

柱矢量涡旋光束在自由空间中传输时角动量的全矢量特性*

高雨洁¹⁾ 李晋红¹⁾ 王静¹⁾ 刘晋宏²⁾ 尹晓金^{1)†}

1) (太原科技大学应用科学学院, 山西省光场调控与融合应用技术创新中心, 太原 030024)

2) (太原工业学院理学系, 太原 030008)

(2024 年 9 月 24 日收到; 2024 年 12 月 30 日收到修改稿)

利用自旋-动量关系表征了柱矢量涡旋光束在自由空间中传输时的动量 (P)、自旋角动量 (SAM)、横向自旋角动量 (t-SAM)、纵向自旋角动量 (l-SAM)、轨道角动量以及矢量光场分布. 研究表明: P 存在与光轴平行和垂直的分量, t-SAM, l-SAM 和光场在拓扑荷 m 不为零时均存在与光轴平行和垂直的分量, 而 SAM 只存在与光轴垂直的分量, 不存在与光轴平行的分量. 使用自旋-动量关系, 对在自由空间中传输的柱矢量涡旋光束的光学参量进行全矢量的表征, 可以为分析结构光束在不同介质中传输时的角动量特性提供一定的理论基础.

关键词: 柱矢量涡旋光束, 动量, 自旋角动量, 轨道角动量

PACS: 92.60.Ta, 29.27.Hj, 42.25.Bs

DOI: 10.7498/aps.74.20241344

CSTR: 32037.14.aps.74.20241344

1 引言

从角动量的形成原因分类, 角动量可分为轨道角动量 (OAM) 和自旋角动量 (SAM). 轨道角动量又被分为两类: 内禀轨道角动量 (i-OAM) 和外禀轨道角动量 (e-OAM), 这两类分别与涡旋相位和光束的传输轨迹有关^[1-7]. 从轨道角动量方向与光束传输方向的关系进行分类, 轨道角动量又被分为平行于光场传输方向的纵向轨道角动量 (l-OAM) 和垂直于光场传输方向的横向轨道角动量 (t-OAM). 其中关于 l-OAM 的研究相对较多, 在光通信^[8-13]、光学捕获^[14,15] 和量子信息传输^[16,17] 等方面得到广泛的研究. 随着时空涡旋光束的出现, t-OAM 也逐渐被研究者所研究^[18]. SAM 作为光场的基本性质,

根据其方向与光束传输方向的平行或垂直关系可以被分为纵向自旋角动量 (l-SAM) 和横向自旋角动量 (t-SAM)^[19]. l-SAM 主要存在于圆偏振光束中. t-SAM 的研究主要集中在表面等离子体波、非衍射场、干涉场和聚焦结构光场等方面同时在光学微操控、量子光通信及光学超表面等领域得到应用^[20-26]. 值得注意的是, 在自由空间傍轴光学系统中不同光束的横向自旋角动量 (t-SAM) 同样得到证实^[27]. 与光子螺旋轨迹相关的 t-SAM 也被发现^[28]. 在紧聚焦^[29,30]、全反射和表面等离子共振产生的倏逝波^[31] 以及在光学系统的傍轴传输中^[32-35] 所产生的自旋-轨道耦合现象被大量研究, 其中在圆偏振光束的聚焦、散射以及自由空间传输中实现了部分自旋角动量到轨道角动量的转换^[36-38]. 在金属表面、纳米纤维和各种波导中, 圆偏振光束与倏逝

* 国家自然科学基金 (批准号: 62305238, 12104332) 和山西省基础研究计划 (批准号: 202203021211192) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 2021013@tyust.edu.cn

波之间的自旋控制单向耦合调控已经在理论和实验中得以证明 [39–41].

本文基于自旋-动量关系研究了不同拓扑荷 m 的柱矢量涡旋光束 (CVVB) 在自由空间中传输时不同参量的全矢量特性, 包括 P , SAM, t-SAM, l-SAM, OAM 和矢量光场. CVVB 分为径向偏振涡旋光束 (RPVB) 和角向偏振涡旋光束 (APVB). 对 APVB 的 P , SAM, t-SAM, l-SAM, OAM 和矢量光场的研究在补充材料 (online) 中进行阐述. 除纵向光场外, APVB 的其他光学参量与 RPVB 分布相同. 当 RPVB 以及 APVB 不携带涡旋相位时, 它们变成了径向偏振光束 (RPB) 和角向偏振光束 (APB). 本文将拓扑荷 $m = 0$ 的 RPVB 以及 APVB 分别对应设置为 RPB 和 APB.

2 理论模型及分析

2.1 理论模型

当 RPVB 在自由空间中传输时, 设定 $z = 0$ 处为光束的源平面, RPVB 在源平面处电场表示为 [42]

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(x_0, y_0, 0) &= [x_0 + \text{isgn}(m)y_0]^{|m|} \exp\left(-\frac{x_0^2 + y_0^2}{w_0^2}\right) \\ &\times \left(\frac{x_0}{w_0} \mathbf{e}_x + \frac{y_0}{w_0} \mathbf{e}_y\right) \exp[-ikz], \end{aligned} \quad (1)$$

式中 x_0 和 y_0 是源平面上的位置矢量, m 代表拓扑荷, w_0 为束腰半径, $\mathbf{e}_x$ 和 $\mathbf{e}_y$ 是 x 方向和 y 方向上的单位向量. RPVB 在自由空间中传输了距离 z 后的电场如 (2a) 式所示:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(x, y, z) &= [x + \text{isgn}(m)y]^{|m|} \exp\left[-\left(\frac{x^2 + y^2}{w(z)^2}\right)\right] \\ &\times \exp\left[-\frac{ik(x^2 + y^2)}{2R(z)}\right] \left(\frac{w_0}{w(z)}\right) \\ &\times \left(\frac{x}{w(z)} \mathbf{e}_x + \frac{y}{w(z)} \mathbf{e}_y\right) \exp[-ikz], \end{aligned} \quad (2a)$$

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + z^2/z_R^2}, \quad (2b)$$

$$R(z) = z \left(1 + z_R^2/z^2\right), \quad (2c)$$

$$z_R = \pi w_0^2/\lambda, \quad (2d)$$

$$k = 2\pi/\lambda, \quad (2e)$$

$w(z)$ 表示光束在 z 处的束腰宽度, $R(z)$ 表示波前曲率半径, z_R 表示瑞利距离, k 表示波数, λ 表示波长. 本文 λ 取 632.8 nm, 传输距离 $z = 298.785 \mu\text{m}$,

