

专题: 华南师范大学建校暨物理学科建立 90 周年

小型化涡旋光模式解复用器: 原理、制备及应用*

杨鑫宇¹⁾²⁾ 叶华朋^{1)2)†} 李佩芸²⁾ 廖鹤麟²⁾ 袁冬^{1)2)‡} 周国富¹⁾²⁾

1) (华南师范大学, 响应型材料与器件集成国际联合实验室, 国家绿色光电国际研究中心, 广州 510006)

2) (华南师范大学, 华南先进光电子研究院, 广东省光信息材料与技术重点实验室, 彩色动态电子纸显示技术研究所, 广州 510006)

(2023 年 9 月 19 日收到; 2023 年 10 月 7 日收到修改稿)

涡旋光因其具有光学轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 而在近二十年倍受关注. 由于具有不同 OAM 的涡旋光相互正交, 涡旋光在光通信领域展现了巨大的潜力, 为未来实现高速、大容量的光通信技术提供了潜在的解决方案. 本文旨在介绍涡旋光 OAM 模式解复用技术的基本原理、小型化器件加工方法和在光通信领域的新兴应用. 首先, 回顾 OAM 模式解复用工作原理的发展历程; 随后, 针对涡旋光 OAM 模式解复用, 将介绍多种典型的小型化器件制备方法; 最后探讨基于轨道角动量的涡旋光模式解复用在通信领域中的新兴应用, 并对 OAM 模式解复用的未来发展趋势及前景进行了深入分析和展望.

关键词: 涡旋光, 轨道角动量, 大容量光通信, 解复用, 小型化光子器件**PACS:** 42.79.Sz, 42.79.-e, 42.50.Tx, 85.60.-q**DOI:** 10.7498/aps.72.20231521

1 引言

光子具有多个自由度, 包括频率/波长、时间、复振幅 (振幅、相位)、偏振和空间结构, 操纵光子的这些物理维度可以实现光相关应用的多样性^[1-3]. 除了传统上对频率、时间、复振幅和偏振的关注之外, 另一个已知的光子的物理维度——空间结构也受到越来越多的关注^[4,5]. 1992 年, Allen 等^[6-8]指出光场的螺旋相位结构与光子的光学轨道角动量 (orbital angular momentum, OAM) 之间存在关联. 涡旋光是具有螺旋型等相位面的光束, 相位分布为 $\exp(i l \varphi)$, 其中 l 为轨道角动量量子数, 也被称为拓扑电荷数, 表征了涡旋光束中每一个光子所携带的轨道角动量的大小 $l\hbar$ (\hbar 是普朗克常数除以 2π), φ 为方位角坐标. 空间结构光领域的进展不仅拓宽了光学研究的范畴, 还为各种应用

领域带来了新的机遇和挑战, 包括量子信息编码、光学操纵、光学超分辨成像、光学测量以及天文学等^[9-17]. 特别地, 由于涡旋光束具有的所有 OAM 模式都是正交的, 理论上存在无穷多个本征态, 这种无限制的额外自由度给了光一个潜在的非约束和相互正交的状态空间, 因此可以被利用来提高各种光通信系统的信息容量^[18,19]. 因为不同模式之间相互正交互不干扰, OAM 复用光通信技术的通信容量已远超传统方案, 突破了 Tbit 量级, 从而可以提高光路的频谱效率和信息容量, 可以作为多路复用器应用于光通信中^[20-23].

涡旋光的生成和涡旋光解复用是涡旋光应用开发的关键所在. 涡旋光束的产生方法包括光学元件的设计, 以及光场调控技术的应用. 到目前为止, 研究人员提出了各种利用光束转换器进行自旋-轨道角动量转换产生涡旋光束的方法^[24]. 常见的方法包括螺旋相位板法^[25]、计算全息法^[26]、模式

* 国家自然科学基金 (批准号: 61805087)、广东省普通高校重点领域专项 (批准号: 2021ZDZX1048)、广东省光信息材料与技术重点实验室 (批准号: 2017B030301007) 和国家绿色光电子国际联合研究中心 (批准号: 2016B01018) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yehp@m.scnu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: yuandong@scnu.edu.cn

转换法^[8]、超表面^[27,28]、空间光调制器法^[29,30]和液晶q片^[31]。除了光学涡旋,涡旋场的研究对象也逐渐扩展到其他领域,如电子涡旋、太赫兹涡旋和声学涡旋^[32–37]。涡旋光束的探测手段主要包括干涉法和衍射法等,目前存在多种方案可用于测量拓扑荷,包括圆形孔径衍射、三角孔径衍射、同轴干涉等方法^[38–40]。通过观察远场衍射光斑阵列和干涉条纹,可以推断出涡旋光的轨道角动量大小和正负方向。然而,这些方法仅适用于探测单一 OAM 模式的涡旋光束,不适用于多个 OAM 模式叠加的涡旋光束。对于多个 OAM 模式叠加的光束,以及需要灵活、高精度测量的情况,这些方法将失效。因此,在实现多个 OAM 模式叠加光束和高精度测量时,需要采用其他更复杂的技术和方法。OAM 解复用器是 OAM 通信系统中的核心器件之一,其主要功能是对共轴传输的不同 OAM 模式在空间上实现有效分离,使得不同模式携带的信息可以互不干扰地被处理和探测。迄今为止,研究者已经提出了多种有效的方法对具有不同拓扑电荷值的涡旋光束进行解复用,如基于马赫-曾德干涉仪^[41]的干涉测量系统和使用衍射光学元件(如定制相位元件^[42–44])的各种方法等。

本文综述了基于涡旋光 OAM 模式解复用领域的研究,首先简述了涡旋光模式解复用原理的发展历程,从早期的干涉法到目前广泛采用的坐标转换方法;随后,针对涡旋光模式解复用,介绍了多种典型的小型化器件制备方法,如光栅、超表面和液晶器件等,用于实现多个 OAM 模式的分离和解复用;在进一步讨论中,探讨了基于轨道角动量的涡旋光解复用在模式复用通信领域中的潜在应用;最后,对涡旋光 OAM 模式解复用技术面临的一些挑战和未来的应用方向进行了简要总结和展望。

2 涡旋光模式解复用的原理

随着无线光通信的迅速发展,传统的调制和复用技术难以满足未来对大容量、高速率和高保密性通信的需求。然而,轨道角动量复用通信技术为无线光通信带来了新的可能性,可以实现多维度的轨道角动量复用通信系统,从而提升通信带宽。涡旋光 OAM 解复用器是 OAM 通信系统中的核心器件之一,其主要功能是对共轴传输的不同 OAM 模式在空间上实现有效分离,实现 OAM 模式的识别、

分选等。涡旋光 OAM 模式解复用的目标是通过设计衍射光学元件,实现涡旋光 OAM 分量在空间上的分离。

2.1 干涉法

过去的研究表明,利用 $\exp(i l \varphi)$ 光束及其镜像进行干涉可以生成具有 $2l$ 个径向辐条的干涉图,从而测量携带相同模式多光子的光束的 OAM。虽然这种技术可以区分多种状态,但无法测量单个光子的状态,因为这需要多个光子才能形成完整的干涉图案^[45]。2002 年,Leach 等^[41]提出了一种利用马赫-曾德干涉仪的方法来分类单光子的 OAM,如图 1(a) 所示。他们在干涉装置中引入道威棱镜,通过调整道威棱镜的旋转角度,将具有不同阶数的涡旋光束传播到不同的输出端口,实现 OAM 模式的分类。具体而言,通过调整旋转角度,可以使相移呈现 $l\alpha$ 的形式。对于特定的 l 和 α 组合,旋转后的光束可以与原始光束同相或异相。当将这种旋转结合到双光束干涉仪的臂中时,两个臂之间的相移将依赖于 l 值。因此,通过设置单级 MZ 干涉装置的旋转角度 ($\alpha = \pi$),可以在两个不同的端口实现奇数和偶数阶拓扑电荷数 l 的涡旋光束的分选。如图 1(b) 所示,当级联多个干涉装置产生更多分选通道时,对于奇数阶拓扑电荷数 l 并没有合适的旋转角度进行分选,因此需要通过全息图法将奇数阶拓扑电荷数 l 转为偶数阶拓扑电荷数 $l + \Delta l$ 进行进一步分选。通过干涉进行单个光子 OAM 的分选方法在原理上是 100% 有效的,仅受到组件效率的限制。为了提高测量涡旋光整数阶拓扑电荷值的阶数,2015 年,Martelli 等^[46]利用柱面透镜的像变换特性,将干涉仪装置中的道威棱镜替换为柱透镜,使用改进的马赫-曾德干涉仪测量拉盖尔-高斯涡旋光束的高阶拓扑电荷阶数高达 90。为了测试模式间的串扰,他们通过测量输入端相应的单个 OAM 模式的两个干涉仪输出端的功率分配比来进行实验。实验结果显示,在 OAM 模式为 $l = 0$ 时,获得了 -10.3 dB 的串扰,而在 $l = 1$ 时,获得了 -8.0 dB 的串扰。

在涡旋光 OAM 解复用领域,干涉测量方法被广泛应用于多个 OAM 状态的分类。然而,这种方法的分选装置需要进行多个阶段的分类,其中需要 $(n - 1)$ 个干涉仪和 $(2n - 2)$ 个臂来实现对 n 个不同的 OAM 状态的分选。随着待分选的 OAM 状态

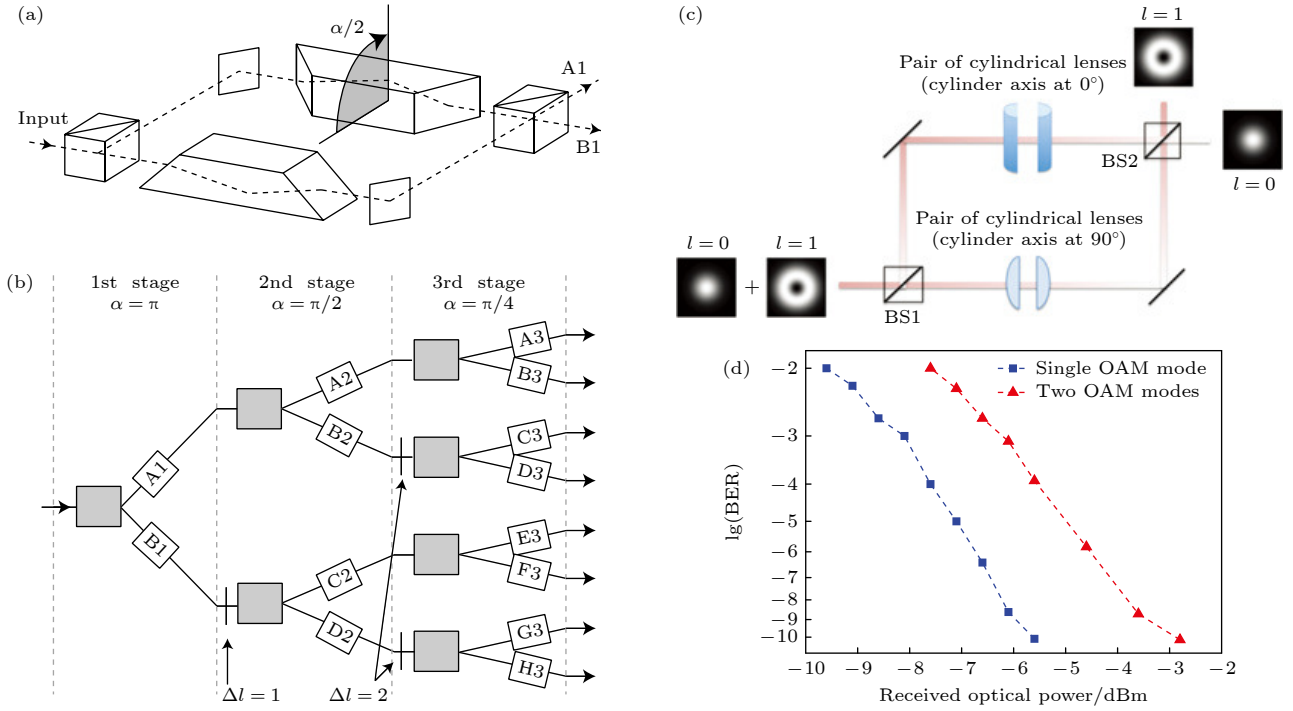


图 1 基于马赫-曾德干涉仪的 OAM 分选方案 (a) OAM 分类器的第 1 阶段; (b) OAM 分类器的前 3 个阶段, 每个灰色框代表 (a) 图所示的干涉仪^[41]; (c) 基于柱面透镜干涉的 OAM 多路复用器/解复用器方案; (d) $l=0$ 时, BER 的测量值随 OAM 模式解复用后接收的光功率的变化规律, 正方形为单个 OAM 模式, 不受 $l=1$ 模式串扰, 三角形为两个 OAM 模式, 受 $l=1$ 模式串扰^[46]

Fig. 1. The schematic of the OAM sorter based on Mach-Zehnder interferometer: (a) The first stage of the OAM sorter; (b) the first three stages of the OAM sorter, the gray boxes in each stage represent the interferometer shown in Fig. 1(a)^[41]; (c) OAM multiplexer/demultiplexer based on interference via cylindrical lens; (d) BER values measured against the received optical power after OAM demultiplexing for mode $l=0$, line denoted with triangles represents two OAM modes with crosstalk because of mode $l=1$, while line denoted with squares represents single OAM mode without crosstalk^[46].

