

doi:10.13756/j.gtxyj.2023.02.002

专题:新型光纤

张博,顾帅,廉正刚,等. 微结构空芯光纤特性及光纤测试和工程应用[J]. 光通信研究,2023(2):9-18.

Zhang B, Gu S, Lian Z G, et al. The Characteristics and Fiber Test of Micro-structure Hollow Core Fiber and Its Engineering Application[J]. Study on Optical Communications,2023(2):9-18.

# 微结构空芯光纤特性及光纤测试和工程应用

张博<sup>1</sup>,顾帅<sup>1,2</sup>,廉正刚<sup>1</sup>,皮亚斌<sup>1</sup>

(1. 武汉长盈光电技术股份有限公司,武汉 430205; 2. 北京交通大学电子信息工程学院,北京 100044)

**摘要:**空芯光纤有着不可替代的物理特性,成为科研机构珍贵的基础研究课题,但由于其整体性能和配套应用并不成熟,产业界一直保持观望态度。近些年来,随着空芯光纤损耗指标的不断优化,多个产业应用案例的成功推进,空芯光纤逐渐得到工业界的进一步重视。文章梳理了3类空芯光纤,即空芯布拉格包层光纤、空芯光子带隙光纤和空芯反谐振光纤,重点介绍了其光学工作原理和测试手段,也结合通信、激光传能和传感领域的应用情况分析空芯光纤的优势。文章最后对标通信单模光纤对空芯光纤的未来技术趋势做出了展望。

**关键词:** 光纤;空芯光纤;微结构;环境条件;光纤测试;传能光纤;激光器

**中图分类号:** TN818 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8788(2023)02-0009-10

## The Characteristics and Fiber Test of Micro-structure Hollow Core Fiber and Its Engineering Application

ZHANG Bo<sup>1</sup>, GU Shuai<sup>1,2</sup>, LIAN Zheng-gang<sup>1</sup>, PI Ya-bin<sup>1</sup>

(1. Yangtze Optical Electronic Co., Ltd., Wuhan 430205, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Due to its irreplaceable physical characteristics, hollow core optical fiber has become a precious basic research topic for scientific research institutions. However, the industry has been keeping a wait-and-see attitude because of its overall performance and supporting applications are not mature. In recent years, with the continuous optimization of the loss performance, and the successful promotion of several industrial application cases, hollow core fiber has gradually been paid more attention by the industry side. In this paper, three types of hollow core fibers: hollow core Bragg layered fiber, hollow core photonic bandgap fiber and hollow core antiresonant fiber, are reviewed. The paper is mainly focused on their optical principles and testing methods, and combined with the application of communication, laser power delivery and sensing fields to analyze the advantages of hollow core fiber. Finally, the future technology development trend of hollow core fiber is prospected.

**Key words:** optical fiber; hollow core optical fiber; micro-structure; environmental conditions; optical fiber test; power delivery fiber; laser

## 0 引言

随着信息时代数据传输容量需求的爆炸性增长,各类新型激光器输出功率的急速提升,以及各类极端环境条件下的应用要求,石英玻璃材料本征特性所带来的缺陷,如色散、非线性、损伤阈值以及中红外波段不导光等问题暴露得愈发明显,严重制约了光纤应用技术的进一步发展<sup>[1]</sup>。多芯、少模光纤是近几年的研究热点,可以较好地提高传输效能,但是依旧不能一劳永逸地解决传感和传能面临的问题。空芯光纤藉由在空气中而非石英玻璃材料中传输光,能够大幅避免上述石英材料本征缺陷所带来

的问题,同时结合其特有的潜在低损耗、大传输容量、高带宽以及通过灵活设计来调控传输窗口波段等优势特性,能够实现为大容量光纤通信、高功率激光传能、光纤陀螺、生物医学传感、非线性光学、光孤子及太赫兹(Tera Hertz, THz)传输等应用发展提供有力的支持,故空芯光纤领域成为最引人注目的特种光纤发展方向之一<sup>[2]</sup>。

空芯光纤自1999年完成首次研制以来,经过20多年的发展,根据导光机理的不同,大致可分成3大类:空芯布拉格包层光纤(Hollow Core Bragg Layered Fiber, HCBF)、空芯光子带隙光纤(Hollow Core Photonic Bandgap Fiber, HCPBF)以及空芯反

收稿日期:2022-11-28; 修回日期:2023-01-04; 纸质出版日期:2023-04-10

基金项目:北大项目国家重点研发计划资助项目(2020YFB1312802)

作者简介:张博(1989-),男,湖北天门人。硕士,工程师,主要研究方向为微结构光纤传感及信号处理。

通信作者:廉正刚,博士。E-mail:lianzhenggang@yoec.com.cn

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

谐振光纤 (Hollow Core Anti Resonant Fiber, HCARF)。本文将对这 3 大类空芯光纤的结构设计和导光机理作简单介绍,并对相应光纤的性能测试结果及初步的应用情况进行展示与分享。

## 1 空芯光纤工作基本原理

不同类型空芯光纤由于结构不同,其导光机理也各不相同,研究人员对其结构的优化主要集中于损耗性能的提升上。图 1 梳理了近这些年来典型空芯光纤的结构变化及其损耗指标<sup>[3-19]</sup>,并且与常规通信单模光纤 (Single Mode Fiber, SMF) 进行了对比。当前 HCBF 的损耗依然很高,在数十到上百 dB/km 量级;HCPBF 通过增大纤芯直径、优化包层孔结构,损耗最低可到 1 dB/km 量级,且传输带宽较大;HCARF 损耗性能目前为空芯光纤中最佳,2021 年实现了最低损耗为 0.22 dB/km。

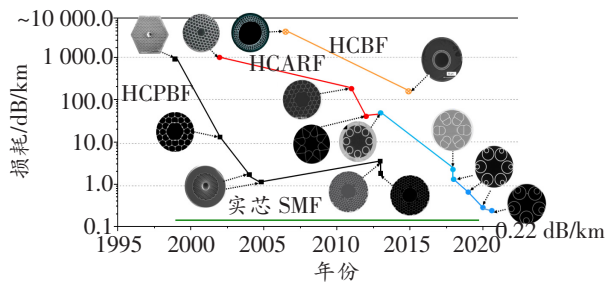


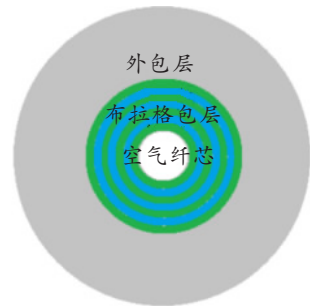
图 1 3 类空芯光纤的损耗性能及与通信 SMF 的对比<sup>[3-19]</sup>

Figure 1 The comparison of loss performance between three types of hollow core fibers and SMF<sup>[3-19]</sup>

### 1.1 HCBF

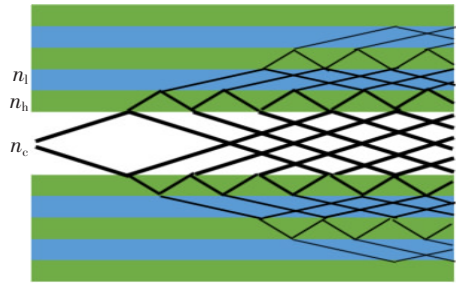
HCBF 与基于二维周期性结构的 HCPBF 相比,其包层结构简单,由径向高、低折射率周期性交叠的介质材料构成,可以通过化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition, CVD) 工艺直接制造。图 2 所示为 HCBF 的典型结构及光在其中的传输路径,如图 2(a)所示,中心为空气纤芯 (折射率为  $n_c$ ),周围是折射率呈周期性变化的布拉格包层结构 (折射率为  $n_h$  和  $n_l$ , 布拉格包层层数可根据设计要求调整),最外层是光纤外包层,光线最终都反射回中间的空气纤芯中。从 1999 年第 1 根全向反射带隙布拉格光纤拉制诞生起<sup>[20]</sup>,发展至今,主要应用于光纤激光器、光纤传感和光纤滤波等领域。