传输距离 z 可以为任意数值, 传输方向为 $-z$ 方向. 从 (2) 式可得, RPVB 在自由空间中传输了距离 z 后, 不同分量的电场表达式为:

$$\begin{aligned} E_x &= [x + \text{isgn}(m)y]^{|m|} \exp\left[-\left(\frac{x^2 + y^2}{w(z)^2}\right)\right] \\ &\times \exp\left[-\frac{ik(x^2 + y^2)}{2R(z)}\right] \left(\frac{w_0}{w(z)}\right) \frac{x}{w(z)} \mathbf{e}_x \\ &\times \exp[-ikz], \end{aligned} \quad (3a)$$

$$\begin{aligned} E_y &= [x + \text{isgn}(m)y]^{|m|} \exp\left[-\left(\frac{x^2 + y^2}{w(z)^2}\right)\right] \\ &\times \exp\left[-\frac{ik(x^2 + y^2)}{2R(z)}\right] \left(\frac{w_0}{w(z)}\right) \frac{y}{w(z)} \mathbf{e}_y \\ &\times \exp[-ikz], \end{aligned} \quad (3b)$$

其中 x 和 y 表示接收平面上的位置矢量. 根据傍轴近似中电场和磁场之间的关系, 相应的磁场分量可以表示为

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{k}{\omega\mu} E_y \mathbf{e}_x \\ &= \frac{k}{\omega\mu} [x + \text{isgn}(m)y]^{|m|} \exp\left[-\left(\frac{x^2 + y^2}{w(z)^2}\right)\right] \\ &\times \exp\left[-\frac{ik(x^2 + y^2)}{2R(z)}\right] \left(\frac{w_0}{w(z)}\right) \frac{y}{w(z)} \mathbf{e}_x \\ &\times \exp[-ikz], \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} H_y &= -\frac{k}{\omega\mu} E_x \mathbf{e}_y \\ &= -\frac{k}{\omega\mu} [x + \text{isgn}(m)y]^{|m|} \exp\left[-\left(\frac{x^2 + y^2}{w(z)^2}\right)\right] \\ &\times \exp\left[-\frac{ik(x^2 + y^2)}{2R(z)}\right] \left(\frac{w_0}{w(z)}\right) \frac{x}{w(z)} \mathbf{e}_y \\ &\times \exp[-ikz]. \end{aligned} \quad (4b)$$

2.2 分析

动量分为传统动量与 Belinfante 动量, 传统动量与波矢量 $\mathbf{p}_o = \hbar \mathbf{k}$ 有关, 与自旋相关的 Belinfante 动量表示为 $\mathbf{p}_s = \nabla \times \mathbf{S}/2$. 将电场公式 (3) 和磁场公式 (4) 代入动量表达式 (5) 中, 可以得到 RPVB 在自由空间中传输距离 z 后的动量分布特性. 图 1 显示了不同拓扑荷 m 的 RPVB 在自由空间传输距离 z 后的动量分布. 具有不同拓扑荷 m 的 RPVB 的动量分量通过除以相应拓扑荷 m 的横向光场与纵向光场强度之和的最大值进行归一化. 可以看出

在自由空间中传输的 RPVB 动量呈现出三维矢量分布, 包括垂直于传输方向的动量分量 (P_x, P_y) 以及平行于传输方向的动量 (P_z). 拓扑荷 m 只影响了 P_z 的尺度大小而没有影响正负分布, 这是因为 P_z 为传统动量只和波矢量 $\mathbf{k}$ 有关. 当拓扑荷 m 的绝对值相等而正负不同时, P_x 和 P_y 的分布发生了一定旋转. 同时, 拓扑荷 m 的绝对值同样影响着 P_x 和 P_y 的尺度大小, 这是因为随着拓扑荷 m 的绝对值的增大, 光斑的尺度也在逐步地增大. 从上面分析可以看出动量分量 P_x 和 P_y 即为与自旋相关的 Belinfante 动量, 从而可以得出在自由空间中传输

的 RPVB 的动量具有三维矢量性, 但在傍轴近似中由于 P_x 与 P_y 相对 P_z 较弱, 通常可以选择忽略.

$$\mathbf{P} = \text{Re}\{\mathbf{E}^* \times \mathbf{H}\}/2c^2 =$$

$$\frac{\varepsilon k}{2\omega} \text{Re} \begin{pmatrix} \frac{1}{ik} \left[E_x^* \frac{\partial E_x}{x} + E_y^* \frac{\partial E_y}{x} + \frac{\partial E_x^* E_y}{y} \right] \mathbf{e}_x \\ \frac{1}{ik} \left[E_x^* \frac{\partial E_x}{y} + E_y^* \frac{\partial E_y}{y} - \frac{\partial E_x^* E_y}{x} \right] \mathbf{e}_y \\ \frac{1}{ik} [-ik(E_x^* E_x + E_y^* E_y) - 0] \mathbf{e}_z \end{pmatrix}, \quad (5)$$

SAM 分为 t-SAM 与 l-SAM, 在自由空间中传输的 RPVB 的 SAM 计算如 (6) 式所示:

$$\mathbf{S} = \text{Im}\{\varepsilon(\mathbf{E}^* \times \mathbf{E}) + \mu(\mathbf{H}^* \times \mathbf{H})\}/4\omega$$

$$= \frac{\varepsilon}{4\omega} \text{Im} \begin{pmatrix} \frac{1}{ik} \left[\frac{\partial E_x^* E_x}{y} + \frac{\partial E_y^* E_y}{y} - E_x^* \frac{\partial E_y}{x} + E_y \frac{\partial E_x^*}{x} + E_y^* \frac{\partial E_x}{x} - E_x \frac{\partial E_y^*}{x} \right] \mathbf{e}_x \\ \frac{1}{ik} \left[-\frac{\partial E_x^* E_x}{x} - \frac{\partial E_y^* E_y}{x} - E_x^* \frac{\partial E_y}{y} + E_y \frac{\partial E_x^*}{y} + E_y^* \frac{\partial E_x}{y} - E_x \frac{\partial E_y^*}{y} \right] \mathbf{e}_y \\ 2[E_x^* E_y - E_y^* E_x] \mathbf{e}_z \end{pmatrix}, \quad (6)$$

