arXiv:2302.00241v1 [physics.optics] 1 Feb 2023

复杂矢量模式的受控纵向自旋轨道分离

肖博 肖博1,*，BO ZHAO2，RUI-PIN CHEN1，以及 CARMELO ROSALES-GUZMÁN3, *

[1]浙江省光场调控重点实验室，物理系，浙江理工大学，中国杭州，*310018*[2]王大珩量子调控协同创新中心，哈尔滨理工大学，中国哈尔滨*150080*[3]光学研究中心，墨西哥瓜纳华托州莱昂市*Loma del Bosque 115*号，*Lomas del Campestre*社区，邮编*37150*[*]通讯作者：*huxiaobo@zstu.edu.cn*，*carmelorosalesg@hrbust.edu.cn*

编译于*2023*年*2*月*2*日

自旋与轨道角动量相互纠缠的复杂矢量模式，正为各种应用开辟广阔前景。重要的是，灵活操控此类光束的各种属性，将为新型应用铺平道路。因此，在本文中，我们展示了在自由空间中传播的复杂矢量模式的纵向自旋—轨道分离。为实现这一点，我们采用了近期展示的圆形艾里高斯涡旋矢量（CAGVV）模式，该模式具有自聚焦特性。具体而言，通过恰当调控 CAGVV 模式的内禀参数，构成 CAGVV 模式的两个正交分量之间的强耦合会沿传播方向发生自旋—轨道分离：一个偏振分量聚焦于特定平面，而另一个则聚焦于不同平面。我们通过数值模拟展示并经实验验证的这种自旋—轨道分离，只需改变 CAGVV 模式的初始参数即可按需调节。我们的发现具有重要意义，例如可应用于光镊，在两个不同的平行平面上操控微米或纳米颗粒。 © 2023 美国光学学会

http://dx.doi.org/10.1364/ao.XX.XXXXXX

结构光领域涵盖了对光的各种性质进行操控，从而产生新颖的光场，现已迅速成为现代光学的重要分支 [1, 2]。特别是，利用空间和偏振自由度生成不可分离光态，正日益受到关注 [3–5]。原因之一是，这类光态已在众多研究领域展现出广泛的应用，例如光镊、光通信、光学计量、高分辨率显微术等 [6–13]。另一个原因是，它们与纠缠态高度相似，因此获得了颇具争议的“经典纠缠”模式这一称谓 [14–18]。这种相似性也促成了若干受量子启发的应用 [2, 19–21]。特别是，近年来，关于具有沿传播方向变化的偏振态的矢量模式的研究已成为热点，这为新型应用提供了潜在工具 [22–25]。例如，有研究报道了在保持不可分离度恒定的同时，在不同矢量态之间振荡的矢量模式；也有研究涉及不可分离度在标量态与矢量态之间振荡的情况，为按需传输特定矢量态开辟了道路 [26]。在其他一些情况下，发生变化的不仅是偏振分布，还有矢量模式的拓扑荷 [27]。其他例子包括矢量场的偏振分布随传播距离振荡，并以古伊相位为依据或利用冻结波实现的情况 [28, 29]。较近期的一个例子报道了一种具有抛物线形状的纯矢量光束，该光束在传播过程中分裂为两个空间分离、偏振方向互相正交的圆偏振模式[30]。在这项研究中，模式在横向平面内分离，呈现出类似自旋霍尔效应的现象。

与上述研究并行，自 2010 [31] 首次提出以来，突发自聚焦圆艾里高斯涡旋（CAGV）光束也一直是多项研究的主题。这类模式由大量以圆形排列的艾里光束叠加而成，能够在传播过程中沿抛物线轨迹实现自聚焦 [32]。通常，这些模式利用空间光调制器以数字方式生成，从而全面控制其传播动力学。例如，焦平面内光束的直径可以根据拓扑荷的阶数进行调节。此外，还可通过改变发射角来控制聚焦距离，而发射角与光束的弹道传播轨迹直接相关。近年来，CAGV 模式的矢量版本也得到展示，形成了一类具有自聚焦特性的全新矢量光束 [33]。