基于一维周期性结构的光子带隙原理导光<sup>[21]</sup>,HCBF 的纤芯为空气孔,当光到达纤芯和包层分界面时,对于满足布拉格条件的波长,无论以何种角度入射,均被周期性包层介质散射返回纤芯中,最终表



(a) HCBF 光纤结构

(a) Geometry of HCBF



(b) HCBF 光纤导光机理

(b) Light guiding mechanism of HCBF

图 2 HCBF 光纤结构及导光机理示意图

Figure 2 Geometry of HCBF and it's light guiding mechanism

现为将特定频率的光波束缚在空气纤芯中沿轴向进行传播。通过合理调整布拉格包层结构参数 (高低折射率材料厚度  $d_h$  和  $d_l$ 、折射率  $n_h$  和  $n_l$ 、周期层数等),可以获得不同的光波传输带宽。当满足  $1/4$  波长条件时,中心波长  $\lambda_0$  附近的最大带隙宽度和高低折射率材料层厚度有如下关系:

$$d_{l,h} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{n_{l,h}^2 - \text{Re}(n_{\text{core}})^2}}, \quad (1)$$

式中:  $d_{l,h}$  为高低折射率材料厚度;  $n_{l,h}$  为高低折射率材料的折射率值;  $n_{\text{core}}$  为纤芯折射率;  $\text{Re}$  表示取折射率实部。

由于纤芯为空气,即  $n_{\text{core}} = 1$ ,有  $d_h \sqrt{n_h^2 - 1} = d_l \sqrt{n_l^2 - 1} = \lambda_0/4$ ,但当光正入射时则为  $d_h n_h = d_l n_l = \lambda_0/4$ 。

### 1.2 HCPBF

HCPBF 基于二维周期性结构的光子带隙原理导光。纤芯为空气,包层由周期性阵列排布的空气孔构成带隙结构,形成光子禁带,从而使特定频率的光波入射到光纤时,遇到光子禁带无法穿越而反射回来,使其限制在空气纤芯中传播。

为了形成稳定的光子禁带,HCPBF 对包层空气孔的周期性排列要求很高,故制造工艺方面也较 HCBF 复杂,大致流程是:首先需要根据结构设计要求控制具有精确外径的包层毛细管;然后将这些毛细管排布成微结构毛细管束,并插入套管内进行组

装堆叠固定并拉制成微结构预制棒,其空气纤芯是通过排管时移除中心位置的数个毛细管而成;最后,通过精密气压控制,将预制棒拉制成丝,形成对应的HCPBF。图3所示为HCPBF发展过程中几种典型的光纤截面扫描电镜图<sup>[13,15,17]</sup>,早期的HCPBF导光性能较差,随着光纤结构的不断完善,纤芯尺寸也在不断增大,到2013年,光纤损耗和带宽性能均得到较好的优化。

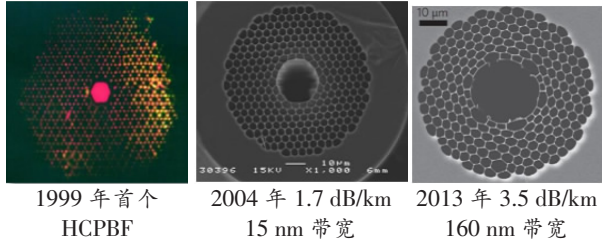


图3 HCPBF发展过程中几种典型的光纤截面扫描电镜图<sup>[13,15,17]</sup>

Figure 3 Cross-section of several typical HCPBF<sup>[13,15,17]</sup>

### 1.3 HCARF

HCARF结构异于HCBF和HCPBF,包层由单层或多层、有节点或无节点和单环或嵌套结构的石英毛细管组成。由于其包层的折射率周期性排布并不严格,不足以支持光子带隙的形成,应用的是一种不同于光子带隙效应的导光机理。图4所示为典型HCARF结构及其导光原理,图4(a)和4(b)中,白色区域为石英玻璃,黑色区域为空气。

HCARF的导光原理主要是通过特定的包层结构,使满足谐振波长的光耦合至包层透射出去,将不满足谐振条件的光反射回空气纤芯稳定传输,实现反谐振反射导光,谐振波长取决于包层石英毛细管的结构和谐振阶次<sup>[22]</sup>。

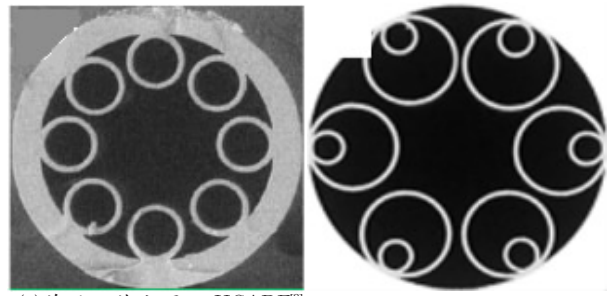
基于反谐振反射光波导(Anti-resonant Reflecting Optical Waveguide, ARROW)理论模型,满足谐振条件时的谐振波长 $\lambda_m$ 与包层石英玻璃毛细管壁厚 $d$ 、空气折射率 $n_0$ 和石英玻璃折射率 $n_1$ 有如下关系:

$$2d \frac{2\pi}{\lambda_m} \sqrt{n_1^2 - n_0^2} = 2m\pi, \quad m \in N^+,$$

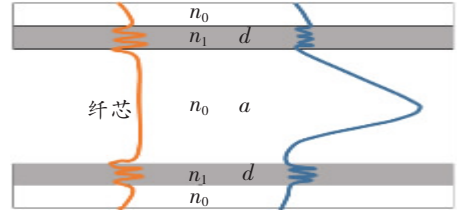
$$\lambda_m = \frac{2d}{m} \sqrt{n_1^2 - n_0^2}, \quad (2)$$

式中, $m$ 为谐振阶次, $m$ 越高对应的通带带宽越窄。

在制造上,HCARF通常沿用HCPBF制备所采用的管束堆积法,只是在具体的毛细管堆积方式以及后续光纤拉制时的温度和气压等参数控制上存在较大差异。



(a) 单层无节点圆环 HCARF<sup>[8]</sup>  
(a) HCARF with non-touching capillaries<sup>[8]</sup> (b) 嵌套式圆环 HCARF<sup>[12]</sup>  
(b) Nested HCARF<sup>[12]</sup>



(c) HCARF的导光机理

(c) Light guiding mechanism of HCARF

注: $a$ 为空气纤芯直径。

图4 典型HCARF结构及其导光机理

Figure 4 Typical HCARF structure and its light guiding mechanism

## 2 空芯光纤损耗性能测试

损耗一直是空芯光纤的核心性能指标,也是研究人员光纤结构优化的重点方向,除了通常所说的光纤损耗,还有某些特殊应用场景下的弯曲损耗和辐射诱导损耗(Radiation-induced Attenuation, RIA)。

