

## 中红外空芯光纤技术现状与发展趋势 (特邀)

张一凡, 洪奕峰, 盛钰霖, 汪滢莹\*

(暨南大学 光子技术研究院 微结构光纤实验室, 广东 广州 511443)

**摘要:** 中红外光纤作为中红外领域的重要器件,在中红外激光产生与传输、生物医学检测、环境检测等领域有着重要应用。然而中红外光纤长期存在制备困难、制备材料化学稳定性差等问题,限制了其发展。与实芯光纤相比,空芯光纤通过构建包层微结构将光波限制在空气中传输,可以大幅降低光纤光学性能对制备材料的依赖,从而为光波传输提供一个低损耗、低色散、低延迟、低非线性、高损伤阈值的理想传输通道,这为中红外光纤的发展拓宽了道路。文中从光纤结构、拉制方式、材料吸收、传输性能等方面分析了石英基和软玻璃基中红外空芯光纤的发展历程、研究现状和应用前景。并通过理论仿真分析了石英基单圈结构和嵌套管结构反谐振空芯光纤吸收损耗、限制损耗与纤芯、壁厚、波长之间的关系,为低损耗中红外反谐振空芯光纤的制备和应用提供了理论指引。

**关键词:** 中红外; 石英基空芯光纤; 软玻璃基空芯光纤; 导光窗口; 光纤损耗

**中图分类号:** TN253      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20230132

### 0 引言

中红外波段 (2.5~15  $\mu\text{m}$ ) 包含重要的大气传输窗口,覆盖多种化学、生物分子吸收峰,在激光通信、环境检测、生物医学等领域有着广泛应用<sup>[1]</sup>。此外,中红外激光在军事国防领域具有重要的应用价值,而光纤作为一种中红外激光产生、频率转换、传输介质,不仅可以提高产生或转换效率,而且可以使光学系统更加紧凑、便携。因此,中红外光纤的研究是中红外领域发展的一个重要突破口。

目前,石英基实芯光纤因传输损耗低、制备技术成熟等特点应用最为广泛,但由于它的光谱范围受石英透明窗口 (约 500~2000 nm) 的限制,不适用于中红外波段。而以氟化物玻璃、硫系玻璃等软玻璃材料为基底的光纤虽具有宽导光窗口、低传输损耗等特点,但制备要求和难度与石英光纤相比相对较高<sup>[1]</sup>。

1999 年,微结构空芯光纤的出现为光波传输提供了一种全新的导光机制。它通过构建包层结构将光波约束在空气纤芯区域,可以强烈地抑制光学模场与玻璃材料之间的重叠,这意味着即使是由高损耗材料

制成的光纤也可以提供低损耗的光传输。这一特性为石英基空芯光纤在中红外波段的应用打下了坚实的基础,也为软玻璃基空芯光纤在中红外领域的发展提供了一个新的思路。同时,空芯光纤还具有低非线性、低延迟、低色散、高损伤阈值等优点,使其更具吸引力。

文中详细综述了中红外空芯光纤技术的研究进展,分别介绍了石英基中红外空芯光纤和不同软玻璃基中红外空芯光纤的性能、拉制方法、应用前景,并对石英基中红外空芯光纤的结构设计方法给出了指导原则,最后对中红外空芯光纤的发展趋势进行了展望。

### 1 石英基中红外空芯光纤

由于石英在 2.5  $\mu\text{m}$  及以上波长处会迅速变得不透明,吸收损耗急剧升高<sup>[2]</sup>。从材料吸收的角度看,石英并不能成为中红外光纤制备材料的最佳选择。但随着空芯光纤的出现,石英基空芯光纤引导中红外不仅被证明是可行的,而且拉制技术更成熟,成品光纤

收稿日期:2023-03-13; 修订日期:2023-04-17

基金项目:国家自然科学基金 (U21A20506, 62222506); 广东省基础与应用基础研究基金 (2021B1515020030)

作者简介:张一凡,女,硕士生,主要从事空芯光纤弯曲损耗方面的研究。

导师(通讯作者)简介:汪滢莹,女,教授,博士,主要从事微结构光纤、光纤器件、非线性光纤光学方面的研究。

质量更有保障,甚至可能是更好的选择。因此,该部分详细描述了石英基红外空芯光纤的发展历程及未来趋势。

### 1.1 光子带隙型空芯光纤

光子带隙光纤包层为二维的光子晶体结构,由周期性排列的石英柱相连形成网状阵列,产生光子带隙效应。当中心区域去除 7 个或 19 个周期结构后,在一定波段范围内的光被限制在中心的缺陷中,无法泄

漏到包层,从而在纤芯中远距离传输<sup>[3]</sup>。

2005 年,赫瑞瓦特大学 J. D. Shephard 等人首次报道了拉制的石英基光子带隙光纤(如图 1(a)所示),在 3.14 μm 波长处的损耗为 2.6 dB/m<sup>[4]</sup>。且仿真表明,通过进一步的结构优化可以实现低于 1 dB/m 的损耗,扩展了石英基单模光纤在中红外的波长范围,在化学和生物传感领域有很大的潜在应用价值<sup>[4]</sup>。

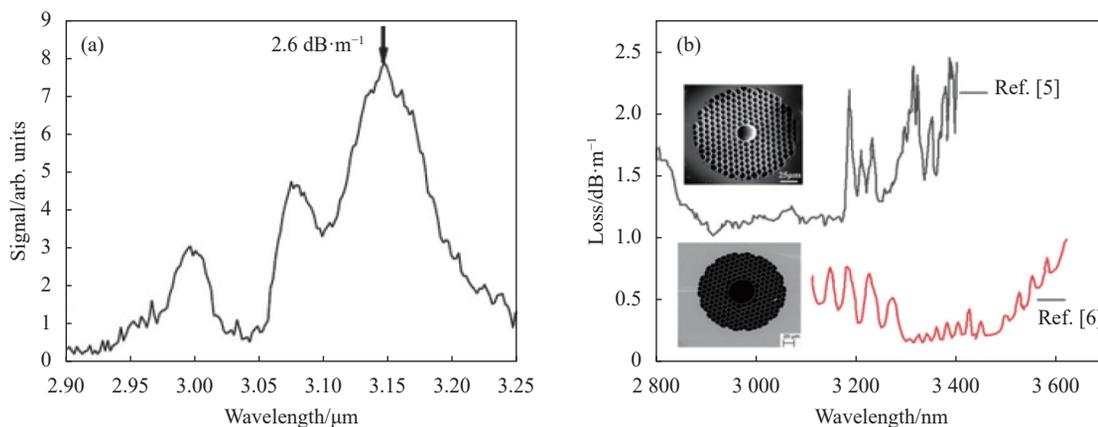


图 1 (a) 扫描电子显微镜照片和光谱的归一化图<sup>[4]</sup>; (b) 扫描电子显微镜照片和光纤损耗谱<sup>[5-6]</sup>

Fig.1 (a) Scanning electron microscope photographs and normalized plot of the spectrum<sup>[4]</sup>; (b) Scanning electron microscope photograph and fiber loss spectrum<sup>[5-6]</sup>