本文报告了矢量光束的一种新特性：其两个构成正交空间模式会随传播而分离，成为具有相反自旋和轨道角动量（AM）的两个标量模式；我们将这种现象称为矢量模式的自旋—轨道分离。值得一提的是，基于自旋的标量版本此前已有报道 [34], ，但本文展示的分离现象所遵循的原理截然不同。此外，分离距离等特性可以动态

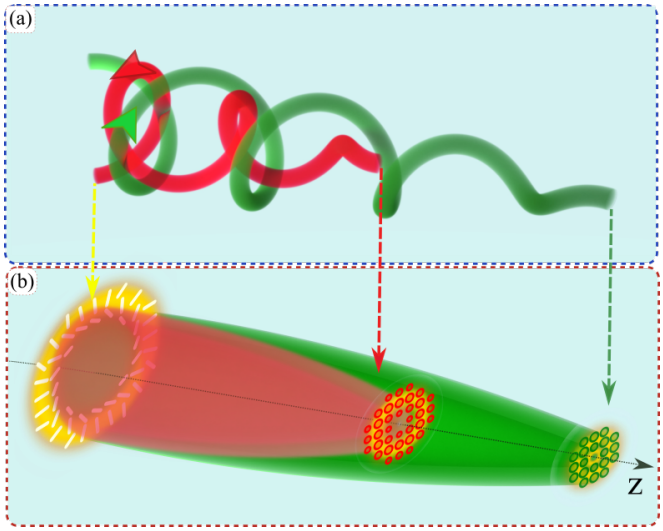

图 1. 涡旋矢量光束纵向自旋-轨道分离的示意图，展示了随传播而变化的（a）自旋（与偏振相关）的分离，以及（b）光束在三个不同平面上的强度和偏振分布，并呈现了各个组成空间模式的自聚焦效应。此处，红色和绿色分别表示右旋和左旋圆偏振。此外，白线表示线偏振。

由 CAGV 光束的参数控制。

图 1 展示了本文所述自旋—轨道分离的示意图。随着传播，圆艾里高斯涡旋矢量（CAGVV）光束会动态解耦，从不可分离性最大转变为不可分离性为零，并呈现出右旋和左旋圆偏振分量的清晰分离，如图1（a）所示。这一现象得益于 CAGV 光束的自加速特性：每个正交自旋-轨道分量会在两个不同的平行平面上自动聚焦。为便于说明，图1（b）展示了 CAGVV 光束在三个不同平面上的偏振分布：在原点处，矢量光束仅呈现线偏振态（以白线标示）；而在后续两个平面上，光束分离为右旋和左旋圆偏振分量，分别以红色和绿色椭圆表示。值得注意的是，沿传播方向的自旋—轨道分离可通过适当设置光束的固有参数按需控制，具体将在下文说明。

数学上，CAGV光束可在柱坐标中定义为 [33],

$$\mathbf{U}_m^{\nu}(\mathbf{r},\phi) = r^{|m|} Ai\left(\frac{r_0 - r}{\omega}\right) \exp\left(\frac{a(r_0 - r)}{\omega}\right) \exp(im\phi) \exp(i\nu r), \quad \textbf{(1)}$$

其中$Ai(\cdot)$ 是艾里函数， ω 是缩放因子，a 是截断参数，r_0 是初始平面上的光束半径。另一个重要参数是初始发射角，记为 ν，它在光束传播时的自聚焦效应中起着关键作用。具体来说，对于 $\nu < 0$，CAGV光束会发生散焦；而对于$\nu > 0$，则会发生聚焦。此外，这种 CAGV光束具有如下形式的方位角变化相位：$\exp(im\phi)$，