### 2.1 损耗指标

空芯光纤的出现,主要是为了克服石英玻璃材料在光传输中由于其本征特性所带来的各种问题,但真正应用于实际,首先需要关注空芯光纤的损耗性能。由于空芯光纤的重要应用场景之一是光纤通信,为应对不断发展的通信系统长距离、大容量和高速率等要求,科研人员在损耗性能提升方面投入了大量精力。

HCBF由于实际加工中的局限性以及材料损耗的问题,其损耗一直很高,通常为dB/m量级,较HCPBF和HCARF损耗大2~3个数量级,这严重制约了HCBF的应用效果,也是近年来相关题材研究偏少的主要原因。不过,不少研究人员倾向于运用其泄露光作为短距离的传感元器件,也用作光/电转换的敏感元器件等。

HCPBF在1999年首次被拉制出来时,损耗同样特别大,但通过对其损耗机理的研究以及相应光

纤结构设计优化和制造工艺水平的提升,到2017年,HCPBF的损耗已经降低到1.3 dB/km的量级<sup>[19]</sup>。但是HCPBF在通信窗口的损耗理论上可低至1.0 dB/km以下,因此其损耗性能还有很大的提升空间。

HCARF由于其超低损耗的特性被广泛关注并成为研究热点,最初的HCARF为Kagome结构,包含多层包层,结构较复杂;2013年俄罗斯科学院光纤研究中心的Kolyadin等提出单层圆环无节点结构<sup>[8]</sup>,如图4(a)所示,至此HCARF的发展进入了新阶段;到2020年,南安普顿大学推出了嵌套环结构HCARF,其损耗已低至0.28 dB/km<sup>[12]</sup>,如图4(b)所示;2021年更是优化到0.22 dB/km,这也是目前为止损耗最低且制作可行的空芯光纤结构。

在损耗测试技术方面,截断法一直是最为常规和准确的方法,即可调谐光源/超连续光源通过标准SMF输出,再通过空间光调制将标准SMF与空芯光纤耦合对准,空芯光纤的末端接入到光谱分析仪中,通过测量截断前和截断后的光传输谱,确定截断部分的损耗值,并依此来计算不同工作波长 $\lambda$ 下的空芯光纤损耗 $\alpha(\lambda)$ ,具体公式为

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{\Delta L} 10 \log_{10} \left( \frac{P_2(\lambda)}{P_1(\lambda)} \right), \quad (3)$$

式中: $\Delta L$ 为截断部分的空芯保偏光子带隙光纤长度; $P_1(\lambda)$ 和 $P_2(\lambda)$ 分别为截断前和截断后的输出光谱功率密度。

## 2.2 空芯光纤弯曲损耗测试

除一般情况下的光纤损耗性能,许多应用场景也对空芯光纤的弯曲损耗提出了要求,例如光纤陀螺这一典型应用的发展趋势要求陀螺敏感单元小型化、高精度和抗干扰等。空芯光纤由单一玻璃材料构成,具备抗干扰优势,但空芯光纤内部结构复杂,其弯曲性能较常规实芯光纤弱。因此,利用空芯光纤作为陀螺仪敏感部件时,就要求其具备良好的抗弯曲性能。

由于HCPBF能较好地将光束束缚在空气纤芯中,其弯曲损耗要显著优于纤芯更大的HCARF,表现出优良的抗弯曲性能。以近两年本团队开发的7-cell(取出中间7根毛细管构成空气纤芯,纤芯直径约17  $\mu\text{m}$ )和19-cell(取出中间19根毛细管构成空气纤芯,纤芯直径约30  $\mu\text{m}$ )HCPBF为对象(如图5所示)进行弯曲损耗测试,即将对应的光纤缠绕在不同直径的圆柱体工装上,然后测量其输出光谱。

测试结果分别如图6和图7所示,由图可知,即使是在弯曲直径仅为4 mm的微小弯曲情况下,7-cell HCPBF在1550 nm波段弯曲和舒展状态下的传输谱依然重合,表明弯曲损耗非常小;而19-cell HCPBF的抗弯曲性能则略差于7-cell HCPBF,只有在弯曲直径 $\geq 10$  mm时,1550 nm波段的弯曲和舒展状态传输谱才会基本重合在一起。HCPBF弯曲损耗最典型的特征是传输谱红移和带宽变窄,所以需要尽可能避免HCPBF在较小工作波段时出现微小弯曲情况。

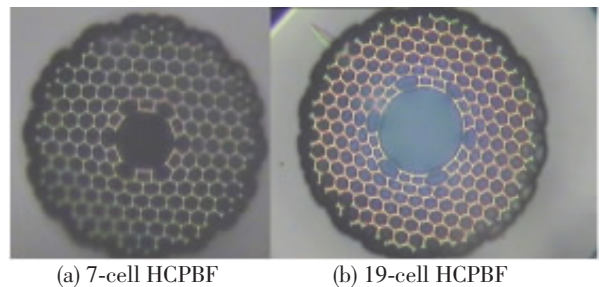
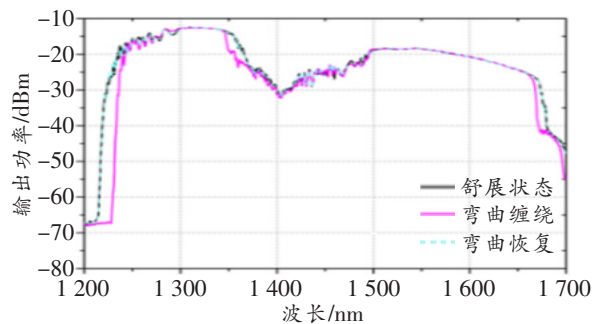
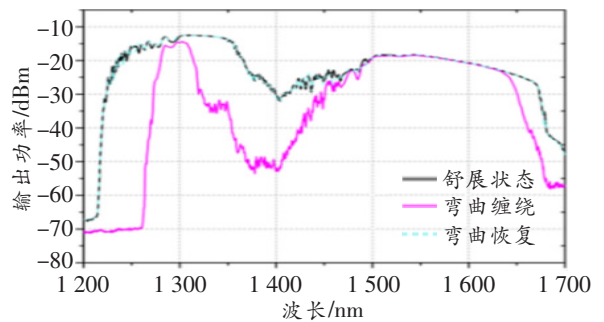


