

# 硫系光纤红外超连续谱输出研究进展

王莹莹<sup>1,2</sup> 戴世勋<sup>1,2</sup> 罗宝华<sup>1,2</sup> 张培晴<sup>1,2</sup> 王训四<sup>1,2</sup> 刘自军<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>宁波大学高等技术研究院红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211

<sup>2</sup>浙江省光电探测材料及器件重点实验室, 浙江 宁波 315211

**摘要** 硫系玻璃具有超宽的红外光谱透过范围和极高的线性、非线性折射率,因此硫系玻璃光纤成为目前唯一能产生中远红外超连续谱输出的光纤基质材料。综述了传统阶跃型硫系光纤、硫系微结构光纤以及硫系拉锥光纤中红外超连续谱输出的研究进展。

**关键词** 光纤光学; 硫系光纤; 红外超连续谱; 非线性光学; 微结构光纤; 拉锥光纤

**中图分类号** TN213; TN253 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.090005

## Progress in Infrared Supercontinuum Generation in Chalcogenide Glass Fibers

Wang Yingying<sup>1,2</sup> Dai Shixun<sup>1,2</sup> Luo Baohua<sup>1,2</sup>

Zhang Peiqing<sup>1,2</sup> Wang Xunsi<sup>1,2</sup> Liu Zijun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Infrared Materials and Devices, Research Institute of Advanced Technologies, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

<sup>2</sup>Zhejiang Provincial Key Laboratory of Photoelectric Materials and Devices, Ningbo, Zhejiang 315211, China

**Abstract** Since chalcogenide glasses show advantages of ultra-wide infrared transmittance range and extremely high linear and nonlinear refractive indices, chalcogenide glass fibers become the unique optical fiber host materials for mid-infrared and far-infrared supercontinuum generation. The research progress in infrared supercontinuum generation in conventional step-index chalcogenide glass fibers, chalcogenide microstructured optical fibers and fiber tapers is reviewed.

**Key words** fiber optics; chalcogenide glass fiber; infrared supercontinuum; nonlinear optics; microstructured optical fiber; fiber taper

**OCIS codes** 060.4005; 060.2310; 160.4330; 320.6629

## 1 引言

3~13  $\mu\text{m}$  红外波段覆盖了中波红外和长波红外区域非常重要的分子指纹区,该波段的红外超连续谱(SC)光源在生物医学、疾病诊断、气体检测和食品质量监控等领域应用广泛<sup>[1-7]</sup>。硫系玻璃是一种以元素周期表中第 VI A 族的硫、硒、碲三种元素为主并结合其他类金属元素(锗、砷、锑等)构成的非氧化物玻璃。硫系玻璃的特性有:折射率高,范围为 2.0~3.5;声子能量低,小于  $350\text{ cm}^{-1}$ ;中远红外透过性能优良,依据组分不同可达 20  $\mu\text{m}$  以上;非线性折射率系数极大( $n_2 = 2 \times 10^{-18} \sim 2 \times 10^{-17}\text{ m}^2/\text{W}$ ),是石英玻璃的 100~1000 倍;组分可调范围较宽<sup>[8-9]</sup>。硫系玻璃光纤(以下简称硫系光纤)已成为目前唯一能实现 3~13  $\mu\text{m}$  超宽红外波段范围 SC 输出的高非线性光纤。

**收稿日期:** 2016-04-29; **收到修改稿日期:** 2016-05-27; **网络出版日期:** 2016-08-24

**基金项目:** 国家自然科学基金(61435009,61377099)、宁波大学王宽诚幸福基金

**作者简介:** 王莹莹(1992—),女,硕士研究生,主要从事硫系玻璃光纤制备及其超连续谱特性等方面的研究。

E-mail: wangyingying127@163.com

**导师简介:** 戴世勋(1974—),男,博士,研究员,主要从事光功能玻璃材料及器件等方面的研究。

E-mail: daishixun@nbu.edu.cn(通信联系人)

2014年本课题组曾对硫系光纤红外 SC 的研究情况进行了综述<sup>[10]</sup>,近两年来,该领域又取得了很大进展。本文简单概括了硫系光纤 SC 的产生机理,对传统阶跃型硫系光纤、硫系微结构光纤(MOF)以及硫系拉锥光纤的红外 SC 输出的研究进展进行了综述。

## 2 硫系光纤中 SC 产生机理

光纤中 SC 的产生主要是光纤群速度色散(GVD)和非线性效应,包括自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频和受激拉曼散射(SRS)等相互作用的结果<sup>[11]</sup>,其中发挥最主要作用的是 GVD 与 SPM 效应。在 SC 的产生过程中,GVD 导致脉冲展宽和脉冲畸变,并与非线性效应相互作用,对非线性频谱展宽和非线性频率转换有重要影响。SPM 和 XPM 使光脉冲在光纤中产生非线性相移,形成频率啁啾。随着传输距离不断增大,新的频率成分不断产生,光谱得到展宽。在光纤的反常 GVD 区,用飞秒脉冲抽运产生 SC 时,与孤子有关的传输效应是光谱展宽的主要机制。传输效应的主要过程依次为高阶孤子传输演化、孤子分裂、孤子自频移(SSFS)、色散波和孤子俘获。高阶色散和拉曼效应是扰动高阶孤子周期性演化的两个最重要因素。通过扰动,高阶孤子分裂成一系列基态孤子。孤子带宽与拉曼增益谱交叠,SSFS 使孤子不断地移向长波,增加了 SC 的光谱宽度。在正常 GVD 区,光谱展宽主要来自于 GVD 和 SPM 的相互作用,并且脉冲越窄,非线性频谱展宽越宽。在近零色散的正常 GVD 区抽运,SPM 展宽的部分光谱会进入反常 GVD 区,此时,与孤子有关的一系列非线性效应将在光谱展宽过程中起主要作用<sup>[12]</sup>。

