

# 基于硫系玻璃光纤的红外超连续谱的研究进展

汪 翠<sup>1</sup> 戴世勋<sup>1</sup> 张培晴<sup>1</sup> 张 斌<sup>2</sup> 王训四<sup>1</sup> 沈 祥<sup>1</sup> 侯 静<sup>2</sup> 王荣平<sup>3</sup> 陶光明<sup>4</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>国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073

<sup>3</sup>澳大利亚国立大学物理与工程学院激光物理中心, 堪培拉 ACT0200

<sup>4</sup>美国中佛罗里达大学光学与光电子学院, 佛罗里达 奥兰多 32816

**摘要** 硫系玻璃具有极宽的红外透射范围、极高的线性和非线性折射率。近年来, 硫系玻璃光纤由于其红外超连续(SC)谱在传感、安全与国防方面的潜在应用价值, 引起了极大的关注。回顾了硫系玻璃光纤中产生 SC 谱的研究历程, 包括硫系微结构光纤 SC 谱输出、硫系拉锥光纤 SC 谱输出以及硫系光纤结构设计, 指出了研究中存在的问题, 并对其发展前景进行了展望。

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

中图分类号 TN253; TN213 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.030001

## Research Progress of Infrared Supercontinuum Generation in Chalcogenide Glass Fibers

Wang Cui<sup>1</sup> Dai Shixun<sup>1</sup> Zhang Peiqing<sup>1</sup> Zhang Bin<sup>2</sup> Wang Xunsi<sup>1</sup> Shen Xiang<sup>1</sup>  
Hou Jing<sup>2</sup> Wang Rongping<sup>3</sup> Tao Guangming<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

<sup>3</sup>Laser Physics Centre, Research School of Physics and Engineering, Australian National University,  
Canberra ACT0200, Australia

<sup>4</sup>The College of Optics and Photonics, University of Central Florida, Orlando, Florida 32816, USA

**Abstract** Chalcogenide glasses have a very wide range of infrared transmittance, extremely high linear and nonlinear refractive index. Recently, infrared supercontinuum (SC) generation in chalcogenide glass fibers attracts extensive attentions for its potential applications in sensing, security and defense. In this article, the research progress of infrared SC generation in chalcogenide glass fibers is reviewed, including the SC generation of chalcogenide tapered fiber and microstructured fibers, and the new fiber structure design for SC generation. Moreover, current problems in exploring SC generation are summarized, and their potential applications are discussed.

**Key words** nonlinear optics; chalcogenide glass fiber; infrared supercontinuum; microstructured fiber; tapered fiber  
**OCIS codes** 060.4005; 060.4370; 320.6629

## 1 引言

超连续谱(SC谱)是指当窄带脉冲在非线性光学介质(如固体、液体、气体和半导体等)中,经过一系列非

收稿日期: 2014-08-18; 收到修改稿日期: 2014-09-18; 网络出版日期: 2015-02-12

基金项目: 国家自然科学基金(61435009)、宁波市新型光电功能材料及器件创新团队项目(2009B21007)、宁波大学王宽诚幸福基金

作者简介: 汪 翠(1990—),女,硕士研究生,主要从事硫系光纤超连续谱等方面的研究。E-mail: 1072439302@qq.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)

线性效应与色散的共同作用,使得脉冲频谱得到极大展宽的一种光谱,这其中的非线性效应主要包括: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。1970年Alfano等<sup>[1]</sup>首次在硼硅酸盐玻璃中获得了可见光区域内的SC谱,SC谱逐渐引起人们的广泛关注。由于光纤纤芯面积小,承受的激光功率密度高,非线性效应强,更容易产生较宽且连续的SC谱。与此同时,3~5 μm中红外波段覆盖了很多生物分子的指纹区,因此中红外波段的高功率SC谱光源<sup>[2]</sup>在航天<sup>[3]</sup>、生物医学<sup>[4]</sup>、中红外传感<sup>[5]</sup>、物种识别<sup>[6]</sup>、污染物监测<sup>[5,7]</sup>等诸多前沿的技术领域具有重要的应用前景。

