动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021070504

轨道角动量传输光纤的研究进展

赵丽娟[1,2,3]，姜焕秋[1]，徐志钮[1*]

（华北电力大学 1. 电气与电子工程学院；2. 河北省电力物联网技术重点实验室；
3. 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室，河北 保定 071003）

摘　要： 基于光纤中光子轨道角动量（Orbital Angular Momentum，OAM）的模式复用技术在提高光通信容量方面具有很大的潜力。适合于传输 OAM 模式的光纤通过材料和结构的优化设计逐步实现了 OAM 信号传输更稳定、传输距离更长，OAM 模式更多等特性。文章从光纤的模式叠加理论出发，分析比较了各种传输 OAM 模式光纤的研究成果、优缺点以及适合的应用场景，包括基于传统光纤设计的环状光纤、超模光纤，以及基于光子晶体光纤设计的六角和圆形光子晶体光纤等。最后对适合于传输 OAM 模式光纤的发展前景做了展望。

关键词： 环状光纤；光子晶体光纤；轨道角动量；涡旋光纤；空分复用

中图分类号： TN253　**文章编号：** 1001－5868(2021)06－0776－08

Research Progress of Optical Fiber with Orbital Angular Momentum Transmission

ZHAO Lijuan[1,2,3], JIANG Huanqiu[1], XU Zhiniu[1]

(1. School of Electrical and Electronic Engin.; 2. Hebei Key Lab. of Power Internet of Things Technol.; 3. Baoding Key Lab. of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technol., North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN)

Abstract: Mode multiplexing technology based on orbital angular momentum (OAM) in optical fiber has great potential in increasing the capacity of optical communication. The optical fiber suitable for OAM mode transmission has gradually realized the characteristics of more stable OAM signal transmission and longer transmission distance, as well as support for more OAM transmission modes through the optimized design of materials and structure. Starting from the optical fiber mode superposition theory, it analyzes and compares the research results, advantages and disadvantages, and suitable application scenarios of various optical fibers that can transmit OAM modes, including ring fibers and super-mode fibers designed based on traditional fibers, as well as hexagonal and circular photonic crystal fibers designed based on photonic crystal fibers, etc. Finally, a further prospect is made for the development of the optical fiber that suitable for the transmission OAM mode.

Key words: ring fiber; photonic crystal fiber; orbital angular momentum; vortex fiber; space division multiplexing

0　引言

1992 年 Allen 等提出光束的轨道角动量（Orbital Angular Momentum，OAM）概念，带轨道角动量的光束一般称为涡旋光束，其每一个光子均具有涡旋相位因子 $e^{il\theta}$，因此携带 $L=l\hbar$ 的轨道角动量（其中，l 为拓扑荷数，也叫角向系数；θ 为方位角，也叫径向指数；$\hbar$ 为约化普朗克常量）。自此，对涡旋光束（OAM 光束）的研究在很多领域都有新成果[1]，比如激光导管、光学镊子、光通信系统[2]、量子

收稿日期：2021－07－05.
基金项目：国家自然科学基金项目（51607066）；河北省自然科学基金项目（E2020502010）；中央高校基本科研业务费专项资金项目（2021MS072）.
* **通信作者：**徐志钮

通信等领域。在光纤通信领域，利用 OAM 光束作为载波的模分复用(Mode Division Multiplexing，MDM)成为通信容量瓶颈的潜在解决方法之一。结合 OAM 模式的特殊性以及低损耗长距离传输的要求，设计符合条件的光纤(涡旋光纤)是光轨道角动量复用传输的关键。2009 年 Ramachandran 团队[3]首次提出并进行基于 OAM 的光纤数据传输实验，证明光纤中可以传输涡旋光束。2011 年 Bozinovic 等[4]设计出可以传输阶数 $l=\pm1$ 涡旋光束的光纤，并于 2013 年实验证明光纤中 OAM 模式复用可以传输太比特每秒量级的信息[5]。之后很多学者研究设计了涡旋光纤并侧重提升传输性能[6]。

涡旋光纤的研究成果已经相当丰富，比较分析发现，目前支持的相邻本征模式间有效折射率差最好的情况可达 0.01 以上，可有效抑制光纤中矢量模式的耦合[7]。另外，支持传输的最多 OAM 模式数也已经达到 110 个[8]，这在大容量 OAM 模分复用(MDM)光纤通信系统中具有潜在的应用。现有研究中的部分光纤支持 OAM 模式纯度在理论上接近 100%，可有效降低模式串扰[9]的影响。其他表征涡旋光纤传输性能的参数也在逐步优化，如实现了低平坦色散[10]、低非线性系数(小于 2.65 W^{-1}/km)[11]、低限制损耗(小于 10^{-9} dB/m)[12]。值得注意的是，利用涡旋光纤实现在 OAM 复用传输的实验在传输距离上有所增加[13-14]，已知最长传输距离为 50 km[14]。

本文首先介绍了光纤传输 OAM 光束的理论依据，包括光纤中的模式叠加理论以及传输光纤的设计要求。然后系统地介绍了基于传统光纤和光子晶体光纤设计的涡旋光纤，包括环状光纤、超模光纤、六角光子晶体光纤和圆形光子晶体光纤等。最后，通过涡旋光纤的研究成果、优缺点、适用场景等线索，综述了涡旋光纤的发展现状，并针对特殊充液光纤在轨道角动量模式传输方面的研究做了展望。

