

# 激光与光电子学进展

## 脊形芯硫系光纤的制备及其线偏振超连续谱的产生

田康振, 李耀程, 任和, 祁思胜, 孟帅, 张鸣杰, 冯宪, 杨志勇\*

江苏师范大学物理与电子工程学院江苏省先进激光材料与器件重点实验室, 江苏 徐州 221116

**摘要** 以  $\text{Ge}_{12}\text{As}_{24}\text{Se}_{64}$  (Ge-As-Se) 和  $\text{Ge}_{10}\text{As}_{24}\text{S}_{66}$  (Ge-As-S) 玻璃分别作为纤芯和包层材料, 研制一种具有脊形芯的保偏硫系玻璃光纤, 用于产生线偏振中红外超连续谱 (MIR SC)。利用有限元法模拟了脊形芯光纤的群速度色散特性并确定了纤芯的几何尺寸, 采用挤压法结合多级棒管法制备了该光纤。制备的光纤在 2.9~5.5  $\mu\text{m}$  波长的典型损耗约为 4 dB/m, 偏振消光比为 19.4 dB~19.6 dB。采用中心波长为 3.7  $\mu\text{m}$ 、脉冲宽度为 170 fs、重复频率为 100 kHz、平均功率为 40 mW 的激光抽运长度为 12 cm 的光纤, 获得了光谱范围为 2~9.5  $\mu\text{m}$ 、平均功率约为 4 mW 的超连续谱, 偏振消光比约为 19.2 dB。研究表明, 脊形芯 Ge-As-Se/Ge-As-S 硫系玻璃光纤是一种有潜力产生线偏振中红外宽带超连续谱的非线性介质。

**关键词** 光纤光学; 硫系玻璃; 超连续谱; 偏振消光比

中图分类号 TN213; TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2106001

### Fabrication of Chalcogenide Fiber with Ridged Core and Its Linearly Polarized Supercontinuum Spectrum Generation

Tian Kangzhen, Li Yaocheng, Ren He, Qi Sisheng, Meng Shuai, Zhang Mingjie, Feng Xian, Yang Zhiyong\*

*Jiangsu Key Laboratory of Advanced Laser Materials and Devices, School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China*

**Abstract** A polarization-maintaining chalcogenide glass fiber with a ridged core was designed and fabricated using  $\text{Ge}_{12}\text{As}_{24}\text{Se}_{64}$  (Ge-As-Se) glass as the core material and  $\text{Ge}_{10}\text{As}_{24}\text{S}_{66}$  (Ge-As-S) glass as the cladding material for generating linearly polarized mid-infrared supercontinuum (MIR SC). The ridged core fiber's group velocity dispersion was simulated using the finite element method, and the ridged core's geometrical size was determined. A multiple-stage rod-in-tube process paired with an extrusion technique was used to fabricate the fiber. The fabricated fiber exhibits a typical transmission loss of approximately 4 dB/m and a polarization extinction ratio of 19.4 dB~19.6 dB in the 2.9~5.5- $\mu\text{m}$  spectral range. SC ranging from 2 to 9.5  $\mu\text{m}$  with an average power of approximately 4 mW was generated when the fiber with a length of 12 cm was pumped by laser with a central wavelength of 3.7  $\mu\text{m}$ , a pulse width of 170 fs, the repetition rate of 100 kHz, and average power of 40 mW. The SC has a measured polarization extinction ratio of 19.2 dB. These results indicate that the Ge-As-Se/Ge-As-S fiber with a ridged core is a promising nonlinear medium for generating linearly polarized broadband MIR SC.