图5 自产7-cell和19-cell HCPBF横截面图

Figure 5 Cross-section of self-produced 7-cell and 19-cell HCPBF



(a) 弯曲直径 10 mm  
(a) Bending diameter 10 mm



(b) 弯曲直径 4 mm  
(b) Bending diameter 4 mm

图6 7-cell HCPBF在不同弯曲直径下的输出光谱

Figure 6 Output spectrum of 7-cell HCPBF at different bending diameters

对比HCPBF良好的抗弯曲性能,HCARF的

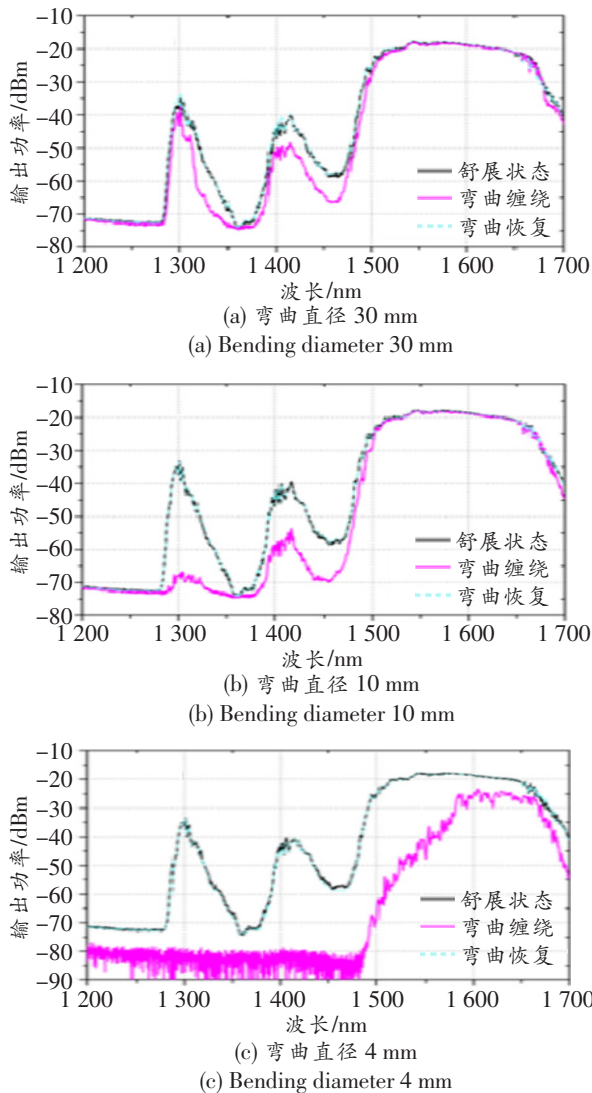


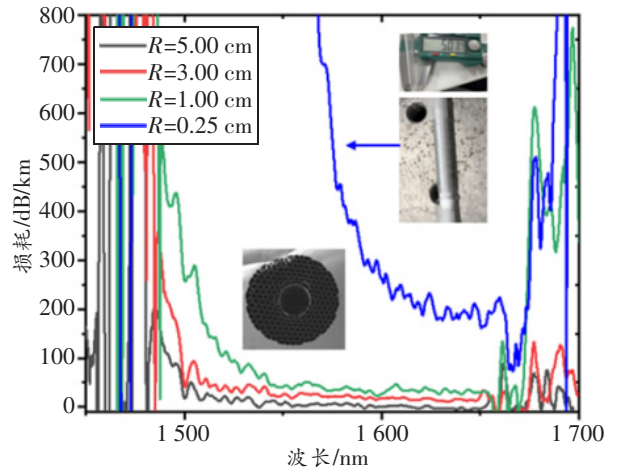
图7 19-cell HCPBF 在不同弯曲直径下的输出光谱

Figure 7 Output spectrum of 19-cell HCPBF at different bending diameter

包层结构在弯曲条件下束缚光的能力弱,使光能量容易耦合到包层圆环中,相应的弯曲损耗也会急剧放大,故在使用时需要格外注意不能出现小半径弯曲。同样以本团队开发的单层6环HCARF进行弯曲损耗测试,而且区别于前文HCPBF弯曲损耗测试的定量分析,此次测试通过将待测光纤密排缠绕数10圈于不同半径的圆柱体上,精确计算出每1圈弯曲所引入的弯曲损耗。

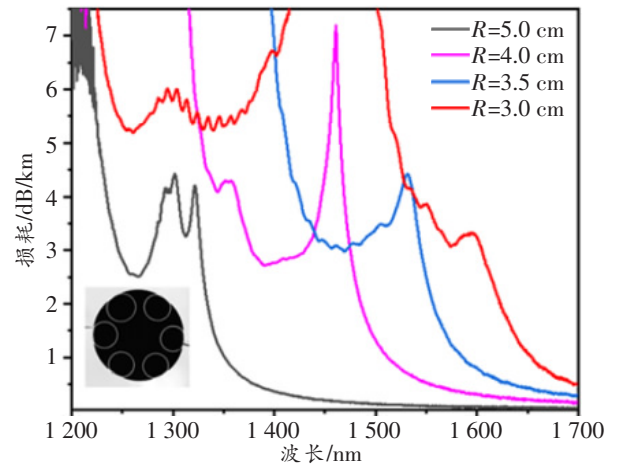
具体弯曲损耗测试结果如图8所示,其中插入有实际测试时工装和光纤样品照片,在1550 nm波段,当圆柱体半径为3 cm时,19-cell HCPBF缠绕1圈引入的弯曲损耗只有  $2.13 \times 10^{-3}$  dB,而6环HCARF缠绕一圈引入的弯曲损耗则高达96.3 dB<sup>[23]</sup>,两者存在4个数量级的差距,对比结果

如表1所示。



注:R为弯曲半径。

(a) 19-cell HCPBF 在不同弯曲半径下损耗情况  
(a) Bending loss at different bending radius of 19-cell HCPBF  $\times 10^4$



(b) 6环HCARF 在不同弯曲半径下损耗情况  
(b) Bending loss at different bending radius of 6-ring HCARF

图8 19-cell HCPBF 和 6环 HCARF 弯曲损耗测试结果

Figure 8 Bending loss test results of 19-cell HCPBF and 6-ring HCARF

表1 HCPBF 和 HCARF 的弯曲损耗对比

Table 1 Comparison of bending loss between HCPBF and HCARF

弯曲半径/cm	弯曲损耗/dB/圈	
	19-cell HCPBF	6环 HCARF
5.00	$0.42 \times 10^{-3}$	1.93
4.00	/	9.35
3.00	$2.13 \times 10^{-3}$	96.30
1.00	$1.39 \times 10^{-3}$	/
0.25	$3.63 \times 10^{-3}$	/

### 2.3 空芯光纤 RIA 测试

当空芯光纤应用于航天用光纤陀螺中时,除了要关注光纤的弯曲损耗特性,由于航天环境恶劣,受

到宇宙辐射影响,因此还有一个重要指标 RIA 不容忽视。

当使用 SMF 或传统保偏光纤 (Polarization Maintaining Fiber, PMF) 绕制光纤陀螺敏感环时,空间辐射会引起锗掺杂纤芯玻璃键结构变化<sup>[24]</sup>,导致纤芯对光能量吸收增加,产生很高的 RIA,严重影响光纤陀螺使用寿命和可靠性。空芯光纤得益于其空气孔的高占空比,降低了纤芯区域石英壁的厚度,使得光场和石英材料的重叠面积极小,具备较强的抗辐照性能。图 9 所示为南安普顿大学研究人员对 HCPBF 和 SMF 的 RIA 测试对比结果<sup>[25]</sup>,其中插入有使用的 HCPBF 样品扫描电镜图。分别将 HCPBF 和 SMF 放置于  $\gamma$  射线辐照下,当总辐照剂量达到 940 kGy 时,在 1 550 nm 波段,测得 SMF 的 RIA 约为 210 dB/km,对应的 HCPBF RIA 仅为 2.1 dB/km,是 SMF 的百分之一。

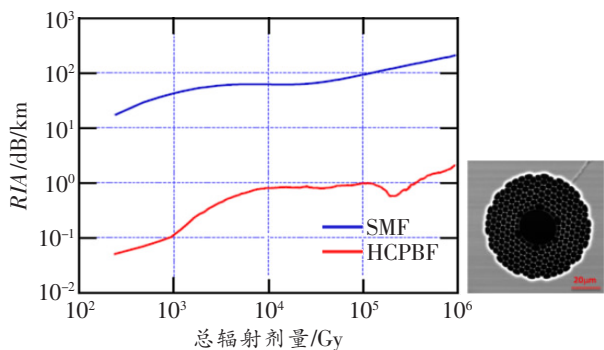


图 9 1 550 nm 波段时 HCPBF 和 SMF 的 RIA 随辐照剂量变化情况<sup>[25]</sup>

Figure 9 RIA as a function of total dose at 1 550 nm between HCPBF and SMF<sup>[25]</sup>

