

## 用于红外激光传输的硫系玻璃光纤研究进展

张豪<sup>1,2</sup>, 郭海涛<sup>1\*</sup>, 许彦涛<sup>1,2</sup>, 李曼<sup>3</sup>, 马文超<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100045;

<sup>3</sup>光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308

**摘要** 随着红外光学的不断发展, 国防安全、生物医疗、先进制造等领域对红外激光传输的需求越来越迫切, 基于非氧化物玻璃的红外传能光纤日益受到重视。硫系玻璃作为一种优秀的红外材料, 具有透过范围广、物化性能稳定、易于成纤等特点, 是制备红外传能光纤的理想材料之一。介绍了国内外有关红外激光传输用硫系光纤(包括阶跃型光纤和微结构光纤)的最新研究进展, 分析了目前存在的问题, 指出了下一步的发展方向。

**关键词** 激光光学; 红外光纤; 硫系玻璃; 负曲率光纤; 激光传输

中图分类号 TQ 171.1; O432.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0101007

### 1 引言

随着高功率红外激光器的日益成熟, 红外激光在工业加工、手术医疗、环境监测和军事国防等领域逐渐得到广泛应用。使用红外光纤替代传统的空间光路, 可以大大降低光学系统的体积, 提高系统的紧凑性和可靠性。

硫系玻璃是由第 VI 主族的 S、Se、Te 与其他元素如 As、Ge、Sb、Ga、P、I 等组成的两组分或多组分玻璃<sup>[1]</sup>。传统石英光纤受材料声子能量的限制, 难以传输波长超过  $2.5 \mu\text{m}$  的红外激光, 氟化物和碲酸盐光纤的红外截止边也通常小于  $5 \mu\text{m}$ , 而硫系玻璃由于具有超低的声子能量 ( $300 \sim 450 \text{ cm}^{-1}$ ), 其光纤根据组分的不同, 可以实现  $2 \sim 12 \mu\text{m}$  宽波段的低损耗传输<sup>[2]</sup>。此外, 相较于氟化物等玻璃, 硫系玻璃还具有化学稳定性好、成玻成纤能力强等特点<sup>[3]</sup>。硫系玻璃光纤作为一种重要的红外光纤, 其制备和应用一直备受国内外重视。第一根硫系玻璃光纤是 1965 年美国 Optics Technology 公司制备的  $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$  光纤<sup>[4]</sup>。然而, 由于当时制备技术的限制及应用需求的缺失, 硫系玻璃光纤的发展缓慢, 直到 20 世纪 80 年代, 随着红外技术的逐步兴起, 日本、

美国、法国等才开始大规模研究硫系玻璃光纤, 并开发出一系列包括 As-S、Ge-As-Se、Ge-S、Ge-As-Se-Te 等光纤。

相较于已经广泛商用化的石英传能光纤, 硫系传能光纤在损耗和激光传输能力等方面仍有极大的改善空间。目前国内外对硫系光纤的研究主要集中在两个方面。1) 低损耗光纤制备技术的研究。硫系玻璃光纤受到 C、H、O、Si 等杂质的影响, 具有不可忽略的吸收损耗, 目前硫系光纤的实际损耗与其理论最低损耗仍有较大差距, 通过硫系玻璃提纯和光纤制备技术, 获得更低损耗的光纤是一个长期的研究方向。2) 硫系光纤损伤阈值的提高。由于硫系玻璃具有弱的共价键特性, 松散的玻璃网络结构导致其低的损伤阈值, 这限制了其传输高功率红外激光的能力, 如何通过优化玻璃组分、玻璃网络结构以及光纤结构来提高硫系光纤的损伤阈值也是一个极具价值的研究方向。

本文总结了近年来用于红外激光传输的硫系光纤的研究进展, 分析了其中的问题, 并对硫系玻璃光纤在高功率红外激光传输方面的未来发展方向进行了展望。

收稿日期: 2021-09-02; 修回日期: 2021-10-01; 录用日期: 2021-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(62090065, 61935006, 62005312)、中科院创新交叉团队(JCTD-2018-19)

通信作者: \*guoht\_001@opt.ac.cn

## 2 硫系传能光纤的研究进展

### 2.1 阶跃折射率光纤

阶跃结构硫系玻璃光纤是最早且最成熟的硫系光纤,根据组分结构的不同,可以实现 2~12  $\mu\text{m}$  的激光传输。本节将介绍硫系阶跃型光纤在 2~5  $\mu\text{m}$  短波中红外和 5~12  $\mu\text{m}$  长波中红外激光传输方面的研究情况。

在 2~5  $\mu\text{m}$  短波中红外激光传输方面,研究者首先研究的是多模光纤。1998 年, Sanghera 等<sup>[5]</sup>报道了采用  $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$  多模光纤成功传输波长为 2.94  $\mu\text{m}$  的医用自由电子激光(MFEL)。自由电子激光器可以发射峰值功率超 10 MW、平均功率相当于 10 W 的飞秒脉冲激光。研究者利用硫系光纤传输的 MFEL 进行眼科手术,由于生物组织中的水对 2.94  $\mu\text{m}$  波长激光的吸收非常强,因此 MFEL 同时具备了高切割精度和高气化效率的特点。人们还利用硫系多模光纤传输波长为 2.94  $\mu\text{m}$  的 Er:YAG 激光。2007 年, Papagiakoumou 等<sup>[6]</sup>制备了在 2.94  $\mu\text{m}$  波长处传输损耗为 0.7 dB/m 的 As-Se-Te 体系的多模光纤和传输损耗为 1.5 dB/m 的  $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$  多模光纤并将其用于传输 Er:YAG 激光,纤芯直径均为 1000  $\mu\text{m}$ ,使用焦距为 150 mm 的  $\text{CaF}_2$  聚焦透镜和可变直径的光阑,将 Er:YAG 激光聚焦并耦合进入光纤。结果发现,脉冲持续时间为 80  $\mu\text{s}$  的脉冲激光的最大入射能量为 4.6 mJ,对应的功率密度为 81.5  $\text{kW}/\text{cm}^2$ ;脉冲持续时间为 190 ns 的脉冲激光的最大入射能量为 2.3 mJ,对应的功率密度为 38.2  $\text{MW}/\text{cm}^2$ 。

2~5  $\mu\text{m}$  短波中红外激光另一个重要的应用领域是国防安全领域,如红外对抗(IRCM)、激光预警或激光战术系统。该领域的应用对光纤的高功率激光传输能力提出了更高的要求。1999 年, Sanghera 等<sup>[7]</sup>利用  $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$  多模光纤实现了 2  $\mu\text{m}$  脉冲激光的传输。结果发现,纤芯直径为 160  $\mu\text{m}$  的  $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$  多模光纤在传输  $1.5 \times 10^7$  次脉冲后光纤端面仍未损坏,脉冲激光的平均功率为 2.69 W,峰值功率达到 26.9 kW,对应的激光输入功率密度为 1.07  $\text{GW}/\text{cm}^2$ ,这一损伤阈值接近于仅考虑表面介电击穿时 3.0  $\text{GW}/\text{cm}^2$  的预测值。

随着高性能中红外激光器的不断发展,人们意识到虽然较大的纤芯直径有利于传输更高功率的激光,但也必须考虑激光传输质量和传输模式,这就需要发展小纤芯的单模光纤。2018 年, Sincore 等<sup>[8]</sup>

