

基于光纤的轨道角动量复用技术的研究进展

刘剑飞, 邢登科, 曾祥烨, 卢嘉

河北工业大学电子信息工程学院, 天津市电子材料与器件重点实验室, 天津 300401

摘要 轨道角动量(OAM)是具有螺旋相位的光束的自然属性,且不同拓扑荷的 OAM 光束之间相互正交。利用 OAM 光束的这种特性,可以把 OAM 光束作为一种新的信息载体应用到复用技术之中。OAM 复用技术在不需要额外带宽的情况下可以极大提升信道容量和频谱效率。光纤作为一种优良的传输介质,是现代通信网络中的首选,基于光纤传输的 OAM 复用技术引起了研究者的广泛关注。介绍了轨道角动量的基本原理,讨论了适于携带 OAM 光束传输的光纤、OAM 光束的生成与检测方法、OAM 复用技术相关器件及其复用系统实验等方面的研究进展,最后探讨了现有技术存在的问题和发展趋势。

关键词 光纤光学; 光学涡旋; 轨道角动量; 光纤通信; 模式

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP55.050005

Orbital Angular Momentum Multiplexing Technology Based on Optical Fiber

Liu Jianfei, Xing Dengke, Zeng Xiangye, Lu Jia

Tianjin Key Laboratory of Electronic Materials and Devices, School of Electronic and Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China

Abstract Orbital angular momentum (OAM) is a natural property of beams with spiral phase. OAM beams with different topological charges are mutually orthogonal. OAM beams can be applied to OAM multiplexing as a new information carrier based on their orthogonality. OAM multiplexing greatly improves the channel capacity and spectrum efficiency without additional bandwidth. Owing to its excellent properties, optical fiber has become the best choice in modern communication network. OAM multiplexing based on optical fiber has attracted widespread concern of researchers. We introduce the basic principle of OAM firstly, and then discuss the research progress of the optical fiber, which is suitable for carrying OAM beam, OAM beam generation and detection methods, related devices and experiments of OAM multiplexing technology and so on. Finally, the existing problems and trends of the current technologies are discussed.

Key words fiber optics; optical vortices; orbital angular momentum; optical fiber communication; mode

OCIS codes 060.2310; 080.4865; 260.6042; 060.2280; 050.4865

1 引言

光纤通信的复用技术经历了时分复用(TDM)、波分复用(WDM)、偏振复用(PDM)、空分复用(SDM)、模分复用(MDM)等研究与发展阶段, TDM、WDM 和 PDM 复用技术已被应用在传输速率、信道容量和频谱效率等方面,但是 MDM、SDM 因存在诸多技术难点仍处于研究阶段。近年来,一

种新型的复用技术——轨道角动量(OAM)复用受到关注。利用光的 OAM 复用技术进行信息传输,可以极大地提升信道容量和频谱效率^[1],从而满足现代信息社会对信息传输速率和信道容量的高要求。因此,光纤通信中的 OAM 复用技术引起了国内外研究者的广泛兴趣,在 OAM 光纤、放大器、解复用器、系统实验等诸多方面取得了不同程度的进展。Allen 等^[2]在 1992 年实验验证了拉盖尔-高斯

收稿日期: 2017-09-19; 收到修改稿日期: 2017-11-09

基金项目: 天津市自然科学基金(15JCYBJC17000)、河北省青年科学基金(F2014202036, F2015202331)

作者简介: 刘剑飞(1968—),男,博士,教授,主要从事光纤通信技术等方面的研究。E-mail: jfliu@hebut.edu.cn

(LG)光束中存在 OAM, Mair 等^[3]在 2001 年率先提出 OAM 可以应用于量子通信中, Gibson 等^[4]在 2004 年将 OAM 应用于光通信。2011 年, 南加州大学的 Wang 等^[5]利用 OAM 复用实现 Tbit/s 光传输, 取得了 OAM 复用技术的突破。

OAM 在光通信中的传输介质主要分为自由空间和光纤两种。在自由空间光通信中主要研究 OAM 模式复用以及其与传统复用技术相结合, 以实现高速率传输。在自由空间 OAM 复用中, Ren 等^[6-9]均取得了不同突破性进展, 信息传输速率、复用的模态数量不断提高。光纤因其可以将传输信号与外界环境相隔绝, 作为信号传输介质可以更好地降低外部干扰, 从而达到更大容量和更长的传输距离。因此, 越来越多的研究者着眼于光纤中的 OAM 技术的研究。

本文介绍了 OAM 复用原理, 讨论了适于携带 OAM 光束传输的光纤、OAM 光束的生成与检测方法、OAM 复用技术相关器件及其复用系统实验等方面的研究进展, 最后探讨了现有技术存在的问题和发展趋势。

2 OAM 复用原理

OAM 作为光束的一种自然属性, 存在于具有螺旋相位的涡旋光束中。携带 OAM 的涡旋光场的结构示意图如图 1 所示^[10]。涡旋光束存在着相位奇点, 中心光强为零。涡旋光场可以表示为^[11]

$$\psi_l(r) = u(r, z) \exp(il\theta) \exp(-ikz), \quad (1)$$

式中: $\exp(il\theta)$ 为相位因子, 其中 l 为拓扑荷, θ 为方位角; $u(r, z)$ 为光场在 z 处的振幅分布; k 为波数, 此处 $-kz$ 表示光波是沿着 z 轴方向传播的。

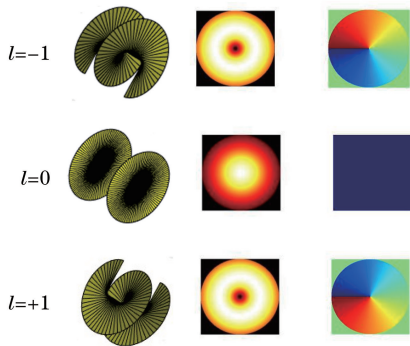


图 1 3 种拓扑荷的 OAM(-1, 0, +1) 的螺旋相位示意图及相位与强度分布示意图^[10]
Fig. 1 Schematic diagram of the spiral phase and intensity distribution of OAM with three topological charges (-1, 0, +1)^[10]

不同拓扑荷的 OAM 光束之间是相互正交的, 而且 OAM 光束的拓扑荷数在理论上可以为任意整数, 所以可以将多个不同拓扑荷的 OAM 光束作为载波进行信息传输。以 LG 光束为例, 不同拓扑荷的 LG 光束之间满足如下的正交关系^[12]:

$$\int u_m(r, \theta, z) u_n^*(r, \theta, z) r dr d\theta = \begin{cases} 0, & n \neq m, \\ \int |u_m|^2 r dr d\theta, & n = m, \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_m 和 u_n 分别为拓扑荷为 m 和 n 的 LG 光束的场强。这种不同拓扑荷 OAM 光束之间的正交性使得 OAM 复用系统可以通过合适的分离方法对复用信号进行解复用。OAM 光束的这种正交性使其在光通信中有着巨大的应用前景。

3 OAM 光纤

光纤作为一种最优的高速大容量传输介质, 在光通信中具有不可替代的作用, 如何在光纤中实现 OAM 有效传输是该领域研究的热点问题。相对于大气等传输介质, 信号在光纤中传输时受到干扰的较低, 传输距离变长, 但是普通的圆光纤结构并不适用于传输 OAM 光束^[13]。