目前,产生可见光至近红外波段(0.4~2.5 μm)SC谱的光纤主要是石英基质的微结构光纤,但由于石英材料在中红外区域的较强红外吸收限制了其SC谱向中红外波段的扩展。因此,中红外乃至远红外区域(8~14 μm)SC谱的研究主要以非石英玻璃光纤为主,包括如:氟化物、碲酸盐和硫系玻璃光纤<sup>[8]</sup>,此类光纤具有较高的非线性系数、优良的中红外透射特性,非常适合中红外SC谱的产生<sup>[9]</sup>,特别是硫系玻璃光纤(以下简称硫系光纤)不仅能透过中红外和远红外波段,而且非线性系数极大,理论上是产生可覆盖中红外到远红外波段的唯一非线性光纤基质材料。

本文介绍了硫系光纤中SC谱的研究历程,从硫系微结构光纤SC谱输出、硫系拉锥光纤SC谱输出以及硫系光纤结构设计等方面总结了硫系光纤中SC谱的研究现状,指出了存在的问题,并对其发展前景进行了展望。

## 2 硫系玻璃的线性和非线性折射率

硫系玻璃是以元素周期表中第IV主族的硫(S)、硒(Se)、碲(Te)三种元素为主,并结合和一些其他类金属元素(砷、锑、锗等)构成的一种非氧化物玻璃,它具有极宽的红外透射范围(其中S基硫系玻璃为0.4~11 μm,Se基硫系玻璃为1~15 μm,Te基硫系玻璃为2~20 μm,如图1所示<sup>[9]</sup>),极高的线性折射率(2.2~3.5)和非线性折射率系数 $n_2$ (是石英玻璃的100~1000倍)。

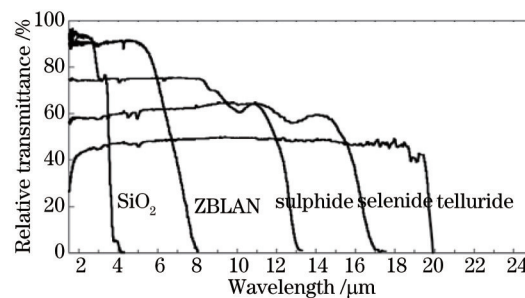


图1 各类光学玻璃的透射光谱

Fig.1 Transmission spectra of different optical glasses

光纤中的SC谱的产生主要依赖于光纤中三阶非线性效应,这种非线性效应起源于非线性折射,即指的是介质的折射率和入射光的强度有关,即

$$n = n_0 + n_2 I, \quad (1)$$

式中 $n_0$ 表示线性折射率, $I$ (单位为 $\text{W}/\text{m}^2$ )表示光强, $n_2$ 是非线性折射率系数或非线性克尔系数,它与三阶极化张量有关,同时随线性折射率的增加而增加<sup>[10]</sup>。表1给出了不同基质的光学玻璃在1.5 μm波长下的线性折射率 $n_0$ 和非线性折射率 $n_2$ 数值,从表中可看出常见的 $\text{As}_2\text{S}_3$ 和 $\text{As}_2\text{Se}_3$ 两种硫基玻璃的 $n_2$ 值分别比石英高出约80和260倍,因此硫系光纤具有极高的三阶非线性系数,更容易产生SC谱输出。

表1 不同光学玻璃在1.5 μm处的 $n_0$ 和 $n_2$ 数值

Table 1 Values of  $n_0$  and  $n_2$  for different optical glasses at wavelength of 1.5 μm

	$n_0$	$n_2/(10^{-20}\text{m}^2/\text{W})$	Reference	
Silica glass	1.45	2.1	Ref.[10]	
Fluoride glass-ZBLAN	1.50	3.3	Ref.[11]	
SF57	1.81	41	Ref.[12]	
Tellurite glass (70%TeO <sub>2</sub> -30%ZnO)	2.03	51	Ref.[13]	
Chalcogenide glass	As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	2.45	160	Ref.[14]
	As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	2.90	520	Ref.[14]