衡量中红外 SC 质量的关键参数有光谱宽度、光谱平坦度和平均输出功率。高质量的中红外 SC 的光谱范围宽、平坦度好、输出功率高。光谱范围宽可以获取更长波段的相干光源,平坦度好可降低对功率均衡技术的要求,输出功率高有利于实际应用。

## 3 硫系光纤红外 SC 输出

### 3.1 传统阶跃型硫系光纤红外 SC 输出

传统阶跃型硫系光纤结构简单,制备相对容易。但其零色散点波长(ZDW)受材料色散影响往往位于长波区域,即波长大于  $4.5\ \mu\text{m}$ ,因此采用短波长激光脉冲在正常 GVD 区抽运光纤中的级联 SRS 和 SPM 非线性效应受限,很难获得平坦的宽 SC 输出<sup>[10,13]</sup>。在传统阶跃型硫系光纤中欲获得宽 SC 输出,主要采用长波红外激光脉冲以光参量放大(OPA)或光参量振荡(OPO)为主的抽运。目前常用的传统阶跃型光纤以  $\text{As}_2\text{S}_3$  和  $\text{As}_2\text{Se}_3$  玻璃材料为主,其光谱透过范围分别为  $0.7\sim 12\ \mu\text{m}$  和  $1\sim 13\ \mu\text{m}$ <sup>[14-15]</sup>。

2014年,Petersen 等<sup>[16]</sup>利用挤压法制备出纤芯为  $\text{As}_2\text{Se}_3$  玻璃,包层为  $\text{Ge}_{10}\text{As}_{23.4}\text{Se}_{66.6}$  玻璃的阶跃型硫系光纤,其数值孔径(NA)为 2.675,ZDW 为  $5.83\ \mu\text{m}$ ,采用工作波长分别为  $4.5\ \mu\text{m}$  和  $6.3\ \mu\text{m}$ 、脉冲宽度为 100 fs、峰值功率为 2.29 MW、频率为 1 kHz 的 OPA 激光器抽运 85 mm 长的光纤,分别获得了强度动态范围为  $\pm 40\ \text{dB}$ 、波长范围为  $1.5\sim 11.7\ \mu\text{m}$  和  $1.4\sim 13.3\ \mu\text{m}$  的 SC 输出(图 1)。如图 2 所示,其光谱覆盖了非常重要的中远红外分子指纹区,这是迄今为止在传统阶跃型硫系光纤中获得的最宽 SC 输出。2014年,Hudson 等<sup>[17]</sup>利用工作波长为  $3.1\ \mu\text{m}$ 、脉宽为 67 fs 的光参量啁啾脉冲放大激光脉冲抽运阶跃型  $\text{As}_2\text{S}_3$  光纤,光纤的纤芯/包层直径为  $9\ \mu\text{m}/170\ \mu\text{m}$ ,NA 为 0.32,ZDW 为  $4\ \mu\text{m}$ 。当脉冲峰值功率达到 520 kW 时,在光纤中产生了强度动态范围为  $\pm 20\ \text{dB}$ 、波长范围为  $1.59\sim 5.89\ \mu\text{m}$  的 SC,平均功率为 8 mW。2014年,Théberge 等<sup>[18]</sup>采用工作波长为  $4.56\ \mu\text{m}$ 、脉宽为 130 fs 的 OPA 激光脉冲抽运 70 cm 长的大芯径阶跃型  $\text{As}_2\text{S}_3$  光纤,其纤芯直径为  $100\ \mu\text{m}$ ,ZDW 为  $4.5\ \mu\text{m}$ ,当输入脉冲能量为  $10\ \mu\text{J}$  时,产生了强度动态范围为  $\pm 20\ \text{dB}$ 、波长范围为  $1.5\sim 7\ \mu\text{m}$  的 SC,这是目前为止实验得到的阶跃型  $\text{As}_2\text{S}_3$  光纤中光谱展宽最宽的 SC 输出。2015年,Zhang 等<sup>[19]</sup>采用工作波长为  $4.1\ \mu\text{m}$ 、脉宽为 320 fs、峰值功率为 3.7 kW、频率为 10.5 MHz 的 OPA 激光脉冲抽运 13.5 cm 长的 Ge-As-Se 光纤,其纤芯/包层直径为  $5.5\ \mu\text{m}/250\ \mu\text{m}$ ,NA 为 1.3,ZDW 为  $3.4\ \mu\text{m}$ ,获得了强度动态范围为  $\pm 10\ \text{dB}$ 、平均功率为 3 mW、波长范围为  $1.8\sim 9.8\ \mu\text{m}$  的 SC 输出。2015年,Yu 等<sup>[20]</sup>通过管棒法制备了阶跃型  $\text{Ge}_{12}\text{As}_{24}\text{Se}_{64}$  光纤,其 NA 为 1.3,ZDW 为  $3.2\ \mu\text{m}$ ,在  $4.0\ \mu\text{m}$  波长处的色散值  $D\approx 21.77\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ,非线性系数  $\gamma=0.25\ \text{W}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ 。采用工作波长为  $4.0\ \mu\text{m}$ 、脉宽为 330 fs、频率

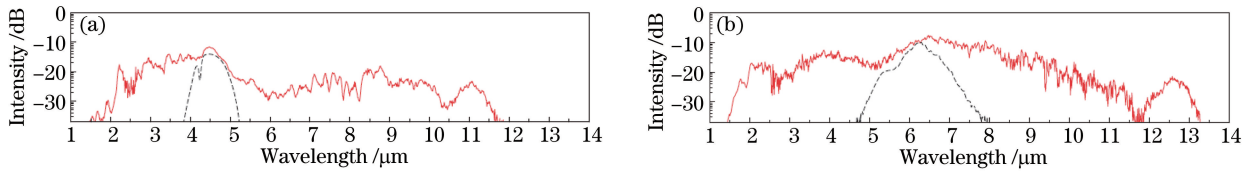


图 1 不同波长抽运条件下  $\text{As}_2\text{Se}_3$  光纤 SC 输出。(a)  $4.5 \mu\text{m}$ ; (b)  $6.3 \mu\text{m}$