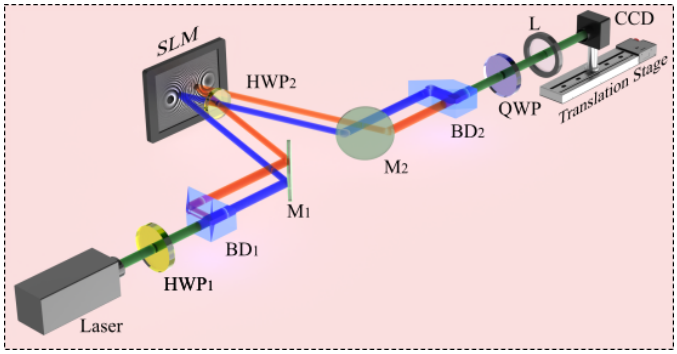

图 2. 生成 CAGVV 模式所采用的光学装置示意图。HWP$_1$-HWP$_2$：半波片，BD$_1$-BD$_2$：分束器，M$_1$-M$_2$：反射镜，QWP：四分之一波片，SLM：空间光调制器，L：透镜，CCD：电荷器件相机。

其中m 称为拓扑荷，对应于每个光子具有 $m\bar{}h$ 的轨道角动量（OAM），其中 $\bar{}h$ 为约化普朗克常数。

遵循将复杂矢量模式生成为空间与偏振自由度（DoF）[35, 36], 非可分离加权叠加态的一般流程，我们将具有不同轨道角动量（OAM）的 CAGV 光束编码为空间自由度，并将一组正交且自旋相反的状态编码为偏振自由度，从而生成 CAGVV 模式。从数学上看，这种叠加形式如下：

$$\mathbf{U}_{m_{1,2}}^{\nu_{1,2}}(\mathbf{r},\phi) = \cos\theta \mathbf{U}_{m_1}^{\nu_1}(\mathbf{r},\phi)\hat{\mathbf{e}}_R + \sin\theta \exp(i\alpha)\mathbf{U}_{m_2}^{\nu_2}(\mathbf{r},\phi)\hat{\mathbf{e}}_L, \quad \textbf{(2)}$$

其中，$\hat{\mathbf{e}}_R$ 和 $\hat{\mathbf{e}}_L$ 分别是表示右旋和左旋圆偏振态的酉向量。$\mathbf{U}^{\nu_1 m_1}(\mathbf{r},\phi)$和$\mathbf{U}^{\nu_2 m_2}(\mathbf{r},\phi)$表示空间自由度，其权重分别为 $\theta \in [0, \pi/2]$。两种模式均携带固定量的轨道角动量（OAM），分别为$m_1\bar{}h$ 和$m_2\bar{}h$。特别是，每种模式的轨迹也可以通过初始发射角 ν_1 和 ν_2灵活调控。额外的模间相位 $\exp(i\alpha)$（其中 $\alpha \in [0, \pi]$）设定了两个偏振分量之间的相位延迟。除非必要，以下将省略$(\mathbf{r},\phi)$的显式依赖关系。

为在实验中生成 CAGVV 光束，我们搭建了图2所示的光学装置。首先，使用位于 22.5°° 处的半波片（HWP$_1$），将一束水平线偏振、经扩束和准直的激光束（$\lambda = 532$ nm）旋转为对角偏振。随后，分束器（BD$_1$）将光束分离为水平（蓝色）和垂直（橙色）偏振分量，再通过反射镜（M$_1$）将两束光分别引至空间光调制器（SLM）。SLM 的屏幕在数字上分为两个水平区域，每个区域分别加载独立的全息图，对应构成标量场$\mathbf{U}^{\nu_1 m_1}$ 和$\mathbf{U}^{\nu_2 m_2}$的傅里叶变换。由于 SLM 只能调制水平偏振，在垂直偏振光束的路径上、SLM 前放置了第二片半波片（HWP$_2$），将其偏振旋转为水平偏振。与此同时，另一束光先经 SLM 调制，再通过同一片 HWP$_2$，使其偏振转换为垂直偏振。最后，第二面反射镜（M$_2$）将两束光引向另一个分束器（BD$_2$），由其重新合成为所需的 CAGVV 光束。最后，我们在45° 处加入一片四分之一波片（QWP），将 CAGVV 光束从线偏振基（$\hat{\mathbf{e}}_H, \hat{\mathbf{e}}_V$）转换为