2012 年,赫瑞瓦特大学 A. Urich 等人拉制的石英基光子带隙光纤(如图 1(b)黑线所示)在 2.9~3.15 μm 波段内实现了 1.2 dB/m 的平均损耗,首次证实了具有传输 2.94 μm 波长的高能微秒脉冲钕激光的能力<sup>[5]</sup>。这一技术有潜力应用于激光手术中,替代现有的关节臂和大芯径光纤,从而实现更高的灵活性服务于微创手术<sup>[5]</sup>。

2014 年,南安普顿大学 Natalie V. Wheeler 等人报道拉制的 19 芯光子带隙光纤(如图 1(b)红线所示)具有 3.1~3.7 μm 中红外导光窗口,在波长 3.33 μm 处的损耗低至 0.13 dB/m,比此前报道的光子带隙光纤降低了一个数量级,该波段还表现出了非常低的弯曲损耗<sup>[6]</sup>。并首次证实了通过气体吹扫可以成功去除空芯中的 HCL,使 3.3 μm 波长处的损耗降低到 0.05 dB/m,在气体传感、手术等领域有很大的应用前景<sup>[6]</sup>。

### 1.2 反谐振空芯光纤

自 2011 年以来,反谐振空芯光纤进入了人们的

视野,反谐振空芯光纤包层由特定厚度的石英薄管或石英薄片组成。当石英管厚度满足横向光场在其中相干相消时,形成反谐振效应,光被泄漏到纤芯中,在纤芯中以泄漏模形式传输,这与光子带隙、全内反射效应形成的导模在机理上就有很大的差别。之后的研究表明,只要石英薄管层数足够多,也可以实现超低损耗传输,并且由于石英薄管可以组成内凹的纤芯结构,可以将纤芯基模与玻璃材料之间的重叠系数降低一个数量级以上,实现更低的表面散射损耗和更高的激光损伤阈值,在中红外波段具有更大的发展潜力<sup>[7]</sup>。

#### 1.2.1 单圈反谐振空芯光纤

2012 年,巴斯大学于飞等人报道拉制了一款冰淇淋型反谐振空芯光纤(如图 2 所示),可以在 2.9~3.85 μm 波段实现中红外宽带传输,其中在 3.05 μm 波长处损耗低至 34 dB/km<sup>[8]</sup>,且当弯曲直径大于 40 cm 时弯曲损耗不会显著影响透射光谱<sup>[8]</sup>。次年,该团队对此类

型光纤的结构和尺寸进行了进一步研究,在 4 μm 波长处实现了 85 dB/km 的损耗<sup>[9]</sup>。这两个实验结果

为石英基反谐振空芯光纤在中红外波段的研究与发展奠定了基础。

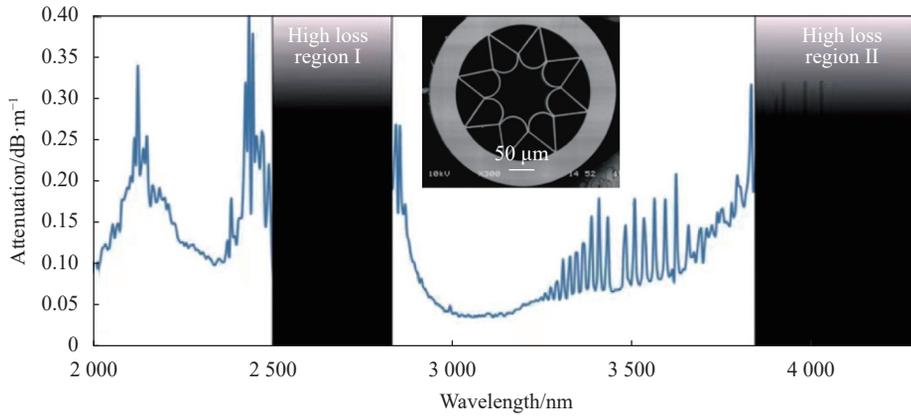


图 2 扫描电子显微镜照片和光纤损耗谱<sup>[9]</sup>

Fig.2 Scanning electron microscope photograph and fiber loss spectrum<sup>[8]</sup>

2013 年,俄罗斯科学院 Anton N. Kolyadin 等人报道拉制了一款包层由八个互不接触的毛细管组成的单圈反谐振空芯光纤(如图 3 所示)。在 2.5~7.9 μm 波段拥有多个传输窗口,最小损耗水平为 4~5 dB/m。即使在 7.7 μm 波长处的损耗高达 50 dB/m,但相比于石英基实芯光纤至少降低了三个数量级,证实了纤芯模式与包层结构非常弱的耦合<sup>[10]</sup>。得益于此,反谐振空芯光纤对中红外波段的光引导具有巨大的潜力。

该团队还分析了实验测得的损耗(红线)比仿真计算的损耗(橙线)高很多的原因,是由于多模波导机制的存在。包层空气孔与纤芯直径的比例偏小,使得光纤支持高阶模,因此不完美的耦合条件会激发高阶模。此外,随着波长减小,不同模式  $R_e(n_{eff})$  的值变得更接近,更容易发生模态间相互作用,这些都导致总损失增加。因此,优化光纤结构从而降低所需波段的损耗水平是很有必要的<sup>[10]</sup>。