研究了  $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$  单模光纤传输三种高功率激光的潜力,即 2.053  $\mu\text{m}$  的 Tm 掺杂石英光纤激光、2.520  $\mu\text{m}$  的 Cr:ZnSe 主振荡功率放大器(MOPA)激光和 4.102  $\mu\text{m}$  的 Fe:ZnSe 激光。使用的 CHG-A (Chalcogenide-A)光纤的纤芯直径为 12  $\mu\text{m}$ ,CHG-B(Chalcogenide-B)光纤的纤芯直径为 25  $\mu\text{m}$ ,这些光纤均被厚聚合物层保护以保证出色的力学性能。同时,研究者还对比了光纤端面有无  $\text{Al}_2\text{O}_3$  增透膜情况下的激光传输情况。如图 1 所示,无增透膜的 20 cm 长 CHG-A 光纤传输 2.053  $\mu\text{m}$  激光时最大输出功率约为 8 W,而有增透膜的 CHG-A 光纤对应的最大输出功率为 10.3 W,传输效率为 90%。经过计算,有增透膜的 CHG-A 光纤在 2.053  $\mu\text{m}$  处的传输损耗为  $(1.0 \pm 0.7)$  dB/m,与截断法测得的  $\sim 0.95$  dB/m 损耗基本一致。对于工作波长为 2.520  $\mu\text{m}$  的 Cr:ZnSe MOPA 激光器,将功率为  $\sim 1.3$  W 的激光耦合进 20 cm 长的镀有增透膜的 CHG-A 光纤后,端面发生了轻微损坏,输出激光的轮廓符合高斯分布,输出功率约为 1 W。对于 4.102  $\mu\text{m}$  的 Fe:ZnSe 激光器,激光入射功率为 500 mW 的激光可以通过 20 cm 长的无增透膜的 CHG-B 光纤进行传输,但当入射功率增大到 1.1 W 时,端面发生损坏,导致传输终止。研究者认为这主要是因为激光没有完全耦合进光纤,在聚合物保护层中传输的激光导致光纤损坏。通过改进的紧凑型光路设计和更好的对准,研究者认为 CHG-B 光纤传输 4.102  $\mu\text{m}$  的 Fe:ZnSe 激光的性能与传输 2.053  $\mu\text{m}$  激光的性能类似。以上结果表明,通过进一步提高反射涂层的质量和使使用高光束质量的中红外光源,硫系玻璃光纤可以在 2~5  $\mu\text{m}$  非高损耗波

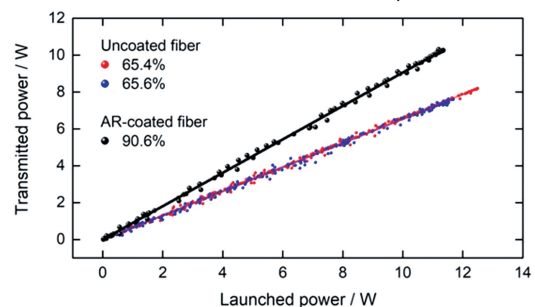


图 1 2.053  $\mu\text{m}$  激光通过长度为 20 cm、纤芯直径为 12  $\mu\text{m}$  的无增透膜和有增透膜  $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$  单模光纤时输入和输出功率的关系<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Relationship between incident and transmitted laser powers of 2.053  $\mu\text{m}$  laser through 20 cm length, 12  $\mu\text{m}$  core diameter, uncoated and AR-coated  $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$  single mode fibers<sup>[8]</sup>

长处以单模形式传输 10 W 左右的中红外激光。

在 5~12  $\mu\text{m}$  长波中红外激光方面,硫系玻璃光纤能够传输高功率 5.4  $\mu\text{m}$  的 CO 激光和 10.6  $\mu\text{m}$  的 CO<sub>2</sub> 激光,已被应用于激光手术、激光加工等领域。早在 1964 年贝尔实验室就研制出具有高功率、高效率的 CO 激光器,其在激光手术和材料加工方面显示出很大的优势。由于需要传输的功率较高,研究者通常还是采用大纤芯的多模光纤。1985 年,Watanabe 等<sup>[9]</sup>研究发现,As-S 体系光纤在 5  $\mu\text{m}$  左右的波长处具有最小的传输损耗,因此是传输 CO 激光的理想材料之一。在不损坏光纤的情况下,长度为 1000 cm、纤芯直径为 1000  $\mu\text{m}$  的 As-S 玻璃多模光纤在传输 CO 激光时,最大输出功率达到 59 W,光纤输出端的激光功率密度约为 5 kW/cm<sup>2</sup>。1993 年,Sato 等<sup>[10]</sup>制备了纤芯直径为 1000  $\mu\text{m}$ 、具有特氟龙包层的 As<sub>40</sub>S<sub>60</sub> 和 Ge<sub>10</sub>As<sub>30</sub>S<sub>60</sub> 光纤,它们在 5.4  $\mu\text{m}$  处的传输损耗分别为 0.45 dB/m 和 0.30~0.45 dB/m。如图 2 所示,使用 CO 连续光时,在光纤端面 and 光纤传输路径均使用氮气风冷的条件下,As<sub>40</sub>S<sub>60</sub> 和 Ge<sub>10</sub>As<sub>30</sub>S<sub>60</sub> 光纤的最大传输功率分别达到 226 W 和 180 W,相应的输出功率密度分别为 29 kW/cm<sup>2</sup> 和 23 kW/cm<sup>2</sup>,两种光纤均实现了百瓦级的 CO 激光传输,基本满足激光手术和激光加工的功率要求。

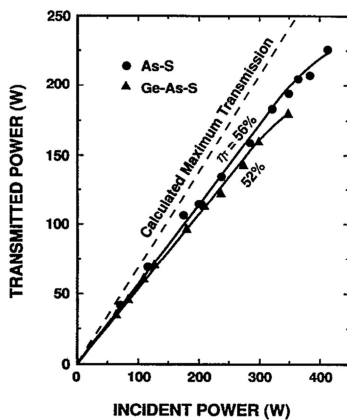


图 2 强制风冷条件下 As<sub>40</sub>S<sub>60</sub> 和 Ge<sub>10</sub>As<sub>30</sub>S<sub>60</sub> 光纤对 5.4  $\mu\text{m}$  的 CO 连续光的传输情况<sup>[10]</sup>

Fig. 2 Transmission of 5.4  $\mu\text{m}$  CO CW laser through As<sub>40</sub>S<sub>60</sub> and Ge<sub>10</sub>As<sub>30</sub>S<sub>60</sub> fibers under forced air-cooling conditions<sup>[10]</sup>

10.6  $\mu\text{m}$  的 CO<sub>2</sub> 激光器是另一种常用的中红外光源,在医疗和工业领域具有独特的优势。与使用较短波长激光的激光手术相比,CO<sub>2</sub> 激光消融手术对周围组织的损伤更小,因此更具潜力。通常情况下,S 基玻璃的红外截止波长约为 10  $\mu\text{m}$ (光纤截

止波长约为 6  $\mu\text{m}$ ),Se 基玻璃的红外截止波长约为 14  $\mu\text{m}$ (光纤截止波长约为 11  $\mu\text{m}$ )。与 S 基和 Se 基玻璃相比,Te 基硫系玻璃具有更大的红外截止波长(可达 25  $\mu\text{m}$  以上),在 10.6  $\mu\text{m}$  的损耗更小,因此人们研发了多种 Te 基硫系玻璃光纤以满足 CO<sub>2</sub> 激光传输的需求。

1991 年,Inagawa 等<sup>[11]</sup>研制出 Se<sub>25</sub>Te<sub>30</sub>I<sub>45</sub> 多模光纤,其长度和直径分别为 100 cm 和 400  $\mu\text{m}$ ,在 10.6  $\mu\text{m}$  处的传输损耗为 0.9 dB/m。输入功率为 2.85 W 的 CO<sub>2</sub> 激光功率经过无保护层光纤传输后输出功率为 0.82 W。为了提高 Te 基硫系光纤的激光传输功率,需要提高光纤的损伤阈值并降低光纤的传输损耗。在提高光纤的损伤阈值方面,研究者通过在玻璃光纤组分中加入 Ge 元素来实现。1992 年,Nishii 等<sup>[12]</sup>研制出 Ge-Se-Te 多模光纤(纤芯和包层分别为 Ge-Se-Te 和 Ge-As-Se-Te)并研究了其传输 CO<sub>2</sub> 激光的性能。纤芯和包层分别为 Ge-Se-Te 和 Ge-As-Se-Te 体系玻璃,该光纤的纤芯和包层直径分别为 450  $\mu\text{m}$  和 550  $\mu\text{m}$ ,光纤端面上沉积了 PbF<sub>2</sub> 增透膜。CO<sub>2</sub> 连续激光被 ZnSe 透镜(焦距  $f=30$  mm)聚焦成直径为 250  $\mu\text{m}$  光斑,然后耦合进 100 cm 长的光纤中,同时将氮气以 500 cm<sup>3</sup>/min 的速度吹扫到抛光后的光纤端面上,以抑制端面在激光传输过程中发生的热损伤,并且在传输激光过程中,对光纤使用水冷以抑制热透镜效应。实验测得的最大输入和输出功率分别为 19.4 W 和 10.7 W,传输效率为 55.2%,最大输入功率密度为 12 kW/cm<sup>2</sup>。1996 年,Busse 等<sup>[13]</sup>报道了 Ge<sub>30</sub>As<sub>10</sub>Se<sub>30</sub>Te<sub>30</sub> 多模光纤用于 CO<sub>2</sub> 激光传输,光纤的纤芯直径和包层直径分别为 162  $\mu\text{m}$  和 270  $\mu\text{m}$ ,长度为 100 cm。实验测得的最大输入和输出功率分别为 1.73 W 和 0.6 W,传输效率为 34.7%,最大输入功率密度为 27 kW/cm<sup>2</sup>。Su 等<sup>[14]</sup>制备了 Ge<sub>15</sub>As<sub>25</sub>Se<sub>40</sub>Te<sub>20</sub> 多模光纤,光纤在 10.6  $\mu\text{m}$  处的传输损耗为 5 dB/m,虽然这种光纤的传输损耗目前比 Se<sub>25</sub>Te<sub>30</sub>I<sub>45</sub> 多模光纤要高,但其化学稳定性和损伤阈值相对于含卤素元素的 Se<sub>25</sub>Te<sub>30</sub>I<sub>45</sub> 光纤较高。研究者将 CO<sub>2</sub> 激光耦合进长度为 100 cm、直径为 400  $\mu\text{m}$  的 Ge<sub>15</sub>As<sub>25</sub>Se<sub>40</sub>Te<sub>20</sub> 光纤中,为了避免激光过热,激光入射时间被限制在 60 s 内,并对光纤施加风冷。结果表明,CO<sub>2</sub> 激光的输出功率随输入功率的增加呈线性增加,最大入射功率为 6.16 W 的激光通过光纤后的输出功率为 1.37 W,光纤没有任何损伤,如图 3 所示,光纤输入端和输出端相应的激光功率密

