

高功率中红外激光传输硫化物玻璃光纤

祁思胜^{1,2}, 李森森³, 胡红斌⁴, 李跃兵², 黄梓轩², 任 和¹, 冯 宪², 杨志勇^{1,2}

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院强激光材料重点实验室, 上海 201800;

2. 江苏师范大学物理与电子工程学院, 江苏 徐州 221116;

3. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308;

4. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471023)

摘 要: 以高纯单质为原料, 通过原料提纯和玻璃熔体蒸馏的方法制备了高光学质量的 As-S 硫化物玻璃, 采用棒管法拉制了阶跃折射率多模光纤。表征了光纤的传输损耗和高功率中红外激光传输性能, 分析了光纤的激光损伤机理。结果表明: 制备的纤芯直径~200 μm 、数值孔径~0.35 的 As-S 玻璃光纤在 2 μm 和 4.6 μm 的传输损耗分别为~0.25 dB/m 和~0.35 dB/m。在有效的制冷条件下, 该光纤能够承受 120 W 的 2 μm 连续激光输入, 输出功率可达 63 W。理论分析表明, 该光纤在高激光功率下的损伤与纤芯玻璃中纳米异相包裹体的分布有关, 在纳米异相包裹体浓度较高的区域易产生热积累, 导致光纤产生热损伤。

关键词: 硫系玻璃; 光纤; 中红外激光; 激光损伤

中图分类号: TN253 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)04-0950-07

网络出版时间: 2022-03-22



Sulfide Glass Fiber for High-Power Mid-Infrared Laser Transmission

QI Sisheng^{1,2}, LI Sensen³, HU Hongbin⁴, LI Yuebing², HUANG Zixuan², REN He¹, FENG Xian², YANG Zhiyong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Materials for High-Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, Jiangsu, China;

3. Science and Technology on Electro-Optical Information Security Control National Key Laboratory, Tianjin 300308, China;

4. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, Aviation Industry of China, Luoyang 471023, Henan, China)

Abstract: As-S sulfide glasses with a high optical quality were prepared *via* purification of high-purity elemental raw materials and chemical distillation of the glass melt. Based on the glasses, a multimode step-index optical fiber was drawn by a rod-in-tube technique. The transmission loss of the fiber was measured, its performance of transmitting high-power mid-infrared laser was characterized, and the laser damage mechanism was analyzed. The results show that the fabricated fiber with a core diameter of ~200 μm and a numerical aperture of ~0.35 has transmission losses of ~0.25 dB/m and ~0.35 dB/m at 2 μm and 4.6 μm , respectively. Under effective cooling condition, the fiber can withstand ~120 W incident power of 2 μm continuous wave laser, and deliver transmitted power of ~63 W. According to the theoretical analysis, the damage of the fiber at a high laser power is related to the distribution of nano-sized heterophase inclusions (NHPI) in the core glass. The heat accumulation could occur in the region at a high concentration of NHPI, resulting in the thermal damage of the fiber.

Keywords: chalcogenide glass; optical fiber; mid-infrared laser; laser damage

收稿日期: 2021-12-18。 修订日期: 2022-01-14。

基金项目: 国家自然科学基金(62175096); 国防科技重点实验室基金(6142107200315); 中科院人才引进项目。

第一作者: 祁思胜(1990—), 男, 硕士, 研究实习员。

通信作者: 冯 宪(1970—), 男, 博士, 教授。

杨志勇(1980—), 男, 博士, 研究员。

Received date: 2021-12-18. Revised date: 2022-01-14.

First author: QI Sisheng (1990—), male, Master, Research Assistant.

E-mail: qisisheng@siom.ac.cn

Correspondent author: FENG Xian (1970—), male, Ph.D., Professor.

YANG Zhiyong (1980—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: xianfeng@jsnu.edu.cn;

yangzhiyong@siom.ac.cn

2~5 μm 中红外激光技术在激光制导、激光医疗、大气遥感、空间通讯、材料加工等领域具有重要的应用价值,近年来在光学和材料领域受到了广泛关注^[1-3]。目前,连续波(CW)和脉冲 2 μm 掺铥光纤激光器的输出平均功率均已达到千瓦级^[4-5], 2.5 μm Cr^{2+} 掺杂的 II~VI 硫系化合物固态激光器也已达到百瓦级功率水平^[6]。最近,量子级联激光器(QCL)作为极具前景的高效、紧凑型中红外激光光源得到了迅速发展^[7-8],单模 CW QCL 在中红外波段的输出功率达到 8.2 W^[9],同时,阵列技术已被提出用于制造百瓦级高功率 QCL。