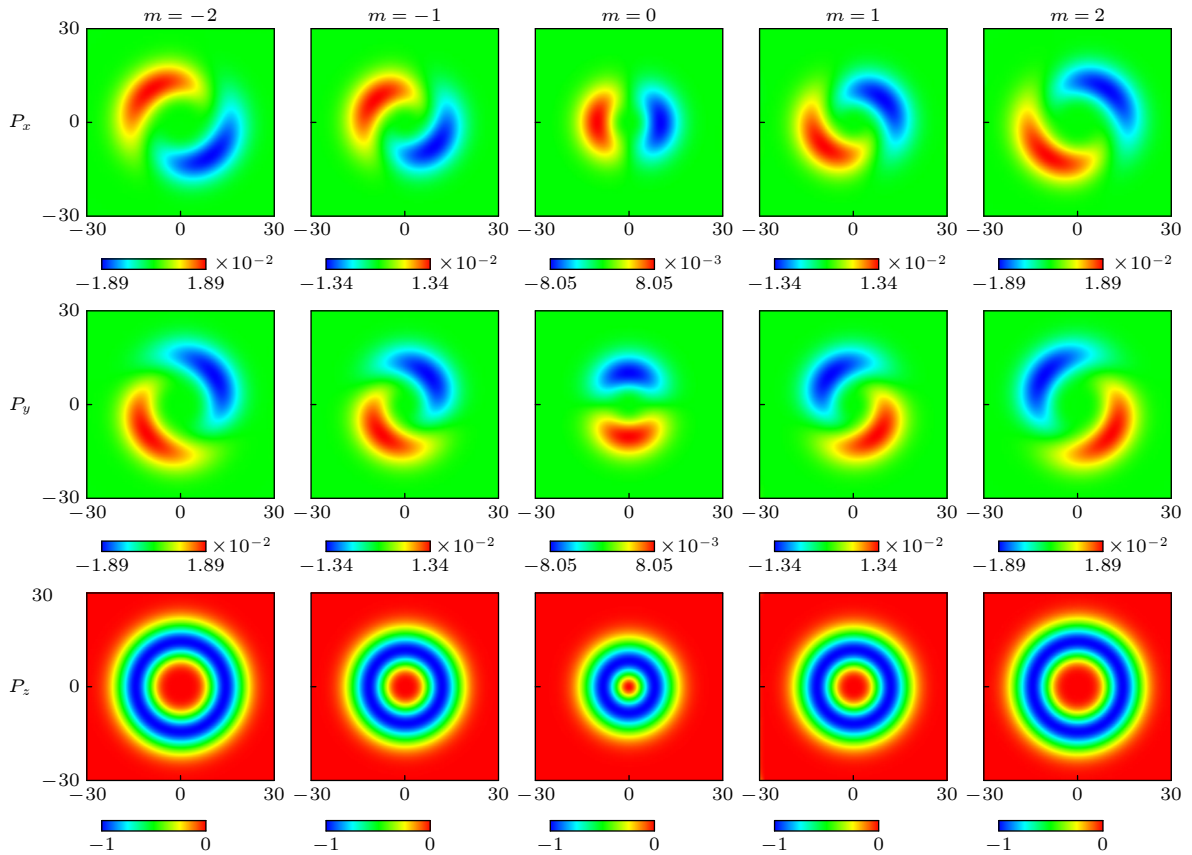


图 1 拓扑荷 $m = 0, \pm 1, \pm 2$ 时 RPVB 在自由空间距离源平面 z 处动量 (P) 的 x, y, z 分量, 带有不同拓扑荷 m 的 RPVB 的动量分量通过除以相应拓扑荷 m 下总光强的最大值进行归一化

Fig. 1. The x, y, z components of kinetic momentum (P) of RPVB in free space from the source plane z when the topological charge $m = 0, \pm 1, \pm 2$, the momentum components of RPVB with different topological charges are normalized by dividing by the maximum value of the total light intensity of the corresponding topological charge m .

其中, 第 1 项是 x 分量, 其垂直于自由空间 RPVB 的传输方向; 第 2 项是 y 分量, 其情况等同于 x 分量; 第 3 项是 z 分量, 其平行于自由空间 RPVB 的传输方向. 在自由空间中传输的 RPVB 传输距离 z 后其 SAM 的 3 个分量 (S_x , S_y , S_z) 分布如图 2 所示. 同样, 带有不同拓扑荷 m 的 RPVB 的所有 SAM 分量均通过除以相应拓扑荷 m 下总光强的最大值进行归一化. 可以看到, RPVB 在自由空间中传输

距离 z 后无论拓扑荷 m 取何值 ($m = 0, \pm 1, \pm 2$), S_x , S_y 都存在并且分布不随着拓扑荷 m 的正负而发生变化. 无论拓扑荷 m 取何值, S_z 均为零, 可见在自由空间传输过程中 RPVB 所携带的 OAM 未转换为 SAM.

RPVB 在自由空间中传输时, 其 t-SAM 由两部分组成: 一部分垂直于光束传播方向, 另一部分平行于光束传播方向, 如 (7) 式所示:

$$\text{Im} \left(\begin{aligned} & \frac{1}{ik} \left[\frac{\partial E_x^* E_x}{y} + \frac{\partial E_y^* E_y}{y} \right] e_x \\ & \frac{1}{ik} \left[-\frac{\partial E_x^* E_x}{x} - \frac{\partial E_y^* E_y}{x} \right] e_y \\ & \frac{1}{k^2} \left[\frac{\partial E_x^*}{x} \frac{\partial E_x}{y} - \frac{\partial E_x^*}{y} \frac{\partial E_x}{x} + \frac{\partial E_y^*}{x} \frac{\partial E_y}{y} - \frac{\partial E_y^*}{y} \frac{\partial E_y}{x} - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 E_x^* E_y}{x^2} + \frac{\partial^2 E_x^* E_y}{y^2} - \frac{\partial^2 E_y^* E_x}{x^2} - \frac{\partial^2 E_y^* E_x}{y^2} \right) \right] e_z \end{aligned} \right), \quad (7)$$