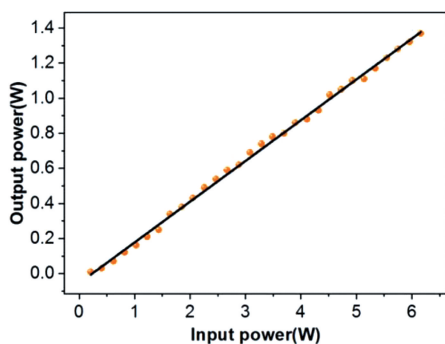


图 3 100 cm 长的  $\text{Ge}_{15}\text{As}_{25}\text{Se}_{40}\text{Te}_{20}$  光纤传输  $10.6 \mu\text{m}$  的  $\text{CO}_2$  激光时输入和输出功率的关系<sup>[14]</sup>

Fig. 3 Relationship between input and output powers of  $10.6 \mu\text{m}$   $\text{CO}_2$  laser through 100 cm long  $\text{Ge}_{15}\text{As}_{25}\text{Se}_{40}\text{Te}_{20}$  fiber<sup>[14]</sup>

度分别为  $4.9 \text{ kW}/\text{cm}^2$  和  $1.09 \text{ kW}/\text{cm}^2$ 。

不同阶跃型光纤的激光传输性能如表 1 所示, 光纤传输脉冲激光(PL)和连续光(CW)时的传输性能可以用激光入射功率密度( $I_{in}$ )或激光输出能量( $E_{out}$ )或激光传输功率( $P_{out}$ )表示。可以看出, 硫系阶跃型光纤在中红外激光传输方面已经取得了很大的进展, 目前多模光纤能够实现百瓦级以上的激光传输, 单模光纤则基本可满足 10 W 以内激光传输需求(非高损耗波长处), 并在激光手术和激光加工等领域得到实验验证。

## 2.2 微结构光纤

尽管硫系阶跃型光纤已经取得了很大的进展, 然而随着传输功率的进一步增加, 由于硫系玻璃材料受自身低激光损伤阈值、高非线性等特点的限制,

表 1 不同硫系光纤的激光传输性能<sup>[5-14]</sup>

Table 1 Laser transmission performances of different chalcogenide fibers<sup>[5-14]</sup>

Laser wavelength / $\mu\text{m}$	Laser	Fiber material	Core diameter / $\mu\text{m}$	Fiber length / cm	Laser transmission performance	Year
2	PL	$\text{As}_{40}\text{S}_{60}$	160	—	$I_{in} = 26.9 \text{ GW}/\text{cm}^2$	1998
2.94		$\text{As}_{40}\text{S}_{60}$	160	1000	$E_{out} > 1 \text{ mJ}$	1998
		As-Se-Te	1000	—	$E_{out} = 4.6 \text{ mJ}$	2007
2.053	CW	$\text{As}_{40}\text{S}_{60}$	12	20	$P_{out} = 10.3 \text{ W}$	2018
2.520			25		$P_{out} = 1 \text{ W}$	
4.102					$P_{out} = 0.5 \text{ W}$	
5.4		As-S	1000	1000	$P_{out} = 59 \text{ W}$	1985
10.6		$\text{As}_{40}\text{S}_{60}$	1000	1000	$P_{out} = 226 \text{ W}$	1993
		$\text{Ge}_{10}\text{As}_{30}\text{S}_{60}$			$P_{out} = 180 \text{ W}$	
	$\text{Se}_{25}\text{Te}_{30}\text{I}_{45}$	400	100	$P_{out} = 0.82 \text{ W}$	1991	
	Ge-Se-Te	450	100	$P_{out} = 10.7 \text{ W}$	1992	
	$\text{Ge}_{30}\text{As}_{10}\text{Se}_{30}\text{Te}_{30}$	270	100	$P_{out} = 0.6 \text{ W}$	1996	
	$\text{Ge}_{15}\text{As}_{25}\text{Se}_{40}\text{Te}_{20}$	400	100	$P_{out} = 1.37 \text{ W}$	2019	

传统的阶跃型光纤逐渐无法满足需求。研究人员开始考虑硫系微结构光纤。大模场光子晶体光纤(LMA-PCF)和空芯微结构光纤(HC-MOF)被认为是提高硫系光纤激光传输功率和效率的有效途径。

为了实现更高功率的激光传输, 增加模场面积是最直接有效的方法, 与此同时为了保证光束质量, 激光在光纤中还需满足单模传输条件。在传统的阶跃型光纤中, 同时满足大模场面积和单模传输是十分困难的。光子晶体光纤的出现为解决这一问题提供了新的思路。2006 年, Person 等<sup>[15]</sup>利用组分为  $\text{Ge}_{20}\text{Ga}_5\text{Sb}_{10}\text{S}_{65}$  的玻璃制备了模场面积为  $108 \mu\text{m}^2$  的 LMA-PCF, 并通过近场光谱表征确定了光纤的单模传输性能。随着硫系 LMA-PCF 的结构设计和制备工艺的日趋成熟, 2007 年, Troles 等<sup>[16]</sup>以

$\text{Ge}_{20}\text{Ga}_5\text{Sb}_{10}\text{S}_{65}$  为基底材料制备了模场面积更大的硫系 LMA-PCF。图 4 展示了不同结构尺寸的硫系 LMA-PCF, 当光纤外径为  $240 \mu\text{m}$ , 孔径( $d$ )和孔间距( $\Lambda$ )比  $d/\Lambda$  为 0.31, 孔间距为  $14 \mu\text{m}$  时, 光纤的模场面积为  $150 \mu\text{m}^2$ 。当光纤外径变为  $400 \mu\text{m}$  并

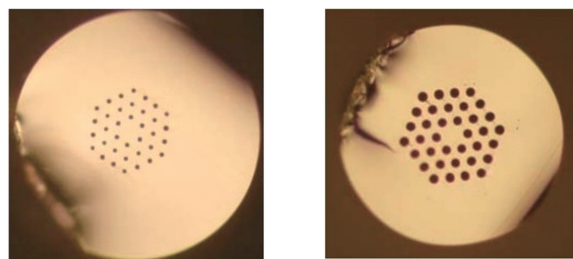
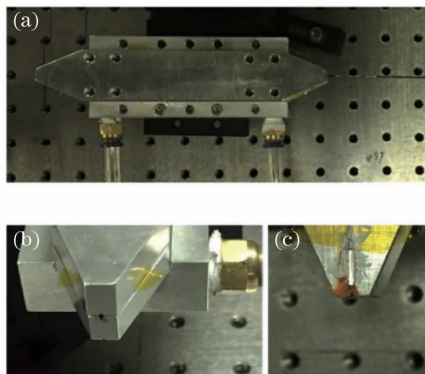


图 4 不同结构尺寸的硫系大模场光子晶体光纤<sup>[16]</sup>

Fig. 4 Chalcogenide LMA-PCFs with different structural geometries<sup>[16]</sup>

且孔间距为  $28\ \mu\text{m}$  时,模场面积为  $1000\ \mu\text{m}^2$ 。在理论上,通过合理的结构设计,硫系 LMA-PCF 的模场面积甚至可增加到上万  $\mu\text{m}^2$  且仍能保持单模传输,这为实现数百瓦甚至千瓦高功率的红外激光传输提供了思路。