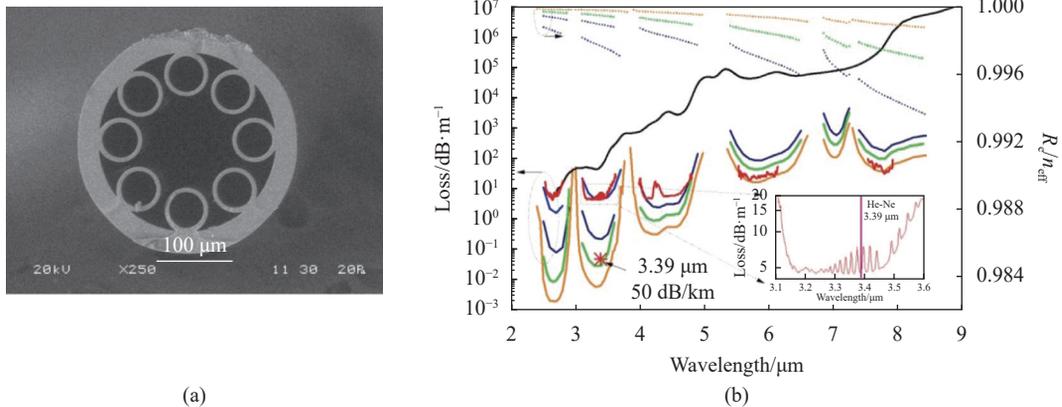


图 3 (a) 扫描电子显微镜照片和 (b) 光纤损耗谱<sup>[10]</sup>: 实验测得传输损耗(红线), 仿真基模传输损耗(橙线)

Fig.3 (a) Scanning electron microscope photograph and (b) fiber loss spectrum<sup>[10]</sup>: Experimentally measured transmission loss (red line), simulated fundamental mode transmission loss (orange line)

虽然石英材料吸收损耗随着波长的增加而快速增加,但可以通过减少模场与二氧化硅的重叠来最小化。2019 年,巴斯大学于飞等人发现在最低阶反共振

条件下,即当包层管壁厚最薄时对应这种重叠最小,而对于更高的共振,这种重叠与壁厚成正比<sup>[2]</sup>。于是,他们调整了单圈反谐振空芯光纤的参数,拉制出的光

纤(如图 4 所示)壁厚为 0.63~0.91  $\mu\text{m}$ 。在 3.1  $\mu\text{m}$  波长下测得的最小损耗为 18 dB/km, 这是一个创纪录的低值, 大幅降低了二氧化硅材料吸收的限制。而在 4  $\mu\text{m}$  波长处损耗为 40 dB/km, 对应  $2.81 \times 10^{-5}$  的模态

重叠, 与仿真数据吻合, 因此可以用仿真手段预测更长波长处的损耗<sup>[2]</sup>。想要进一步降低损耗还可以增大纤芯的尺寸, 这一工作对未来中红外单圈反谐振空芯光纤的设计与应用提供了一定的理论支撑。

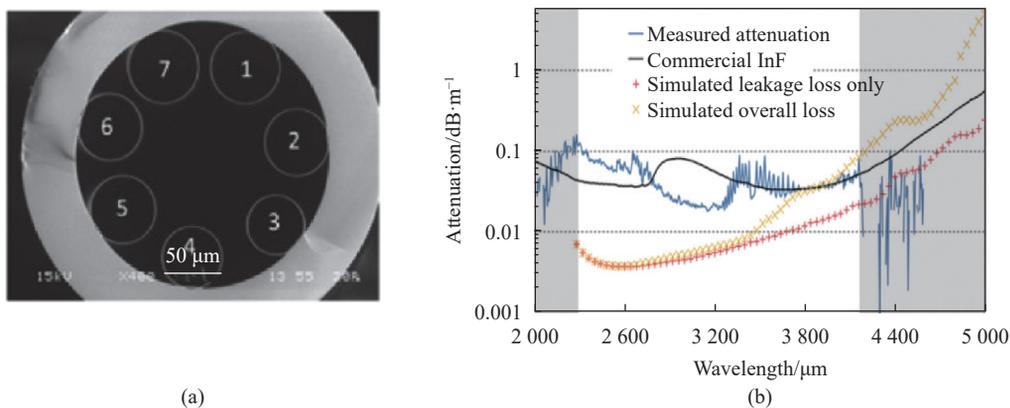
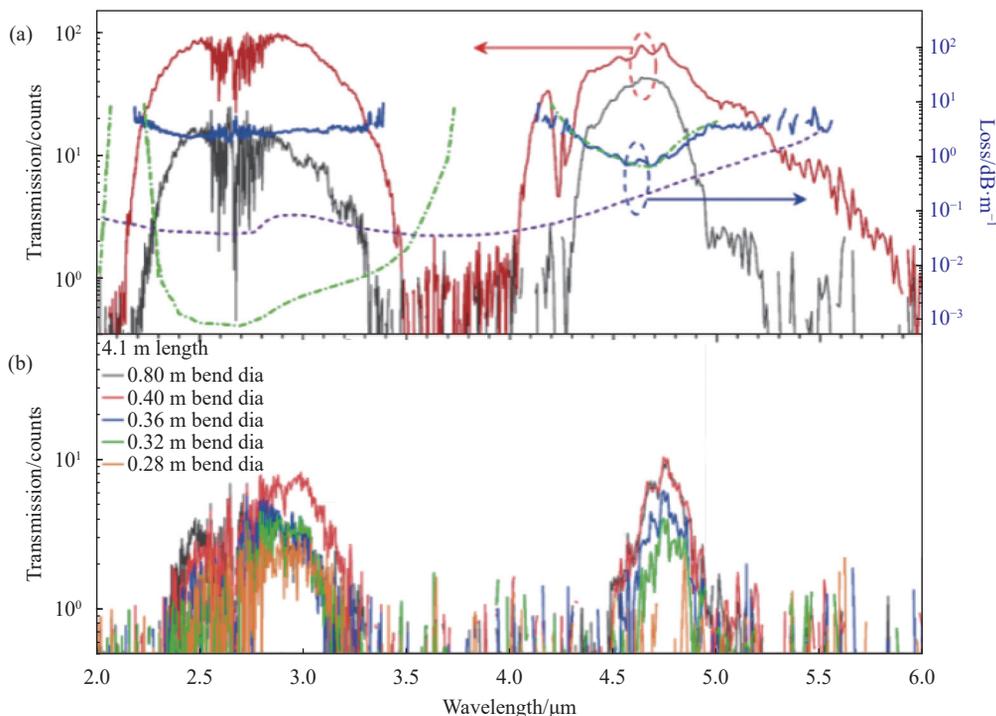


图 4 (a) 扫描电子显微镜照片; (b) 光纤损耗谱<sup>[2]</sup>

Fig.4 (a) Scanning electron microscope photograph; (b) Fiber loss spectrum<sup>[2]</sup>