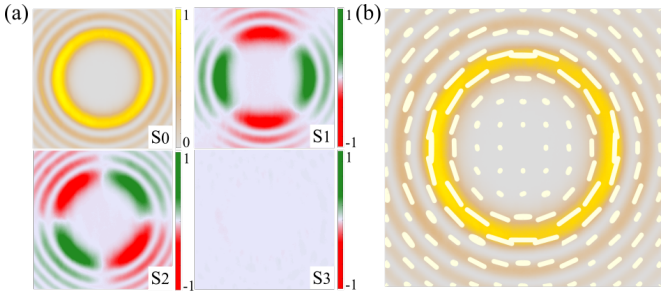

图 3. 矢量模式 $\mathbf{U}_{-1}^{0\,0}$,,1 的实验斯托克斯参数 S_0, S_1, S_2 和 S_3 显示于(a)中，其中偏振分布的重建结果叠加在(b)中所示的总强度 S_0 上。这里，白色表示水平椭圆。在此示例中， ω=0.2mm, r_0=1mm,a=0.4。

圆偏振基（$\hat{\mathbf{e}}_R, \hat{\mathbf{e}}_L$）。使用电荷耦合器件（CCD: FL3-U3-120S3C-C，分辨率为 1.55μ m）记录生成光束的强度。该器件置于 L_3 的焦平面（f = 300 mm），并安装在导轨上，以记录光束在传播过程中的变化。

为了详细分析所生成 CAGVV 光束的传播动力学，我们使用斯托克斯偏振测量重建了光束的偏振分布。为此，我们根据以下关系式，通过强度测量计算斯托克斯参数:

$$S_0 = I_H + I_V, \qquad S_1 = 2I_H - S_0,$$
$$S_2 = 2I_D - S_0, \qquad S_3 = 2I_R - S_0. \tag{3}$$

这里，I_H、I_D、I_V和 I_R 分别是光束的水平、对角、垂直和右旋圆偏振分量。这些强度可通过在 CCD 前插入一系列相位延迟器进行实验测量。具体而言，我们将生成的光束依次通过方位角设为 0°、 45°和 90°的线偏振片，测量 I_H、I_D 和 I_V；而 I_R 可通过在 45°处插入另一块四分之一波片，并将偏振片设置为 90° 来获得（更多详情见 [37] ）。例如，图 3(a)展示了矢量模式 $\mathbf{U}_{-1}^{0\,0}$,,1 在参数 ω=0.2mm 、 r_0=1mm 、 a=0.4 时的实验斯托克斯参数，据此可以重建方位偏振分布，如图 3(b)所示，其中也给出了强度分布以供参考。

为了观察所生成的 CAGVV 模式的纵向自旋-轨道分离，我们扫描了其传播过程中的横向偏振分布。举例来说，我们利用斯托克斯偏振测量，重建了特定模式$\mathbf{U}_{1\,-1}^{2\,0.5}$,,在四个不同平面上的横向偏振分布，如图4所示，图4(a)展示数值模拟结果，图4(b)展示实验结果。如$z_1 = 0$mm) 的初始平面所示，我们生成的矢量模式呈现出线偏振的混合分布（以白线标记），见图4(a) 左图。在传播距离为$z_2 = 505$mm 处，我们展示了另一个例子，此时横向偏振分布呈现右旋和左旋椭圆偏振的混合。随着光束进一步传播，携带拓扑荷$m_1 = 1$ 的右旋圆偏振分量首先在横向平面$z_3 = 1080$ mm 处聚焦，如第三幅图所示；而拓扑荷为$m_2 = -1$的左旋分量随后在平面$z_4 = 1800$mm 处聚焦，如图所示