光纤作为激光传输或产生介质具有输出光束质量高、柔性可弯曲、体积小、质量轻等优点,利于激光平台的小型化和轻量化。硅酸盐玻璃光纤已在近红外千瓦至万瓦级高功率光纤激光技术的发展中起到关键作用^[10],新兴的 2~5 μm 高功率中红外激光技术也迫切需要紧凑灵活的高性能光纤作为激光平台的传输介质。在中红外光纤中,氟化物玻璃光纤和硫化物玻璃光纤被认为是较有潜力的 2~5 μm 高功率激光传输材料^[11-12]。典型的氟化物玻璃光纤的光谱范围为 0.35~4.5 μm ,低损耗波段为 0.7~3.5 μm ,日本 Fiberlabs 公司生产的 ZBLAN 氟化物光纤在中红外 2~3.5 μm 波段的损耗小于 0.1 dB/m。10 μm 芯径的单模 ZBLAN 光纤可传输 30 W 以上 1.90~3.35 μm 波段超连续谱激光^[13]。与氟化物玻璃光纤相比,硫化物玻璃光纤具有更宽的红外透光范围(覆盖 1~6.5 μm),其低损耗波段为 2~5 μm (4.1 μm 附近的杂质吸收带除外)^[14-15],美国 IRflex 公司生产的 As-S 玻璃光纤在中红外 2~5 μm 波段的典型损耗小于 0.1 dB/m。此外,硫化物玻璃光纤具有极好的化学稳定性,即使在潮湿或酸性环境中也可以长时间保存而不会显著影响其光学性能。因此,近年来硫化物玻璃光纤在 2~5 μm 中红外波段的应用备受关注,如中红外激光传输、非线性频率产生等^[12, 16]。然而,由于形成硫化物玻璃网络结构的化学键较弱,硫化物玻璃光纤表现出较低的激光损伤阈值,使得其能够传输的激光功率相对较低。根据文献报道,目前单模硫化物玻璃光纤传输的最高中红外 CW 激光功率为 10.3 W(@ 2 μm)^[12],光纤芯径为 12 μm ;多模硫化物光纤中传输的最高中红外 CW 激光功率为 226 W(@ 5.4 μm)^[17],光纤芯径为 1 mm,如此大芯径的光纤实际上已经失去了光纤最重要的柔性优势。迄今为止,在柔性硫化物玻璃光纤中尚未实现百瓦级 2~5 μm 中红外激光传输。

本研究制备了芯径为 200 μm 的柔性 As-S 玻璃光纤,利用 2 μm 高功率光纤激光器作为光源研究了光纤的激光传输能力和激光损伤机理。在强制冷却条件下,该光纤能够承受 120 W 的入射激光功率,输出功率达到 63 W;采用柱状材料热传递模型分析了光纤的激光损伤过程。

1 实验

1.1 玻璃制备

纤芯玻璃和包层玻璃的化学组成分别为 $\text{As}_{0.4}\text{S}_{0.6}$ 和 $\text{As}_{0.38}\text{S}_{0.62}$ 。制备玻璃所用原料为纯度 9.999 999% 的 As 单质和纯度 99.999 9% 的 S 单质,所用反应容器为羟基含量小于 5×10^{-6} 的高纯石英管,原料的存储、称量和装填均在充满氮气且水氧含量低于 1×10^{-7} 的手套箱中进行。与 C、H、O 相关的杂质会在中红外波段产生特征吸收,从而显著影响玻璃的中红外透光性能。为了尽可能减少原料携带的痕量 C、H、O 杂质,在配料前,将放入洁净石英管中的 As 在 320 $^{\circ}\text{C}$ 真空处理 2 h 进行表面脱氧;将 S 在石英容器中真空蒸馏 4 次进行脱碳和脱氢处理。将预处理后的 As 和 S 称量并装入石英管中,同时加入质量比为 5×10^{-5} 的 Al(99.999%)作为除氧剂和 2×10^{-4} 的 GaCl_3 (99.999%,超干)作为 C、H 清除剂,将装有原料的石英管抽真空至管内压强低于 10^{-3} Pa 并用氢氧焰封接,然后将封接的石英管放入摇摆炉中采用熔融-淬冷法制备初始玻璃。之后,将获得初始玻璃放入双腔石英容器中进行蒸馏提纯,详细提纯过程与文献[18]所述相同。 $\text{As}_{0.4}\text{S}_{0.6}$ 和 $\text{As}_{0.38}\text{S}_{0.62}$ 玻璃的熔制温度均为 800 $^{\circ}\text{C}$,退火温度分别为 200 $^{\circ}\text{C}$ 和 190 $^{\circ}\text{C}$,制备的玻璃尺寸为 $\phi 14.9 \text{ mm} \times 100 \sim 120 \text{ mm}$ 。