光纤中的 OAM 模式是由同阶奇模和偶模叠加而成的, 即 $\text{OAM}_{\pm l, m}^{\pm}$ 可由 $\text{HE}_{l+1}^{\text{even}}$ 和 $\text{HE}_{l+1}^{\text{odd}}$ 叠加而成, 亦可由 $\text{EH}_{l-1}^{\text{even}}$ 和 $\text{EH}_{l-1}^{\text{odd}}$ 叠加而成, 其中 HE^{even} 和 EH^{even} 分别为 HE 模和 EH 模的奇模, HE^{odd} 和 EH^{odd} 分别为 HE 模和 EH 模的偶模, HE^{even} 与 HE^{odd} 以及 EH^{even} 与 EH^{odd} 之间均存在 $\pi/2$ 的相位差。在普通的圆光纤中, 由于模间有效折射率差小, OAM 光束在普通光纤中传输时容易发生模式简并, 严重影响信号质量^[14], 所以设计一种适于传输 OAM 光束的光纤非常必要。

研究表明, 适用于传输 OAM 光束的光纤必须具备两个条件^[15]: 1) 可以通过合理控制光纤中矢量模之间的有效折射率差来减弱模式简并; 2) 光纤的模场呈环状分布。近些年来研究者们提出了许多适用于传输 OAM 光束的光纤^[15-28], 根据折射率分布与光纤结构可分为环形光纤、光子晶体光纤和微结构光纤等。

3.1 环形光纤

2009 年, Ramachandran 等^[16]提出了一种具有环形折射率的环光纤结构。通过对圆环折射率进行设计, 增大不同模式之间的有效折射率差, 使 OAM 光束可以在光纤中传输, 如图 2(a) 所示。该种环光

纤分为 3 个部分,从内到外分别为纤芯层、传输层和包层,其中包层和纤芯层折射率相同,均小于传输层,如图 2(b)所示,并且给出了 LP_{11} 模的模场分布,由图 2(b)可以看出中心光强为 0。图 2(c)为构成 LP_{11} 模的 TE_{01} , TM_{01} 和 HE_{21} 的有效折射率。实验

表明:经过 20 m 的传输后, TE_{01} , TM_{01} 的模式纯度达到 99.8% 以上,证明这种环形光纤可以很好地保证 OAM 光束的稳定传输。为了进一步提高光纤中 OAM 模式的稳定性,Bozinovic 等^[17]在该光纤后连接偏振控制器,使 OAM 光束的模式纯度达到 97%。

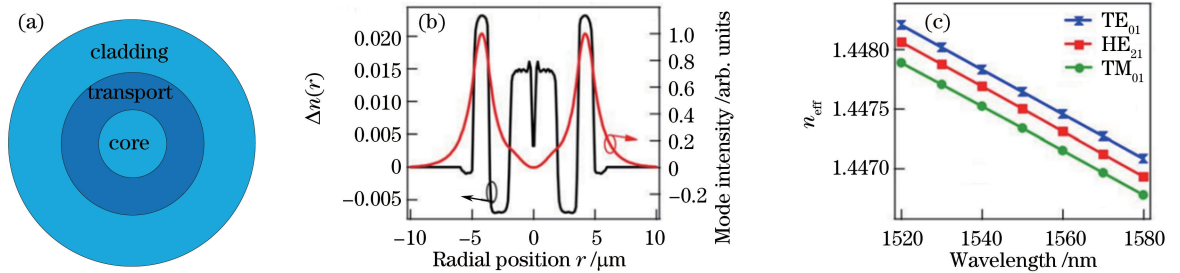


图 2 环光纤横截面图和主要参数^[16]。(a)环光纤示意图;(b)环光纤折射率和 LP_{11} 模场分布;(c) LP_{11} 模中 3 个矢量模有效折射率

Fig. 2 Cross-section and main parameters of ring fiber^[16]. (a) Schematic diagram of ring fiber; (b) refractive index profile of ring fiber and mode intensity profile of LP_{11} ; (c) effective refractive index for the three vector modes of the scalar LP_{11}

为了增大模式之间的有效折射率差,初期考虑通过改变光纤纤芯的填充材料来实现,如利用空气对光纤纤芯进行填充。Golowich 等^[18]在 2012 年设计了一种支持 OAM 光束传输的新型空气芯环形光纤。该种光纤由于纤芯处为空气,折射率接近于 1,较之前的光纤可以更大地增加有效折射率差。如图 3(a)所示,由于纤芯处为空气,折射率最小,包层折射率大于纤芯但是小于传输层。从图 3(b)中可以看出, LP_{11} 模之间有效折射率的

差均大于 10^{-4} ,即不会发生模式简并。实验采用大半径环形结构光纤,可以支持超过 9 个 OAM 模态的稳定传输。2013 年, Gregg 等^[19]设计出支持 12 个 OAM 状态稳定传输的空气孔光纤,实现了 12 个 OAM 模态经过距离为 2 m 的传输,模式纯度大于 12 dB。2016 年, Gregg 等^[20]又设计了一种光纤循环环路,传输距离达到 13.4 km,其中模式串扰在 5.5 km 时低于 10 dB,在 2 km 时低于 15 dB。

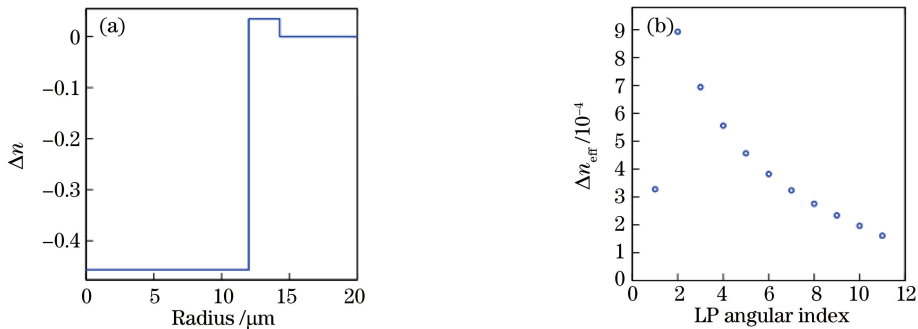


图 3 新型空气芯环形光纤^[18]。(a)光纤折射率分布;(b) LP_{11} 模的有效折射率

Fig. 3 New type of air core ring fiber^[18]. (a) Refractive index profile of ring fiber; (b) effective refractive index of LP_{11} mode

环形光纤的出现使得 OAM 光纤传输得到了发展,但是,单环结构的光纤在传输 OAM 模态的数量上会受到一定的限制。2013 年, Li 等^[21]设计了一种支持多模 OAM 传输的多芯光纤(MOMRF)。该种光纤包括 7 个纤芯,每个纤芯折射率呈环状分布,每个环状纤芯支持 22 种模式(18 种 OAM 模态)的传输,如图 4 所示。通过提高纤芯有效面积并适当增大环间距离(30 μm)可以降低模间串扰和环间串

扰。之后,他们在对该光纤的优化设计中,改变了每个纤芯单环的折射率分布^[22],如图 5 所示。这样,通过减小芯间串扰使纤芯数量达到 19 个,每个纤芯支持 22 种模式(18 种 OAM 模态)的传输。Zhu 等^[23]在 2015 年提出一种新型环光纤,与传统光纤不同,该种新型光纤有两个传输区域(中心纤芯 I 与环形区域 III),光纤结构和折射率分布如图 6 所示。通过对光纤折射率特性的设计,光纤纤芯中基模的传

输与传统单模光纤中相似,同时在环形区域可以支持多个 OAM 模式的传输,仿真结果中显示两个传输区域中几乎无串扰。另外,Jung 等^[24]在 2017 年设计出一种少模环状纤芯光纤,该光纤可以支持 4 种模式群。这种光纤通过合理地设计折射率特