Fig. 1 SC generation in  $\text{As}_2\text{Se}_3$  fiber with the pump wavelength centered at (a)  $4.5 \mu\text{m}$  and (b)  $6.3 \mu\text{m}$

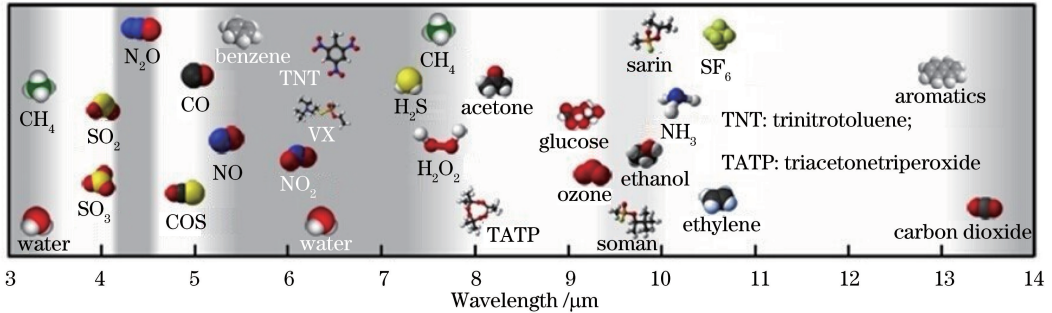


图 2  $3\sim 14 \mu\text{m}$  红外波段覆盖的分子指纹区

Fig. 2 Molecular fingerprint region with infrared wavelength from  $3 \mu\text{m}$  to  $14 \mu\text{m}$

为  $21 \text{ MHz}$  的 OPA 激光脉冲抽运,在较低的阈值功率(约为  $3 \times 10^3 \text{ W}$ )下获得了强度动态范围为  $\pm 15 \text{ dB}$ 、波长范围为  $1.8\sim 10 \mu\text{m}$  的 SC 输出。

通过理论仿真,深入研究了不同参数(光纤直径、NA 等)光纤和不同参数(抽运脉冲波长、脉冲宽度等)的抽运源对 SC 展宽程度的影响。2014 年, Kubat 等<sup>[21]</sup>数值模拟了不同直径、不同 NA 下  $\text{As}_2\text{Se}_3$  光纤中 SC 的输出特性。仿真结果表明,当激光器工作波长为  $4.5 \mu\text{m}$ ,脉宽为  $50 \text{ ps}$ ,峰值功率为  $0.75 \text{ kW}$ ,光纤的纤芯直径为  $8 \mu\text{m}$ ,NA 为  $1.0$ ,长度为  $2 \text{ m}$ ,ZDW 分别为  $5.1 \mu\text{m}$  和  $9.43 \mu\text{m}$ ,在  $4.5 \mu\text{m}$  波长处  $D = -7.35 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ,  $\gamma = 0.2 \text{ W}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$  时,掺  $\text{Pr}^{3+}$  硫系光纤锁模激光器抽运光纤获得的 SC 展宽至  $12.5 \mu\text{m}$ ,如图 3(a)所示。当抽运脉冲峰值功率增加到  $4.7 \text{ kW}$ ,光纤纤芯直径为  $20 \mu\text{m}$ ,NA 为  $0.8$ ,长度为  $2.25 \text{ m}$ ,ZDW 为  $6.28 \mu\text{m}$ ,在  $4.5 \mu\text{m}$  处  $D = -19.2 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ,  $\gamma = 0.04 \text{ m}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$  时,抽运光纤获得的 SC 展宽至  $10.3 \mu\text{m}$ ,如图 3(b)所示。2016 年, Kubat 等<sup>[22]</sup>对不同抽运脉冲宽度下阶跃型  $\text{As}_2\text{Se}_3$  光纤中 SC 展宽特性的仿真结果表明,在工作波长为  $2.9 \mu\text{m}$ ,峰值功率为  $4.8 \text{ kW}$ ,脉宽分别为  $10, 20, 40, 60 \text{ ps}$  的激光脉冲作用下,在纤芯直径为  $8 \mu\text{m}$ ,NA 为  $1.0$ ,ZDW 为  $5 \mu\text{m}$ ,长度为  $1 \text{ m}$  的 As-Se 光纤中得到了光谱展宽程度不同的 SC 输出。数值模拟表明,当脉冲宽度不大于  $10 \text{ ps}$  时,光纤中只存在基模传输,光谱展宽较宽( $3\sim 13 \mu\text{m}$ );当脉冲宽度大于等于  $40 \text{ ps}$  时,虽然脉冲能量增大,但高阶模被激发,部分脉冲能量转移到高阶模中,基模中能量的减少限制了 SC 的进一步展宽。2016 年, Saghaei 等<sup>[23]</sup>采用工作波长为  $12 \mu\text{m}$ 、脉宽为  $100 \text{ fs}$ 、峰值功率为  $50 \text{ kW}$  的激光脉冲抽运  $\text{As}_{10}\text{Se}_{60}$  单模光纤(纤芯/包层直径为  $2.32 \mu\text{m}/3.5 \mu\text{m}$ ),在  $50 \text{ mm}$  长的光纤中获得  $10 \mu\text{m}$  宽( $8\sim 18 \mu\text{m}$ )的红外 SC 输出。