数量的增加, 系统的复杂度和信号损失也会急剧增加. 系统的复杂性和信号损失限制了其在实际应用中的可扩展性. 因此, 进一步的研究将致力于寻找更简化和高效的分选装置, 以提高涡旋光 OAM 解复用技术的性能和可靠性.

2.2 坐标转换法

2.2.1 对数-极坐标转换法及改进方法

2.2.1.1 对数-极坐标转换法

由于马赫-曾德干涉仪存在系统较复杂和耗损随着模式数的增大而增大的可扩展性问题, 无法满足实际光通信系统的小型化要求. 近年来, 基于光学坐标变换的分选系统被认为是一种应用前景广泛的有效解决方案^[47–49].

涡旋光束具有螺旋相位结构, 呈现出一个特征方位角相位项 $\exp(i l \varphi)$. 涡旋光的螺旋相位大小和方向随着位置的变化而发生变化, 因此涡旋光的螺旋相位呈现出一个空间分布的角向梯度. 涡旋光的

角向相位梯度与光束的轨道角动量大小和方向密切相关. 具体而言, 角动量的大小与涡旋光的角量子数 l 有关, 而方向则受到光束旋转方向和偏振方向的影响. 在光束传播过程中, 涡旋光的角向相位梯度会随着传播距离的增加而增大. 通过将涡旋光束的螺旋相位梯度转换为横向相位梯度, 然后使用透镜将经过转换后具有不同横向相位梯度的平面波聚焦到不同的位置的方式, 可以将不同 OAM 模式的光束在空间位置上被有效地分离出来, 实现 OAM 模式的高效分选.

基于上述想法, 2010 年, Berkhout 等^[50]首次提出了利用对数-极坐标转换方法进行涡旋光解复用的方法, 如图 2(a) 所示. 他们通过使用两个定制的光学元件将笛卡尔坐标转换为对数极坐标, 成功地将携带 OAM 状态的螺旋相位光束转换为具有横向相位梯度的高斯光束. 接下来, 透镜将每个输入的 OAM 状态聚焦到不同的横向位置, 实现了 OAM 模式的分选. 在这种方法中, 关键的光学元件是将输入光束的方位角位置转换为输出光束的

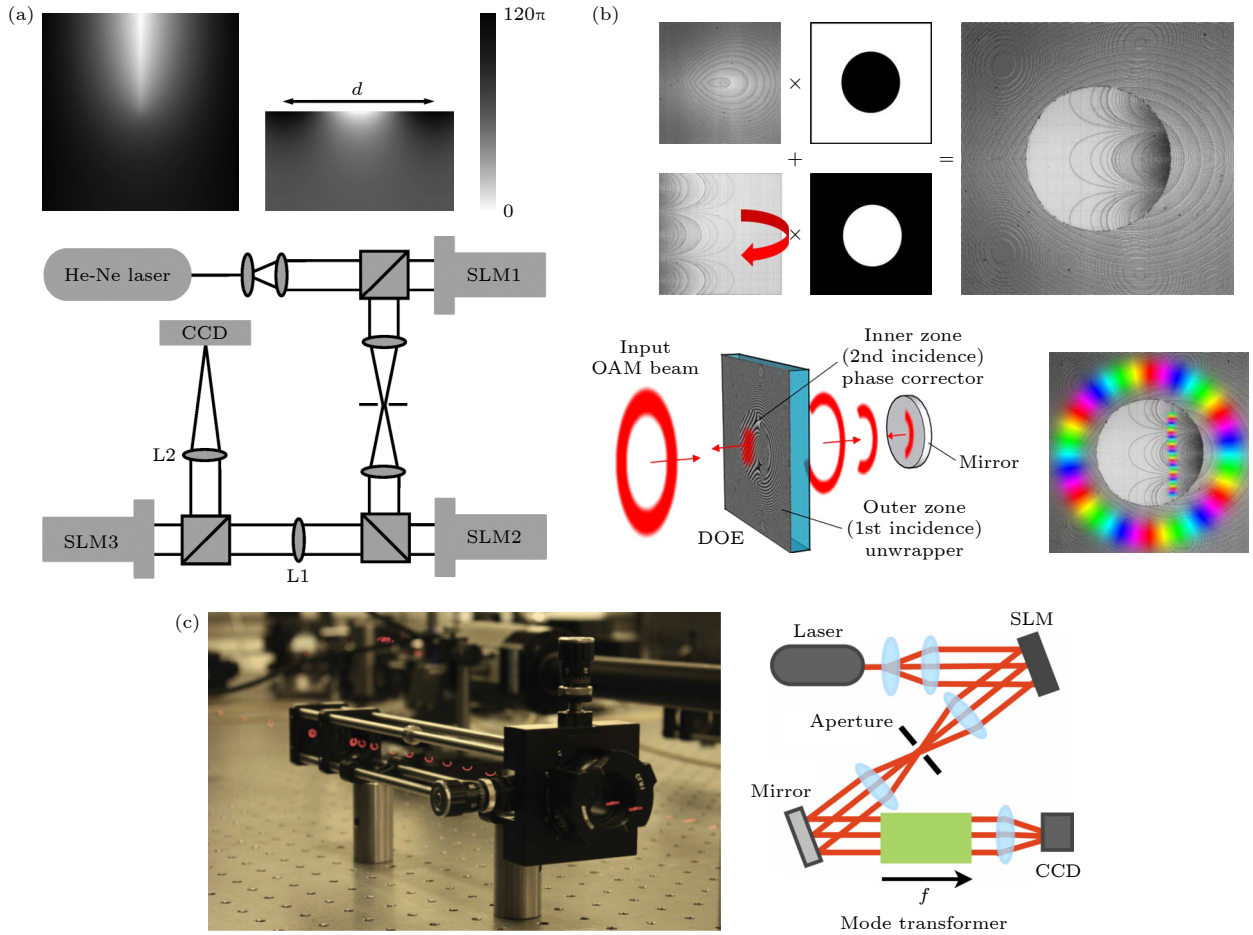


图 2 利用对数-极坐标转换法实现 OAM 模式分离的原理 (a) 对数-极坐标转换法实验装置图^[50]; (b) 基于对数-极坐标变换的紧凑 OAM 模式解复用方案^[52]; (c) 使用折射光学元件将 OAM 状态转换为横向动量状态的光路示意图^[51]

Fig. 2. The principle of realizing OAM mode separation based on logarithmic-polar coordinate transformation method: (a) The schematic of the experimental setup based on log-polar coordinate transformation method^[50]; (b) the scheme of compact OAM mode demultiplexer based on logarithmic-polar coordinate transformation method^[52]; (c) the optical path of converting the OAM state into a transverse momentum state using refractive optical elements^[51].

横向位置, 即将螺旋相位光束转换为横向相位梯度的光学元件, 这相当于将包含同心圆的输入图像转换为包含平行线的输出图像。

然而, 这种转换会引入光程长度的变化, 导致需要对相位失真进行校正。因此, 转换系统包括两个定制的光学元件: 一个用于执行图像转换的解复用器件, 另一个位于解复用器件的傅立叶平面中, 用于校正相位失真的相位矫正器件。解复用器件执行映射 $(x, y) \rightarrow (u, v)$, 其中 (x, y) 和 (u, v) 分别表示输入和输出平面中的笛卡尔坐标系, 而相位矫正器件则对前一步骤中引入的偏差进行相位校正。然而, 由于空间光调制器 (SLM) 的衍射效率有限, 大约有四分之三的输入光束损失, 导致相邻 OAM 模式的分离度受到衍射的限制。

为了改善这一问题, 2012 年, Lavery 等^[51] 改

进了所需的实验装置, 将之前使用的衍射光学元件替换为折射光学元件 (图 2(c)), 实验证明光学元件能够在单光子水平上分离输入涡旋光的 OAM 状态。这项改进提高了携带 OAM 的光束分离效率, 最终测得携带 OAM 的光束分离到探测器上的离散区域效率为 85%。这种方法可用于生成和检测量子通信或量子密钥分配系统中使用的 OAM 状态, 从而增加可编码到单个光子上的信息量。

由于对数-极坐标转换法的解复用器被分为两个相位组件, 在实际过程中对准要求非常严格。为了简化两个相位元件的对准过程, 提高光学体系结构的紧凑性和小型化水平, 研究人员在器件集成、设计优化和采用新型材料等方面进行了深入而系统的研究^[52–56]。2017 年, Ruffato 等^[52] 提出了一种基于对数-极坐标转换法的紧凑型 OAM 模式解复

用器方案(图 2(b)), 将这种解复用技术应用于完美旋涡光的 OAM 分选, 并通过将两个光学元件集成到一个衍射光学元件中, 进一步提高了器件的微型化水平. 具体而言, 解复用器件分为外部解复用区和内部相位矫正区, 涡旋光束首先通过外部展开区(而内部相位矫正区的输入强度为零)进行解码, 然后光束被反射镜反射并照亮解复用器件的内部相位矫正区域. 通过自动设计这两个元件的同轴性、对准性和平行性, 有利于简化对准操作, 并实现了器件的小型化和集成化. 实验结果显示, 当 $\Delta l = 4$ 时, 可以有效地分离远场光斑, 并且降低串扰值低于 -15 dB, 达到高达 96% 的分离效率. 最近, Li 等^[56] 验证了一种新型的光子总角动量(total angular momentum, TAM) 调制器, 实现了 TAM 的选择性提取. 在该工作中, 他们采用对数-极坐标转换的方法设计了液晶衍射元件, 证实了其工作性能稳定并且 OAM 模式分离的串扰很小. 这表明该紧凑型模式解复用器方案能够在高效的同时实现较低的串扰和高分离效率.

2.2.1.2 模式复制法

使用对数-极坐标变换进行解复用是一种简单高效的方法, 但其分辨率受到模式串扰的限制. 由于方位角变量在该数学变换中的周期局限于 2π , 无法完全对应于螺旋相位, 导致解复用结果存在显著重叠, 从而限制了识别分辨率, 并在分离的通道之间产生串扰. 这是该方法固有的局限性, 无法通过放大变换后的平面波来避免. 放大平面波会减小其波前的倾斜角, 虽然放大后的平面波可以聚焦到更小的点上, 但这些点之间的间距也相应减小, 导致重叠程度没有改善.