1　涡旋光纤的理论分析

光纤中的本征模式包含四种：TE 模、TM 模、EH 模和 HE 模。光纤中的 OAM 模和 LP 模都可以看作是本征模的叠加，而 $OAM^{\pm}_{\pm l,m}$ 模式是由相位差为 $\pi/2$ 的同一阶本征奇偶模线性叠加而成的，l 为拓扑荷数，m 为径向阶数，一般取值为 1，具体叠加方式如下：

$$OAM^{\pm}_{\pm l,m}=HE^{even}_{l+1,m}\pm jHE^{odd}_{l+1,m},\quad l\geqslant 1 \quad (1)$$

$$OAM^{\mp}_{\pm l,m}=EH^{even}_{l-1,m}\pm jEH^{odd}_{l-1,m},\quad l>1 \quad (2)$$

$$OAM^{\mp}_{\pm l,m}=TM_{0,m}\pm TE_{0,m},\quad l=1 \quad (3)$$

OAM 模的偏振一般为矢量圆偏振，上标“±”代表左旋或右旋圆偏振方向，下标“±”代表 OAM 光束波前旋转方向，j 代表 $\pi/2$ 相位。当 $l\geqslant2$ 时，$OAM^{\pm}_{\pm l,m}$ 模式组包含 4 个 OAM 模；当 $l=1$ 时，$OAM^{\pm}_{\pm l,m}$ 模式叠加式为式(1)和(3)，但式(3)中 $TM_{0,m}$ 与 $TE_{0,m}$ 具有不同的传播常数，简并形成的 OAM 模式不稳定，所以此时包含 2 个 OAM 模；$l=0$ 对应光纤基模。

综合式(1)～(3)并结合光纤中 LP 矢量模式叠加原理[15]可以得出，理论上能够稳定传输带轨道角动量光束的光纤设计必须满足以下几个条件：第一，组成 LP 模式的本征模式组间有效折射率差 $\Delta n_{eff}>10^{-4}$，避免耦合成 LP 模式，使 OAM 模式可以稳定传输，以及构成 OAM 模式同一阶本征奇偶模的传播常数相同。第二，涡旋光纤应具有良好的传输特性，可以在较大的波长范围内具有低限制损耗、低平坦色散、低非线性系数。第三，设计的光纤应该有匹配环状 OAM 模场的光纤剖面结构，以及要避免激励更高的径向阶数(避免 $m>1$)。

2　基于传统光纤设计的涡旋光纤

传统光纤是基于光的全反射原理，由玻璃或塑料制成，包含纤芯、包层、涂覆层三个部分的圆柱光波导。常见结构的传统光纤并不能达到传输轨道角动量的要求，需要根据第 1 节中的理论，对光纤进行改进。

2.1　环状光纤

2012 年丹麦技术大学研究组通过实验证明了环状光纤[16]适合传输 OAM 光束。如图 1 所示，环状光纤是在纤芯和包层之间设计一层高折射率层(传输层)，OAM 光束在这个区域中传输。

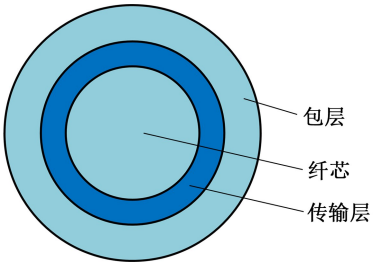


图 1　环状光纤横截面示意图

常见的环状光纤为芯-环光纤，通过对纤芯折射

率的控制，形成可以传输 OAM 光的涡旋光纤，纤芯类型包括固体芯[17]、空气芯[18-20]和折射率呈倒抛物线分布的纤芯[21]。其中，固体纤芯是通过掺杂实现纤芯、传输层及包层之间较大的折射率差，需借助光学器件完成信息传输，实际应用的领域较少[5]。相比于固体纤芯，空气纤芯的折射率为 1，实现了包层、传输层及纤芯之间最大的折射率差，使支持传输的 OAM 模式数增加，但存在损耗大、寿命短、传输距离不理想等缺点。为了弥补上述两种光纤的缺点，有学者提出了纤芯折射率为倒抛物线分布的光纤，此类光纤的模式间有效折射率差比较大，部分模式的群速度色散接近零平坦色散，这对光纤中 OAM 模式的长距离传输具有很大的意义，但其支持传输的模式数量较少。

仅通过改变环状光纤纤芯的折射率来实现 OAM 模传输并不能满足实际光纤通信对 OAM 模式传输数量以及传输距离的要求，因此有研究者通过改进环状光纤传输层等方式来改善传输特性。2014 年 Brunet 等[22-23]和 2015 年黄桂勇等[24]分别在传输层外面加了一层下陷层和高折射率层。随后，2017 年马莹莹等[9]将传输层折射率设计成缓变分布。以上三种方法使环状光纤的传输特性均有所提升。下陷层的存在增加了能够稳定传输的 OAM 模式数量，但需要对色散进行补偿且传输距离有限；而加入高折射率层，一方面增大了模式间的有效折射率差，使传输稳定、损耗降低，另一方面它对材料要求较低，可降低成本；此外，马莹莹的设计优化了模式纯度，有效解决了 OAM 光的拓扑荷突变问题，对光纤的不圆度有较好的容忍性。此外，Zhu 等[25]将传输层与纤芯用包层隔开，设计了如图 2 所示的双导模区环状光纤，以达到分别传输 OAM 模式和基模的目的，两个导模区串扰可以忽略，极大优化了传输性能，该结构光纤也可以应用在量子通信领域。

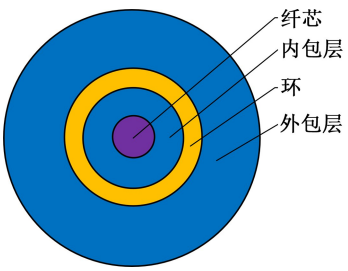


图 2 双导模区环状光纤横截面示意图

针对高密度 OAM 的空分复用，2013 年 Li 等[26]研究出了一种紧凑低串扰多环光纤，因其多模多环(7×18 个 OAM 模)的结构以及在短距离传输时模间串扰和环间串扰均可以忽略，且具有对材料的要求比较宽泛(低损耗的材料即可)等特点，该光纤在实际应用方面有很大的潜力。次年该课题组对此结构又进行了改进，如图 3 所示，将光纤中独立的环状部分加入沟槽，沟槽使得环间串扰降低，且整体的环数有所增加(19×18 个 OAM 模)，光纤结构更加紧实的同时降低了对环的不圆度及光纤弯曲度的要求[27]。相比单信道传输，上述两种结构设计使得传输总容量提高了数万倍，总频谱效应提高了数百倍。

