

环保砷-硒硫系光纤的挤压制备及其超连续谱产生

钟明辉^{1,2}, 王弦歌^{1,2}, 焦凯^{1,2}, 司念^{1,2}, 梁晓林^{1,2}, 徐铁松^{1,2}, 肖晶^{1,2}, 刘佳^{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 为了制备无砷红外硫系光纤, 采用熔融-淬冷法和蒸馏提纯工艺熔制了高纯度的 $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{79}\text{Te}_1$ 和 $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{80}$ 两种玻璃, 基于优化的掏心挤压法制备出具有理想芯包结构的 Ge-Se 光纤预制棒。拉丝后的 Ge-Se 光纤在 $7.5\sim 8.7\ \mu\text{m}$ 波段的平均损耗为 $4.8\ \text{dB/m}$, 其中在 $7.7\ \mu\text{m}$ 处达到 $3.2\ \text{dB/m}$ 的最低损耗。利用中红外光参量放大器作为抽运源, 抽运 $17\ \text{cm}$ 长的 Ge-Se 光纤探究谱宽和抽运波长、抽运功率的关系, 获得了光谱宽度为 $1.5\sim 11.2\ \mu\text{m}$ 的平坦超连续谱。

关键词 光纤光学; 硫系玻璃; 红外光纤; 绿色环保; 光纤损耗; 超连续谱

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170618

Eco-Friendly Ge-Se Chalcogenide Fiber Extrusion Preparation and Supercontinuum Generation

Zhong Minghui^{1,2}, Wang Xiange^{1,2}, Jiao Kai^{1,2}, Si Nian^{1,2}, Liang Xiaolin^{1,2},
Xu Tiesong^{1,2}, Xiao Jing^{1,2}, Liu Jia^{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}

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

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

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

Abstract In order to fabricate an arsenic-free infrared chalcogenide optical fiber, two kinds of high purity glass samples, i. e., $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{79}\text{Te}_1$ and $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{80}$, are prepared by the melt-quenching method and dynamic vacuum distillation purification process. Then a Ge-Se fiber preform with ideal core-clad structure is prepared by an optimized peel-off extrusion method. The drawn Ge-Se fiber has an average loss of $4.8\ \text{dB/m}$ in the range from 7.5 to $8.7\ \mu\text{m}$, and has a minimum loss of $3.2\ \text{dB/m}$ at $7.7\ \mu\text{m}$. A flat supercontinuum in the range of $1.5\sim 11.2\ \mu\text{m}$ is generated by using a 17-cm long fiber which is pumped by an optical parametric amplifier, and the relationship among supercontinuum wide, pumping wavelength, and pumping power is obtained.

Key words fiber optics; chalcogenide glass; infrared fiber; environmental protection; fiber loss; supercontinuum

OCIS codes 060.2390; 060.2280; 060.2400

收稿日期: 2019-04-11; 修回日期: 2019-04-25; 录用日期: 2019-05-06

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: wangxunsi@nbu.edu.cn

1 引言

中、远红外光谱具有重要的科学和应用价值,在该光谱范围内的分子振动呈现振动吸收并留下特殊的光谱指纹^[1-2],基于该指纹区的光谱技术可为快速精准地检测温室气体(如 CO₂, CH₄ 等)提供了新方法。中、红外光谱技术的发展需要开发相应的光纤或波导基质,当前氟化物玻璃、碲酸盐玻璃以及硫系玻璃等均可在相应光谱范围作为非通信领域的光谱传输或激光非线性作用的载体^[3]。硫系玻璃材料具有中、远红外透过性能优良,声子能量低,非线性折射率大以及组分可调整等特性^[1],使其在红外镜头、温度传感、激光功率传输、热成像等方面,具有十分广泛的应用前景^[2-3],并成为中、远红外光谱区域产生宽带超连续谱(SC)的最佳材料^[4-7]。