为了改善这种情况, 2013 年, Mirhosseini 等^[57] 受到 Berkhout 等^[50,51] 的启发, 提出了一种基于对数-极坐标变换的“模式复制”方法, 并在之后的工作中通过对轨道角动量的弱测量和对角位置的强测量, 探索其高纬度状态的检测潜力, 实现了在轨道角动量的离散基中高维状态向量的实际直接测量^[58], 实验装置如图 3(a) 所示. 该方法的原理是将每个 OAM 模式映射到倾斜平面波前的多个副本. 在这种情况下, 变换光束的宽度增大, 而倾斜角度保持不变. 需要注意的是, 截断平面波的相邻副本之间的周期性相位跳跃等于 2π 的整数倍, 因此产生的光束具有平滑的波前. 这些转换后的模式可以聚焦到一系列点上, 这些点的间距与之前相同, 但宽度更窄, 实现了更高分辨率的分选.

前相同, 但宽度更窄, 实现了更高分辨率的分选. Malik 等^[58] 利用这种方法测量了量子数为 $l = -12$ 到 $l = 12$ 的 OAM 模式, 并计算出正确检测到 OAM 模式的平均概率为 $92.1\% \pm 0.7\%$. 这表明模式复制方法能够提高解复用的分辨率和减少串扰效应. 这一研究为光涡旋解复用技术的发展提供了新的思路, 通过模式复制的方法克服了对数-极坐标变换的局限性, 实现了更高的解复用性能.

2.2.1.3 螺旋-极坐标转换法

值得注意的是, 采用增加相位的方式可能会引入大量冗余数值优化, 并需要额外的相位元件来实现. 为了克服这些问题, 2018 年, Wen 等^[59] 提出了一种更普遍适用的光学变换方案, 称为螺旋坐标转换, 如图 3(b) 所示. 与之前的对数极坐标变换不同, 螺旋坐标转换沿着螺旋线路径对光场的波前进行分解, 实现了从 OAM 模式到倾斜平面波模式的转换, 进而实现对不同的 OAM 模式的分离.

螺旋坐标转换通过沿着螺旋线路径提取更多的相位信息, 可以实现对 OAM 光场的更高分辨率测量. 相比之前的变换方法, 螺旋变换能有效地克服相邻解复用模式在空间上部分重叠引起的串扰问题. 这意味着螺旋坐标转换具有更好的解复用性能和分辨率, 能够更准确地分离和识别不同的 OAM 模式. 螺旋坐标转换的提出为光涡旋解复用技术的进一步发展提供了新的途径. 该方法不仅提高了解复用性能, 还减少了对额外相位元件的依赖, 具有更好的普适性和实用性.

2.2.2 多平面坐标转换法

尽管坐标转换方案在紧凑性和高分辨率方面有了很大的改进, 但是它的模式容量仍然存在限制. 上述方案报道的解复用 OAM 模式数量为几个或数十个, 无法满足大规模大容量光通信系统的需求. 为了解决上述挑战, 研究人员提出了一种名为多平面光转换器(multi-plane light conversion, MPLC)的方案, 实现了数百个 OAM 模式的空间解复用. MPLC 是一组以一定距离依次连接的定制相位调制板, 由于 MPLC 具有较大的模式容量, 研究人员将其应用于涡旋光场的复用与解复用技术, 使得多个 OAM 模式可以同时传输并实现高效的解复用过程^[60–65].

2019 年, Fontaine 等^[60] 提出了一种特殊的变换方法, 用于将笛卡尔坐标系中的点 (x, y) 转换为

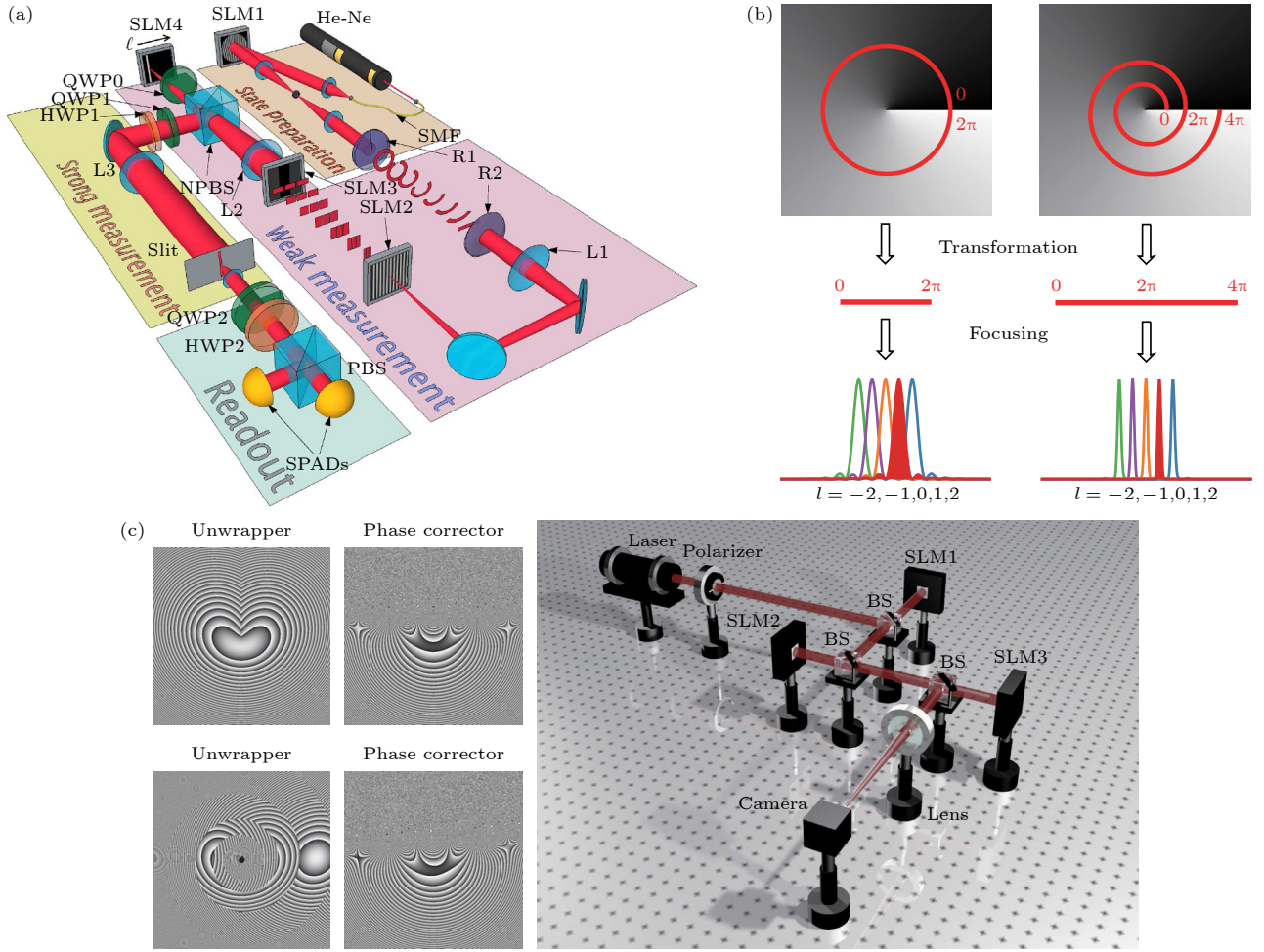


图 3 (a) 模式复制方案分选的光路图^[58]; (b) 螺旋极坐标转换原理与对数极坐标转换原理的对比示意图; (c) 螺旋极坐标转换原理的分选光路图^[59]

Fig. 3. (a) The schematic of the experimental setup of the mode sorter based on refractive beam-copying method^[58]; (b) comparison between the principle of spiral-polar coordinate transformation method and the principle of the log-polar coordinate transformation method; (c) the diagram of the optical path based on spiral-polar coordinate transformation method^[59].

Hermite-Gaussian (HG) 模式中的笛卡尔指数 (m, n), 通过使用少量的等间距相位平面就可以实现. 如图 4(a) 所示, 这种变换方法利用了多平面光转换设备, 研究人员成功地演示了超过 325 种模式的分离. MPLC 设备具有高度复杂的相位变换能力, 它可以将输入光场转换为包含多个光学模式的输出光场. 通过优化相位分布和光学元件的设计, MPLC 设备能够高效地实现 OAM 模式的解复用, 并且具备较大的模式容量. 这项研究的结果表明, 利用特殊变换方法和 MPLC 设备可以实现更大规模的 OAM 模式解复用. 此类研究成果对实现高容量的光通信系统具有重要意义, 它为进一步提升光通信的数据传输速率和容量提供了新的途径. 通过采用特殊变换方法和 MPLC 设备, 可以有效地利用 OAM 模式的多样性和大容量特性, 为光通信领

域带来更加广阔的发展前景. 最近, 研究者也提出了一种光学衍射神经网络, 结合深度学习和光场调制功能, 用于调制 OAM 模式, 显示出出色的信息处理能力^[67–72]. 然而, 这些方法主要集中在对单个涡旋光束的模式转换.

2.3 准小波变换法

为了解决坐标变换方案输出重叠导致分选后相邻 OAM 模式之间的严重串扰问题, 2023 年, Cao 等^[66] 提出了一种新颖独特的方法, 称为准小波变换法, 该方法比多平面光转换方法所需的相平面更少. 准小波变换法的工作原理是将输入平面划分为多个同心环, 并将这些同心环转换为多个倾斜平面波, 然后将它们排列成一条直线, 如图 4(b) 所示. 通过这个操作, 可以得到 N 倍周期的倾斜平面

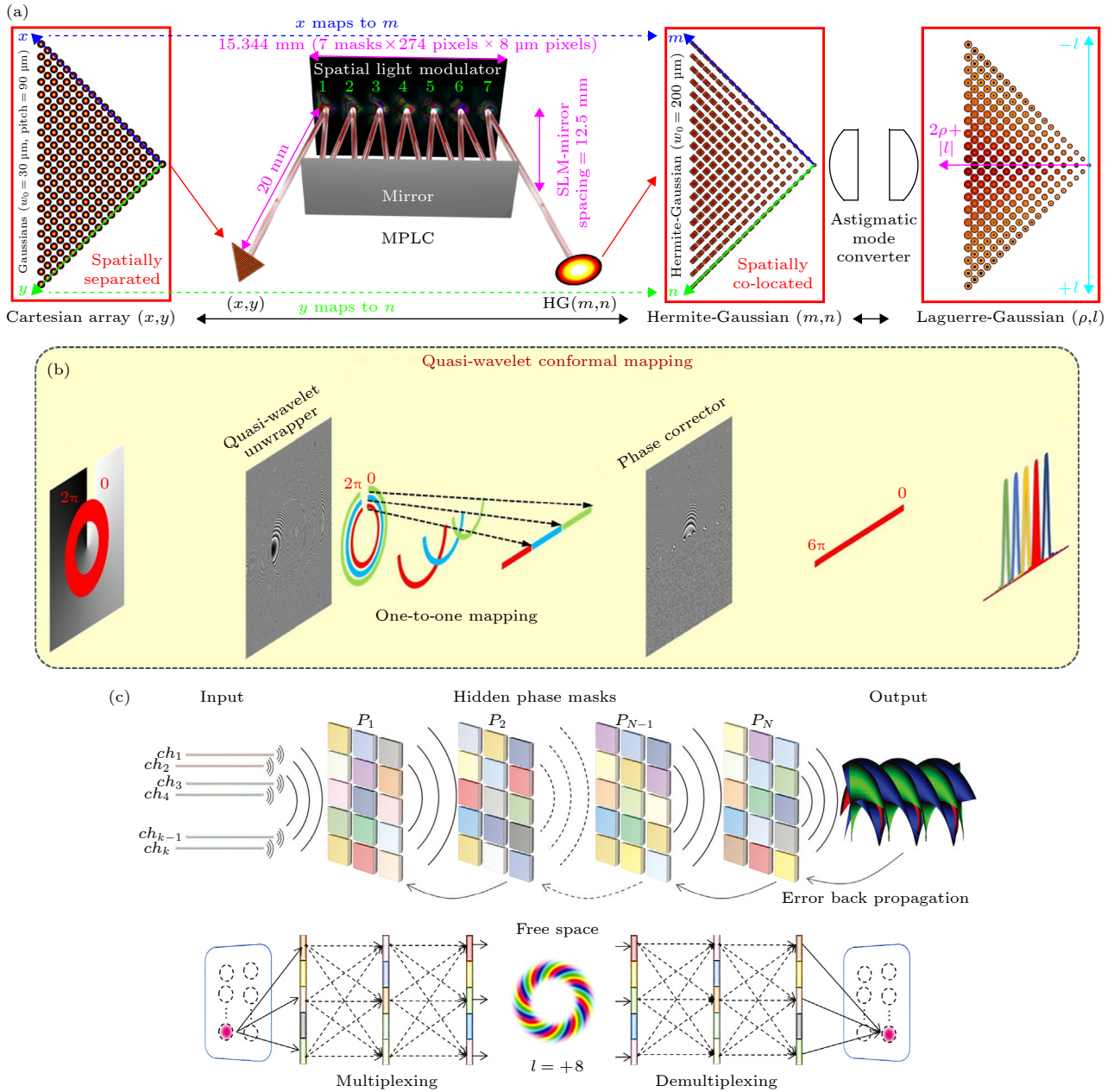


图 4 (a) 用于 HG/LG 叠加态分解的多平面光转换器件^[60]; (b) 准小波共形映射示意图^[66]; (c) 基于光衍射神经网络的宽带、低串扰和大信道 OAM 模式解复用^[60]

