

# 微结构光纤的研究进展及展望

夏长明, 周桂耀\*

华南师范大学广州市特种光纤光子器件与应用重点实验室, 广东 广州 510006

**摘要** 微结构光纤(MOF)在结构和性能上的优越性引起了国内外光纤研究人员的广泛兴趣,成为光电子学领域的前沿热点,并得到了快速发展。MOF 根据结构可分为实芯 MOF 和空芯 MOF,根据传输机理可分为全内反射型 MOF、光子带隙型 MOF 和反谐振 MOF 等多种类型,在激光技术、光传感技术、光通信技术、光电子集成和光纤器件等领域具有重要应用。本文综述了 MOF 的发展历程,并对 MOF 的种类、传输机理、结构设计和控制进行了全面分析和归纳,为未来 MOF 的研究及应用提供借鉴。

**关键词** 光纤光学; 微结构光纤; 带隙微结构光纤; 空芯反谐振光纤; 稀土掺杂微结构光纤

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170603

## Progress and Prospect of Microstructured Optical Fibers

Xia Changming, Zhou Guiyao\*

Guangzhou Key Laboratory for Special Fiber Photonic Devices and Applications,  
South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

**Abstract** The structure and performance advantages of microstructured optical fibers (MOFs) have aroused an immense interest from researchers both locally and internationally, and the MOF emerges as a hot spot in the field of optoelectronics. Currently, according to the structure, MOF can either be solid-core or hollow-core. With respect to the transmission mechanism, they can be categorized as total internal reflection MOF, photonic bandgap MOF, and anti-resonant MOF. The important applications of MOF can be found in laser technology, optical sensing technology, optical communication technology, optoelectronic integration, and optical fiber devices. This paper conducts a review on the development history of MOF, presents a comprehensive analysis and summary of their various types, transmission mechanism, design, and fabrication, and provides a reference for exploring new research directions and applications of MOF in the future.

**Key words** fiber optics; microstructured optical fiber; photonic bandgap microstructured fiber; hollow core anti-resonant fiber; rare-earth doped microstructured fiber

**OCIS codes** 060.4005; 060.2280; 060.3510

## 1 引言

微结构光纤(MOF),也称光子晶体光纤(PCF)或多孔光纤(HF)。1991年,英国南安普顿大学的 Russell 教授<sup>[1]</sup>首次提出光子晶体光纤的概念,这一概念源于 1987 年 Yablonovitch<sup>[2]</sup>提出的光子晶体的概念。Yablonovitch 等<sup>[3]</sup>发现,某些动物体表艳丽的

色彩是由于其体表周期性结构可以吸收某些波长的光,也可以反射某些波长的光,于是把这种结构命名为光子晶体。1996年,英国南安普顿大学的 Knight 课题组<sup>[4]</sup>成功研制了世界上第一根光子晶体光纤。自此,光子晶体光纤受到了国内外专家学者的密切关注,成为光电子学发展的前沿热点<sup>[1,5]</sup>。随着光子晶体的光纤功能越来越突出,光纤结构已不再按照严格

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2019-05-31; 录用日期: 2019-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(61575066,61527822,61735005)、国家重点研发计划(2018YFB0407403)、广东省重点领域支持研发计划(2018B010114002)、广东省高等学校珠江学者岗位计划(2017)、广东省基金项目(2017A030313333)

\* E-mail: zguyao@163.com

的光子晶体理念设计和制备,而是更多地强调其功能化,逐渐被“微结构光纤”这一概念取代<sup>[6-9]</sup>。近20年来,微结构光纤的设计、制备和应用开发得到迅速发展,极大地促进了光纤激光技术<sup>[10-13]</sup>、光纤传感技术<sup>[14-15]</sup>、光通信技术<sup>[16-18]</sup>、光电子集成<sup>[19]</sup>、激光传输技术的发展<sup>[20-22]</sup>。

## 2 微结构光纤的结构及导光机理

微结构光纤的结构灵活可调,克服了传统光纤较难或无法克服的技术难题,使其具有传统光纤无法比拟的光学特性,如无截止单模<sup>[23]</sup>、高非线性<sup>[24]</sup>、高双折射<sup>[25]</sup>、大模场<sup>[26]</sup>、色散可调等<sup>[27-29]</sup>。微结构光纤根据传输机理可分为全内反射型微结构光纤、光子带隙型微结构光纤和反谐振微结构光纤<sup>[30]</sup>等,而根据其结构则可分为实芯微结构光纤和空芯微结构光纤<sup>[1,5]</sup>。

### 2.1 实芯微结构光纤

实芯微结构光纤也称折射率引导型光纤,其典型结构如图1所示,由纤芯及其周围呈周期排列的空气孔组成的包层构成。该种光纤的导光机理为全内反射(M-TIR)<sup>[31-32]</sup>,纤芯折射率 $n_{\text{core}}$ 大于包层的有效折射率 $n_{\text{cladding}}$ ,满足全反射光在高折射率纤芯中的传输要求。一般采用归一化频率 $V$ <sup>[33]</sup>确定光纤的导光模式数, $V$ 的定义为

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{cladding}}^2}, \quad (1)$$

式中: $a$ 为纤芯半径; $\lambda$ 为波长; $n_{\text{core}}$ 为纤芯折射率; $n_{\text{cladding}}$ 为包层的有效折射率。

实芯微结构光纤随着结构及功能的不同而逐渐演化出非线性微结构光纤、大模场面积微结构光纤、稀土掺杂微结构光纤、少模微结构光纤、轨道角动量(OAM)微结构光纤等。

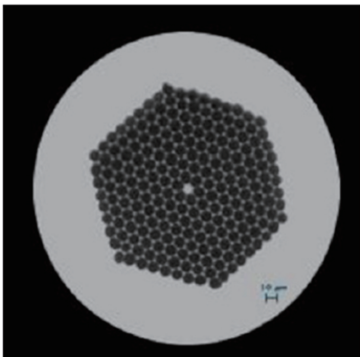


图1 实芯微结构光纤的端面图

Fig. 1 Cross-section of solid core microstructured optical fiber

### 2.2 空芯微结构光纤

空芯微结构光纤根据其导光机理不同,可分为空芯光子带隙微结构光纤和空芯反谐振微结构光纤。

#### 2.2.1 空芯光子带隙微结构光纤

空芯光子带隙微结构光纤的纤芯一般充满空气或其他气体,其结构如图2所示。与全内反射型光纤不同,空芯光子带隙微结构光纤的导光机理为光子带隙(PBG)效应<sup>[34]</sup>,其原理如图3所示。在光子带隙光纤中,高低折射率材料交替排列,形成周期性结构,该结构可以产生光子晶体带隙,类似于半导体中的禁带,周期排列的低折射率位点距离大小相同,导致一定距离大小的“光子晶体”只对一定频率的光产生能带效应,从而将光约束在纤芯中。为了实现光子带隙效应,空芯光子带隙微结构光纤的空气填充率一般大于90%,空气填充率的计算公式为

$$f = \frac{\pi d}{2\sqrt{3}\Lambda}, \quad (2)$$

式中: $f$ 为空气填充率; $d$ 为空气孔直径; $\Lambda$ 为孔间距。基于带隙效应,光可以只在低折射率的纤芯中传输,从而极大地降低了传输损耗。纤芯可根据实际需要进行调整,可以是3芯、7芯、19芯及37芯,结构如图4所示。

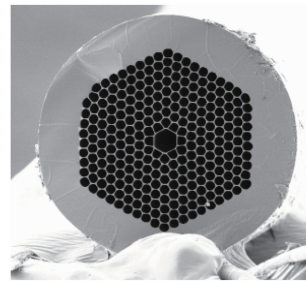


图2 空芯光子带隙微结构光纤的端面图

Fig. 2 Cross-section of hollow core photonic bandgap microstructured optical fiber

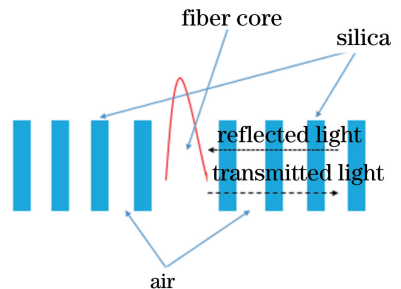


图3 光子带隙微结构光纤导光机理示意图

Fig. 3 Light guiding principle in microstructured optical fiber with hollow core photonic bandgap

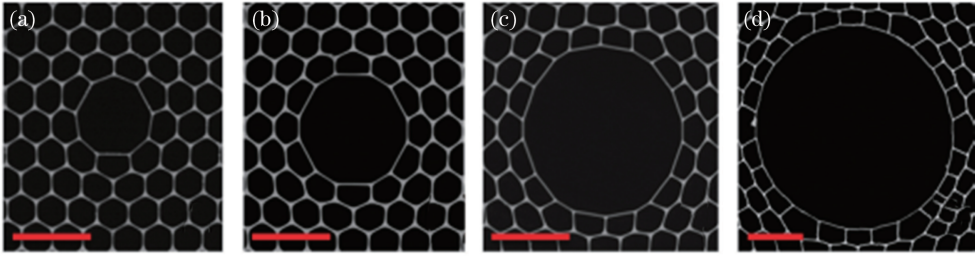


图 4 空芯光子带隙微结构光纤的端面图<sup>[35]</sup>。(a) 3 芯;(b) 7 芯;(c) 19 芯;(d) 37 芯  
Fig. 4 Cross-sections of microstructured optical fiber with hollow core photonic bandgap<sup>[35]</sup>.  
(a) 3 cores; (b) 7 cores; (c) 19 cores; (d) 37 cores

### 2.2.2 空芯反谐振微结构光纤

空芯微结构光纤的家族成员除了空芯光子带隙微结构光纤外,还有一种新型光纤——反谐振空芯光纤<sup>[36]</sup>,其典型结构如图 5 所示,包层仅由一层空气孔组成。该光纤的导光机理与空芯带隙光纤导光机理不同,其导光机理如图 6 所示<sup>[31]</sup>。包层内壁高折射率石英脉区构成的结构可以看作一个法布里-珀罗(F-P)谐振腔,在共振状态时,F-P 腔可以看成是透明状态,光从包层泄漏出去;在反共振状态时,F-P 腔的反射系数非常高,将光限制在纤芯中。

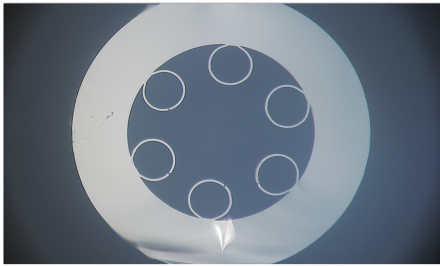


图 5 空芯反谐振光纤的端面图

Fig. 5 Cross-section of hollow core antiresonant fiber

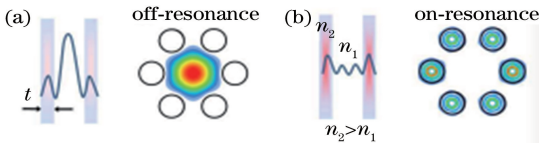


图 6 空芯反谐振微结构光纤的导光原理图<sup>[31]</sup>。

(a) 反谐振;(b) 谐振

Fig. 6 Light guiding principles of hollow core antiresonant fiber<sup>[31]</sup>. (a) Antiresonant; (b) resonant

空芯反谐振微结构光纤的反谐振窗口位置一般可以表示为

$$\lambda_y = \frac{2t}{m} \sqrt{n^2 - 1}, \quad (3)$$

式中: $\lambda_y$  为反谐振波长; $t$  为石英脉区的宽度; $n$  为石英玻璃的折射率; $m$  为整数,与波导的共振数相

对应。

## 3 微结构光纤的制备工艺

微结构光纤的结构特点决定了微结构光纤制备工艺的复杂性。整个制备工艺主要分为光纤预制棒制备和光纤拉制两个过程。光纤预制棒制备是制备微结构光纤的重要环节,直接决定了微结构光纤的结构。