在硫系玻璃光纤的发展过程中,由于受到玻璃成玻区和光纤制备技术的限制,传统的双坩埚拉丝法只能局限在组分简单且抗析晶性能强的少数几种玻璃,当前所报道的商用硫系玻璃光纤绝大多数集中在传统 As-S 和 As-Se(As: 砷, S: 硫, Se: 硒)玻璃基质材料中^[8-11],此外, Zhang 等^[12-13]也报道了一些基于 Ge-As-Se(Ge: 锗)和 Ge-As-Se-Te(Te: 碲)等组分的新型硫系玻璃光纤,这受益于其中 As 元素对硫系玻璃成玻性能改善的关键贡献。虽然 As 基玻璃可以降低玻璃析晶的风险,但 As 的无机/有机化合物具有致命毒性,对人类及环境具有潜在的危害,所以制备无 As 环保型玻璃材料日渐成为发展趋势^[14]。Katsuyama 等^[15]将 Ge-Se 玻璃作为无 As 材料,制备了 Ge₂₀Se₈₀ 光纤裸丝(无芯包结构),在 5.5 μm 处损耗达到最低(0.2 dB/m)。Parnell 等^[16]制备了 Ge-Sb-Se(Sb: 锑)光纤裸丝(无芯包结构),在 6.04 μm 处损耗达到 0.6 dB/m,截止波长达到 10 μm。许彦涛等^[17]采用真空高速旋转法制备了芯包结构的 Ge-Sb-Se 光纤,其平均损耗为 2.2 dB/m;廖方兴等^[14]采用传统挤压法制备了芯包结构的 Ge-Te-Se 阶跃光纤,在 4.25 μm 处达到最低损耗(6.8 dB/m),截止波长达到 10 μm。由于光纤制备工艺水平与国外存在一定差距,国内具有芯包结构的无 As 红外光纤损耗较大。

在 Ge-Se 玻璃基质中引入 Te 或 Sb 会增大 Ge-Se 玻璃析晶的风险,本文在不易析晶的二元玻璃材料 Ge₂₀Se₈₀ 的基础上,优化掏心挤压法,制备了 Ge-Se 光纤预制棒,将其拉制成具有理想芯包结构的 Ge-Se 基阶跃光纤,研究 Ge-Se 光纤的光学性能,并

利用飞秒激光器对 Ge-Se 光纤的非线性性能进行抽运实验,最终在不同的抽运波长和抽运功率下产生超连续谱输出。

2 Ge-Se 光纤的制备

2.1 高纯度的玻璃制备

选用 Ge₂₀Se₈₀ 作为包层玻璃组分,并借助组分微调技术,将物质的量比为 1% 的 Se 替换成 Te 元素,从而实现高折射率的纤芯玻璃组分优化,即选用 Ge₂₀Se₇₉Te₁ 为纤芯玻璃组分,使用传统的熔融-淬冷法^[18]制备高纯玻璃。将用于封装原料的石英管和蒸馏管在王水[浓盐酸(HCl)和浓硝酸(HNO₃)按体积比为 3:1 组成的混合物]中浸泡 9 h,去除石英管上的悬浮物和金属等杂质,再用去离子水洗净,放入温度为 150 °C 的烘干箱内,真空干燥去除管壁的水珠。纯度为 99.999% 的 Ge、Se、Te 原料按分子式 Ge₂₀Se₇₉Te₁ 进行化学配比,并将精确称量后的原料与镁(Mg)放入蒸馏管内抽真空,同时在 120 °C 温度下加热蒸馏管,其中 Mg 用于去除原料中的水和羟基等杂质,减少氢(H)峰对玻璃的影响。在管内真空压强低于 10⁻³ Pa 时,利用氢氧焰高温封断后放入蒸馏箱中进行蒸馏提纯。提纯后的石英玻璃管放入摇摆炉中高温(750 °C)熔制 18 h 以上,以保证高纯原料完全融合,之后降温至 600 °C。将装有熔融玻璃液的提纯管采用冷风快速淬冷处理,待玻璃熔体脱离石英管壁后,将其迅速放入纳博热真空退火炉中在 165 °C 温度下保温,静置 3 h 去除玻璃中的应力后,最终从石英管中取出纤芯玻璃锭。包层玻璃锭 Ge₂₀Se₈₀ 的制备过程与纤芯玻璃制备过程类似。