### 3 研究历程

硫系光纤的SC谱研究始于2005年,加拿大瓦尔大学Wei等<sup>[15]</sup>采用波长为1.55  $\mu\text{m}$ ,脉宽为20 fs(平均功率为26 mW)的激光抽运长度为1.5 m的传统结构单模 $\text{As}_2\text{S}_3$ 光纤,获得了1.5  $\mu\text{m}$ 波段的SC谱输出,但平坦度为15 dB的带宽仅为310 nm,这主要因为传统结构的硫系光纤零色散点(ZDW)受材料色散影响往往位于长波区域(大于4.5  $\mu\text{m}$ )<sup>[16]</sup>,在正常色散区抽运下光纤中的级联SRS和SPM非线性效应受限,因此采用近红外激光抽运传统结构硫系光纤很难获得平坦且宽的SC谱输出。

一般而言,光纤中要获得高质量的SC谱输出,须满足两个条件:1)抽运波长与光纤的零色散点接近,且处于反常色散区域;2)光纤须有较高的非线性系数 $\gamma$ 值。因此,为了在硫系光纤中获得宽的红外SC谱输出,研究者需要设计新型结构的光纤,使ZDW蓝移,同时且让纤芯变细,从而使得模场面积变小,光纤非线性系数增大。硫系微结构光纤和拉锥光纤因此成为研究者的首选,2005年12月,美国海军实验室Shaw等<sup>[17]</sup>首次报道了用波长为2.5  $\mu\text{m}$ ,脉宽为100 fs的激光抽运1 m长的 $\text{As}_2\text{Se}_3$ 微结构光纤,产生了2.1~3.2  $\mu\text{m}$ 的SC谱,从此真正开启了硫系光纤中红外SC谱产生的研究。近年来国内外众多的知名研究机构如美国海军实验室、英国南安普顿大学、丹麦科技大学、悉尼大学、日本丰田工业大学等,纷纷开展了硫系光纤的SC谱输出的研究,并取得了很大的进展<sup>[16,18-22]</sup>。表2汇总了部分硫系微结构光纤和拉锥光纤的SC谱输出的研究结果,可以看出,硫系光纤的基质材料主要以 $\text{As}_2\text{S}_3$ 或 $\text{As}_2\text{Se}_3$ 玻璃为主,硫系微结构光纤和拉锥光纤的SC谱已分别扩展到6.1  $\mu\text{m}$ <sup>[23]</sup>和5  $\mu\text{m}$ <sup>[24]</sup>,光纤长度普遍短于10 cm,最大平均输出功率<sup>[25]</sup>已达百毫瓦量级<sup>[25]</sup>。

表2 硫系微结构光纤和拉锥光纤中SC谱输出

Table 2 SC spectrum output of chalcogenide microstructured fibers and taper fibers

	Host material	Fiber length /cm	Peak power /kW	Width of SC spectrum /nm	Reference
Microstructured fiber	$\text{As}_2\text{S}_3$	45	28	1.0~3.2	Ref.[26]
	$\text{As}_2\text{Se}_3$	9.0	15	2.0~6.1	Ref.[23]
	$\text{As}_2\text{S}_5$	4.8	1.55	1.37~5.56	Ref.[22]
Tapered fiber	$\text{As}_2\text{Se}_3$	5.0	3.5	0.85~2.35	Ref.[27]
	$\text{As}_2\text{S}_3$	3.8	4.7	2.2~5	Ref.[24]

近年来国内相关高校和研究机构也相继开展了硫系光纤及非线性应用理论和实验研究。清华大学研究了单模 $\text{As}_2\text{S}_3$ 光纤的色散特性<sup>[28]</sup>;复旦大学开展了 $\text{As}_2\text{S}_3$ 微纳光纤制备及其结型微腔特性研究<sup>[29]</sup>;武汉理工大学深入开展了系列卤化物和硫化物硫系玻璃光纤基质材料制备及非线性特性研究<sup>[30]</sup>;华东理工大学开展了光稳定性硫系玻璃组分调控<sup>[31]</sup>及硒基硫卤玻璃非线性特性的研究<sup>[32]</sup>;国防科技大学设计了一种可产生1.1~5.5  $\mu\text{m}$ 中红外SC谱的双零色散三角格子型 $\text{As}_2\text{S}_3$ 微结构光纤<sup>[33]</sup>;燕山大学开展了 $\text{As}_2\text{S}_3$ 微结构光纤结构设计研究<sup>[34]</sup>;湖南大学开展了 $\text{As}_2\text{S}_3$ 微结构光纤中红外SC谱产生的理论研究<sup>[35]</sup>;宁波大学开展了基于Ge-Sb-Se和Ge-Sb-S等硫系玻璃微结构光纤的结构设计<sup>[36]</sup>、中红外增益<sup>[37]</sup>及光纤制备<sup>[38]</sup>研究,并探究了硫系微纳光器件的制备工艺<sup>[39]</sup>。但总体而言,大多停留在硫系微结构光纤的结构设计和传输特性理论方面,而有关硫系光纤的SC谱实验基本处于空白状态。