### 3.1 堆积控制工艺

玻璃毛细管堆积拉制工艺是微结构光纤制备工艺中使用最广泛的工艺,根据谷歌搜索,搜索词为“stack and draw fiber”时,可以搜索到 1590 万个结果。第一根光子晶体光纤和第一根空芯光子带隙光纤均采用堆积法拉制而成<sup>[4,34]</sup>。无论微结构光纤的结构简单还是复杂,基本上均可以采用堆积拉制工艺制备,同时,此工艺还可适用于不同材料的光纤<sup>[37-38]</sup>。堆积拉伸工艺流程如图 7 所示<sup>[39]</sup>,主要包括以下步骤:1)毛细玻璃管、棒的拉制;2)将毛细玻璃管通过堆积法堆积成所设计的光纤结构;3)加入外套管构成微结构光纤预制棒;4)在 1800~2000 °C 的高温下,利用特种光纤拉丝塔拉制成光纤棒;5)将光纤棒置于支撑管内,在 1800~2000 °C 的高温下,利用特种光纤拉丝塔拉制成微结构光纤,并涂敷、绕盘。

微结构光纤的制备工艺<sup>[39]</sup>除了上文提及的堆积拉制工艺外,还有一些其他的制备工艺,如挤压工艺<sup>[40]</sup>、机械钻孔法<sup>[41]</sup>、激光打孔法<sup>[42]</sup>,以及 3D 打印工艺<sup>[43]</sup>等。

### 3.2 挤压工艺

挤压工艺是玻璃光纤制备的常用工艺,常用来制备硫化物玻璃光纤、氟化物玻璃光纤等,这是由于玻璃的熔点低,比较适合采用挤压操作。图 8 为微结构光纤的挤压示意图,其中,1 为容器,2 为加热炉,3 为模具,4 为真空管。

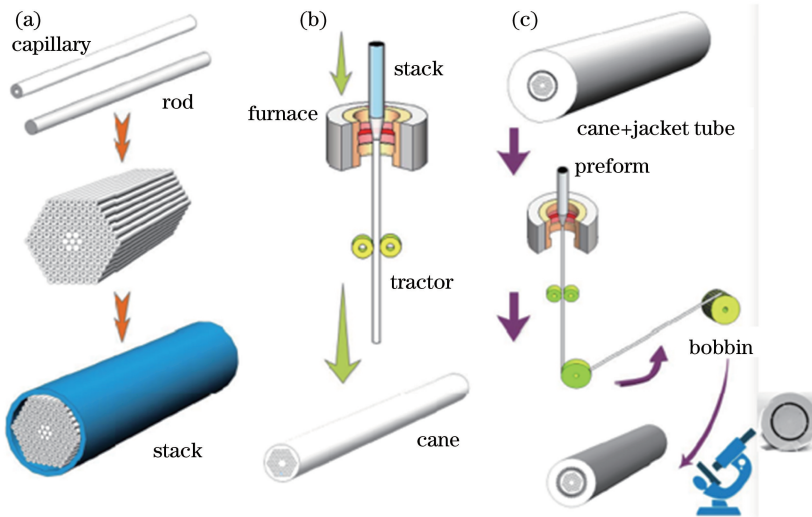


图 7 堆积法制备微结构光纤的流程图。(a)采用堆积法制备光纤预制棒;(b)光纤棒的拉制;(c)光纤的拉制  
Fig. 7 Flow chart of microstructured optical fiber fabrication by stack and draw method. (a) Fabrication of fiber preform by stack and draw method; (b) drawing of fiber cane; (c) drawing of fiber

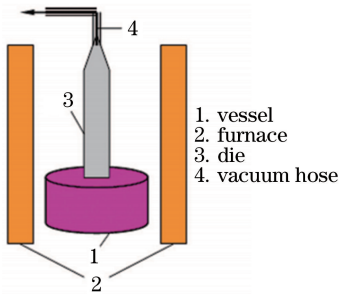


图 8 微结构光纤挤压示意图<sup>[44]</sup>

Fig. 8 Extrusion of microstructured optical fibers<sup>[44]</sup>

2002 年,Ravi Kanth Kumar 等<sup>[40]</sup>利用挤压工艺制备出软玻璃光子晶体光纤,并用 1550 nm 光源激发,在 350~2200 nm 波长范围内获得了超连续光谱(SC),如图 9 所示。

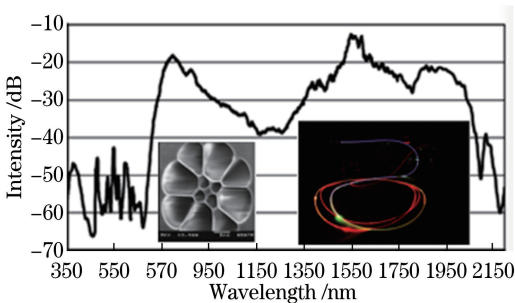


图 9 挤压法制备的微结构光纤及其超连续谱<sup>[40]</sup>  
Fig. 9 Microstructured optical fibers fabricated by extrusion method and supercontinuum spectrum<sup>[40]</sup>

2003 年,Ravi Kanth Kumar 等<sup>[45]</sup>采用挤压工艺制备了碲酸盐玻璃微结构光纤,如图 10 所示,并分析了该光纤的光学性能。

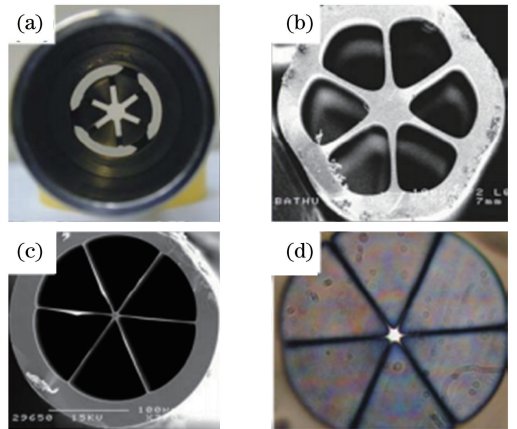


图 10 挤压工艺制备的碲酸盐玻璃微结构光纤<sup>[45]</sup>。(a)挤压模具的截面图;(b)碲酸盐玻璃预制棒;(c)碲酸盐玻璃光子晶体光纤的扫描电镜图;(d)碲酸盐玻璃光子晶体光纤的光传输图

Fig. 10 Tellurite MOF fabricated by extrusion process<sup>[45]</sup>. (a) Cross-section of die used for extrusion; (b) tellurite preform; (c) scanning electron microscope image of tellurite PCF; (d) optical transmission view of tellurite PCF

2006 年,燕山大学的 Zhou 等<sup>[44]</sup>利用挤压工艺制备了 SF<sub>6</sub>玻璃微结构光纤,开辟了国内用挤压工艺制备玻璃光子晶体光纤的先例,并利用此光纤在 400~1400 nm 范围内实现了超宽带连续谱,如图 11 所示。

随着微结构光纤制备技术的发展,挤压技术由于费时费力(如挤压光纤后模具要长时间清洗),且模具成本比较高,逐渐退出了历史舞台,但仍有人在

使用该工艺进行玻璃微结构光纤的制备。

### 3.3 机械钻孔与激光打孔法

采用机械钻孔或激光打孔技术研制微结构光纤预制棒,并将其拉制成微结构光纤,是对传统微结构光纤制备工艺的补充,也为研制复杂结构的微结构光纤开辟了新途径。

2007年,英国南安普顿大学的 Webb 等<sup>[41]</sup>利用机械打孔的方式制备了石英悬垂芯微结构光纤,并将其应用于倏逝场传感。2013年,德国耶拿光子技术研究所的 Becker 等<sup>[42]</sup>报道了利用激光打孔技术制备的微结构光纤。2015年,宁波大学戴世勋教授团队利用机械打孔方法制备了硫化物玻璃光子晶体光纤<sup>[46]</sup>,制备工艺及光纤结构如图 12 所示,结果表明,该光纤具有很高的光束质量、热稳定性以及力学稳定性。

### 3.4 3D 打印工艺

3D 打印技术作为一项新的制造技术已在机械制造、医疗、航空航天、建筑等领域得到了广泛应用。

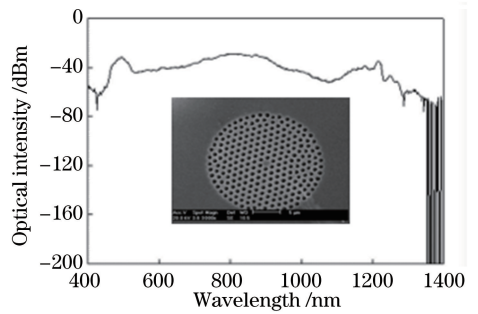
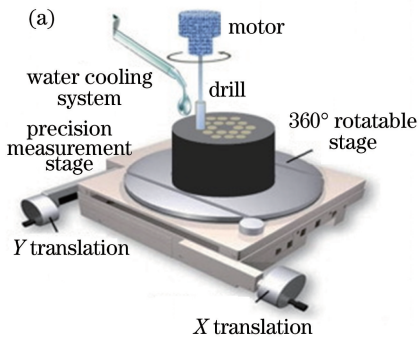


图 11 挤压工艺制备的 SF<sub>6</sub> 微结构光纤及其超连续谱<sup>[44]</sup>  
Fig. 11 SF<sub>6</sub> microstructured optical fibers fabricated by extrusion process and supercontinuum spectrum<sup>[44]</sup>

随着光纤 3D 打印技术的突破<sup>[47-49]</sup>,3D 打印微结构光纤成为现实,图 13 所示为麻省理工学院提出的高精度玻璃 3D 打印技术。随着 3D 技术在微结构光纤制备、应用等领域的日渐成熟,制备结构更复杂的微结构光纤预制棒将不再是难题,从而极大地解决了人工制备微结构光纤预制棒耗时费力的问题。

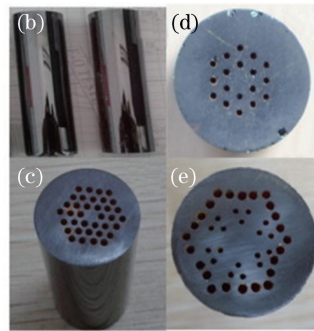


图 12 机械打孔法制备硫化物玻璃微结构光纤的装置示意图以及玻璃、预制棒照片<sup>[46]</sup>。(a)机械打孔装置示意图;  
(b)硫化物玻璃棒;(c)~(e)预制棒

Fig. 12 Diagram of sulphide glass microstructured optical fibers fabricated by mechanical drilling and photos of sulphide glass rods and preforms<sup>[46]</sup>. (a) Equipment of mechanical drilling; (b) sulphide glass rods; (c)-(e) prepared preforms

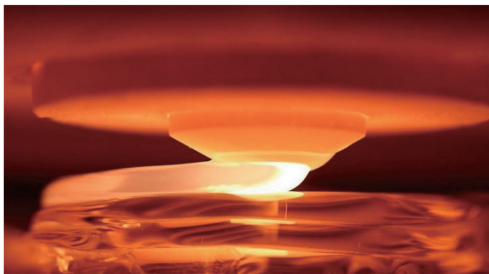


图 13 麻省理工学院提出的高精度玻璃 3D 打印技术<sup>[47]</sup>  
Fig. 13 3D printing technology based glass with high precision from Massachusetts Institute of Technology<sup>[47]</sup>

2015年,澳大利亚悉尼大学的 Cook 等<sup>[50]</sup>报道了利用 3D 打印预制棒制备的空气结构光纤,图 14 为该光纤结构及导光图,光纤预制棒材料为改进的

丁二烯聚合物。此外,3D 打印工艺可用于软玻璃光纤的打印,也可以用于石英玻璃光纤的打印。

2015年7月,英国工程与物理科学研究委员会投资 110 万英镑用于南安普顿大学 3D 打印光纤预制棒的技术攻关。南安普顿大学的 Sahu 教授认为,3D 打印技术将会使复杂结构光纤的制备变得更加容易,同时他希望这项新技术生产的石英或玻璃微结构光纤能用于通信、传感、光纤实验室(lab in a fiber)、金属材料光纤及高功率光纤激光器<sup>[51]</sup>。3D 打印技术将改变通信与数据传输工业<sup>[52]</sup>。2016年,英国阿斯顿大学的 Zubel 等<sup>[53]</sup>利用 3D 打印技术制备了聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)空芯光纤预制棒,如图 15 所示,并将其拉制成空芯光纤。尽管该结构