1.2 光纤制备

采用棒管法制备光纤,芯棒直接使用上述制备的 $\phi 14.9 \text{ mm}$ 的 $\text{As}_{0.4}\text{S}_{0.6}$ 玻璃,如图 1a 所示。包层套管采用旋管法制备,将上述制备的 $\text{As}_{0.38}\text{S}_{0.62}$ 玻璃在手套箱中粉碎,称量适量玻璃放入内外径分别为 19 mm 和 23 mm 的石英管中,然后将石英管真空封接并放入旋管模具中加热至 600 $^{\circ}\text{C}$,之后将旋管模具放入旋管机中通过高速旋转产生的离心力使石英管中的 $\text{As}_{0.38}\text{S}_{0.62}$ 熔体形成空心管,最后将旋管模具取下在 190 $^{\circ}\text{C}$ 对内部的玻璃套管进行退火。制备的 $\text{As}_{0.38}\text{S}_{0.62}$ 包层套管的内外径分别为 15 mm 和 18.8 mm,长度约 120 mm。将上述制备的 $\text{As}_{0.4}\text{S}_{0.6}$ 芯棒插入 $\text{As}_{0.38}\text{S}_{0.62}$ 包层套管中,然后在包层套管外壁包裹聚醚酰亚胺(PEI)薄膜作为聚合物保护层,形

成直径约 22.6 mm 的光纤预制棒，最后在 300 °C 和氮气保护下拉制成直径为 300 μm 的光纤，如图 1b

所示。玻璃纤芯和包层的直径分别为~200 μm 和~250 μm ，如图 1c 所示。

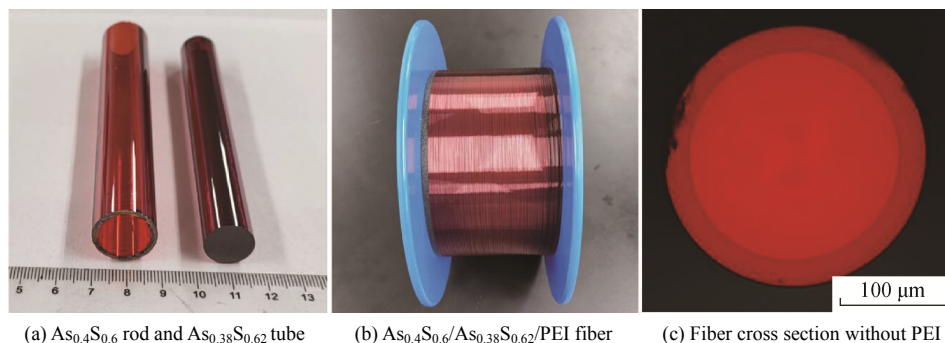


图 1 制备的玻璃和光纤照片

Fig. 1 Photos of prepared glasses and fibers

1.3 样品表征

采用红外变角椭偏仪(IR-VASE, J.A. Woollam IR-VASE, USA)^[19] 测试玻璃在 2~10 μm 的折射率，样品为尺寸 $\phi 14.9 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的单面抛光玻璃片。采用 Fourier 变换红外光谱仪(FTIR, Tensor 27, Bruker, Germany)测试光纤在 2~7 μm 的传输损耗，光纤起始长度为 5 m，每次截断长度约 0.8 m。光纤在 2 μm 和 4.6 μm 的传输损耗还分别采用 2 μm CW 掺铈石英光纤激光器(TFC-200, 中红外激光研究院(江苏)有限公司)和 4.6 μm CW QCL(QF4550CM1, Thorlabs, USA)作为光源进行测试，分别使用铟-镓-砷和汞-镉-碲探测器测量激光功率。

光纤的激光传输能力采用图 2 所示装置进行测试。高功率激光光源为上述 2 μm CW 掺铈石英光纤激光器，输出尾纤配有光纤端帽，输出激光的光束

质量因子 M^2 约为 1.2，最大输出功率约 130 W。使用焦距分别为 50 mm 和 150 mm 的 CaF_2 透镜将激光准直和聚焦到光纤的输入端，光斑直径为~180 μm ，是光纤芯径的 90%。将输入端长度约 12 cm 的光纤夹在 2 个黄铜 V 型槽之间，光纤的上表面贴上双面导电铜胶带以确保光纤和金属槽之间接触良好；使用导电胶将珀耳帖(Peltier)制冷模块粘在 V 型槽底部对其进行制冷；在光纤和下部 V 型槽之间放置一个热电偶监控温度；在珀耳帖制冷模块下方连接一块水冷铝板对其进行散热；上述元件均安装在三维位移平台上以便将激光耦合进光纤中。使用量程为 0.1~200.0 W 的热功率计(S322C, thorlabs, USA)监测光纤输入端的激光功率 P_{in} 和输出端的激光功率 P_{out} ，可获得激光在光纤中的传输效率($\eta = P_{\text{out}}/P_{\text{in}}$)。