### 4 研究热点

目前,硫系光纤SC谱研究主要集中在三个方面:微结构硫系光纤SC谱输出、硫系拉锥光纤SC谱输出及硫系光纤SC谱输出。

#### 4.1 微结构硫系光纤SC谱输出

硫系微结构光纤可将硫系玻璃优良透红外和高非线性折射率特性与光子晶体光纤<sup>[40]</sup>的结构设计灵活、非线性和色散可控的优势有效结合起来,为其在红外SC谱非线性应用带来了发展。2005年,美国海军实验室Shaw等<sup>[17]</sup>用2.5  $\mu\text{m}$ 飞秒激光器抽运1 m长的六边形 $\text{As}_2\text{Se}_3$ 微结构光纤,产生了2.1~3.2  $\mu\text{m}$ 的SC谱。随后同实验室的Sanghera等<sup>[41]</sup>用同一激光器抽运1 m长的 $\text{As}_2\text{S}_3$ 微结构光纤,得到了2~3.6  $\mu\text{m}$ 的SC谱。2009年,Fatome等<sup>[42]</sup>等利用波长为1.55  $\mu\text{m}$ 、脉宽为8.3 ps的激光抽运六边形结构 $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$ 硫系微结构光纤(长度为1.15 m),当平均抽运功率为1 mW时,产生了1.1~1.75  $\mu\text{m}$ 的SC谱。

近年来,研究者采用了一种占空比大的悬吊芯硫系微结构光纤来产生 SC 谱,这种光纤的 ZDW 位于较短波长处,且模场面积  $A_{\text{eff}}$  极小,光纤  $\gamma$  值极大,在低激光抽运功率下容易产生 SC 谱。2010 年,法国科学研究中心 El-Amraoui 等<sup>[43]</sup>首次制备出悬吊芯  $\text{As}_2\text{S}_3$  微结构光纤,如图 2 所示,光纤 ZDW 为  $2.1 \mu\text{m}$ ,  $\gamma$  值为  $2150 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ ,利用  $1.5 \mu\text{m}$  的皮秒激光器抽运  $45 \text{ cm}$  长度的光纤,获得了  $1.45\sim 1.7 \mu\text{m}$  波段的较平坦 SC 谱(受测量仪器限制,  $1.7 \mu\text{m}$  以上 SC 谱无法测得);随即用  $1.55 \mu\text{m}$ ,  $400 \text{ fs}$  的脉冲激光器(峰值功率为  $5.6 \text{ kW}$ )抽运长度  $68 \text{ cm}$  的同种光纤,获得了平坦的  $1.0\sim 2.6 \mu\text{m}$  的 SC 光谱<sup>[44]</sup>。