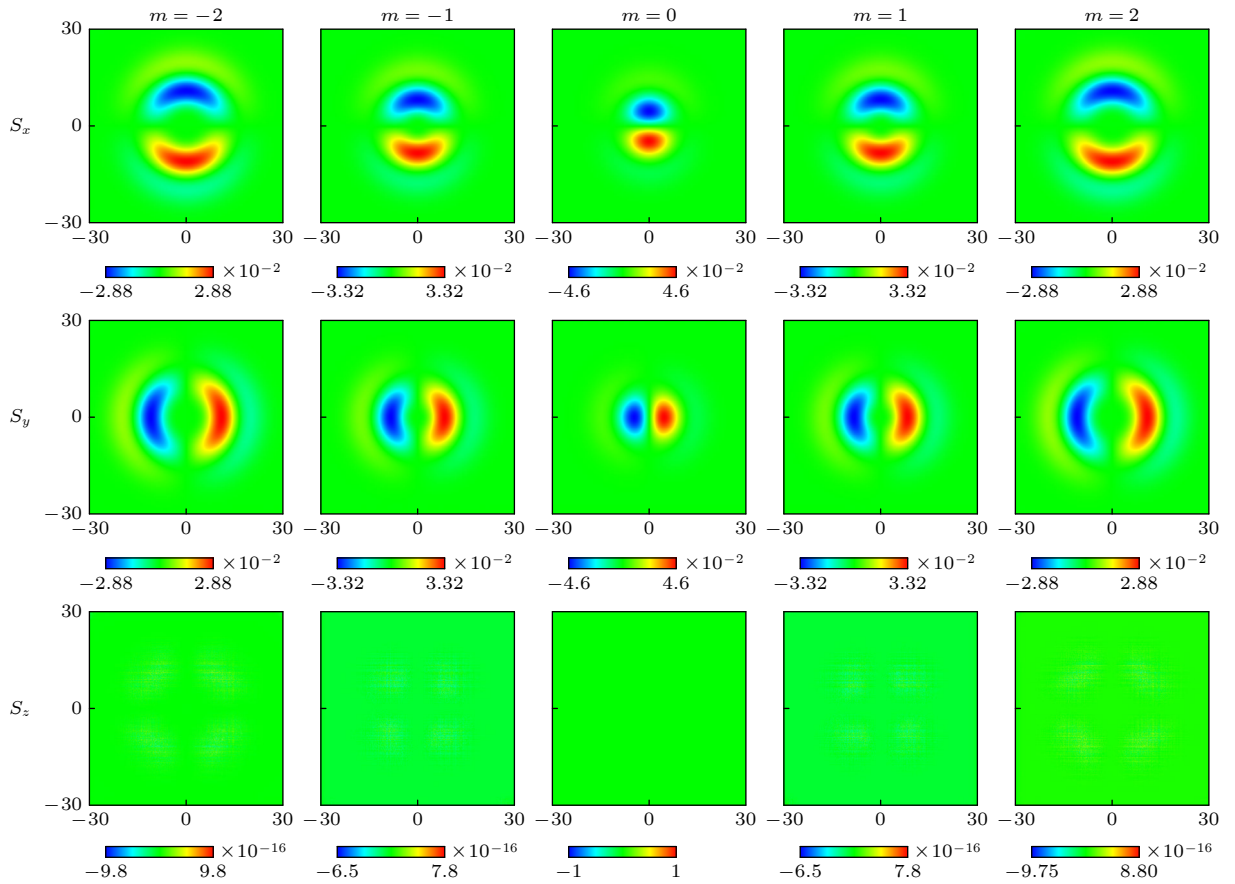


图 2 拓扑荷 $m = 0, \pm 1, \pm 2$ 时 RPVB 在自由空间距离源平面 z 处总 SAM 的 x , y , z 分量, 带有不同拓扑荷 m 的 RPVB 的总 SAM 分量通过除以相应拓扑荷 m 下总光强的最大值进行归一化

Fig. 2. The x , y , z components of the total SAM of RPVB in free space from the source plane z when the topological charge $m = 0, \pm 1, \pm 2$, the total SAM component of RPVB with different topological charges is normalized by dividing by the maximum value of the total light intensity of the corresponding topological charge m .

(7) 式中, 第 1 项是 t-SAM 在 x 轴方向上的分量 (ST_x), 第 2 项和第 3 项为 t-SAM 在 y 轴和 z 轴方向上的分量 (ST_y, ST_z). 图 3 显示了当拓扑荷 $m = 0, \pm 1, \pm 2$ 时, RPVB 在自由空间中传输距离 z 后, 其 t-SAM 在 x, y, z 方向上的分量 (ST_x, ST_y, ST_z) 的分布情况. 同样, t-SAM 的各分量 (ST_x, ST_y, ST_z) 均通过除以相应拓扑荷 m 下总光强的最大值进行归一化处理. 当拓扑荷 m 的绝对值相同时, ST_x 的分布相同, 同样 ST_y 的分布也相同, 说明 ST_x 和 ST_y 的分布与拓扑荷 m 的正负无关. 除拓扑荷 $m = 0$

外 RPVB 在传播过程中 t-SAM 还会存在 z 方向的分量 ST_z . ST_x 和 ST_y 的最大值随着拓扑荷 m 绝对值的增大而减小, 相反地, ST_z 的最大值则呈现增大的趋势. 从图 3 可以看出, ST_z 的方向与拓扑荷 m 正负相关而 ST_x 和 ST_y 的方向与拓扑荷 m 的正负无关. 从上面可以得出 ST_z 即为与光子螺旋轨迹相关的 t-SAM 纵向分量.

l-SAM 可以用 $SL = S - ST$ 来表征. 通过 (8) 式计算了 l-SAM 的 3 个分量 (SL_x, SL_y, SL_z):

$$SL = S - ST = \frac{\varepsilon}{4\omega} \text{Im} \left(\begin{aligned} & \frac{1}{ik} \left[- \left(E_x^* \frac{\partial E_y}{x} - E_y \frac{\partial E_x^*}{x} - E_y^* \frac{\partial E_x}{x} + E_x \frac{\partial E_y^*}{x} \right) \right] e_x \\ & \frac{1}{ik} \left[- \left(E_x^* \frac{\partial E_y}{y} - E_y \frac{\partial E_x^*}{y} - E_y^* \frac{\partial E_x}{y} + E_x \frac{\partial E_y^*}{y} \right) \right] e_y \\ & \left[2(E_x^* E_y - E_y^* E_x) - \frac{1}{k^2} \left(\frac{\partial E_x^*}{x} \frac{\partial E_x}{y} - \frac{\partial E_x^*}{y} \frac{\partial E_x}{x} + \frac{\partial E_y^*}{x} \frac{\partial E_y}{y} - \frac{\partial E_y^*}{y} \frac{\partial E_y}{x} \right) \right. \\ & \left. + \frac{1}{2k^2} \left(\frac{\partial^2 E_x^* E_y}{x^2} + \frac{\partial^2 E_x^* E_y}{y^2} - \frac{\partial^2 E_y^* E_x}{x^2} - \frac{\partial^2 E_y^* E_x}{y^2} \right) \right] e_z \end{aligned} \right). \quad (8)$$