性,保证 LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} 和 LP_{31} 模式在 C 波段的稳定性的同时,抑制了波长为 1500 nm 处的 LP_{41} 模式。光纤长度达到 25.3 km 且 4 种不同的模式群的衰减都接近 0.3 dB/km。

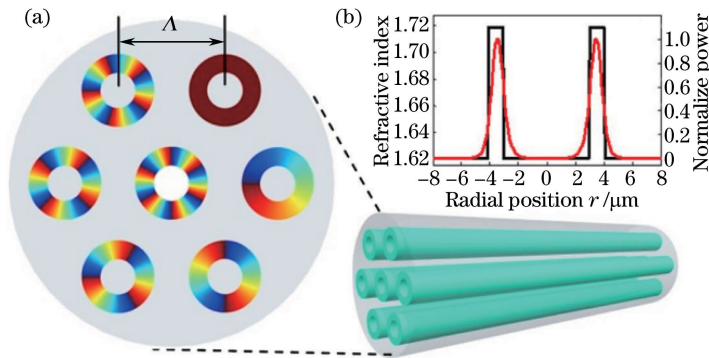


图 4 MOMRF 光纤^[21]。(a)横截面及光纤几何结构;(b)单环折射率分布

Fig. 4 Fiber of MOMRF^[21]. (a) Cross-section and geometrical structure of MOMRF; (b) refractive index profile of a single ring

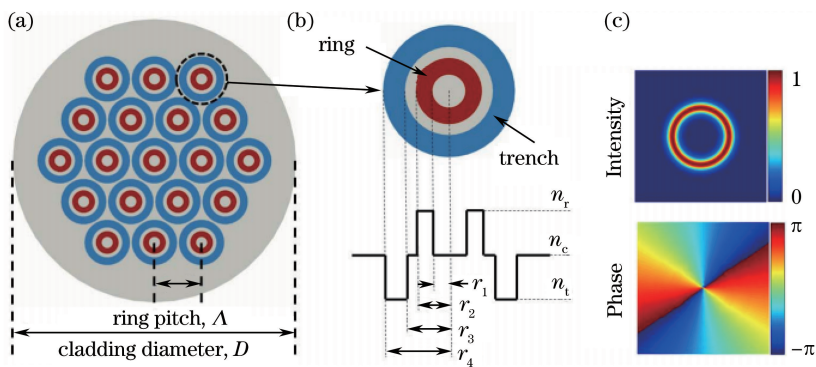


图 5 改进型 MOMRF^[22]。(a)改进型 MOMRF 光纤横截面;(b)单环折射率分布;(c)单环中 HE_{31} 模的强度与相位分布

Fig. 5 Improved MOMRF^[22]. (a) Cross-section of improved MOMRF; (b) refractive index profile of a single ring; (c) intensity and phase distributions of HE_{31} related OAM mode in a single ring

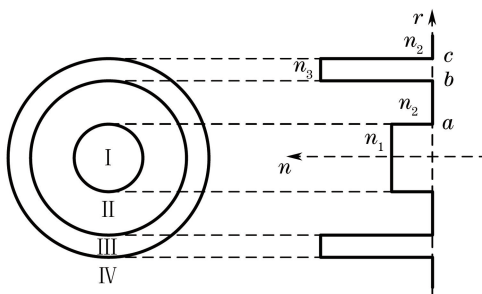


图 6 光纤的几何结构和折射率分布

Fig. 6 Geometrical structure and refractive index distribution of optical fiber

3.2 光子晶体光纤

光子晶体光纤(PCF)具有无截止单模传输、色散可调等^[25]优良特性,近些年来受到了广泛关注。无

截止单模传输特性使得 PCF 可以在更大的波长范围内实现单模传输,其带宽比传统光纤的带宽有大幅度提高。同时,由于 PCF 色散可调,而且具有大模场面积特性,故可以有效避免非线性效应的影响,降低了损耗。在光子晶体 OAM 光纤中也是如此^[26-28]。

Zhang 等^[26]设计了一种可以支持 3 种不同阶数 OAM 传输的圆形光子晶体光纤(C-PCF),其结构如图 7 所示。从图 7 可以看出,几种模式被很好地限制在该种光纤的高折射率区域,光纤模场保持着良好的环形分布特性。在自由空间中随着 OAM 光束的拓扑荷数的增大,OAM 光束的环形半径也会随之变化,从而很难将多个不同拓扑荷数的 OAM 光束耦合到单环光纤中。而对于该种光纤,如图 7(b)和(c)所示,在高折射率环状区域,不同模

态的强度分布之间变化很小,高阶模态的环的宽度随拓扑荷数的增大而变小,降低了模式间的串扰,利于多种 OAM 模态的同时传输。Zhang 等^[28]又提出了一种新型光子晶体光纤,其纤芯面积较大且为

空心结构,如图 8 所示,周围的空气孔周期性的在包层部分排列为 4 个环。该种光纤可以支持 11 种阶数的 OAM 光束的传输,携带 42 种不同的 OAM 模态。

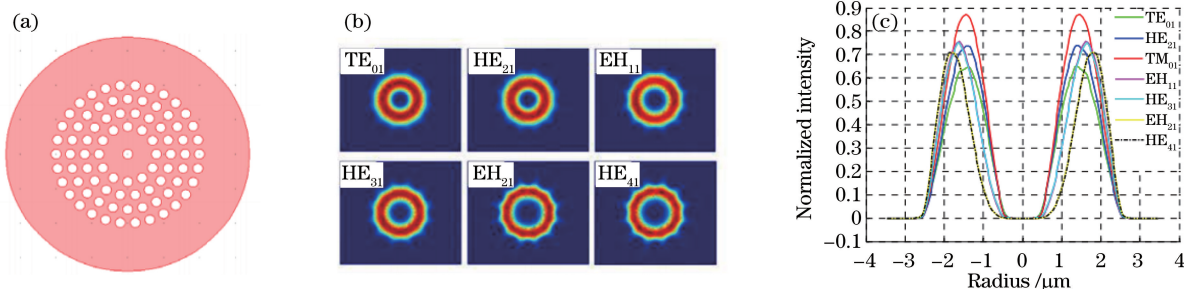


图 7 圆形光子晶体光纤横截面图和主要参数^[26]。(a)圆形光子晶体光纤结构示意图;(b) TE_{01} , HE_{21} , EH_{11} , HE_{31} , EH_{21} , HE_{41} 模式强度分布;(c)不同模式在高折射率环状区域的归一化强度分布

Fig. 7 Cross-section and main parameters of C-PCF^[26]. (a) Structure diagram of C-PCF; (b) intensity distributions of the vortex modes (TE_{01} , HE_{21} , EH_{11} , HE_{31} , EH_{21} , HE_{41}); (c) normalized intensity distribution in high-index ring region with different order modes