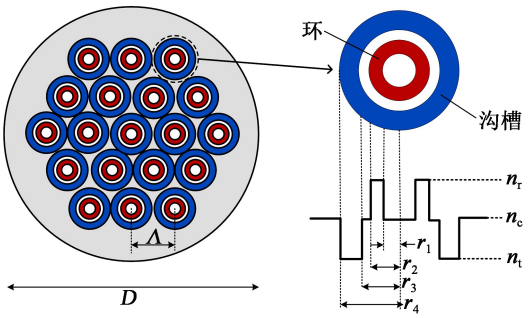


图 3 多环光纤横截面示意图

除了多环结构之外，对环状光纤进行扭转也可以提升涡旋光束传输的鲁棒性。基于传统光纤的扭转目前主要有两种，一种是对空芯光纤的扭转[28]，另一种是对纤芯折射率呈倒抛物线分布光纤的扭转[29]。扭转使得光纤中的介电常数变化，OAM 模式可以表示成具有不同有效折射率和拓扑电荷的本征模态，简并的 OAM 模式随着扭曲率的提高得到分离，进一步促进低串扰超长距离传输。第一种扭转光纤中的 OAM 模态随扭曲率增加而更易分离，同时失去高阶模态，可以用作 OAM 模式滤波器。第

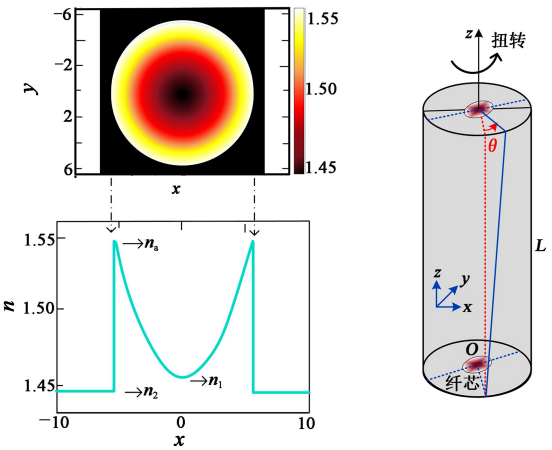


图 4 扭转光纤的横截面及结构示意图

二种扭转的最佳扭曲率(33 rad/m)比第一种扭转的最佳扭曲率(3.8 rad/cm)小一个数量级，其扭转方式如图 4 所示，固体纤芯易于焊接，具有更小的非线性，可以更好地用于 OAM 的复用传输。

2.2　超模光纤

多芯光纤通过各芯耦合产生超模，这样的光纤也称为超模光纤。超模光纤能够传输 OAM 模式的原理与环状光纤的原理相似，只是此类光纤中的 OAM 模式是由相位差为 π/2 的超模叠加而成，且多个纤芯围绕中心呈环形排布。2015 年 Li 等[30]报道了一种结构由等间距且呈环形排列的六个纤芯组成的超模光纤，低模式耦合态下形成 OAM 模，这种结构弥补了芯环结构光纤非线性系数大的不足，在增加了传输距离的同时降低了制备难度，适用于波分复用。图 5 是改进的超模光纤截面图[31]，它将传统多芯光纤与微结构光纤相结合，包层小空气孔和 20 个掺锗纤芯等角分布在中心大空气孔周围，较上一种超模光纤性能显著改善，主要体现在显著增大 OAM 模式数和有效模场面积上。

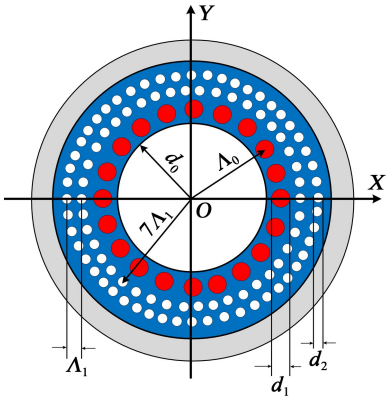


图 5　用于传输轨道角动量的超模光纤截面图

为了更直观地了解一般环状光纤、扭转光纤、多环光纤和超模光纤的特点，将上述各种光纤的传输特性列于表 1，优缺点列于表 2。

表 1　各种环状光纤特性分析表

年份	Δn_{eff}	OAM 模式数	OAM 模式阶数	波长(带宽)/nm	文献
2013	$>10^{-3}$	2	$\|l\|=1$	1 550(10)	[5]
2013	$>10^{-4}$	12	$\|l\|=7\sim9$	1 550	[18]
2015	$>10^{-4}$	12	$\|l\|=5\sim7$	1 530	[19]
2014	$>10^{-4}$	6	$\|l\|=1\sim2$	1 520～1 580(60)	[21]
2014	$>10^{-4}$	34	$\|l\|=1\sim9$	1 550	[22]
2014	$>10^{-4}$	14	$\|l\|=1\sim4$	1 520～1 580(60)	[23]
2015	$>10^{-3}$	10	$\|l\|=1\sim3$	1 550	[24]
2015	$>10^{-4}$	28	$\|l\|=1\sim8$	1 520～1 580(60)	[25]
2017	$>10^{-3}$	16	/	1 550	[9]
2013	$>10^{-4}$	126	$\|l\|=1\sim5$	1 520～1 580(60)	[26]
2014	$>10^{-4}$	342	$\|l\|=1\sim5$	1 520～1 630(110)	[27]
2016	$>10^{-4}$	/	$\|l\|=1\sim7$	1 550	[28]
2020	$>10^{-4}$	22	$\|l\|=1\sim5$	1 550	[29]
2015	$>10^{-4}$	8	$\|l\|=1\sim2$	1 525～1 630(105)	[30]
2019	$>10^{-4}$	56	/	1 000～1 800(800)	[31]