在 LMA-PCF 的开发中,研究者提出了一种全固态的设计,这是因为相比于多孔的微结构包层,全固态设计可以避免光纤拉制过程中产生的气孔变形等缺陷,消除了环境因素对光纤传输的影响,并且防止了空气中水的污染。2019 年, Ren 等<sup>[17]</sup> 制备了波长为  $4\ \mu\text{m}$  时模场面积为  $5200\ \mu\text{m}^2$ 、光纤损耗为



$5.2\ \text{dB/m}$  的全固态 LMA-PCF。2020 年, Feng 等<sup>[18]</sup> 展示了一种用于中红外高功率激光传输的少模 LMA-PCF,实际测得的光纤损耗在波长为  $2\ \mu\text{m}$  处为  $7.8\ \text{dB/m}$ ,数值模拟显示其模场面积达到了  $10500\ \mu\text{m}^2$ 。图 5 所示为高功率激光传输实验及结果,光纤被夹在两片高热导率的铝板之间并施加水冷,在  $2\ \mu\text{m}$  连续光输入条件下,测得的输出功率随着入射功率的增加几乎呈线性增加,当入射功率为  $11.8\ \text{W}$  时,光纤端面被破坏。对于  $2\ \mu\text{m}$  的连续波激光器,最大可允许的入射激光功率密度预估为  $150\ \text{kW/cm}^2$ 。

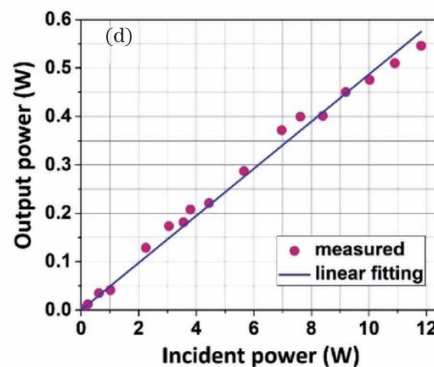


图 5  $2\ \mu\text{m}$  连续光传输实验及结果<sup>[18]</sup>。(a)(b)(c)装置;(d)通过长度为  $47\ \text{cm}$  的光纤后输出功率和入射功率的关系

Fig. 5 Experiment and result of  $2\ \mu\text{m}$  CW laser transmission<sup>[18]</sup>. (a)(b)(c)Devices;(d)relationship between incident and output powers through  $47\ \text{cm}$  long fiber

从整体情况来看,目前硫系 LMA-PCF 的最低损耗为几个  $\text{dB/m}$ ,与计算的限制损耗  $10^{-2}\ \text{dB/m}$  量级有较大差距,这主要是因为 LMA-PCF 的总损耗由材料损耗、缺陷损耗和弯曲损耗组成。LMA-PCF 由于模场和玻璃材料的高度重叠,光纤损耗对材料吸收、结构缺陷(毛细管变形塌陷、界面效应引起的散射损耗)和弯曲十分敏感;同时由于特殊的包层结构,LMA-PCF 传输的光束质量也更容易被热透镜效应影响,这些问题限制了 LMA-PCF 传输高功率激光的能力。事实上,只有“空气甚至真空”才被人们认为是光波传输的最佳介质,这是因为光波只有在无非线性、无损耗、无色散的真空中,才能以最快的速度无畸变地传播。因此研究人员以空气作为纤芯、微纳尺寸的人造周期性结构作为包层,即硫系空芯微结构光纤(HC-MOF),以解决材料的本征缺陷(吸收损耗、非线性、色散和光致损伤等)对传输损耗的制约。HC-MOF 传输的光能量主要集中在空气纤芯中,只有很少一部分光在玻璃材料中传输(通过合理的机构设计,硫系玻璃材料中传输的能量可以占整个传输光能量的  $1\%$  以下),所以相较于硫

系 LMA-PCF,硫系 HC-MOF 理论上的传输损耗较小。

空芯微结构光纤可以分为空芯布拉格光纤<sup>[19]</sup>、空芯光子晶体光纤(HC-PCF)<sup>[20]</sup>和空芯反谐振光纤(HC-ARF)<sup>[21]</sup>等。

第一根硫系 HC-MOF 是 Temelkuran 等<sup>[22]</sup> 在 2002 年报道的由  $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$  玻璃和热塑性聚合物(聚醚砜,PES)包层组成的空芯布拉格光纤,如图 6 所示。传输机制为光子带隙效应,光纤的基模和高阶模传输窗口由包层的尺寸决定,可传输的波长范围为  $0.75\sim 10.6\ \mu\text{m}$ , $10.6\ \mu\text{m}$  处的传输损耗小于  $1\ \text{dB/m}$ ,比  $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$  的传输损耗( $7\ \text{dB/m}$ )和 PES 的传输损耗( $10^5\ \text{dB/m}$ )都要低,长度为  $30\sim 250\ \text{cm}$  的直光纤和弯曲状态下的光纤均实现了  $\text{CO}_2$  激光的传输,耦合到光纤中的最大激光功率密度约为  $300\ \text{W/cm}^2$ ,这说明了可以通过结构设计而不是选择红外高透过材料实现低损耗传输。一般来说,空芯布拉格光纤包层结构的层数越多,传输损耗越低,然而更多的层数也会带来其他问题,如外包层多层结构的壁厚不均匀性会导致各自传输频带的失配,

从而减小整体的传输带宽。另外,在光纤制备时,需要考虑硫系玻璃和聚合物层的热匹配,采用蒸镀轧制法制备多层空芯布拉格光纤时,会不可避免地引入界面缺陷或界面粗糙度,从而增加光纤的传输损耗。为了消除硫系玻璃和聚合物层之间不良热匹配的影响,2015 年 Zhu 等<sup>[23]</sup>采用挤压法制出了完全基于  $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{10}\text{Se}_{75}$  和  $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{20}\text{S}_{58.5}\text{I}_{13}$  硫系玻璃的空芯布拉格光纤。预制棒和所拉光纤的截面图如图 7 所示,在  $10.6\ \mu\text{m}$  波长处光纤的损耗为  $44\ \text{dB/m}$ 。

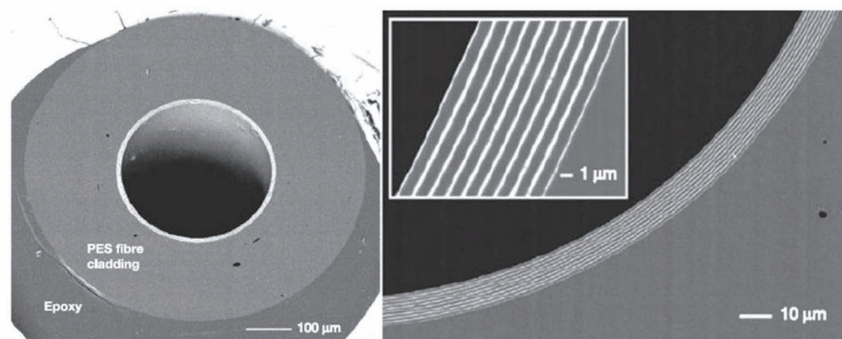


图 6 不同放大倍数下空芯布拉格光纤横截面的扫描电镜图<sup>[22]</sup>

Fig. 6 Cross-sectional SEM images of hollow-core Bragg fiber at various magnifications<sup>[22]</sup>

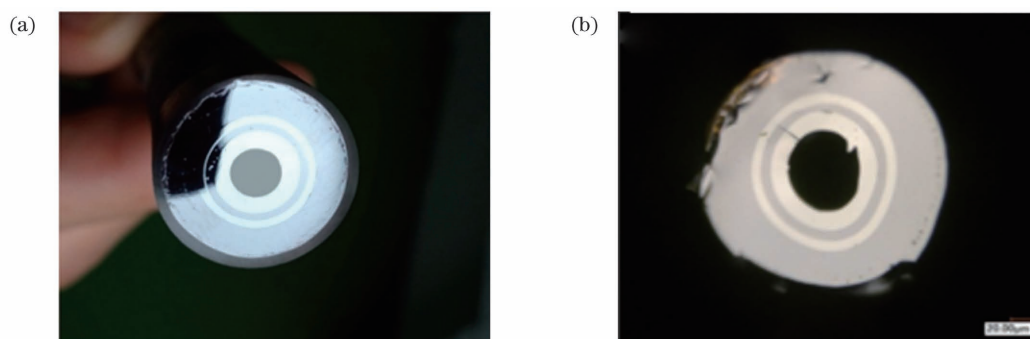


图 7 光纤预制棒和空芯布拉格光纤的横截面<sup>[23]</sup>。(a) 光纤预制棒; (b) 空芯布拉格光纤

Fig. 7 Cross sections of fiber preform and hollow-core Bragg fiber<sup>[23]</sup>. (a) Fiber preform; (b) hollow-core Bragg fiber