**Key words** fiber optics; chalcogenide glass; supercontinuum spectrum; polarization extinction ratio

**OCIS codes** 060.2390; 060.2280; 060.2400

收稿日期: 2021-02-23; 修回日期: 2021-03-25; 录用日期: 2021-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(61805109, 61575086)

通信作者: \*yangzhiyong@jsnu.edu.cn

## 1 引言

宽带中红外光源在化学检测、分子光谱学、生物医学成像、光学测量等领域都有着重要的应用,因此具有高亮度、宽光谱覆盖范围和良好空间相干性特点的中红外超连续谱(MIR SC)光源近年来备受研究人员关注<sup>[1-5]</sup>。MIR SC一般通过脉冲激光抽运中红外非线性介质使脉冲频谱展宽获得。由于光波导(包括光纤和平面波导)具有较高的非线性系数、可调控的色散特性和优异的光束控制能力,它们被认为是制作高性能SC光源的理想非线性介质<sup>[1,6-8]</sup>。近年来,许多研究人员以碲酸盐、氟化物和硫系玻璃等中红外光波导为非线性介质尝试产生MIR SC<sup>[9-13]</sup>。例如,Kedenburg等<sup>[9]</sup>在碲酸盐玻璃光纤中获得了光谱范围为1.3~5.3  $\mu\text{m}$ 的MIR SC;Qin等<sup>[10]</sup>在氟化物玻璃光纤中产生了覆盖0.35~6.28  $\mu\text{m}$ 的MIR SC。由于玻璃红外截止波长的限制,在碲酸盐玻璃光纤和氟化物玻璃光纤中,SC难以分别扩展到 $>6 \mu\text{m}$ 和 $>7 \mu\text{m}$ 的长波中红外区域。相比之下,硫系玻璃光波导的红外截止波长可达16  $\mu\text{m}$ ,并且硫系玻璃具有极高的三阶非线性系数<sup>[2,14-16]</sup>,这使得它们成为产生超宽带MIR SC的优选介质。最近,多种硫系玻璃光波导(包括阶跃折射率光纤<sup>[17]</sup>、微结构光纤<sup>[18]</sup>、锥形光纤<sup>[19]</sup>、平面波导<sup>[7]</sup>等)已被用于产生高亮度超宽带MIR SC。目前为止,Zhao等<sup>[17]</sup>采用7  $\mu\text{m}$ 飞秒脉冲(脉冲宽度为159 fs,重复频率为1 kHz)抽运Ge-Te-AgI阶跃折射率光纤,产生了具有最大光谱范围(2.0~16  $\mu\text{m}$ )的MIR SC,但输出功率小于1 mW;Robichaud等<sup>[5]</sup>采用3.6  $\mu\text{m}$ 飞秒脉冲抽运端面镀有 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 增透膜的As-Se光纤,获得了具有最大平均功率(825 mW)的MIR SC输出,对应的光谱范围为2.5~5.0  $\mu\text{m}$ 。这些工作对基于硫系玻璃光纤的高亮度MIR SC光源进入实际应用阶段具有重要指导意义。

在实际应用中(如高光谱成像、大气污染检测等),通常要求SC光源具有优异的偏振特性<sup>[7,20]</sup>。Yu等<sup>[7]</sup>设计和制备了一种保偏脊形Ge-As-Se/Ge-

As-S硫系玻璃平面光波导,采用4.2  $\mu\text{m}$ 的脉冲(330 fs, 21 MHz)抽运该光波导,获得了功率约为20 mW的线偏振SC,其偏振消光比达到20.6 dB,并演示了该线偏振SC在分子光谱测量中的优异性能。然而,高光学质量多层微米级厚度的硫系薄膜制备困难,薄膜上刻写波导工艺复杂,且平面光波导的长度受到晶片尺寸的限制。相对而言,光纤较容易制备,且其长度不受限制。本研究尝试在光纤中实现与上述保偏脊形平面光波导类似的结构和性能。首先利用有限元法模拟了脊形芯Ge-As-Se/Ge-As-S硫系玻璃光纤的色散特性,优化了光纤几何尺寸;然后采用玻璃挤压技术和多级棒管法制备了脊形芯光纤;最后测试和评估该光纤产生线偏振MIR SC的潜力。