### 3.2 硫系 MOF 红外 SC 输出

尽管采用长工作波长的 OPA 光源抽运传统阶跃型硫系光纤可获得极宽的红外 SC 输出,但是抽运源体积庞大,且为空间光抽运,难以有效实现器件小型化和集成化。研究人员尝试采用硫系 MOF 使其 ZDW 蓝移,以便更加灵活地选择抽运光源,从而实现全光纤化的硫系红外 SC 光源。目前主要采用挤压法或打孔法进行硫系 MOF 制备,通过结构设计实现色散优化,通过增大有效折射率差增强光的限制能力,增大光纤端面光功率密度,从而增强光纤非线性效应以获得宽 SC 输出<sup>[24-25]</sup>。

2015 年, Møller 等<sup>[26]</sup>制备了纤芯直径为  $4.5 \mu\text{m}$ ,ZDW 迁移到  $3.5 \mu\text{m}$  的  $\text{As}_{38}\text{Se}_{62}$  悬吊芯光纤,光纤截面如图 4(a)、(b)所示。采用工作波长为  $4.4 \mu\text{m}$ 、脉宽为  $320 \text{ fs}$ 、峰值功率为  $5.2 \text{ kW}$ 、频率为  $21 \text{ MHz}$  的 OPA 激光脉冲抽运  $18 \text{ cm}$  长的光纤,在  $\pm 40 \text{ dB}$  的强度动态范围内获得了平均功率为  $15.6 \text{ mW}$ 、覆盖  $1.7\sim 7.5 \mu\text{m}$  波段的 SC 输出,如图 4(c)所示。2016 年, Liu 等<sup>[27]</sup>通过管棒法制备了纤芯材料为  $\text{AsSe}_2$  玻璃,空气孔由  $\text{As}_2\text{S}_3$  玻璃填充的四孔 MOF,光纤纤芯和  $\text{As}_2\text{S}_3$  玻璃棒的直径分别为  $2.4 \mu\text{m}$  和  $3.5 \mu\text{m}$ ,在

2.7  $\mu\text{m}$ 处  $\gamma=13.5 \text{ m}^{-1}\cdot\text{W}^{-1}$ ,  $n_2=2.3\times 10^{-17} \text{ m}^2\cdot\text{W}^{-1}$ 。采用工作波长为 2.7  $\mu\text{m}$ 、脉宽为 200 fs、峰值功率为 5.2 kW 的 OPO 激光脉冲抽运 2 cm 长的光纤,输出 SC 波段范围为 2.2~3.3  $\mu\text{m}$ 。

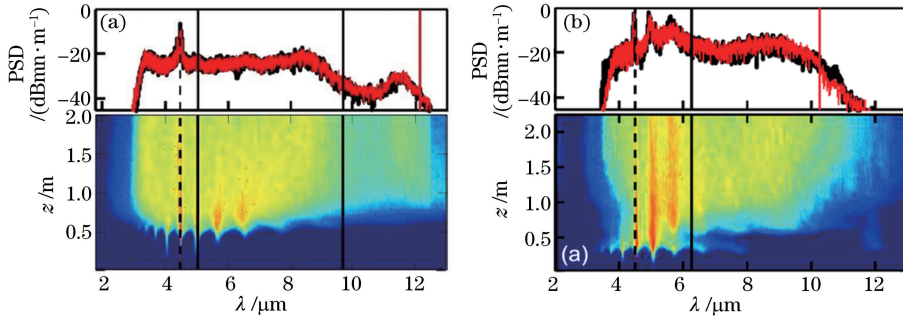


图 3  $\text{As}_2\text{Se}_3$  光纤 SC 输出(PSD:功率谱密度)。(a)纤芯直径为 8  $\mu\text{m}$ ,NA 为 1.0;(b)纤芯直径为 20  $\mu\text{m}$ ,NA 为 0.8

Fig. 3 SC generation of  $\text{As}_2\text{Se}_3$  fiber (PSD: power spectrum density).

(a) Diameter is 8  $\mu\text{m}$  and NA is 1.0; (b) diameter is 20  $\mu\text{m}$  and NA is 0.8

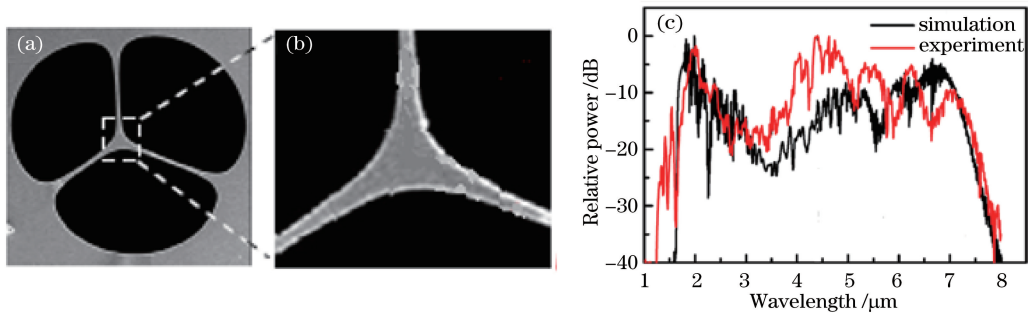
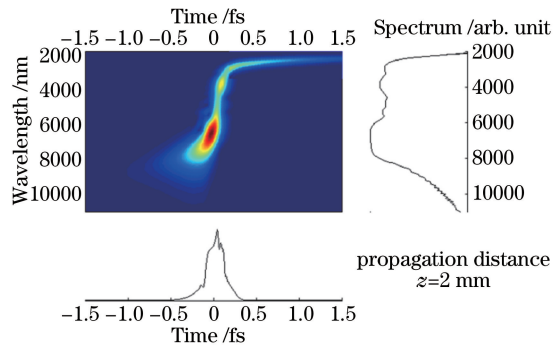
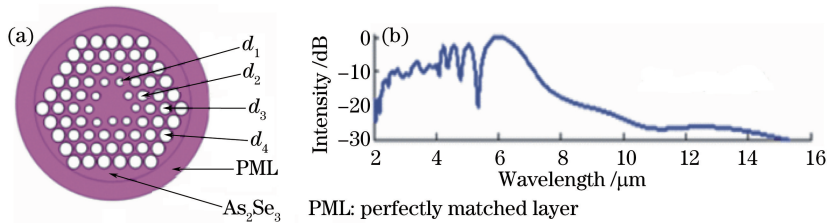


