

基于挤压技术的新型七芯超大数值孔径硫系玻璃 光纤制备及其光学性能研究

吴国林^{1,2}, 冯赞^{1,2}, 汪俊^{1,2}, 汪金晶^{1,2}, 钟明辉^{1,2}, 徐铁松^{1,2}, 梁晓林^{1,2}, 肖晶^{1,2},
王弦歌^{1,2}, 焦凯^{1,2}, 赵浙明^{1,3}, 王训四^{1,2*}, 张培晴^{1,2}, 刘永兴^{1,2}, 戴世勋^{1,2}, 聂秋华^{1,2}

¹宁波大学信息科学与工程学院, 高等技术研究院, 红外材料与器件实验室, 浙江 宁波 315211;

²浙江省光电探测材料及器件重点实验室, 浙江 宁波 315211;

³嘉兴学院南湖学院, 浙江 嘉兴 314001

摘要 基于挤压技术制备新型七芯光纤。首先通过蒸馏纯化工艺和传统熔融淬冷法制备了 As_2Se_3 和 As_2S_3 两种玻璃, 采用改进的分离式挤压法制备了光纤预制棒, 并结合聚合物层的高温涂覆保护获得了结构完整的新型七芯硫系玻璃光纤, 该光纤的数值孔径分布范围高达 1.20~1.45。采用截断法测试了该光纤的损耗, 最低损耗约为 1.9 dB/m@4.4 μ m, 最后将飞秒激光结合光参量放大器(OPA)作为泵浦源测试了该光纤的非线性性能, 在 14 cm 长的七芯光纤中获得了谱宽范围为 1.5~12 μ m 的超连续谱输出。结果表明, 该七芯硫系光纤具有良好的非线性性能, 在中红外光学领域具有重要的应用价值和研究意义。

关键词 光纤光学; 七芯光纤; 硫系玻璃; 挤压法; 中红外超连续谱

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1006003

Fabrication and Optical Properties of a Novel Seven-Core High-NA Chalcogenide Glass Fiber Based on Extrusion

Wu Guolin^{1,2}, Feng Zan^{1,2}, Wang Jun^{1,2}, Wang Jinjing^{1,2}, Zhong Minghui^{1,2}, Xu Tiesong^{1,2},
Liang Xiaolin^{1,2}, Xiao Jing^{1,2}, Wang Xiang^{1,2}, Jiao Kai^{1,2}, Zhao Zheming^{1,3},
Wang Xunsi^{1,2*}, Zhang Peiqing^{1,2}, Liu Yongxing^{1,2}, Dai Shixun^{1,2}, Nie Qiuhua^{1,2}

¹Laboratory of Infrared Materials and Devices, Research Institute of Advanced Technology, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

²Key Laboratory of Photoelectric Detection Materials and Devices of Zhejiang Province, Ningbo, Zhejiang 315211, China;

³Nanhu College, Jiaxing University, Jiaxing, Zhejiang 314001, China

Abstract A novel seven-core chalcogenide glass fiber was fabricated via extrusion. Firstly, two glasses, As_2Se_3 and As_2S_3 , were prepared by distillation purification and melt-quenching. Then, an improved isolated extrusion method was used to fabricate the optical fiber preforms. In addition, a novel seven-core chalcogenide glass fiber of a complete structure was obtained with the protection of the high-temperature polymer layer, with the numerical aperture (NA) in the range of 1.20 to 1.45. Its loss was measured by the cutback method, with a minimum of 1.9 dB/m@4.4 μ m. Finally, pumping with femtosecond laser from an optical parametric amplifier (OPA) yielded

收稿日期: 2020-09-01; 修回日期: 2020-12-05; 录用日期: 2020-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(61875097, 61627815, 61705091)、浙江省杰出自然科学基金(LR18F050002)、浙江省光电探测材料及器件重点实验室开放课题(2017004)、宁波市领军和拔尖人才培养工程择优资助、嘉兴市科技局项目(2017AY13010)、王宽诚幸福基金课题资助

* E-mail: xunsiwang@siom.ac.cn

a supercontinuum covering 1.5–12 μm in a 14-cm long seven-core fiber, demonstrating excellent nonlinearity of this fiber. In summary, this fiber shows great potential in both mid-infrared research and technical applications.