## 2 实验

### 2.1 样品制备

采用真空熔融-急冷法制备Ge-As-Se和Ge-As-S玻璃,原料Ge的纯度为5N(99.999%),Se和S的纯度为6N(99.9999%),As的纯度为7N(99.99999%)。原材料的预纯化和玻璃的制备均按照之前报道的步骤进行<sup>[20-21]</sup>。采用挤压技术和棒管法制备脊形芯光纤。首先,使用自搭建的气氛保护软玻璃挤压机分别制备脊形芯玻璃和带脊形孔的圆柱形包层玻璃。用金刚石线切割机将制备好的直径为10 mm的 $\text{Ge}_{12}\text{As}_{24}\text{Se}_{64}$ 玻璃切成长度为40 mm的圆柱形玻璃棒,将玻璃棒放入特制的模具中进行加热挤压,所用模具的出口形状为脊形,挤压形成的预制棒如图1(a)所示。为了避免玻璃在高温下发生氧化或被污染,挤压过程在干燥氮气的保护下进行。包层玻璃的挤压也采用类似的方法,主要区别在于挤压时使用较大的套筒和特定结构的模具。然后,采用多级棒管法<sup>[20]</sup>拉制光纤。将脊形芯玻璃棒插入一个带脊形孔的包层玻璃管(外径为12 mm)中,如图1(b)所示;插入一个内外径分别为12 mm和30 mm的包层玻璃套管中,形成组合件,如图1(c)所示;在挤压机上挤压组合件,得到直径为12 mm的棒,进一步在高精度软玻璃光纤拉丝

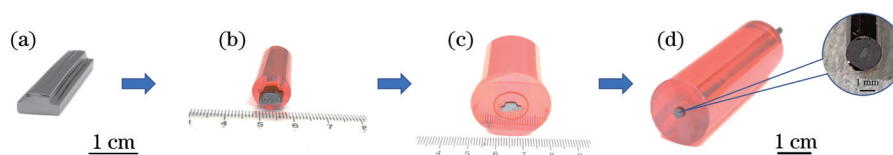


图1 脊形芯光纤预制棒制备过程

Fig. 1 Preparation process of the optical fiber preform with a ridged core

塔上将其拉制成直径约为 2.2 mm 的细棒;将细棒剪短并插入内径为 2.2 mm、外径为 14.8 mm 的  $\text{Ge}_{10}\text{As}_{24}\text{S}_{66}$  包层套管中,形成最终的光纤预制棒,如图 1(d)所示。最后,将光纤预制棒卷上聚合物保护层并加热,拉制成目标尺寸光纤,拉丝温度约为 330 °C,拉丝速度约为 2 m/min。

## 2.2 样品表征

使用美国 TA 公司生产的型号为 Q2000 的差示扫描量热仪 (DSC) 测试玻璃的热性能。使用美国 J. A. Woollam 公司生产的型号为 IR-VASE 的椭偏仪测试玻璃的线性折射率  $n_0$ <sup>[22-23]</sup>,测量光谱范围为 2~20  $\mu\text{m}$ 。采用截断法测试光纤在中红外波段的传输损耗<sup>[20, 24]</sup>。所用光源为立陶宛 Light Conversion 公司生产的型号为 Orpheus-HP 的光学参量放大器 (OPA)。首先用数值孔径 (NA) 为 0.56、焦距为 4 mm 的红外非球面透镜 (C036TME-E, Thorlabs) 将 OPA 发射的准直光束耦合进光纤一端,然后用热电制冷碲镉汞探测器 (MCT; S180C, Thorlabs, 探测范围为 2.9~5.5  $\mu\text{m}$ ) 在光纤另一端测试输出功率,用一对  $\text{CaF}_2$  全息线栅偏振片和一个  $\text{BaF}_2$  1/4 波片控制光的强度和偏振方向。为了尽可能避免光纤中非线性效应对损耗的影响,测试所用激光的平均功率小于 0.1 mW。光纤中产生 SC 的测试方法与之前报道类似<sup>[14, 20]</sup>。通过红外非球面透

镜将 OPA 产生的抽运光耦合进光纤一端,光纤另一端输出的 SC 经金镜反射后进入单色仪 (MS3504i, SOL Instruments, Belarus),在单色仪出口处使用液氮制冷 MCT 探测器采集光谱。