图 4  $\text{As}_{38}\text{Se}_{62}$  悬吊芯光纤。(a)扫描电子显微镜图;(b)纤芯放大图;(c)4.4  $\mu\text{m}$  激光抽运产生的 SC 输出

Fig. 4  $\text{As}_{38}\text{Se}_{62}$  suspended core fiber. (a) Scanning electron microscopic image;

(b) zoom-in on core; (c) SC generation pumped by 4.4  $\mu\text{m}$  laser

为了获得平坦的红外 SC 输出,研究人员从硫系 MOF 的结构设计着手,通过调整 MOF 空气孔直径  $d$ 、孔间距  $\Lambda$ 、占空比  $d/\Lambda$ 、折射率差  $\Delta n$  以及其他参数,对光纤的色散进行调控,使其更适应抽运激光工作波长。2015 年, Saghaei 等<sup>[28]</sup> 仿真设计了一种由  $\text{As}_2\text{S}_3$  玻璃填充最内层空气孔的  $\text{As}_2\text{Se}_3$  MOF 光纤,光纤在 5~10  $\mu\text{m}$  波段范围内具有超平坦的近零色散 [ $D\approx 5 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ] 和较低的光纤损耗 ( $\alpha\approx 5 \text{ dB}/\text{m}$ )。在工作波长为 4.6  $\mu\text{m}$ 、脉宽为 50 fs、峰值功率为 10 kW 的激光脉冲抽运下,在 50 mm 长的光纤中获得了 3.86  $\mu\text{m}$  宽(2.58~6.44  $\mu\text{m}$ ) 的 SC 输出。2015 年, Baili 等<sup>[29]</sup> 仿真设计了一种色散平坦、结构具有 5 层空气孔的  $\text{As}_2\text{Se}_3$  MOF 光纤 [ $\Lambda=800 \text{ nm}$ ,  $d_1/\Lambda=0.35$ ,  $d_2/\Lambda=0.55$ ,  $d_3/\Lambda=0.7$ ,  $d_4/\Lambda=0.8$ ,  $d_5/\Lambda=0.95$ , 在 5.24  $\mu\text{m}$  处  $D=-2.37 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ ,  $\gamma=7250 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ]。在工作波长为 5.24  $\mu\text{m}$ 、脉宽为 50 fs、脉冲能量为 80 pJ 的激光脉冲作用下,在 2 mm 长的光纤中获得了 2~10  $\mu\text{m}$  的 SC 输出,如图 5 所示。2015 年, Saini 等<sup>[30]</sup> 仿真设计了一种 4 层空气孔环绕三角格子型的  $\text{As}_2\text{Se}_3$  MOF 光纤,如图 6(a) 所示。逐渐增大由里层到外层的空气孔直径,使得光纤的折射率呈渐变型。研究了每层空气孔的直径大小对色散的影响,发现外两层空气孔的直径变化对 MOF 色散的影响较小。当每层空气孔的直径分别为  $d_1=420 \text{ nm}$ 、 $d_2=700 \text{ nm}$ 、 $d_3=800 \text{ nm}$ 、 $d_4=900 \text{ nm}$  时,MOF 在抽运波长 4.1  $\mu\text{m}$  处的  $\gamma$  值高达  $1944 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ,有效模场面积  $A_{\text{eff}}$  仅为 4.1  $\mu\text{m}^2$ 。采用脉宽为 50 fs、峰值功率为 3.5 kW 的掺  $\text{Tm}^{3+}$  锁模光纤激光器抽运 5 mm 长的光纤,获得了 2~15  $\mu\text{m}$  的超宽 SC 输出,如图 6(b) 所示。2015 年, Zhang 等<sup>[31]</sup> 仿真设计了一种 4 层空气孔环绕的  $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_{12}\text{S}_{65}$  MOF 光纤,内两层空气孔直径  $d_1=1.4 \mu\text{m}$ ,外两层空气孔直径  $d_2=1.6 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda=4 \mu\text{m}$ , ZDW 为 3.2  $\mu\text{m}$  和 7.0  $\mu\text{m}$ 。当采用工作波长为 3  $\mu\text{m}$ 、功率为 165 W 的低功率激光脉冲抽运 15 cm 长的光纤时,得到 1.9~9.3  $\mu\text{m}$  的 SC 输出。2016 年, Saghaei 等<sup>[23]</sup> 仿真设计了一种具有 5 层空气孔的  $\text{As}_2\text{Se}_3$  MOF,光纤纤芯直径为 7  $\mu\text{m}$ ,  $d=3 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda=5 \mu\text{m}$ 。采用工作波长为 12  $\mu\text{m}$ 、脉宽为 100 fs、峰值功率为 50 kW 的 OPA 激光脉冲抽运,在 50 mm 长的光纤中获得了宽度为 13  $\mu\text{m}$  (7~20  $\mu\text{m}$ ) 的 SC 输出。

图5  $\text{As}_2\text{Se}_3$  MOF 中理论 SC 输出Fig. 5 Simulated SC generation in  $\text{As}_2\text{Se}_3$  MOF图6 (a)三角格子型  $\text{As}_2\text{Se}_3$  MOF 光纤截面图;(b)脉宽为 150 fs、峰值功率为 3.5 kW 的脉冲抽运 5 mm 长 MOF 产生的 SC 展宽Fig. 6 (a) Transverse cross-section of triangular-core  $\text{As}_2\text{Se}_3$  MOF; (b) broadening of output SC from