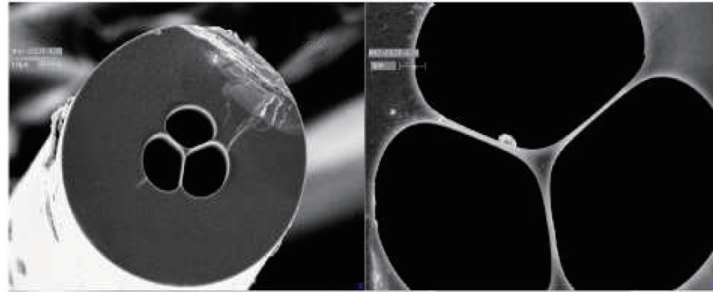


图 2 悬吊芯  $\text{As}_2\text{S}_3$  微结构光纤端面图

Fig.2 Cross section of  $\text{As}_2\text{S}_3$  fiber with suspended core

正常色散区抽运硫系光纤时许多非线性效应,如孤子效应、FWM 等并不能充分发挥作用,SC 谱展宽有限。而在反常色散区近零色散点抽运可以产生多种非线性综合效应,可实现 SC 谱的极大展宽。初始脉冲传输通过 SPM 致使频谱展宽,随着进一步的传输,脉冲频谱扩展到拉曼增益谱区, SRS 开始起作用,频谱发生红移,大部分能量被转移到长波长,形成拉曼孤子,并产生孤子自频移(SSFS)。因此,在反常色散区抽运硫系光纤可产生较宽的 SC 谱输出。2012 年,法国布尔格涅大学 Savelii 等<sup>[26]</sup>在制备了悬吊芯  $\text{As}_2\text{S}_3$  微结构光纤基础上(光纤参数  $A_{\text{eff}}=6.5 \mu\text{m}^2$ ,  $2.3 \mu\text{m}$  时,  $\alpha=1 \text{ dB/m}$ ,  $\lambda_{\text{ZDW}}=2.3 \mu\text{m}$ ,  $\gamma=1175 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ,  $n_2=2.8\times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ ),采用钛宝石抽运的光参量放大(OPO)激光器(波长为  $2.3 \mu\text{m}$ ,脉宽为  $200 \text{ fs}$ ,平均功率为  $450 \text{ mW}$ )激发  $45 \text{ mm}$  长度的光纤获得了  $1\sim 4.0 \mu\text{m}$  的中红外 SC 谱(见图 3)。2013 年, Gao 等<sup>[45]</sup>深入研究了悬吊芯的  $\text{As}_2\text{S}_3$  微结构光纤(纤芯和包层直径分别为  $3.2 \mu\text{m}$  和  $160 \mu\text{m}$ ,  $2.0 \mu\text{m}$  时,  $\alpha=1.2 \text{ dB/m}$ ,在  $2.5 \mu\text{m}$  处,  $\gamma=894.2 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ,  $n_2=3\times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ ,  $A_{\text{eff}}=8.43 \mu\text{m}^2$ ,  $\lambda_{\text{ZDW}}=2.5 \mu\text{m}$ ) 在 OPO 脉冲激光(脉宽为  $200 \text{ fs}$ , 波长调谐范围为  $1.72\sim 3.2 \mu\text{m}$ , 平均功率为  $201 \text{ mW}$ )作用下,该光纤产生的中红外 SC 谱与光纤长度、抽运功率和抽运波长的变化规律,实验结果发现当光纤长度较长( $20\sim 40 \text{ cm}$ )时,由于光纤杂质吸收,SC 谱在  $2.7 \mu\text{m}$  处呈现不连续性。当纤长度较短( $1.3\sim 2.4 \text{ cm}$ )时,产生的 SC 谱可扩展至  $4.5 \mu\text{m}$  以上。2014 年,日本丰田工业大学制备了一种四孔悬吊芯的  $\text{As}_2\text{S}_3$  微结构光纤(光纤参数:  $2.0 \mu\text{m}$  时,  $\alpha=1.5 \text{ dB/m}$ ,  $\lambda_{\text{ZDW}}=2.28 \mu\text{m}$ ,  $\gamma=1160 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ,  $n_2=3\times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ ),光纤端面如图 4(a)所示,输入脉冲宽度为  $200 \text{ fs}$ 、抽运波长为  $2.3 \mu\text{m}$ ,获得了  $1.37\sim 5.65 \mu\text{m}$  的红外 SC 谱,如图 4(b)所示,这是迄今为止在硫系光纤中获得的波长最远的 SC 谱<sup>[22]</sup>。

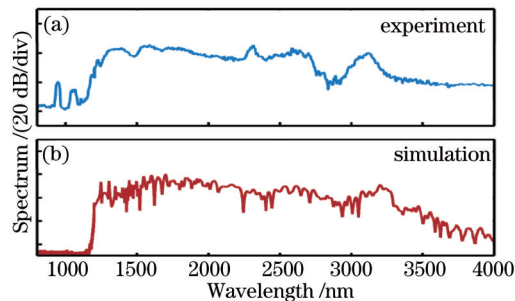


图 3  $2.3 \text{ mm}$  激光抽运  $45 \text{ mm}$  长度悬吊芯  $\text{As}_2\text{S}_3$  微结构光纤的(a)实验和(b)理论 SC 谱输出