## 3 分析与讨论

适用于产生偏振 MIR SC 的硫系玻璃光纤需要具有良好的群速色散 (GVD) 特性和较大的双折射。本研究中,  $\text{Ge}_{12}\text{As}_{24}\text{Se}_{64}$  和  $\text{Ge}_{10}\text{As}_{24}\text{S}_{66}$  分别被选为纤芯和包层材料,这是因为它们具有较高的折射率差,并且在拉制光纤过程中的热兼容性较好。它们的玻璃化转变温度 ( $T_g$ ) 相近,分别为 206 °C 和 201 °C,且两种玻璃在 450 °C 前均未出现析晶迹象,适合多次加热拉制光纤,如图 2(a)所示。图 2(b) 是玻璃的折射率色散曲线,两种玻璃的折射率可分别用 Sellmeier 方程表示,分别为

$$n_{\text{Ge-As-Se}}^2 = 1 + \frac{5.7617\lambda^2}{\lambda^2 - 0.2621^2} + \frac{1.8472\lambda^2}{\lambda^2 - 51.72^2}, \quad (1)$$

$$n_{\text{Ge-As-S}}^2 = 1 + \frac{4.0707\lambda^2}{\lambda^2 - 0.2165^2} + \frac{0.8783\lambda^2}{\lambda^2 - 28.26^2}, \quad (2)$$

式中:  $n_{\text{Ge-As-Se}}$  和  $n_{\text{Ge-As-S}}$  分别为  $\text{Ge}_{12}\text{As}_{24}\text{Se}_{64}$  和  $\text{Ge}_{10}\text{As}_{24}\text{S}_{66}$  玻璃的折射率;  $\lambda$  为波长。利用该玻璃组合,可获得 NA 较大的光纤,利于光纤群速色散的调节。

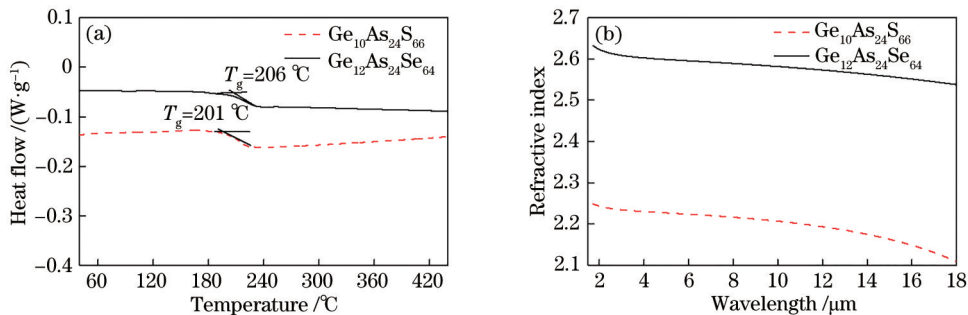


图 2  $\text{Ge}_{12}\text{As}_{24}\text{Se}_{64}$  和  $\text{Ge}_{10}\text{As}_{24}\text{S}_{66}$  玻璃的特性曲线。(a) 差示扫描量热曲线; (b) 线性折射率色散曲线

Fig. 2 Characteristic curves of  $\text{Ge}_{12}\text{As}_{24}\text{Se}_{64}$  and  $\text{Ge}_{10}\text{As}_{24}\text{S}_{66}$  glasses. (a) Differential scanning calorimetry curves; (b) dispersion curves of linear refractive index

根据玻璃的性质,同时参考文献[7]中脊形平面光波导的结构,进一步设计了具有如图 3(a)所示截面形状的脊形芯 Ge-As-Se/Ge-As-S 光纤,并采用有限元法对其进行色散计算分析。光纤纤芯可以调节的尺寸有底部宽度  $W$  和高度  $h$ 。首先将  $h$  设置成 2  $\mu\text{m}$ ,通过改变底部宽度  $W$ ,研究了该脊形芯硫系玻璃光纤的色散特性,获得的结果如图 3(b)所示。随着参数  $W$  的增大,TE 和 TM 模对应的第一

个零色散点向长波方向移动,第二个零色散点则向短波方向移动。接着研究  $h$  的大小对光纤色散的影响,从图 3(c)和图 3(d)可知,随着参数  $h$  的增大,TE 和 TM 模对应的第一个零色散点向长波方向移动,第二个零色散点也向长波方向移动。