2020 年, 南安普顿大学 I. A. Davidson 等人报道拉制了一款纤芯为 132  $\mu\text{m}$ 、外径为 358  $\mu\text{m}$  的单圈反谐振空芯光纤(如图 5 所示), 在一阶反谐振窗口(4.3~5.2  $\mu\text{m}$ )的传输损耗是当时最低的, 其中在 4.5~4.7  $\mu\text{m}$  范围内小于 1 dB/m, 在 4.68  $\mu\text{m}$  处最小为 0.7 dB/m<sup>[11]</sup>。虽然 2.5~2.9  $\mu\text{m}$  和 4.15~4.35  $\mu\text{m}$  两波段

内分别有水和二氧化碳的吸收峰, 但可以通过气体吹扫消除<sup>[11]</sup>。同时, 对该光纤进行弯曲灵敏度测量发现, 在 0.32 m 直径下盘绕时, 尽管损耗增大, 它在 4.6~4.9  $\mu\text{m}$  波段仍能导光<sup>[11]</sup>。这是一个十分有意义的结果, 证明通过优化设计可能实现该波段弯曲损耗的降低, 从而扩宽其应用前景。



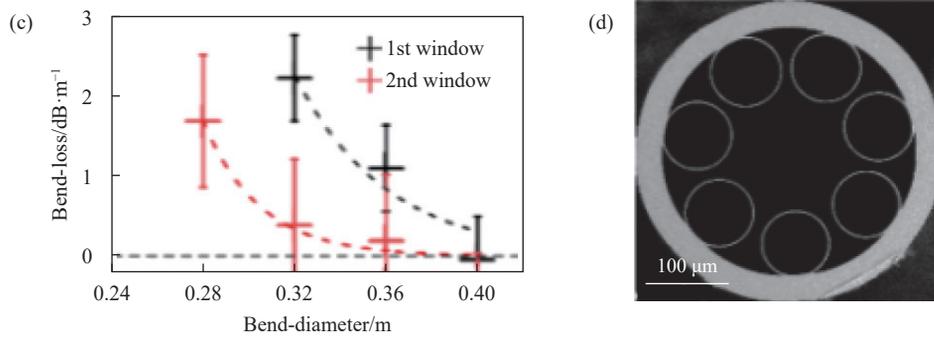


图 5 (a) 传输谱和损耗谱; (b) 不同弯曲直径传输谱; (c) 弯曲损耗; (d) 扫描电子显微镜照片<sup>[11]</sup>

Fig.5 (a) Transmission and loss spectra; (b) Transmission spectra for different bending-diameters; (c) Bending losses; (d) Scanning electron microscope photograph<sup>[11]</sup>

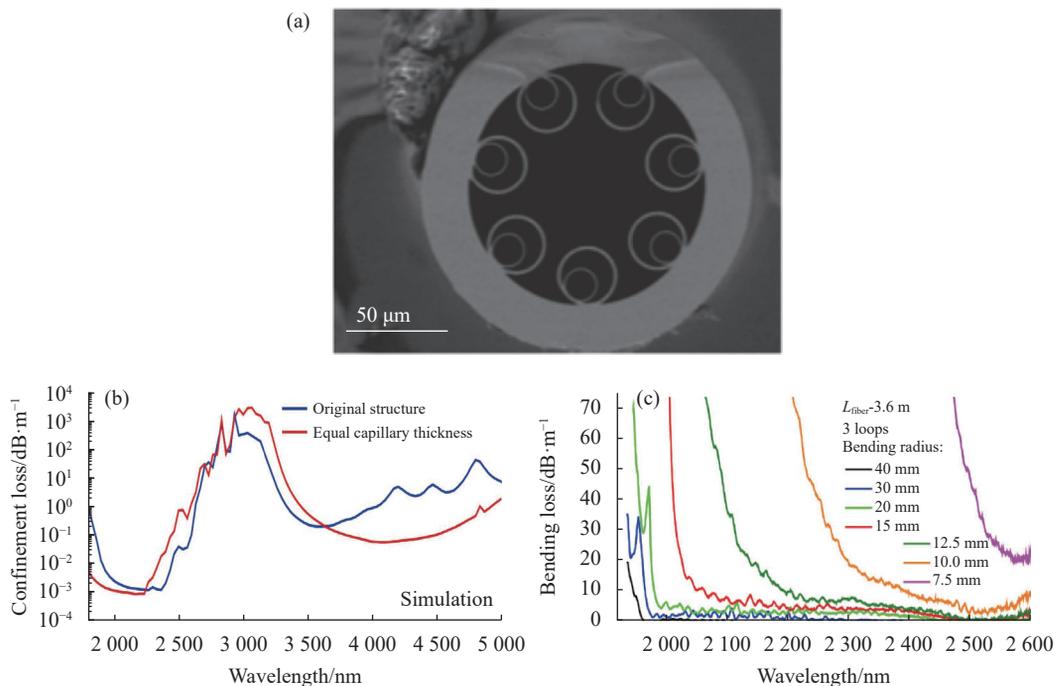
### 1.2.2 嵌套反谐振空芯光纤

2018 年, 多层反谐振空芯光纤进入了人们的视野, 其中连体管反谐振空芯光纤在 1512 nm 波长处的损耗达到 2 dB/km<sup>[12]</sup>。经过结构的不断优化和损耗的不断降低, 2022 年的双层嵌套管结构实现了 0.174 dB/km 的超低损耗, 与石英基实芯光纤的损耗相当<sup>[13]</sup>。此外, 还保留了空芯光纤宽带和低模场-玻璃重叠的特性, 为空芯光纤在中红外领域的发展提供了一个新的结构设计思路。

2019 年, 华沙大学 Mariusz Klimczak 等人报道拉制了一款嵌套反谐振空芯光纤 (如图 6 所示)。实验证明, 该光纤可以实现在 3.5~4.2 μm 的中红外波段传

输<sup>[14]</sup>。且当弯曲半径为 40 mm 时, 4 μm 波长处的弯曲损耗为 0.5 dB/m, 弯曲半径为 15 mm 时, 弯曲损耗为 5 dB/m<sup>[14]</sup>。由此可见, 嵌套反谐振空芯光纤在中红外波段具有较高的抗弯曲性能, 为以后嵌套反谐振空芯光纤在中红外领域的研究与应用提供了实验依据。

随着空芯光纤在中红外波段的不断发展进步, 可以得到一个清晰的结论, 在短波长处限制损耗是损耗的主导因素, 而在中红外波段, 吸收损耗占主导地位。因此, 进一步探索降低吸收损耗的方法, 对拓宽空芯光纤中红外波段的导光窗口、降低光纤损耗具有重要意义。