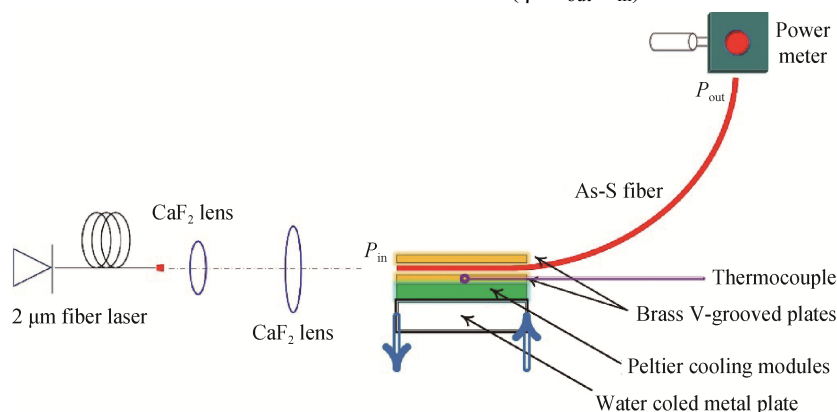


图 2 使用 As-S 多模光纤传输 2 μm 高功率激光的实验装置示意图

Fig. 2 Schematic experimental setup for 2- μm high-power laser transmission in As-S multimode fiber

2 结果与讨论

2.1 玻璃和光纤的光学性能

玻璃的折射率色散曲线如图 3 所示， $\text{As}_{0.4}\text{S}_{0.6}$ 纤芯玻璃和 $\text{As}_{0.38}\text{S}_{0.62}$ 包层玻璃对应的色散方程分别为：

$$n_{\text{core}}^2 = 1 + \frac{4.825 \cdot 5\lambda^2}{\lambda^2 - 0.256 \cdot 4^2} + \frac{1.021 \cdot 0\lambda^2}{\lambda^2 - 29.38^2} \quad (1)$$

$$n_{\text{cladding}}^2 = 1 + \frac{4.698 \cdot 2\lambda^2}{\lambda^2 - 0.225 \cdot 4^2} + \frac{1.070 \cdot 0\lambda^2}{\lambda^2 - 31.52^2} \quad (2)$$

其中： n_{core} 和 n_{cladding} 分别为纤芯玻璃和包层玻璃的

折射率; λ 为波长。可以看出, 二者在 2~5 μm 波段的折射率差约为 0.03。

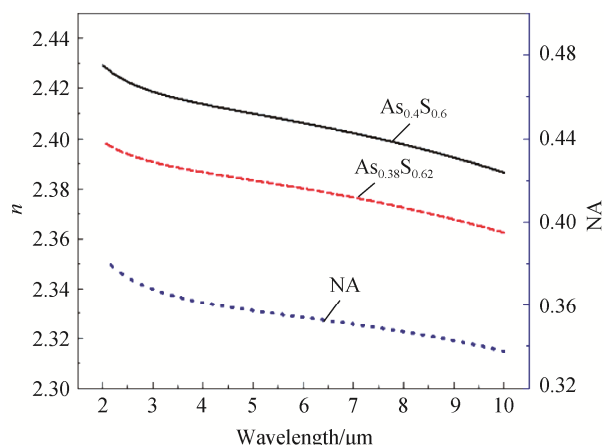


图 3 $\text{As}_{0.4}\text{S}_{0.6}$ 玻璃和 $\text{As}_{0.38}\text{S}_{0.62}$ 玻璃的折射率 n 和对应光纤的数值孔径 NA

Fig. 3 Measured refractive indices n of $\text{As}_{0.4}\text{S}_{0.6}$ and $\text{As}_{0.38}\text{S}_{0.62}$ glasses, and calculated numerical aperture NA of corresponding fiber

根据纤芯玻璃和包层玻璃的折射率, 可计算出制备的光纤在 2~5 μm 波段的数值孔径(NA)为 0.35~0.38(见图 3), 芯径为 200 μm 的光纤对应的归一化频率 V 为 45~120。根据经验公式 $N \approx V^2/2$, 可求出光纤能够传输的模式数量 N 超过 1 000 个。

光纤的传输损耗如图 4 所示。其中, 光纤在 2~7 μm 波段的损耗曲线采用 FTIR 测得, 光纤在 2 μm 和 4.6 μm 波长的损耗采用激光器作为光源测得, 2 种方法的测试结果基本一致。可以看出, 光纤在 2 μm 和 4.6 μm 的损耗分别为 ~0.25 dB/m 和 ~0.35 dB/m。损耗曲线显示光纤在 3.0 μm 和 4.1 μm 附近具有较高的峰值损耗, 这与光纤中残留的 O-H 和 S-H 杂质吸收有关^[14]。