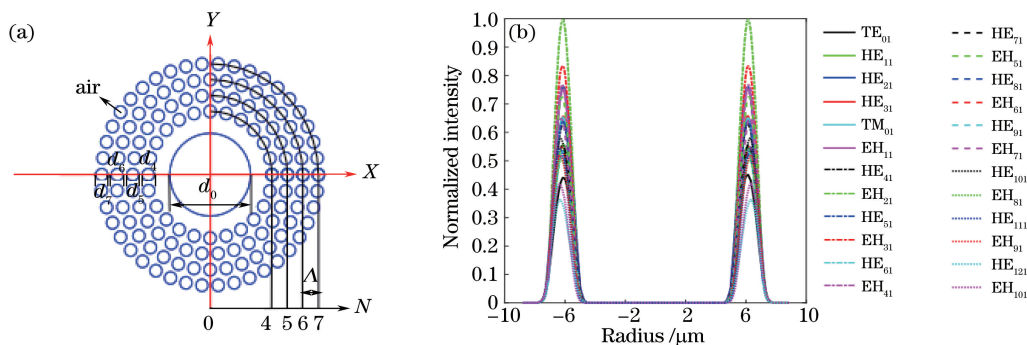


图 8 新型圆形光子晶体光纤横截面图和主要参数^[28]。(a)光纤结构示意图;(b)在高折射率环状区域的归一化强度分布

Fig. 8 Cross-section and main parameters of C-PCF^[28]. (a) Structure diagram of novel C-PCF; (b) normalized intensity distribution in high-index ring region with different order modes

3.3 微结构光纤

Zhu 等^[29]设计了一种用于传输 OAM 光束的微结构光纤,纤芯与周围 6 个孔均为空气孔。为了抑制径向模式和局域模的产生,环的厚度不超过 $2 \mu\text{m}$,相邻环之间的连接处厚度不超过 $1 \mu\text{m}$ 。这种设计可以增大两种不同 OAM 态之间的有效折射率差,在降低模间串扰的同时可以传输更多的 OAM 模态。

Huang 等^[30]在 2015 年设计了一种新型微结构光纤,该种光纤可以在不同的波长下产生多种 OAM 模态,如图 9 所示。光纤中包括高折射率环状区域和纤芯,纤芯被 4 个空气孔包围。纤芯和空气孔中可以加入一些光学功能材料,折射率可通过调节物理参量(温度、电压、光强等)来改变。光学功能材料的加入改变了光纤模式的色散特性,使得输入的圆偏振模可以与高阶 OAM 模式在环状区域发

生耦合。通过调节材料的折射率,光纤就可以实现在可调波长范围内的圆偏振模与多种不同高阶 OAM 模式的耦合。

研究表明,除了上述光纤之外,少模光纤^[31]、多模

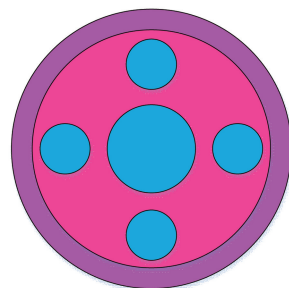


图 9 波长可调微结构光纤横截面示意图

Fig. 9 Schematic diagram of wavelength tunable microstructured optical fiber cross section

光纤^[32]和超模光纤^[33]等也可以实现 OAM 光束的传输。与其他 OAM 光纤相同,它们也是通过将矢量本征模式叠加为 OAM 模态来实现 OAM 光束的传输。缺点是这几种光纤传输 OAM 光束的损耗较高,并且由于有效模场面积小导致非线性系数较大,与专门为传输 OAM 光束设计的光纤相比缺乏性能上的优势。

4 OAM 光束产生、检测及 OAM 复用相关器件

4.1 OAM 光束的产生

OAM 光束的产生是进行 OAM 光通信应用的前提和基础。OAM 光束的产生不同于普通光束的产生,需要利用一些特殊的方法和装置,才能产生纯净、稳定的 OAM 光束。光束的产生主要有以下几种方法:

1) 螺旋相位板法^[34-35]。螺旋相位板是一块具有固定折射率的透明板,其中一端是规则的平面结构,另一端则是一个不规则螺旋面结构。高斯光束通过螺旋相位板后被附加上一个螺旋相位因子,形成涡旋光束。这种方法转换效率高,产生的光束功率较高,但是通过一种螺旋相位板只能产生单一拓扑荷的 OAM 光束,使得这种方法在应用上有一定的局限性。

2) 模式转换法^[36-37]。LG 模式和 Hermite-Gaussian(HG)模式之间存在以下的关系:

$$u_{lm}^{\text{LG}}(x, y, z) = \sum_{k=0}^N i^k b(n, m, k) u_{N-k, k}^{\text{HG}}(x, y, z), \quad (3)$$

式中: b 为与 n, m, k 相关的实系数; $N = n + m$; i^k 表明 LG 模式与 HG 模式之间有着 $\pi/2$ 的相位差。利用 Gouy 计算可知,将一对相同的柱面透镜相距 $\sqrt{2}f$ (f 为焦距)对称放置的时候,光束可以实现 $\pi/2$ 的相位变化。该方法转换效率高,但操作复杂且只能生成单一模式的 OAM 光束。

3) 计算全息图法^[38]。该方法是通过将激光器产生的高强度高斯光束照射到全息光栅(一般为叉形光栅)上,得到的一级衍射光束即为涡旋光束,其中空间光调制器(SLM)的工作原理和计算全息图法相类似。该方法相对于其他方法来说可以产生高拓扑荷数的 OAM 光束,但是效率较低。

近些年来,随着对 OAM 复用技术的关注,又有许多产生 OAM 光束的新方法相继被提出:

1) 利用光纤耦合器来实现 OAM 光束的产生^[39-41]。光纤耦合器是一种光无源器件,用来连接

多根光纤,使光纤中传输的光信号在特殊的耦合区进行耦合,并进行功率或波长分配^[42]。因为 OAM 光束可以通过同阶的奇模和偶模耦合得到^[43],所以通过在光纤耦合器中对不同模式耦合,可以在环光纤中产生 OAM 光束并传输。该方法对于 OAM 光束产生装置的要求相对较低,易于实现,适合在光纤通信中应用。

2) 利用超表面进行 OAM 的产生^[44-45]。利用传统的光学元件进行 OAM 光束的产生都是通过用比光波波长大很多的传输距离实现的。当光束通过元件时,幅度、相位等的变化是随着传输距离进行累积。超表面作为一种新型超薄光学元件,可以使光束的相位发生突变,所以可以用超表面调控光束的相位、振幅甚至传播方向。Karimi 等^[44]提出等离子纳米结构的双折射特性可以用来实现圆偏振光到 OAM 光束的转换,左旋偏振光通过超表面,形成拓扑荷为 2 的右旋偏振 OAM 光束。Du 等^[45]设计了一种基于绝缘硅平台的介质超表面阵列,实验证明利用这种超表面可以产生拓扑荷 $-4 \sim 4$ 的 OAM 光束,但是由于这种方法在灵活性上有所欠缺,因此其在光通信上的应用受到限制。

3) 利用达曼编码光栅实现 OAM 光束的产生^[46-47]。达曼编码光栅具有光栅间隔均匀的特点。Zhang 等^[46]利用该特点将达曼编码光栅与传统叉型光栅相结合,利用二维达曼涡旋光栅产生了大量携带不同拓扑荷的 OAM 光束,所有 OAM 光束的能量平均分布。Yu 等^[47]在 2012 年通过将二维达曼光栅与达曼波带片(DZP)结合,实现了三维达曼光栅并利用其产生大量的拓扑荷数可调节的 OAM 光束。

在上述 OAM 光束的产生方法中,使用的激光光源大多数都是氦氖激光器而非光学实验中常用的半导体激光器。氦氖激光器是一种气体激光器,因其输出波长稳定、不因外界环境变化而变化、光束质量好等特点成为产生高质量 OAM 光束的理想激光器。但是,上述很多方法在实际应用时较为复杂,并不适用于 OAM 复用系统。在 OAM 复用系统中多利用 SLM 来实现 OAM 光束的产生,方法相对简单,并且可以产生任意拓扑荷数的 OAM 光束。缺点是利用 SLM 产生的 OAM 光束,由于其本身具有环形半径随着拓扑荷数成比例增大的特点,难以同时将多个携带不同拓扑荷数的 OAM 光束耦合进环形光纤。