在近零色散波长的反常色散区域抽运光纤,利于获得宽带 SC 输出。综合考虑光纤的色散、激光耦合的难度、制备工艺,为了尽量能够在短波长范围内

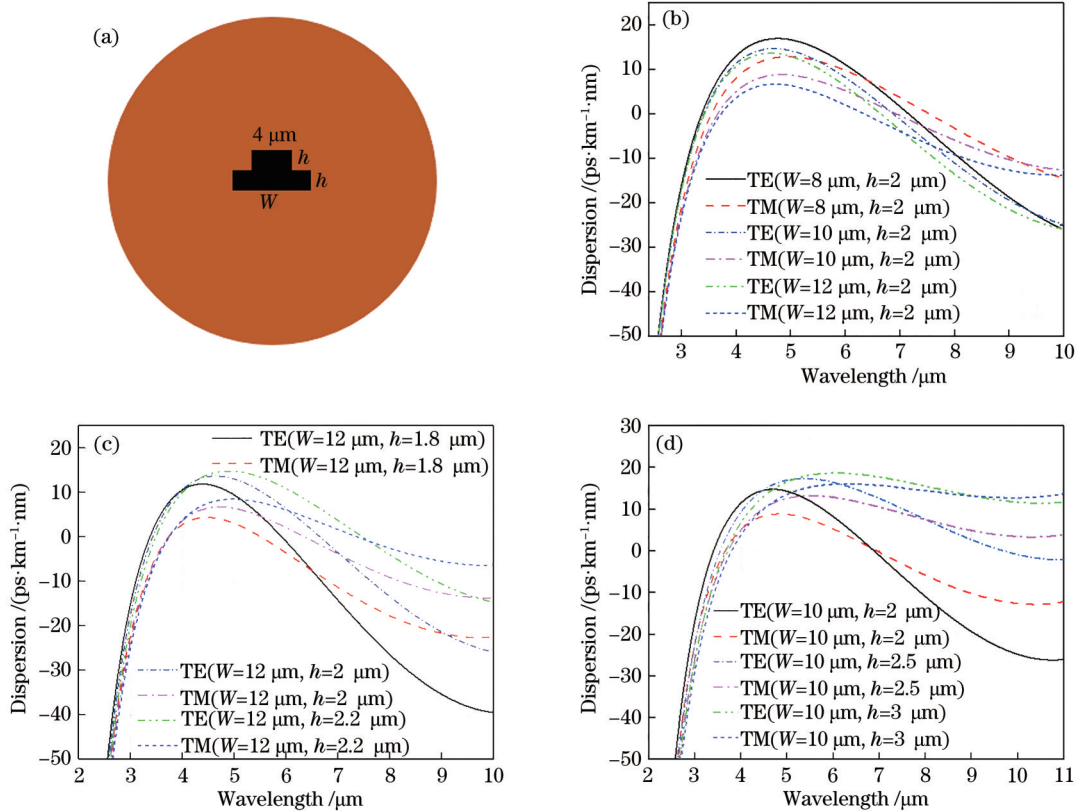


图3 脊形芯光纤色散与纤芯尺寸之间的关系。(a)脊形芯光纤截面示意图;(b)光纤色散与  $W$  的关系;  
(c)(d)光纤色散与  $h$  的关系

Fig. 3 Relationship between dispersion and core size of ridged core fiber. (a) Schematic of cross section for the ridged core fiber;  
(b) relationship between dispersion of the fiber and  $W$ ; (c)(d) relationship between dispersion of the fiber and  $h$

抽运光纤,选择了  $W=10$  μm,  $h=2.5$  μm 作为纤芯尺寸,此时 TE 模对应两个零色散波长分别是 3.55 μm 和 9.66 μm; TM 模对应的零色散波长为 3.73 μm。该光纤 TE 和 TM 基模在 3.7 μm 波长(所选光纤抽运波长)对应的有效折射率分别为 2.5643 和 2.5633,相应的拍长  $L_b$  为 3.7 mm。由于使用的光纤长度远大于  $L_b$ ,光纤具有较好的保偏性。