Fig. 4. (a) Multi-plane optical converter for HG/LG superposition state decomposition^[60]; (b) the schematic of quasi-wavelet conformal mapping^[66]; (c) low crosstalk OAM mode demultiplexer based on optical diffraction neural network^[60].

波, 其中 N 取决于划分的同心环的数量. 倾斜平面波具有周期性延伸和增大长度的特性, 因此能够减少重叠和模式串扰.

与先前提出的极坐标转换法中的一对多映射不同, 准小波共形映射方法实际上是一对一的共形映射. 这意味着每个输入 OAM 模式都被映射到一个唯一的倾斜平面波, 避免了多个模式之间的重叠. 实验表明, 准小波变换法可以实现多达 15 个通道 (OAM-7 到 OAM+7) 的 OAM 解复用, 并且

模式间串扰小于 -12.1 dB . 这种方法的提出为解决 OAM 模式解复用中的串扰问题提供了一种新的有效途径, 并且具有较高的解复用容量和较低的串扰水平.

2.4 基于光衍射神经网络的 OAM 模式解复用

光的波长、时间、偏振和复杂振幅的光通信技术正在接近瓶颈, 而空间维度则相对未被探索. 为

了有效利用光的空间维度，宽带和低串扰的 OAM 模式解复用器件是必不可少的。如图 4(c) 所示，用于 OAM 模式解复用的光学衍射神经网络模型首先通过级联一组相位板来构建^[60]，以该器件的解复用过程为例，右端口输入的同轴涡旋光束通过自由空间衍射和被相位板 P_1 — P_N 调制后，将逐渐转化为分离的涡旋光束阵列。由于这组相位板的结构是通过神经网络来优化设计的，因此可以快速地预测模型结构。得益于光学衍射神经网络模型的大操作自由度，该器件可以支持 16 种 OAM 模式 ($l = \pm 1$ — ± 8)，并有可能进一步扩展通道数，实现定制化的宽带、低串扰和大信道 OAM 模式解复用。

基于光学坐标变换的分选系统已经在实验中得到验证,并展示出较高的分类效果和稳定性。相对于干涉测量方法,基于光学坐标变换的分选系统具有许多优势。首先,它可以减少光学系统的复杂度和体积,仅需少量的光学元件便可实现分类,而无需使用数个干涉仪和臂。其次,它可以减小信号损失,因为光学坐标变换不涉及干涉过程,避免了干涉引起的能量损耗。然而,仍然存在一些挑战需要克服,例如光学元件的设计和制备精度、系统的稳定性和可靠性等方面。因此,未来的研究可以集中在优化光学坐标变换分选系统的性能,并探索适用于实际光通信系统的高效设计。此外,基于光衍射神经网络的 OAM 模式解复用通过多层衍射面结构实现了空间维度的解复用,为光通信技术提供了新的维度。

3 涡旋光模式解复用器的制备方法

需要注意的是,之前提到用于产生涡旋光束的无源设备也可以应用于涡旋光解复用. 本节将回顾一些有效的涡旋光解复用方法和设备,这些方法和设备主要基于对涡旋光束的分类或检测,以实现涡旋光的解复用. 涡旋光解复用的方法和装置通常依据以下原理进行设计: 将具有不同拓扑电荷值的涡旋光束传输到不同的空间位置,或将涡旋光束转换为其他容易测量的物理参数. 这些方法为涡旋光的解复用提供了一种可行的途径.

3.1 传统制备方法

在过去的二十年里, 已经开发了一系列技术来制备 OAM 分选器. 使用叉状全息图、液晶 q 片或超

表面可以高精度地分选不同的 OAM 模式, 但通常受到 $1/N$ 的成功率的限制, 其中 N 是涉及分离的 OAM 模式的数量. 基于马赫-曾德尔干涉仪的方案可以实现接近单位的效率来测量 N 态, 但这种方法受到多个分选阶段的复杂性和尺寸的影响.

液晶是一种具有可调控光学性质的材料,可以通过外加电场改变其折射率,从而调制光的相位,实现对 OAM 的分选 [73–75]. 2009 年, Karimi 等 [76] 利用液晶双折射片 (q 片) 的特性提出了一种高效产生和分选具有单位拓扑电荷的涡旋光 OAM 的方法. 如图 5(a) 所示, 装置由四分之一波片, q 片和四分之一波片构成. 实施步骤如下: 首先, 使用波长为 532 nm 的线偏振 TEM_{00} 激光束作为输入光, 通过四分之一波片控制光的偏振状态为左旋或右旋. 然后, 光束通过 q 片转换为涡旋光. 在分选实验中, 研究人员利用空间光调制器和四分之一波片依次创建了四个光子状态 $|L, 2\rangle$, $|L, -2\rangle$, $|R, 2\rangle$, $|R, -2\rangle$. 随后, 这 4 个状态通过 q 片分别变为 $|R, 4\rangle$, $|R, 0\rangle$, $|L, 0\rangle$, $|L, 4\rangle$. 进一步使用四分之一波片, 这些状态又分别转换为 $|H, 4\rangle$, $|H, 0\rangle$, $|V, 0\rangle$, $|V, -4\rangle$. 其中, $|H, 4\rangle$ 和 $|H, 0\rangle$ 透过偏振分束器传输, 而 $|V, 0\rangle$ 和 $|V, -4\rangle$ 将被反射. 由于 q 片的作用, 反射和透射光束中的两个状态具有不同的光子轨道角动量值 ($m = 0$ 和 $m = 4$). 在远场或透镜的焦平面上, 这两个模式可以通过它们不同的径向分布进行分离, 从而将具有 $m = 0$ 的中心光斑和 $m = 4$ 的外环区分开来, 最终成功将所有 4 个初始自旋轨道模式分类为独立的光束. 实验测试结果显示, 当对比度大于 10^3 时, 分选效率为 50%, 当对比度大于 10^6 时, 分选效率为 10%. 然而由于液晶的性能可能受到温度和环境变化的影响, 需要外部稳定控制, 且液晶 q 片的响应速度较慢, 因此利用液晶 q 片作为涡旋光分选器可能不适用于高速通信系统.

叉状全息图是一种常用于制备涡旋光分选器的方法, 通过光的干涉来实现不同涡旋光模式的分选^[77–79]. 2015 年, Lei 等^[22]提出了一种名为达曼光栅的新型解复用光学器件. 如图 5(b) 所, 该器件利用达曼光栅对光信号进行编码和解码, 实现了光学信号的解复用. 具体而言, 通过将具有平面波前的高斯形光束投射到达曼光栅上, 光束经过零级

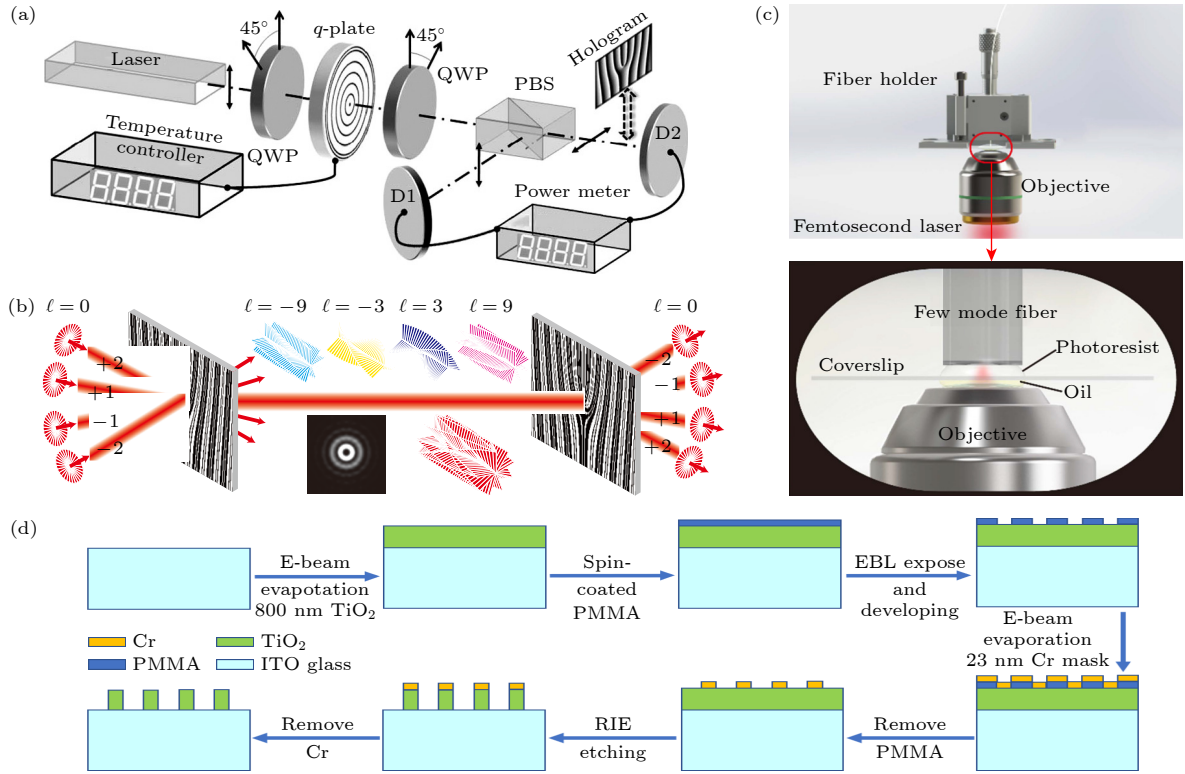


图 5 (a) 光子的 SAM 变化转换为 OAM 的装置示意图 [76]; (b) 基于达曼光栅进行 OAM(解)复用的自由空间光通信示意图 [22]; (c) 使用双光子光刻技术在少模光纤表面上制造涡旋光栅示意图 [80]; (d) 基于电子束刻蚀法制作的超表面流程图 [81]

Fig. 5. (a) The schematic of SAM-OAM mode converter [76]; (b) the schematic of free-space optical communication based on Damman grating for OAM (de)multiplexing [22]; (c) the details of fabricating vortex gratings on the surface of few-mode optical fibers using two-photon lithography [80]; (d) flow chart of producing metasurface based on electron beam etching [81].