值得注意的是, Ostrovsky 等^[48]提出的“完美涡旋”概念给人们提供了一种产生 OAM 光束的新思路。该技术利用载有特殊的相位掩模板的 SLM 得

到 OAM 光束,光束的环形半径不随拓扑荷数增大而变化,可以将不同拓扑荷数的 OAM 光束耦合进同一根光纤。随后,研究者采用了多种方法产生完美涡旋光束,比如采用锥形镜^[49]、数字微镜^[50]等器件的方法。目前为止,已实现了拓扑荷数达到 90 的完美涡旋光束的产生,并且产生的完美涡旋光束的质量逐渐提高。完美涡旋光束虽然仍然存在光强模式单一^[51]等问题,但其在 OAM 复用中具有广阔的应用前景。

4.2 OAM 光束的检测

几乎所有基于模式转换产生 OAM 态的方法都可以用于检测 OAM 态^[10]。而对于非模式转换所产生的 OAM 光束,需要通过其他的方法进行检测。Mair 等^[3]曾提出了基于纠缠光路符合测量的 OAM 态检测方法。2002 年,Leach 等^[52]利用马赫-曾德尔干涉仪测量分离轨道角动量来进行检测,系统由两个分束镜、两个道威棱镜和两个全反射镜组成,其中的一个棱镜相对于另一个棱镜做 90° 旋转,所以两棱镜引入的相位差为 $l\alpha$,即为 $l\pi$, α 为光束的旋转角度。通过调整干涉仪的光路就可以在一端得到 l 为奇数的光束,在另一端得到 l 为偶数的光束。但是通过上述方法只可以检测出 OAM 光束拓扑荷数是奇数还是偶数,通过级联不同旋转角度的道威棱镜就可以实现任意阶 OAM 光束的检测。

2012 年,Schattschneider 等^[53]利用柱透镜检测 OAM 光束的阶数,利用柱透镜将高斯光束转换成 OAM 光束,通过聚焦柱透镜后方的光斑确定拓扑荷的数量和正负。Hossack 等^[54-56]提出一种高效 OAM 态检测方法,该方法通过坐标变换将具有螺旋相位的光束转换为具有梯度相位的光束,再通过透镜将不同 OAM 态的光束聚焦在不同的横向位置上,通过横向位置区分 OAM 态。之后,相继出现利用二维达曼光栅来检测^[57],利用涡旋光共轴叠加干涉生成携带双态 OAM 的光束进行检测^[58],采用“fan-out”实现 OAM 态精确检测^[59]等方法。

OAM 光束检测是 OAM 复用系统的重要部分。但为了简化系统,检测方法不宜太复杂,简单而高效的 OAM 检测方法更适用于 OAM 复用系统。一种是采用上文中所提到的 Hossack 等的高效 OAM 态检测方法,一种是通过加载与产生 OAM 光束时相位相反的相位掩模的 SLM 来移除光束中的螺旋相位,恢复成为高斯光束进行检测。

4.3 OAM 复用相关器件

OAM 复用系统不仅包括上述的 OAM 光束的

产生与检测,还包括信号的放大、OAM 光束的复用与解复用等。随着 OAM 复用技术研究的不断深入,一些新型放大器、解复用器等与 OAM 复用相关的器件相继出现^[60-66]。

在传统 OAM 复用系统的复用与解复用过程中,恢复源信号时会出现信号不连续的情况,影响了系统的性能。为改善这个问题,Strain 等^[60-61]提出了一种基于绝缘硅的超小型可调谐集成 OAM 器件,可以在 10 μm 内实现 OAM 模式通断,在 20 μm 内实现 OAM 模式的切换。该设备利用微谐振器回音壁模式耦合的原理,在自由空间通过嵌入到微谐振器的角动量光栅来实现 OAM 模式的传输。其中环谐振器的回音壁模式 λ_R 被定义为

$$\lambda_R = \frac{n_{\text{eff}} L_c}{p}, \quad (4)$$

式中: n_{eff} 为波导的有效折射率; L_c 为环的几何长度; p 为回音壁模式的阶数。发射出的 OAM 光束的阶数 l 随 λ_R 变化,表示为

$$l = p - q = \frac{n_{\text{eff}} L_c}{\lambda_R} - q, \quad (5)$$

式中: q 为总的光栅周期数通过控制波导的有效折射率可以实现特定波长的 OAM 光束,而波导有效折射率的变化则是通过热光效应实现。实验中将 10 kHz 方波作为驱动信号,结果表明可以在 20 μs 内实现模式切换。

Huang 等^[62]在 2013 年实验验证了一种适于 OAM 复用系统的光分插复用器(ROADM)。该 ROADM 通过 SLM 在保证其他 OAM 光束模态不变的情况下将某一 OAM 模态的光束单独转换为高斯光束,或将某一高斯光束单独转换为 OAM 光束。实验中选取了 OAM_{-5} , OAM_{+2} , OAM_{+8} 3 种不同模态的 OAM 光束,在误码率(BER)为 2×10^{-3} 时,光信噪比(OSNR)损耗小于 2 dB。

解复用器作为 OAM 复用系统的一个重要器件,在实现解复用的同时需要对其引入的损耗进行控制。Liu 等^[63]实验验证了一种可调射频 OAM 解复用器,实验中成功实现了 3 种阶数 OAM($l=0,1,2$)光束的解复用,边模抑制率达到 20 dB。该解复用器可以分为 3 个部分:圆形天线阵列、光延时单元和移相器。圆形天线阵列用来接收复用后的光信号,光延时单元用来补偿在传输信道中的相位和幅度失真,移相器用来进行相位增量补偿。

在光通信系统中,由于损耗的存在,信号的功

率会不可避免的降低,为了延长信号的传输距离,在传输过程中需要对信号进行放大。Jung 等^[66]在2017年提出了一种基于空气孔掺铒光纤(AH-EDF)的 OAM 光放大器,该种掺铒光纤放大器(EDFA)在波长为 1545~1600 nm 的范围内可以实现 15.6 dB 的增益。该种光纤结构与前面所提到的空气孔光纤相似,但是其环状纤芯为掺铒纤芯。该种 AH-EDF 采用包层抽运的方式。虽然采用纤芯抽运的方法也可以获得低差模增益,但是纤芯抽运需要将输入的高斯抽运模式转化为相应的环纤芯中可稳定存在的模式以耦合入光纤,这就带来了一定的损耗,增加了额外的复杂度。而包层抽运可以直接利用侧面耦合方法使抽运光通过放大器,相比纤芯抽运更为简单。