5-mm-long MOF obtained at pulse width of 150 fs and incident peak power of 3.5 kW

### 3.3 硫系拉锥光纤红外 SC 输出

光纤拉锥作为一种重要的光纤后处理技术,可通过减小拉锥区域的光纤直径和增强光功率密度灵活控制光纤色散和非线性效应的大小。硫系拉锥光纤较 MOF 制备简单,且超短脉冲在其中传输时可产生非常强的非线性效应,更容易实现低功率阈值激光脉冲抽运下 SC 的输出,是硫系光纤应用研究的热点<sup>[32]</sup>。2013 年,Al-Kadry 等<sup>[33]</sup>将传统结构的  $\text{As}_2\text{Se}_3$  光纤(纤芯直径为  $6\ \mu\text{m}$ )拉制成锥腰直径为  $1.28\ \mu\text{m}$  的拉锥光纤,ZDW 蓝移到  $1.73\ \mu\text{m}$  处。采用工作波长为  $1.55\ \mu\text{m}$ 、脉宽为 260 fs、峰值功率为 18.8 W、频率为 20 MHz 的激光脉冲抽运 10 cm 长的拉锥光纤,在  $\pm 20\ \text{dB}$  的强度动态范围内得到了覆盖  $1.26\sim 2.2\ \mu\text{m}$  的 SC 输出。2013 年,Rudy 等<sup>[34]</sup>利用搭建的在线拉锥平台(图 7)将纤芯直径为  $7\ \mu\text{m}$ 、包层直径为  $160\ \mu\text{m}$ 、NA 为 0.2 的传统结构  $\text{As}_2\text{S}_3$  光纤拉制成为锥腰直径为  $2\ \mu\text{m}$ 、长度为 2.1 mm 的拉锥光纤,其 ZDW 为  $1.95\ \mu\text{m}$ 。采用工作波长为  $2.04\ \mu\text{m}$ 、脉宽为 100 fs、平均功率为 450 mW 的掺  $\text{Tm}^{3+}$  锁模光纤激光器进行抽运,获得了强度动态范围为  $\pm 45\ \text{dB}$ 、波长范围为  $1\sim 3.7\ \mu\text{m}$  的 SC 输出。2014 年,Shabahang 等<sup>[35]</sup>通过调整拉锥速度、长度及温度,将纤芯直径为  $10\ \mu\text{m}$  的  $\text{As}_2\text{Se}_{1.5}\text{S}_{1.5}$  阶跃型光纤拉制成锥腰直径从几微米到 100 nm,锥区长度从几毫米到几十厘米不等的拉锥光纤,拉锥样品如图 8 所示。采用工作波长为  $1.55\ \mu\text{m}$ 、峰值功率约为 100 W 的飞秒激光脉冲抽运,在锥腰直径为 250 nm、长度为 68 mm 的拉锥光纤中获得了  $1\sim 2\ \mu\text{m}$  的 SC 输出。2014 年,Al-Kadry 等<sup>[36]</sup>采用工作波长为  $1.94\ \mu\text{m}$ 、脉宽为 800 fs、能量为 500 pJ 的掺  $\text{Tm}^{3+}$  锁模光纤激光器抽运  $\text{As}_2\text{Se}_3$  拉锥光纤(锥腰直径为  $1.6\ \mu\text{m}$ 、长度为 10 cm,NA 为 0.2,ZDW 为  $1.85\ \mu\text{m}$ ,在  $1.94\ \mu\text{m}$  处  $A_{\text{eff}}=1.13\ \mu\text{m}^2$ , $\gamma=32.2\ \text{W}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ ),获得了强度动态范围为  $\pm 30\ \text{dB}$ 、覆盖范围为  $1.1\sim 4.4\ \mu\text{m}$  的 SC 输出。2015 年,Sun 等<sup>[37]</sup>通过改进的一步挤压法制备了  $\text{As}_2\text{Se}_3$  光纤(纤芯/包层直径为  $103\ \mu\text{m}/207\ \mu\text{m}$ ,NA 为 1.45)。将光纤拉锥至纤芯直径为  $1.9\ \mu\text{m}$  时,对应的 ZDW 为  $3.3\ \mu\text{m}$ 。在工作波长为  $3.4\ \mu\text{m}$ 、脉宽为 100 fs、峰值功率为 500 kW 的抽运脉冲作用下,获得了强度范围为  $\pm 20\ \text{dB}$ 、覆盖范围为  $1.5\sim 4.8\ \mu\text{m}$  的 SC 输出,  $4.8\ \mu\text{m}$  波长以上 SC 受光谱仪测量范围限制,光谱输出如图 9 所示。

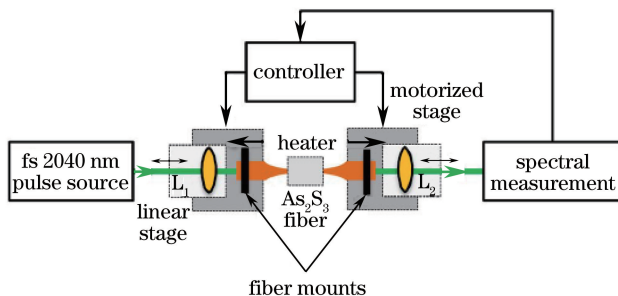


图7 硫系光纤在线拉锥装置

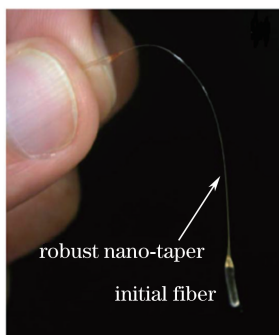
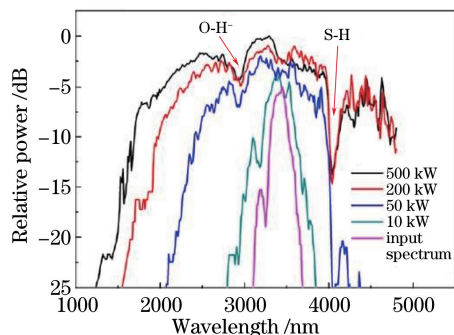
Fig. 7 Setup for *in situ* chalcogenide glass fiber tapering system