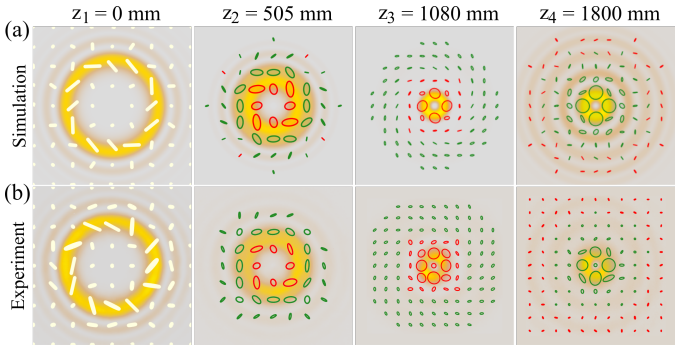

图 4. 自由空间传播过程中$\mathbf{U}_{1\,-1}^{2\,0.5}$，模式的偏振分布。在四个不同平面上，展示了与偏振分布重叠的理论（a）和实验（b）横向强度分布，分别为z_1 = 0mm、z_2 = 505mm、z_3 = 1080 mm、z_4 = 1800mm，其中右旋和左旋偏振分别用红色和绿色椭圆表示，白线表示线偏振。

在右图中，右旋和左旋椭圆偏振分量分别以红色和绿色表示。

图 5 展示了经过设计的 $\mathbf{U}_{1\,-1}^{2\,0.5}$，，的峰值强度随传播距离 z 变化的情况：图 5(a) 为数值模拟结果，图 5(b) 为实验结果。每种情况下，底部面板均显示矢量光束的完整强度分布，其中可以观察到两个聚焦区。为清晰起见，顶部面板展示了各偏振分量对应的强度，可以清楚地观察到这两个聚焦区。同样，右旋和左旋偏振分量分别用红色和绿色圆圈表示。值得注意的是，通过谨慎选择各分量的初始发射角，可以按需调控两个焦点的位置，即 ν_1, ν_2。在 $\nu_1 = \nu_2$这一特定情况下，生成的矢量光束将在单一平面聚焦。鉴于增大参数 ν 会增强圆艾里高斯涡旋模式的骤然自聚焦特性（如插图所示），所生成的 CAGVV 模式的 ν_1 与 ν_2 之差可实现可调谐的纵向自旋-轨道分离：一个偏振分量携带固定量的轨道角动量，且具有较大的初始发射角，因此先在特定平面聚焦；另一个偏振分量携带不同量的轨道角动量，随后在更远的平面聚焦（受较小初始发射角影响）。此外，圆艾里高斯涡旋模式的另一个参数——拓扑荷 m——会影响焦点强度对比度[38],，这为未来灵活调控 CAGVV 模式自旋-轨道分离过程中各焦点的强度开辟了道路。

总之，我们提出了纵向自旋—轨道分离这一概念，它是一种光子自旋霍尔效应。为实现这一点，我们采用了圆艾里涡旋矢量（CAVV）光束，该光束由圆艾里高斯涡旋（CAGV）模式与正交圆偏振态加权叠加而成。CAGV光束的自聚焦特性使自旋—轨道纵向分离成为可能，而光束的内禀参数能够灵活调控这一特性。这种新型光束将为众多领域的新应用开辟道路。例如，在光镊中，它们可用于在两个不同平面上捕获微米或纳米颗粒；在激光材料加工中，也可用于在两个不同平面上进行材料加工。