Key words fiber optics; seven-core fiber; chalcogenide glass; extrusion method; mid-infrared supercontinuum

OCIS codes 060.2280; 060.2390; 060.2300

1 引言

近年来,中红外超连续谱由于它的应用价值而受到越来越多的重视。中红外波段的光会被分子选择吸收,使得分子产生振动或转动,形成红外吸收光谱,故有着特殊的分子指纹区^[1-2]。因此,基于分子指纹的红外光谱技术逐渐成为化学、天文、生物、医疗等领域不可或缺的重要研究工具^[3-5],红外光谱技术的发展需要借助相关的红外材料,硫系玻璃因其具有较宽的中、远红外透过范围,较低的声子能量,极高的线性和非线性折射率系数等优点,是产生中、远红外超连续谱的玻璃材料中的理想介质^[6-7]。而在众多的硫系玻璃体系中,Se 基硫系玻璃具有良好的宽红外窗口透过性能(如 As_2Se_3 的长波截止波长可达 18 μm),且具有良好的化学稳定性和玻璃形成能力,具有良好的光纤化性能^[8-9]。但由于硫系玻璃的激光抗损伤阈值低,普通单芯硫系玻璃光纤中产生的超连续谱功率有限,为了提高超连续谱的输出功率,人们常采用多芯结构光纤设计^[10-11]。相比于单芯光纤,多芯光纤具有诸多优点,如:可以利用不同纤芯来传输不同模式,且能够保证模式间相互独立,可以增大光纤的通信量^[10-13];处于同一个包层下的多个纤芯,能增大光场的有效模场面积,进而提高光纤的激光损伤阈值^[14]。Huo 等^[15]比较了多芯光纤激光器与单芯光纤激光器的性能,由于多芯光纤能够使传热速度更快,故其输出功率可以通过增加芯数来增大。当前多芯光纤大多采用石英玻璃,其受限于材料本征吸收而无法应用于中远红外波长范围,因此,在中远红外波长区间,基于硫系玻璃的多芯光纤可极大地提高传输容量,且是产生大功率中红外超连续谱的理想方法之一。

常用的七芯光纤的制备方法有堆叠法和坩埚法^[16-18]。Samir 等^[17]采用堆叠的方法,先用化学气相沉积法制备一个石英空管,再将高折射的七个纤芯材料插入其中,最后通过高温加热制备出直径为 125 μm 的石英七芯光纤。Doros 等^[18]用双坩埚法将熔融的纤芯玻璃和包层玻璃分别倒入两个同心的坩埚,其中内坩埚有多个喷嘴,喷嘴数量等于纤芯数量,纤芯玻璃通过内坩埚喷嘴流出后与外坩埚中的包层玻璃形成多芯光纤。然而对于硫系玻璃多芯光

纤来说,堆叠法难以控制每个纤芯玻璃的均匀性,且空管插入过程需要精确地操控,而双坩埚法需要很高的工作温度,这使得硫系玻璃极易发生氧化析晶。迄今为止,上述两种方法均未能实现硫系玻璃光纤的多芯化。挤压法是将玻璃加热至软化温度附近时,对高黏度的玻璃施加压力,使其通过设计的模具后成型。该方法可以获得结构比例均匀且芯包界面紧凑、无间隙的预制棒^[19],并且在整个挤压过程通入干燥的高纯度稀有气体,在较低的温度下进行压力控制,就可以极大地降低硫系玻璃析晶和氧化的风险。

本文报道了一种新颖的太阳花型七芯硫系玻璃光纤的制备方法。为了实现大数值孔径设计,选择折射率差较大的 As_2Se_3 和 As_2S_3 分别作为纤芯玻璃和包层玻璃,基于低温挤压技术,制备了结构较为完美的 As-Se 七芯预制棒,并拉制成了光纤,最终实现了大数值孔径低损耗多芯硫系玻璃光纤制备,采用飞秒激光器和光参量放大器(OPA)泵浦方案获得了超宽中红外超连续谱(SC)输出。