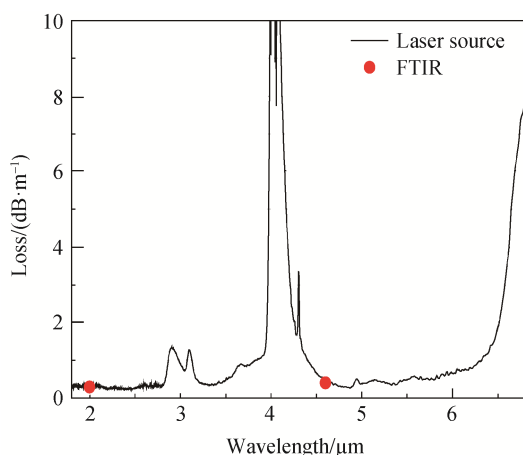


图 4 制备的 As-S 光纤的传输损耗

Fig. 4 Transmission losses of fabricated As-S fiber

2.2 光纤的激光传输性能

在 25 $^{\circ}\text{C}$ 的洁净环境中, 采用图 2 所示装置对制备的光纤进行了一系列激光传输和损伤实验。将两端去除 PEI 保护层并平切的光纤用于测试, 珀耳帖模块制冷的光纤输入端的温度设为 15 $^{\circ}\text{C}$, 温度波动为 ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。图 5 显示了长度为 50 cm 的光纤中典型的 2 μm CW 激光入射功率 P_{in} 和输出功率 P_{out} 之间的关系。可以看出, 当 P_{in} 低于 91 W 时, 激光在光纤中的传输效率为 ~55%, 与文献[17]报道值(56%)相近, 之后斜率显著下降, 直到 P_{in} 达到 ~120 W 时光纤发生损伤, 此时对应的 P_{out} 为 63 W。这种光纤损伤前出现功率变化斜率下降的现象在之前报道的 1 mm 芯径 As-S 和 Ge-As-S 光纤中也曾被观察到^[17], 表明斜率出现下降后更高比例的激光能量转化成了热。计算可知, 本研究制备的光纤最高可以承受 ~470 kW/cm^2 的入射激光强度和 ~200 kW/cm^2 的透射强度(50 cm 长光纤), 分别是文献[17]报道的 1 mm 芯径 As-S 光纤所能承受功率强度的 ~2 倍和 ~7 倍。

值得注意的是, 纤芯玻璃 $\text{As}_{0.4}\text{S}_{0.6}$ 在 2 μm 波长的折射率为 2.429, 由此可以计算出光纤一个端面的菲涅耳反射损耗约为 17%, 光纤两个端面多次反射引起的总菲涅耳反射损耗约为 ~30%, 因此 2 μm 激光在 $\text{As}_{0.4}\text{S}_{0.6}$ 光纤中的最高传输效率 η 为 ~70%, 图 5 中的虚线表示该理论极限。而本实验测得的 η 为 ~55%, 考虑到 50 cm 长光纤有 0.125 dB (~3%) 的传输损耗, 可以推算出实验中有 ~12% 的能量进入了包层, 最终被包层和聚合物保护层吸收转化为热。就绝对输出功率而言, 本研究的实验结果仍低于文献报道的 1 mm 纤芯 As-S 光纤的传输结果^[17]。然而, 本研

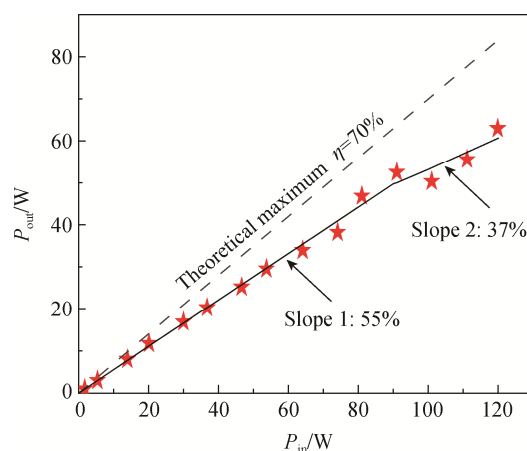


图 5 测试的 As-S 光纤中输出功率 P_{out} 与输入功率 P_{in} 的关系

Fig. 5 Relationship between output power P_{out} and input power P_{in} in tested As-S fiber

究中获得的输出功率已可满足多数实际应用的需求,如基于 2~5 μm 激光的定向红外对抗。必须指出,文献[17]中使用的 1 mm 芯径 As-S 光纤已经不再具有柔性,而本研究中的外径为 300 μm 的 As-S 玻璃光纤具有相当大的可弯曲能力,这可以保证基于该光纤元件的激光系统具有体积小、结构紧凑的优势。