2.2 优化的掏心挤压法制备光纤预制棒

取出制备完成的 Ge₂₀Se₇₉Te₁ 和 Ge₂₀Se₈₀ 玻璃锭,用氧化铝(Al₂O₃)抛光粉对玻璃锭外表面进行抛光处理,以减少预制棒芯包界面的缺陷,然后通过优化的掏心挤压法^[19]制备光纤预制棒。Ge-Se 光纤预制棒的过程如下:首先将装有 Ge₂₀Se₇₉Te₁ 玻璃的模具挤压到包层 Ge₂₀Se₈₀ 玻璃中,然后在高压和高温的作用下,将包层玻璃与去除 2 mm 厚外表面的纤芯玻璃共同挤压出来,最后取出预制棒进行退火。在实验中,将装有纤芯玻璃和包层玻璃的模具放入挤压机的加热炉膛中,同时往加热炉膛中通入氮气(N₂)或氩气(Ar),防止硫系玻璃在挤压过程发生氧化。炉膛内的温度升至 310 °C 后保温 3 h,待温度传导至玻璃内部使玻璃到达软化温度后,将挤压下降速度设定为 0.07 mm/min,通过调节温度和下降速度来

控制压力的大小,使压力在 90~11 kN 之间保持动态平衡。对挤压出的预制棒在 165 °C 的温度下进行预退火,待玻璃被完全挤压出来后,快速取出预制棒,将其放入纳博热真空退火炉中,设定退火温度为 165 °C 后保温 3 h,从而得到 Ge-Se 光纤预制棒成品。

2.3 预制棒拉丝成光纤

为了防止 Ge-Se 光纤在拉丝过程中断裂,制备出更易保存的光纤,本研究选用聚丙烯(PP)和聚醚砜树脂(PES)作为光纤的涂覆保护层,将其均匀地包裹在预制棒周围。在 Ar 或 N₂ 氛围下,将 Ge-Se 预制棒垂直固定在自制的特种光纤拉丝机中进行加热(280 °C)。在前期引丝阶段中,在恒定拉力和拉丝速度(0.2 mm/min)的作用下实现预制棒的引丝和预牵引,牵引成功后,通过微调温度、拉丝速度和预制棒送料速度等参数,将预制棒稳定(0.15 mm/min)拉制成外径为 500 μm、长度为 20 m 的光纤。

3 光学性能测试及分析

3.1 玻璃红外透过光谱测试

对纤芯 Ge₂₀Se₇₉Te₁ 和包层 Ge₂₀Se₈₀ 玻璃样品进行双面抛光处理后,再进行性能测试。玻璃样品在 400~2500 nm 的近红外波段光谱由 Perkin-Elmer Lambda 950 分光光度计测定;红外透过光谱则用傅里叶红外光谱仪(Nicaklet 380)进行测定。对 2 mm 厚的玻璃样品抛光后进行测定,得到的红外透过光谱如图 1 所示。

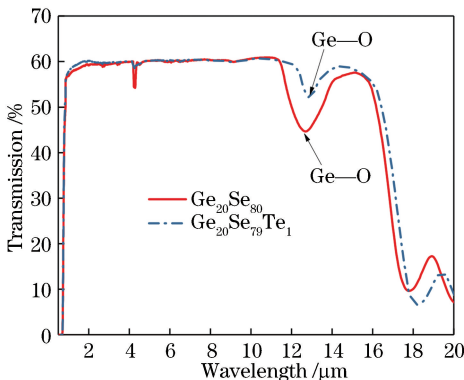
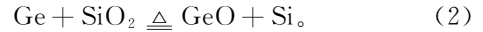
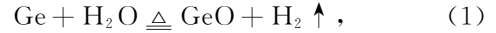


图 1 纤芯 Ge₂₀Se₇₉Te₁ 和包层 Ge₂₀Se₈₀ 玻璃的红外透过光谱
Fig. 1 Infrared transmission spectra of Ge₂₀Se₇₉Te₁ and Ge₂₀Se₈₀

从图 1 中可以看出,Ge₂₀Se₇₉Te₁ 和 Ge₂₀Se₈₀ 玻璃具有优良的红外透过性能,Ge₂₀Se₇₉Te₁ 玻璃的远红外透过波长可达 17.5 μm,在 11 μm 处透过率达到最大值(58%);而 Ge₂₀Se₈₀ 玻璃的远红外透过波

长可达 18 μm,在 11 μm 处透过率达到最大值(58%)。纤芯和包层玻璃的红外光谱上均存在 3 处较为明显的杂质吸收峰/带:1)4.3 μm 附近 CO₂ 的吸收峰;2)4.5 μm 附近 Se—H 键振动的吸收峰;3)13.0 μm 附近 Ge—O(O: 氧)的吸收带^[20]。在 13.0 μm 附近,Ge—O 键振动引起的吸收峰增大,这是因为蒸馏提纯的温度达到 800 °C 时,Ge 在高温蒸馏的过程中与 H₂O 和 SiO₂ 反应生成氧化锗(GeO),反应式为