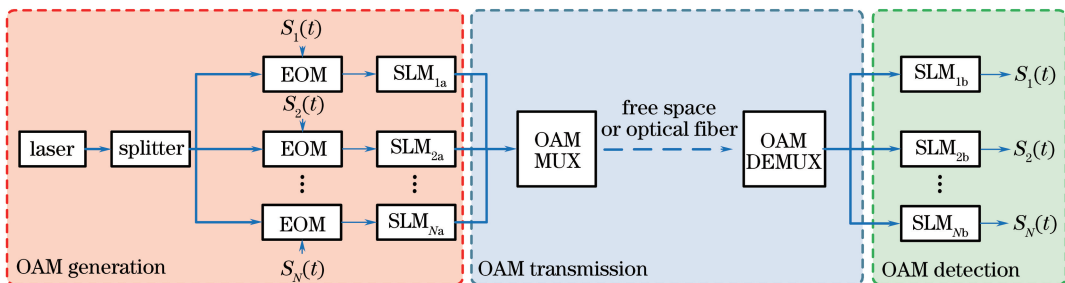


图 10 OAM 复用系统框图

Fig. 10 Block diagram of OAM multiplexing system

2011年,Wang 等^[5]通过实验验证了 OAM 复用在光通信中的可行性,实现了 OAM 光通信的一个重大突破。他们采用 4 种 OAM 模态的光束进行复用,并用反射式向列液晶 SLM 来实现 OAM 光束的产生和解复用,频谱效率达到 $12.8 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$,在 BER 为 2×10^{-3} 时 OSNR 损耗低于 2.4 dB。在随后实验中又加入了偏振复用技术^[39],频谱效率提高到 $25.6 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$,BER 为 2×10^{-3} 的 OSNR 损耗低于 3.5 dB。

随着涡旋光纤的研制成功,OAM 复用技术也在光纤系统中实现了突破。Bozinovic 等^[70]于2011年提出在 0.9 km 的涡旋光纤中实现 OAM 光束的传输。在实验中,利用微弯的光纤光栅实现 OAM 光束的形成,将 OAM 光束与高斯光束进行干涉得到干涉图像。实验结果验证了 OAM 光纤通信的可行性,并且测得在输出端的串扰小于 20 dB。2013年,Bozinovic 等^[71]实现两种不同的 OAM 模态经过 1.1 km 涡旋光纤,总容量为 1.6 Tbit/s 的模式复用和波分复用传输,模式耦合引入的串扰小于 -10 dB。传输之后在 BER 为 3.8×10^{-3} 时所引入

5 OAM 复用系统实验

以光纤作为传输介质的实验系统近年来得到迅速发展,从双 OAM 模态到更多 OAM 模态的复用,已实现了最多达 20 种 OAM 模态的复用^[32],最高传输速率达到 10.56 Tbit/s^[67]。在自由空间中最高传输距离可达到 143 km^[68],在光纤中可达到 50 km^[69]。

OAM 复用系统框图如图 10 所示。光源经过 $1 \times N$ 分束器后形成 N 个光信号, N 个数据流通过电光调制器(EOM)调制到光信号上,调制信号通过 SLM 形成 OAM 光束。不同 OAM 模态的光束经过复用与解复用后,通过 SLM 后转换为高斯光束(该 SLM 与前面对应的 SLM 的相位掩模相反,如 SLM_{1a} 与 SLM_{1b} 的相位掩模是相反的),解调得到电信号。

的最大光功率损耗为 2.5 dB。Nejad 等^[72]实现了双 OAM 态在 1.4 km 的环状纤芯光纤中的复用,光束在经过掺铒光纤放大器后分为 4 束,其中 2 束通过 SLM 调制成 $\text{OAM}_{\pm 1}$ 模态,另外两束不做处理,为高斯光束。两种模态的 OAM 光束进行复用并在光纤中进行传输,随后解复用并进行信号处理。4 种光束接收解调之后的纠错前 BER 均小于 5×10^{-4} 。

2016年,Wang 等^[73]实验验证了双 OAM 模态在少模光纤中的复用。发射端信号采用 10 Gbaud 的奈奎斯特信号,调制方式采用 32QAM。实验测得单 OAM 模态(无模间串扰)OSNR 的变化在 BER 为 3.8×10^{-3} 时小于 1 dB,双 OAM 模态复用时小于 2 dB,而且在该系统中未采用多输入多输出(MIMO)均衡技术进行串扰抑制。

随着研究的不断深入,更多 OAM 模态复用的系统也得以实现。Zhu 等^[32]在 2016 年利用一种特殊设计的光纤高效地激发出了 4 种 OAM 模式群,其中包含 20 种不同的 OAM 模态,该光纤通过在传统的 OM3 多模光纤前后两端加入模式激发器件和模式过滤器件实现。OAM 光束通过透镜聚焦并耦

合到模式激发器件中,这种基于模式激发器件的光纤的纤芯半径小于普通多模光纤,使得光纤可以更好地激发出所需的 OAM 模式群。后面连接的模式过滤器件只允许需要的 OAM 模式群通过,因此可以保证得到的 OAM 模式群的纯度。通过上述方法,实验验证了 4 种不同 OAM 模式群(OAM₀₁, OAM_{±11}, OAM₊₂₁, OAM₊₃₁) 在 2.6 km 的 OM3 多模光纤中的传输^[32], BER 小于 2×10^{-3} 。

Ingerslev 等^[67] 在 2017 年实验验证了 12 种 OAM 模态的光束在 1.2 km 光纤中的传输,该传输过程不需要 MIMO 技术,发射端采用了间隔为 25 GHz 的频率梳实现 60 路波分复用的信道。信号在通过偏振复用器后经过 1×8 分束器,其中 6 路信号经过放大被用来实现 12 种 OAM 模式的产生。

涡旋光纤的出现使得 OAM 光束在理论上可以在光纤中稳定地传输,但是在实际中,OAM 复用系统依然存在一定的损耗,损耗主要来源于模间串扰和多径干扰^[74]。于是一些研究者开始着手于消除这种损耗。Milione 等^[75] 实验验证了在少模光纤中的 4 种 OAM 模态的复用,并利用 MIMO 均衡的信号处理技术补偿了信道的串扰,使得被传输的四相相移键控(QPSK)数据在接收端得以恢复,在 BER 为 2.3×10^{-3} 时 OSNR 改善了 1.5 dB。

Wang 等^[69] 实验验证了 50 km 的光纤中的双 OAM 模态复用,实验采用低密度奇偶校验码(LDPC)对伪随机二进制序列进行编码来消除串扰。经过 50 km 少模光纤的传输,在 BER 为 2.6×10^{-6} 时所引入的最大光功率损耗为 5.1 dB。

6 问题与讨论

不同 OAM 态之间的相互正交性,使得 OAM 在光纤通信中得到了极大的发展,借助于 OAM 这种良好特性,光纤通信系统的信道容量和频谱效率得到了极大的提升。因此,OAM 复用技术在光纤通信中不断发展,并且在其他方面也得以延伸。虽然 OAM 复用技术有着独特的优势,但是在实际应用中仍然存在诸多问题。首先是成本高,方法和设备普遍相对复杂。OAM 光束的产生和光纤的制备都需要与 OAM 光束本身的特性相匹配,无法采用常用的技术来实现。而且所需器件需要达到较高的精度,否则很难达到理想效果。其次是 OAM 光束调制等一系列对光束的操作都依赖于分立器件,在一个 OAM 复用系统中,分立器件的增多会产生较高的插入损耗,而且 OAM 复用系统一般较为复杂,

对于系统传输性能的影响无法忽略。最后是传输过程中的损耗问题,OAM 光束在理论上具有理想的正交性,但在实际中会遇到模式串扰、材料吸收、非线性等一系列问题的影响,如何在光纤材料选取到结构设计的过程中进一步降低传输损耗是需要进一步解决的问题。因此,今后的研究需要继续解决这些瓶颈问题,才能实现 OAM 光纤通信更广泛的应用。