2010 年, Désévéday 等<sup>[25]</sup>报道了基于  $\text{Te}_{20}\text{As}_{30}\text{Se}_{50}$  玻璃通过堆积法制造的硫系空芯光子晶体光纤。与空芯布拉格光纤相同, HC-PCF 的传输机制也是光子带隙效应,不同的是空芯布拉格光纤有着一维的周期性包层结构,而 HC-PCF 的包层结构是二维周期性的,其传输窗口由包层微结构的光子带隙决定,带隙的中心波长由微结构的周期决定,而带隙的宽度与空气在微结构中所占的比例(占空比)有关<sup>[26]</sup>。图 8 展示了两种不同结构尺寸的硫系 HC-PCF,两种光纤在  $9.3\ \mu\text{m}$  处的理论损耗分别为  $1.0\ \text{dB/m}$  和  $0.6\ \text{dB/m}$ 。然而,在后来的研究中这种光纤不被看好,这是因为光纤结构中硫系玻璃和空气的界面不是绝对光滑的。理论研究表

这主要是两种硫系玻璃热膨胀系数的差异导致了玻璃层分布不均匀,实际结构尺寸偏离了预期设计,从而导致过高的传输损耗,这也说明了空芯布拉格光纤对制造公差十分敏感。2021 年, Hayashi 等<sup>[24]</sup>仿真了空芯布拉格光纤和空芯反谐振光纤的传输性能,结果表明,当纤芯直径相同时,空芯布拉格光纤的理论传输损耗要比空芯反谐振光纤高 2~3 个数量级。综上所述,空芯布拉格光纤在理论仿真和光纤制备方面存在着一定的局限性。

明,在光纤拉制过程中,不可避免地会引入表面毛细波,这种表面缺陷将会引入一种额外的损耗,即表面散射损耗。纤芯基模的部分模场会与玻璃壁发生重叠,这决定了光纤损耗很难再进一步降低。另一方面, HC-PCF 容易受到表面模的影响,导致光纤传输带中会出现额外的高损耗峰,从而缩小了传输带宽。

硫系 HC-PCF 的出现虽然满足了一定的应用需求,但是过高的传输损耗限制了其进一步的发展。研究人员开始探索其他的解决方案,空芯反谐振光纤(又称为负曲率光纤)逐渐出现在人们的视野中。负曲率是指纤芯边界的表面法线方向是与柱坐标系的径向单元矢量方向相反<sup>[27]</sup>。这种光纤的传输机制为泄漏模理论,理论上无法实现严格导光,因此这

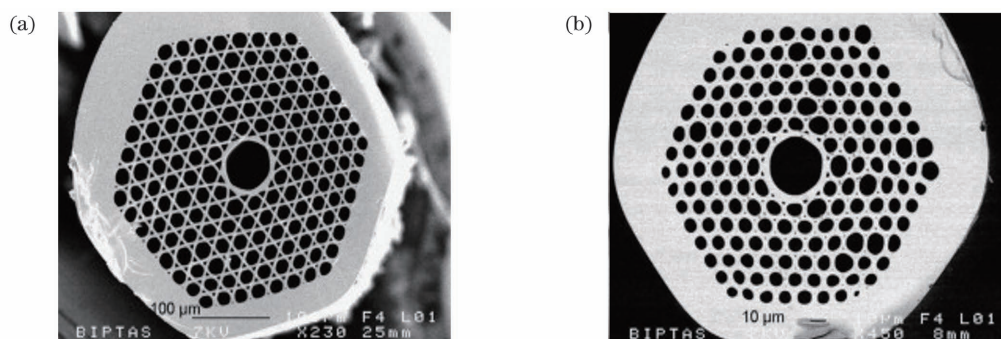


图 8 不同结构的硫系空芯光子晶体光纤<sup>[25]</sup>。(a)六角晶格包层结构;(b)Kagome 包层结构

Fig. 8 Chalcogenide HC-PCFs with different structures<sup>[25]</sup>. (a) Hexagonal lattice cladding structure; (b) Kagome cladding structure

种光纤起初并未受到重视。但随后研究人员发现,纤芯边界为负曲率时可以有效降低光纤的传输损耗,并且其传输通带还具有向红外波段扩展的特性,于是受到越来越多学者的关注。近年来石英负曲率光纤的传输损耗持续降低,最终超越石英 HC-PCF (最低损耗记录为 1.6 dB/km @ 1620 nm<sup>[28]</sup>) 并创造了新的传输损耗记录。2020 年南安普敦大学制备了通信波段 0.28 dB/km 超低损耗的负曲率光纤<sup>[29]</sup>,正在逼近瑞利散射损耗极限 0.12 dB/km。这些进步将极大地鼓舞硫系负曲率光纤的研究,结合其在其他性能上的优势(宽传输带、高激光损伤阈值、高模式纯度和低弯曲损耗等特点<sup>[30-33]</sup>),红外负曲率光纤有望成为一个新的研究热点。

负曲率光纤的导光机理可以追溯到 1986 年 Duguay 等<sup>[19]</sup>提出的反谐振式平面波导理论。直观地说,反谐振原理就是基于干涉效应将光尽可能地约束在波导芯中。2002 年, Litchinitser 等<sup>[34]</sup>将反谐振式平面波导原理应用到空芯光纤中,提出纤芯中的光传输波长主要由包层毛细管壁厚决定,只有当包层毛细管壁厚满足谐振条件时,光才会被显著地泄漏。其谐振波长可以表示为  $\lambda_m = 2t\sqrt{n_2^2 - 1}/m$ , 其中  $t$  为包层毛细管壁厚,  $n_2$  为材料折射率,  $m$  为一个正整数。根据这一公式,通过选择不同折射率的材料,设计不同厚度的包层毛细管就可以实现不同传输带导光,可以说负曲率光纤是一种为所需传输带“量身定制”的光纤。除了宽带导光之外,负曲率光纤的模场直径一般比 HC-PCF 的大,通常光传输模场中 99.99% 的光强会与空气重叠(HC-PCF 中约为 99.8%),这就使得传输损耗能够相对降低 1~2 个数量级<sup>[35]</sup>。

负曲率光纤结合了宽传输带下较低的理论损耗和较高的制造公差容忍度。特别是硫系等多组分玻

璃,其对制造公差的容忍度尤为重要。2011 年, Kosolapov 等<sup>[36]</sup>利用组分为  $\text{Te}_{20}\text{As}_{30}\text{Se}_{50}$  的玻璃制备了第一根硫系负曲率光纤。光纤预制棒是由一个基层管和 8 个包层毛细管通过堆积法制成的,图 9 展示了扫描电镜下的负曲率光纤截面。采用截断法,利用傅里叶变换红外光谱(FT-IR)测量该光纤在 10.6  $\mu\text{m}$  处的传输损耗为 13.5 dB/m。但这一结果是空芯损耗和玻璃损耗的平均值,因为在测试 FT-IR 时光无法单独耦合进空芯中,还经过了基层管和包层毛细管。为了更准确地测量光纤的传输损耗,研究者研究了硫系负曲率光纤传输  $\text{CO}_2$  激光的性能,将  $\text{CO}_2$  激光通过 ZnSe 透镜耦合进光纤中,通过热成像相机观察光纤输出端面上的强度分布。从图 10(b)可以看出,  $\text{CO}_2$  激光被很好地被限制在纤芯中,传输损耗在 10.6  $\mu\text{m}$  处为 11 dB/m。这项工作初步展现了硫系负曲率光纤传输高功率激光的能力。

$\text{As}_{40}\text{S}_{60}$  负曲率光纤也在 2014 年被 Shiryaev 等<sup>[37]</sup>成功制备,其中基层管采用离心铸造法制备,毛细管采用双坩埚法制备,然后研究者采用堆积法将基层管和毛细管制备成预制棒。然而,由于光纤