蒸馏中利用了金属 Mg 的强还原性去除 O 和 H,为降低光纤损耗提供了基础,但金属 Mg 会与原料中的水分子反应,产生 H⁺ 或—H 键,从而出现 Se—H 键振动的吸收峰^[21]。由于玻璃样品中 Se—Se 的多声子作用,透过率在 15 μm 之后快速下降。

3.2 光纤结构性能测试

光纤的结构参数如图 2(a)所示。由红外椭偏仪(IR-VASE Mark2)测得纤芯 Ge₂₀Se₇₉Te₁ 玻璃的折射率大于包层 Ge₂₀Se₈₀ 玻璃,满足全反射条件。两种玻璃的折射率相近,2~12 μm 波段的折射率分布在 2.36~2.42 之间,根据数值孔径(NA)计算公式为

$$NA = \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2}, \quad (3)$$

式中: n_{core} 为纤芯折射率; n_{clad} 为包层折射率。由(3)式计算得出 NA 的值处于 0.09~0.18 之间,如图 2(a)虚线所示。光纤的归一化频率 $V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA$ (a 为纤芯半径, λ 为波长),当 $a = 20 \mu\text{m}$, $\lambda = 5.4 \mu\text{m}$ 时,此时 $V < 2.405$,支持单模传输,其归一化频率曲线如图 2(b)所示。

Ge-Se 光纤的基模色散和材料色散如图 3 所示,可以看出材料色散和基模色散均比较平坦,零色散波长位于长波段(在图 3 中未能显示),且 Ge-Se 光纤为全正色散。

采用截断法测量光纤损耗,其中包含了光纤所能支持的全部模式[具体见图 2(b)],配合傅里叶红外光谱仪(Nicolet:5700)可同时测试多个波长的损耗(傅里叶红外光谱仪输出波长范围为 2.5~25 μm)。由于采用宽谱光源,该傅里叶红外光谱仪测试的损耗具有谱宽优势。但相对于单激光波长而言,耦合到光纤纤芯中的光强较弱,导致测得损耗误差略大于单激光波长。截取长度为 1.5 m 的光纤进行损耗测量,切除 50 cm 后再进行光强度测量,并在

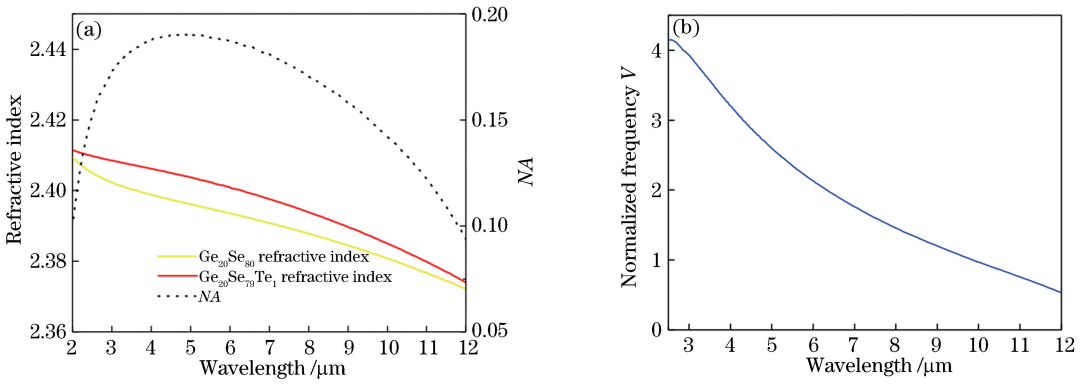


图 2 光纤的折射率、数值孔径及归一化频率分布图。(a) Ge₂₀Se₇₉Te₁ 和 Ge₂₀Se₈₀ 折射率及数值孔径；(b) 归一化频率
Fig. 2 Refractive index, NA, and normalized frequency distribution of fiber. (a) Refractive indexes of Ge₂₀Se₇₉Te₁ and Ge₂₀Se₈₀, and calculated NA; (b) normalized frequency