2 实验

2.1 玻璃的制备

采用传统的熔融-淬冷法,制备了纤芯玻璃 As_2Se_3 和包层玻璃 As_2S_3 ,这两种玻璃的折射率差值较大且具有较为接近的玻璃转变温度(T_g)和软化温度(T_p)。将封装用的石英管预先在浓盐酸(HCl)和浓硝酸(HNO_3)按体积比为 3:1 组成的混合物中浸泡 10 h 后,用去离子水多次清洗并烘干。选用纯度为 99.999% 的 As、Se、S 原料,按化学计量比进行配备称量后将 As、Se 等原料放入石英管中并加入还原剂-镁条,之后用机械泵配合分子泵进行抽真空操作,同时对石英管加热,以去除残留在石英管内的水杂质。当真空度低于 10^{-3} Pa 时,用乙炔-氧气焰对石英管进行封断;将封断后的石英管放入管式炉中进行蒸馏纯化处理。蒸馏完毕后放入摇摆炉中以 750 $^\circ\text{C}$ 熔融 12 h,取出装有硫系玻璃的石英管,淬冷后进行退火处理,待降至室温后将石英管敲碎并取出硫系玻璃锭。对取出的玻璃进行切割并加以抛光处理,最后获得了直径为 26 mm、高度为 15 mm 的 As_2Se_3 纤芯玻璃以及直径为 46 mm、高

度为 15 mm 的 As_2S_3 包层玻璃。

2.2 预制棒的挤压制备

待玻璃样品和模具清洗烘干之后,将玻璃放在特殊设计的模具中,其中直径为 26 mm 的纤芯玻璃放在直径为 46 mm 包层玻璃的上方,如图 1(a)所示。将装有玻璃样品的模具放入挤压机的炉膛内加热,待玻璃软化后进行挤压操作,整个挤压过程都通入高纯的氩气以防止玻璃表面氧化。首先,将装有

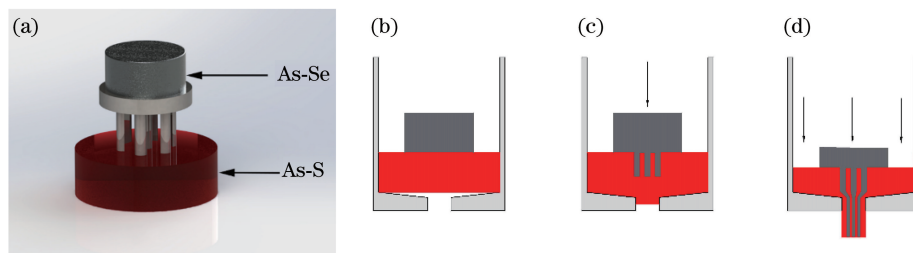


图 1 挤压流程示意图。(a)挤压模具原理;(b)金属模块挤入后状态;(c)纤芯玻璃挤入包层玻璃;(d)预制棒挤出

Fig. 1 Diagrams of extrusion process. (a) Principle of extrusion die; (b) state after the metal module is squeezed in; (c) extrusion process of core glass into cladding glass; (d) preform extruded out

2.3 光纤拉制

由于硫系玻璃较脆,为了加强光纤的柔韧度,需对硫系光纤进行涂覆保护。此处采用聚丙烯(PP)和聚醚砜树脂(PES)作为光纤的外保护层。为了降低玻璃析晶的风险,采用较低的拉丝温度。同时,在整个拉丝过程中通入氩气以防止预制棒氧化。通过精确控制拉丝温度、拉丝速率和预制棒进料速度这三个拉丝参数,成功实现了 As_2Se_3 多芯光纤的制备,光纤的外径为 410 μm 。