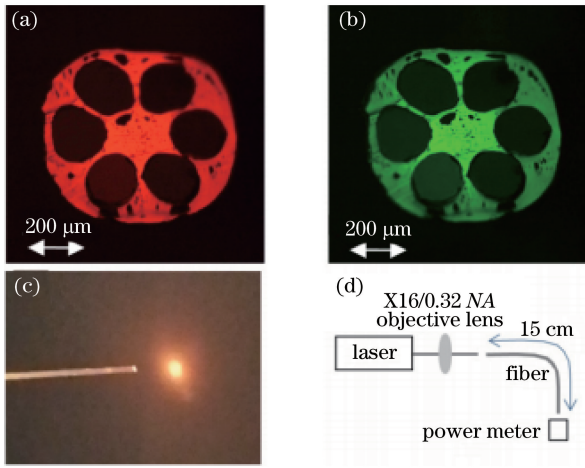


图 14 3D 打印丁二烯聚合物 (SBP) 微结构光纤及导光图<sup>[50]</sup>。(a) 630 nm 导光;(b) 515 nm 导光;(c) 白光;(d) 导光测试装置示意图

Fig. 14 Microstructured optical fibers from 3D printed SBP preform and transmission of light<sup>[50]</sup>. (a) 630 nm guided light; (b) 515 nm guided light; (c) white light; (d) schematic of setup used for guidance test

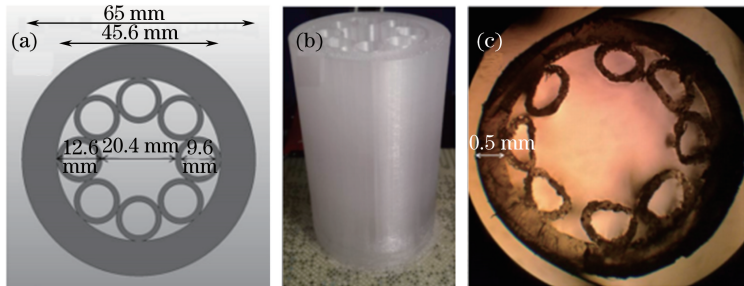


图 15 3D 打印塑料微结构光纤的设计图及预制棒、光纤端面照片<sup>[53]</sup>。(a) PMMA 空芯光纤预制棒设计图;(b) 3D 打印空芯光纤预制棒;(c) PMMA 空芯光纤端面

Fig. 15 3D printed PMMA microstructured optical fibers and photos of preforms and cross-section of fiber<sup>[53]</sup>. (a) Design of PMMA hollow core fiber preform; (b) 3D printed hollow core fiber preform; (c) cross-section of PMMA hollow core fiber

#### 4.1 实芯微结构光纤

微结构光纤灵活的结构特征赋予其传统光纤所不具有的特性,如高非线性、大模场面积、高双折射、无限单模特性等,这些特性使得微结构光纤具有不同的功能。特性决定应用,而微结构光纤的应用市场及需求又决定了微结构光纤的发展方向。实芯微结构光纤是微结构光纤家族最重要、技术最成熟的部分,家族成员包含非线性光子晶体光纤、大模场面积光子晶体光纤、无限单模光子晶体光纤、保偏光子晶体光纤、OAM 光子晶体光纤等,在光纤通信、光纤传感、光纤激光器、光纤传能、光纤器件等领域已得到了广泛应用。

不完美,但却为 3D 打印塑料反谐振微结构光纤的拉制提供了参考。

2017 年,阿卜杜拉国王科技大学的 Bertoncini 等<sup>[43]</sup>利用 3D 打印技术在单模光纤端面上打印出了锥形光子晶体光纤结构,用于改变光模场直径。同年,3D 打印石英玻璃材料取得突破性进展,为 3D 打印技术应用于复杂结构微结构光纤的制备创造了条件<sup>[54]</sup>。

未来,正如上述南安普顿大学 Sahu 教授所认为的那样,3D 打印技术将会使复杂结构光纤的制备变得更加容易,这项新技术生产的石英或玻璃微结构光纤也将用于通信、传感、光纤实验室、金属材料光纤、高功率光纤激光器<sup>[51]</sup>等领域。同时,3D 打印微结构光纤技术在其他的许多方面有待开发,包括理论、增材制造、相关设备等。

#### 4 微结构光纤研究及应用进展

本节内容将依据微结构光纤的结构,从实芯微结构光纤和空芯微结构光纤两个方面介绍微结构光纤研究及应用的进展情况。

##### 4.1.1 非线性光子晶体光纤

光子晶体光纤最典型的特性是高非线性,非线性系数高达  $30 \sim 400 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ ,是传统光纤的几倍甚至几十倍。高非线性光子晶体光纤纤芯小,模场面积小,对光具有极强的限制作用,单位面积光强极大,有利于光纤非线性效应的产生。同时,零色散点可调特性使高非线性光纤具有单零色散、双零色散、三零色散等特性,零色散波长可位于 800, 1064, 1550 nm 波段及  $2 \mu\text{m}$  波段,甚至具有色散平坦高非线性特性。这些特性使得高非线性光子晶体光纤在超连续谱产生、拉曼放大、四波混频、光参量放大、波长转换、光学相干层析、光电对抗等方面具有广泛

应用<sup>[55-56]</sup>。目前市场上已出现了成熟的高非线性光子晶体光纤,如 NKT Photonic 公司的高非线性光子晶体光纤系列<sup>[57]</sup>、长飞公司的高非线性光子晶体光纤系列<sup>[58]</sup>、武汉长进激光技术有限公司的高非线性光子晶体光纤系列<sup>[59]</sup>。此外,国内外已有部分机构利用高非线性光子晶体光纤研制出可实用化的超宽带超连续谱光源,如:NKT 推出 SuperK 系列高功率超连续谱光源<sup>[60]</sup>,其波长为 400~2400 nm,输出功率为 1~10 W,重复频率为 20~320 MHz,该光源的市场份额在超连续光源领域占主导地位;武汉安扬激光技术有限公司推出了一系列超连续谱光源,其平均功率大于 20 W,重复频率大于 200 MHz,光谱范围覆盖 400~2400 nm<sup>[61]</sup>。高非线性光子晶体光纤的广泛应用也推动着国内外科研机构及高校投入到高非线性光子晶体光纤的研究中,并取得了一定进展。2017 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的廖梅松研究员带领的团队在超连续谱用非线性光子晶体光纤方面取得了突破性进展<sup>[62]</sup>,他们研制出了适合 1  $\mu\text{m}$  掺镱光纤激光器抽运的光子晶体光纤,如图 16 所示,其外径为 120  $\mu\text{m}$ ,纤芯直径为 5  $\mu\text{m}$ ,零色散波长为 1040 nm。该光纤在 1055 nm 飞秒光纤激光器的抽运下,获得了光谱覆盖整个可见光波段的超连续谱输出。

华南师范大学与广州华仁亿和特种光纤有限公司联合推出了一种可用于超连续光源的高非线性光子晶体光纤<sup>[63]</sup>,并将其推向市场。该光纤在 800 nm 飞秒脉冲的抽运下可以实现 465~2500 nm 的超宽带输出,带宽高达 2000 nm,并且利用色散效应可以进一步将光谱延伸到深紫外区<sup>[64]</sup>。2018 年,燕山的 Liu 等<sup>[65]</sup>利用锥形掺 Yb<sup>3+</sup> 光子晶体光纤实现了波长从 388 nm 到 1590 nm 的超宽连续谱输出。

#### 4.1.2 大模场面积光子晶体光纤

近 30 年来,光纤激光器因光束质量好、光光转换效率高、散热性能好、体积小而成为国内外激光领域的研究热点。稀土掺杂工艺的改进及双包层光纤技术使得目前单根掺镱双包层光纤的输出功率已达到千瓦量级<sup>[66-68]</sup>。根据最新的报道,国外商业化光纤激光器输出功率已达 500 kW<sup>[69]</sup>,其发射的激光由多束光纤激光叠加耦合而成。国内掺镱光纤激光器的输出功率也已达到了 20 kW<sup>[70]</sup>。然而,传统的光纤激光器因受到受激拉曼散射、受激布里渊散射<sup>[71]</sup>、热损伤等效应的影响,难以大幅提高单个激光器的输出功率。光子晶体光纤灵活的结构特性可以有效实现大模场面积,减小光纤的非线性效应,提高

热损伤、光损伤阈值。同时,光子晶体光纤的空气孔结构也有利于大功率激光器的散热。因此,大模场面积光子晶体光纤在光纤激光器方面得到了广泛应用和深入研究。2001 年,英国巴斯大学的 Wadsworth 等<sup>[72]</sup>报道了第一根掺镱大模场面积光子晶体光纤。2005 年,法国 Limpert 等<sup>[73]</sup>利用 48 cm 的长棒状大模场面积掺 Yb<sup>3+</sup> 光子晶体光纤获得 120 W 的激光输出(相当于 250 W/m),斜率效率为 74%,如图 17 所示。目前 NKT 公司已将棒状掺镱光子晶体光纤产业化,并推向市场进行销售<sup>[74]</sup>。

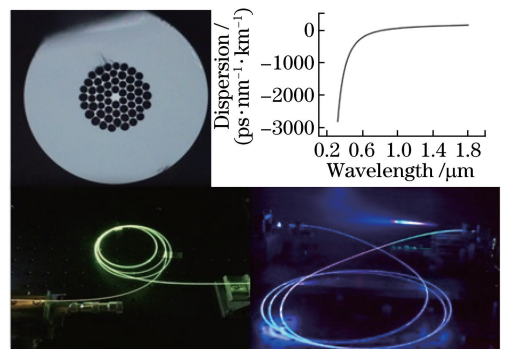


图 16 高非线性光纤及其超连续谱<sup>[62]</sup>

Fig. 16 High-nonlinearity fibers and supercontinuum spectrum<sup>[62]</sup>

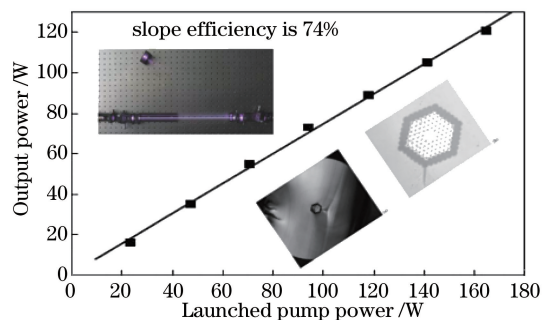


图 17 棒状大模场面积掺 Yb<sup>3+</sup> 光子晶体光纤结构图及激光的斜率效率<sup>[73]</sup>

Fig. 17 Large mode area Yb<sup>3+</sup> doped photonic crystal fiber rod and laser slope efficiency<sup>[73]</sup>

2012 年, Gaida 等<sup>[75]</sup>利用芯径为 80  $\mu\text{m}$  的棒状掺镱光子晶体光纤实现了超过 20 W 的激光输出,激光的斜率效率为 27.8%,如图 18 所示。

2012 年, Kadwani 等<sup>[76]</sup>利用掺镱偏振光子晶体光纤实现了激光输出,斜率效率如图 19 所示,光束质量  $M^2$  小于 1.5,所用光纤纤芯直径为 50  $\mu\text{m}$ ,包层直径为 250  $\mu\text{m}$ ,占空比为 0.18,光纤偏振消光比为 15 dB。2014 年,深圳大学的阮双琛教授团队<sup>[77]</sup>报道了一种基于掺镱光子晶体光纤的双通道超荧光光源,如图 20 所示。

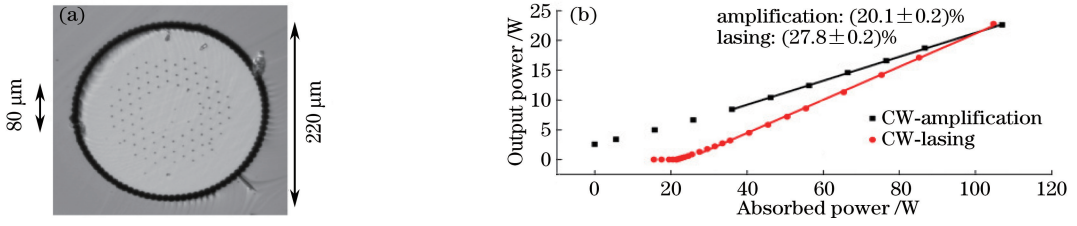


图 18 (a)棒状掺铥微结构光纤端面图以及(b)激光的斜率效率、放大斜率效率<sup>[75]</sup>

Fig. 18 (a) Cross section of  $Tm^{3+}$  doped photonic crystal fiber rod and laser and (b) amplification slope efficiencies<sup>[75]</sup>