7 结束语

OAM 技术的出现使得光纤通信得到了进一步的发展,在提高带宽和频谱效率方面为研究者提供了一种新的思路。本文介绍了适于携带 OAM 光束传输的光纤、OAM 光束的生成与检测方法、OAM 复用技术相关器件及其复用系统实验等方面的研究进展,探讨了现有技术存在的问题和发展趋势。目前,基于 OAM 的光纤通信技术仍然处于实验室研究阶段,在光源产生、耦合、光纤传输、解调以及光纤器件等方面还有大量问题须要解决,但其所蕴含的潜力使得 OAM 光纤通信技术有着诱人的发展前景。

参 考 文 献

- [1] Willner A E, Huang H, Yan Y, *et al.* Optical communications using orbital angular momentum beams[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(1): 66-106.
- [2] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [3] Mair A, Vaziri A, Weihs G, *et al.* Entanglement of the orbital angular momentum states of photons[J]. *Nature*, 2001, 412(6844): 313-316.
- [4] Gibson G, Courtial J, Padgett M J, *et al.* Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum [J]. *Optics Express*, 2004, 12(22): 5448-5456.
- [5] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, *et al.* Demonstration of 12.8-bit/s/Hz spectral efficiency using 16-QAM signals over multiple orbital-angular-momentum modes[C]//37th European Conference and Exposition on Optical Communications, 2011: 12356541.
- [6] Ren Y, Huang H, Xie G, *et al.* Experimental turbulence effects on crosstalk and system power penalty over a free space optical communication link

- using orbital angular momentum multiplexing [C] // IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics, 2013: 14392562.
- [7] Huang H, Xie G, Ren Y, *et al.* 4×4 MIMO equalization to mitigate crosstalk degradation in a four-channel free-space orbital-angular-momentum-multiplexed system using heterodyne detection [C] // 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2013: 13842070.
- [8] Liu J, Wang J. Polarization-insensitive PAM-4-carrying free-space orbital angular momentum (OAM) communications [J]. *Optics Express*, 2016, 24(4): 4258-4269.
- [9] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, *et al.* Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 488-496.
- [10] Zhao S M, Jiang X C, Gong L Y, *et al.* Communications using orbital angular momentum multiplexing [J]. *Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2015, 35(6): 1-13.
赵生妹, 蒋欣成, 巩龙延, 等. 轨道角动量态复用通信研究 [J]. *南京邮电大学学报(自然科学版)*, 2015, 35(6): 1-13.
- [11] Sun P J. Generation of vector vortex beams in an optical fiber [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2016.
孙培敬. 光纤中矢量涡旋光束的产生 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [12] Djordjevic I B. Deep-space and near-Earth optical communications by coded orbital angular momentum (OAM) modulation [J]. *Optics Express*, 2011, 19(15): 14277-14289.
- [13] Alexeyev A N, Fadeyeva T A, Volyar A V. Optical vortices and the flow of their angular momentum in a multimode fiber [J]. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 1998, 1(1): 82-89.
- [14] Huang G Y. Modal characteristics of OAM in a modified ring fiber [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015.
黄桂勇. 改进环光纤结构中轨道角动量模式特性研究 [D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [15] Brunet C, Vaity P, Messaddeq Y, *et al.* Design, fabrication and validation of an OAM fiber supporting 36 states [J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26117-26127.
- [16] Ramachandran S, Kristensen P, Yan M F, *et al.* Generation and propagation of radially polarized beams in optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(16): 2525-2527.
- [17] Bozinovic N, Golowich S, Kristensen P, *et al.* Control of orbital angular momentum of light with optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2451-2453.
- [18] Golowich S, Kristensen P, Bozinovic N, *et al.* Fibers supporting orbital angular momentum states for information capacity scaling [C] // Proceeding of Frontiers in Optics Conference, New York, 2012.
- [19] Gregg P, Kristensen P, Golowich S, *et al.* Stable transmission of 12 OAM states in air-core fiber [C] // Proceeding of Conference of Lasers and Electro-Optics, 2013, CTu2K: CTu2K.2.
- [20] Gregg P, Kristensen P, Ramachandran S. 13.4 km OAM state propagation by recirculating fiber loop [J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 18938-18947.
- [21] Li S H, Wang J. Multi-orbital-angular-momentum multi-ring fiber for high-density space-division multiplexing [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(5): 7101007.
- [22] Li S H, Wang J. A compact trench-assisted multi-orbital-angular-momentum multi-ring fiber for ultrahigh-density space-division multiplexing (19 rings \times 22 modes) [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(3853): 1-8.
- [23] Zhu M, Zhang W, Xi L, *et al.* A new designed dual-guided ring-core fiber for OAM mode transmission [J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, 25: 58-63.
- [24] Jung Y M, Kang Q, Zhou H, *et al.* Low-loss 25.3 km few-mode ring-core fiber for mode-division multiplexed transmission [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(8): 1363-1368.
- [25] Wang W, Hou L T. Present situation and future development in photonics crystal fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, 45(2): 43-58.
王伟, 侯蓝田. 光子晶体光纤的现状和发展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2008, 45(2): 43-58.
- [26] Zhang H, Zhang W B, Xi L X, *et al.* Design of a Circular photonic crystal fiber supporting OAM modes [C] // Asia Communications and Photonics Conference, Hongkong, 2015, ASu2A: ASu2A.54.
- [27] Hu Z A, Huang Y Q, Luo A P, *et al.* Photonic crystal fiber for supporting 26 orbital angular momentum modes [J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 17285-17291.
- [28] Zhang H, Zhang W, Xi L, *et al.* A new design of a

- circular photonic crystal fiber supporting 42 OAM modes[C] // Australian Conference on Optical Fibre Technology, 2016, ATh2C: ATh2C. 4.
- [29] Zhu G X, Wang X Y, Chen Y J, *et al.* Microstructured optical fibers for transmitting orbital angular momentum (OAM) modes [C] // Asia Communications and Photonics Conference, Hongkong, 2015, AM3C: AM3C.4.
- [30] Huang W, Liu Y, Wang Z, *et al.* Generation and excitation of different orbital angular momentum states in a tunable microstructure optical fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33741-33752.
- [31] Ung B, Vaity P, Wang L, *et al.* Few-mode fiber with inverse-parabolic graded-index profile for transmission of OAM-carrying modes [J]. Optics Express, 2014, 22(15): 18044-18055.
- [32] Zhu L, Wang A, Liu J, *et al.* Experimental demonstration of orbital angular momentum (OAM) modes transmission in a 2.6 km conventional graded-index multimode fiber assisted by high efficient mode-group excitation[C] // Optical Fiber Communication Conference, 2016, W2A: W2A.32.
- [33] Li S, Wang J. Supermode fiber for orbital angular momentum (OAM) transmission [J]. Optics Express, 2015, 23(14): 18736-18745.
- [34] Turnbull G A, Roberston D A, Smith G M, *et al.* The generation of free-space Laguerre-Gaussian modes at millimetre-wave frequencies by use of a spiral phaseplate[J]. Optics Communications, 1996, 127(4): 183-188.
- [35] Guo M J, Zeng J, Li J H. Generation and interference of vortex beam based on spiral phase plate[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 092602.
- 郭苗军, 曾军, 李晋红. 基于螺旋相位板的涡旋光束的产生与干涉[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 092602.
- [36] Beijersbergen M W, Allen L, vander Venn H E L O, *et al.* Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum [J]. Optics Communications, 1993, 96(1): 123-132.
- [37] Tamn C, Weiss C O. Bistability and optical switching of spatial patterns in a laser[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1990, 7(6): 1034-1038.
- [38] Heckengerg N R, Mcduff R, Smith C P, *et al.* Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms[J]. Optics Letters, 1992, 17(3): 221-223.
- [39] Yan Y, Lin Z, Jian W, *et al.* Generating orbital angular momentum modes in a fiber with a central square and a ring profile [C] // IEEE Photonics Conference, Arlington, 2011: 12443071.
- [40] Wang J, Yang J Y, Fazal I M, *et al.* 25.6-bit/s/Hz spectral efficiency using 16-QAM signals over pol-muxed multiple orbital-angular-momentum modes [C] // IEEE Photonics Conference, Arlington, 2011: 12470003.
- [41] Yan Y, Wang J, Zhang L, *et al.* Fiber coupler for generating orbital angular momentum modes [J]. Optics Letters, 2011, 36(21): 4269-4271.
- [42] Pelegrina-Bonilla G, Hausmann K, Sayinc H, *et al.* Analysis of the modal evolution in fused-type mode-selective fiber couplers[J]. Optics Express, 2015, 23(18): 22977-22990.
- [43] Hou J, Wang L Z, Yang C Y, *et al.* Progress in optical orbital angular momentum communications [J]. Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2014, 33(1): 67-90.
- 侯金, 王林枝, 杨春勇, 等. 轨道角动量光通信研究进展[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2014, 33(1): 67-90.
- [44] Karimi E, Schulz S A, de Leon I, *et al.* Generating optical orbital angular momentum at visible wavelengths using a plasmonic metasurface [J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(5): e167.
- [45] Du J, Li X H, Li S H, *et al.* Experimental demonstration of chip-scale orbital angular momentum (OAM) beams generation and detection using nanophotonic dielectric metasurface array[C] // The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition, California, 2016, W2A: W2A.13.
- [46] Zhang N, Yuan X C, Burge R E. Extending the detection range of optical vortices by Dammann vortex gratings[J]. Optics Letters, 2010, 35(20): 3495-3497.
- [47] Yu J, Zhou C, Jia W, *et al.* Three-dimensional Dammann vortex array with tunable topological charge[J]. Applied Optics, 2012, 51(13): 2485-2490.
- [48] Ostrovsky A S, Rickenstorff-Parrao C, Arrizón V. Generation of the "perfect" optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator [J]. Optics Letters, 2013, 38(4): 534-536.
- [49] Chen M, Mazilu M, Arita Y, *et al.* Dynamics of