2.3 光纤的激光损伤机理

在 2 μm CW 高功率激光传输实验中,观察到光纤在未强制冷却部分某个部位随机地发生热损伤,损伤部位长度 L_x 为 5~10 cm。这种损伤特征与纤芯玻璃中纳米异相包裹体(NHPI)缺陷的分布有关^[20–22]。根据文献[22]中给出的数据,在 2 μm 处损耗为 0.25 dB/m 的 As-S 光纤中的 NHPI 的浓度约为 10^5 cm^{-3} ,这意味着在芯径为 200 μm 的光纤中,每厘米纤芯内含有几十个 NHPI。可以合理地假设,在如此低的浓度水平下,NHPI 沿光纤长度非均匀分布,即每厘米长度的光纤内 NHPI 的数量显著不同。As-S 玻璃中的 NHPI 通常含有碳、氢、氧、硅等杂质^[21–22],这些杂质会对传输的激光产生散射和/或吸收。在高功率激光传输时,当传输的光遇到浓度相对较高的 NHPI 团簇时,会导致局部热积累,一旦积累的热量使局部温度升高至接近玻璃化转变温度 T_g 时,光纤就会在该部位损伤。

为了进一步理解光纤的激光损伤机理,对光纤损伤时加载在损伤部位的热量进行分析。首先,输入功率 P_{in} 的 15%(70%~55%)转化为热,由于光纤损耗较低,这些热量沿光纤均匀分布,当 $P_{\text{in}}=120 \text{ W}$ 时,沿光纤分布的热量为 0.36 W/cm;其次,当 P_{in} 从 91 W 升高至 120 W 时,局部长度内产生的净热量为 5.3 W。因此,当光纤在 $P_{\text{in}}=120 \text{ W}$ 损伤时,受损部分(L_x)承载的总热量 Q 为 $0.36 L_x + 5.3 \text{ W}$ 。

采用柱状材料的热传递模型可以对光纤的散热过程进行分析。如图 6 所示,从纤芯到包层外表面传导的热量 Q_1 可以通过下式计算^[23]:

$$Q_1 = k \frac{\pi(R_o + R_c) \cdot \Delta L}{R_o - R_c} \cdot (T_c - T_o) \quad (3)$$

其中: k 为包层材料的热导率; R_c 和 R_o 分别为纤芯半径和包层半径; ΔL 为热积累部位的长度; T_c 和 T_o 分别为纤芯温度和包层外表面温度。由于 PEI 聚合物与 As-S 玻璃的热导率相近,均为 $(0.20 \pm 0.03) \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[24],在计算中可以认为 PEI 为包层的一部分。从光纤外表面向周围环境散发的热量 Q_2 可通过牛顿冷却定

律计算^[25]:

$$Q_2 = h \cdot 2\pi R_o \cdot \Delta L \cdot (T_o - T_\infty) \quad (4)$$

其中: h 为对流传热系数; $2\pi R_o \Delta L$ 为光纤(包括 PEI 层)的外表面面积; T_∞ 为周围环境温度。

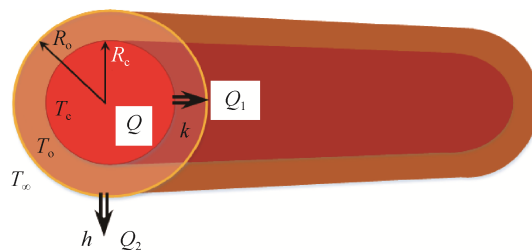
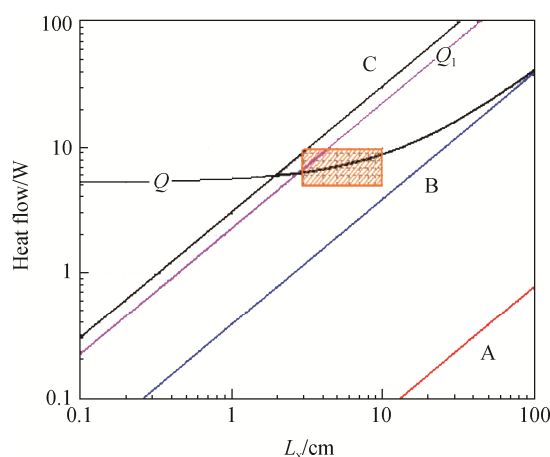


图 6 光纤热传递模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of heat transfer model for the fiber

在计算中, R_c 和 R_o 分别设为 100 μm 和 150 μm ;假设纤芯温度 T_c 为 170 $^\circ\text{C}$ (比纤芯玻璃 T_g 低约 30 $^\circ\text{C}$)时光纤发生损伤;假设光纤外表面的温度 T_o 为 100 $^\circ\text{C}$,周围环境温度 T_∞ 设置为 15 $^\circ\text{C}$ (珀耳帖模块制冷温度)。图 7 显示了不同冷却条件下计算的耗散热流与损伤部位长度 L_x 的关系,其中直线 A、B、C 分别对应静滞空气冷却 $[h=10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ ^[24]、强制空气冷却 $[h=500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ ^[24]、珀耳帖模块冷却[等效强制水冷冷却, $h=4000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ ^[26]。只有满足 $Q_2 \geq Q_1 \geq Q$ 时,纤芯内产生的热量才能被有效传递到环境中,否则,积累的热量将导致光纤损伤。可以看出,在高功率激光传输时,只有采用珀耳帖模块冷却或等效冷却方式才能有效防止光纤内部产生热积累引起光纤损伤;损伤部位的长度应该大于



A—Stagnant air cooling; B—Forced air cooling; C—Peltier cooling.