衍射后被编码到同轴涡旋光束的不同 OAM 通道中. 在接收端, 通过同样的达曼光栅进行解复用, 将所有的 OAM 信道解码为相应衍射级的高斯光束. 这种达曼光栅方案能够支持 10 个通道的涡旋光束的解复用, 从而实现高达 80/160 Tbit/s 的高速光通信.

研究团队采用紫外光刻技术制造达曼光栅. 他们设计了尺寸为 $5.12 \text{ mm} \times 5.12 \text{ mm}$ 的相位掩模, 具有 $1024 \text{ 像素} \times 1024 \text{ 像素}$ 的高分辨率, 光栅周期尺寸为 $50 \text{ }\mu\text{m}$. 制备过程如下: 首先, 在石英衬底上涂覆了 AR-N4340 光刻胶, 并控制光刻胶厚度为 $1.285 \text{ }\mu\text{m}$; 然后, 经过软烘烤处理后, 使用 365 nm 的紫外波长和 20 mW/cm^2 的曝光剂量, 利用 MJB4 掩模对准仪进行曝光; 曝光完成后, 进行后烘烤和显影处理, 成功制备出所需的达曼光栅结构, 其尺寸和图案与设计一致.

在 2018 年的研究中, Xie 等 [80] 提出了一种集成光纤式的 OAM(解)复用器, 利用在光纤端面制备的涡旋光栅实现了直接的涡旋光 OAM 复用和解复用. 经过 5 km 的少模光纤传输后, 误比特率

测量结果证实了该方案的有效性和可行性. 制备涡旋光栅的光纤端面制作工艺示意图如图 5(c) 所示. 该实验装置解决了在端面上通过双光子光刻进行三维微纳结构制作的困难. 所采用的少模光纤的芯径为 $20 \text{ }\mu\text{m}$, 包层直径为 $125 \text{ }\mu\text{m}$. 光纤和盖玻片被放置在一个支架上, 可以微米级精度地调节切剖面 and 盖玻片之间的距离. 涡旋光栅的写入使用了三维光刻系统, 并且通过计算机控制的样品台精确操控激光焦点相对于光纤端面的位置. 涡旋光栅的模型使用计算机辅助设计软件按照定义的方程进行建模. 随后, 将三维设计转化为与光刻系统控制软件兼容的代码, 光刻系统通过数字写入过程将设计好的结构转移到光刻胶中.

由于光栅的制备过程中涉及特定的角度, 使得该方法对于角度变化非常敏感, 因此在实际应用中需要精密的角度控制. 每个叉状全息图通常只能分选一种涡旋光模式, 对于多个涡旋光模式的分选需要多个全息图, 增加了系统复杂性.

片上集成 OAM 分选对于解决数据流量指数增长所带来的挑战至关重要. 虽然已经取得了一

些成功,但当前的多路分解技术要么会显著降低效率,要么会牺牲系统的紧凑性^[81–87]. 2022 年,Cheng 等^[81]报道了一种在 CMOS 芯片上实现模式分选的超紧凑型 OAM 解复用器. 为了实现分选功能,他们在互补金属氧化物半导体 (CMOS) 相机上集成了 TiO₂ 超表面. 实验测量结果显示,该分选器在拓扑电荷范围为 $m = -3 \sim +3$ 的涡旋光模式分离方面表现出高效率 and 低串扰. 分选器的分离效率达到了 77.3%,串扰水平为 -6.43 dB. 该研究团队采用了以下工艺步骤来制备基于 TiO₂ 纳米棒的超表面 (sub>纳米棒的超表面 (sub>纳米棒的超表面 (sub>纳米棒的超表面 (sub>纳米棒的超表面). 首先,使用电子束蒸发在具有氧化铟锡 (ITO) 涂层的玻璃基底上沉积一定厚度的 TiO₂ 薄膜. 随后旋涂电子束抗蚀胶后,使用电子束光刻技术进行图案制作,在显影后形成反转图案. 接着,使用电子束蒸发沉积一定厚度的铬,并通过去除掉光刻胶来形成铬硬掩膜. 最后,使用等离子刻蚀将光刻图案转移到 TiO₂ 薄膜上,并用 Cr 蚀刻液去除 Cr 掩膜,从而实现 TiO₂ 纳米棒超表面的制作. 整个过程的处理时间为 10 min. 通过优化刻蚀过

[illegible]

基于电子束光刻技术制备的超紧凑尺寸的 OAM 分选器与光纤系统兼容, 电子束刻蚀法的定位精度非常高, 可以实现复杂结构的精确制作. 与一些其他制备技术相比, 电子束刻蚀法的制作速度较慢, 可能不适用于大规模生产, 且制作面积有限, 可能需要多次曝光和刻蚀才能制作大尺寸的器件.

3.2 新兴的制备方法

利用光控取向液晶制作涡旋光分选器是一种常见的方法, 通过设计涡旋结构的光栅图案, 适当调整电场或激光束的参数, 使得不同涡旋光的分量

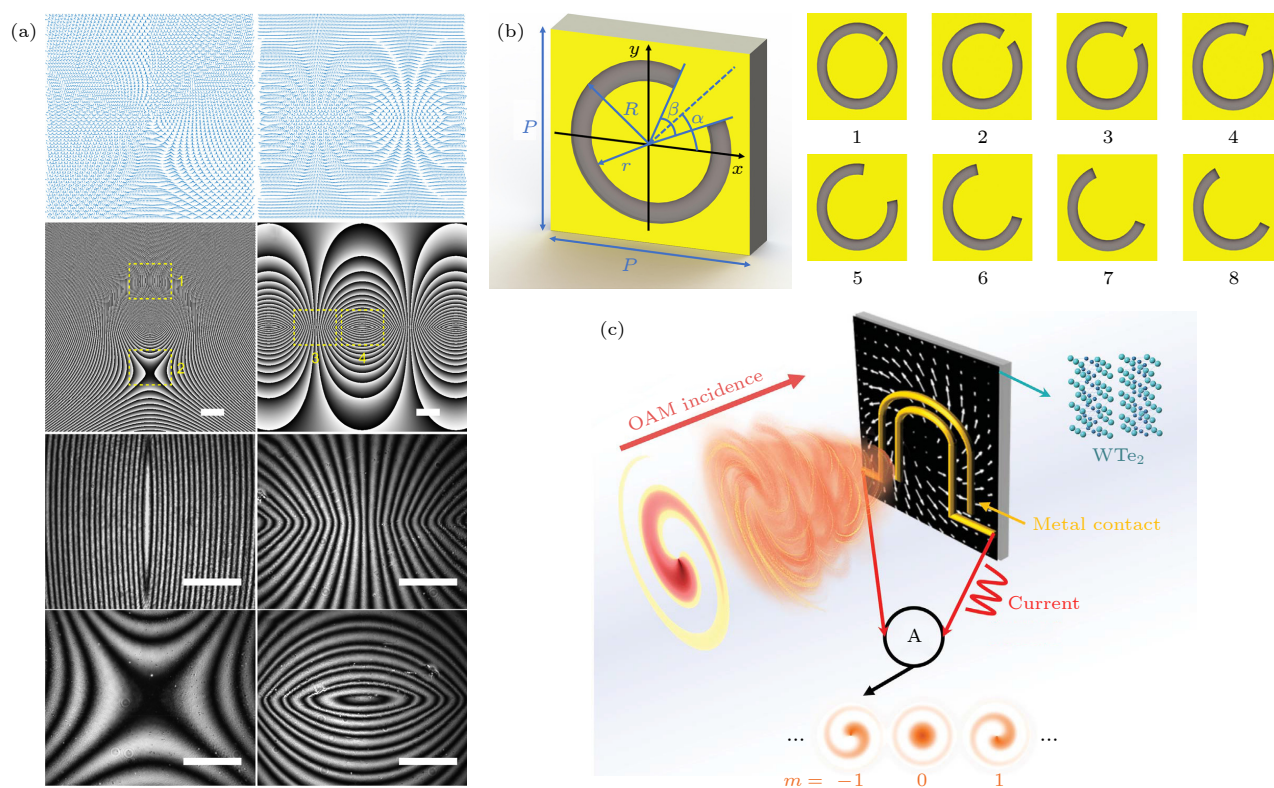


图 6 (a) Pancharatnam-Berry 光学元件器件的相位分布图 [88]; (b) 基于使用单层超表面的太赫兹频段 OAM 复用方案的天线结构示意图 [89]; (c) 携带 OAM 的光束的光电流测量示意图 [90]

Fig. 6. (a) Phase distribution of Pancharatnam-Berry photonic device^[88]; (b) the schematic of the nanoantenna of single-layer metasurface for terahertz OAM multiplexing^[89]; (c) the schematic of the photocurrent measurement for optical beams carrying OAM^[90].

在液晶层中以不同的方式传播, 实现涡旋光的分选. 2018 年, Fang 等^[88]提出了一种创新的圆柱矢量光束多路复用通信方案. 该方案利用了基于光取向液晶制造的 Pancharatnam-Berry 光学元件器件, 通过这些器件可以实现自旋相关的光学几何变换 (图 6(a)). 这种变换能够将圆柱矢量光束从甜甜圈形状转换为两条直线, 从而实现对拓扑电荷值在 -10 — $+10$ 之间的柱矢量光进行分选. 实验结果显示, 该方案具有高达 61.7% 的分选效率.

为了设计和制备 Pancharatnam-Berry 光学元件液晶器件, 该团队采用了基于无掩模动态投影曝光系统的光控取向技术. 首先, 在制备器件之前先对 ITO 玻璃基底进行了超声波和紫外臭氧清洁 (玻璃尺寸为 $1.5\text{ cm} \times 2.0\text{ cm}$). 接下来, 使用磺酸基偶氮染料 SD1 作为取向剂, 并将其旋涂在二甲基甲酰胺上. 经过 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下固化 10 min 后, 该团队将两个玻璃基底组装在一起, 并用环氧胶封装形成间格为 $6\text{ }\mu\text{m}$ 的液晶盒. 填充液晶后, SD1 分子将通过分子间相互作用局部引导液晶分子的取向. 需要注意的是, 由于 SD1 分子具有二色性吸收特性, 并对入射光的偏振态敏感, 当吸收紫外偏振光时, 染料分子发生异构化, 最终趋向于与局部偏振方向垂直, 从而只记录最终的光致取向. 为了将偏振全息图转移到 SD1 层上, 他们使用基于数字微镜阵列 (DMD) 的曝光技术. 经过偏振片和准直系统的紫外偏振光通过透镜到达 DMD 表面, DMD 像素微镜可以通过计算机输入图像进行控制, 使反射的紫外线偏振光中携带曝光图案信息, 最终实现液晶高精度图案化取向.

综合考虑, 光控取向液晶制作涡旋光分选器具有实时可调、高效率 and 紧凑性等优点, 但也存在响应速度有限和对波长敏感等缺点.

近几年, 基于亚波长天线阵列的超表面技术已在各个领域展示了巨大的应用价值. 通过引入突变的相位梯度, 超表面已被广泛应用于光的波前整形. 通过调制电磁波的相位和振幅, 超表面可以很容易地被用于涡旋光的复用和解复用中. Zhao 等^[89]对基于单层超表面的太赫兹波段 OAM 复用进行了理论和实验验证, 他们所设计的器件可以将入射高斯光束调制为 4 个具有不同拓扑电荷数的聚焦涡旋光束, 这意味着该技术可以支持四通道 OAM 复用. 当使用每个单独的涡流光束作为入射光束时, 在焦斑处仅识别和提取一个通道, 即实现

了 OAM 模式解复用. 该器件由 100×100 个天线单元组成, 采用真空蒸发、光刻和随后的沉积工艺相结合的方法制造, 图 6(b) 为该器件的部分天线示意图, 所制造的解复用器结构尺寸约为 $1.0\text{ cm} \times 1.0\text{ cm}$, 厚度在亚波长范围内, 其优点包括小尺寸、轻重量和低成本等.