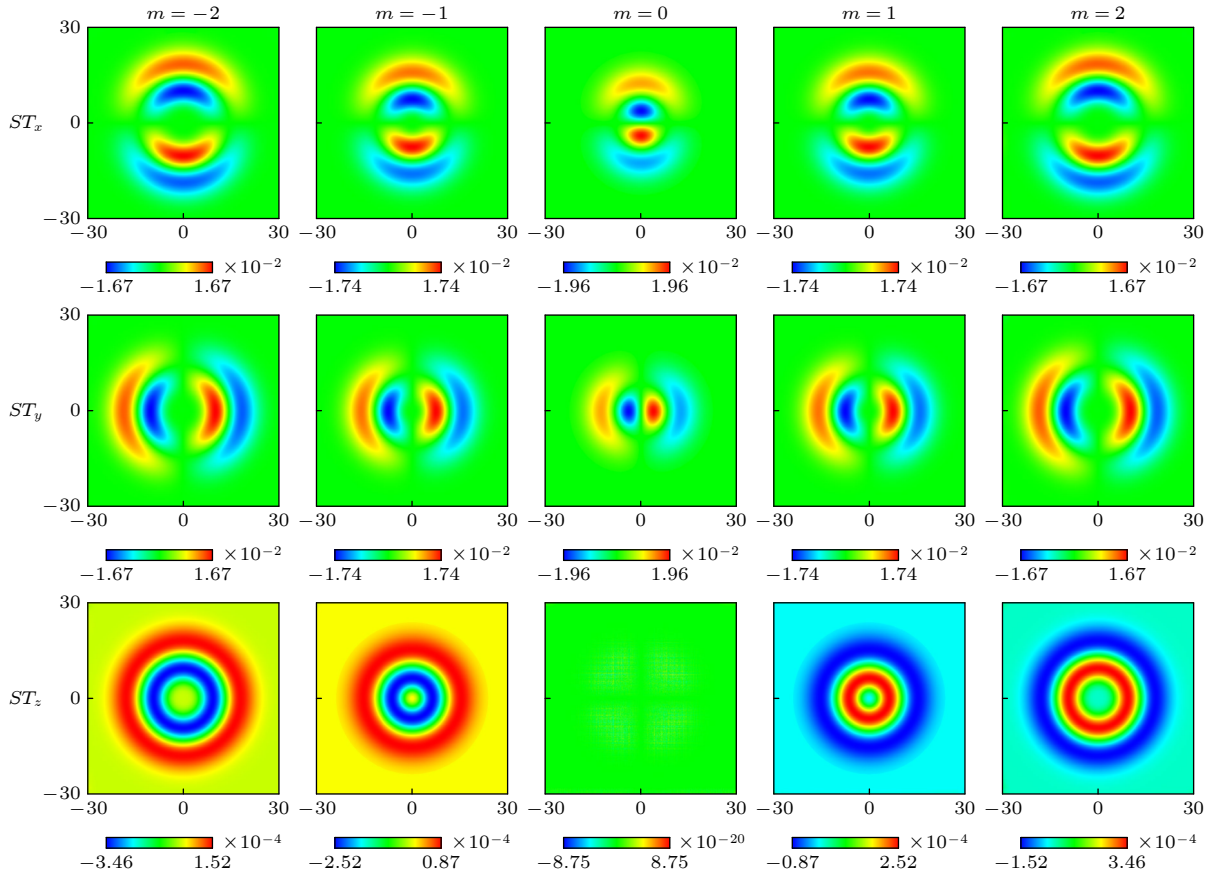


图 3 拓扑荷 $m = 0, \pm 1, \pm 2$ 时 RPVB 在自由空间距离源平面 z 处横向自旋 (t-SAM) 的 x, y, z 分量, 带有不同拓扑荷 m 的 RPVB 的 t-SAM 的分量通过除以相应拓扑荷 m 下总光强的最大值进行归一化

Fig. 3. The x, y, z components of the transverse-type spin (t-SAM) of RPVB in free space from the source plane z when the topological charge $m = 0, \pm 1, \pm 2$, the components of the t-SAM of RPVB with different topological charges are normalized by dividing by the maximum value of the total light intensity of the corresponding topological charge m .

通过该 (8) 式分析了这些分量在不同拓扑荷 $m(m = 0, \pm 1, \pm 2)$ 下的分布情况, 如图 4 所示. l-SAM 的各分量 (SL_x, SL_y, SL_z) 均通过除以相应拓扑荷 m 下总光强的最大值进行归一化处理. 由于柱矢量涡旋光束具有不均匀的强度、相位以及偏振分布, 因此纵向自旋 SL 存在微弱的 x 和 y 分量. 当拓扑荷 $m = \pm 1$ 时, SL_x 和 SL_y 的最大值大于 ST_x 和 ST_y , 但小于 S_x 和 S_y . 当拓扑荷 $m = \pm 2$ 时, SL_x 和 SL_y 的最大值小于 ST_x 和 ST_y , 且小于 S_x 和 S_y . 特别地, 当拓扑荷 $m = 0$ 时, 尽管不携带涡旋相位, SL_x 和 SL_y 的最大值仍然大于 ST_x 和 ST_y , 但同样小于 S_x 和 S_y . 这些结果表明, 随着拓扑荷 m 的变化, l-SAM 在总 SAM 中的占比程度也会有所不同. 由于 S_z 的值为 0, 因此 SL_z 的分布几乎与 ST_z 的分布相反. 此外, SL_x 和 SL_y 的分布与拓扑荷 m 的正负无关.

当 RPVB 在自由空间中传输时, 存在纵向场

E_z . E_z 可以从 E_x 和 E_y 推导得出, 并被定义为 (9) 式的第 1 项:

$$E_z = \frac{1}{ik} \left(\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} \right) e_z, \quad (9)$$

$$I_1 = E_x^* E_x + E_y^* E_y, \quad I_2 = E_z^* E_z.$$

图 5 所示为不同拓扑荷 $m(m = 0, \pm 1, \pm 2)$ 下, RPVB 在自由空间传输过程中的横向场光强 (I_1) 和纵向场光强 (I_2) 变化以及 APVB 的纵向场光强 (I_2) 变化. 不同拓扑荷 m 的 RPVB 及 APVB 的横向场光强和纵向场光强均通过除以相应拓扑荷 m 下总光强的最大值进行归一化, 以便于比较和分析. 通过比较我们发现 APVB 在拓扑荷 $m = 0$ 时其纵向场强度为零, 并且对应拓扑荷 m 下 ($m = \pm 1, \pm 2$) APVB 的纵向场光强要小于 RPVB. 此外, 随着拓扑荷 m 的绝对值增大, RPVB 的纵向场光强逐渐减弱而 APVB 的纵向场光强逐渐增强. 上述说明了 RPVB 在自由空间传输过程中存在纵向