表 2　基于传统光纤设计的传输轨道角动量光纤的优缺点

类型	优点	缺点
一般环状光纤	依赖于本征模的叠加，尺寸小，芯环之间有较高的折射率差，可以减少模间串扰，限制径向高阶模态	模态有效面积小，即非线性系数大，进而导致较大的功率损耗，不利于长距离 OAM 复用传输，不易于制备以及模态激发，且模的利用率较低
扭转光纤	通过对光纤的扭转提高简并标量模之间的简并度，克服环状光纤对模式利用率低的问题	实际制作困难
多环光纤	可用于高密度空分复用，环间串扰和模间串扰小	仅适用于短距离通信
超模光纤	低串扰、低非线性 OAM 传输，具有更大的设计自由度，如芯数、芯尺寸等	光纤内部高折射率柱对光能量的束缚能力较低，存在光能量的泄露

3　基于光子晶体光纤设计的涡旋光纤

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber，PCF)的包层中分布着沿光纤径向周期性排列、沿光纤轴向伸展的空气孔。与传统光纤相比，光子晶体光纤结构的可设计性更强[32]，在提升传输性能方面表现得更为优异。基于光子晶体光纤的涡旋光纤设计与基于传统光纤的涡旋光纤设计原理类似，主要是为了形成一个高折射率的环形层用于涡旋光束的传输。

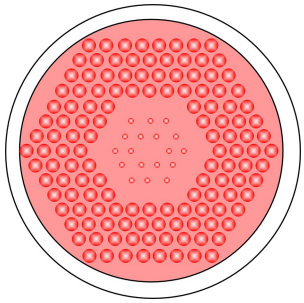
用于传输 OAM 模式的光子晶体光纤的结构种类有很多，根据整体的空气孔排布形式分为圆形光子晶体光纤、六角光子晶体光纤；从所用到的材料分类又可分为一般光子晶体光纤、掺杂微结构光纤以及具有较高折射率背景材料的光子晶体光纤；通过对包层中空气孔的形状和排布方式进行设计又可以将分类细化。下面将分别以圆形光子晶体光纤和六角光子晶体光纤为例分析涡旋光纤，并将详细信息整理在表 3 中。

表 3 不同形状空气孔的涡旋光纤特性分析

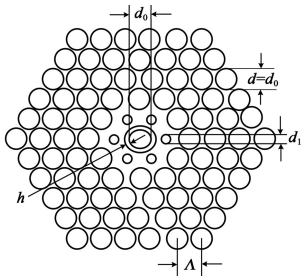
年份	Δn_{eff}	OAM 模式数	波长(带宽)/nm	传输特性			文献
				色散/(ps·km^{-1}·nm^{-1})	限制损耗/(dB·m^{-1})	非线性系数/(km^{-1}·W^{-1})	
2018	$>10^{-4}$	22	1 500～1 600(100)	0～50	10^{-9}～10^{-11} 量级	/	[10]
2017	$>10^{-4}$	2	1 550	/	/	/	[36]
2019	$>10^{-3}$	6	1 350～1 750(400)	色散接近超平坦色散	10^{-6}～10^{2} 量级	<21	[37]
2019	$>10^{-4}$	TLPCF--14 IPGIF--18 SPQCF--10	1 400～1 700(300)	平坦色散	$<1\times10^{-7}$	保持在 10^{-3} 量级	[38]
2018	$>10^{-4}$	30	1 520～1 580(60)	接近零平坦色散	$<10^{-8}$ 量级	/	[45]
2018	$>10^{-4}$	26	1 250～2 100(850)	色散变化范围较大	$<7\times10^{-9}$	/	[46]
2020	$>10^{-4}$	80	1 520～1 580(60)	平坦色散	$\leqslant7\times10^{-8}$	<2.65	[11]
2020	$>10^{-4}$	56	1 400～1 700(300)	低阶模呈低平坦色散	$<5\times10^{-8}$	/	[47]
2019	$>10^{-4}$	50	1 200～2 000(800)	低阶模较平坦,高阶模变化大	短波小长波变大	0.833～2.295	[48]
2018	$>10^{-4}$	46	1 200～2 000(800)	低阶模趋于平坦色散	10^{-7}～10^{-10} 量级	<2.58	[49]
2018	$>10^{-4}$	54	1 500～1 600(100)	所有模式色散趋于平坦色散	10^{-9}～10^{-10} 量级	<4	[50]
2020	$>10^{-4}$	34	1 250～2 000(750)	C 波段色散:<310	变化范围大	<3	[51]
2017	$>10^{-2}$	10	550～710(160)	/	/	/	[7]
2018	$>10^{-3}$	64～76	1 100～1 700(600)	色散较平坦	低至 10^{-7} 量级	<4	[12]
2020	$>10^{-3}$	26	1 200～1 950(750)	所有模式色散趋于平坦色散	5×10^{-6}～4×10^{-10}	≤4	[53]