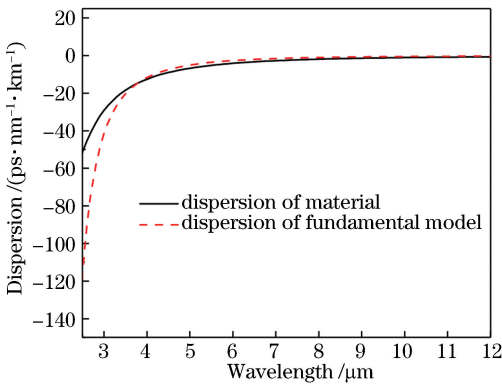
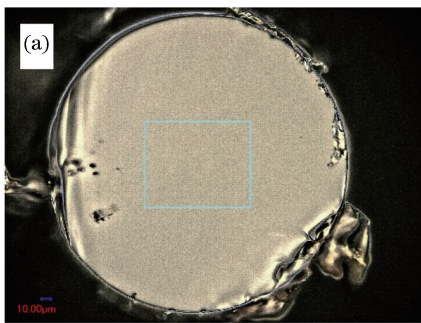


图 3 Ge-Se 光纤模拟色散曲线图
Fig. 3 Simulated dispersion curves of Ge-Se fiber

光学显微镜 (keyence: vhx-1000) 下观察切割光纤的端面, 结果如图 4(a) 所示。在端面平整度基本一



致的情况下尽量减少手动切割光纤端面不一致性的影响。光纤损耗 (L_{Loss}) 为

$$L_{Loss} = \frac{10}{L} \lg\left(\frac{P_i}{P_o}\right), \quad (4)$$

式中: L 为被切除光纤的长度; P_i 为光纤输入功率; P_o 为光纤输出功率。取多次截断测量结果的平均值, 得到阶跃 Ge-Se 光纤的损耗谱如图 4(b) 所示。对照纤芯 Ge₂₀Se₇₉Te₁ 和包层 Ge₂₀Se₈₀ 玻璃红外透过光谱 (图 1), 光纤在 4.5 μm 附近有 Se—H 吸收峰, 在 10.5 μm 附近受到 Ge—O 吸收峰的影响。在短波范围, 受限于 Se 原子的本征声子振动引起的多声子吸收和 Ge—O 吸收峰, L_{Loss} 有所增加, 其波长可达 10.5 μm 。虽然 Ge-Se 光纤在 3.0~10.0 μm 波长范围的平均损耗达 8.9 dB/m, 但在 7.5~8.7 μm 波

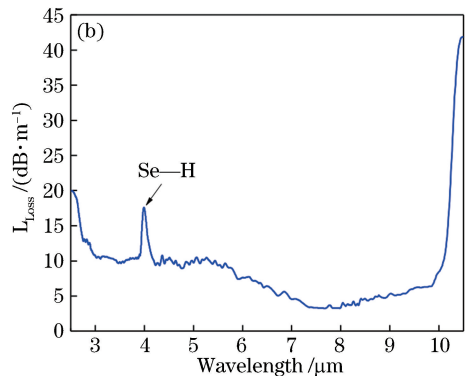


图 4 光纤的端面及损耗图谱。(a) Ge-Se 结构光纤端面; (b) Ge-Se 光纤损耗图谱
Fig. 4 Cross-sectional image and loss of fiber. (a) Cross-sectional image of the Ge-Se fiber; (b) measured loss in the Ge-Se fiber

长范围的损耗均小于 5 dB/m, 其中在 7.7 μm 处达到最低损耗 (3.2 dB/m), 已初步具备后续应用的可能性。

4 超连续谱的产生

Ge-Se 光纤在传输红外光时, 会受到自相位调

制 (SPM)、交叉相位调制 (XPM)、四波混频 (FWM) 和受激拉曼散射 (SRS) 等多种非线性效应和群速度色散 (GVD) 的影响, 产生新的光脉冲频率, 并产生超连续谱。利用掺钛蓝宝石锁模激光器 (Coherent Mira 900) 作为激光光源, 通过光参量放大器 (OPA)