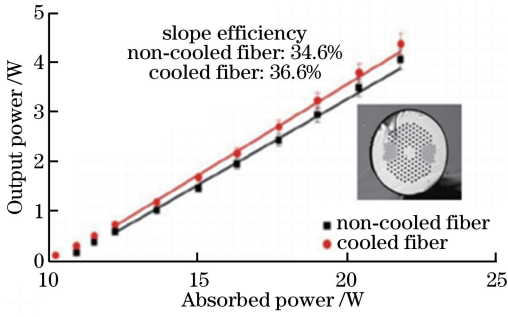


图 19 掺铥偏振光子晶体光纤及其斜率效率<sup>[76]</sup>

Fig. 19 Slope efficiencies and cross-section of  $Tm^{3+}$  doped photonic crystal fiber<sup>[76]</sup>

为满足大模场面积光子晶体光纤在高功率光纤激光器中的需求,国内的众多科研机构已投入到大模场面积光子晶体光纤的设计、制备研发中,

如燕山大学、武汉邮电科学研究所、华中科技大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、上海大学、华南师范大学、华南理工大学等。2017年,中国科学院上海光学精密机械研究所石英光纤材料课题组在大模场有源光子晶体光纤的研制方面取得了重要进展,成功制备了纤芯直径大于  $50\ \mu m$ 、数值孔径  $NA$  小于 0.03 的大芯径光子晶体光纤,光纤结构如图 21 所示,并在皮秒脉冲放大器中实现了平均功率超过百瓦、单脉冲能量大于微焦量级的高光束质量输出(光束质量  $M^2 < 1.5$ )。该项技术打破了国际上仅由 NKT 公司等极少数公司掌握的高亮度大模场光子晶体光纤制备技术的垄断,为我国发展大能量超短脉冲光纤激光放大器奠定了核心激光材料基础<sup>[78]</sup>。

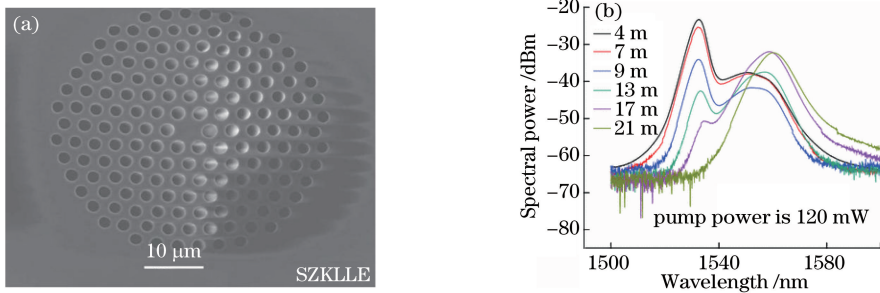


图 20 (a)掺铒光子晶体光纤结构及(b)随光纤长度变化的超荧光光谱图<sup>[77]</sup>

Fig. 20 (a) SEM image of  $Er^{3+}$  doped photonic crystal fiber cross section and (b) superfluorescence spectrum varying with fiber length<sup>[77]</sup>

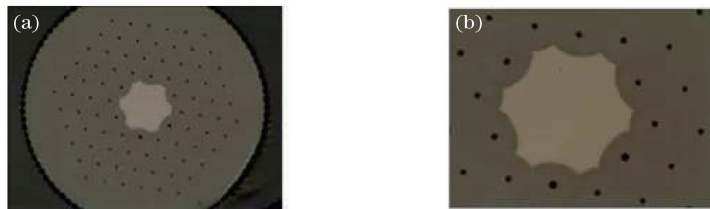


图 21 大模场掺铒光子晶体光纤的端面图<sup>[78]</sup>。(a)全貌;(b)局部放大

Fig. 21 Cross-section of  $Yb^{3+}$  doped photonic crystal fiber with large mode area<sup>[78]</sup>.

(a) Whole image; (b) locally enlarged image

大模场面积光子晶体光纤的应用也推动着光纤研制技术的发展。为了实现光子晶体光纤的大模场

面积,同时也为了实现高功率光纤激光器,与新技术结合的方式成为制备新型大模场面积光子晶体光纤



的一种趋势,并出现了多种大模场光纤预制棒的制备技术。2007年, Pedrazza 等<sup>[79]</sup>将溶胶-凝胶技术用于掺镱大模场面积光纤的制备;胡丽丽教授团队<sup>[80-83]</sup>采用此方式制备了大模场面积掺镱、掺铥光子晶体光纤;德国 Leich 等<sup>[84]</sup>提出了粉末烧结的非化学气相沉积技术,并将其用于研制大模场掺镱光纤,该技术也可用于掺镱光子晶体光纤的制备;华南师范大学特种光纤研究中心<sup>[85-88]</sup>分别采用等离子体非化学气相沉积技术、激光烧结技术制备掺镱、掺铥大模场光子晶体光纤;华中科技大学的李进延教授团队<sup>[89-90]</sup>采用玻璃分相技术和改进的化学气相沉积技术研制出掺镱大模场光子晶体光纤;德国莱布尼兹光子技术研究所、Heraeus Quarzglas 股份有限公司<sup>[91-92]</sup>采用 Repusil 技术研制出掺镱大模场光子晶体光纤,并将其用于高功率单模光纤激光器的开发中。大模场面积光子晶体光纤除了可应用于高功率光纤激光器的开发中<sup>[93]</sup>,也可以用于超短脉冲光纤激光器、放大器的研发中,同时也可以进行高功率、超短脉冲激光传输、远距离传能等,如用于千瓦级高

功率激光清洗装备、海岛间信能同传光电转换装置等。

#### 4.1.3 OAM 光子晶体光纤

OAM 自 1992 年由 Allen 等<sup>[94]</sup>提出以来,受到了人们的广泛关注。OAM 光束又叫涡旋光束,该光束的等相位面是涡旋状旋转的,具有相位奇异性。对于涡旋光束中的光子,其相位项为  $\exp(il\varphi)$  ( $l$  为角量子数,也称为拓扑电荷数,一般为整数; $\varphi$  为空间方位角),每个光子携带  $l\hbar$  (约化普朗克常量) 的轨道角动量,图 22 展示了  $l=3$  时的 OAM 相位波前和场强分布。从图 22 可以看出,涡旋光束的场强呈圆环状分布,光束的中心是一个光强为零的暗点,光束在光传播过程中始终保持中心光场强度为零。2012 年,华中科技大学的王健教授团队<sup>[95]</sup>提出利用涡旋光束的轨道角动量作为除了频率、振幅、相位之外的一个新的自由度在空间上进行复用、解复用,可以获得 2.56 Tbit/s 的传输速率。自此,结合密集波分复用(DWDM)等传统通信技术,OAM 空间光通信的传输速率屡创新高。

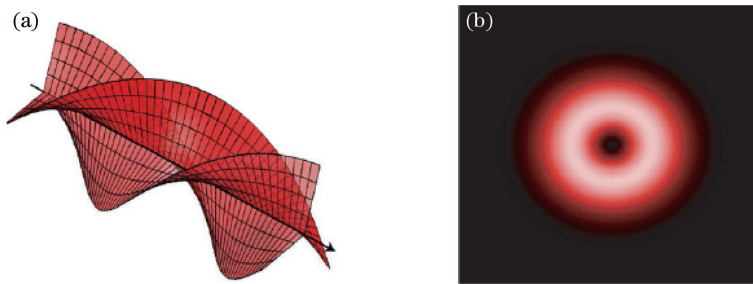


图 22 OAM 光束相位波前与场强分布( $l=3$ )。(a)螺旋相位波前;(b)光场强度分布

Fig. 22 Phase wavefront and field intensity distribution of OAM beams ( $l=3$ ). (a) Spiral phase wavefront; (b) optical field intensity distribution

2015 年,深圳大学、暨南大学、华为技术有限公司联合实验室报道了 160 Tbit/s 的空间传输速率<sup>[96]</sup>。虽然涡旋光束在空间光通信中取得了巨大进展,但空间光通信易受外界环境的干扰,不利于远距离传播<sup>[97]</sup>。因此,利用涡旋光纤,尤其是利用 OAM 光子晶体光纤进行 OAM 模式的稳定传输就成了当下 OAM 光通信的研究热点。目前对于涡旋光束的产生和传输,大多依然采用传统硅基芯片或环型芯光纤,这种方式面临的最大问题是模式耦合串扰,其次是缺乏成熟的涡旋光束产生或传输的小型化集成、模分离器件等,同时传统环型芯光纤传输 OAM 模式数非常有限。为解决此问题,用高折射率差光纤可同时解决模式数有限及模式耦合串扰的问题,而光子晶体光纤可以有

效增大折射率差,缓解模式耦合串扰问题,增加可传导的 OAM 模式数<sup>[98]</sup>。但 OAM 光子晶体光纤也面临着一些其他问题,如损耗,尤其是在长距离传输过程中。此外,色散也是 OAM 光子晶体光纤面临的问题。目前对于 OAM 光子晶体光纤的研究大多集中在理论研究方面<sup>[99-102]</sup>,通过改变光纤结构、材料来实现 OAM 传输。Kim 等<sup>[103]</sup>提出一种光子准晶体光纤(PQF)来支持多达 38 个轨道的 OAM 模式,在 C+L 波段具有平坦的色散特性。南京邮电学院的陈鹤鸣教授<sup>[104]</sup>带领的团队提出了一种新型的圆形光子晶体光纤(C-PCF),其包层上有方形气孔,可以支持更多的轨道角动量模式,如图 23 所示。为了优化设计,他们研究了 OAM 模式数与光纤结构参数的关系,仿真结果表明,所

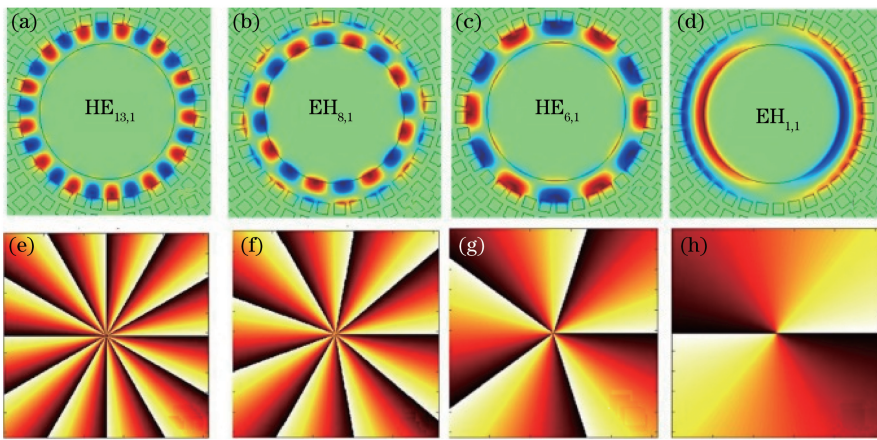


图 23 方孔 C-PCF 支持的模式及相位图<sup>[104]</sup>。(a)  $HE_{13,1}$ 、(b)  $EH_{8,1}$ 、(c)  $HE_{6,1}$ 、(d)  $EH_{1,1}$  模式强度分布图；(e)  $OAM_{12,1}$ 、(f)  $OAM_{9,1}$ 、(g)  $OAM_{5,1}$ 、(h)  $OAM_{2,1}$  模式波前

Fig. 23 Modes supported by proposed C-PCF and wavefront distributions<sup>[104]</sup>. Field intensities of (a)  $HE_{13,1}$ , (b)  $EH_{8,1}$ , (c)  $HE_{6,1}$ , and (d)  $EH_{1,1}$  modes; wavefronts of (e)  $OAM_{12,1}$ , (f)  $OAM_{9,1}$ , (g)  $OAM_{5,1}$ , and (h)  $OAM_{2,1}$  modes