最终制备了目标 Ge-As-Se-/Ge-As-S 光纤,获得的光纤截面如图 4(a)和图 4(b)所示。可以看到,经过多次加热拉制后,纤芯的形状未发生显著变化。纤芯的尺寸  $W=10.4$  μm,  $h=2.6$  μm,与目标尺寸相当。测得的光纤的传输损耗如图 4(c)所示,可以看出:TE 模损耗略低于 TM 模损耗,TE 模在 2.9~5.5 μm 的典型损耗约为 4 dB/m;光纤在 4.1 μm 和 4.6 μm 附近具有较高的损耗,它们分别是由光纤中残留的 S-H 和 Se-H 杂质吸收引起的<sup>[25]</sup>。进一步测试了光纤的保偏特性,当激发波长为 2.9 μm 和 5.5 μm 时,测得的偏振消光比分别为 19.6 dB 和 19.4 dB,表明该光纤在中红外波段具有

较好的保偏性能。

最后,考察了该光纤用于产生偏振 MIR SC 的潜力。在脊形芯 Ge-As-Se/Ge-As-S 光纤中,TE 模对应的两个零色散波长之间(3.55~9.66 μm)是光纤的反常色散区,在此区域抽运光纤利于产生宽带 SC。本实验中,采用中心波长为 3.7 μm、脉冲宽度为 170 fs、重复频率为 100 kHz 的激光抽运长度约 12 cm 的脊形芯光纤(纤芯的  $W=10.4$  μm,  $h=2.6$  μm)。根据纤芯玻璃 Ge<sub>12</sub>As<sub>24</sub>Se<sub>64</sub>在 3.7 μm 波长的三阶非线性折射率( $n_2=2.5 \times 10^{-18}$  m<sup>2</sup>/W)<sup>[26-27]</sup>,可计算出光纤在该波长的非线性系数( $\gamma$ )约为 0.24 W<sup>-1</sup>·m<sup>-1</sup>(TE 基模,有效模场面积  $A_{\text{eff}}=1.74 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>)。当抽运光的偏振方向与光纤的 TE 方向平行时,光纤的 TE 模被激发。当抽运源的平均功率达到 40 mW 时,获得了覆盖 2~9.5 μm 的 SC,如图 5 所示。在抽运激光平均功率小于 0.1 mW 的情况下,根据光纤输入端前和输出端后的激光功率、光纤在 3.7 μm 处的损耗(~4 dB/m),推算出脉冲未发生超连续谱展宽时抽运激光的耦

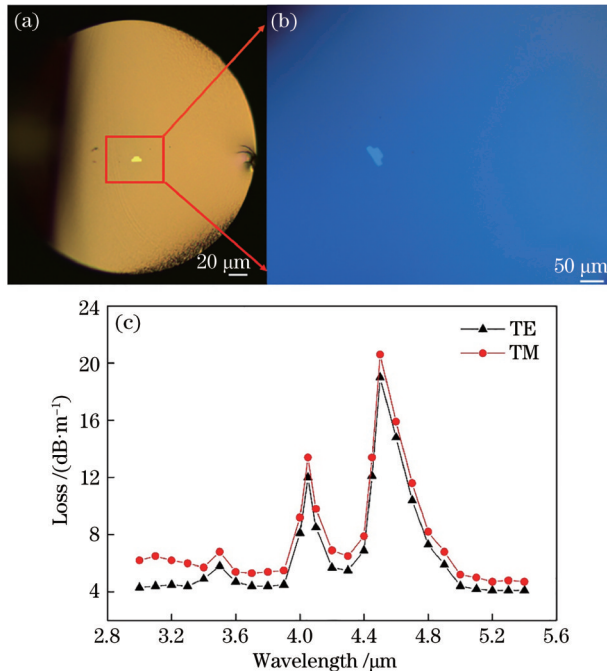


图 4 制备光纤的横截面和传输损耗。(a)(b)横截面图；  
(c)传输损耗

Fig. 4 Cross section and transmission loss of fabricated fiber.  
(a) (b) Cross section; (c) transmission loss