3.1 六角光子晶体光纤

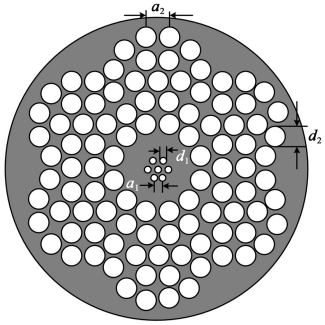
第一个用于 OAM 光束传输的光子晶体光纤是 Yang[33] 以 AS_2S_3 为背景材料设计的六角结构光子晶体光纤,它是对环状光纤的一种模仿,之后也相继出现了很多六角结构的设计,如 Wong 等[34] 设计的螺旋扭曲微结构光纤和 Li 等[35] 设计的光子带隙光纤。以上光纤的六角结构存在较大的不足,例如不能提供足够的圆对称,使得支持的 OAM 模式质量差,限制损耗、非线性系数和色散等特性不是很理想。近些年来,我国很多学者在研究六角结构的涡旋光纤上有很大的突破,如图 6 所示光纤,可以弥补一般六角结构在传输特性上的不足。其中,图 6(a)是 2017 年张羚翔等[36] 设计的实纤芯涡旋光纤,包层中大小两层空气孔之间形成传导涡旋光的高折射率环形层结构;图 6(b)是 2018 年游永等[10] 利用大小混合空气孔以及掺杂环设计的光纤,显著提高了涡旋光传输性能,在长距离 OAM 通信方面有很大应用价值;图 6(c)是 2019 年 Liu 等[37] 设计的双包层六角光子晶体光纤,具有独特的旋转对称晶格排列特征,传输特性在弯曲半径大于 30 μm 时仍表现良好。此外,魏薇等[38] 设计并比较了三种光子晶体光纤,包括三角晶格环形光子晶体光纤(Triangular Lattice Photonic Crystal Fiber)、折射率倒转抛物线式光子晶体光纤(Inverted Parabolic Guiding Index Fiber)和六重准晶涡旋光光子晶体光纤(Sixfold Photonic Quasi-Crystal Fiber),这三种光纤各有优缺点,但整体传输特性都比较好。TLPCF 色散系数小,非线性系数最小,而 SPQCF 的色散相对平坦,以及 IPGIF 的限制损耗相对较小。



(a) 文献[36]设计的光纤截面



(b) 文献[10]设计的光纤截面



(c) 文献[33]设计的光纤截面

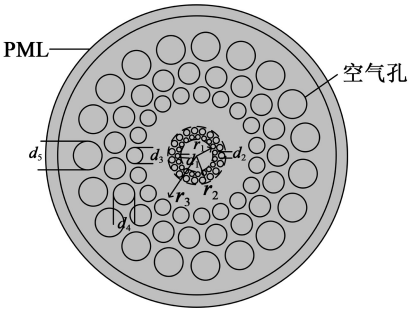
图 6 改进的六角光子晶体光纤

3.2 圆形光子晶体光纤

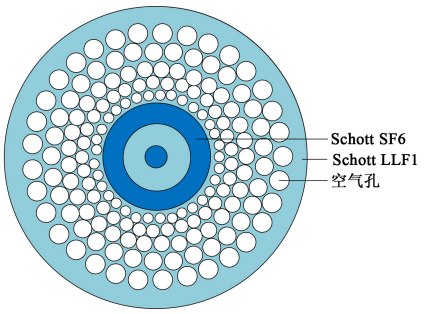
面对六角结构存在的很多不足,Zhang 等[39] 提

出了圆形光子晶体光纤，即其包层内的几层小空气孔呈圆形排布。由于该类光纤的圆形结构与环状 OAM 模式非常吻合，且可以通过调整一些结构参数有效地改善光纤特性，因此之后的学者更多地对圆形光子晶体光纤进行改进，完善其传输性能。早期最典型的圆形光子晶体光纤是通过改变空气孔的大小、层数以及包层与纤芯距离来进行设计[39-43]。其中文献[41]克服了文献[42]因过于追求圆周对称而使每层空气孔大小不一导致制作难度增加的缺点。另外，文献[43]以 AS_2S_3 为背景材料，设计了四层空气孔结构的光纤，在大容量通信和超连续谱产生方面有较好的应用前景。借鉴了基于传统光纤设计的多环光纤以及上述一般圆形光子晶体光纤之后，多环微结构光纤[44]也可以通过整体多环结构及单环中的空气孔辅助实现较低水平的环间串扰，在超高密度短距离 OAM 模式传输上表现得更为优越。再者，在圆形光子晶体光纤内加入一个掺杂环，可以减小模式耦合，提升传输性能。2018 年 Zhang 等[8]提出的光子晶体光纤在内环区域内镶嵌了一个折射率为 1.55 的玻璃材料（紫水晶）环，将所有模式控制在高指数环形区域内，能够支持 110 种 OAM 模式的稳定传输，是目前支持 OAM 模式数最多的光纤结构。

另外，近年来圆形光子晶体光纤在导模区利用方面取得了一些进展，出现了双导模区的涡旋光纤等，如图 7 所示的光纤，每种都有独特的结构和优势。图 7(a)是 Xu 等[45]充分利用空气孔隔离了电磁场设计的涡旋光纤，其串扰小、色散平坦且易于制造，在近距离大容量通信方面具有较大的应用潜力。同年 Wang 等[46]设计了与图 7(a)相似的双导模结构，但后者是以 AS_2S_3 为背景材料且在中心增加一个大的空气孔，该光纤中特征模损耗小于 10^{-9} dB/m，在高速通信上实现了大容量传输。2020 年 Wang 等[11]设计了一种新型嵌套式双导模光子晶体光纤，



(a)　内部利用两层空气孔分离导模区的光纤截面图

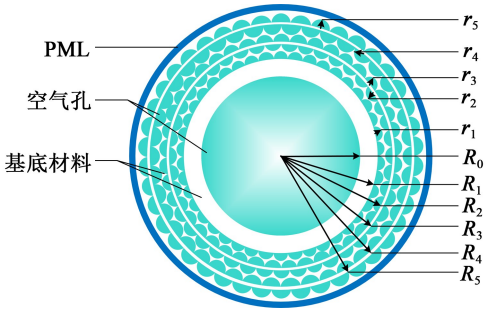


(b)　低折射率环引入使导模区分离的光纤截面图

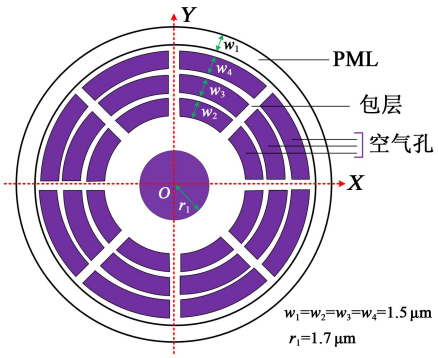
图 7　用于传输轨道角动量的双导模圆形光子晶体光纤

两个导模区均可支持 OAM 模式，有利于 OAM 模式复用。同年[47]该课题组选择了两种肖特玻璃作为背景材料，去掉了上述的内层空气孔，改为低折射率环，如图 7(b)所示，这样的改进使得光纤更容易制造，在更大波段范围内实现低损耗多模式传输。