设计的 C-PCF 在  $1.2 \sim 2.0 \mu\text{m}$  的  $800 \text{ nm}$  带宽范围内可以稳定地支持 46 种 OAM 模式<sup>[104]</sup>。目前, OAM 光子晶体光纤支持的 OAM 模式可达 110 个之多<sup>[105]</sup>。

除了单芯 OAM 光子晶体光纤外,多芯 OAM 光子晶体光纤也是未来发展的一个方向,通过增加通道大大提高了 OAM 光子晶体光纤的容量及速率。华南师范大学特种光纤研究中心<sup>[106-107]</sup>成功制备了可支持 36 个模式的多芯光子晶体光纤。此外,空芯光子带隙光子晶体光纤也可以应用于涡旋光的传输<sup>[108]</sup>。

面对 OAM 光子晶体光纤巨大的应用前景,世界各国研究者竞相投入到 OAM 光子晶体光纤的研究中。在国内,OAM 光纤通信的研究尚处于理论研究和实验摸索阶段。中山大学、暨南大学、华中科技大学、烽火通信科技等高校和企业 OAM 光纤通信的理论、实验方面做了一些相关工作<sup>[109-111]</sup>。

#### 4.2 光子带隙型微结构光纤

自 1999 年英国巴斯大学的 Russell 等在 *Science* 上报了第一根空芯光子带隙光纤以来,空芯光子带隙光纤的研究序幕就此揭开,其后由于制备工艺的改进,其导光性能快速提升,其应用也获得了迅速发展。2003 年,美国康宁公司的 Smith 等<sup>[112]</sup>在 *Nature* 上报了低损耗空芯带隙光纤,获得带宽超过  $400 \text{ nm}$  的传输窗口, $1500 \text{ nm}$  波长处的损耗小于  $13 \text{ dB/km}$ 。随着工艺的改进,光子带隙光纤的损耗不断降低。2004 年,英国巴斯大学的 Mangan 等<sup>[113]</sup>将空芯光子带隙光纤在  $1565 \text{ nm}$  处的损耗降至  $1.7 \text{ dB/km}$ 。2005 年,英国巴斯大学的

Roberts 等<sup>[114]</sup>将光子晶体光纤损耗降至  $1.2 \text{ dB/km}$ ,2005 年底,损耗降至  $0.75 \text{ dB/km}$ <sup>[115]</sup>,但由于表面模的限制,很难进一步降低空芯带隙光纤的损耗。这些表面模不仅会减小有效带宽,还会增加色散和色散斜率。2008 年,巴斯大学的 Amezcua-Correa 等<sup>[116]</sup>认为,当纤芯周围的壁厚为包层壁厚的  $1/2$  时,可以抑制表面模。空芯光子带隙光纤损耗的降低,让人们看到了空芯光纤的应用前景,各国研究机构纷纷投入大量人力、资金进行研究。国外研究光子带隙型微结构光纤的机构主要有英国南安普顿大学、日本北海道大学、英国巴斯大学、新加坡南洋理工大学、丹麦科技大学、德国埃朗根-纽伦堡大学的马克斯-普朗克研究小组、康宁公司、耶鲁大学、剑桥大学、斯坦福大学、美国光学学会等。在国内,许多课题组也积极地加入到光子带隙型微结构光纤的研究行列中,如:天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光实验室、华中科技大学武汉光电国家实验室、华南师范大学、清华大学、南开大学、北京邮电大学、燕山大学、北京工业大学、香港理工大学、重庆大学等。但是相对国外的研究水平来说,国内在光子带隙型微结构光纤的设计、制备和实验研究方面都存在着很大差距,还有许多问题处于探索和实验阶段。

空芯光子带隙光纤的研究极大地推动了其市场应用。早在 2006 年,Honeywell 公司的 Sanders 等<sup>[117]</sup>首次将空芯微结构光纤用于光纤陀螺仪的研究。2012 年,斯坦福大学的 Terrel 等<sup>[118]</sup>利用 NKT Photonics 公司生产的 HC-1550-PM-01 型 7 芯保偏空芯微结构光纤制作了混合型光纤谐振腔。2014

年, Epple 等<sup>[119]</sup>利用空芯光子晶体光纤搭建了里德伯系统对量子信息进行了研究。英国科学家宣称他们利用基于模式复用的 37 芯空芯光子带隙光纤(HC-PBGF)创造出了 73.7 Tbit/s 传输速率的新纪录。南安普顿大学光电子研究中心高级研究员 Jung 等<sup>[120]</sup>制造了世界上第一根 37 芯的低损耗宽带 HC-PBGF, 其内部不存在表面模式和低串扰。近年来, 空芯光子带隙微结构光纤在气体光纤激光器、高能激光传输、粒子操控、传感、生物医学等领域得到极大推广和应用, 但空芯光子带隙光纤制备工艺的复杂性使得对空芯光子带隙微结构光纤制备方面的投入严重不足, 重应用研究、轻基础研究也是目前在空芯光子带隙微结构光纤方面存在的主要问题。

### 4.3 反谐振空芯光纤

空芯反谐振光纤是在空芯带隙光子晶体光纤基础上提出并发展起来的。当空芯带隙微结构光纤的纤芯内壁呈负曲率结构或呈内旋线结构时, 它将以反谐振导光机理进行传输。2011 年, 英国巴斯大学的 Wang 等<sup>[121]</sup>在降低笼木式光纤损耗方面取得了突破性进展, 提出一种内旋线芯笼木式空芯微结构光纤, 将纤芯周围的石英壁设计为内旋线式, 成功地将损耗降至小于 100 dB/km。同年, 俄罗斯科学院光纤光学研究中心的 Pryamikov 等<sup>[122]</sup>提出了一种石英空芯微结构光纤, 其纤芯边缘为负曲率曲线, 该光纤除了在紫外、可见光及近红外波段存在低损耗窗口外, 在波长大于 3.5  $\mu\text{m}$  的中红外区域也存在一个低损耗传输窗口。根据反谐振的导光机理, Pryamikov 等认为如果纤芯周围的石英壁厚度一致, 减少或使纤芯远离这些改变壁厚的节点, 可以有效降低反谐振微结构光纤的损耗, 并使共振波长处的高损带变窄, 增大导光范围。2012 年, 英国巴斯大学的 Yu 等<sup>[123]</sup>提出一种低损耗空芯微结构光纤, 其纤芯内壁的内旋式结构使其成为一种类似冰淇淋结构的空芯微结构光纤, 该光纤在 3~4  $\mu\text{m}$  波段形成了一个传输窗口, 最小损耗值为 34 dB/km@3050 nm。这种由管式相互接触式反谐振微结构光纤改进而成的非接触式反谐振微结构光纤, 大大降低了光纤的损耗, 并且其高损区域不断被压缩。随着对这种光纤研究的不断深入, 人们发现它具有众多优势, 是一种理想的传输光纤。2014 年, 华南师范大学研制出了可传输可见光的六边形反谐振微结构光纤, 并将其应用于 750 nm 激光的传输<sup>[124]</sup>, 还基于该空芯微结构光纤研制出多种传感器

件<sup>[125-126]</sup>。2014 年, 巴斯大学的 Belardi 等<sup>[127]</sup>在前期研究的基础上提出了嵌套环型反谐振空芯光纤, 这种设计理念的优势在于能够极大地降低光纤的约束损耗, 同时这种光纤可以用于可见光波段传输, 甚至是紫外波段传输。

2015 年, 丹麦技术大学的 Habib 等<sup>[128]</sup>通过合理的设计, 将中红外 2.85  $\mu\text{m}$  波长处的损耗降至 0.002 dB/km。2017 年, Habib 等<sup>[129]</sup>设计出一种低损耗空芯反谐振微结构光纤, 其在波长 1.06  $\mu\text{m}$  处的损耗可低至 0.0015 dB/km, 当弯曲半径为 5 cm 时, 损耗为 0.006 dB/km, 同时在 1~1.1  $\mu\text{m}$  波长范围内实现了高消光比特性, 消光比达到了 1500。2017 年, 天津大学王清月教授带领的团队<sup>[130]</sup>在理论上证实了嵌套椭圆包层结构的空芯反谐振微结构光纤比圆形包层结构反谐振微结构光纤的损耗小两个数量级。2016 年, 丹麦技术大学的 Habib 等<sup>[131]</sup>设计了一种椭圆结构的空芯反谐振微结构光纤, 其在宽带 1.0~1.65  $\mu\text{m}$  范围内的消光比可以大于 1000, 而基模的泄漏损耗在相同范围内低于 15 dB/km。2016 年, 中国科学院光电研究院的樊仲维教授团队<sup>[132]</sup>在理论上证实了圆形双芯空芯反谐振微结构光纤具有较低的限制损耗, 椭圆双芯空芯反谐振微结构光纤具有较宽的传输带。2017 年, 南安普顿大学的 Hayes 等<sup>[133]</sup>利用空芯反谐振微结构光纤实现了短距离数据传输, 带宽大于 1000 nm, 低损耗为 25 dB/km, 在波长 1065, 1565, 1963 nm 处实现了数据通信。2018 年, 丹麦技术大学的 Adamu 等<sup>[134]</sup>利用氩气填充空芯反谐振微结构光纤, 通过中红外超短脉冲抽运, 实现了 200~4000 nm 多倍频程超连续谱。中国科学院光电研究院的研究人员在理论上设计了一种新型结构空芯反谐振微结构光纤, 类似雨滴型的内管形成了光纤的内部结构, 该结构具有出色的宽带低损耗性能和单模特性, 数值分析表明其在 CL 波段的损耗可以低至 1.1 dB/km, 并对高阶模具有抑制作用<sup>[135]</sup>。通过结构的合理设计, 空芯反谐振微结构光纤还可以为其他领域提供研究平台, 如可利用不对称间隙 NHC-PCF 进行基于光纤的光流控应用研究<sup>[136]</sup>。2018 年 6 月, 北京工业大学和中国科学院物理研究所光学物理实验室联合报道了一款空芯反谐振微结构光纤, 其在波长 1512 nm 处实现了 2.0 dB/km 的传输损耗<sup>[137]</sup>, 图 24 所示为该光纤的结构及损耗。2018 年, 华南师范大学的研究人员<sup>[138]</sup>在 CLEO 会议上报道了利用空芯反谐振微结构光纤进行光抽运

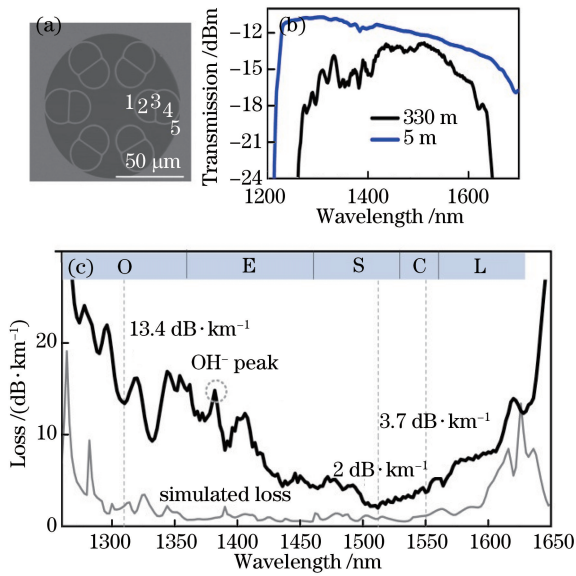


图 24 低损耗空芯反谐振光纤的结构、透过谱及损耗<sup>[137]</sup>。(a)结构;(b)透过谱;(c)损耗

Fig. 24 Structure, transmission spectrum and loss of low loss hollow core antiresonant fiber<sup>[137]</sup>. (a) Structure; (b) transmission spectrum; (c) loss

气体光纤激光器的研究情况。2018年9月,国际知名期刊 *Laser Focus World* 报道了南安普顿大学利用空芯反谐振微结构光纤在5G网络通信及数据传输方面取得的成就。通过欧洲研究委员会“light-pipe”项目,南安普顿大学的研究人员<sup>[139]</sup>将空芯反谐振微结构光纤损耗降至1.3 dB/km,这也是目前报道的损耗最低的光纤。2018年,Knight团队利用反谐振空芯光纤完成了2 μm 45 W纳秒脉冲激光的传输<sup>[140]</sup>。