3 玻璃及光纤的光学性能测试

在常温环境下进行光学性能测试。采用 Nicolet 380 型傅里叶红外光谱仪(FTIR)测试了玻璃样品的红外透过光谱,测试范围为 2.5~25 μm 。用红外椭偏仪(IR-VASE Mark2)测量了芯玻璃和包层玻璃的折射率。采用标准的截断法测试了光纤的传输损耗,所用仪器为美国 Thermo Fisher Scientific 公司的傅里叶红外光谱仪(Nicolet; 5700),测量范围为 2.5~15 μm 。超连续谱装置用红外参量放大器(OPA)进行测试(美国相干公司,~150 fs, 重复频率为 1 kHz)。

3.1 玻璃的红外透过性能和热膨胀系数

图 2(a)给出 As_2Se_3 和 As_2S_3 玻璃样品的红外透过光谱,样品的厚度均为 2 mm。从图中可见: As_2Se_3 具有较好的红外透过性能,透过率最高可达 66%,长波截止波长大于 16 μm ; As_2S_3 玻璃的透

As_2Se_3 玻璃的金属模块(As_2Se_3 玻璃与 As_2S_3 玻璃之间的金属模具)挤入 As_2S_3 包层玻璃,当金属模块挤入包层玻璃后,此时状态如图 1(b)所示。再将纤芯玻璃 As_2Se_3 挤入至挤压腔内的七个模具管子中,该过程如图 1(c)所示,最后将七个模具中的纤芯玻璃 As_2Se_3 和包层玻璃 As_2S_3 一同挤出,即形成七个纤芯结构的光纤预制棒。将预制棒放入退火炉中经 20 h 降至室温,以除去预制棒内部的应力。

过曲线(实线)中存在较为明显的杂质吸收峰,主要位于 2.9 μm 和 6.3 μm 处,分别对应—OH 键和 H—O—H 杂质吸收峰,4.5 μm 处可见轻微的 Se—H 杂质吸收峰,14 μm 以外透过率下降,这主要是由于 Se—Se 的本征振动吸收所致;而包层玻璃 As_2S_3 (虚线)的红外透过率最高可达 62%,在 8 μm 以外由于 S—S 声子振动吸收导致透过率开始下降,其中在 4.1 μm 处存在明显的 S—H 杂质吸收峰。此外,这两种玻璃样品的红外透过曲线谱均未发现明显的氧化物杂质吸收峰,这表明通过蒸馏提纯处理,还原剂镁条可有效地去除玻璃中的氧化物杂质,但未能完全消除杂质水;高温蒸馏过程中镁条和原料里的水分子发生反应,产生的 H^+ 以—H 形式残留在玻璃熔体中,加剧了 Se—H 和 S—H 杂质吸收。

图 2(b)为 As_2Se_3 玻璃和 As_2S_3 玻璃样品的热膨胀曲线,图中纵坐标表示相对于样品长度的长度变化, T_g 为玻璃的转变温度, T_p 为玻璃的软化温度,其中 As_2Se_3 的 T_g 约为 186.6 $^\circ\text{C}$, T_p 约为 209.2 $^\circ\text{C}$,而 As_2S_3 的 T_g 约为 206.7 $^\circ\text{C}$, T_p 约为 221.5 $^\circ\text{C}$ 。包层玻璃和纤芯玻璃的软化温度较为接近,可以与低温挤压温度相匹配,从而极大地降低了硫系玻璃在挤压过程中的析晶风险。特别是对于这种多芯结构预制棒而言,芯玻璃 As_2Se_3 的软化温度相对于包层玻璃 As_2S_3 略低,故芯玻璃能够顺利挤入七芯模具管中,最终通过同步挤压进入包层玻璃,形成芯包界面清晰的七芯结构预制棒。