- microparticles trapped in a perfect vortex beam [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4919-4922.
- [50] Chen Y, Fang Z X, Ren Y X, *et al.* Generation and characterization of a perfect vortex beam with a large topological charge through a digital micromirror device [J]. *Applied Optics*, 2015, 54 (27): 8030-8035.
- [51] Wang Y J, Li X Z, Li H H, *et al.* Research progress of perfect vortex field [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 54(9): 090007.
王亚军, 李新忠, 李贺贺, 等. 完美涡旋光场的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54 (9): 090007.
- [52] Leach J, Padgett M J, Barnett S M, *et al.* Measuring the orbital angular momentum of a single photon [J]. *Physics Review Letters*, 2002, 88(1): 257901.
- [53] Schattschneider P, Stoger-Pollach M, Verbeeck J. Novel vortex generator and mode converter for electrons [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109 (8): 084801.
- [54] Hossack W J, Darling A M, Dahdour A. Coordinate transformations with multiple computer-generated optical-elements [J]. *Journal of Modern Optics*, 1987, 34(9): 1235-1250.
- [55] Saito Y, Komatsu S, Ohzu H. Scale and rotation invariant real-time optical correlator using computer generated hologram [J]. *Optics Communications*, 1983. 47(1): 8-11.
- [56] Beckhout G C, Lavery M P J, Courtial J, *et al.* Efficient sorting of orbital angular momentum states of light [J]. *Physics Review Letters*, 2010, 105(15): 153601.
- [57] Zhong L. Generation of OAM laser and detection of OAM states [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
钟雷. OAM 激光光源的产生和 OAM 态检测技术研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [58] Ke X Z, Xu J Y. Interference and detection of vortex beams with orbital angular momentum [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0905003.
柯熙政, 胥俊宇. 涡旋光束轨道角动量干涉及检测的研究 [J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0905003.
- [59] Mirhosseini M, Malik M, Shi Z, *et al.* Efficient separation of the orbital angular momentum eigenstates of light [J]. *Nature Communications*, 2013(4): 2781.
- [60] Strain M J, Cai X, Wang J, *et al.* Fast electrical switching of orbital angular momentum modes using ultra-compact integrated vortex emitters [J]. *Nature Communications*, 2014(5): 4856.
- [61] Cai X, Wang J, Strain M J, *et al.* Integrated compact optical vortex beam emitters [J]. *Science*, 2012, 338(6105): 363-366.
- [62] Huang H, Yue Y, Yan Y, *et al.* Liquid-crystal-on-silicon-based optical add/drop multiplexer for orbital-angular-momentum-multiplexed optical links [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(23): 5142-5145.
- [63] Liu B, Liu J, Chen P, *et al.* Photonic demultiplexer for radio frequency orbital-angular-momentum signals [C] // *IEEE Opto-Electronics and Communications Conference*, 2015: 15650055.
- [64] Wei W, Mahdjoubi K, Brousseau C, *et al.* Generation of OAM waves with circular phase shifter and array of patch antennas [J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(6): 442-443.
- [65] Bian F, Li S, Song Y, *et al.* Generation of wideband radio frequency signals carrying orbital angular momentum based on microwave photonics phase shifter [C] // *IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2014: 14862184.
- [66] Jung Y, Kang Q, Sidharthan R, *et al.* Optical orbital angular momentum amplifier based on an air-hole erbium-doped fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(3): 430-436.
- [67] Ingerslev K, Gregg P, Galili M, *et al.* 12 Mode, MIMO-free OAM transmission [C] // *Optical Fiber Communication Conference*, 2017, M2D: M2D. 1.
- [68] Krenn M, Handsteiner J, Fink M, *et al.* Twisted light transmission over 143 km [C] // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(48): 13648-13653.
- [69] Wang A D, Zhu L, Chen S, *et al.* Characterization of LDPC-coded orbital angular momentum modes transmission and multiplexing over a 50 km fiber [J]. *Optics Express*, 2016. 24(11): 11716-11726.
- [70] Bozinovic N, Kristensen P, Ramachandran S. Long-range fiber-transmission of photons with orbital angular momentum [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2011, CTuB: CTuB1.
- [71] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y X, *et al.* Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers [J]. *Science*, 2013, 340(6140): 1545-1548.
- [72] Nejad R M, Allahverdyan K, Vaity P, *et al.* Orbital angular momentum mode division multiplexing over

- 1.4 km RCF fiber [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, 2016, SW4F: SW4F.3.
- [73] Wang J, Zhu L, Zou K, *et al.* Experimental demonstration of orbital angular momentum (OAM) modes (de) multiplexing and transmission in 2-km fiber with Nyquist 32-QAM coherent detection signals [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, 2016, SW4F: SW4F.2.
- [74] Lai J S, Wu B B, Zhao W Y, *et al.* Application and analysis of orbital angular momentum technology in optical communication [J]. Telecommunications Science, 2014(5): 46-54.
- 赖俊森, 吴冰冰, 赵文玉, 等. 光通信中轨道角动量技术及应用前景分析 [J]. 电信科学, 2014(5): 46-54.
- [75] Milione G, Huang H, Lavery M, *et al.* Orbital-angular-momentum mode (de) multiplexer: a single optical element for MIMO-based and non-MIMO-based multimode fiber systems [C] // Optical Fiber Communication Conference, 2014, M3K: M3K.6.