目前空芯反谐振微结构保偏光纤主要以理论设计为主。2018年,日本北海道大学的Tu等<sup>[141]</sup>在理论上提出两种As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>玻璃空芯反谐振微结构光纤可用于高功率CO<sub>2</sub>激光的传输,在波长10.6 μm处的损耗为2.6 dB/km,在宽带范围内可同时实现小于1 dB/km的低损耗和大于1×10<sup>-4</sup>的高双折射。Wei等<sup>[142]</sup>设计了一种偏振低损耗负曲率空芯光纤,其损耗为0.020 dB/m,双折射度为10<sup>-4</sup>,消光比为850。北京交通大学的姜淑琴教授率领的团队<sup>[143]</sup>设计了一种单偏振单模双环空芯反谐振微结构光纤,该光纤在1545~1553 nm和1591~1596 nm两个波段可实现单偏振,在1550 nm波长处,其x轴的基模损耗仅为0.04 dB/m,消光比为17662,高阶模最小消光比为393。从以上空芯反谐

振微结构光纤的研究现状来看,空芯反谐振微结构光纤具有低损耗、偏振可控以及宽带传输性能,同时其结构简单,这使得其在未来高功率激光传输、长距离数据传输等应用方面具有巨大潜力。随着光纤制备技术的不断提升,非接触管式反谐振空芯光纤损耗的降低以及传输窗口的不断扩展,非接触管式反谐振空芯光纤已在高功率脉冲传输、光通信及光泵光纤气体激光器等方面取得了显著成果。早在2017年,美国贝勒大学的Wei等<sup>[144]</sup>就对负曲率光纤进行了全面的分析总结,他认为:未来负曲率空芯光纤将在数据通信、功率传输、非线性光学、化学传感、弯曲传感以及中红外、紫外和太赫兹传输等领域具有广泛应用。2016年,丹麦NKT Photonics A/S公司的Michieletto等<sup>[145]</sup>将设计研制的反谐振非接触管式空芯光纤用于1032 nm皮秒激光传输实验,该光纤在波长1090 nm处的传输损耗为30 dB/km,实验获得了成功,成功地传输了70 W功率的激光。2017年,英国南安普顿大学的Hayes等<sup>[133]</sup>将反谐振空芯光纤应用于短程数据通信,该光纤在1200 nm波长处具有最小的损耗,损耗约为25 dB/km。2017年,丹麦技术大学的研究人员<sup>[146]</sup>将反谐振空芯光纤通过气体填充的方式应用于孤子等离子体间相互作用的研究。2017年,英国巴斯大学的Xu等<sup>[147]</sup>将反谐振空芯光纤应用于光泵空芯光纤气体激光器,通过在反谐振空芯光纤中填入乙炔气体,在1.53 μm激光激励下实现了功率为1 W、波长为3.1 μm的激光输出,然而由于光纤损耗较大,其效率受到一定限制。2019年,美国新墨西哥大学的Aghbolagh等<sup>[148]</sup>利用N<sub>2</sub>O填充的空芯光纤实现了4.6 μm激光发射。

未来随着空芯微结构光纤损耗的进一步降低以及光纤材料的不断开发,以气体填充的空芯微结构光纤激光器将向中红外激光、紫外波段激光方向发展。

## 5 微结构光纤的前景展望

### 5.1 制备工艺难题

尽管微结构光纤已在多个领域得到了广泛应用,但其也面临着制备工艺复杂、长距离结构难以保持、成本高、缺乏与之匹配的相关器件等问题,因此光子晶体光纤并没有如传统光纤那样在各个领域得到大面积应用推广。由于光子晶体光纤结构的特殊性,光子晶体光纤的拉制是限制其发展的瓶颈问题。目前,微结构光纤在实验制备与理论研究方面均有

不少报道,但前者不足后者工作的 20%,这表明研究人员所设计的结构新颖、功能独特的微结构光纤,只有不足 20%获得了实验制备。从另一个侧面来看,这也说明光子晶体光纤制备的难度相当大,如长距离 OAM 光子晶体光纤,甚至是几十千米级多芯 OAM 光子晶体光纤的制备依然是一项世界级难题,因此微结构光纤的制备在未来几年仍然是急需解决的重要问题,它直接决定着光子晶体光纤是否能在未来实现广泛的推广应用。因此,未来或许很长的一段时间内,微结构光纤的制备工艺将是一个重要的研究方向。例如,3D 打印微结构光纤工艺,不仅可以解决复杂结构微结构光纤预制棒制备难的问题,还可以解决长距离光纤拉制的问题,为未来微结构光纤的应用拓展奠定了基础。此外,面对市场上超大功率激光光纤的需求及国内发展需要,利用新技术或与传统技术结合的技术进行激光材料的开发,进而进行高功率激光用微结构光纤制备也将是未来的一个发展方向。

## 5.2 微结构光纤器件发展方向

微结构光纤结构灵活可调,特性优异,使其在众多领域得到了广泛应用。灵活可调的结构特性赋予了微结构光纤多种功能,可以适应不同的需求,如应用在传感领域,可以测试温度、湿度、压力、折射率等,以满足其在高温、高压以及极端恶劣环境下的使用要求。同时,独特的拉制工艺也赋予微结构光纤材料的多变性,可以满足不同波段的需求。因此以微结构光纤为基础的微结构光纤器件将是未来一个非常重要的研究方向,可以与医疗、生物、化学、环境、核物理、高能物理、人工智能等多个学科相结合<sup>[149-153]</sup>,开发出多功能微结构光纤,光纤实验室(lab in a fiber)亦将成为现实。例如,以空芯光纤为载体的生化传感器,由于微结构光纤天然的微流控通道而成为多种生化溶液的流动腔体,从而实现多组分的同时测量。此外,微结构光纤内部的微加工技术也发展迅猛,对于特种光纤内部复杂的排布进行修饰和改善就可使光纤的光学特性改变。例如,将贵金属与微结构光纤相结合,可利用波导的传输特性与表面等离子体共振效应实现光的滤波和偏振等操控。从机械行业来看,由于光纤天然的微型性与便捷性,对光纤进行特定的涂敷,可使光纤的柔韧性得以提高,从而可以在机器人等机械行业领域充当机械的外延肢体,又由于微结构光纤可携带信息的多样性,相比于传统光纤可以收集更多有利用价值的信号<sup>[154]</sup>。总之,微结构光纤在器件领域具有

很大研究价值。

## 参 考 文 献

- [1] Russell P. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, 299(5605): 358-362.
- [2] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [3] Yablonovitch E, Gmitter T, Leung K. Photonic band structure: the face-centered-cubic case employing nonspherical atoms[J]. *Physical Review Letters*, 1991, 67(17): 2295-2298.
- [4] Knight J C, Birks T A, Russell P St J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [5] Knight J C. Photonic crystal fibres [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 847-851.
- [6] Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(1): 25-27.
- [7] Kuhlmeiy B T, White T P, Renversez G, *et al.* Multipole method for microstructured optical fibers. II. Implementation and results [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19(10): 2331-2340.
- [8] White T P, Kuhlmeiy B T, McPhedran R C, *et al.* Multipole method for microstructured optical fibers. I. Formulation[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19(10): 2322-2330.
- [9] Steel M J, White T P, de Sterke C M, *et al.* Symmetry and degeneracy in microstructured optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(8): 488-490.
- [10] Limpert J, Schreiber T, Nolte S, *et al.* High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser[J]. *Optics Express*, 2003, 11(7): 818-823.
- [11] Wadsworth W J, Percival R M, Bouwmans G, *et al.* High power air-clad photonic crystal fibre laser[J]. *Optics Express*, 2003, 11(1): 48-53.
- [12] Limpert J, Schreiber T, Liem A, *et al.* Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation[J]. *Optics Express*, 2003, 11(22): 2982-2990.
- [13] Wu D K C, Kuhlmeiy B T, Eggleton B J. Ultrasensitive photonic crystal fiber refractive index sensor[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(3): 322-324.
- [14] Dong X Y, Tam H Y, Shum P. Temperature-

- insensitive strain sensor with polarization-maintaining photonic crystal fiber based Sagnac interferometer[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(15): 151113.
- [15] Rindorf L, Jensen J B, Dufva M, *et al.* Photonic crystal fiber long-period gratings for biochemical sensing[J]. *Optics Express*, 2006, 14(18): 8224-8231.
- [16] Bjarklev A, Lin C. Applications of photonic crystal fibers in optical communications - what is in the future? [C] // 2005 IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, October 22-28, 2005, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE, 2005: 812-813.
- [17] Sang X Z, Chu P L, Yu C X. Applications of nonlinear effects in highly nonlinear photonic crystal fiber to optical communications [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2005, 37(10): 965-994.
- [18] Xi X M, Wong G K L, Frosz M H, *et al.* Orbital-angular-momentum-preserving helical Bloch modes in twisted photonic crystal fiber[J]. *Optica*, 2014, 1(3): 165-169.
- [19] McNab S J, Moll N, Vlasov Y A. Ultra-low loss photonic integrated circuit with membrane-type photonic crystal waveguides [J]. *Optics Express*, 2003, 11(22): 2927-2939.
- [20] Palma-Vega G, Beier F, Stutzki F, *et al.* High average power transmission through hollow-core fibers [C] // Laser Congress 2018 (ASSL), November 4-8, 2018, Boston, Massachusetts, United States. Washington, D. C.: OSA, 2018: ATh1A.7.
- [21] Temelkuran B, Hart S D, Benoit G, *et al.* Wavelength-scalable hollow optical fibres with large photonic bandgaps for CO<sub>2</sub> laser transmission [J]. *Nature*, 2002, 420(6916): 650-653.
- [22] Konorov S O, Fedotov A B, Kolevatova O A, *et al.* Laser breakdown with millijoule trains of picosecond pulses transmitted through a hollow-core photonic-crystal fibre [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2003, 36(12): 1375-1381.
- [23] Birks T A, Knight J C, Russell P St J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(13): 961-963.
- [24] Dudley J M, Taylor J R. Ten years of nonlinear optics in photonic crystal fibre [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(2): 85-90.
- [25] Ortigosa-Blanch A, Knight J C, Wadsworth W J, *et al.* Highly birefringent photonic crystal fibers [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(18): 1325-1327.
- [26] Knight J C, Birks T A, Cregan R F, *et al.* Large mode area photonic crystal fibre [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(13): 1347-1348.
- [27] Knight J C, Arriaga J, Birks T A, *et al.* Anomalous dispersion in photonic crystal fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(7): 807-809.
- [28] Ferrando A, Silvestre E, Miret J J, *et al.* Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(11): 790-792.
- [29] Reeves W, Knight J, Russell P, *et al.* Demonstration of ultra-flattened dispersion in photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2002, 10(14): 609-613.
- [30] Belardi W, Knight J C. Hollow antiresonant fibers with reduced attenuation [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1853-1856.
- [31] Markos C, Travers J C, Abdolvand A, *et al.* Hybrid photonic-crystal fiber [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2017, 89(4): 045003.
- [32] Wadsworth W J. Photonic crystal fibers [C] // Specially Optical Fibers 2011, June 12-15, 2011, Toronto, Canada. Washington, D.C.: OSA, 2011: SOMD3.
- [33] Poli F, Cucinotta A, Selleri S. Photonic crystal fibers [M]. Netherlands: Springer, 2007.
- [34] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, *et al.* Single-mode photonic band gap guidance of light in air [J]. *Science*, 1999, 285(5433): 1537-1539.
- [35] Poletti F, Petrovich M N, Richardson D J. Hollow-core photonic bandgap fibers: technology and applications [J]. *Nanophotonics*, 2013, 2(5/6): 315-340.
- [36] Markos C, Nielsen K, Bang O. Antiresonant guiding in a poly(methyl-methacrylate) hollow-core optical fiber [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(10): 105603.
- [37] Chillece E F, Cordeiro C M B, Barbosa L C, *et al.* Tellurite photonic crystal fiber made by a stack-and-draw technique [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, 352: 3423-3428.
- [38] Pysz D, Kujawa I, Stępień R, *et al.* Stack and draw fabrication of soft glass microstructured fiber optics [J]. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 2014, 62(4): 667-682.
- [39] Ma J, Yu H H, Jiang X, *et al.* High-performance