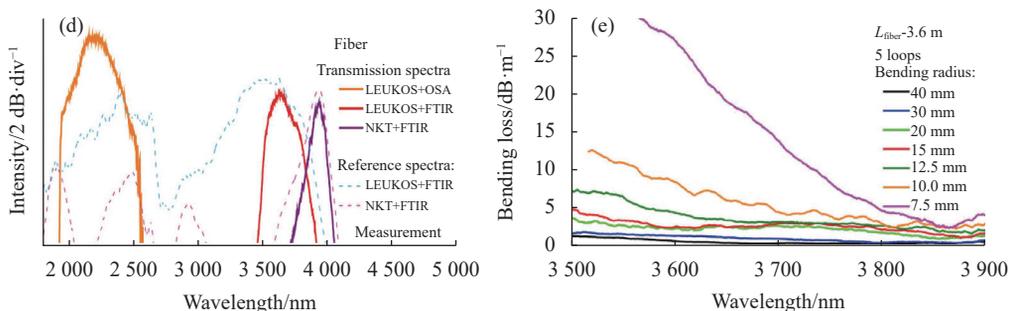


图 6 (a) 扫描电子显微镜照片; (b) 有限元方法仿真限制损耗谱; (d) 传输谱; (c)、(e) 弯曲损耗谱<sup>[14]</sup>

Fig.6 (a) Scanning electron microscope photograph; (b) Finite element method simulation of the fiber confinement loss; (d) Transmission spectra; (c), (e) Bending loss spectrum<sup>[14]</sup>

为进一步研究光纤结构对中红外波段传输损耗性能的影响,笔者团队在南安普顿大学 Fokoua 等人<sup>[15]</sup>对材料吸收损耗分析的基础上展开了进一步的仿真和分析。空芯光纤的吸收损耗与纤芯的尺寸、波长和包层的设计有关<sup>[15]</sup>,因此,在固定纤芯半径、壁厚与波长比例的前提下,对嵌套管结构和单圈结构的空芯光纤进行了吸收、限制损耗的仿真,并进行对比分析。

仿真时设两款光纤的纤芯半径与波长的关系为:

$$a\lambda = 15 \quad (1)$$

式中:  $a$  为纤芯半径;  $\lambda$  为波长。

壁厚  $t$  与波长  $\lambda$  的关系参考反谐振波长公式为:

$$\lambda_m = 4t \sqrt{(n_{\text{石英}} - n_{\text{空气}})/(2m + 1)} \quad (2)$$

式中:  $\lambda_m$  为反谐振波长;  $t$  为毛细管壁厚;  $n$  为折射率;  $m$  为常数 (0, 1, 2, …)。

因此,纤芯半径和壁厚是随波长不断变化的。例如,波长为 2.5  $\mu\text{m}$  时对应纤芯半径为 37.5  $\mu\text{m}$ ; 波长为 4  $\mu\text{m}$  时对应纤芯半径为 60  $\mu\text{m}$ 。限制损耗和吸收损耗的仿真结果如图 7 所示,图中, NANF 为嵌套管反谐振空芯光纤, Single-ring 为单圈反谐振空芯光纤。

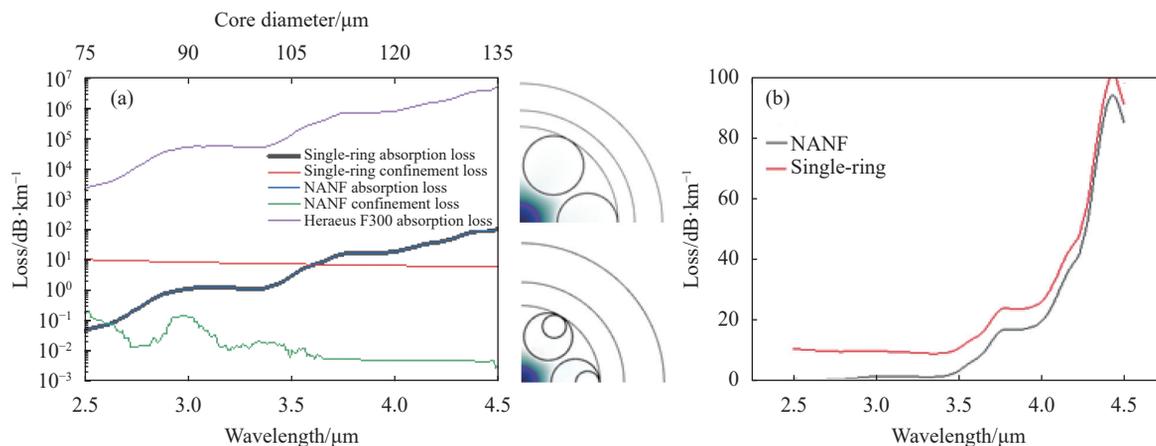


图 7 限制损耗谱和吸收损耗谱。(a) 紫线为 Heraeus F300 石英损耗谱; 蓝线、黑线重叠为 NANF 和 Single-ring 的吸收损耗谱, 红线、绿线分别为 Single-ring 和 NANF 限制损耗谱; (b) Single-ring 和 NANF 总损耗谱

Fig.7 Confinement loss spectra and absorption loss spectra. (a) The purple line is the Heraeus F300 silica glass loss spectrum; the blue and black overlapping lines are the absorption loss spectra of NANF and Single-ring, and the red and green lines are the Single-ring and NANF confinement loss spectra, respectively; (b) The total loss spectra of Single-ring and NANF

由图 7(a) 的仿真结果可以清晰地看到, 石英基空芯光纤的吸收损耗 (蓝线和黑线) 比石英的吸收损耗 (紫线) 降低了四五个数量级, 再一次印证了前文提到

的“由高吸收损耗材料制成的空芯光纤可以实现低损耗传输”的结论。同时可以清晰地看到, 参数比例相同的单圈空芯光纤和嵌套管空芯光纤的吸收损耗曲

线(蓝线和黑线)几乎是重叠的。对于嵌套管结构,总损耗基本取决于吸收损耗(蓝线);对于单圈结构,在 3.5  $\mu\text{m}$  以下波段由吸收损耗(黑线)和限制损耗(红线)共同作用,而在 3.5  $\mu\text{m}$  以上波段,限制损耗已经不是损耗的主导因素,吸收损耗占主导地位。由图 7(b)可以更明显地看出,随着波长的增大限制损耗更加被弱化,总损耗的差距会越来越小。值得注意的是,上述分析是以固定了  $a/\lambda = 15$  为前提的。如果继续增大  $a/\lambda$ ,单圈结构与嵌套管结构的损耗曲线将在更短波长处趋于重叠。从应用的角度可以得出总的设计原则:长波长区域两者损耗相差很小,但单圈空芯光纤拉制技术更加成熟,拉制步骤更为简单,因而选择单圈空芯光纤更为合理,短波长则用嵌套管结构可以得到更低的损耗。注意这里的仿真只针对光纤的传输损耗,如果加入弯曲损耗的影响,情况将更为复杂。因此,针对特定的应用需求,需要做定制化仿真设计,给出最优的结构参数。