图 7 不同冷却条件下计算的从光纤表面耗散至环境中的热流与损伤部位长度 L_x 的关系

Fig. 7 Relation between calculated heat flow dissipated to the surroundings from the fiber surface and the length L_x of damaged section under different cooling conditions

3 cm(图 7 中虚线方块), 这与本研究中观察到的 5~10 cm 损伤长度相一致。使用相同的模型, 可以进一步预测, 使用芯径为 260 μm 、外径为 300 μm 且损耗相同的 As-S 光纤, 传输功率 P_{out} 可以达到 100 W。此外, 如果通过改进制备技术将 As-S 玻璃中 NHPI 的浓度降低至原来的 1/3, 那么在芯径为 200 μm 、外径为 300 μm 的 As-S 光纤中甚至可以实现 100 W 以上 2~5 μm 激光功率传输。

3 结论

通过单质原料提纯和玻璃熔体提纯制备了 $\text{As}_{0.4}\text{S}_{0.6}$ 纤芯玻璃和 $\text{As}_{0.38}\text{S}_{0.62}$ 包层玻璃, 采用棒管技术制备了芯径~200 μm 、包层直径~250 μm 、PEI 保护层直径~300 μm 的柔性多模光纤。光纤在 2~5 μm 波段的数值孔径为 0.35~0.38, 在 2 μm 和 4.6 μm 的传输损耗分别为~0.25 dB/m 和~0.35 dB/m。采用珀耳帖模块冷却, 光纤最高可输入~120 W 的 2 μm 连续激光, 输出功率可达~63 W。在高功率激光传输时, 光纤的损伤与纤芯玻璃中 NHPI 的分布有关, NHPI 团簇会使光纤局部产生热积累, 从而导致光纤损伤。通过进一步增大光纤芯径或降低 NHPI 浓度, 有望使光纤传输的中红外激光功率提高至 100 W 以上。

参考文献:

- [1] JUNG D, BANK S, LEE M L, et al. Next generation mid-infrared sources[J]. *J Opt*, 2017, 19(12): 123001.
- [2] JACKSON S D, JAIN R K. Fiber-based sources of coherent MIR radiation: Key advances and future prospects[J]. *Opt Express*, 2020, 28(21): 30964–31019.
- [3] 杨俊彦, 公发全, 刘锐刚, 等. 中红外激光在光电对抗领域的应用及进展[J]. *飞控与探测*, 2020, 3(6): 34–42.
YANG Junyan, GONG Faquan, LIU Ruigang, et al. Flight Control Detect(in Chinese), 2020, 3(6): 34–42.
- [4] ANDERSON B M, SOLOMON J, FLORES A. 1.1 kW, beam-combinable thulium doped all-fiber amplifier[J]. *Proc SPIE*, 2021, 11665: 116650B.
- [5] ZERVAS M N, CODEMARD. High power fiber lasers: A review[J]. *IEEE J Sel Top Quant*, 2014, 20(5): 219–241.
- [6] MOSKALEV I, MIROV S, MIROV M. 140 W Cr:ZnSe laser system [J]. *Opt Express*, 2016, 24(18): 21090–21104.
- [7] MEYER J R, BEWLEY W W, CANEDY C L, et al. The interband cascade laser[J]. *Photonics*, 2020, 7(3): 75.
- [8] 邓凯, 高志远, 韩隆, 等. 量子级联激光器及其应用的研究进展[J]. *光电技术应用*, 2021, 36(5): 23–35.
DENG Kai, GAO Zhiyuan, HAN Long, et al. *Electro-optic Technol Applic(in Chinese)*, 2021, 36(5): 23–35.
- [9] ZHOU W, LU Q, WU D, et al. High-power, continuous-wave, phase-locked quantum cascade laser arrays emitting at 8 μm [J]. *Opt Express*, 2019, 27(11): 15776–15785.
- [10] 陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 高效率全国产化 10 kW 光纤激光器[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0336001.
CHEN Xiaolong, LOU Fengguang, HE Yu, et al. *Acta Opt Sin(in Chinese)*, 2019, 39(3): 0336001.
- [11] UEHARA H, KONISHI D, GOYA K, et al. Power scalable 30-W mid-infrared fluoride fiber amplifier[J]. *Opt Lett*, 2019, 44(19): 4777–4780.
- [12] SINCORE A, COOK J, TAN F, et al. High power single-mode delivery of mid-infrared sources through chalcogenide fiber[J]. *Opt Express*, 2018, 26(6): 7313–7323.
- [13] YANG L Y, LI Y, ZHANG B, et al. 30-W supercontinuum generation based on ZBLAN fiber in an all-fiber configuration[J]. *Photon Res*, 2019, 7(9): 1061–1065.
- [14] CHURBANNOV M F, SNOPTIN G E, SHIRYAEV V S, et al. Recent advances in preparation of high-purity glasses based on arsenic chalcogenides for fiber optics[J]. *J Non-Cryst Solids*, 2011, 357: 2352–2357.
- [15] 郭海涛, 崔健, 许彦涛, 等. 低损耗硫系红外光纤制备及其应用研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170606.
GUO Haitao, CUI Jian, XU Yantao, et al. *Laser Optoelectron Prog(in Chinese)*, 2019, 56(17): 170606.
- [16] DAI SX, WANG Y Y, PENG X F, et al. A review of mid-infrared supercontinuum generation in chalcogenide glass fibers[J]. *Appl Sci-Basel*, 2018, 8(5): 707.
- [17] SATO S, IGARASHI K, TANIWAKI M, et al. Multihundred-Watt CO laser power delivery through chalcogenide glass fibers[J]. *Appl Phys Lett*, 1993, 62(7): 669–671.
- [18] ZHANG B, GUO W, YU Y, et al. Low loss, high NA chalcogenide glass fibers for broadband mid-Infrared supercontinuum generation[J]. *J Am Ceram Soc*, 2015, 98(5): 1389–1392.
- [19] WANG Y W, QI S S, YANG Z Y, et al. Composition dependences of refractive index and thermo-optic coefficient in Ge-As-Se chalcogenide glasses[J]. *J Non-Cryst Solids*, 2017, 459: 88–93.
- [20] KAMERDKY V A, SCRIPACHEV I V, SNOPTIN G E, et al. High-power As-S glass fiber delivery instrument for pulse YAG:Er laser radiation[J]. *Appl Opt*, 1998, 37: 5596–5599.
- [21] SNOPTIN G E, SHIRYAEV V S, PLOTNICHENKO V G, et al. High-purity chalcogenide glasses for fiber optics[J]. *Inorg Mater*, 2009,