- temperature sensing using a selectively filled solid-core photonic crystal fiber with a central air-bore [J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 9406-9415.
- [40] Ravi Kanth Kumar V V, George A K, Reeves W H, *et al.* Extruded soft glass photonic crystal fiber for ultrabroad supercontinuum generation [J]. *Optics Express*, 2002, 10(25): 1520-1525.
- [41] Webb A S. Suspended-core holey fiber for evanescent-field sensing [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(1): 010503.
- [42] Becker M, Werner M, Fitzau O, *et al.* Laser-drilled free-form silica fiber preforms for microstructured optical fibers [J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(5): 482-485.
- [43] Bertoncini A, Rajamanickam V P, Liberale C. On-fiber 3D printing of photonic crystal fiber tapers for mode field diameter conversion [C] // 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 25-29, 2017, Munich, Germany. New York: IEEE, 2017: 17332724.
- [44] Zhou G Y, Hou Z Y, Li S G, *et al.* Fabrication of glass photonic crystal fibers with a die-cast process [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(18): 4433-4436.
- [45] Ravi Kanth Kumar V V, George A K, Knight J C, *et al.* Tellurite photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2003, 11(20): 2641-2645.
- [46] Zhang P Q, Zhang J, Yang P L, *et al.* Fabrication of chalcogenide glass photonic crystal fibers with mechanical drilling [J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, 26: 176-179.
- [47] Andrew T. MIT figured out how to 3D print using glass instead of plastic [EB/OL]. USA: MIT. [2019-04-15]. <https://www.engadget.com/2015/08/21/mit-figured-out-how-to-3d-print-using-glass-instead-of-plastic/>.
- [48] Camposeo A, Persano L, Farsari M, *et al.* Additive manufacturing: applications and directions in photonics and optoelectronics [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(1): 1800419.
- [49] Destino J F, Dudukovic N A, Johnson M A, *et al.* 3D printed optical quality silica and silica-titania glasses from sol-gel feedstocks [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(6): 1700323.
- [50] Cook K, Canning J, Leon-Saval S, *et al.* Air-structured optical fiber drawn from a 3D-printed preform [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(17): 3966-3969.
- [51] TechRepublic. 3D printing is helping UK researchers create complex fiber optics [N/OL]. [2019-04-15]. <https://www.techrepublic.com/article/3d-printing-is-helping-create-complex-fiber-optics/>.
- [52] New optical fiber 3D printing technique [J]. *Optik & Photonik*, 2015, 10(4): 17.
- [53] Zubel M G, Fasano A, Woyessa G, *et al.* 3D-printed PMMA preform for hollow-core POF drawing [C] // Proceedings of the 25th International Conference on Plastic Optical Fibers 2016, September 13-15, 2016, Aston University, Birmingham, United Kingdom. Birmingham: University of Aston, 2016.
- [54] Kotz F, Arnold K, Bauer W, *et al.* Three-dimensional printing of transparent fused silica glass [J]. *Nature*, 2017, 544(7650): 337-339.
- [55] Knight J C, Skryabin D V. Nonlinear waveguide optics and photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2007, 15(23): 15365-15376.
- [56] Wadsworth W J, Ortigosa-Blanch A, Knight J C, *et al.* Supercontinuum generation in photonic crystal fibers and optical fiber tapers: a novel light source [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19(9): 2148-2155.
- [57] Hansen K, Imam H. Photonic crystal fiber [J]. *Optik & Photonik*, 2010, 5(2): 37-41.
- [58] YOFC. HNLF [EB/OL]. [2019-04-15]. <http://www.yofc.com/view/2135.html>.
- [59] CJ Photonics. Highly nonlinear photonic crystal fiber [EB/OL]. [2019-04-15]. <http://www.cjphotonics.com/product/center/PCF/55.html>. CJ Photonics. 高非线性光子晶体光纤 [EB/OL]. [2019-04-15]. <http://www.cjphotonics.com/product/center/PCF/55.html>.
- [60] Hansen K P, Kristiansen R E. Supercontinuum generation in photonic crystal fibers [R/OL]. [2019-04-15]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.430.3325&rep=rep1&type=pdf>.
- [61] YSL Photonics. Supercontinuum light source [EB/OL]. [2019-04-15]. <http://www.yslphotonics.com/Home/Index/Product/index/id/22.html>. YSL Photonics. 超连续谱光源 [EB/OL]. [2019-04-15]. <http://www.yslphotonics.com/Home/Index/Product/index/id/22.html>.
- [62] University of Chinese Academy of Sciences. Significant progress has been made in the fabrication

- of highly nonlinear silica photonic crystal fiber[N/OL]. (2017-01-20)[2019-04-15]. [http://www.siom.cas.cn/xwzx/kydt/201701/t20170126\\_4741436.html](http://www.siom.cas.cn/xwzx/kydt/201701/t20170126_4741436.html).
- 中国科学院大学. 在高非线性石英光子晶体光纤制作方面取得重要进展[N/OL]. (2017-01-20)[2019-04-15]. [http://www.siom.cas.cn/xwzx/tpxw/201701/t20170126\\_4741437.html](http://www.siom.cas.cn/xwzx/tpxw/201701/t20170126_4741437.html).
- [63] HRYH. Highly nonlinear microstructural fiber[EB/OL]. [2019-04-15]. [http://www.hryh-fiber.com/products\\_detail/productId=77.html](http://www.hryh-fiber.com/products_detail/productId=77.html).
- HRYH. 高非线性微结构光纤[EB/OL]. [2019-04-15]. [http://www.hryh-fiber.com/products\\_detail/productId=77.html](http://www.hryh-fiber.com/products_detail/productId=77.html).
- [64] Yang J J, Han Y, Wang W, *et al.* Deep ultraviolet supercontinuum study in the highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(4): 1215-1219.
- 杨建菊, 韩颖, 王伟, 等. 高非线性光子晶体光纤深紫外超连续谱的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(4): 1215-1219.
- [65] Liu Z L, Zhang C L. Tapered Yb<sup>3+</sup>-doped photonic crystal fiber for blue-enhanced supercontinuum generation[J]. *Optik*, 2018, 161: 172-179.
- [66] Zervas M N, Codemard C A. High power fiber lasers: a review [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 219-241.
- [67] Liu S, Zhan H, Peng K, *et al.* Multi-kW Yb-doped aluminophosphosilicate fiber [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(8): 2114-2124.
- [68] Laser focus world. IPG photonics successfully tests world's first 10 kilowatt single-mode production laser[N/OL]. (2009-06-15)[2019-04-15]. <https://www.laserfocusworld.com/home/article/16559922/ipg-photonics-successfully-tests-worlds-first-10-kilowatt-singlemode-production-laser>.
- [69] IPG Photonics. Lasers [EB/OL]. [2019-04-15]. <https://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers>.
- [70] Techweb. China's 2 million kilowatt autonomous fiber laser installed successfully breaks the US monopoly [N/OL]. [2019-04-15]. <http://www.techweb.com.cn/it/2016-11-23/2438056.shtml>.
- Techweb. 中国 2 万瓦自主光纤激光器装机成功打破美国垄断[N/OL]. [2019-04-15]. <http://www.techweb.com.cn/it/2016-11-23/2438056.shtml>.
- [71] Février S, Gaponov D D, Roy P, *et al.* High-power photonic-bandgap fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(9): 989-991.
- [72] Wadsworth W J, Knight J C, Russell P S J, *et al.* Large mode area photonic crystal fibre laser [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 11, 2001, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE, 2001: 319.
- [73] Limpert J, Deguil-Robin N, Manek-Hönninger I, *et al.* High-power rod-type photonic crystal fiber laser [J]. *Optics Express*, 2005, 13(4): 1055-1058.
- [74] NKT Photonics. AeroGAIN-ROD high power ytterbium rod fiber gain modules [EB/OL]. [2019-04-15]. <https://www.nktp Photonics.com/lasers-fibers/product/aerogain-rod-high-power-ytterbium-rod-fiber-gain-modules/>.
- [75] Gaida C, Kadwani P, Leick L, *et al.* CW-lasing and amplification in Tm<sup>3+</sup>-doped photonic crystal fiber rod [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(21): 4513-4515.
- [76] Kadwani P, Modsching N, Sims R A, *et al.* Lasing in thulium doped polarizing photonic crystal fibers (PCF) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8237: 82372Z.
- [77] Wu X, Zhang L, Liu C X, *et al.* High-stable, double-pass forward superfluorescent fiber source based on erbium-doped photonic crystal fiber [J]. *Applied Physics B*, 2014, 114(3): 433-438.
- [78] Wang F, Wang M, Feng S Y, *et al.* Large-mode-area photonic crystal fiber towards pulse laser amplification based on YbAl/P/F codoped silica glass [C] // *Advanced Solid States Laser 2018*, November 4-8, 2018, Boston, Massachusetts, United States. Washington, D. C.: OSA, 2018: ATh1A.5.
- [79] Pedrazza U, Romano V, Lüthy W. Yb<sup>3+</sup>: Al<sup>3+</sup>: sol-gel silica glass fiber laser [J]. *Optical Materials*, 2007, 29(7): 905-907.
- [80] Li Z L, Wang S K, Wang X, *et al.* Spectral properties of Tm<sup>3+</sup>-doped silica glasses and laser behaviors of fibers by sol-gel technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0806003.
- 李志兰, 王世凯, 王欣, 等. 溶胶凝胶法制备的掺铥石英玻璃光谱性质及光纤激光性能 [J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0806003.
- [81] Xie F H, Shao C Y, Wang M, *et al.* Photodarkening-resistance improvement of Yb<sup>3+</sup>/Al<sup>3+</sup> co-doped silica fibers fabricated via sol-gel method [J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 28506-28516.