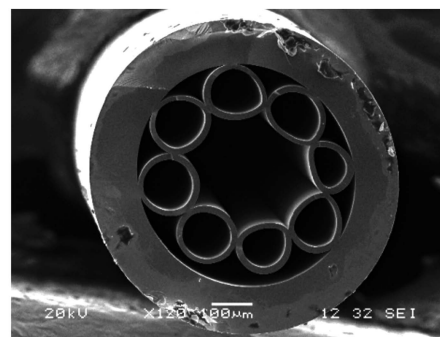


图 9 硫系负曲率光纤横截面的扫描电镜图片<sup>[36]</sup>  
Fig. 9 Cross-sectional SEM image of chalcogenide negative curvature fiber<sup>[36]</sup>

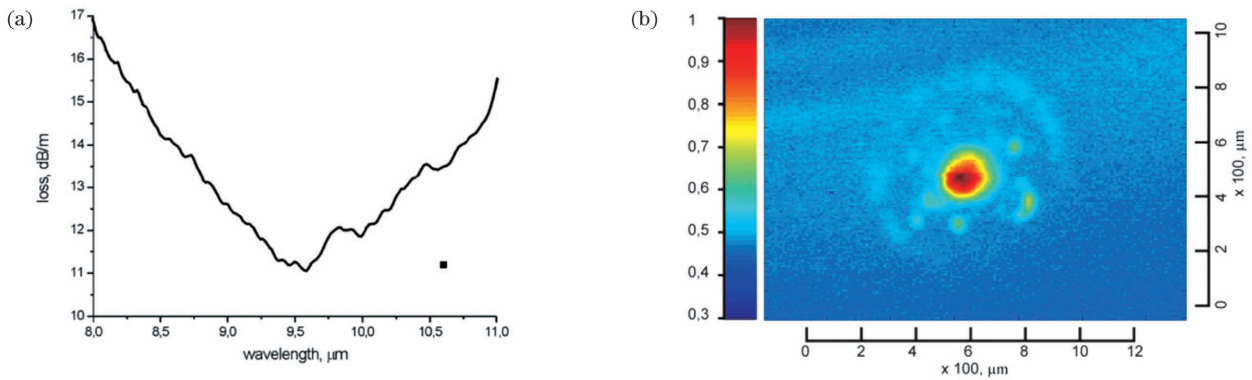


图 10 硫系负曲率光纤传输 CO<sub>2</sub> 激光的性能<sup>[36]</sup>。(a)测量的光学损耗谱;(b)CO<sub>2</sub> 激光在纤芯上的强度分布

Fig. 10 Transmission performances of CO<sub>2</sub> laser in chalcogenide negative curvature fiber<sup>[36]</sup>. (a) Measured optical loss spectrum; (b) intensity distribution of CO<sub>2</sub> laser over fiber core

拉制过程中产生的缺陷,制备出的负曲率光纤相比于阶跃型光纤展现出更高的损耗,原因有以下几点。1)硫系玻璃的黏度对温度更加敏感,在拉制过程中容易出现明显的结构缺陷。2)硫系玻璃的高折射率增加了对毛细管壁厚的要求,壁厚过大会导致传输损耗过高。3)采用堆积拉伸法制备的光纤由于包层毛细管互相接触而产生附加损耗。4)双坩埚法制备的毛细管质量还不能够与商用石英管质量相媲美。为了进一步降低硫系负曲率光纤的传输损耗,一方面需要精密控制光纤的结构尺寸以符合预期设计,另一方面研究人员设计了包层毛细管非接触式新型结构,以降低附加损耗。2016 年, Gattass 等<sup>[38]</sup>利

用挤压法,一步制备出包层毛细管非接触式的 As<sub>40</sub>S<sub>60</sub> 负曲率光纤预制棒,通过在光纤拉制时对包层毛细管施加微正压,制备出一系列不同壁厚、纤芯直径和包层毛细管间隙等尺寸规格的负曲率光纤。图 11 展示了不同管内压下光纤的截面图,在包层毛细管内施加微正压,有利于包层毛细管在光纤拉制过程中变薄,这对降低光纤损耗是十分有益的。研究者获得了在 9.75~10.5 μm 波长范围内的最低损耗记录,即在 10 μm 波长下最低损耗为 2.1 dB/m,这相比 As<sub>40</sub>S<sub>60</sub> 阶跃型光纤在 10 μm 处的损耗降低了 2~3 数量级,已经具有一定的实用价值。

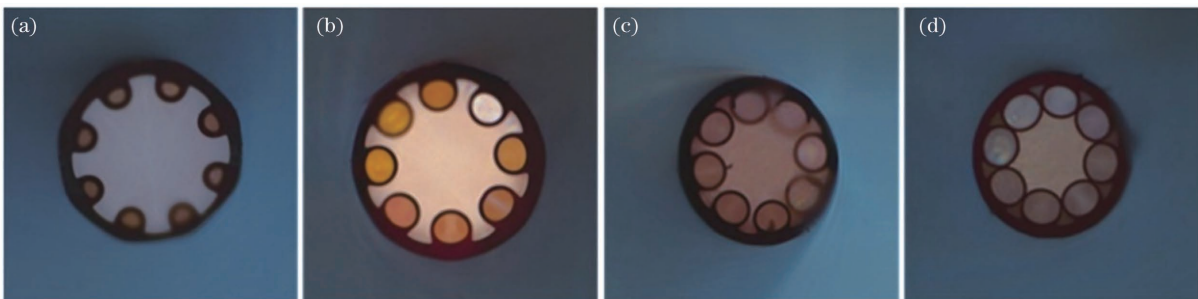


图 11 不同管内压下光纤的截面图<sup>[39]</sup>。(a) 0;(b)  $3.5 \times 10^3$  Pa;(c)  $4 \times 10^3$  Pa;(d)  $4.5 \times 10^3$  Pa

Fig. 11 Cross sections of fiber under different inner tube pressures<sup>[39]</sup>. (a) 0; (b)  $3.5 \times 10^3$  Pa; (c)  $4 \times 10^3$  Pa; (d)  $4.5 \times 10^3$  Pa

在非接触式负曲率光纤的拉制过程中,毛细管可能会发生横向移动,从而导致结构变形,产生额外的损耗。为了抑制这一负面影响,2020 年 Chenard 等<sup>[39]</sup>设计并制备了一种拱形结构的 As<sub>40</sub>S<sub>60</sub> 负曲率光纤,用于 CO<sub>2</sub> 激光传输。在光纤结构设计方面,包层毛细管壁厚为 3.9 μm,纤芯直径为 185 μm,在 10.6 μm 处的理论损耗小于 1 dB/m。在实际的光纤拉制过程中,拱形结构设计很好地抑制了包层毛细管的横向移动,保持了完好的结构,如图 12 所示。

所拉制光纤的包层毛细管实际壁厚约为 4.7 μm,通过 FT-IR 测得的光纤传输带与反谐振理论计算结果一致。

除了新的结构设计,研究人员也在思考着制备复杂结构预制棒的方法。2021 年 Carcreff 等<sup>[40]</sup>基于 Te<sub>20</sub>As<sub>30</sub>Se<sub>50</sub> 玻璃,通过 3D 打印的方法制备了预制棒并将其拉制成负曲率光纤,拉制出的光纤的传输带覆盖了 4~12 μm 波段。整个打印过程是在通风橱中进行的,受打印丝材直径(约为 400 μm)的



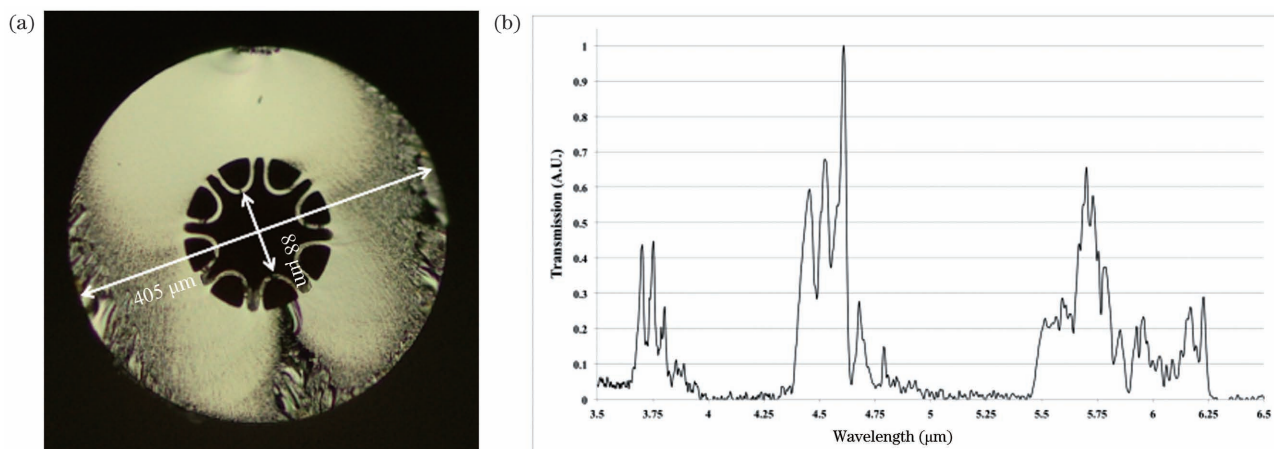


图 12 光纤性能表征<sup>[39]</sup>。(a)拱形负曲率光纤的光纤横截面图;(b)通过 FTIR 测得的传输带

Fig. 12 Characterization of fiber performances<sup>[39]</sup>. (a) Cross section of arch-shape negative curvature fiber; (b) transmission band measured by FTIR