图 8 展示了部分通过改变包层空气孔形状来优化 OAM 模式传输特性的光子晶体光纤，通过增加包层中空气的填充率，进而增大包层和环形高折射率区的折射率差，且空气孔的圆形排列有效地阻止了高阶模泄露至包层，将 OAM 模式更好地限制在光纤环形区域。包层的空气孔可以是矩形[48-49]、扇形，以及各种形状的混合[50-51]，还有乔文等设计的柚子型微结构光纤[7]以及李伟等设计的支架式中空环形芯微结构光纤[52]，这些光纤都能稳定地传输 OAM 模式，有些甚至具有很高的可制作性和广泛的应用前景。其中，柚子型微结构光纤以全反射为原理进行导光，0.01 以上的较大折射率差能将传输光限制在纤芯中而不依赖光子禁带效应，有效改善一般涡旋光纤模式间串扰的问题。另外，其成熟的制作工艺为复用提供了可行性。而支架式中空环形芯微结构光纤避免了高阶 OAM 模式在支撑壁内形成谐振模式，从而降低了光纤的损耗，为基于 OAM 光束的光纤传输和传感奠定了基础。图 8(a)为半圆空气孔的光子晶体光纤的截面图[12]，在不同的背



(a)　半圆空气孔 PCF 截面图



(b) 包层中为链型空气腔的光纤截面图

图 8 对圆形光子晶体光纤包层中空气孔的改进

景材料下可以支持 64～76 种 OAM 模式,其中以 SiO_2 为背景材料的光纤最具实用性,能传输 74 种 OAM 模式且表现出良好的通信性能。图 8(b)在包层中采用了三层链型空气腔[53],不仅在传输 OAM 模式上表现出平坦色散、低损耗、低非线性系数等良好特性,在编码方面也可以有很好的应用前景。

4 总结与展望

涡旋光纤的设计主要是采用类环结构使相邻矢量模式之间形成较高的有效折射率差,这可以确保 OAM 模式能够稳定传输,并不断在材料、结构上进行结构优化以提高传输性能。基于光子晶体光纤的涡旋光纤设计具有结构多样性,成为当前最热的研究方向。鉴于涡旋光纤设计大部分还处于仿真阶段,实现其工艺化以及大规模应用也是重要的研究方向。

结合本文对涡旋光纤的分析,可以尝试从充液光纤入手进行涡旋光纤的设计,基于空心的传统光纤或空心的光子晶体光纤填充液体(水、乙醇等),在实现近零超平坦色散上较为突出,使传输更加稳定,但用于传输轨道角动量的充液光纤设计较少,是需要突破的研究方向。涡旋光纤的设计是一个不断完善的过程,随着问题的提出以及研究的深入,涡旋光纤将是解决现存通信问题的一种非常有潜力的方式。

参考文献:

[1] Padgett M J. Orbital angular momentum 25 years on[J]. Optics Express, 2017, 25(10): 11265-11274.

[2] 王 伟, 李晓记, 杜卫海, 等. 水下轨道角动量可见光通信研究进展[J]. 光通信技术, 2019, 43(5): 13-18.
Wang W, Li X J, Du W H, et al. Research progress of underwater orbital angular momentum-based visible light communication[J]. Optical Communication Technol., 2019, 43(5): 13-18.

[3] Ramachandran S, Kristensen P, Yan M F. Generation and propagation of radially polarized beams in optical fibers[J]. Opt. Lett., 2009, 34(16): 2525-2527.

[4] Bozinovic N, Kristensen P, Ramachandran S. Long-range fiber-transmission of photons with orbital angular momentum [C]// IEEE Lasers & Electro-optics, 2011: 1188-1189.

[5] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, et al. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers[J]. Science, 2013, 340(6140): 1545-1548.

[6] 陈鹤鸣, 白秀丽. 轨道角动量光通信关键技术研究进展[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2020, 40(5): 125-133.
Chen Heming, Bai Xiuli. Research progress on key technologies of orbital angular momentum optical communication[J]. J. of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2020, 40(5): 125-133.

[7] 乔 文, 高社成, 雷 霆, 等. 轨道角动量模式在柚子型微结构光纤中的传输[J]. 中国激光, 2017, 44(4): 190-195.
Qiao Wen, Gao Shecheng, Lei Ting, et al. Transmission of orbital angular momentum in grapefruit-type microstructure fiber[J]. Chinese J. of Lasers, 2017, 44(4): 190-195.

[8] Zhang L, Zhang K, Peng J, et al. Circular photonic crystal fiber supporting 110 OAM modes [J]. Optics Communications, 2018, 429: 189-193.

[9] 马莹莹, 陈鹤鸣, 白秀丽. 一种新型的缓变折射率环形 OAM 传输光纤[J]. 光通信研究, 2017(2): 43-46.
Ma Yingying, Chen Heming, Bai Xiuli. A new type of graded-index ring fiber supporting multi-OAM modes[J]. Study on Optical Communications, 2017(2): 43-46.

[10] 游 永, 黄 薇, 陈胜勇, 等. 支持 22 个轨道角动量模式的低平坦色散微结构光纤[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 97-102.
You Yong, Huang Wei, Chen Shengyong, et al. Flat and low dispersion microstructured optical fiber for supporting 22 orbital angular momentum mode[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 97-102.