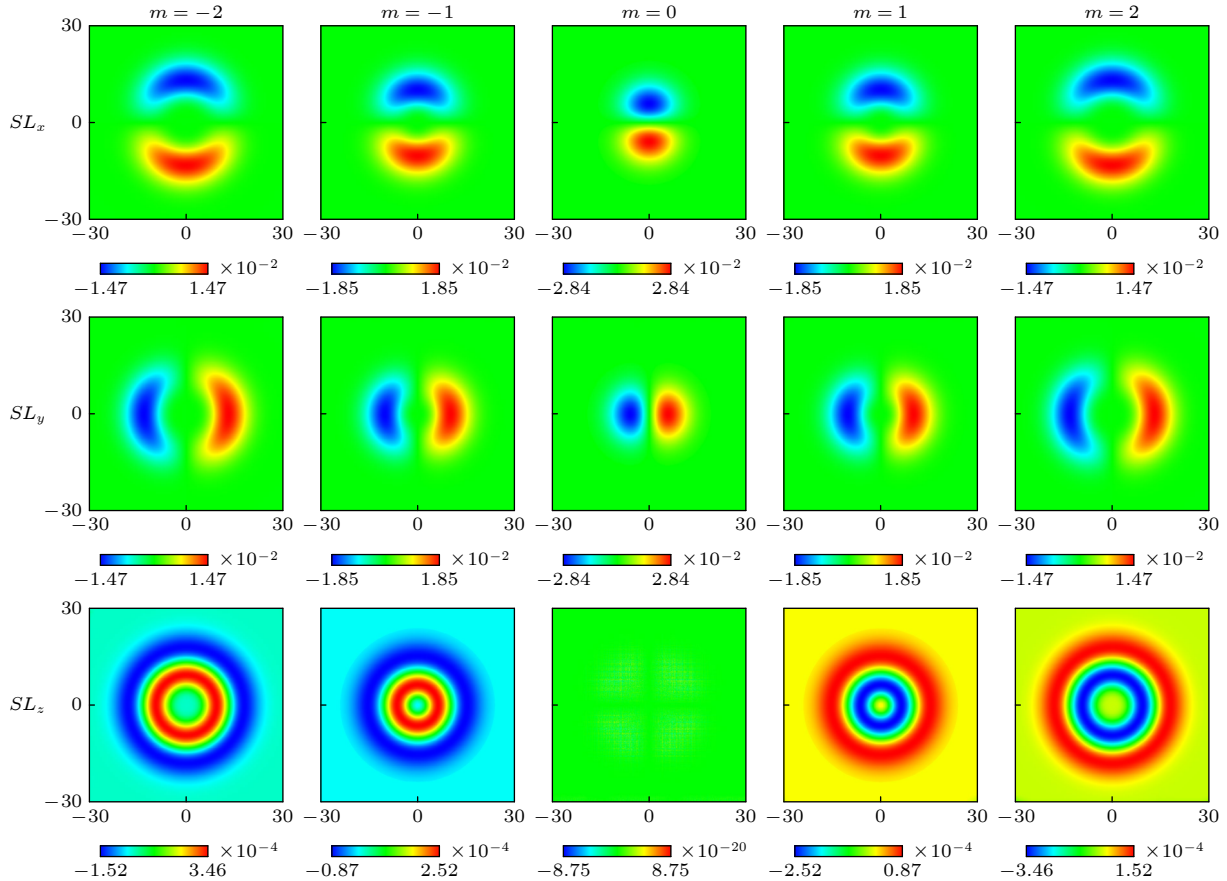


图 4 拓扑荷 $m = 0, \pm 1, \pm 2$ 时 RPVB 在自由空间距离源平面 z 处纵向自旋 (l-SAM) 的 x, y, z 分量, 带有不同拓扑荷 m 的 RPVB 的 l-SAM 的分量通过除以相应拓扑荷 m 下总光强的最大值进行归一化

Fig. 4. The x, y, z components of the longitudinal-type spin (l-SAM) of RPVB in free space from the source plane z when the topological charge $m = 0, \pm 1, \pm 2$, the components of the l-SAM of RPVB with different topological charges are normalized by dividing by the maximum value of the total light intensity of the corresponding topological charge m .

场分量而 APVB 除拓扑荷 $m = 0$ 外均存在纵向场分量, 并且两者光场分布随着拓扑荷 m 的变化发生改变.