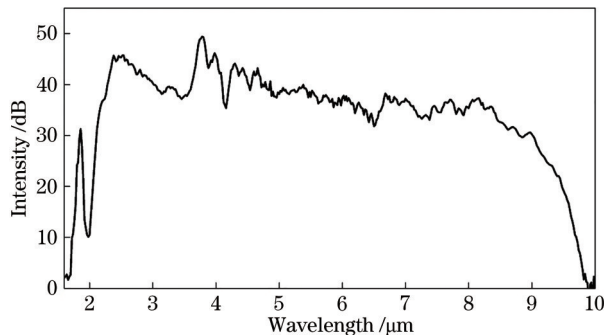


图 5 沿 TE 方向激发 12 cm 长脊形芯 Ge-As-Se/Ge-As-S 光纤时测得的超连续谱输出

Fig. 5 Measured SC of 12-cm-long Ge-As-Se/Ge-As-S fiber with a ridged core pumped along TE direction

合效率约为 32%；因此抽运源的平均功率为 40 mW 时，耦合进光纤的抽运激光平均功率约为 12.8 mW，对应的脉冲峰值功率约为 750 kW。用热功率计在光纤的输出端测得 SC 输出平均功率约为 4 mW，对应的光转换效率约为 31%，较低的转换效率主要与 3.7 μm 的抽运脉冲极大展宽时产生的严重量子亏损有关。在光纤的输出端放置一个 CaF<sub>2</sub> 全息线栅检偏器，旋转检偏器同时测试输出功率的变化，测得输出 SC 的偏振消光比约为 19.2 dB，这表明产生的 SC 具有较好的线偏特性。

## 4 结 论

为了获得具有良好保偏特性的硫系玻璃光纤，设计了脊形芯 Ge<sub>12</sub>As<sub>24</sub>Se<sub>64</sub>/Ge<sub>10</sub>As<sub>24</sub>S<sub>66</sub>（纤芯/包层）光纤。采用有限元法模拟了脊形芯光纤的色散特性，确定了光纤纤芯的几何尺寸为  $W=10\ \mu\text{m}$  和  $h=2.5\ \mu\text{m}$ 。采用挤压法结合多级棒管法制备了脊形芯 Ge-As-Se/Ge-As-S 光纤，制备的光纤纤芯尺寸为  $W=10.4\ \mu\text{m}$ ,  $h=2.6\ \mu\text{m}$ ，光纤在 2.9~5.5 μm 的典型损耗约为 4 dB/m。采用波长为 3.7 μm、脉冲宽度为 170 fs 的脉冲抽运 12 cm 长光纤，获得了光谱范围为 2~9.5 μm、偏振消光比约为 19.2 dB 的 SC。

## 参 考 文 献

- [1] Dai S X, Wang Y Y, Peng X F, et al. A review of mid-infrared supercontinuum generation in chalcogenide glass fibers[J]. Applied Sciences, 2018, 8(5): 707.
- [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] Zhao Z M, Chen P, Wang X S, et al. A novel chalcogenide fiber with high nonlinearity and low material zero-dispersion via extrusion[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2019, 102(9): 5172-5179.
- [4] Yang L Y, Li Y, Zhang B, et al. 30-W supercontinuum generation based on ZBLAN fiber in an all-fiber configuration[J]. Photonics Research, 2019, 7(9): 1061-1065.
- [5] Robichaud L R, Duval S, Pleau L P, et al. High-power supercontinuum generation in the mid-infrared pumped by a soliton self-frequency shifted source[J]. Optics Express, 2020, 28(1): 107-115.
- [6] Guo W, Zhang B, Zhai C C, et al. Fabrication and application of small core chalcogenide glass fibers in nonlinear optics[J]. Journal of Inorganic Materials, 2016, 31(2): 180-184.  
郭威, 张斌, 翟诚诚, 等. 小芯径硫系玻璃光纤的制备及其非线性光学应用[J]. 无机材料学报, 2016, 31(2): 180-184.
- [7] Yu Y, Gai X, Ma P, et al. Experimental demonstration of linearly polarized 2-10 μm supercontinuum generation in a chalcogenide rib waveguide[J]. Optics Letters, 2016, 41(5): 958-961.