石英基中空芯光纤的出现和发展,克服了石英材料在中红外波段的材料吸收,并随着结构的优化和发展,传输损耗不断降低,导光窗口不断拓宽,同时弯曲损耗也随之不断降低,为中红外光传输提供了一种新的选择。

## 2 软玻璃基中红外空芯光纤

由于很多软玻璃材料相对于石英而言在中红外波段具有更高的透射率,随着空芯光纤的不断发展和成熟,陆续出现了多种软玻璃基空芯光纤。这类光纤因在中红外波段能提供带宽更宽、波长更长的导光窗口而受到了越来越多的关注。该部分将对以硫系玻璃为主的软玻璃基空芯光纤在中红外波段的发展进程、研究现状、应用前景进行较为详细的总结。

### 2.1 硫系中红外反谐振空芯光纤

硫系玻璃具有声子能量低、红外透射波段宽、物理化学性能相对稳定以及良好的成纤性能等优点<sup>[16]</sup>,成为制造中红外光纤的关键材料之一。但硫系实芯光纤损伤阈值较低,很容易被激光破坏,因此制备硫系反谐振空芯光纤并应用于中红外领域是一项十分有意义的工作。

2014 年,俄罗斯科学院 Shiryayev 等人研究了硫化亚砷玻璃粘性随温度的变化规律,确定了制备预制件的最佳温度条件,首次制备了硫化亚砷玻璃基具有

8 个和 10 个接触包层毛细管的反谐振空芯光纤,在 4.8  $\mu\text{m}$  和 2.7~3.4  $\mu\text{m}$  处的最小损耗分别为 3 dB/m 和 1.2 dB/m<sup>[17-18]</sup>。这两种光纤都是用“叠拉”法制成的,即先在拉管塔上拉制特定尺寸的毛细管,再将毛细管按照设计的结构进行堆叠,加热使毛细管融合到外层玻璃管上,在拉管塔上拉制出预制件,再在光纤拉丝塔上将预制件拉制成光纤。在光纤拉制过程中,需要对微结构进行充气以保持相应的结构,但该方法面临着高制造公差挑战。

2016 年,美国海军研究实验室 Gattas 等人为了提高性能,采用了“挤压-拉伸”的方法,即用玻璃挤压机在玻璃熔融环境下进行挤压,当玻璃被挤压进定制的模具后,形成与模具相对应的微结构,再将微结构预制件放到拉丝塔上进行拉制。制备了一种具有 8 根非接触包层毛细管的硫系反谐振空芯光纤,在 4.7  $\mu\text{m}$  处获得了 1.763 dB/m 的低光纤损耗<sup>[19]</sup>。但由于挤压模具的限制,所报道的反谐振空芯光纤有断点,并不是最优化的结构<sup>[20]</sup>。因此,尽管硫系反谐振空芯光纤在理论上表现出极低的吸收损耗,但解决不完善的光纤结构引起的损耗增加也是一项很重要的工作。

2021 年,法国雷恩第一大学 Carcreff 等人首次采用 3D 打印技术制备硫系玻璃 ( $\text{Te}_{20}\text{As}_{30}\text{Se}_{50}$ ) 光纤预制件,进而成功拉制出反谐振空芯光纤,并在 2~12  $\mu\text{m}$  的中红外范围出现了多个传输窗口<sup>[21]</sup>。尽管在制备过程中存在的一些问题,使得最终的实验结果与仿真结果有偏差,但可以通过使用高光学质量的原始玻璃、在受控条件下印刷预制棒以及在光纤拉锥过程中更好地控制几何参数等方式降低损耗。这些结果为制备硫化物和其他软玻璃基组件以及其他类型的光波导或透镜开辟了一条新途径<sup>[21]</sup>。

2023 年,中国科学院西安光学精密机械研究所张豪等人用“叠拉法”和双气路压力控制技术相结合的方法(双气路压力控制技术是指在拉制过程中对纤芯和包层空气孔充不同压力的气体,从而使管光纤结构更加对称),制备了一种具有 7 根接触包层毛细管的硫系 ( $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$ ) 玻璃基反谐振空芯光纤,并从理论和实验上证明了这种介质在中红外波段表现出高阶模式抑制特性和几个低损耗导光窗口,其中在 4.79  $\mu\text{m}$  处测量的光纤损耗低至 1.29 dB/m。该结果也为中红外波段各种硫系反谐振空芯光纤的制备和应用奠定

了基础<sup>[16]</sup>。

### 2.2 其他软玻璃基中红外空芯光纤

由于硫系玻璃具有较差的机械强度和较陡的粘温曲线<sup>[22-23]</sup>,因此拉制结构均匀的硫系反谐振空芯光纤还需要不断探索合适的拉制方法;同时大部分的硫系光纤制备材料中都使用了 As,因此不适用于侵入医学检测。这也为其他软玻璃基中红外空芯光纤的研制和发展提供了突破口。

碲酸盐玻璃具有宽的红外透射区(0.35~6 μm)、高的热稳定性和良好的耐腐蚀性<sup>[24]</sup>。2019年10月,丰田技术研究所 Hoang Tuan Tong 等人报道了成功拉制的具有6个非接触包层管的亚碲酸盐反谐振空芯光纤,并首次对其透射和偏振特性进行了仿真和实验研究。当2.1 μm的输入光为线性偏振时,通过17 cm长的光纤传播后可以保持线偏振态<sup>[25]</sup>。尽管受限于激光源当前的工作范围,它的传输范围仅扩展到3.9 μm,但仿真结果显示,通过优化结构和拉制工艺有望扩展到6 μm左右<sup>[25]</sup>。这为中红外反谐振空芯光纤的发展和气体拉曼的研究拓宽了思路。