图8 典型的拉锥光纤

Fig. 8 Typical robust nanotaper

图9 不同功率的  $3.4 \mu\text{m}$  激光脉冲抽运  $\text{As}_2\text{Se}_3$  拉锥光纤产生的 SC 输出Fig. 9 Experimental SC generation pumped with different input powers at  $3.4 \mu\text{m}$  in  $\text{As}_2\text{Se}_3$  fiber taper

## 4 结束语

近年来,硫系光纤红外 SC 输出研究取得了长足进步,光谱范围和宽度均已覆盖到  $10 \mu\text{m}$  以上。在传统阶跃型硫系光纤中,采用长波 OPA 激光脉冲在反常 GVD 区近 ZDW 抽运产生的红外 SC 已覆盖  $1.4 \sim 13.3 \mu\text{m}$  波段;在正常 GVD 区的 OPA 激光脉冲作用下很难获得平坦且宽的红外 SC 输出。为适应短波长便携商用激光器(如  $2 \mu\text{m}$  锁模光纤激光器)抽运,尝试对传统阶跃型硫系光纤进行结构设计以实现光纤 ZDW 蓝移。硫系 MOF 的 ZDW 可迁移至  $2.28 \mu\text{m}$  处,目前在反常 GVD 区采用 OPA 激光脉冲抽运可实现  $5.8 \mu\text{m}$  宽的 SC 输出,但由于其 ZDW 无法迁移至  $2.0 \mu\text{m}$  以下,硫系 MOF 的宽带 SC 输出以理论仿真研究居多。硫系拉锥光纤的 ZDW 可蓝移至  $1.73 \mu\text{m}$  处,且由于其极强的非线性效应,商用激光器在低功率阈值脉冲下抽运硫系拉锥光纤获得了  $3 \mu\text{m}$  宽的红外 SC 输出。

目前各类硫系光纤的红外 SC 输出的平均功率还比较低( $10 \text{ mW}$  量级以下),需要进一步优化抽运方案提升平均输出功率。此外,全光纤化也是今后硫系光纤红外 SC 光源的发展趋势之一。

## 参 考 文 献

- Schliesser A, Picqué N, Hänsch T W. Mid-infrared frequency combs[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 440-449.
- Michaels C A, Masiello T, Chu P M. Fourier transform spectrometry with a near-infrared supercontinuum source[J]. Applied Spectroscopy, 2009, 63(5): 538-543.
- Kumar M, Islam M N, Terry F L, *et al.* Stand-off detection of solid targets with diffuse reflection spectroscopy using a high-power mid-infrared supercontinuum source[J]. Applied Optics, 2012, 51(15): 2794-2807.
- Waynant R W, Ilev I K, Gannot I. Mid-infrared laser applications in medicine and biology[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2001, 359(1780): 635-644.
- Seddon A B. A prospective for new mid-infrared medical endoscopy using chalcogenide glasses[J]. International Journal of