限制以及打印过程中硫系玻璃材料易氧化和挥发,光纤横截面容易产生缺陷,从而导致高传输损耗。未来开发高精度的 3D 打印设备并改进硫系玻璃预制棒的打印工艺,可能为硫系或其他多组分玻璃负曲率光纤的制备开辟一条新的途径<sup>[41]</sup>。

### 3 存在的问题与发展方向

虽然国内外在硫系传能光纤的制备和应用研究方面已取得丰富成果,但总体而言,还存在一些关键科学和技术问题有待深入研究。

1) 高激光损伤阈值的低损耗硫系阶跃型光纤的制备。低损耗和高激光损伤阈值是硫系传能光纤的基本要求。目前商用的低损耗硫系光纤主要有  $As_{40}S_{60}$  和  $As_{40}Se_{60}$  两种,其激光损伤阈值较低,单模光纤只能满足 10 W 以内的功率传输需求。Ge 基硫系光纤具有更高的损伤阈值,但目前其损耗仍相对较高,因此开展 Ge 基硫系玻璃的新型提纯技术和制备技术是下一步重点研究的方向之一。

2) 硫系负曲率光纤的理论研究。硫系负曲率光纤虽然只有十年左右的历史,但已经超越硫系大模场光子晶体光纤、硫系空芯布拉格光纤和硫系空芯光子晶体光纤,成为最有潜力的红外高功率激光传能光纤。目前硫系负曲率光纤的理论研究尚不完善,研究负曲率光纤的传输过程需要反谐振理论、泄漏模理论和耦合模理论,因此还需要建立完善的泄漏模导光理论模型,分析光纤限制损耗、表面散射损耗、弯曲损耗在光纤整体传输损耗中的占比,从而进一步探究硫系负曲率光纤的传输损耗极限。

3) 低损耗硫系负曲率光纤的结构设计和制备。目前已经制备出的硫系负曲率光纤的结构仍为最简

单的单层包层毛细管结构。为了进一步降低传输损耗,可以考虑借鉴石英负曲率光纤中类似的嵌套或连结管设计,这对硫系负曲率光纤预制棒的制备和光纤拉制都提出了更高的要求。

### 4 结束语

目前硫系传能光纤已经在激光加工、激光手术和国土安全等领域中获得了应用,低损耗高激光损伤阈值的硫系传能光纤极具科学价值和应用前景。近年来,国内在硫系阶跃型传能光纤的制备和应用研究方面取得了长足的进步,但是在硫系空芯微结构光纤方面的研究较少,而国际上许多研究机构都已经进行了一定的理论及实验研究,这场红外光纤基础材料和相关应用技术的科技竞赛已经开始,国内需迎头赶上。

### 参 考 文 献

- [1] Borisova Z U. Glassy semiconductors [M]. New York: Springer, 1981: 5-35.
- [2] Dai S X, Wang M, Wang Y Y, et al. Review of mid-infrared supercontinuum spectrum generation based on chalcogenide glass fibers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071603.  
戴世勋,王敏,王莹莹,等.基于硫系玻璃光纤的中红外超连续谱产生研究进展[J].激光与光电子学进展,2020,57(7):071603.
- [3] Nguyen V Q, Sanghera J S, Pureza P, et al. Fabrication of arsenic selenide optical fiber with low hydrogen impurities [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2004, 85(11): 2849-2851.
- [4] Kapany N S, Simms R J. Recent developments in infrared fiber optics [J]. Infrared Physics, 1965, 5

- (2): 69-80.
- [5] Sanghera J S, Brandon Shaw L, Talley D B, et al. IR fiber optics for biomedical applications [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3907: 461-467.
- [6] Papagiakoumou E, Papadopoulos D N, Serafetinides A A. Pulsed infrared radiation transmission through chalcogenide glass fibers [J]. Optics Communications, 2007, 276(1): 80-86.
- [7] Sanghera J S, Aggarwal I D. Active and passive chalcogenide glass optical fibers for IR applications: a review[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1999, 256/257: 6-16.
- [8] Sincore A, Cook J, Tan F, et al. High power single-mode delivery of mid-infrared sources through chalcogenide fiber[J]. Optics Express, 2018, 26(6): 7313-7323.
- [9] Watanabe S, Iwamoto N, Hattori T, et al. 60-W CO laser power transmission through As-S glass fibers [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 21-24, 1985, Baltimore, Maryland. Washington, D. C.: OSA, 1985: FP6.
- [10] Sato S, Igarashi K, Taniwaki M, et al. Multihundred-watt CO laser power delivery through chalcogenide glass fibers [J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(7): 669-671.
- [11] Inagawa I, Yamagishi T, Yamashita T. Transmission-loss spectra of chalcogenide Se-Te-I glass fibers and its delivery of CO<sub>2</sub> Laser power[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1991, 30(1): 2846-2849.
- [12] Nishii J, Morimoto S, Inagawa I, et al. Recent advances and trends in chalcogenide glass fiber technology: a review[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1992, 140: 199-208.
- [13] Busse L E, Moon J A, Sanghera J S, et al. Midinfrared power delivery through chalcogenide glass-clad optical fibers [J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2714: 211-221.
- [14] Su J X, Dai S X, Jiang L, et al. Fabrication and bending strength analysis of low-loss Ge<sub>15</sub>As<sub>25</sub>Se<sub>40</sub>Te<sub>20</sub> chalcogenide glass fiber: a potential mid-infrared laser transmission medium [J]. Optical Materials Express, 2019, 9(7): 2859-2869.
- [15] Le Person J, Smektala F, Chartier T, et al. Light guidance in new chalcogenide holey fibres from GeGaSbS glass [J]. Materials Research Bulletin, 2006, 41(7): 1303-1309.
- [16] Troles J, Brilland L, Smektala F, et al. Chalcogenide photonic crystal fibers for near and middle infrared applications[C]//2007 9th International Conference on Transparent Optical Networks, July 1-5, 2007, Rome, Italy. New York: IEEE Press, 2007: 297-300.
- [17] Ren H, Qi S, Hu Y, et al. All-solid mid-infrared chalcogenide photonic crystal fiber with ultralarge mode area[J]. Optics Letters, 2019, 44(22): 5553-5556.
- [18] Feng X, Ren H, Xu F, et al. Few-moded ultralarge mode area chalcogenide photonic crystal fiber for mid-infrared high power applications[J]. Optics Express, 2020, 28(11): 16658-16672.
- [19] Duguay M A, Kokubun Y, Koch T L, et al. Antiresonant reflecting optical waveguides in SiO<sub>2</sub>-Si multilayer structures [J]. Applied Physics Letters, 1986, 49(1): 13-15.
- [20] Knight J C. Photonic crystal fibres [J]. Nature, 2003, 424(6950): 847-851.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Zhu M M, Wang X S, Pan Z H, et al. Fabrication of an IR hollow-core Bragg fiber based on chalcogenide glass extrusion [J]. Applied Physics A, 2015, 119(2): 455-460.
- [24] Hayashi J G, Mousavi S M A, Ventura A, et al. Numerical modeling of a hybrid hollow-core fiber for enhanced mid-infrared guidance[J]. Optics Express, 2021, 29(11): 17042-17052.
- [25] Désévéday F, Renversez G, Troles J, et al. Chalcogenide glass hollow core photonic crystal fibers [J]. Optical Materials, 2010, 32(11): 1532-1539.
- [26] Jin W, Bao H H, Qi Y, et al. Micro/nano-structured optical fiber laser spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0130002. 靳伟, 鲍海泓, 齐云, 等. 微纳结构光纤光谱学 [J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0130002.
- [27] Zhang H J, Pan R, Ning D. Progress of mid-Infrared hollow core microstructure optical fiber [J]. Optical Communication Technology, 2014, 38(11): 21-23. 张慧嘉, 潘蓉, 宁鼎. 中红外石英空心微结构传能光纤的研究进展 [J]. 光通信技术, 2014, 38(11): 21-23.
- [28] 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, 2004. OFC 2004, February 23-27, 2004, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 2004,