[11] Wang W, Sun C, Wang N, et al. A design of nested photonic crystal fiber with low nonlinear and flat dispersion supporting 30+50 OAM modes[J]. Optics Communications, 2020, 471: 125823.

[12] Lei Y, Xu X, Wang N, et al. Numerical analysis of a photonic crystal fiber for supporting 76 orbital angular momentum modes[J]. J. of Optics, 2018, 20(10): 105701.

[13] Wang A, Du C, Zhu G, et al. 18 km low-crosstalk OAM+WDM transmission with 224 individual channels enabled by a ring-core fiber with large high-order mode group separation [J]. Opt. Lett., 2018, 43(8): 1890-1893.

[14] Wang H, Liang Y, Zhang X, et al. Low-loss orbital angular

momentum ring-core fiber: design, fabrication and characterization[J]. J. of Lightwave Technol., 2020, 38(22): 6327-6333.

[15] 韩　凯，崔文达，奚小明，等. 弱导阶跃折射率光纤中的模式简并问题[J]. 红外与激光工程，2020，49(4)：120-130.
Han Kai, Cui Wenda, Xi Xiaoming, et al. Study on mode degeneracy in weakly guiding step index fiber[J]. Infrared and Laser Engin., 2020, 49(4): 120-130.

[16] Bozinovic N, Golowich S, Kristensen P, et al. Control of orbital angular momentum of light with optical fibers[J]. Opt. Lett., 2012, 37(13): 2451-2453.

[17] Brunt C, Ung B, Belanger P A, et al. Vector mode analysis of ring-core fibers: design tools for spatial division multiplexing[J]. J. of Lightwave Technol., 2014, 32(23): 4648-4659.

[18] Gregg P, Kristensen P, Golowich S, et al. Stable transmission of 12 OAM states in air-core fiber[C]// Cleo. IEEE, 2013: 1-2.

[19] Gregg P, Kristensen P, Ramachandran S. Conservation of orbital angular momentum in air-core optical fibers[J]. Optica, 2015, 4(9): 1115-1116.

[20] Ramachandran S, Gregg P, Kristensen P, et al. On the scalability of ring fiber designs for OAM multiplexing[J]. Opt. Express, 2015, 23(3): 3721-3730.

[21] Ung B, Vaity P, Wang L, et al. Few-mode fiber with inverse-parabolic graded-index profile for transmission of OAM-carrying modes[J]. Opt. Express, 2014, 22(15): 18044-18055.

[22] Brunet C, Vaity P, Messaddeq, et al. Design, fabrication and validation of an OAM fiber supporting 36 states[J]. Opt. Express, 2014, 22(21): 26117-26127.

[23] Brunet C, Ung B, Messaddeq Y, et al. Design of an optical fiber supporting 16 OAM modes[C]// IEEE Optical Fiber Communication Conf., 2014.

[24] 黄桂勇，周守利，覃亚丽，等. 改进环光纤结构中轨道角动量模式特性分析[J]. 激光与光电子学进展，2015，52(8)：114-117.
Huang Guiyong, Zhou Shouli, Qin Yali, et al. Modal characteristics analysis of orbital angular momentum in a modified ring fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 114-117.

[25] Zhu M, Zhang W, Xi L, et al. A new designed dual-guided ring-core fiber for OAM mode transmission[J]. Optical Fiber Technol., 2015, 25: 58-63.

[26] Li S, Wang J. Multi-orbital-angular-momentum multi-ring fiber for high-density space-division multiplexing[J]. IEEE Photonics J., 2013, 5(5): 7101007.

[27] Li S, Wang J. A compact trench-assisted multi-orbital-angular-momentum multi-ring fiber for ultrahigh-density space-division multiplexing (19 rings × 22 modes)[J]. Scientific Reports, 2014, 4(1): 3853.

[28] Ye Jingfu, Yan, et al. Excitation and separation of vortex modes in twisted air-core fiber[J]. Opt. Express, 2016, 24(8): 8310-8316.

[29] Zhang Z, Liu X, Wei W, et al. The simulation of vortex modes in twisted few-mode fiber with inverse-parabolic index profile[J]. IEEE Photonics J., 2020, 12(3): 1-8.

[30] Li S, Wang J. Supermode fiber for orbital angular momentum (OAM) transmission[J]. Opt. Express, 2015, 23(14): 18736-18745.

[31] Wang W, Xu H D, Yang Q H, et al. Large mode area microstructured fiber supporting 56 super-OAM modes[J]. Opt. Express, 2019, 27(20): 27991-28008.

[32] 赵丽娟，梁若愚，徐志钮. 光子晶体光纤的设计与应用研究综述[J]. 半导体光电，2020，41(4)：464-471.
Zhao Lijuan, Liang Ruoyu, Xu Zhiniu. Review of designs and applications of photonic crystal fiber[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2020, 41(4): 464-471.

[33] Yue Y, Zhang L, Yan Y, et al. Octave-spanning supercontinuum generation of vortices in an AS_2S_3 ring photonic crystal fiber[J]. Opt. Lett., 2012, 37(11): 1889-1891.

[34] Wong, KI G. Excitation of orbital angular momentum resonances in helically twisted photonic crystal fiber[J]. Science, 2012, 337(6093): 446-449.

[35] Haisu L, Guobin R, Bofeng Z, et al. Guiding terahertz orbital angular momentum beams in multimode kagome hollow-core fibers[J]. Opt. Lett., 2017, 42(2): 179-182.

[36] 张羚翔，魏　薇，张志明，等. 环形光子晶体光纤中涡旋光的传输特性研究[J]. 物理学报，2017，66(1)：112-117.
Zhang Lingxiang, Wei Wei, Zhang Zhiming, et al. Propagation properties of vortex beams in a ring photonic crystal fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(1): 112-117.

[37] Liu E, Tan W, Yan B, et al. Robust transmission of orbital angular momentum mode based on a dual-cladding photonic quasi-crystal fiber[J]. J. of Phys. D: Appl. Phys., 2019, 52(32): 325110.