对光纤进行抽运实验,脉冲宽度为 150 fs、重复频率为 1 kHz 的中红外脉冲入射到长度为 17 cm 的 Ge-Se 光纤中,出射的红外光经镀金反射抛物镜面后入射到单色仪中。为了消除 O₂、H₂O 和 CO₂ 等气体对接收超连续谱信号的干扰并提高探测器的灵敏度,在此采用液氮制冷的红外阵列式光电探测器(HgCdTe)。

图 5 为长度为 17 cm 的 Ge-Se 光纤在抽运功率为 40 mW,抽运波长分别为 4,5,6,7 μm 情况下输出的超连续谱(其中探测器检测到的超连续谱光子信号强度以相对单位 dB 表示)。脉冲强 SPM 通过自陡峭和三阶色散导致激光脉冲分裂,同时展宽光谱。而在抽运波长 4~7 μm 中,耦合不稳定造成光谱展宽的趋势逐渐减弱,射入纤芯的光逐渐发散,能量逐步转向高阶模部分,从而抑制了超连续光谱的展宽^[22]。由于 4 μm 附近损耗会受到 Se-H 峰的

影响,为了避免这个影响,可选择 4 μm 作为抽运波长。从图 5 中可以看出,在抽运波长 4 μm 处,可获得最宽(1.5~11.2 μm)的超连续光谱。

为了研究抽运功率与超连续谱宽度的关系,抽运长度为 17 cm 的 Ge-Se 光纤,分别在 10,20,30,40 mW 抽运功率下产生超连续谱,如图 6 所示。当抽运功率为 10 mW、光强为 -10 dB 时,光谱宽度为 3~6 μm 。随着抽运功率的增大,非线性效应影响程度加深,光谱向长波范围扩展。当抽运功率为 40 mW、光强为 -10 dB 时,光谱宽度增加至 2.0~8.5 μm ,并获得平坦的超连续谱。

表 1 列出在光强 -10 dB 的平坦度条件下,无 As 的光纤中部分超连续光谱的谱宽数据。相比之下,硫系光纤具有普遍的谱宽优势,尤其是本文的无 As 环保型 Ge-Se 光纤,其在光强 -10 dB 的平坦度条件下,具有最宽的带宽(6.4 μm)。

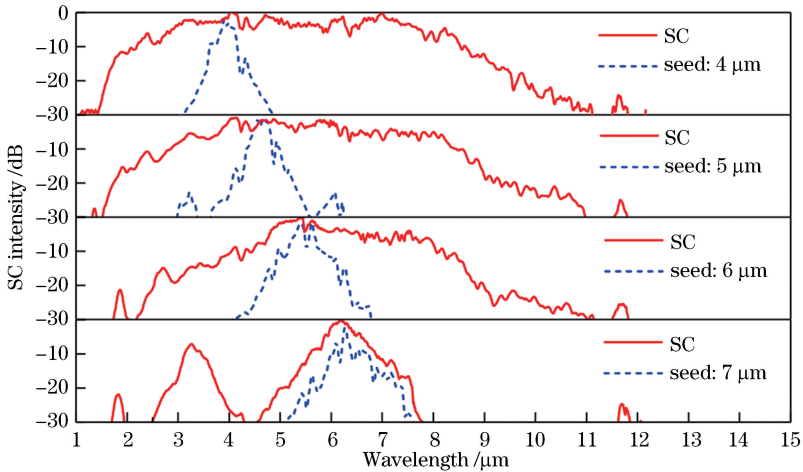


图 5 抽运波长分别为 4,5,6,7 μm 情况下输出的超连续谱

Fig. 5 Supercontinuum spectra with pump wavelengths of 4, 5, 6, and 7 μm

表 1 无 As 光纤的超连续谱对比

Table 1 Comparison of supercontinuum spectra of arsenic-free fiber

Type of arsenic-free fiber	Pump wavelength / μm	Spectral range / μm	Spectral range at -10 dB / μm	Ref. No
GeTe-AgI	7.0	2.0-16.0	5.9-10.2	[23]
Ge-Sb-Se	6.0	1.8-14.0	5.7-9.8	[24]
TeO ₂ BaF ₂ Y ₂ O ₃ /TeO ₂	2.3	0.9-3.9	1.1-3.4	[25]
YAG/SiO ₂ (yttrium aluminum garnet)	1.4	1.2-1.6	1.3-1.6	[26]
Er:ZBLAN+InF ₃	2.8	2.6-5.4	3.5-3.8	[27]
Ge-Se	4.0	1.5-11.5	2.2-8.6	This work