由此可见,空芯光纤具备极强的抗辐照性能,可以大大提高光纤器件在太空辐照环境下的寿命,保证其性能稳定。

### 3 空芯光纤应用技术

空芯光纤的应用技术,主要还是集中在通信、传感、激光传能和光纤陀螺等领域,且不同类型的空芯光纤,应用方向的重点也不相同。

#### 3.1 HCBF 应用

HCBF 损耗性能较差,通常应用于短距离元器件场景,例如光纤滤波器、激光能量传输以及各类传感器中。HCBF 用作光纤滤波器,可用于激光器的输出波长选择。北京交通大学娄老师团队将 HCBF 与一个由 PMF 绕制的 Sagnac 环通过  $2 \times 2$  的耦合器连接在一起,构成了一种新型光纤滤波器<sup>[26]</sup>,使

不同的输出光波长具有不同的透射强度,与传统等波长间隔和等幅值的梳状输出谱相比,能有效抑制模式竞争,提高边模抑制比,并增强激光的输出稳定性,其输出如图 10 所示。

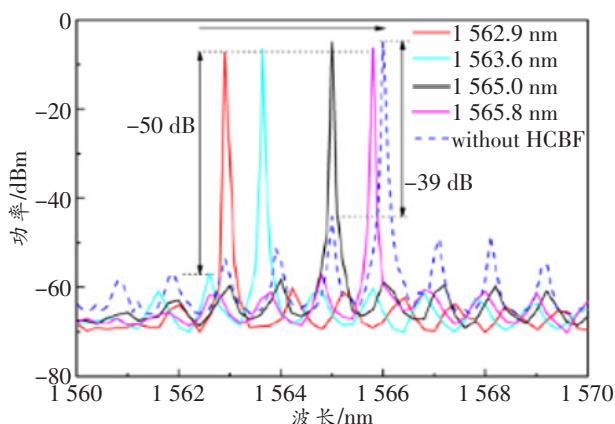


图 10 基于 HCBF 的新型光纤滤波器在 1 562.5 ~ 1 565.8 nm 的单波长输出情况<sup>[26]</sup>

Figure 10 Single-wavelength lasing output in the range 1 562.5 ~ 1 565.8 nm of the proposed Novel Fiber Filter based on HCBF<sup>[26]</sup>

HCBF 也被用作红外激光和飞秒激光脉冲的传输介质。飞秒激光单脉冲持续时间极短,一般为几十到几百飞秒,但其峰值功率极大,频谱范围超宽,而 HCBF 的高损伤阈值以及宽光谱和大角度的光反射特性,十分适用于飞秒激光脉冲的传输。此外,通过调整 HCBF 的制造材料,可以改变其工作波段,例如采用塑料材料时,对应的 HCBF 能支持可见光和 THz 波段的光传输<sup>[27]</sup>。MIT 团队在多年前尝试利用塑料薄膜和高折射率疏系玻璃薄膜实现大折射率差的布拉格包层结构空芯光纤<sup>[28]</sup>,不过在 10.6  $\mu\text{m}$  波长传输性能方面损耗较大。

光纤传感方面,基于 HCBF 的传感技术常用于各类气体、温度、压力和应变传感器中。2021 年, Wang 等人提出一种基于光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 和 HCBF 级联的光纤传感器<sup>[29]</sup>,如图 11 所示。其传感单元由一段包含 FBG 的 SMF、一段 HCBF 以及一段空芯毛细管 (Hollow Core Capillary, HCC) 拼接而成,能同时测量环境温度和气压。在最高 600  $^{\circ}\text{C}$  温变以及 2 MPa 气压的大动态范围内,该光纤传感器实现了对温度和气压的准确检测,其压力和温度灵敏度分别为  $-3.747 \text{ nm/MPa}$  和  $25.925 \text{ pm/}^{\circ}\text{C}$ 。此外,只需稍微调整传感单元结构,变为 SMF-HCBF-SMF 拼接级联,即可利用 HCBF 透射光对外界环境变化敏感

的特性,实现对液位甚至人体呼吸的传感检测<sup>[30-31]</sup>。

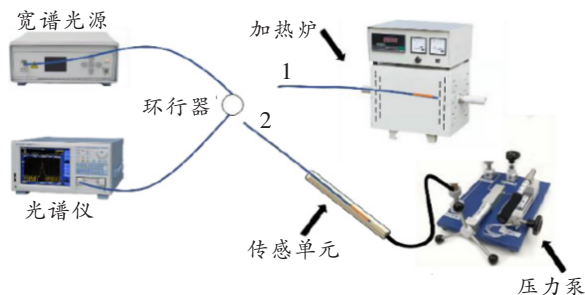


图 11 用于温度和气压测试的光纤传感器实验装置示意图<sup>[30]</sup>

Figure 11 Experiment setup for temperature and gas pressure response<sup>[30]</sup>

### 3.2 HCPBF 应用

HCPBF 的应用范围很广,除光纤通信外,还在光纤陀螺、光纤传感、高功率激光传能和偏振控制等方面有广泛应用。早在 2013 年,英国南安普顿大学 Poletti 教授团队就将 19-cell HCPBF 用于密集波分复用 (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) 传输,在 1 528~1 560 nm 波段的 37 个通道上以 40 Gbit/s 的速率发射信号,实现了 1.45 Tbit/s 的大容量传输,这是首次以接近光速的速率进行波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 数据传输的实验演示<sup>[17]</sup>,其 37 个通道的输出和使用的 19-cell HCPBF 如图 12 所示。

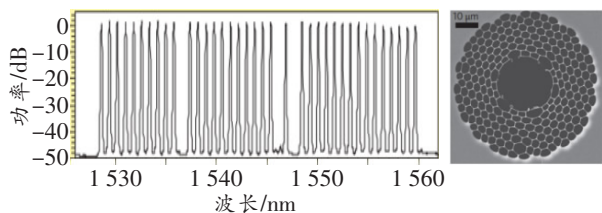


图 12 37×40 Gbit/s DWDM 传输系统的输出和其采用的 19-cell HCPBF<sup>[17]</sup>

Figure 12 37×40 Gbit/s DWDM transmission system output and its adoption of 19-cell HCPBF<sup>[17]</sup>

由于 HCPBF 的传输光模式仅限于空气芯,且具备极佳的抗弯曲性能,将其绕制成敏感环用于光纤陀螺中时,可以有效消除使用传统 PMF 时的克尔效应、法拉第效应和布里渊散射,并能提供更好的温度稳定性与更低的辐射敏感性。2016 年,斯坦福大学 Digonnet 等人研制了一款采用激光光源的 HCPBF 光纤陀螺<sup>[32]</sup>,该陀螺拥有极低的随机游走系数  $0.000\ 73\ ^\circ/\sqrt{h}$ ,零偏稳定性也达到  $0.03\ ^\circ/h$ ,是当时报道的采用相干光源光纤陀螺中的最低值;同年,北京航空航天大学冯教授小组通过优化设计

耦合结构,搭建了基于 HCPBF 的谐振式光纤陀螺实验样机<sup>[33]</sup>,通过 Allan 方差分析,该陀螺系统零偏稳定性为  $71\ ^\circ/h$ ,角随机游走系数为  $0.97\ ^\circ/\sqrt{h}$ ;2021 年,冯教授团队通过匹配谐振式光纤陀螺中 HCPBF 和 PMF 的长度,获得的谐振腔的谐振深度差小于 1.8%,有效地减小了 HCPBF-PMF 谐振腔熔点处菲涅尔反射的影响,有望实现精确谐振频率检测<sup>[34]</sup>。