- 2: 1-3.
- [29] Jason 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] // 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 8-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 1-3.
- [30] 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.
- [31] Uebel P, Günendi M C, Frosz M H, et al. Broadband robustly single-mode hollow-core PCF by resonant filtering of higher-order modes[J]. Optics Letters, 2016, 41(9): 1961-1964.
- [32] Debord B, Amsanpally A, Chafer M, et al. Ultralow transmission loss in inhibited-coupling guiding hollow fibers[J]. Optica, 2017, 4(2): 209-217.
- [33] Zhang J Q, Zhang M, Yin J D, et al. Design of low loss hollow-core anti-resonance fiber for 3  $\mu\text{m}$  spectral region[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1723001.  
张家强, 张敏, 尹金德, 等. 3  $\mu\text{m}$  波段低损耗抗弯曲反谐振空芯光纤设计[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1723001.
- [34] Litchinitser N M, Abeeluck A K, Headley C, et al. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides[J]. Optics Letters, 2002, 27(18): 1592-1594.
- [35] Ding W, Wang Y Y, Gao S F, et al. Theoretical and experimental investigation of light guidance in hollow-core anti-resonant fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(12): 124201.  
丁伟, 汪滢莹, 高寿飞, 等. 高性能反谐振空芯光纤导光机理与实验制作研究进展[J]. 物理学报, 2018, 67(12): 124201.
- [36] Kosolapov A F, Pryamikov A D, Biriukov A S, et al. Demonstration of CO<sub>2</sub>-laser power delivery through chalcogenide-glass fiber with negative-curvature hollow core[J]. Optics Express, 2011, 19(25): 25723-25728.
- [37] 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]. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2014, 16(9): 1020-1025.
- [38] 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.
- [39] Chenard F, Alvarez O, Buff A. Novel hollow-core chalcogenide fiber with anti-resonant arches for high-power infrared laser transmission[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11261: 112610W.
- [40] Carcreff J, Chevire F, Galdo E, et al. Mid-infrared hollow core fiber drawn from a 3D printed chalcogenide glass preform [J]. Optical Materials Express, 2020, 11(1): 198-209.
- [41] Carcreff J, Chevire F, Lebullenger R, et al. Investigation on chalcogenide glass additive manufacturing for shaping mid-infrared optical components and microstructured optical fibers [J]. Crystals, 2021, 11(3): 228-239.

## Research Progress in Chalcogenide Glass Fibers for Infrared Laser Delivery

Zhang Hao<sup>1,2</sup>, Guo Haitao<sup>1\*</sup>, Xu Yantao<sup>1,2</sup>, Li Man<sup>3</sup>, Ma Wenchao<sup>3</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China;

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100045, China;

<sup>3</sup> Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control Laboratory, Tianjin 300308, China

### Abstract

**Significance** As the performance of mid-infrared lasers continues to improve, there occurs an increasing demand for their applications in laser surgery, military, materials processing, and other fields. Compared with spatial optical systems, the use of infrared fibers for laser transmission can greatly reduce the size of an optical system and improve the compactness and reliability of the whole system.

For example, in the medical field, a considerable amount of laser surgery is performed using 2.94  $\mu\text{m}$  Er:YAG lasers. The Er:YAG laser radiation absorption is very strong because this laser wavelength is practically in the center

of the maximum absorption band of cellular water. Since biological tissues contain up to 70% ~ 90% water, the Er:YAG laser is extremely efficient for their high precision cutting and vaporization. In addition, in the military field, another important application for 2  $\mu\text{m}$  to 5  $\mu\text{m}$  short-wave mid-infrared lasers is infrared countermeasures (IRCM) or laser tactical systems. Transmitting high power infrared lasers by infrared fibers can deflect or dazzle the infrared target seeking system. This application puts a high demand on the power handling capability of the fiber (typically tens of watts). For 5–12  $\mu\text{m}$  long-wave mid-infrared lasers, high power CO (5.4  $\mu\text{m}$ ) and CO<sub>2</sub> (10.6  $\mu\text{m}$ ) lasers can be used for laser surgery, industrial cutting, and welding applications. In addition, the transmission of laser power through optical fibers enables remote operation.

Due to the characteristics of wide infrared transmission, good physical and chemical stabilities, and easily fiberized performances, chalcogenide glass is one of the best materials for infrared laser power delivery fiber. Therefore, as an important infrared fiber, the fabrication and application of chalcogenide glass fiber have been paid much attention at home and abroad. This review introduces the research progresses of domestic and foreign research groups in the preparation and application of chalcogenide fibers (including the step-index fibers and micro-structured fibers) for infrared laser power delivery.

**Progress** Step-index chalcogenide glass fibers are the earliest and most mature chalcogenide fibers. For 2–5  $\mu\text{m}$  short-wave mid-infrared lasers, researchers first studied chalcogenide multi-mode fibers. In 1998, the US Naval Laboratory reported the successful transmission of a 2.94  $\mu\text{m}$  wavelength medical free electron laser (MFEL) using an As<sub>40</sub>S<sub>60</sub> multi-mode fiber. This result showed that laser surgery should be possible using a chalcogenide multi-mode fiber. Both CW and pulsed laser transmissions through chalcogenide multi-mode fibers were then subsequently reported. With the continuous development of mid-infrared lasers, while large-core multi-mode fibers can transmit higher power lasers, laser transmission quality and transmission modes still had to be considered, which require the development of small-core single-mode fibers. In 2018, the University of Central Florida examined the potential of chalcogenide fibers to handle high power mid-infrared lasers. The AR-coated As<sub>40</sub>S<sub>60</sub> single-mode fiber enables the delivery of 10.3 W laser at 2.053  $\mu\text{m}$  (Fig. 1).

For 5–12  $\mu\text{m}$  long-wave mid-infrared lasers, a multi-hundred-watt CO laser has been successfully delivered through chalcogenide glass fibers under gas cooling conditions (Fig. 2). And Te-based chalcogenide fibers can deliver a CO<sub>2</sub> laser with tens of watts. The laser transmission of different chalcogenide step-index fibers has been summarized (Table 1). It can be seen that chalcogenide step-index fibers have made a great progress in mid-infrared laser transmission. At present, a multi-mode step-index fiber can achieve multi-hundred-watt laser transmission, while a single-mode step-index fiber can basically meet the demand for laser transmission within 10 W, and has been experimentally demonstrated in the fields of laser surgery and laser processing.

Although a great progress has been made in chalcogenide step-index fibers, traditional step-index fibers are incapable due to material limitations with the increase in transmission power. In order to achieve a high power laser delivery, increasing the mode field area is the most direct and effective solution, and at the same time to ensure the beam quality, the transmission in fibers is required to be single-mode. A hollow-core micro-structured optical fiber (HC-MOF) and a large-mode-area photonic crystal fiber (LMA PCF) have become effective approaches to enhance the capability of power handling of chalcogenide fibers. Hollow-core micro-structured fibers can be divided into hollow-core Bragg fibers, hollow-core photonic crystal fibers (HC-PCFs) and hollow-core anti-resonant fibers (HC-ARFs). As researchers continue to study the numerical simulation and fabrication of micro-structured optical fibers, HC-ARFs have become the most promising infrared fibers for a high power laser delivery. The development of HC-ARFs is an encouraging advance in the fiber technology which combines the low theoretical loss over a wide bandwidth with a high tolerance to fabrication imperfections. A tolerance to fabrication imperfection is particularly important for chalcogenide fibers. At present, the minimum loss of HC-ARFs is 2.1 dB/m at 10  $\mu\text{m}$ . This result indicates that HC-ARFs have already some practical value.

**Conclusions and Prospects** Chalcogenide fibers have been used in laser processing, laser surgery, and homeland security. The development of chalcogenide fibers with low loss and high laser damage threshold has great scientific value and application prospects. In particular, hollow-core micro-structured fibers are a technological race for the next generation of infrared fibers and related applications.

**Key words** laser optics; infrared fiber; chalcogenide glass; negative curvature fiber; laser delivery