2016 *Sci. Rep.* **6** 35731
- [59] Li P, Guo X, Qi S, Han L, Zhang Y, Liu S, Li Y, Zhao J 2018 *Sci. Rep.* **8** 9831
- [60] Chi Y, Yu Y, Gong Q, Wang J 2023 *Sci. China Inf. Sci.* **66** 180501
- [61] Lei T, Zhang M, Li Y R, Jia P, Liu G N, Xu X G, Li Z H, Min C J, Lin J, Yu C Y, Niu H B, Yuan X C 2015 *Light Sci. Appl.* **4** e257

# Orbital angular momentum splitter of light based on beam displacer<sup>\*</sup>

Zhang Zhuo   Zhang Jing-Feng   Kong Ling-Jun<sup>†</sup>

(*Beijing Key Laboratory of Nanophotonics and Ultrafine Optoelectronic Systems, Key Laboratory of Advanced Optoelectronic Quantum Architecture and Measurements of Ministry of Education, School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

( Received 29 November 2023; revised manuscript received 21 December 2023 )

## Abstract

In recent years, the high-dimensional properties of the orbital angular momentum degree of freedom of light have attracted extensive attention. This degree of freedom has been studied and used in many scientific fields, especially in optical communication and quantum information. In order to fully utilize the high-dimensional properties of orbital angular momentum, non-destructive separation of different orbital angular momentum states has become a fundamental requirement. However, the existing orbital angular momentum beam-splitting systems either lack stability and cascade expansibility, or the properties of the separated orbital angular momentum states are seriously damaged, thus failing to participate in further interaction processes. In this work, we construct a miniature Mach-Zehnder interferometer based on the beam displacer, and design an orbital angular momentum beam splitter, thereby realizing the non-destructive beam splitting of orbital angular momentum mode. In the orbital angular momentum splitter, the theoretical energy loss is zero because there exists only total reflection of the beam. The beam in the miniature Mach-Zehnder interferometer passes through the same optical element, and the spatial deviation of the beam is small, so the orbital angular momentum beam splitter has good stability. In addition, because the separated orbital angular momentum state has the same propagation direction as the incident orbital angular momentum state, the beam splitter has good extensibility and is easy to use in cascade. Our research result is of great significance in using the orbital angular momentum as a high-dimensional degree of freedom in optical communication and other related fields.

**Keywords:** orbital angular momentum, state recognition, optical communication

**PACS:** 42.15.Eq, 42.30.Sy, 42.79.Bh, 42.79.Sz

**DOI:** [10.7498/aps.73.20231874](https://doi.org/10.7498/aps.73.20231874)

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 12004038).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [konglj@bit.edu.cn](mailto:konglj@bit.edu.cn)



## 基于光束偏移器的光的轨道角动量分束器

张卓 张景风 孔令军

### Orbital angular momentum splitter of light based on beam displacer

Zhang Zhuo Zhang Jing-Feng Kong Ling-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 074201 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231874

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231874>

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

#### 利用衍射光栅探测涡旋光束轨道角动量态的研究进展

Progress of detecting orbital angular momentum states of optical vortices through diffraction gratings

物理学报. 2018, 67(3): 034201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171899>

#### 海洋湍流对光子轨道角动量量子通信的影响

Effects of ocean turbulence on photon orbital angular momentum quantum communication

物理学报. 2022, 71(1): 010304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211146>

#### 基于双层超表面的宽带、高效透射型轨道角动量发生器

Wideband and high efficiency orbital angular momentum generator based on bi-layer metasurface

物理学报. 2021, 70(3): 038101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200975>

#### 基于平面相控阵的轨道角动量涡旋电磁波扫描特性

Beam steering of orbital angular momentum vortex wave based on planar phased array

物理学报. 2021, 70(23): 238401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211119>

#### 长周期多芯手征光纤轨道角动量的调制

Modulation of orbital angular momentum in long period chirally-coupled-cores fiber

物理学报. 2019, 68(6): 064211 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182036>

#### 一种可用于轨道角动量的受激布里渊放大的光子晶体光纤放大器

Design of photonic crystal fiber amplifier based on stimulated Brillouin amplification for orbital angular momentum

物理学报. 2022, 71(7): 074206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211909>