图 6 所示为利用 (10) 式计算 OAM 分布情况. 同样, 不同拓扑荷 m 的 OAM 均通过除以相应拓扑荷 m 下总光强的最大值进行归一化. 可以看出

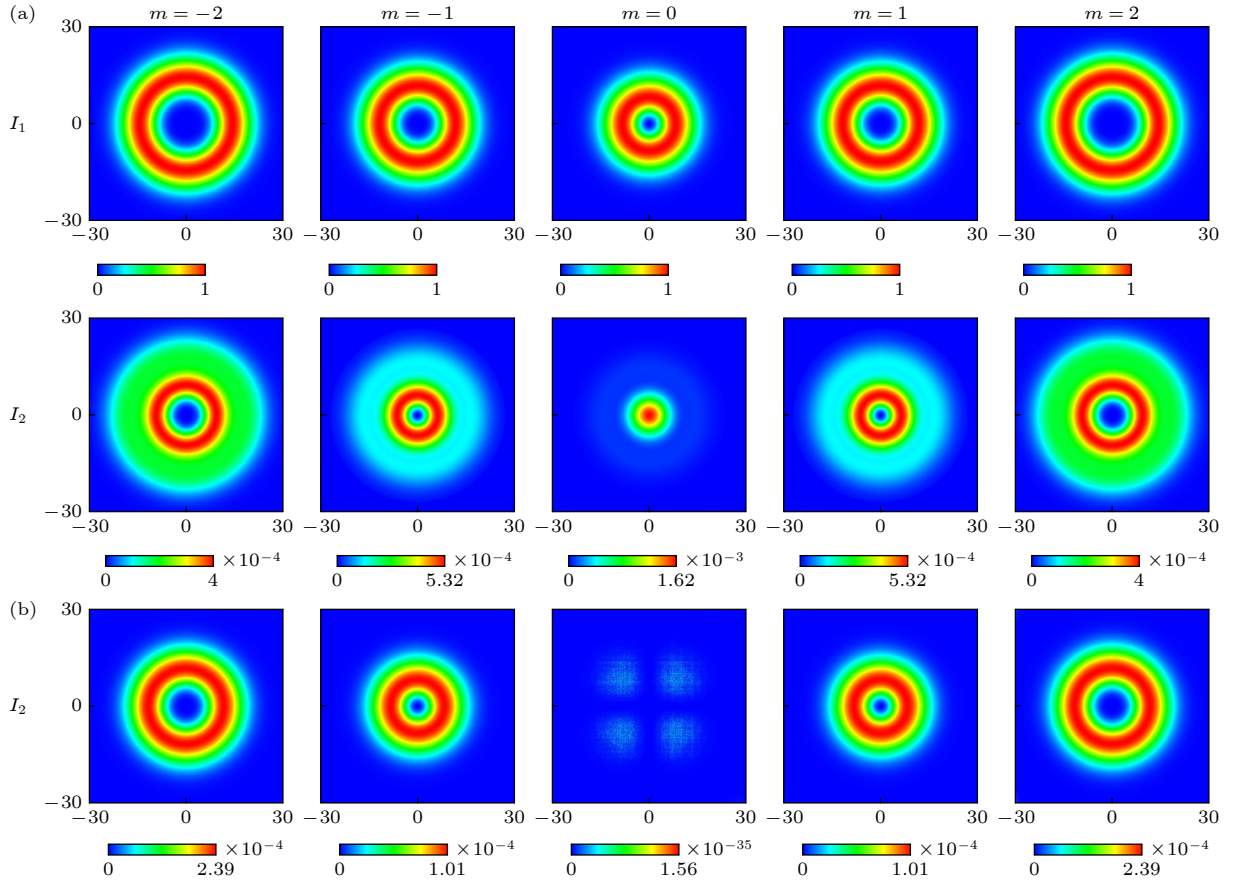


图 5 (a) 拓扑荷 $m = 0, \pm 1, \pm 2$ 时 RPVB 在自由空间距离源平面 z 处的横向场和纵向场光强, 带有不同拓扑荷 m 的 RPVB 的横向场和纵向场光强通过除以相应拓扑荷 m 下 $I_1 + I_2$ 的最大值进行归一化; (b) 拓扑荷 $m = 0, \pm 1, \pm 2$ 时 APVB 在自由空间距离源平面 z 处的纵向场光强, 带有不同拓扑荷 m 的 APVB 的纵向场光强通过除以相应拓扑荷 m 下 $I_1 + I_2$ 的最大值进行归一化

Fig. 5. (a) The transverse field and longitudinal field intensity of RPVB in free space from the source plane z when the topological charge $m = 0, \pm 1, \pm 2$. The transverse and longitudinal field light intensities of RPVB with different topological charges are normalized by dividing by the maximum value of $I_1 + I_2$ of the corresponding topological charge m ; (b) the longitudinal field intensity of APVB in free space from the source plane z when the topological charge $m = 0, \pm 1, \pm 2$, the longitudinal field light intensity of APVB with different topological charges are normalized by dividing by the maximum value of $I_1 + I_2$ of the corresponding topological charge m .

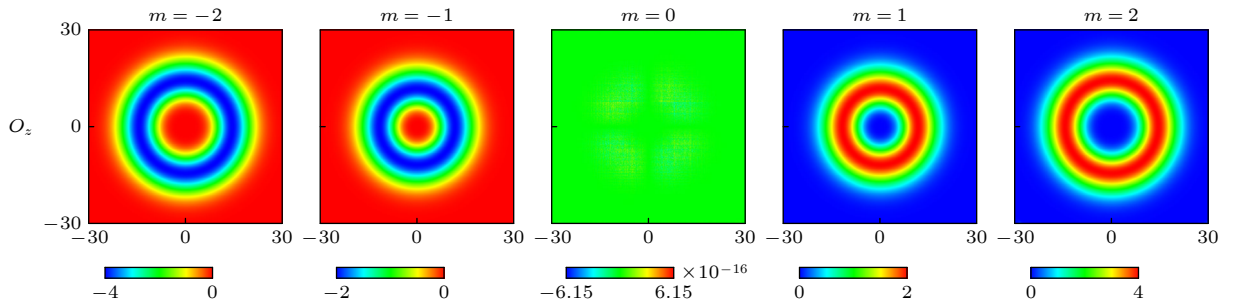


图 6 拓扑荷 $m = 0, \pm 1, \pm 2$ 时 RPVB 在自由空间距离源平面 z 处的 OAM, 带有不同拓扑荷 m 的 RPVB 的 OAM 通过除以相应拓扑荷 m 下 $I_1 + I_2$ 的最大值进行归一化

Fig. 6. The OAM of RPVB in free space from the source plane z when the topological charge $m = 0, \pm 1, \pm 2$, the OAM of RPVB with different topological charges is normalized by dividing by the maximum value of $I_1 + I_2$ of the corresponding topological charge m .

当拓扑荷 $m = 0$ 时, OAM 为零. 当拓扑荷 $m \neq 0$ 时, OAM 的正负与拓扑荷 m 正负相关. 同时, 当拓扑荷 $m \neq 0$ 时, 拓扑荷 m 的绝对值越大, 其 OAM 尺度越大.

$$\begin{aligned} T_x &= E_x^* \frac{\partial E_x}{x} + E_y^* \frac{\partial E_y}{x} + E_z^* \frac{\partial E_z}{x}, \\ T_y &= E_x^* \frac{\partial E_x}{y} + E_y^* \frac{\partial E_y}{y} + E_z^* \frac{\partial E_z}{y}, \\ O_z &= \text{Im}[2xT_y - 2yT_x]. \end{aligned} \quad (10)$$

3 结 论

基于自旋-动量关系, 研究了 CVVB 在自由空间中传输时其动量 P 、自旋角动量 SAM、横向自旋角动量 t-SAM、纵向自旋角动量 l-SAM、光场以及轨道角动量 OAM 的特性. 其中动量存在三维矢量分布. SAM 存在 x 和 y 方向分量, 不存在 z 方向分量. 横向自旋角动量 t-SAM 与纵向自旋角动量 l-SAM 在拓扑荷 m 为零时不存在 z 方向分量, 其余则存在三维矢量分布. APVB 在拓扑荷 m 为零时其纵向场不存在, 拓扑荷 m 为其他值 ($m = \pm 1, \pm 2$) 时 RPVB 与 APVB 在自由空间中传输时其纵向场均存在. 本文分析了 CVVB 在自由空间中的传输矢量特性, 包括对动量 P 、自旋角动量 SAM、横向自旋角动量 t-SAM、纵向自旋角动量 l-SAM 的三维分量进行表征, 其研究结果为光学通信和光与物质相互作用等领域的研究提供了一定的理论基础.