近几十年来, 研究人员对于在紧凑设备中实现微米级和纳米级涡旋光发生器和探测器的研究兴趣逐渐增加. 2020 年, Ji 等^[90]设计了一种基于二碲化钨的光电探测器, 旨在直接表征涡旋光的轨道角动量的拓扑电荷 (图 6(c)). 这种探测器采用了精心设计的电极几何形状, 可以将涡旋光信号直接转化为电信号. 该光电探测器利用螺旋相位梯度驱动的轨道光电流效应, 通过测量围绕光束轴缠绕的电流来区分不同 OAM 模式. 这种电流的大小与 OAM 模式的量化值成比例, 从而实现对 OAM 拓扑电荷的直接测量.

为了实现光芯片的制备, 首要任务是获取二碲化钨薄膜. 该团队采用化学气相传输法将多晶状态下的二碲化钨粉末和转运剂碘在的耐热石英容器中密封. 在高温的环境下, 让单晶二碲化钨在容器内生长. 数天后用冰水对容器内的二碲化钨薄膜进行冷萃. 随后, 利用脱模剂聚二甲硅氧烷对薄膜进行机械剥离. 最后, 利用物理气相沉积和电子束光刻的方法在薄膜上附上接收光电流的电极. 因此利用该方法制备的光电探测器可以直接测量 OAM, 然而, 利用光电探测器仅能测量单一的拓扑电荷值, 无法对同轴的多个涡旋光束进行有效分选.

4 涡旋光在模式复用通信方面的应用

近年来, OAM 在光通信中的应用是 OAM 子领域中最活跃的研究方向之一^[91–95]. 关键原因是光的自旋角动量只有两个正交状态, 而 OAM 有可能无限多个状态. 早在 2004 年, Padgett 等^[96]就在自由空间通信中首次明确使用了 OAM, 他们在几米范围内的望远镜-望远镜光学链路中应用了 OAM. 该早期系统利用空间光调制器 (SLM) 制造和测量了 8 种不同的 OAM 状态之一, 尽管其固有光学测量效率为 $1/8$. 随后, 利用两个共同传播但可区分的 OAM 信道进行了长路径长度演示^[97], 在射频领域取得了成功. 尽管存在这些早期的演示,

但直到 Wang 等^[98,99]将 OAM 与他们在实际通信系统中的专业知识相结合, OAM 在扩展多路复用选项范围方面的潜力才得到真正的认可.

在 OAM 多路复用光通信领域, 近年来出现了两种主要方案: 自由空间通信^[96,98,100]和光纤通信^[101,102]. OAM 复用光通信已经实现了超过 Tbit 级别的传输容量, 远远超越了传统方案, 从而极大地拓宽了其应用范围. 同时, 随着涡旋光在大气中传播的研究的不断深入, 利用涡旋光进行自由空间通信的性能也在逐步改善和提升. 2012 年, Wang 等^[98]在涡旋光 OAM 解复用领域取得了重要突破, 成功展示了 4 个偏振复用的轨道角动量光束的复用和解复用技术. 如图 7(a) 所示, 他们利用正交幅度调制 (16-QAM) 信号传输每个光束, 实现了每个符号 4 位的数据传输, 每个光束承载了 (42.8×4) Gbit/s 的数据速率. 通过复用 4 个轨道角动量光束和两个偏振状态, 总传输容量达到了 1369.6 Gbit/s, 频谱效率达到了 25.6 bit/s/Hz (使用 50 GHz 网格). 他们还在空间域展示了可扩展性, 通过利用两组同心环, 每组包含 8 个偏振复用的轨道角动量光束. 每个光束承载着 (20×4) Gbit/s 的 16-QAM 信号, 从而实现了令人瞩目的 2560 Gbit/s 的传输容量. 通过复用 8 个轨道角动量光束、两个偏振状态和两组同心环, 频谱效率达到了 95.7 bit/s/Hz (使用 25 GHz 网格). 此外, 他们还成功展示了两个轨道角动量光束之间的数据交换, 每个光束承载了 100 Gbit/s 的差分正交相移键控 (DQPSK) 信号. 这些重要研究成果推动了涡旋光 OAM 解复用技术的发展, 并为高容量、高效率的光通信系统提供了有力的支持.

2017 年, Lavery 等^[103]进行了一项重要实验, 他们在涡旋光 OAM 解复用领域取得了新的突破. 如图 7(b) 所示, 他们在实验中叠加了两束具有不同轨道角动量状态的波长为 809 nm 的光束, 并将其传输穿越了埃尔朗根市区, 距离达到了 1.6 km. 这些光束不仅穿越了公路, 还经过了高耸的建筑物, 在日常的城市环境中受到了噪音和大气湍流的干扰. 通过这个实验, 研究人员成功地探索了在真实的城市环境中传输高维结构化光场的可行性. 这一成果为进一步推动涡旋光 OAM 解复用技术在实际应用中的发展提供了重要的实证基础.

实验中的具体步骤如下. 首先, 使用二极管激光光源产生光束, 然后利用空间光调制器 (SLM)

在光束上编码了具有 l 分叉全息图的 OAM 模式. 在本实验中, 所使用的是线偏振模式. 接下来, 通过望远镜对这些模式进行进一步扩展, 使其具有约 40 mm 的近似光束尺寸. 随后, 这些光束通过 1.6 km 的自由空间链路进行传输. 实验中的模式接收器由一个直径为 150 mm、焦距为 800 mm 的聚光透镜组成. 测量结果显示, 当 $l=1$ 时, 在接收孔径处接收到的光功率损失约为 5.64 dB.

望远镜中还包括第 2 个透镜, 用于对收集到的光束进行缩小, 使其直径约为 10 mm. 为了检测 OAM 内容以及 OAM 通道之间的串扰, 他们在缩小光束的望远镜输出处放置了一个称为模式分选器的设备. 该模式分选器利用两个折射元件将 OAM 态转换为横向动量态 (即倾斜的平面波). 透镜用于将这些转换后的态聚焦到放置在焦平面上的电荷耦合器件 (CCD) 摄像机上的离散点上. 在测量的 CCD 图像中, 他们定义了相邻且大小相等的区域, 每个区域对应于特定的 OAM 模式. 每个区域中测得的像素值之和与每个 OAM 模式中的光束功率成比例. 这种方法提供了一种全新的无线点对点数据传输方式. 由于该方案基于轨道角动量量子态, 它还展示了量子纠缠现象的特性. 这意味着该技术有潜力在量子密码学领域得到应用. 通过利用量子纠缠, 可以实现更安全的通信和数据传输, 进一步推动信息安全领域的发展.

与自由空间 OAM 通信相比, 基于光纤的 OAM 通信系统在湍流大气中具有更好的稳定性. 在 2018 年, Heng 等^[104]提出并展示了一种用于稳定生成和传播轨道角动量光束全光纤方案. 如图 7(c) 所示, 方案利用自行设计和制造的梯度折射率少模纤维 (GI-FMF) 和兼容的模式选择耦合器 (MSC). MSC 由传统的单模光纤 (SMF) 和 GI-FMF 组成, 实现了有效的 SMF 基模到 GI-FMF 目标 OAM 模式的耦合, 满足相位匹配条件. 同时, GI-FMF 打破了所选择的本征模式和相邻矢量模式之间的退化, 确保了所选择 OAM 模式的保持和传播. 经过实验验证, 研究人员成功实现了在 $|l|=1$ 的稳定 OAM 模式下工作的全光纤器件. 实验结果表明, 涡旋光束能够稳定地传播, 模式纯度约为 95%, 带宽达到 100 nm. 这种全光纤器件为进一步开发宽带轨道角动量模式分割复用应用提供了可行性. 这种全光纤器件可用于进一步开发宽带轨道角动量模式分割复用应用.

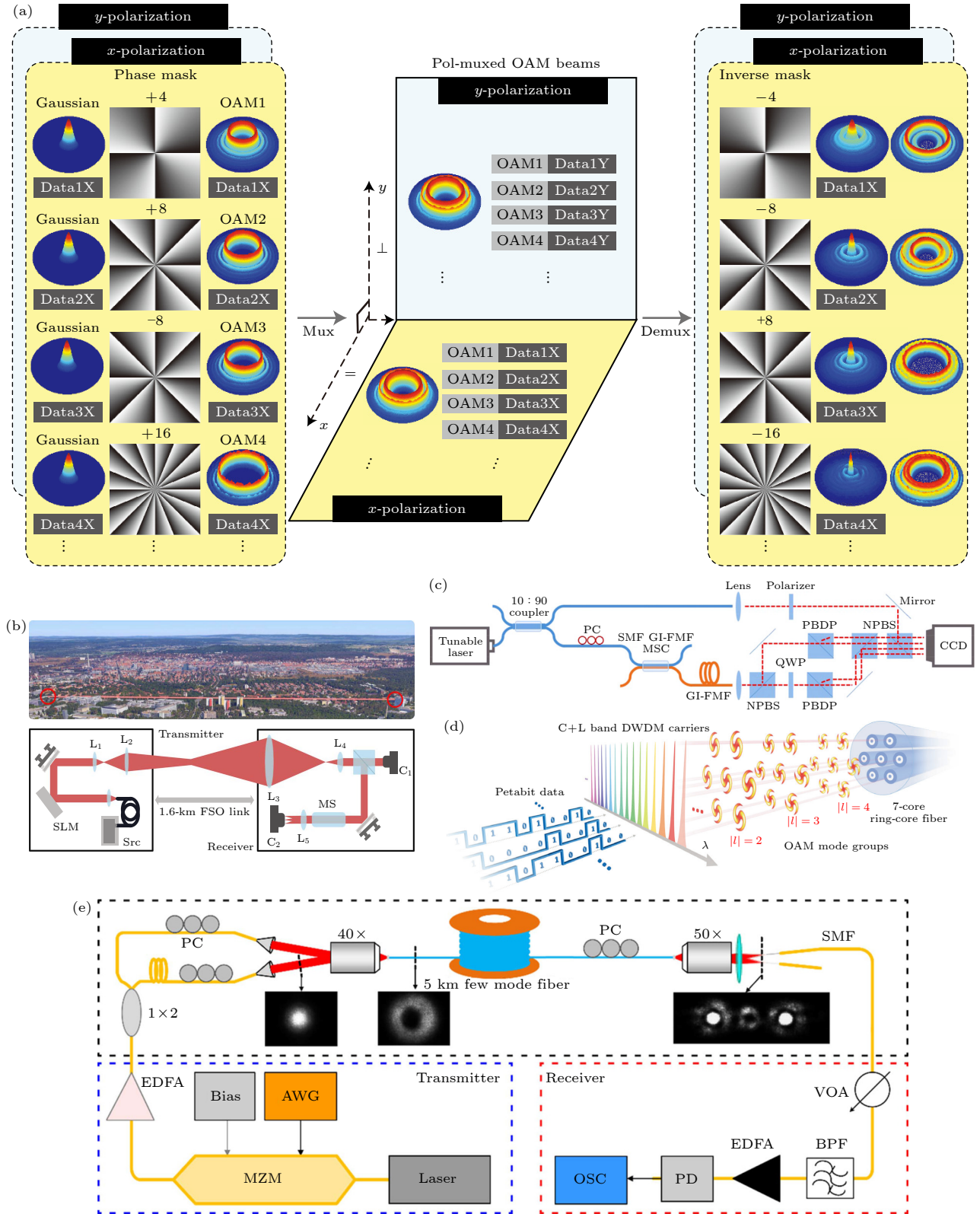


图 7 (a) 载有信息的涡旋光束的复用/解复用以及偏振复用/解复用^[98]; (b) 埃尔朗根天际线 1.6 km 远的自由空间扭曲光路图和实验装置图^[103]; (c) 用于表征生成的涡旋光束的实验装置^[104]; (d) OAM-SDM-WDM 数据传输的实验装置^[105]; (e) OAM 复用光纤通信系统的实验装置, 实验装置包括发射器、OAM(解)复用器和接收器^[80]

Fig. 7. (a) De/multiplexing of OAM beams carrying information and de/multiplexing of polarization^[98]; (b) 1.6 km free-space link in the city of Erlangen and the corresponding experimental setup^[103]; (c) experimental setup for characterizing the generated OAM beam^[104]; (d) experimental setup of OAM-SDM-WDM data transmission^[105]; (e) experimental setup of the optical fiber communication system for OAM multiplexing, including a transmitter, an OAM, de/multiplexer and a receiver^[80].