- [8] Martinez R A, Plant G, Guo K W, et al. Mid-infrared supercontinuum generation from 1.6 to  $>11 \mu\text{m}$  using concatenated step-index fluoride and chalcogenide fibers[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 296-299.
- [9] Kedenburg S, Strutynski C, Kibler B, et al. High repetition rate mid-infrared supercontinuum generation from 1.3 to  $5.3 \mu\text{m}$  in robust step-index tellurite fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): 601-607.
- [10] Qin G S, Yan X, Kito C, et al. Ultrabroadband supercontinuum generation from ultraviolet to  $6.28 \mu\text{m}$  in a fluoride fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(16): 161103.
- [11] Zhang N, Peng X F, Wang Y Y, et al. Ultrabroadband and coherent mid-infrared supercontinuum generation in Te-based chalcogenide tapered fiber with all-normal dispersion[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 10311-10319.
- [12] Tian K Z, Hu Y S, Ren H, et al. Ge-As-S chalcogenide glass fiber with high laser damage threshold and mid-infrared supercontinuum generation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(4): 047801.  
田康振, 胡永胜, 任和, 等. 高激光损伤阈值 Ge-As-S 硫系玻璃光纤及中红外超连续谱产生[J]. *物理学报*, 2021, 70(4): 047801.
- [13] Hu Y S, Tian K Z, Li T T, et al. Mid-infrared nonlinear optical performances of Ge-Sb-S chalcogenide glasses[J]. *Optical Materials Express*, 2021, 11(3): 695-706.
- [14] Zhang M J, Li L, Li T T, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in chalcogenide fibers with high laser damage threshold[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 29287-29296.
- [15] Yu Q S, Zhang X Y, Zhang Z P. Research progress of chalcogenide glasses with third-order optical nonlinearity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(8): 080003.  
于秋爽, 张潇予, 张志萍. 硫系玻璃三阶光学非线性的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(8): 080003.
- [16] Guo H T, Cui J, Xu Y T, et al. Progress in preparation and applications of low-loss chalcogenide infrared fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170606.  
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.
- [17] Zhao Z M, Wu B, Wang X S, et al. Mid-infrared supercontinuum covering  $2.0\text{--}16 \mu\text{m}$  in a low-loss telluride single-mode fiber[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(2): 1770023.
- [18] Xue Z G, Liu S, Zhao Z M, et al. Infrared suspended-core fiber fabrication based on stacked chalcogenide glass extrusion[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(12): 2416-2421.
- [19] Wang Y Y, Dai S X, Li G T, et al.  $1.4\text{--}7.2 \mu\text{m}$  broadband supercontinuum generation in an As-S chalcogenide tapered fiber pumped in the normal dispersion regime[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(17): 3458-3461.
- [20] Ren H, Yu Y, Zhai C C, et al. Chalcogenide glass fibers with a rectangular core for polarized mid-infrared supercontinuum generation[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2019, 517: 57-60.
- [21] 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.
- [22] Sun M Y, Yang A P, Zhang X H, et al. Ga-Sb-S-I chalcogenide glasses and fibers for mid-infrared applications[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2019, 102(11): 6600-6605.
- [23] Yang Y, Chen Y X, Liu Y H, et al. Tailoring structure and property of Ge-As-S chalcogenide glass[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(12): 127801.  
杨艳, 陈云翔, 刘永华, 等. Ge-As-S 硫系玻璃的结构与性能调控[J]. *物理学报*, 2016, 65(12): 127801.
- [24] Zhong M H, Wang X G, Jiao K, et al. Eco-friendly Ge-Se chalcogenide fiber extrusion preparation and supercontinuum generation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170618.  
钟明辉, 王弦歌, 焦凯, 等. 环保砷-硒硫系光纤的挤压制备及其超连续谱产生[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170618.
- [25] Zhang B, Yu Y, Zhai C C, et al. High brightness  $2.2\text{--}12 \mu\text{m}$  mid-infrared supercontinuum generation in a nontoxic chalcogenide step-index fiber[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2016, 99(8): 2565-2568.
- [26] Yu Y, Zhang B, Gai X, et al.  $1.8\text{--}10 \mu\text{m}$  mid-infrared supercontinuum generated in a step-index chalcogenide fiber using low peak pump power[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(6): 1081-1084.
- [27] Wang T, Gai X, Wei W H, et al. Systematic Z-scan measurements of the third order nonlinearity of chalcogenide glasses[J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(5): 1011-1022.