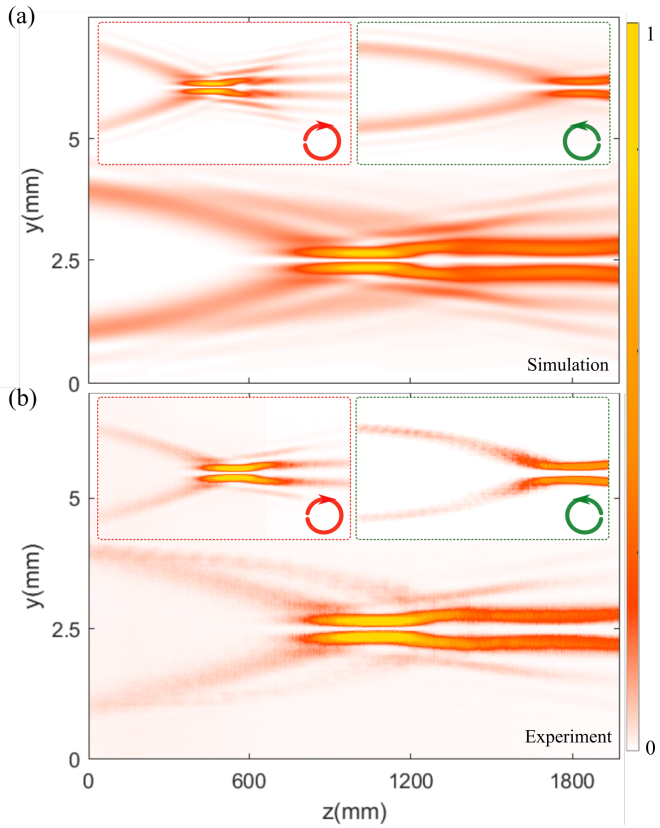

图 5. 展示了特定情况下最大强度的传播轨迹，其中观察到两个沿抛物线轨迹的明显自聚焦过程。理论结果和实验结果分别显示于 (a) 和 (b) 中。每幅图上方还以插图形式展示了对应于右旋和左旋圆偏振分量的强度，分别由左侧和右侧面板中的红色和绿色圆圈表示。这里展示的是特定情况，其中，ω=02mm，r_0=1mm，a=0.4。

资金来源

本研究得到浙江省自然科学基金（项目编号：LQ23A040012）、浙江理工大学科学基金（项目编号：22062025-Y）以及国家自然科学基金委员会（项目编号：61975047）的资助。

披露事项

作者声明，与本文相关的利益冲突。

参考文献

1. H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M. V. Berry, M. R. Dennis, D. L. Andrews, M. Mansuripur, C. Denz, C. Alpmann, P. Banzer, T. Bauer, E. Karimi, L. Marrucci, M. Padgett, M. Ritsch-Marte, N. M. Litchinitser, N. P. Bigelow, C. Rosales-Guzmán, A. Belmonte, J. P. Torres, T. W. Neely, M. Baker, R. Gordon, A. B. Stilgoe, J. Romero, A. G. White, R. Fickler, A.E.Willner, G.Xie, B. McMorran, and A. M. Weiner, 《光学杂志》**19**, 013001 (2017). 2. Y. Shen and C. Rosales-Guzmán, 《激光与光子学评论》 **n/a**, 2100533 (2022).