- [82] Liu S J, Li H Y, Tang Y X, *et al.* Effect of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content on physical and spectroscopic properties of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped silica glass by sol-gel method[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2012, 41(S3): 568-571.  
刘少俊, 李海元, 唐永兴, 等.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 对溶胶-凝胶法制备  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂石英玻璃物理及光谱性质的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2012, 41(S3): 568-571.
- [83] Liu S J. Investigation on fabrication and spectroscopic properties of  $\text{Yb}^{3+}$  doped silica glass and PCF fiber by sol-gel method [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2012.  
刘少俊. 溶胶-凝胶法制备掺镱石英玻璃和光子晶体光纤的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.
- [84] Leich M, Just F, Langner A, *et al.* Highly efficient  $\text{Yb}$ -doped silica fibers prepared by powder sinter technology[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(9): 1557-1559.
- [85] Zhang W, Wu J L, Zhou G Y, *et al.*  $\text{Yb}$ -doped silica glass and photonic crystal fiber based on laser sintering technology[J]. *Laser Physics*, 2016, 26(3): 035801.
- [86] Xia C M, Zhou G Y, Liu J T, *et al.* Optical properties of  $\text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$  co-doped air cladding silica-based fiber fabricated with plasma non-chemical vapor deposition method [J]. *Applied Physics A*, 2015, 118(2): 525-530.
- [87] Zhang W, Liu J T, Zhou G Y, *et al.* Optical properties of the  $\text{Yb}/\text{Er}$  co-doped silica glass prepared by laser sintering technology[J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(5): 1708-1715.
- [88] Xia C M, Zhou G Y, Liu J T, *et al.* Fabrication and laser performance of  $\text{Yb}^{3+}/\text{Al}^{3+}$  co-doped photonic crystal fiber synthesized by plasma nonchemical vapor deposition method[J]. *Optical Fiber Technology*, 2015, 25: 20-24.
- [89] Chen G, Jiang Z W, Peng J G, *et al.* Study of air-clad large-mode-area ytterbium doped photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(14): 144206.  
陈瑰, 蒋作文, 彭景刚, 等. 空气包层大模场面积掺镱光子晶体光纤研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(14): 144206.
- [90] Chu Y B, Liu Y G, Liu C B, *et al.* Extra-large-core  $\text{Yb}^{3+}$  doped fiber and its laser research based on glass phase-separation technique [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1201005.  
褚应波, 刘永光, 刘长波, 等. 基于玻璃分相技术的大芯径掺镱光纤及其激光研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1201005.
- [91] Schuster K, Grimm S, Kalide A, *et al.* Evolution of fluorine doping following the REPUSIL process for the adjustment of optical properties of silica materials[J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(4): 887-897.
- [92] Zhu Y, Lorenz M, Eschrich T, *et al.* Laser beam quality improvement of REPUSIL-based rod amplifier with local short adiabatic taper [J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10512: 105121H.
- [93] Schuster K, Unger S, Aichele C, *et al.* Material and technology trends in fiber optics[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2014, 3(4): 447-468.
- [94] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [95] 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.
- [96] Lei T, Zhang M, Li Y R, *et al.* Massive individual orbital angular momentum channels for multiplexing enabled by Dammann gratings[J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(3): e257.
- [97] Rodenburg B, Lavery M P J, Malik M, *et al.* Influence of atmospheric turbulence on states of light carrying orbital angular momentum[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(17): 3735-3737.
- [98] Yu S Y. Potentials and challenges of using orbital angular momentum communications in optical interconnects[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3075-3087.
- [99] 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.
- [100] Nandam A, Shin W. Spiral photonic crystal fiber structure for supporting orbital angular momentum modes[J]. *Optik*, 2018, 169: 361-367.
- [101] 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.
- [102] Li H, Zhang H, Zhang X G, *et al.* Design tool for circular photonic crystal fibers supporting orbital angular momentum modes [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(10): 2474-2481.
- [103] Kim M, Lee C G, Kim S. Photonic quasicrystal fiber supporting orbital angular momentum modes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10947: 1094704.
- [104] Bai X L, Chen H M, Yang H H. Design of a circular photonic crystal fiber with square air-holes for orbital angular momentum modes transmission [J]. *Optik*, 2018, 158: 1266-1274.
- [105] Zhang L, Zhang K C, Peng J, *et al.* Circular photonic crystal fiber supporting 110 OAM modes [J]. *Optics Communications*, 2018, 429: 189-193.
- [106] Chen C, Zhou G Y, Zhou G, *et al.* A multi-orbital-angular-momentum multi-ring micro-structured fiber with ultra-high-density and low-level crosstalk [J]. *Optics Communications*, 2016, 368: 27-33.
- [107] Chen C. Research of micro-structured fiber supporting few modes and OAM states [D]. Guangzhou: South China Normal University, 2016. 陈成. 具有传输少模和光束轨道角动量特性微结构光纤的研究[D]. 广州: 华南师范大学, 2016.
- [108] Li H, Ren G, Gao Y, *et al.* Hollow-core photonic bandgap fibers for orbital angular momentum applications[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(4): 045704.
- [109] Zhang Y F, Chen Y J, Zhong Z Q, *et al.* Orbital angular momentum (OAM) modes routing in a ring fiber based directional coupler [J]. *Optics Communications*, 2015, 350: 160-164.
- [110] Zhong Z Q, Zhang Y F, Chen Y J, *et al.* A numerical study of ring fibre for high capacity orbital angular momentum mode transmission [C] // 2013 12th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), July 26-28, 2013, Chengdu, China. New York: IEEE, 2013: 13824788.
- [111] 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.
- [112] Smith C M, Venkataraman N, Gallagher M T, *et al.* Low-loss hollow-core silica/air photonic bandgap fibre[J]. *Nature*, 2003, 424(6949): 657-659.
- [113] Mangan B, Farr L, Langford A, *et al.* Low loss (1.7 dB/km) hollow core photonic bandgap fiber [C] // *Optical Fiber Communication Conference 2004*, February 22, 2004, Los Angeles, California, United States. Washington, D. C.: OSA, 2004: PD24.
- [114] Roberts P J, Couny F, Sabert H, *et al.* Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres[J]. *Optics Express*, 2005, 13(1): 236-244.
- [115] Benabid F, Russell P S J. Hollow-core photonic crystal fibers: progress and prospects [J]. *Proceeding of SPIE*, 2005, 5733: 176-189.
- [116] Amezcua-Correa R, Gèrôme F, Leon-Saval S G, *et al.* Control of surface modes in low loss hollow-core photonic bandgap fibers [J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1142-1149.
- [117] Sanders G A, Strandjord L K, Qiu T Q. Hollow core fiber optic ring resonator for rotation sensing [C] // *Optical Fiber Sensors 2006*, October 23-27, 2006, Cancun, Mexico. Washington, D.C.: OSA, 2006: ME6.
- [118] Terrel M A, Digonnet M J F, Fan S H. Resonant fiber optic gyroscope using an air-core fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(7): 931-937.
- [119] Epple G, Kleinbach K S, Euser T G, *et al.* Rydberg atoms in hollow-core photonic crystal fibres [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4132.
- [120] Jung Y M, Sleiffer V, Baddela N, *et al.* First demonstration of a broadband 37-cell hollow core photonic bandgap fiber and its application to high capacity mode division multiplexing [C] // *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013*, March 17-21, 2013, Anaheim, CA. Washington, D. C.: OSA, 2013: PDP5A.3.
- [121] Wang Y Y, Wheeler N V, Couny F, *et al.* Low loss broadband transmission in hypocycloid-core Kagome hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(5): 669-671.
- [122] Pryamikov A D, Biriukov A S, Kosolapov A F, *et al.* Demonstration of a waveguide regime for a silica hollow-core microstructured optical fiber with a negative curvature of the core boundary in the spectral region  $> 3.5 \mu\text{m}$  [J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1441-1448.
- [123] Yu F, Wadsworth W J, Knight J C. Low loss silica hollow core fibers for 3-4  $\mu\text{m}$  spectral region [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 11153-11158.

- [124] Liu Y, Zhou G Y, Xia C M, *et al.* The fabrication and properties analysis of octagonal hollow core micro-structured fiber[J]. *Applied Laser*, 2014, 34(4): 341-345.  
刘营, 周桂耀, 夏长明, 等. 八边形空芯微结构光纤的制备和特性分析[J]. *应用激光*, 2014, 34(4): 341-345.
- [125] Li B Y, Sheng Z C, Wu M, *et al.* Sensitive real-time monitoring of refractive indices and components using a microstructure optical fiber microfluidic sensor[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 5070-5073.
- [126] Sheng Z C, Wang T, Zhou G Y, *et al.* Raman probe based on hollow-core microstructured fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(18): 184211.  
盛子城, 王腾, 周桂耀, 等. 基于空芯微结构光纤拉曼探针的实验研究 [J]. *物理学报*, 2018, 67(18): 184211.
- [127] Belardi W, Knight J C. Negative curvature fibers with reduced leakage loss [C] // *Optical Fiber Communication Conference 2014*, March 9-13, 2014, San Francisco, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2014: Th2A. 45.
- [128] Habib M S, Bang O, Bache M. Low-loss hollow-core silica fibers with adjacent nested anti-resonant tubes[J]. *Optics Express*, 2015, 23(13): 17394-17406.
- [129] Habib M S, Markos C, Bang O, *et al.* Curvature and position of nested tubes in hollow-core anti-resonant fibers[C] // *2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*, June 25-29, 2017, Munich, Germany. New York: IEEE, 2017: 17350440.
- [130] Meng F C, Liu B W, Li Y F, *et al.* Low loss hollow-core anti-resonant fiber with nested elliptical cladding elements [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 7100211.
- [131] Habib M S, Bang O, Bache M. Low-loss single-mode hollow-core fiber with anisotropic anti-resonant elements [J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8429-8436.
- [132] Liu X S, Fan Z W, Shi Z H, *et al.* Dual-core anti-resonant hollow core fibers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 17453-17458.
- [133] Hayes J R, Sandoghchi S R, Bradley T D, *et al.* Anti-resonant hollow core fiber with an octave spanning bandwidth for short haul data communications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(3): 437-442.
- [134] Adamu A I, Habib M S, Petersen C R, *et al.* Supercontinuum generation from deep-UV to mid-IR in a noble gas-filled fiber pumped with ultrashort mid-IR pulses[C] // *Optical Sensors 2018*, July 2-5, 2018, Zurich Switzerland. Washington, D. C.: OSA, 2018: JTu6E. 2.
- [135] Yu T Y, Liu X S, Fan Z W. Hollow core anti-resonant fiber with radially asymmetric nodeless claddings[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 7100908.
- [136] Hao Y, Xiao L M, Benabid F. Optimized design of unsymmetrical gap nodeless hollow core fibers for optofluidic applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(16): 3162-3168.
- [137] Gao S F, Wang Y Y, Ding W, *et al.* Hollow-core conjoined-tube negative-curvature fibre with ultralow loss[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2828.
- [138] Xia C M, Sheng Z C, Fan H X, *et al.* Hollow core fibers for optical pumped fiber gas laser [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim 2018*, July 29-August 3, 2018, Hong Kong, China. Washington, D.C.: OSA, 2018: Tu2E.3.
- [139] Laser focus world. Low-attenuation hollow-core fiber could herald more cost effective data centers and 5G networks[N/OL]. (2018-09-26) [2019-04-15]. <https://www.laserfocusworld.com/articles/2018/09/low-attenuation-hollow-core-fiber-could-herald-more-cost-effective-data-centers-and-5-g-networks.html>.
- [140] Lee E, Luo J, Sun B, *et al.* 45 W 2  $\mu\text{m}$  nanosecond pulse delivery using anti-resonant hollow-core fiber [C] // *CLEO: Science and Innovations 2018*, May 13-18, 2018, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2018: SF1K.1.
- [141] Tu J J, Zhang B, Liu Z Y, *et al.* Chalcogenide-glass nested anti-resonant nodeless fibers in mid-infrared region [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(22): 5244-5253.
- [142] Wei C L, Menyuk C R, Hu J. Polarization-filtering and polarization-maintaining low-loss negative curvature fibers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9528-9540.
- [143] Yan S B, Lou S Q, Zhang W, *et al.* Single-polarization single-mode double-ring hollow-core anti-resonant fiber [J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 31160-31171.

- [144] Wei C L, Joseph Weiblen R, Menyuk C R, *et al.* Negative curvature fibers [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2017, 9(3): 504-561.
- [145] Michieletto M, Lyngsø J K, Jakobsen C, *et al.* Hollow-core fibers for high power pulse delivery [J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7103-7119.
- [146] Selim Habib M, Markos C, Bang O, *et al.* Soliton-plasma nonlinear dynamics in mid-IR gas-filled hollow-core fibers [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2232-2235.
- [147] Xu M, Yu F, Knight J. Mid-infrared 1 W hollow-core fiber gas laser source [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(20): 4055-4058.
- [148] Aghbolagh F B A, Nampoothiri V, Debord B, *et al.* Mid IR hollow core fiber gas laser emitting at 4.6  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(2): 383-386.
- [149] Guo Y Y, Yan F P, Liu S, *et al.* Characteristics investigation of high birefringent micro-structured optical fiber filled with magnetic fluid at 2  $\mu\text{m}$  band [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0406003.  
郭玉玉, 延凤平, 刘硕, 等. 2  $\mu\text{m}$  波段高双折射微结构磁流体光纤特性研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0406003.
- [150] Qiao W, Gao S C, Lei T, *et al.* Transmission of orbital angular momentum modes in grapefruit-type microstructure fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0406002.  
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): 0406002.
- [151] Zhang Z, Wang X H, Qiao P F, *et al.* High sensitivity fluorescence detection system based on air suspended core microstructural fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0510006.  
张昭, 王秀翊, 乔鹏飞, 等. 基于空气悬浮芯微结构光纤的高灵敏度荧光检测系统 [J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0510006.
- [152] Chen Y B, Wang Z F, Gu B, *et al.* 1.5  $\mu\text{m}$  fiber ethane gas Raman laser amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0514002.  
陈育斌, 王泽锋, 顾博, 等. 1.5  $\mu\text{m}$  光纤乙烷气体拉曼激光放大器 [J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0514002.
- [153] Gao S F, Wang Y Y, Wang P. Research progress on hollow-core anti-resonant fiber and gas Raman laser technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508014.  
高寿飞, 汪莹莹, 王璞. 反谐振空芯光纤及气体拉曼激光技术的研究 [J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508014.
- [154] Zeng W, Shu L, Li Q, *et al.* Fiber-based wearable electronics: a review of materials, fabrication, devices, and applications [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(31): 5310-5336.