2020年9月,斯科尔科沃科技学院 Stanislav Perevoschikov 等人首次报道拉制了一款硼硅酸盐软玻璃基空芯光纤,拥有400~6.5 μm可见光和中红外波段的导光窗口,近红外(0.8~1 μm)和中红外(2~4 μm)导光窗口最小损耗分别为0.6 dB/cm和1 dB/cm<sup>[26]</sup>。尽管在中红外波段损耗很高,但通过对光纤结构的进一步优化可以降低损耗并扩大其波长范围,为中红外空芯光纤的制备提供了一种新的材料选择<sup>[26]</sup>。而硼硅酸盐无毒的特性使其有望成为基于空芯光纤的传感器的候选材料,应用于化学和生物医学等领域。

近年来,以硫系为主的软玻璃基中红外空芯光纤凭借具有较宽的中红外导光窗口得到了诸多研究者的关注(如表1所示)。但由于软玻璃材料的熔点较低,拉制时可调节的温度范围很窄,容易析晶,拉制出的软玻璃基空芯光纤存在结构不均匀、长度有限等问题。不断探索更适用于软玻璃基空芯光纤的拉制方式,不断提升光纤品质,是这一领域正在努力的研究方向。

表 1 软玻璃基空芯光纤总结表

Tab.1 Summary table of soft glass-based hollow-core fiber

Year	Soft glass	Hollow-core fiber	Mid-infrared light-guided windows	Lowest loss	Preparation method	Advantages/ Applications
2014 <sup>[17]</sup>	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	8 tube (Contact) Single-ring	1.5-4 μm 4.5-7.5 μm	4.8 μm 3 dB/m	Stack-draw	Broaden the light guide window
2015 <sup>[18]</sup>	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	10 tube (Contact) Single-ring	2-6.5 μm	2.7-3.4 μm 1.23 dB/m	Stack-draw	
2016 <sup>[19]</sup>	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	8 tube (Non-contact) Single-ring	2-8 μm 9.5-11.5 μm	4.7 μm 1.763 dB/m	extrusion- draw	A new way to draw soft glass-based HCF
2019 <sup>[25]</sup>	Tellurite	6 tube (Non-contact) Single-ring	2-2.3 μm 2.5-2.9 μm 3.2-3.9 μm	-	Stack-draw	Beneficial for gas Raman studies
2020 <sup>[26]</sup>	Borosilicate	PBGF with three concentric capillary layers	2-6.5 μm	2-4 μm 1 dB/cm	Stack-draw	Applications in chemistry, biomedicine
2021 <sup>[21]</sup>	Te <sub>20</sub> As <sub>30</sub> Se <sub>50</sub>	6 tube (Non-contact) Single-ring	4-12 μm	7.5 μm 8 dB/m	3D printing-draw	A new way to draw soft glass-based HCF
2023 <sup>[16]</sup>	As <sub>40</sub> S <sub>60</sub>	7 tube (Contact) Single-ring	-	4.79 μm 1.29 dB/m	Stack-draw with a dual gas path pressure control technique	

### 3 结 论

与中红外实芯光纤相比,中红外空芯光纤克服了石英材料在中红外波段的材料吸收,拓宽了石英基光纤的导光窗口,实现了低损耗的中红外光传输;低色

散、低延迟、低非线性、高损伤阈值等特点使其在中红外激光领域具有更大的优势。尽管中红外空芯光纤的弯曲损耗随空芯光纤结构的迭代和优化在不断降低,但仍与实芯光纤有一定的差距,这也将是今后中红外空芯光纤领域的一个重要研究方向。

就目前而言,中红外空芯光纤在中红外激光产生与传输、生物医学传感、通信等领域具有广泛的应用价值。除石英材料外,多种软玻璃材料(例如硫系玻璃、碲酸盐玻璃)具有低材料吸收等本征特性,也为中红外空芯光纤的制备提供了更多的材料选择。相对于其他软玻璃基空芯光纤,对石英基和硫系中红外空芯光纤的研究更加普遍和深入,因而被着重讨论。相对于石英,硫系玻璃在中红外透射窗口更宽,总结现有工作也可以发现石英基中红外空芯光纤的导光通带普遍在 2.5~5  $\mu\text{m}$  范围内,而硫系中红外空芯光纤可以达到 12  $\mu\text{m}$  左右,因而在大于 5  $\mu\text{m}$  的长波波段用硫系中红外空芯光纤更为适合。但硫系空芯光纤仍存在拉制工艺不成熟等问题,拉制出的光纤普遍壁厚较厚,长度较短,这意味着光纤需要工作在高阶反谐振带,对应的导光通带变窄,并无法满足长距离应用的需求。而石英基空芯光纤拉制工艺更为成熟,化学稳定性更好,对于 2.5~5  $\mu\text{m}$  范围的中短波波段无疑是更好的选择。通过结构不断优化、拉制工艺的不断精进,石英基中红外空芯光纤的导光窗口有望拓展到更长的波长,如南安普顿大学 Fokoua 通过仿真预测的石英基空芯光纤甚至可能可以在 7  $\mu\text{m}$  波长工作,当纤芯直径为 200  $\mu\text{m}$ 、壁厚为 2.3  $\mu\text{m}$  时,光纤的吸收损耗仅为 1.4 dB/m。

笔者团队对相同参数的石英基单圈结构和嵌套管结构的吸收损耗和限制损耗进行了仿真,结果再一次证实了在 3.5  $\mu\text{m}$  后的中红外波段吸收损耗成为损耗的主导因素,而限制损耗随波长的增大被弱化。从应用的角度而言,在 3.5  $\mu\text{m}$  之前的中红外波段,嵌套管结构的损耗更低、更为合适;而在 3.5  $\mu\text{m}$  之后的波长段,二者总损耗相差越来越小,用单圈结构则更为合理。