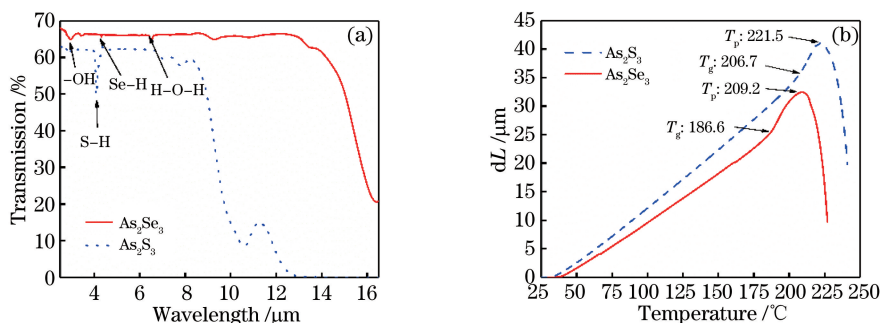


图 2 玻璃样品红外透过光谱及热膨胀曲线。(a) As_2Se_3 / As_2S_3 玻璃红外透过光谱; (b) As_2Se_3 / As_2S_3 玻璃热膨胀曲线
Fig. 2 Infrared transmission spectra and thermal expansion curves of glass samples. (a) Infrared transmission spectra of As_2Se_3 and As_2S_3 ; (b) thermal expansion curves of As_2Se_3 and As_2S_3

3.2 As-Se 七芯光纤的性能测试

玻璃的折射率曲线和光纤的 NA 分布如图 3(a) 所示。由于纤芯和包层两者之间的折射率差较大, 该光纤的 NA 较大。较大的折射率差能够提高光纤对光线的束缚能力, 而较大的 NA 更有利于光纤输入端的耦合。NA 的表达式为

$$NA = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}, \quad (1)$$

其中, n_{core} 为纤芯折射率, n_{clad} 为包层折射率, 计算可得该光纤的 NA 在 1.20~1.45 范围内。由于该光纤具有大 NA 和较大的纤芯, 故对光的约束能力较强, 同时光纤是多模的且易于与泵浦激光器和光

纤耦合。光纤的色散以及基模有效折射率如图 3(b) 所示, 其中基模色散可通过商用软件 (RSOFT) 计算获得, 从图中可以看出光纤的材料色散和基模色散平坦度较好, 其中材料色散的零色散波长为 $6.9 \mu m$, 基模色散的零色散波长为 $6 \mu m$ 。基于多模广义非线性薛定谔方程的数值模拟表明, 当泵浦脉冲足够短 ($\leq 10 ps$) 时, 因为存在暂时的偏移, 高阶模式不重要, 故在色散数值模拟中只考虑了基模的色散^[20-21]。从图中可以看出模拟的基模有效折射率 (n_{eff}) 随着波长的增大而减小, 但减小的幅度较小。

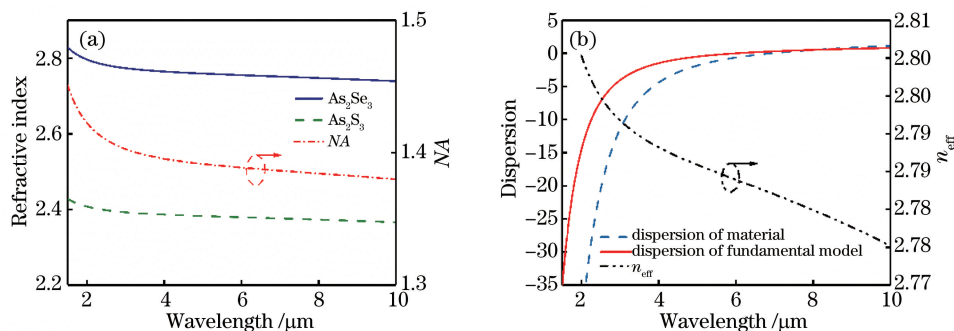


图 3 光纤的折射率、数值孔径、模拟色散曲线以及基模有效折射率。(a) As_2Se_3 和 As_2S_3 折射率和数值孔径; (b) 光纤模拟色散曲线图和基模有效折射率

Fig. 3 Refractive index, NA, simulated dispersion curves and fundamental mode effective refractive index of fiber. (a) Refractive index of As_2Se_3 and As_2S_3 , and calculated NA; (b) simulated dispersion curve of fiber and fundamental mode effective refractive index