HCPBF 也可用于温度、压力和应变等参数的传感。又因为 HCPBF 具备精细的包层微孔结构,为气体和液体等物质的填充提供了可能,有助于扩展其传感功能。当用折射率大于或等于石英材料的液体填充 HCPBF 纤芯时,就类似于实芯光子带隙光纤,由于不同的液体可提供的折射率范围也不同,因此可以通过灵活调节填充材料类型来调整 HCPBF 的传播模式和数值孔径等参数。当用折射率小于石英材料的液体填充 HCPBF 纤芯时,HCPBF 仍然可以保持光子带隙的导光原理,但其传输频谱会发生漂移<sup>[35]</sup>,如图 13 所示。基于该特性,这类液体/胶体填充光纤可用于制备高灵敏度的液体/胶体检测传感器,或者依据不同工作波长或工作温度的转变构建新型的光开关、衰减器和温度传感器等。

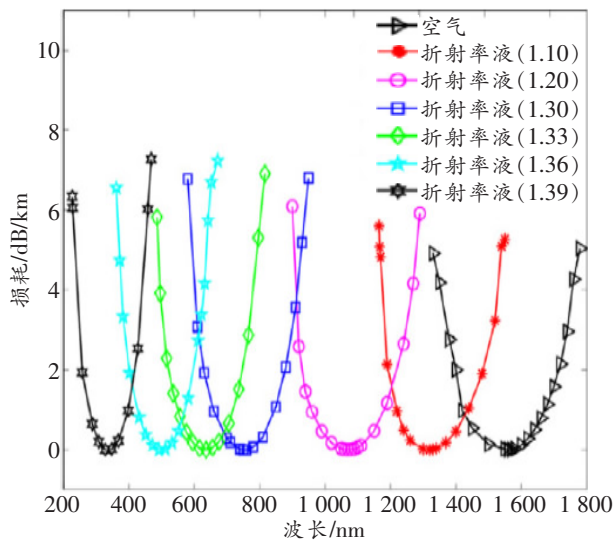


图 13 HCPBF 微孔中填充不同折射率液体时传输谱漂移仿真图<sup>[35]</sup>

Figure 13 The calculated transmission spectrum drift of a HCPBF filled with different refractive index liquids<sup>[35]</sup>

### 3.3 HCARF 应用

由于 HCARF 具有很低的损耗,当前已进入实际的通信传输试验阶段。美国电信运营商 Comcast

与英国光纤供应商 Lumenisity 合作,在费城的两个地点之间部署了一条 40 km 混合 HCARF 和传统光纤的链路,成功地测试了双向传输,能够在单股 HCARF 路径上同时产生 10 ~ 400 Gbit/s 的传输速率,传输速度比传统光纤快 150%,延迟时间缩减了 33%。来自意大利 Politecnico 和 Links 基金的一个小组,在 41 通道 C 波段 WDM 循环回路测试实验中使用了 11.5 km 的嵌套式 5 环 HCARF (如图 14 所示),即便是循环传输 350 次 (4 025 km),所有通道的平均广义互信息 (Generalized Mutual Information, GMI) 依然可达 3.54 bits/symb (相当于纠错前 3% 的误码率)<sup>[36]</sup>。美国 OFS 公司同样基于可现场部署的空芯光纤光缆,进行了 31 通道 WDM 10 Gbit/s 不归零编码 (Non-return-to-zero Code, NRZ) 实时光传输,无需前向纠错编码 (Forward Error Correction, FEC) 即可实现 3 km 无误码超低延时光传输。

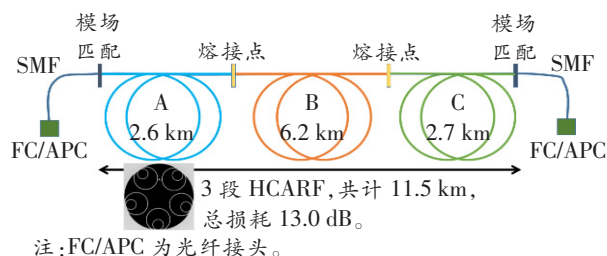


图 14 11.5 km 嵌套 5 环 HCARF 构成的传输路径<sup>[36]</sup>

Figure 14 11.5 km nested 5-ring HCARF transmission path<sup>[36]</sup>

同 HCPBF 一样,HCARF 也可应用于光纤传感、激光传能、光纤陀螺、偏振控制以及 THz 波传输等领域。THz 波段的 HCARF 通常由各种聚合物材料制成,尺寸也较大,可以不拉制,直接由聚合物管组合堆积而成,也可以使用三维 (3 Dimensional, 3D) 打印技术来制造。虽然当前 THz-HCARF 的损耗水平还未达到足以实际应用的阶段,但相较于金属 THz 波导等已拥有巨大优势<sup>[37]</sup>,随着制备工艺的提升以及新材料的开发,THz-HCARF 的损耗有望进一步降低。

在激光传能方面,Photonic Tools 公司早在 2015 年就开始将 HCARF 集成于激光传输光缆,用于高功率激光脉冲传输。空芯光纤成缆需要极精密的加工控制技术,以防止引入额外的应力或变形导致光纤损耗增加,甚至传输模式的改变,降低光束质量。Photonic Tools 推出的激光传输光缆,将

HCARF 密封于光缆内部,其空气纤芯能够以高光束质量传导大功率激光脉冲,同时保持脉冲功率、脉冲持续时间和偏振态的稳定,到如今,其开发的超快激光器模块化光传输系统,能以准单模方式传输达数百 MW 的高功率超快脉冲,并可以集成到现有的多类型加工机械设备中<sup>[38]</sup>,图 15 所示为 Photonic Tools 公司推出的大功率光纤连接器,主要由连接头和激光传输光缆组成。国内,北京交通大学娄老师团队也对其研发 HCARF 的高功率传能性能进行了测试<sup>[39]</sup>,实现高达 270 nm 的 3 dB 带宽,且其光束质量因子  $M^2$  仅为 1.05。

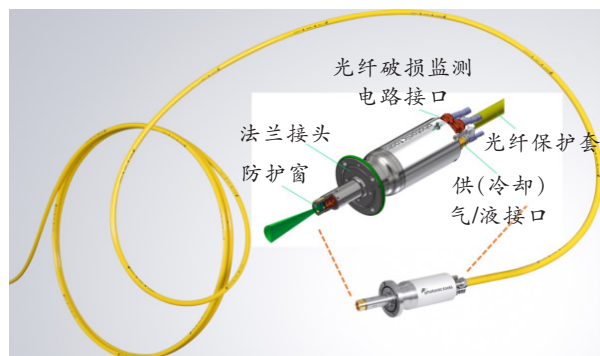


图 15 Photonic Tools 公司推出的大功率光纤连接器<sup>[38]</sup>

Figure 15 Photonic Tools' high-power optical fiber connector<sup>[38]</sup>

在光纤陀螺方面,研究人员也将 HCARF 应用于谐振式光纤陀螺中。2021 年,霍尼韦尔和英国南安普顿大学光电研究中心合作<sup>[40]</sup>,在谐振式光纤陀螺中采用嵌套式 6 环 HCARF 绕制光纤环,用于角度  $\Omega$  传感,如图 16 所示。该陀螺的长期工作零偏不稳定性可以达到 0.05 °/h,是之前谐振式空芯光纤陀螺性能的 3 倍。