参考文献

- [1] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [2] Allen L, Padgett M J, Babiker M 1999 *Prog. Opt.* **39** 291
- [3] Fang X Y, Yang H C, Yao W Z, Wang T X, Zhang Y, Gu M, Xiao M 2021 *Adv. Photon.* **3** 015001
- [4] Bekshaev A, Bliokh K Y, Soskin M 2011 *J. Opt.* **13** 053001
- [5] Shen Y J, Wang X J, Xie Z W, Min C J, Fu X, Liu Q, Gong M L, Yuan X C 2019 *Light Sci. Appl.* **8** 90
- [6] Bliokh K Y, Niv A, Kleiner V, Hasman E 2008 *Nat. Photonics* **2** 488
- [7] Bliokh K Y 2009 *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* **11** 094009
- [8] Lin J, Yuan X C, Tao S H, Burge R E 2007 *Appl. Opt.* **46** 4680
- [9] 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
- [10] 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
- [11] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, Vasnetsov M, Pas'ko V, Barnett S M, Franke-Arnold S 2004 *Opt. Express* **12** 5448
- [12] Richardson D J, Fini J M, Nelson L E 2013 *Nat. Photonics* **7** 354
- [13] Labroille G, Barré N, Pinel O, Denolle B, Lengle K, Garcia L, Jaffres L, Jian P, Morizur J F 2017 *Opt. Fiber Technol.* **35** 93
- [14] Yang Y, Ren Y X, Chen M, Arita Y, Rosales-Guzman C 2021 *Adv. Photon.* **3** 034001
- [15] Li Y, Zhou L M, Zhao N 2021 *Opt. Lett.* **46** 106
- [16] Stav T, Faerman A, Maguid E, Oren D, Kleiner V, Hasman E, Segev M 2018 *Science* **361** 1101
- [17] Solntsev A S, Agarwal G S, Kivshar Y 2021 *Nat. Photonics* **15** 327
- [18] Chong A, Wan C, Chen J, Zhan Q 2020 *Nat. Photonics* **14** 350
- [19] Shi P, Du L P, Yuan X C 2021 *Nanophotonics* **10** 3927
- [20] Bliokh K Y, Bekshaev A Y, Nori F 2014 *Nat. Commun.* **5** 3300
- [21] Fu Z Y 2018 *M. S. Thesis* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [付泽宇 2018 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [22] Bliokh K Y, Smirnova D, Nori F 2015 *Science* **348** 1448
- [23] Bliokh K Y, Rodríguez-Fortuño F J, Bekshaev A Y, Kivshar Y S, Nori F 2018 *Opt. Lett.* **43** 963
- [24] Shi P, Lei X, Zhang Q, Li H, Du L P, Yuan X C 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 213904
- [25] Bekshaev A Y, Bliokh K Y, Nori F 2015 *Phys. Rev. X* **5** 011039
- [26] Aiello A, Banzer P 2016 *J. Opt.* **18** 085605
- [27] Shi P, Li H, Du L P, Yuan X C 2022 *ACS Photonics* **10** 2332
- [28] Shi P, Du L P, Yang A, Yin X, Lei X, Yuan X C 2023 *Commun. Phys.* **6** 283
- [29] Yin X J, Shi P, Du L P, Yuan X C 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 241107
- [30] Yu P P, Zhao Q, Hu X Y, Li Y M, Gong L 2018 *Opt. Lett.* **43** 5677
- [31] Li C C, Shi P, Du L P, Yuan X C 2020 *Nanoscale* **12** 13674
- [32] Alexeyev C N, Alexeyev A N, Lapin B P, Milione G, Yavorsky M A 2013 *Phys. Rev. A* **88** 63814
- [33] Volyar A V, Zhilaitis V Z, Shvedov V G 1998 *Tech. Phys. Lett.* **24** 826
- [34] Johnson S D, Ma Z, Padgett M J, Ramachandran S 2019 *OSA Continuum* **2** 2975
- [35] Chakravarthy T P, Viswanathan N K 2019 *OSA Continuum* **2** 1576
- [36] Bliokh K Y, Alonso M A, Ostrovskaya E A, Aiello A 2010 *Phys. Rev. A* **82** 63825
- [37] Bliokh K Y, Ostrovskaya E A, Alonso M A, Rodríguez-Herrera O G, Lara D, Dainty C 2011 *Opt. Express* **19** 26132
- [38] Yin X J, Li Y, Jin G L, Wang J, Liu J H, Li J H 2024 *J. Opt. Soc. Am. A* **41** 2231
- [39] Rodríguez-Fortuño F J, Marino G, Ginzburg P, O'Connor D, Martínez A, Wurtz G A, Zayats A V 2013 *Science* **340** 328
- [40] Petersen J, Volz J, Rauschenbeutel A 2014 *Science* **346** 67
- [41] Rodríguez-Fortuño F J, Barber-Sanz I, Puerto D, Griol A, Martínez A 2014 *ACS Photonics* **1** 762
- [42] Zhao C G 2022 *M. S. Thesis* (Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology) (in Chinese) [赵春刚 2022 硕士学位论文 (太原: 太原科技大学)]

Full vector properties of angular momentum of cylindrical vector vortex beam propagating in free space^{*}

GAO Yujie¹⁾ LI Jinhong¹⁾ WANG Jing¹⁾ LIU Jinhong²⁾ YIN Xiaojin^{1)†}

1) (*Shanxi Center of Technology Innovation for Light Manipulations and Applications, School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China*)

2) (*Department of Science, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China*)

(Received 24 September 2024; revised manuscript received 30 December 2024)

Abstract

The full vector properties of the optical parameters of cylindrical vector vortex beam (CVVB) propagating in free space, such as the momentum (P), spin angular momentum (SAM), transverse-type spin angular momentum (t-SAM), longitudinal-type spin angular momentum (l-SAM), and light field are characterized by using spin-momentum relation in this work. The research results show that P has x -, y -, and z - component, SAM has x - and y - components, but no z -component; t-SAM and l-SAM both have components which are parallel and perpendicular to the optical axis when the topological charge m is not 0; t-SAM has a longitudinal component which is related to the helical trajectory of photons; l-SAM has a transverse component in free space. Except for the angularly polarized vortex beam (APVB), which has no longitudinal field when the topological charge m is 0, both radially polarized vortex beam (RPVB) and APVB have longitudinal fields in free space. The vectorial characteristic of the angular momentum of CVVB in free space can provide a theoretical basis for analyzing the transmission of structured beams in different media.

Keywords: cylindrical vector vortex beam, kinetic momentum, spin angular momentum, orbital angular momentum

PACS: 92.60.Ta, 29.27.Hj, 42.25.Bs

DOI: [10.7498/aps.74.20241344](https://doi.org/10.7498/aps.74.20241344)

CSTR: [32037.14.aps.74.20241344](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20241344)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62305238, 12104332) and the Fundamental Research Program of Shanxi Province, China (Grant No. 202203021211192).

[†] Corresponding author. E-mail: 2021013@tyust.edu.cn

柱矢量涡旋光束在自由空间中传输时角动量的全矢量特性

高雨洁 李晋红 王静 刘晋宏 尹晓金

Full vector properties of angular momentum of cylindrical vector vortex beam propagating in free space

GAO Yujie LI Jinhong WANG Jing LIU Jinhong YIN Xiaojin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 059202 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241344

CSTR: 32037.14.aps.74.20241344

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241344>

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>

风控热晕对双模涡旋光束大气传输的轨道角动量和相位奇异性的影响

Influence of wind-dominated thermal blooming on orbital angular momentum and phase singularity of dual-mode vortex beams

物理学报. 2023, 72(16): 164202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230684>

基于光束偏移器的光的轨道角动量分束器

Orbital angular momentum splitter of light based on beam displacer

物理学报. 2024, 73(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231874>

三维空间轨道角动量全息

Three-dimensional spatial orbital angular momentum holography

物理学报. 2024, 73(9): 094202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231822>

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>

轨道角动量量子光源的集成化研究

Research progress of integrated quantum light sources with orbital angular momentum

物理学报. 2024, 73(16): 164204 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240791>