图 4 展示了光纤端面及光纤传输损耗测试结果。测试时选用长度为 1 m 的光纤, 采用截断法测试了光纤的传输损耗, 采用光学显微镜 (Xenics, XEN-000298, 500X 放大倍率) 观察截断后的光纤端面来判断端面是否光滑平整, 如图 4(a) 所示, 从图中可见, 光纤中心的纤芯尺寸较大, 其直径约为 $145 \mu m$, 直径约 $60 \mu m$ 的 6 个纤芯则均匀分布在纤

芯周围, 构成了紧凑的太阳花形状, 光纤的外径约 $410 \mu m$, 整个端面结构比较均匀, 无明显缺陷。考虑到模具在设计时中央挤压管为大圆柱而其余 6 个为小圆柱, 因此在挤压过程中中心圆柱管进料较多, 使得中间的芯径明显大于周围的 6 个小芯。这样的结构设计可拉近中央纤芯与四周纤芯间的距离, 从而实现光纤入射端更好的耦合, 通过仔细观察光纤

端面,可见整个光纤芯包界面没有任何气泡和颗粒等杂质缺陷。对光纤多次截断并取平均值得到如图 4(b)所示的光纤损耗图,从图中可见,光纤的红外波长工作范围在 $3.2\sim 8.4\ \mu\text{m}$,基底损耗约(除去杂质吸收峰后的光纤背景损耗) $3.47\ \text{dB/m}$,在 $2.9\ \mu\text{m}$ 和 $6.3\ \mu\text{m}$ 波长附近存在明显的水杂质吸收峰, $4.3\ \mu\text{m}$ 位置有较轻微的 Se-H 杂质吸收峰, $8.5\ \mu\text{m}$ 以外波长区间的传输损耗急剧上升,其源于包层玻璃的吸收[$8.5\ \mu\text{m}$ 之后透过率快速下降,如图 2(a)中的玻璃透过曲线所示],结果造成了该光纤的工作区间止步于 $9\ \mu\text{m}$,远低于普通 AsSe 光纤的限

制($12\ \mu\text{m}$)^[22]。由于玻璃制备过程中的纯化工艺程度不够充分,所制备的玻璃依然残留了较多的一OH 和 H_2O 等杂质,使得光纤的传输损耗略微偏高。其中 $3.5\sim 5\ \mu\text{m}$ 之间的基底损耗为 $2.6\ \text{dB/m}$ 。光纤输出端的光斑如图 4(b)中内插图所示,由近红外相机记录。从光斑图中清晰可见,每个纤芯都能传输光信号,且周围 6 颗芯的亮度几乎相当,未见任何包层光模式。此光斑图再次证明了光纤的各个芯包界面光滑,光信号被很好地束缚在纤芯内。这得益于光纤拥有较大的芯包折射率差分布,且其实际流体变形情况与光纤结构的理论设计基本相符。

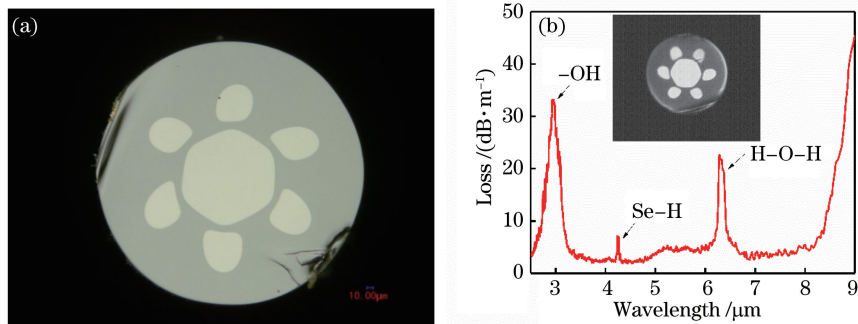


图 4 光纤的端面以及损耗图谱。(a)光纤端面;(b)光纤损耗测试结果(插图:输出端光斑)