3. C. Rosales-Guzmán, B. Ndagano, and A. Forbes, 《光学杂志》 **20**, 123001 (2018). 4. C. Rosales-Guzmán, X.-B. Hu, V. Rodríguez-Fajardo, R. I. Hernandez- Aranda, A. Forbes, and B. Perez-Garcia, 《光学杂志》 **23**, 034004 (2021). 5. B. Zhao, V. Rodríguez-Fajardo, X.-B. Hu, R. I. Hernandez-Aranda, B. Perez-Garcia, and C. Rosales-Guzmán, 纳米光子学.**11**, 681 (2022). 6. Q. Zhan, 《光学与光子学进展》 **1**, 1 (2009). 7. X.-B. Hu, B. Zhao, Z.-H. Zhu, W. Gao, and C. Rosales-Guzmán, 《光学快报》 **44**, 3070 (2019). 8. P. Li, B. Wang, and X. Zhang, 《光学快讯》 **24**, 15143 (2016). 9. Y. Yang, Y. Ren, M. Chen, Y. Arita, and C. Rosales-Guzmán, 《光子学进展》**3** (2021). 10. B. Ndagano, B. Perez-Garcia, F. S. Roux, M. McLaren, C. Rosales- Guzmán, Y. Zhang, O. Mouane, R. I. Hernandez-Aranda, T. Konrad, and A. Forbes, 《自然·物理》**13**, 397 (2017). 11. N. Bhebhe, P. A. C. Williams, C. Rosales-Guzmán, V. Rodriguez- Fajardo, and A. Forbes, 《科学报告》 **8**, 17387 (2018). 12. Y. Zhao and J. Wang, 《光学快报》 **40**, 4843 (2015). 13. B. Ndagano, I. Nape, M. A. Cox, C. Rosales-Guzmán, and A. Forbes, 《光波技术杂志》**36**, 292 (2018). 14. R. J. C. Spreeuw, 《物理学基础》 **28**, 361 (1998). 15. E. Karimi and R. W. Boyd, Science. **350**, 1172 (2015). 16. E. Toninelli, B. Ndagano, A. Vallés, B. Sephton, I. Nape, A. Ambrosio, F. Capasso, M. J. Padgett, and A. Forbes, 《光学与光子学进展》 **11**, 67 (2019). 17. T. Konrad and A. Forbes, Contemp. Phys. pp. 1–22 (2019). 18. S. Chávez-Cerda, J. R. Moya-Cessa, and H. M. Moya-Cessa, 《美国光学学会杂志B辑》**24**, 404 (2007). 19. F. Töppel, A. Aiello, C. Marquardt, E. Giacobino, and G. Leuchs, 《新物理学杂志》 **16**, 073019 (2014). 20. S. Berg-Johansen, F. Töppel, B. Stiller, P. Banzer, M. Ornigotti, E. Gia- cobino, G. Leuchs, A. Aiello, and C. Marquardt, 《光学》.**2**, 864 (2015). 21. A. Forbes, A. Aiello, and B. Ndagano, “经典纠缠光”, 载于《光学进展》,(Elsevier Ltd., 2019), pp. 99–153. 22. I. Moreno, J. A. Davis, M. M. Sánchez-López, K. Badham, and D. M. Cottrell, 《光学快报》**40**, 5451 (2015). 23. S. Fu, S. Zhang, and C. Gao, Sci. Reports **6**, 30765 (2016). 24. P. Li, Y. Zhang, S. Liu, H. Cheng, L. Han, D. Wu, and J. Zhao, 《光学快讯》**25**, 5821 (2017). 25. P. Li, Y. Zhang, S. Liu, L. Han, H. Cheng, F. Yu, and J. Zhao, 《光学快报》 **41**, 4811 (2016). 26. E. Otte, C. Rosales-Guzmán, B. Ndagano, C. Denz, and A. Forbes, 《光：科学与应用》**7**, 18009 (2018). 27. J. A. Davis, I. Moreno, K. Badham, M. M. Sánchez-López, and D. M. Cottrell, 《光学快报》**41**, 2270 (2016). 28. R.-Y. Zhong, Z.-H. Zhu, H.-J. Wu, C. Rosales-Guzmán, S.-W. Song, and B.-S. Shi, 《物理评论A辑》**103**, 053520 (2021). 29. P. Li, D. Wu, Y. Zhang, S. Liu, Y. Li, S. Qi, and J. Zhao, 《光子学研究》**6**, 756 (2018). 30. X.-B. Hu, B. Perez-Garcia, V. Rodríguez-Fajardo, R. I. Hernandez- Aranda, A. Forbes, and C. Rosales-Guzmán, 《光子学研究》 **9**, 439 (2021). 31. N. K. Efremidis and D. N. Christodoulides, 《光学快报》 **35**, 4045 (2010). 32. B. Chen, C. Chen, X. Peng, Y. Peng, M. Zhou, and D. Deng, 《光学快讯》**23**, 19288 (2015). 33. X.-B. Hu, B. Zhao, R.-P. Chen, and C. Rosales-Guzmán, Sci. Reports**12**, 18274 (2022). 34. S. Liu, P. Li, Y. Zhang, X. Gan, M. Wang, and J. Zhao, Sci. Reports **6**, 20774 (2016). 35. E. J. Galvez, S. Khadka, W. H. Schubert, and S. Nomoto, 《应用光学》 **51**, 2925 (2012). 36. E. J. Galvez, 空间偏振可变光束 (Wiley- Blackwell, 2015), chap. 3, pp. 61–76. 37. B.Zhao, X.-B. Hu, V.Rodríguez-Fajardo, Z.-H. Zhu, W. Gao, A. Forbes, and C. Rosales-Guzmán, 《光学快讯》 **27**, 31087 (2019). 38. Y. Jiang, S. Zhao, W. Yu, and X. Zhu, 《美国光学学会杂志A辑》**35**, 890 (2018).