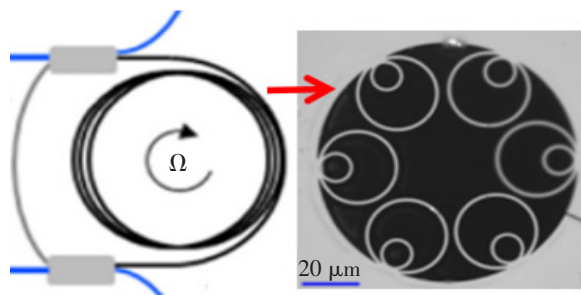


图 16 霍尼韦尔推出的谐振式光纤陀螺中使用的嵌套式 HCARF 光纤环<sup>[40]</sup>

Figure 16 Nested HCARF ring used in the resonator fiber optic gyro introduced by Honeywell<sup>[40]</sup>

此外,空芯光纤成缆以及光纤通信、传感和陀螺等应用场景下,必然要面临空芯光纤同空芯光纤或

空芯光纤同 SMF 等的接续问题。从 2001 年开始,国内外一些公司、高校和研究机构已经就其熔接技术及相关工艺进行研究,并取得了重大进展。2016 年,英国南安普顿大学光子学研究中心的 Hayes 等人通过在 SMF 和 HCARF 之间引入模场匹配的过渡光纤,实现了 SMF-HCARF-SMF 总熔接损耗 2.1 dB<sup>[41]</sup>;2018 年,北京工业大学汪老师团队,基于过渡光纤模场匹配方法,将 HCPBF-SMF 的熔接损耗降低到了 0.844 dB<sup>[42]</sup>;2021 年,复旦大学肖老师团队通过 SMF 反向扩锥方式,将 SMF-HCARF-SMF 的总熔接损耗降低为 0.88 dB<sup>[43]</sup>。

## 4 结束语

与基础科研不同,工程技术必定与亟待解决的实际问题相关联,且一项成熟的技术一定会经历一环又一环的技术迭代。如今,实芯结构的通信 SMF 不足以满足新兴的工程问题,空芯光纤异军突起,是极具应用潜力和前景的特种光纤之一。不过我们也需要客观看待,大部分空芯光纤研究成果依然还处于实验室验证阶段,距离真正的实际应用尚有很长一段距离。文中提到了 3 类空芯光纤,覆盖了很多应用领域,并不是每一类光纤都适用于大多数工业应用场景,技术也在进行优胜劣汰,与应用场景之间相互选择。

此外,得益于相关制造工艺水平和设备性能的提升,虽然当前在空芯光纤拉制上已取得相当大的成果,但如何保证拉制过程中空芯光纤结构的均匀不变以及单次拉制出数 10 km 长性能一致的空芯光纤,真正实现量产化,依然是个难题。

可以预见,未来空芯光纤的发展方向主要集中在以下几个方面:

(1) 光纤制备材料的多样化发展。为了应对在更广阔波段上的应用需求,光纤制备材料已经不仅限于纯石英玻璃材料,也可以通过修改玻璃材料来降低表面模,进而进一步优化光纤损耗。与此同时,塑料(THz 波段)、多组份玻璃(红外)等均已有了相关产品,而且随着 3D 打印等新技术的出现,必会催生出越来越多新的空芯光纤制备适配材料。

(2) 光纤设计及制造相关技术的突破和提升。一方面设计出具备新性能(例如保偏空芯光纤)的光纤、制造更加简单和性能可靠的空芯光纤结构,另一方面从空芯光纤拉制技术本身着手,突破光纤微结构长距离保型的难题,实现批量化生产。

(3) 应用向实际工程化推广中,只强调单一指

标的提升而忽视全面性能会导致应用难度不减反增,且从实验室验证走向工程应用还会面临很多问题,例如空芯光纤接续问题、长期工作稳定性问题和后期维护更换问题等,均需要仔细考量并一一克服。“好光纤”的定义一定不是仅仅某项指标非常优异,而是整体“好用”。

(4) 标准化推进。仅仅通过对细微结构的调整,即可实现传输过程中对信号或能量的控制,这一“优势”也造成这一类光纤标准化难度大,应用端追求的永远是简单、易用以及低成本。空芯光纤想实现类似通信 SMF 一样,稳定、可靠和经久不衰,需要全行业上下游的共同支撑,共同推进建立标准化。

## 参考文献:

- [1] Li M J, Hayashi T. Advances in Low-loss, Large-area, and Multicore Fibers[M]. Willner A E. Optical Fiber Telecommunications VII. New York: Academic Press, 2019.
- [2] Debord B, Amrani F, Vincetti L, et al. Hollow-core Fiber Technology: The Rising of “Gas Photonics”[J]. Fibers, 2019, 7(2):7020016.
- [3] Vienne G, Xu Y, Jakobsen C, et al. Ultra-large Bandwidth Hollow-core Guiding in All-silica Bragg Fibers with Nano-supports[J]. Optics Express, 2004, 12(15): 3500—3508.
- [4] Matějček V, Podrazky O, Kašík I, et al. Comparison of Characteristics of Bragg Fibers with Silica and Air Cores[C]//Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. Prague, Czech Republic: SPIE, 2014:945500Y.
- [5] Benabid F, Knight J C, Antonopoulos G, et al. Simulated Raman Scattering in Hydrogen-filled Hollow-core Photonic Crystal Fiber[J]. Science, 2002, 298(5592): 399—402.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Kolyadin A N, Kosolapov A F, Pryamikov A D, et al. Light Transmission in Negative Curvature Hollow Core Fiber in Extremely High Material Loss Region [J]. Optics Express, 2013, 21(8):9514—9519.
- [9] Bradley T D, Hayes J R, Chen Y, et al. Record Low-loss 1.3 dB/km Data Transmitting Antiresonant Hol-