Fig. 4 Cross-section image and loss of the fiber. (a) Cross-section of the fiber; (b) measured optical loss of the fiber (inset: output light spot image)

3.3 超连续谱测试

为了测试该光纤的超连续谱输出性能,采用 $14\ \text{cm}$ 长的七芯光纤进行超连续谱泵浦实验,泵浦源为中红外光参量放大器(OPA),脉冲参数为 $150\ \text{fs}$ 、重复频率为 $1\ \text{kHz}$ 的飞秒种子光经 OPA 后输出中红外波长激光,在相同 $12\ \text{mW}$ 抽运功率下,泵浦波长分别为 $5, 6, 7\ \mu\text{m}$ 的种子光通过透镜耦合至七芯光纤中。超连续谱输出结果如图 5 所示;泵浦光为 $5\ \mu\text{m}$ 时,超连续谱在 $-30\ \text{dB}$ 光强下从 $1.5\ \mu\text{m}$ 展宽到 $12\ \mu\text{m}$;而在光纤零色散波长区域附近,即 $6\ \mu\text{m}$ 泵浦光下获得了最宽的超连续谱展宽,

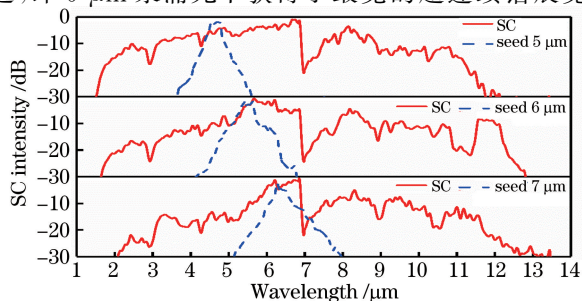


图 5 光纤在不同抽运波长下的超连续谱

Fig. 5 Supercontinuum spectrum of optical fiber at different pumping wavelengths

此时 $-30\ \text{dB}$ 光强下的 SC 光谱的谱宽为 $1.6\sim 12.8\ \mu\text{m}$,可以看出 SC 谱在 $3\ \mu\text{m}$ 附近出现平滑性下降,这是此处有很强的一OH 和 H_2O 吸收峰所致,但是在 $7\ \mu\text{m}$ 处的跳崖式下降,是因为在超连续谱测试过程中, $7\ \mu\text{m}$ 时切换了光栅,导致光谱发生变化。当泵浦光为 $7\ \mu\text{m}$ 时,由于非线性效应加强,光谱展宽到了 $13.4\ \mu\text{m}$,此时超连续谱平坦度有所下降。

4 结 论

基于 As_2Se_3 和 As_2S_3 玻璃,采用挤压法实现了结构较完美的多芯硫系玻璃光纤制备,光纤结构为七芯结构——略大的中间芯外围等间隔紧密密布 6 个直径略小的芯构成太阳花型。结果表明:该光纤的芯包界面光滑,各纤芯具有良好的光场模式束缚能力;尽管光纤中存在较大的一OH 和 H_2O 吸收峰,但该光纤依然具有良好的光学传输性能;最低损耗为 $1.9\ \text{dB/m}$ 于 $4.4\ \mu\text{m}$,在 $3.2\sim 8.4\ \mu\text{m}$ 波长区间的基底损耗为 $3.8\ \text{dB/m}$ 。该七芯光纤在不同的抽运波长处可以得到多种超连续谱输出,其中在 $6\ \mu\text{m}$ 抽运波长、 $12\ \text{mW}$ 抽运功率下获得了谱宽范围为 $1.6\sim 12.8\ \mu\text{m}$ 的超连续谱输出,该光纤有望