在 2022 年, Liu 等^[105] 提出了一种创新的 OAM 空间多路复用 (OAM-SDM) 方案, 并成功实现了高容量的光纤传输系统实验. 如图 7(d) 所示, 他们设计了一种具有离轴相位补偿的 7 通道模式转换相位板, 并在自研的 7 环芯 OAM 光纤中实现了低串扰的发射和传输, 包括纤芯间以及纤芯内部模式信道组之间的传输. 在接收端, 仅使用了固定规模的 4×4 多输入多输出 (MIMO) 算法来补偿模式组内部 4 个简并模式之间的串扰. 该方案通过增加每个纤芯中模式组的数量来扩展复用信道的数量, 而不是增加纤芯的数量, 从而保证了光纤的总直径小于 $200\ \mu\text{m}$. 基于这一创新的 OAM-SDM 方案, 结合 C + L 波段密集波分复用技术, 他们首次展示了 Pbit/s 级别的 OAM 复用光纤传输系统实验. 在单根光纤内传输了 24960 个数据信道, 传输距离达到 34 km. 该系统的总 (净) 容量可达 $1.223\ (1.02)\ \text{Pbit/s}$, 并且具有较高的频谱效率, 可达 $156.8\ (130.7)\ \text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$.

5 总结与展望

本文从涡旋光束的基本理论出发, 对涡旋光的解复用原理、加工制备方法以及新兴应用等相关研究进展进行了综述. 首先简述了 OAM 解复用原理的发展历程. 随后, 针对涡旋光 OAM 解复用, 介绍了多种典型的适用于实现多个涡旋 OAM 的分离和解复用器件的制备方法. 尽管利用马赫-曾德干涉仪的方法可以对单个光子的 OAM 进行分类, 但随着待分选的 OAM 状态数量的增加, 系统的复杂度和信号损失也会迅速增加. 这种复杂性和信号损失的上升限制了其在实际应用中的可扩展性. 然而, 几何坐标变换技术在多个领域已经取得了显著的成功, 这种技术可以将螺旋相位光束转换为横向相位梯度, 从而实现涡旋光 OAM 的有效分选. 新近提出的多平面光转换器方案具有更高的潜力, 可以实现数百个不同 OAM 模式的空间解复用, 这为光通信领域带来了更为广阔的发展前景.

在过去二十年, 涡旋光 OAM 分选器的制备技术得到了广泛研究与发展. 电子束刻蚀法利用电子束对光刻胶进行图案化, 能够形成高分辨率、精确度高的涡旋光解复用器件结构, 适用于微小结构. 然而, 该方法制备效率低, 工艺流程复杂, 难以用于大规模生产, 且可制备器件面积有限, 可能需要

多次曝光和刻蚀才能制作大尺寸器件. 激光直写法通过将聚焦的激光束直接写入光敏材料, 从而制备所需结构. 虽然适用于微小涡旋光器件, 但相较于电子束刻蚀法, 其分辨率依然较低. 利用聚合光敏材料和激光的非线性光学效应, 可以实现亚微米尺度的高分辨率制备. 双光子聚合法适用于制备具有复杂结构和高度定制化的涡旋光解复用器件, 但通常分辨率相对较低. 新兴的光控取向液晶制备涡旋光分选器具有实时可调、高效率 and 紧凑性等优点, 但也存在响应速度有限和对波长敏感等问题. 这些技术为小型化涡旋光 OAM 分选器的制备提供了多样化的选择, 但在选择时需要权衡其优缺点以满足特定应用需求.

除了涡旋光束在粒子操控、生物医学等领域的应用, 近年来 OAM 在通信领域的应用也备受关注. 由于涡旋光 OAM 在理论上具有无限多的拓扑电荷以及不同 OAM 态之间的相互正交性, OAM 为光通信系统提供了一个全新的物理维度. 通过利用 OAM 作为新的光通信自由度, 可以与现有的多路复用传输系统合并兼容, 这有望为光通信技术带来巨大的变革. 这篇综述文章还提供了对 OAM 在光通信领域的应用研究的概述和总结, 为进一步探索和发展基于 OAM 的高容量光通信技术提供了参考.

尽管近年来涡旋光发展迅速, 但仍充满挑战和机遇. 为了进一步推动涡旋光的发展, 需要改进涡旋光的生成、检测 and 操控方法和设备. 这包括发展更高效、更精确的涡旋光生成技术, 设计更灵敏、更可靠的涡旋光检测方法, 并提供更灵活、更可控的涡旋光操控设备. 此外, 还需要深入研究涡旋光的更高级应用, 探索其在新领域和新技术中的潜在应用, 以实现更广泛的应用和影响. 随着技术的不断进步和理解的深入, 涡旋光必将在光学领域中扮演越来越重要的角色, 并为科学研究和实际应用带来更多创新和突破.

参考文献

- [1] Webb W, Hanzo L 1994 *Modern Quadrature Amplitude Modulation: Principles and Applications for Wireless Communications* (Hoboken: Wiley-IEEE Press)
- [2] Mukherjee B 2006 *Optical WDM Networks* (New York: Springer)
- [3] Hanzo L, Ng S X, Keller T, Webb W 2004 *Quadrature Amplitude Modulation* (Hoboken: Wiley-IEEE Press)

- [4] Rubinsztein-Dunlop H, Forbes A, Berry M V 2017 *J. Opt.* **19** 013001
- [5] Forbes A, De Oliveira M, Dennis M R 2021 *Nat. Photon.* **15** 253
- [6] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [7] Van Enk S J, Nienhuis G 1992 *Opt. Commun.* **94** 147
- [8] Beijersbergen M W, Allen L, Van Der Veen H E L O, Woerdman J P 1993 *Opt. Commun.* **96** 123
- [9] Molina-Terriza G, Torres J P, Torner L 2007 *Nat. Phys.* **3** 305
- [10] Padgett M J 2017 *Opt. Express* **25** 11265
- [11] Tkachenko G, Chen M Z, Dholakia K, Mazilu M 2017 *Optica* **4** 330
- [12] Zhang Y, Shi W, Shen Z, Man Z, Min C, Shen J, Zhu S, Urbach H P, Yuan X 2015 *Sci. Rep.* **5** 15446
- [13] Tamburini F, Anzolin G, Umbriaco G, Bianchini A, Barbieri C 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 163903
- [14] Xie G, Song H, Zhao Z, Milione G, Ren Y, Liu C, Zhang R, Bao C, Li L, Wang Z, Pang K, Starodubov D, Lynn B, Tur M, Willner A E 2017 *Opt. Lett.* **42** 4482
- [15] Qiu C W, Yang Y 2017 *Science* **357** 645
- [16] Swartzlander J G A, Ford E L, Abdul-Malik R S, Close L M, Peters M A, Palacios D M, Wilson D W 2008 *Opt. Express* **16** 10200
- [17] Tamburini F, Thide B, Molina-Terriza G, Anzolin G 2011 *Nat. Phys.* **7** 195
- [18] Fang X, Ren H, Gu M 2019 *Nat. Photonics* **14** 102
- [19] Erhard M, Fickler R, Krenn M, Zeilinger A 2018 *Light Sci. Appl.* **7** 17146
- [20] Wang J 2016 *Photon. Res.* **4** B14
- [21] Jia P, Yang Y, Min C J, Fang H, Yuan X C 2013 *Opt. Lett.* **38** 588
- [22] 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
- [23] Ren Y, Li L, Wang Z, Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, Zhao Z, Xie G, Cao Y, Ahmed N, Yan Y, Liu C, Willner A J, Ashrafi S, Tur M, Faraon A, Willner A E 2016 *Sci. Rep.* **6** 33306
- [24] Padgett M, Courtial J, Allen L 2004 *Phys. Today* **57** 35
- [25] Beijersbergen M W, Coerwinkel R P C, Kristensen M, Woerdman J P 1994 *Opt. Commun.* **112** 321
- [26] Carpentier A V, Michinel H, Salgueiro J R, Olivieri D 2008 *Am. J. Phys.* **76** 916
- [27] Yu N F, Genevet P, Kats M A, Aieta F, Tetienne J P, Capasso F, Gaburro Z 2011 *Science* **334** 333
- [28] Cai X, Wang J, Strain M J, Johnson-Morris B, Zhu J, Sorel M, O'Brien J L, Thompson M G, Yu S 2012 *Science* **338** 363
- [29] Kumar A, Vaity P, Krishna Y, Singh R P 2010 *Opt. Laser Eng.* **48** 276
- [30] Bouchal Z, Haderka O, Celechovsky R 2005 *New J. Phys.* **7** 125
- [31] Marrucci L, Karimi E, Slussarenko S, Piccirillo B, Santamato E, Nagali E, Sciarrino F 2011 *J. Opt.* **13** 064001
- [32] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y X, Tur M, Kristensen P, Huang H, Willner A E, Ramachandran S 2013 *Science* **340** 1545
- [33] Anhauser A, Wunenburger R, Brasselet E 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 034301
- [34] Jiang X, Li Y, Liang B, Cheng J C, Zhang L K 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 034301
- [35] Li H, Ren G, Zhu B, Gao Y, Yin B, Wang J, Jian S 2017 *Opt. Lett.* **42** 179
- [36] Verbeeck J, Tian H, Schattschneider P 2010 *Nature* **467** 301
- [37] Liu C M, Liu J S, Niu L T, Wei X L, Wang K J, and Yang Z G 2017 *Sci. Rep.* **7** 3891
- [38] Liu Y X, Sun S H, Pu J X, Lu B D 2013 *Opt. Laser Technol.* **45** 473
- [39] Ambuj A, Vyas R, Singh S 2014 *Opt. Lett.* **39** 5475
- [40] Tao H, Liu Y, Chen Z, Pu J 2012 *Appl. Phys. B* **106** 927
- [41] Leach J, Padgett M J, Barnett S M, Franke-Arnold S, Courtial J 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 257901
- [42] Ruffato G, Massari M, Romanato F 2016 *Sci. Rep.* **6** 24760
- [43] Zheng S, Wang J 2017 *Sci. Rep.* **7** 40781
- [44] Dai K J, Gao C Q, Zhong L, Na Q X, Wang Q 2015 *Opt. Lett.* **40** 562
- [45] Harris M, Hill C A, Tapster P R, Vaughan J M 1994 *Phys. Rev. A* **49** 3119
- [46] Martelli P, Boffi P, Fasiello A, Martinelli M 2015 *Electron. Lett.* **51** 278
- [47] Hossack W J, Darling A M, Dahdouh A 1987 *J. Modern Opt.* **34** 1235
- [48] Ruffato G, Massari M, Parisi G, Romanato F 2017 *Opt. Express* **25** 7859
- [49] Yang J S, Liu Z B, Gao S C, Huang X C, Feng Y H, Liu W P, Li Z H 2019 *Opt. Express* **27** 4338
- [50] Berkhout G C, Lavery M P, Courtial J, Beijersbergen M W, Padgett M J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 153601
- [51] Lavery M P, Robertson D J, Berkhout G C, Love G D, Padgett M J, Courtial J 2012 *Opt. Express* **20** 2110
- [52] Ruffato G, Massari M, Romanato F 2017 *Opt. Lett.* **42** 551
- [53] Ruffato G, Massari M, M Girardi, G Parisi, Zontini M, and Romanato F 2019 *Opt. Express* **27** 24123
- [54] Lightman S, Hurvitz G, Gvishi R, Arie A 2017 *Optica* **4** 605
- [55] Wan C H, Chen J, Zhan Q W 2017 *APL Photonics* **2** 031302
- [56] Li L, Guo Y C, Zhang Z C, Shang Z J, Li C, Wang J Q, Gao L L, Hai L, Gao C Q, Fu S Y 2023 *Adv. Photon.* **5** 056002
- [57] Mirhosseini M, Malik M, Shi Z, Boyd R W 2013 *Nat. Commun.* **4** 2781
- [58] Malik M, Mirhosseini M, Lavery M 2014 *Nat. Commun.* **5** 3115
- [59] Wen Y H, Chremmos I, Chen Y J, Zhu J B, Zhang Y F, Yu S Y 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 193904
- [60] Fontaine N K, Ryf R, Chen H, Neilson D T, Kim K, Carpenter J 2019 *Nat. Commun.* **10** 1865
- [61] Liu Z B, Gao S C, Lai Z Y, Li Y R, Ao Z H, Li J P, Tu J J, Wu Y X, Liu W P, Li Z H 2023 *Laser Photonics Rev.* **17** 2200536
- [62] Huang Z, Wang P, Liu J, Xiong W, He Y, Xiao J, Ye H, Li Y, Chen S, Fan D 2021 *Phys. Rev. Appl.* **15** 014037
- [63] Brandt F, Hiekkamäki M, Bouchard F, Huber M, Fickler R 2020 *Optica* **7** 98
- [64] Labroille G, Denolle B, Jian P, Genevaux P, Treps N, Morizur J F 2014 *Opt. Express* **22** 15599
- [65] Schloegel K, Karypis G, Kumar V 2001 *IEEE T. Parall. Distr.* **12** 451
- [66] Cao H, Liang Y Z, Wang L L, Ruan Z S, Wang H Y, Zeng J W, Wang J 2023 *Laser Photonics Rev.* **17** 2200631
- [67] Shi J S, Wei D, Hu C, Chen M C, Liu K W, Luo J, Zhang X Y 2021 *Opt. Express* **29** 7084
- [68] Veli M, Mengü D, Yardımcı N T, Luo Y, Li J, Rivenson Y, Jarrahi M, Özcan A 2021 *Nat. Commun.* **12** 37
- [69] Zhou T, Lin X, Wu J, Chen Y, Xie H, Li Y, Fan J, Wu H, Fang L, Dai Q 2021 *Nature Photonics* **15** 367
- [70] Yan T, Wu J, Zhou T, Xie H, Xu F, Fan J, Fang L, Lin X,