[38] 魏　薇，张羚翔，张志明，等. 三种涡旋光光子晶体光纤的设计[J]. 光学学报，2019，39(9)：93-99.
Wei Wei, Zhang Lingxiang, Zhang Zhiming, et al. Design of three vortex photonic crystal fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 93-99.

[39] Zhang H, Zhang W, Xi L, et al. A new type circular photonic crystal fiber for orbital angular momentum mode transmission[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2016, 28(13): 1426-1429.

[40] Zhang H, Zhang X G, Li H, et al. A design strategy of the circular photonic crystal fiber supporting good quality orbital angular momentum mode transmission[J]. Optics Communications, 2017, 397: 59-66.

（下转第 798 页）

[2] Martin T, Dixon P, Gagliardi M A, et al. 320×240 pixel InGaAs/InP focal plane array for short-wave infrared and visible light imaging[J]. Proc. SPIE, 2005, 5726: 85.

[3] Enriquez M D, Blessinger M A. Performance of high resolution visible-InGaAs imager for day/night vision[J]. Proc. SPIE, 2008, 6940: O-1-9.

[4] Martin T, Brubaker R, Dixon P, et al. 640×512 InGaAs focal plane array camera for visible and SWIR imaging[J]. Proc. SPIE, 2005, 5738: 12.

[5] Manda S, Matsumoto R. High-definition visible-SWIR InGaAs image sensor using Cu-Cu bonding of Ⅲ-Ⅴ to silicon wafer[J]. Proc. IEEE, 2019: 978-1-7281-4032-2/19.

[6] 董绪丰，杜 林. 基于VB程序的自动化控制倒装焊技术[J]. 半导体光电，2015，36(2)：226-228，232.
Dong Xufeng, Du Lin. Automatization of flip chip bonding technology based on VB program [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(2): 226-228, 232.

[7] 董绪丰，李 政，王 艳. FPA探测器微细间隙填充工艺研究[J]. 半导体光电，2013，34(1)：103-105.
Dong Xufeng, Li Zheng, Wang Yan. Research on fine pitch underfill process of FPA ultraviolet detector[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013, 34(1): 103-105.

作者简介：

莫才平(1973—)，男，高级工程师，主要从事Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体光电子器件的研制。

(上接第783页)

[41] Tian W, Zhang H, Zhang X G, et al. A circular photonic crystal fiber supporting 26 OAM modes[J]. Optical Fiber Technol., 2016, 30: 184-189.

[42] Zhou G, Zhou G, Cheng C, et al. Design and analysis of a microstructure ring fiber for orbital angular momentum transmission[J]. IEEE Photonics J., 2017, 8(2): 1-12.

[43] Hu Z A, Huang Y Q, Luo A P, et al. Photonic crystal fiber for supporting 26 orbital angular momentum modes[J]. Opt. Express, 2016, 24(15): 17285-17291.

[44] Chen C, Zhou G, Zhou G, et al. A multi-orbital-angular-momentum multi-ring micro-structured fiber with ultra-high-density and low-level crosstalk[J]. Opt. Communications, 2016, 368: 27-33.

[45] Xu M, Zhou G, Chen C, et al. A novel micro-structured fiber for OAM mode and LP mode simultaneous transmission [J]. J. of Optics, 2018, 47(4): 428-436.

[46] Wang N, Xie J L, Jia Hongzhi, et al. A low confinement loss double-photonic crystal fibre over 850 nm bandwidth with 26 orbital angular momentum modes transmission[J]. J. of Modern Optics, 2018, 65(18): 2060-2066.

[47] Wang W, Wang N, Li K, et al. A novel dual guided modes regions photonic crystal fiber with low crosstalk supporting 56 OAM modes and 4 LP modes[J]. Optical Fiber Technol., 2020, 57: 102213.

[48] 白秀丽，陈鹤鸣，张凌菲. 轨道角动量模传输的圆环形光子晶体光纤[J]. 红外与激光工程，2019，48(2)：224-231.
Bai Xiuli, Chen Heming, Zhang Lingfei. Circular photonic crystal fiber supporting orbital angular momentum modes transmission[J]. Infrared and Laser Engin., 2019, 48(2): 224-231.

[49] Bai X I, Chen H M, et al. Design of a circular photoniccrystal fiber with square air-holes for orbital angular momentum modes transmission [J]. Optik, 2018, 158: 1266-1274.

[50] 杨红红. 新型OAM光子晶体光纤的设计与性能分析[D]. 南京：南京邮电大学，2018.
Yang Honghong. Design and performance analysis of a novelphotonic crystal fiber for OAM mode transmission[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecom., 2018.

[51] 王 霏，肖平平. 具有混合形状空气孔的OAM传输光纤设计研究[J]. 光电子·激光，2020，31(3)：254-261.
Wang Fei, Xiao Pingping. Design and performance of fiber with hybrid shape air holes for OAM mode transmission[J]. J. of Optoelectronics·Laser, 2020, 31(3): 254-261.

[52] 伍淑坚，杜 城，罗文勇，等. 环形纤芯结构光纤设计与制备技术研究[J]. 光通信研究，2020，4(4)：31-36，67.
Wu Shujian, Du Cheng, Luo Wenyong, et al. Research on design and fabrication technology of annular core structure fiber [J]. Study on Optical Commun., 2020, 4(4): 31-36, 67.

[53] Hassan M M, Kabir M A, Hossain M N, et al. Photonic crystal fiber for robust orbital angular momentum transmission: design and investigation [J]. Optical and Quantum Electron., 2020, 52(1): 1-14.

作者简介：

赵丽娟(1981—)，女，博士，副教授，主要研究方向为光纤传感与光纤通信；

徐志钮(1979—)，男，博士，副教授，主要研究方向为分布式光纤传感器及其在电气设备状态监测和故障诊断中的应用。