5 结 论

通过优化的掏心挤压法,制备了具有理想芯包

结构的低损耗单模 Ge-Se 光纤,其在 7.5~8.7 μm 波段的平均损耗为 4.8 dB/m,在 7.7 μm 处达到最低损耗(3.2 dB/m),刷新了芯包结构 Ge-Se 光纤损

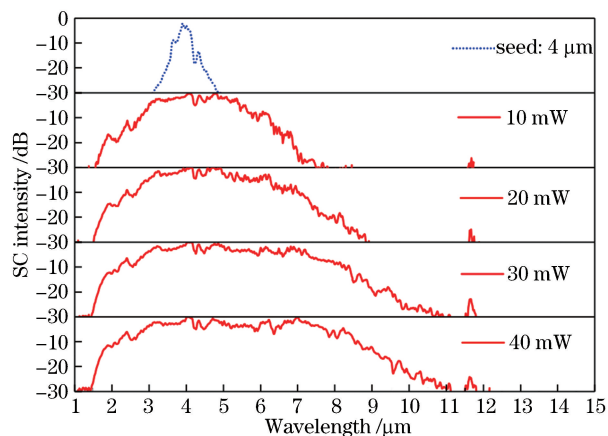


图6 抽运功率为10,20,30,40 mW时输出的超连续谱
Fig. 6 Supercontinuum spectra with pump powers of 10, 20, 30, and 40 mW

耗参数指标。该 Ge-Se 光纤分别在不同的抽运波长、抽运功率下,获得了由三阶非线性效应产生的超连续谱输出,在抽运波长为 $4 \mu\text{m}$ 、抽运功率为 40 mW 的激光作用下获得了 $1.5 \sim 11.2 \mu\text{m}$ 波长范围的超连续谱输出。在光强为 -10 dB 的平坦度条件下,获得了 $2.2 \sim 8.6 \mu\text{m}$ 的谱宽。该 Ge-Se 光纤产生的具有高平坦度、超宽超连续谱输出,可覆盖温室气体分子的指纹区,在高相干性的宽谱光源领域具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Schliesser A, Picqué N, Hänsch T W. 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] Szpulak M, Fevrier S. Chalcogenide As_2S_3 suspended core fiber for mid-IR wavelength conversion based on degenerate four-wave mixing [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(13): 884-886.
- [4] Li Y, Liao M S, Xue T F, *et al.* Research progress of mid-infrared supercontinuum in soft glass fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 080001.
黎宇, 廖梅松, 薛天锋, 等. 软玻璃光纤中红外超连续谱研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 080001.
- [5] Yin K, Zhang B, Cai Z, *et al.* Fiber-optic pumping $2.0\text{-}5.5 \mu\text{m}$ spectral flat mid-infrared supercontinuum source[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1215001.

殷科, 张斌, 蔡振, 等. 光纤抽运 $2.0 \sim 5.5 \mu\text{m}$ 光谱平坦型中红外超连续谱光源[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1215001.

- [6] Gao P F, Li X H, Luo W F, *et al.* Numerical simulation of effect of pump wavelength on mid-infrared supercontinuum [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0703223.
高鹏飞, 李晓辉, 罗文峰, 等. 抽运波长对中红外超连续谱影响的数值模拟[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0703223.
- [7] Xue Z G, Chen P, Tian Y M, *et al.* Fabrication of single-mode As-Se infrared glass fiber and its performance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(7): 0706001.
薛祖钢, 陈朋, 田优梅, 等. 单模 As-Se 红外玻璃光纤的制备及其性能研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(7): 0706001.
- [8] Churbanov M F, Snopatin G E, Shiryayev V S, *et al.* Recent advances in preparation of high-purity glasses based on arsenic chalcogenides for fiber optics [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2011, 357(11/12/13): 2352-2357.
- [9] El-Amraoui M, Fatome J, Jules J C, *et al.* Strong infrared spectral broadening in low-loss As-S chalcogenide suspended core microstructured optical fibers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(5): 4547-4556.
- [10] Th  berge F, Thir   N, Daigle J F, *et al.* Multioctave infrared supercontinuum generation in large-core As_2S_3 fibers [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(22): 6474-6477.
- [11] Cheng T L, Nagasaka K, Tuan T H, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation spanning 2.0 to $15.1 \mu\text{m}$ in a chalcogenide step-index fiber[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 2117-2120.
- [12] Zhang B, Guo W, Yu Y, *et al.* Low loss, high NA chalcogenide glass fibers for broadband mid-infrared supercontinuum generation [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2015, 98(5): 1389-1392.
- [13] Petersen C R, M  ller U, Kubat I, *et al.* Mid-infrared supercontinuum covering the $1.4\text{-}13.3 \mu\text{m}$ molecular fingerprint region using ultra-high NA chalcogenide step-index fibre[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(11): 830-834.
- [14] Liao F X, Wang X S, Nie Q H, *et al.* Preparation and properties of low-loss core-cladding structure Ge-Te-Se fiber based on the extrusion technology [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(10): 1006003.
廖方兴, 王训四, 聂秋华, 等. 基于挤压技术的 Ge-