用于高功率中红外超连续谱的产生。总的来说,本实验证明挤压法可以很好地实现多芯结构硫系玻璃光纤的制备,多芯光纤技术将在中远红外光学领域提供更大的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Schliesser A, Picqué N, Hänsch T W, et al. Mid-infrared frequency combs [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 440-449.
- [2] Allen M G. Diode laser absorption sensors for gas-dynamic and combustion flows [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9(4): 545-562.
- [3] Tandy J, Feng C, Boatwright A, et al. Communication: infrared spectroscopy of salt-water complexes [J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2016, 144(12): 121103.
- [4] Casey C M. Far-infrared spectral energy distribution fitting for galaxies near and far [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, 425(4): 3094-3103.
- [5] Petersen C R, Prtljaga N, Farries M, et al. Mid-infrared multispectral tissue imaging using a chalcogenide fiber supercontinuum source [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 999-1002.
- [6] Zhu Q D, Wang X S, Zhang P Q, et al. Fabrication and optical properties of chalcogenide As_2S_3 suspended-core fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1206004.
祝清德, 王训四, 张培晴, 等. 硫系 As_2S_3 悬吊芯光纤制备及其光谱性能研究 [J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1206004.
- [7] Petersen C R, Møller U, Kubat I, et al. Mid-infrared supercontinuum covering the 1.4–13.3 μm molecular fingerprint region using ultra-high NA chalcogenide step-index fibre [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(11): 830-834.
- [8] Ta'eed V G, Fu L B, Pelusi M, et al. Error free all optical wavelength conversion in highly nonlinear As-Se chalcogenide glass fiber [J]. *Optics Express*, 2006, 14(22): 10371-10376.
- [9] Lenz G, Zimmermann J, Katsufuji T, et al. Large Kerr effect in bulk Se-based chalcogenide glasses [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(4): 254-256.
- [10] Cheng T L, Duan Z C, Gao W Q, et al. A novel seven-core multicore tellurite fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(11): 1793-1796.
- [11] Zhou P, Wang X L, Ma Y X, et al. Beam quality and power scalability of various multicore fiber lasers [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(8): 084205.
- [12] Vyas A K. Analysis of different structure and nonlinear distortion of multicore fiber for power over fiber applications [J]. *Optik*, 2018, 168: 184-191.
- [13] Yuan L B. Multi-core fiber characteristics and its sensing applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170612.
苑立波. 多芯光纤特性及其传感应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170612.
- [14] Liu Y H, Li J Y. Mode properties and progress of multi-core fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 050005.
刘业辉, 李进延. 多芯光纤激光器选模特性及其研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 050005.
- [15] Huo Y, Cheo P K. Thermomechanical properties of high-power and high-energy Yb-doped silica fiber lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(3): 759-761.
- [16] Lu Y Q, Lu Y, Feng G F, et al. Fabrication and transmission characteristics of seven-core fiber [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2017, 28(3): 269-274.
陆云清, 陆懿, 冯高峰, 等. 七芯光纤的制备和传输特性的研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2017, 28(3): 269-274.
- [17] Samir A, Perpar L, Batagelj B, et al. Fabrication of a single-mode seven-core optical fiber using the stack-and-draw procedure [C] // 2016 International Workshop on Fiber Optics in Access Network (FOAN), October 18-19, 2016, Lisbon, Portugal. New York: IEEE Press, 2016: 1-4.
- [18] Dorosz J, Romaniuk R S. Current developments of multicrucible technology of tailored optical fibers [J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3731: 32-58.
- [19] Liu S, Tang J Z, Liu Z J, et al. Fabrication and properties of low-loss chalcogenide optical fiber based on the extrusion method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1006002.
刘硕, 唐俊州, 刘自军, 等. 低损耗硫系玻璃光纤的挤压制备及其性能研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1006002.
- [20] Kubat I, Bang O. Multimode supercontinuum generation in chalcogenide glass fibres [J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 2513-2526.
- [21] Jiao K, Yao J M, Wang X G, et al. 1.2–15.2 μm supercontinuum generation in a low-loss chalcogenide fiber pumped at a deep anomalous-dispersion region [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5545-5548.
- [22] Xue Z G, Li Q L, Chen P, et al. Mid-infrared supercontinuum in well-structured AsSe fibers based on peeled-extrusion [J]. *Optical Materials*, 2019, 89: 402-407.