45(13): 1439–1460.

[22] KETKOVA A, CHURBANOV M F. Heterophase inclusions as a source of non-selective optical losses in high-purity chalcogenide and tellurite glasses for fiber optics[J]. J Non-Cryst Solids, 2018, 480: 18–22.

[23] LIMPET J, SCHREIBER T, LIEM A, et al. Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation[J]. Opt Express, 2003, 11(22): 2982–2990.

[24] SINCORE A, COOK J, TAN F, et al. Practical limits of power transmission through single-mode chalcogenide fibers[J]. Opt Eng, 2018, 57(11): 111807.

[25] INCROPERA F P, DEWITT D P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer (6th Edition)[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006: 8.

[26] ZINTZEN B, LANGER T, GEIGER J, et al. Heat transport in solid and air-clad fibers for high-power fiber lasers[J]. Opt Express, 2007, 15(25): 16787–16793.

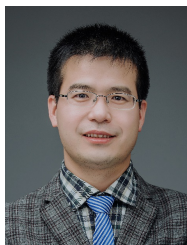
※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※



祁思胜，中科院上海光学精密机械研究所研究实习员，研究方向为红外硫系玻璃光纤和光纤传像束的制备与应用，已发表 SCI 论文 10 篇，获授权发明专利 6 件。



冯宪，江苏师范大学物理与电子工程学院教授，博士研究生导师。先后主持国家自然科学基金、英国 EPSRC 重点项目、欧盟多国合作 FP7 重大项目子课题 5 项。在国内外学术刊物、会议上发表研究论文 100 余篇。主要研究方向为特种光纤材料和特种光子晶体光纤设计-制备-应用研究。2017 年 1 月-2018 年 12 月，任美国光学学会光纤设计和制造技术小组组长，代表美国光学学会负责特种光纤设计、研究和应用等领域在全球的推广工作。



杨志勇，中科院上海光学精密机械研究所研究员，博士研究生导师。入选中科院人才引进计划(择优支持)、江苏省双创计划，曾获澳大利亚研究基金委青年人才项目 Discovery Early Career Researcher Award。主要研究方向为红外玻璃与光纤器件的制备及应用。主持承担国防项目、国家自然科学基金等科研项目 10 余项，发表 SCI 论文 90 余篇，获授权发明专利 20 件。红外硫系玻璃、硫系光纤和光纤传像束的生产技术均已实现成果转化，自主研制的红外玻璃与光纤器件已被国内外多家单位使用。