- Te-Se 低损耗芯-包结构光纤的制备及其性能[J]. 光子学报, 2015, 44(10): 1006003.
- [15] Katsuyama T, Ishida K, Satoh S, *et al.* Low loss Ge-Se chalcogenide glass optical fibers[J]. Applied Physics Letters, 1984, 45(9): 925-927.
- [16] Parnell H, Furniss D, Tang Z Q, *et al.* Compositional dependence of crystallization in Ge-Sb-Se glasses relevant to optical fiber making [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2018, 101(1): 208-219.
- [17] Xu Y T, Guo H T, Lu M, *et al.* Preparation and properties of low-loss core-cladding structural Ge-Sb-Se chalcogenide glass fibers [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(1): 182-187.
许彦涛, 郭海涛, 陆敏, 等. 低损耗芯包结构 Ge-Sb-Se 硫系玻璃光纤的制备与性能研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 182-187.
- [18] Nie Q H, Wang G X, Wang X S, *et al.* Effect of Ga on optical properties of novel Te-based far infrared transmitting chalcogenide glasses [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(11): 7949-7955.
聂秋华, 王国祥, 王训四, 等. Ga 对新型远红外 Te 基硫系玻璃光学性能的影响[J]. 物理学报, 2010, 59(11): 7949-7955.
- [19] Xue Z G, Li Q L, Chen P, *et al.* Mid-infrared supercontinuum in well-structured As-Se fibers based on peeled-extrusion[J]. Optical Materials, 2019, 89: 402-407.
- [20] Sun J, Nie Q H, Wang X S, *et al.* Research on thermal and optical properties of novel Ge-Te-Se-Sn far infrared transmitting chalcogenide glasses [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1116003.
孙杰, 聂秋华, 王训四, 等. 新型远红外 Ge-Te-Se-Sn 硫系玻璃的热学与光学性质研究[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1116003.
- [21] Zhao Z M, Wu B, Liu Y J, *et al.* Investigation on Ge-As-Se-Te chalcogenide glasses for far-infrared fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(12): 124205.
赵浙明, 吴波, 刘雅洁, 等. 低损耗 Ge-As-Se-Te 硫系玻璃远红外光纤的性能分析[J]. 物理学报, 2016, 65(12): 124205.
- [22] Frosz M H. Validation of input-noise model for simulations of supercontinuum generation and rogue waves [J]. Optics Express, 2010, 18(14): 14778-14787.
- [23] Zhao Z M, Wu B, Wang X S, *et al.* Mid-infrared supercontinuum covering 2.0-16 μm in a low-loss telluride single-mode fiber [J]. Laser & Photonics Reviews, 2017, 11(2): 1700005.
- [24] Ou H Y, Dai S X, Zhang P Q, *et al.* Ultrabroad supercontinuum generated from a highly nonlinear Ge-Sb-Se fiber [J]. Optics Letters, 2016, 41(14): 3201-3204.
- [25] Yao C F, Jia Z X, Li Z R, *et al.* High-power mid-infrared supercontinuum laser source using fluorotellurite fiber [J]. Optica, 2018, 5(10): 1264-1270.
- [26] Li X, Li J, Cheng T L, *et al.* Coherent supercontinuum in a silicate glass composite fiber with all-normal dispersion [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10100: 101001I.
- [27] Gauthier J C, Robichaud L R, Fortin V, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation in fluoride fiber amplifiers: current status and future perspectives [J]. Applied Physics B, 2018, 124(6): 122.