在未来,中红外空芯光纤的发展也将继续不断提升拉制技术,优化光纤结构进而拓宽导光窗口,降低损耗并应用于各个领域。

#### 参考文献:

- [1] Cui Yulong, Zhou Zhiyue, Huang Wei. Progress and prospect of mid-infrared fiber laser technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(9): 9-38. (in Chinese)
- [2] Yu F, Song P, Wu D, et al. Attenuation limit of silica-based hollow-core fiber at mid-IR wavelengths [J]. *APL Photonics*, 2019, 4(8): 080803.
- [3] 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.
- [4] Shephard J D, MacPherson W N, Maier R R J, et al. Single-mode mid-IR guidance in a hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Opt Express*, 2005, 13(18): 7139-7144.
- [5] Urich A, Maier R R J, Mangan B J, et al. Delivery of high energy Er: YAG pulsed laser light at 2.94  $\mu\text{m}$  through a silica hollow core photonic crystal fibre [J]. *Opt Express*, 2012, 20(6): 6677-6684.
- [6] Wheeler N V, Heidt A M, Baddela N K, et al. Low-loss and low-bend-sensitivity mid-infrared guidance in a hollow-core-photonic-bandgap fiber [J]. *Opt Lett*, 2014, 39(2): 295-298.
- [7] 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.
- [8] Yu Fei, Wadsworth W J, Knight J C. Low loss silica hollow core fibers for 3-4  $\mu\text{m}$  spectral region [J]. *Opt Express*, 2012, 20(10): 11153-11158.
- [9] Yu Fei, Knight J C. Spectral attenuation limits of silica hollow core negative curvature fiber [J]. *Opt Express*, 2013, 21(18): 21466-21471.
- [10] 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.
- [11] Davidson I A, Rikimi S, Sakr H, et al. Anti-resonant, mid-infrared silica hollow-core fiber [C]//OSA Advanced Photonics Congress (AP) 2020, Optica Publishing Group, 2020: SoW1H. 7.
- [12] Gao S, Wang Y, Ding W, et al. Hollow-core conjoined-tube negative-curvature fibre with ultralow loss [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2828.
- [13] Jasion G T, Sakr H, Hayes J R, et al. 0.174 dB/km hollow core double nested antiresonant nodeless fiber (DNANF) [C]//2022 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2022: 1-3.
- [14] Klimczak M, Dobrakowski D, Ghosh A N, et al. Nested capillary anti-resonant silica fiber with mid-infrared transmission and low bending sensitivity at 4 000 nm [J]. *Optics Letters*,

- 2019, 44(17): 4395-4398.
- [15] Fokoua E R N, Mousavi S M A, Jasion G T, et al. Loss in hollow-core optical fibers: mechanisms, scaling rules, and limits [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2023, 15(1): 470592.
- [16] Zhang H, Chang Y, Xu Y, et al. Design and fabrication of a chalcogenide hollow-core anti-resonant fiber for mid-infrared applications [J]. *Optics Express*, 2023, 31(5): 7659-7670.
- [17] Shiryayev V S, Kosolapov A F, Pryamikov A D, et al. Development of technique for preparation of As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> glass preforms for hollow core microstructured optical fibers [J]. *J Optoelectron Adv Mater*, 2014, 16(9-10): 1020-1025.
- [18] Shiryayev V S. Chalcogenide glass hollow-core microstructured optical fibers [J]. *Frontiers in Materials*, 2015, 2: 00024.
- [19] Gattass R R, Rhonehouse D, Gibson D, et al. Infrared glass-based negative-curvature anti-resonant fibers fabricated through extrusion [J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25697-25703.
- [20] Ventura A, Hayashi J G, Cimek J, et al. Extruded tellurite antiresonant hollow core fiber for Mid-IR operation [J]. *Optics Express*, 2020, 28(11): 16542-16553.
- [21] Carcreff J, Cheviré F, Galdo E, et al. Mid-infrared hollow core fiber drawn from a 3D printed chalcogenide glass preform [J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(1): 198-209.
- [22] Camilo G M. Mechanical properties of chalcogenide glasses: a review [J]. *Reliability of Optical Fiber Components, Devices, Systems, and Networks*, 2003, 4940: 222-229.
- [23] Košťál P, Šhánělová J, Málek J. Viscosity of chalcogenide glass-formers [J]. *International Materials Reviews*, 2020, 65(2): 63-101.
- [24] Mori A. Tellurite-based fibers and their applications to optical communication networks [J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2008, 116(1358): 1040-1051.
- [25] Tong H T, Nishiharaguchi N, Suzuki T, et al. Mid-infrared transmission by a tellurite hollow core optical fiber [J]. *Optics Express*, 2019, 27(21): 30576-30588.
- [26] Perevoschikov S, Kaydanov N, Ermatov T, et al. Light guidance up to 6.5 μm in borosilicate soft glass hollow-core microstructured optical waveguides [J]. *Optics Express*, 2020, 28(19): 27940-27950.

## Mid-infrared hollow-core fiber technology: status and development trend (*invited*)

Zhang Yifan, Hong Yifeng, Sheng Yulin, Wang Yingying\*

(Micro-structured Optical Fiber Group, Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou 511443, China)

### Abstract:

**Significance** Mid-infrared optical fiber is an important tool in the field of mid-infrared optics with applications in mid-infrared laser generation and transmission, biomedical detection, environmental detection and other fields. However, traditional mid-infrared optical fibers suffer from fabrication difficulties and poor chemical stability of substrate materials, substantially limiting their developments. Compared with solid-core fibers, hollow-core fibers release the dependence on the substrate materials. By constructing microstructures in the cladding, light is confined, in the central air core, thus providing an ideal transmission channel with low loss, low dispersion, low delay, low nonlinearity, and high damage threshold. It opens a new path in the development of mid-infrared fibers.

**Progress** This paper reviews the development history, research status and application prospects of silica-based and soft glass-based mid-infrared hollow-core fibers in terms of fiber structure, fabrication method, material absorption and transmission performance. By numerical simulations, we show the relationship between absorption loss and confinement loss with core size, wall thickness and wavelength in silica-based single-ring structure and nested tube structure anti-resonant hollow-core fiber. It provides design guidelines for the low-loss mid-infrared anti-resonant hollow-core fiber.

**Conclusions and Prospects** Compared with mid-infrared (MIR) solid core fiber, MIR hollow-core fibers (HCF) have overcome the material absorption of silica in the mid-infrared band, expanded the guiding window of silica-based HCF, and realized low loss light transmission in the mid-infrared band. The characteristics of low dispersion, low delay, low nonlinearity and high damage threshold make more advantageous in the field of mid-infrared laser. Although the bending loss of MIR-HCF is continuously reduced by iteration and optimization of the fiber structure, there is still a certain gap between them and solid core fiber, which will be an important research direction in the field of mid-infrared hollow core fiber in the future. Currently, mid-infrared hollow fibers have a wide range of applications in the fields of mid-infrared laser generation and transmission, biomedical sensing, communication and other fields. In addition to silica materials, many soft glass materials (such as sulfide glass and tellurite glass) have inherent low material absorption properties, which provide more material choices for the preparation of MIR-HCF. In the future, the development of MIR-HCF will continue in improving the fabrication technology, optimizing the fiber structure, broadening the transmission window, reducing the attenuation and be applied to various fields.

**Key words:** mid-infrared; silica-based hollow-core fiber; soft glass-based hollow-core fiber; light-guiding window; fiber loss

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (U21A20506, 62222506); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2021B1515020030)