- Dai Q 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 023901
- [71] Lin X, Rivenston Y, Yardimci N T, Veli M, Luo Y, Jarrahi M, Ozcan A 2018 *Science* **361** 1004
- [72] Doster T, Watnik A T 2017 *Appl. Opt.* **56** 3386
- [73] Chen P, Ma L L, Duan W, Chen J, Ge S J, Zhu Z H, Tang M J, Xu R, Gao W, Li T, Hu W, Lu Y Q 2018 *Adv. Mater.* **30** 1705865
- [74] Milione G, Nguyen T A, Leach J, Nolan D A, Alfano R R 2015 *Opt. Lett.* **40** 4887
- [75] Liu S J, Chen P, S. Ge J, Zhu L, Zhang Y H, Lu Y Q 2022 *Laser Photonics Rev.* **16** 2200118
- [76] Karimi E, Piccirillo B, Nagali E, Marrucci L, Santamato E 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 231124
- [77] Zhang H, Fu C, Fang J, Lei T, Zhang Y, Yuan X 2020 *Appl. Opt.* **59** 11041
- [78] Xie Z, Lei T, Weng X, Du L, Gao S, Yuan Y, Feng S, Zhang Y, Yuan X 2016 *IEEE Photonics Technology Letters* **28** 2799
- [79] Min C, Liu J, Lei T, Si G, Xie Z, Lin J, Du L, Yuan X 2016 *Laser Photonics Rev.* **10** 978
- [80] Xie Z, Gao S, Lei T, Feng S, Zhang Y, Li F, Zhang J, Li Z, Yuan X 2018 *Photon. Res.* **6** 743
- [81] Cheng J, Sha X, Zhang H, Chen Q, Qu G, Song Q, Yu S, Xiao S 2022 *Nano. Lett.* **22** 3993
- [82] Li S, Li X, Zhang L, Wang G, Zhang L, Liu M, Zeng C, Wang L, Sun Q, Zhao W, Zhang W 2020 *Adv. Optical Mater.* **8** 1901666
- [83] Li Y, Li X, Chen L, Pu M, Jin J, Hong M, Luo X 2017 *Adv. Optical Mater.* **5** 1600502
- [84] Zhang S, Huo P, Zhu W, Zhang C, Chen P, Liu M, Chen L, Lezec H J, Agrawal A, Lu Y, Xu T 2020 *Laser & Photonics Reviews* **14** 2000062
- [85] Fu P, Ni P N, Wang Q H, Liu Y F, Wu B, Chen P P, Kan Q, Wang S P, Chen H D, Xu C, Xie Y Y 2021 *Adv. Optical Mater.* **9** 2101308
- [86] Chung H, Kim D, Choi E, Lee J 2022 *Laser Photonics Rev.* **16** 2100456
- [87] Feng Q, Kong X, Shan M, Lin Y, Li L, Cui T J 2022 *Phys. Rev. Appl.* **17** 034017
- [88] Fang J C, Xie Z W, Lei T, Min C J, Du L P, Li Z H, Yuan X C 2018 *Acs Photonics* **5** 3478
- [89] Zhao H, Quan B, Wang X, Gu C, Li J, Zhang Y 2017 *ACS Photonics* **5** 1726
- [90] Ji Z, Liu W, Krylyuk S, Fan X, Zhang Z, Pan A, Feng L, Davydov A, Agarwal R 2020 *Science* **368** 763
- [91] Wang P P, Xiong W J, Huang Z B, He Y L, Liu J M, Ye H P, Xiao J N, Li Y, Fan D Y, Chen S Q 2022 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **28** 7500111
- [92] Wang P, Xiong W, Huang Z, He Y, Xie Z, Liu J, Ye H, Li Y, Fan D, Chen S 2021 *Photon. Res.* **9** 2116
- [93] Xiong W J, Huang Z B, Wang P P, Wang X R, He Y L, Wang C F, Liu J M, Ye H P, Fan D Y, Chen S Q 2021 *Opt. Express* **29** 36936
- [94] Xiong W, Wang P, Cheng M, Liu J, He Y, Zhou X, Xiao J, Li Y, Chen S, Fan D 2020 *J. Lightwave Technol.* **38** 1712
- [95] Willner A E, Li L, Xie G, Ren Y, Huang H, Yue Y, Ahmed N, Willner M J, Willner A J, Yan Y, Zhao Z, Wang Z, Liu C, Tur M, Ashrafi S 2016 *Photon. Res.* **4** B5
- [96] Gibson G, Courtial J, Padgett M, Vasnetsov M, Pas'ko V, Barnett S, Franke-Arnold S 2004 *Opt. Express* **12** 5448
- [97] Tamburini F, Mari E, Sponselli A, Thidé B, Bianchini A, Romanato F 2012 *New J. Phys.* **14** 033001
- [98] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, Ahmed N, Yan Y, Huang H, Ren Y X, Yue Y, Dolinar S, Tur M, Willner A E 2012 *Nat. Photonics* **6** 488
- [99] Li L, Zhang R, Zhao Z, Xie G, Liao P, Pang K, Song H, Liu C, Ren Y, Labroille G, Jian P, Starodubov D, Lynn B, Bock R, Tur M, Willner A E 2017 *Sci. Rep.* **7** 17427
- [100] Vallone G, D'Ambrosio V, Sponselli A, Slussarenko S, Marrucci L, Sciarrino F, Villoresi P 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 060503
- [101] Wang A D, Zhu L, Chen S, Du C, Mo Q, Wang J 2016 *Opt. Express* **24** 11716
- [102] Zhu L, Liu J, Mo Q, Du C, Wang J 2016 *Opt. Express* **24** 16934
- [103] Lavery M P J, Peuntinger C, Gunthner K, Banzer P, Elser D, Boyd R W, Padgett M J, Marquardt C, Leuchs G 2017 *Sci. Adv.* **3** e1700552
- [104] Heng X B, Gan J L, Zhang Z S, Li J, Li M Q, Zhao H, Qian Q, Xu S H, Yang Z M 2018 *Opt. Express* **26** 17429
- [105] Liu J, Zhang J, Liu J, Lin Z, Li Z, Lin Z, Zhang J, Huang C, Mo S, Shen L, Lin S, Chen Y, Gao R, Zhang L, Lan X, Cai X, Li Z, Yu S 2022 *Light Sci. Appl.* **11** 202

SPECIAL TOPIC — The 90th Anniversary of South China Normal University and Physics Discipline

Miniaturized optical vortex mode demultiplexer: Principle, fabrication, and applications^{*}

Yang Xin-Yu¹⁾²⁾ Ye Hua-Peng^{1)2)†} Li Pei-Yun²⁾ Liao He-Lin²⁾
Yuan Dong^{1)2)‡} Zhou Guo-Fu¹⁾²⁾

1) (*National Center for International Research on Green Optoelectronics, SCNU-TUE Joint Lab of Device Integrated Responsive Materials (DIRM), South China Normal University, Guangzhou 510006, China*)

2) (*Institute of Electronic Paper Displays, Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Information Materials and Technology, South China Academy of Advanced Optoelectronics, South China Normal University, Guangzhou 510006, China*)

(Received 19 September 2023; revised manuscript received 7 October 2023)

Abstract

Vortex beams have attracted extensive attention in recent decade due to the carried optical orbital angular momentum (OAM). Vortex beams carrying different OAM modes are orthogonal to each other, and thus have become highly promising in realizing high-capacity optical communication systems. This review is to introduce the fundamental principles of optical OAM mode demultiplexing, recent advances in the fabrication techniques and emerging applications in high-capacity optical communications. First, this review introduces the development history of the working principle of OAM mode demultiplexer. Subsequently, a variety of preparation techniques and emerging applications of OAM mode demultiplexing are discussed in detail. Finally, we provide an in-depth analysis and outlook for the future trends and prospects of the OAM mode demultiplexer.

Keywords: vortex beam, orbital angular momentum, high-capacity optical communication, demultiplex, miniaturized photonic device

PACS: 42.79.Sz, 42.79.-e, 42.50.Tx, 85.60.-q

DOI: 10.7498/aps.72.20231521

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61805087), the Special Program on Key Fields for Colleges and Universities of Guangdong Province, China (Grant No. 2021ZDZX1048), the Key Laboratory of Optical Information Materials and Technology Guangdong Province, China (Grant No. 2017B030301007), and the National Green Optoelectronics International Joint Research Center (Grant No. 2016B01018).

[†] Corresponding author. E-mail: yehp@m.scnu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: yuandong@scnu.edu.cn

小型化涡旋光模式解复用器：原理、制备及应用

杨鑫宇 叶华朋 李佩芸 廖鹤麟 袁冬 周国富

Miniaturized optical vortex mode demultiplexer: Principle, fabrication, and applications

Yang Xin-Yu Ye Hua-Peng Li Pei-Yun Liao He-Lin Yuan Dong Zhou Guo-Fu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 204207 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20231521

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231521>

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

基于电光晶体平板部分相位调制动态产生涡旋光束

Dynamic generation of vortex beam based on partial phase modulation of electro-optical crystal plate

物理学报. 2022, 71(20): 207801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220835>

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>

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>

平板式螺旋相位板的设计与应用

Design and application of flat spiral phase plate

物理学报. 2019, 68(5): 054102 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181677>

基于场变换理论的大角度涡旋电磁波生成方法

Wide-angle method for vortex electromagnetic wave generation using field transformation

物理学报. 2020, 69(13): 135201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200365>

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>