- Applied Glass Science, 2011, 2(3): 177-191.
- 6 Eggleton B J, Davies B L, Richardson K. Chalcogenide photonics[J]. Nature Photonics, 2011, 5(3): 141-148.
- 7 Wilson R H, Tapp H S. Mid-infrared spectroscopy for food analysis: Recent new applications and relevant developments in sample presentation methods[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 1999, 18(2): 85-93.
- 8 Slusher R E, Lenz G, Hodelin J, *et al.* Large Raman gain and nonlinear phase shifts in high-purity  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide fibers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2004, 21(6): 1146-1155.
- 9 Dai Shixun, Yu Xingyan, Zhang Wei, *et al.* Research progress of chalcogenide glass photonic crystal fiber[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(9): 090602.  
戴世勋, 於杏燕, 张巍, 等. 硫系玻璃光子晶体光纤研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(9): 090602.
- 10 Wang Cui, Dai Shixun, Zhang Peiqing, *et al.* Research progress of infrared supercontinuum generation in chalcogenide glass fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030001.  
汪翠, 戴世勋, 张培晴, 等. 基于硫系玻璃光纤的红外超连续谱的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 030001.
- 11 Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 40-117.  
阿格拉沃尔. 非线性光纤光学[M]. 贾东方, 余震虹, 译. 北京: 电子工业出版社, 2010: 40-117.
- 12 Zhang Bin. Study on controllable visible supercontinuum generation and mid-IR supercontinuum generation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012: 23-34.  
张斌. 光谱可控的可见光超连续谱与中红外超连续谱产生研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012: 23-34.
- 13 Wang Cui, Dai Shixun, Yang Peilong, *et al.* Infrared supercontinuum generation in chalcogenide-tellurite compound microstructured optical fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0816003.  
汪翠, 戴世勋, 杨佩龙, 等. 基于硫系玻璃/碲酸盐玻璃复合微结构光纤的红外超连续谱输出特性研究[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0816003.
- 14 Gao W, Duan Z, Asano K, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation in a four-hole  $\text{As}_2\text{S}_5$  chalcogenide microstructured optical fiber[J]. Applied Physics B, 2014, 116(4): 847-853.
- 15 Deng D, Liu L, Tuan T H, *et al.* Mid-infrared supercontinuum covering 3-10  $\mu\text{m}$  using a  $\text{As}_2\text{Se}_3$  core and  $\text{As}_2\text{S}_5$  cladding step-index chalcogenide fiber[C]. Advanced Solid State Lasers, Berlin, 2015: ATu2A.32.
- 16 Petersen C R, Møller U, Kubat I, *et al.* Mid-infrared supercontinuum covering the 1.4-13.3  $\mu\text{m}$  molecular fingerprint region using ultra-high NA chalcogenide step-index fibre[J]. Nature Photonics, 2014, 8(11): 830-834.
- 17 Hudson D D, Baudisch M, Werdehausen D, *et al.* 1.9 octave supercontinuum generation in a  $\text{As}_2\text{S}_3$  step-index fiber driven by mid-IR OPCPA[J]. Optics Letters, 2014, 39(19): 5752-5755.
- 18 Théberge F, Thiré N, Daigle J F, *et al.* Multioctave infrared supercontinuum generation in large-core  $\text{As}_2\text{S}_3$  fibers[J]. Optics Letters, 2014, 39(22): 6474-6477.
- 19 Zhang B, Guo W, Yi 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.
- 20 Yu Y, Zhang B, Gai X, *et al.* 1.8-10  $\mu\text{m}$  mid-infrared supercontinuum generated in a step-index chalcogenide fiber using low peak pump power[J]. Optics Letters, 2015, 40(6): 1081-1084.
- 21 Kubat I, Agger C S, Møller U, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation to 12.5  $\mu\text{m}$  in large NA chalcogenide step-index fibers pumped at 4.5  $\mu\text{m}$ [J]. Optics Express, 2014, 22(6): 16169-16182.
- 22 Kubat I, Bang O. Multimode supercontinuum generation in chalcogenide glass fibres[J]. Optics Express, 2016, 24(3): 2513-2526.
- 23 Saghaei H, Moravvej-Farshi M K, Ebnali-Heidari M, *et al.* Ultra-wide mid-infrared supercontinuum generation in  $\text{As}_{10}\text{Se}_{60}$  chalcogenide fibers solid core PCF versus SIF[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(2): 279-286.
- 24 Zhu Qingde, Wang Xunsi, Zhang Peiqing, *et al.* Fabrication and optical properties of chalcogenide  $\text{As}_2\text{S}_3$  suspended-core fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1206004.  
祝清德, 王训四, 张培晴, 等. 硫系  $\text{As}_2\text{S}_3$  悬吊芯光纤制备及其光谱性能研究[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1206004.
- 25 Li Xuyou, Xu Zhenlong, Ling Weiwei, *et al.* Numerical simulation and analysis of photonic crystal fibers with high

- nonlinearity and flattened chromatic dispersion[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505003.
- 李绪友, 许振龙, 凌卫伟, 等. 高非线性色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505003.
- 26 Møller U, Yu Y, Kubat I, *et al.* Multi-milliwatt mid-infrared supercontinuum generation in a suspended core chalcogenide fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(3): 3282-3291.
- 27 Liu L, Cheng T, Nagasaka K, *et al.* Coherent mid-infrared supercontinuum generation in all-solid chalcogenide microstructured fibers with all-normal dispersion[J]. Optics Letters, 2016, 41(2): 392-395.
- 28 Saghaei H, Ebnali-Heidari M, Moravvej-Farshi M K. Midinfrared supercontinuum generation via  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide photonic crystal fibers[J]. Applied Optics, 2015, 54(8): 2072-2079.
- 29 Baili A, Cherif R, Zghal M. Two octaves spanning supercontinuum in highly nonlinear  $\text{As}_2\text{Se}_3$  nanophotonic crystal fiber for midinfrared applications[J]. Journal of Nanophotonics, 2015, 9(1): 093059.
- 30 Saini T S, Kumar A, Sinha R K. Broadband mid-infrared supercontinuum spectra spanning 2-15  $\mu\text{m}$  using  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide glass triangular-core graded-index photonic crystal fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(18): 3914-3920.
- 31 Zhang P, Ma B, Zhang J, *et al.* Simulation study of mid-infrared supercontinuum generation in  $\text{Ge}_{23}\text{Sb}_{12}\text{S}_{65}$ -based chalcogenide photonic crystal fiber[J]. Optik, 2016, 127(5): 2732-2736.
- 32 Li Chaoran, Dai Shixun, Wu Yuehao, *et al.* Research progress of chalcogenide glass based micro-nanophotonic devices [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(2): 020005.
- 李超然, 戴世勋, 吴越豪, 等. 硫系玻璃基质的微纳光子器件研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(2): 020005.
- 33 Al-Kadry A, Baker C, Amraoui M E, *et al.* Broadband supercontinuum generation in  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide wires by avoiding the two-photon absorption effects[J]. Optics Letters, 2013, 38(7): 1185-1187.
- 34 Rudy C W, Marandi A, Vodopyanov K L, *et al.* Octave-spanning supercontinuum generation in *in situ* tapered  $\text{As}_2\text{S}_3$  fiber pumped by a thulium-doped fiber laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(15): 2865-2868.
- 35 Shabahang S, Tao G, Marquez M P, *et al.* Nonlinear characterization of robust multimaterial chalcogenide nanotapers for infrared supercontinuum generation[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2014, 31(3): 450-457.
- 36 Al-Kadry A, Amraoui M E, Messaddeq Y, *et al.* Two octaves mid-infrared supercontinuum generation in  $\text{As}_2\text{Se}_3$  microwires[J]. Optics Express, 2014, 22(25): 31131-31137.
- 37 Sun Y, Dai S, Zhang P, *et al.* Fabrication and characterization of multimaterial chalcogenide glass fiber tapers with high numerical apertures[J]. Optics Express, 2015, 23(18): 23472-23483.