- low Core Fibre [C]//2018 European Conference on Optical Communication(ECOC). Rome, Italy: IEEE, 2018:8535324.
- [10] 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(1):2828.
- [11] Bradley T, Jasion G, Hayes J, et al. Antiresonant Hollow Core Fibre with 0.65 dB/km Attenuation Across the C and L Telecommunication Bands[C]//45th European Conference on Optical Communication (ECOC2019). Dublin, Ireland: ECOC, 2019:1028.
- [12] Jasion G T, Bradley T D, Harrington K, et al. Hollow Core NANF with 0.28 dB/km Attenuation in the C and L Bands[C]//Optical Fiber Communication Conference 2020. San Diego, CA, USA: IEEE, 2020:Th4B.4.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Mangan B J, Farr L, Langford A, et al. Low Loss (1.7 dB/km) Hollow Core Photonic Bandgap Fiber [C]//Optical Fiber Communication Conference. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2004:PDP24.
- [16] Roberts P J, County F, Sabert H, et al. Ultimate Low Loss of Hollow-core Photonic Crystal Fibers[J]. *Optics Express*, 2005, 13(1):236-244.
- [17] Poletti F, Wheeler N V, Petrovich M N, et al. Towards High-capacity Fibre-optic Communications at the Speed of Light in Vacuum[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(4):279-284.
- [18] Frosz M H, Nold J, Weiss T, et al. Five-ring Hollow-core Photonic Crystal Fiber with 1.8 dB/km Loss[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13):2215-2217.
- [19] Richardson D J, Wheeler N V, Chen Y, et al. Hollow Core Fibres and Their Applications[C]//2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). Los Angeles, CA, USA: IEEE, 2017: Tu3H.1.
- [20] Fink Y, Ripin D J, Fan S, et al. Guiding Optical Light in Air Using an All-dielectric Structure[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(11):2039-2041.
- [21] Joannopoulos D J, Johnson G S, Winn N J, et al. *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*[M]. Princeton: Princeton University Press, 2011.
- [22] Ding W, Wang Y Y, Gao S F, et al. Recent Progress in Low-loss Hollow-core Anti-resonant Fibers and Their Applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2020, 26(4):2957445.
- [23] 顾帅, 皮鹏程, 廉正刚, 等. 面向光纤陀螺发展需求的空芯微结构光纤的弯曲特性研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(13):1306002.
- Gu S, Pi P C, Lian Z G, et al. Research on the Bending Characteristics of Hollow-core Micro-structured Fibers for the Development of Fiber Optic Gyroscopes [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(13):1306002.
- [24] Griscom D L. Nature of Defects and Defect Generation in Optical Glasses[J]. *Radiation Effects in Optical Materials*, 1985, 541:975358.
- [25] Olanterä L, Sigaud C, Troska J, et al. Gamma Irradiation of Minimal Latency Hollow-core Photonic Bandgap Fibres[J]. *Journal of Instrumentation*, 2013, 12(8):C12010.
- [26] Zhao T L, Lian Z G, Wang X, et al. Switchable and Tunable Erbium-doped Fiber Lasers Using a Hollow-core Bragg Fiber [J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(11):115104.
- [27] 王学忠, 庞方亮, 于荣金, 等. 微结构塑料光纤及其通信领域应用趋势[C]//第八届全国塑料光纤与聚合物光子学会议. 中国, 成都: 中国光学学会, 2012:23-29.
- Wang X Z, Pang F L, Yu R J, et al. Micro-structured Plastic Fiber and Its Application Trend in Communication Field[C]//The 8th National Conference on Plastic Optical Fiber and Photonics of Polymers. Chengdu, China: COS, 2012:23-29.
- [28] Temelkuran B, Shandon D H, Benoit G, et al. Wavelength-scalable Hollow Optical Fibres with Large Photonic Bandgaps for CO<sub>2</sub> Laser Transmission[J]. *Nature*, 2002, 420:650-653.
- [29] Wang Y, Tao J H, Yuan W H, et al. Hollow Core Bragg Fiber Integrated with Regenerate Fiber Bragg Grating for Simultaneous High Temperature and Gas Pressure Sensing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(17):5643-5649.
- [30] Wang Y, Yan G F, Lian Z G, et al. Liquid-level Sensing based on a Hollow Core Bragg Fiber[J]. *Optics Express*, 2018, 26(17):21656-21663.
- [31] Yuan W H, Li L D, Wang Y, et al. Temperature and Curvature Insensitive All-fiber Sensor Used for Human Breath Monitoring[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17):26375-26384.
- [32] Dignonnet M J F, Chamoun J N. Recent Developments in Laser-driven and Hollow-core Fiber Optic Gyroscopes[J]. *Fiber Optic Sensors and Applications XIII*, 2016, 9852:985204.

- [C]//The 16th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, CA, USA; IEEE, 2003, 1:417—418.
- [2] Oosenbrug A, Jakubowicz A. Operational Stability of 980-nm Pump Lasers at 200 mW and Above[C]//Fabrication, Testing, and Reliability of Semiconductor Lasers II. CA, USA: SPIE, 1997, 3004:62—70.
- [3] Burns W K. Current Status of Fiber-optic Gyroscopes [C]//OFC'98. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, Technical Digest, Conference Edition. CA, USA; IEEE, 1998, 2:370.
- [4] Wysocki P F, Digonnet M J F, Kim B Y, et al. Characteristics of Erbium-doped Superfluorescent Fiber Sources for Interferometric Sensor Applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 1994, 12(3):550—567.
- [5] Chung H S, Lee M S, Lee D, et al. Low Noise, High Efficiency L-band EDFA with 980 nm Pumping [J]. Electronics Letters, 1999, 35(13):1099—1100.
- [6] 余金中. 半导体光电子技术 [M]. 北京:北京化学工业出版社, 2003.
- Yu J Z, Semiconductor Optoelectronic Technology [M]. Beijing: Beijing Chemical Industry Press, 2003.
- [7] Adams A R. Band Structure Engineering for Low Threshold High Efficiency Semiconductor Laser [J]. Electronics Letters, 1986, 22(5):249—256.
- [8] Dutta C A, Presby H M. Ideal Microlenses for Laser to Fiber Coupling [J]. Journal of Light Wave Technology, 1993, 11(2):252—256.
- 
- (上接第18页)
- [33] 冯丽爽, 焦洪臣, 李慧, 等. 空芯光子晶体光纤谐振式光学陀螺技术 [C]//2016年光学陀螺及系统技术发展与应用研讨会. 中国, 九江:中国惯性技术学会, 2016: 6—9.
- Feng L S, Jiao H C, Li H, et al. Hollow-core Photonic Crystal Fiber Resonant Optical Gyro [C]// 2016 Symposium on Development and Application of Optical Gyro and System Technology. Jiujiang, China: CSIT, 2016:6—9.
- [34] Ma H H, Jiao H C, Feng C K, et al. Reduction of the Fresnel Reflection Effect in the Hybrid PBF-PMF Resonator for RFOG [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(23):7502—7508.
- [35] Xuan H F, Jin W, Ju J, et al. Low-contrast Photonic Bandgap Fibers and Their Potential Applications in Liquid-base Sensors [C]//Third European Workshop on Optical Fibre Sensors. Napoli, Italy: SPIE, 2007: 661936.
- [36] Nespola A, Sandoghchi S R, Hooper L, et al. Ultra-long-haul WDM Transmission in a Reduced Inter-Modal Interference NANF Hollow-core Fiber [C]//Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2021. San Francisco, CA, USA:OSA, 2021:F3B.5.
- [37] Zhang X Q, Xu Q, Xia L B, et al. Terahertz Surface Plasmonic Waves: A Review [J]. Advanced Photonics, 2020, 2(1):014001.
- [38] Eilzer S, Wedel B. Hollow Core Optical Fibers for Industrial Ultra Short Pulse Laser Beam Delivery Applications [J]. Fibers, 2018, 6(4):6040080.
- [39] Gu S, Wang X, Jia H Q, et al. Single-ring Hollow-core Anti-resonant Fiber with a Record Low Loss (4.3 dB/km) for High-power Laser Delivery at 1  $\mu\text{m}$  [J]. Optics Letters, 2022, 47(22):5925—5928.
- [40] Taranta G A S, Narayanan A A, Fokoua C, et al. Hollow-core Resonator Fiber Optic Gyroscope Using Nodeless Anti-resonant Fiber [J]. Optics Letters, 2021, 46(1):46—49.
- [41] Haye R J, Sandoghchi R S, Bradley D T, et al. Antiresonant Hollow Core Fiber with an Octave Spanning Bandwidth for Short Haul Data Communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(3):437—442.
- [42] 李晓倩, 高寿飞, 汪滢莹, 等. 空芯反谐振光纤与单模光纤的低损耗熔接研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1006002.
- Li X Q, Gao S F, Wang Y Y, et al. Low-loss Fusion Splice of Hollow-core Anti-resonant Fiber and Single Mode Fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1006002.
- [43] Wang C Y, Yu R W, Debord B, et al. Ultralow-loss Fusion Splicing between Negative Curvature Hollow-core Fibers and Conventional SMFs with A Reverse-tapering Method [J]. Optics Express, 2021, 29(14): 22470—2247.