Fig.3 (a) Experimental and (b) numerical recording of supercontinuum generation in a  $45\text{-mm}$  long sample of suspended-core  $\text{As}_2\text{S}_3$  fiber pumped by  $2.3 \text{ mm}$  laser

除悬吊芯微结构外,研究者还通过设计和制备其他结构硫系微结构光纤来实现中红外超连续谱输出。2009 年,日本丰田工业大学 Liao 等<sup>[46]</sup>用传统的堆积法制备了一种以碲酸盐玻璃为包层,  $\text{As}_2\text{S}_3$  玻璃为纤芯的复合微结构光纤,光纤  $\gamma$  值约为  $930 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ ,  $\lambda_{\text{ZDW}}$  为  $1.65 \mu\text{m}$ ,采用  $1.85 \mu\text{m}$  的飞秒激光抽运,得到了  $0.8\sim$

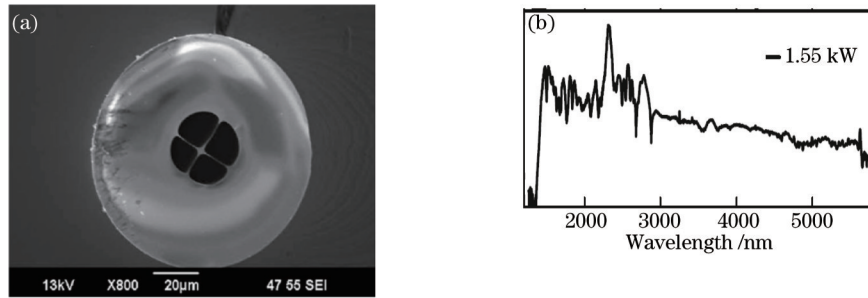


图4 (a) 四孔悬吊芯  $\text{As}_2\text{S}_5$  微结构光纤端面; (b) 1.55 kW 峰值功率抽运产生的 SC 谱

Fig.4 (a) Cross section of  $\text{As}_2\text{S}_5$  MOF; (b) SC generation pumped by 1.55 kW peak power

2.4  $\mu\text{m}$  的平坦 SC 谱输出。

#### 4.2 硫系拉锥光纤 SC 谱输出

硫系拉锥光纤可实现低功率激光阈值抽运下 SC 谱产生,这主要因为硫系微结构光纤制备工艺相对复杂和困难,且使用中有其局限性,而拉锥光纤较微结构光纤制备简单,还可灵活控制光纤的色散和非线性大小,当光纤拉锥区域的纤芯直径非常小,超短脉冲传输到该区域时,脉冲可以达到非常高的功率密度,可产生非常强的非线性效应,更容易在低阈值抽运功率下产生 SC 谱。

2008年,澳大利亚悉尼大学将传统结构的  $\text{As}_2\text{Se}_3$  光纤(纤芯和包层直径分别为 7.7  $\mu\text{m}$  和 170  $\mu\text{m}$ ,  $NA=0.2$ )拉制成腰锥直径为 0.95  $\mu\text{m}$  拉锥光纤(拉锥长度为 30 mm),如图 5 所示,采用波长为 1.55  $\mu\text{m}$ ,脉宽为 1.2 ps,重复频率为 9 MHz 的脉冲激光器进行激发,当峰值功率仅为 7.8 W 时,产生了 1.15~1.7  $\mu\text{m}$  的 SC 输出<sup>[47]</sup>。2012年,美国中佛罗里达大学光学中心 Shabahang 等<sup>[27]</sup>制备了  $\text{As}_2\text{Se}_3$ (芯)/  $\text{As}_2\text{S}_3$ (内包层)/PES 塑料(外包层)的传统结构光纤,并将其拉锥成长度为 5 cm,腰锥直径为 480 nm 的光纤,采用 1.55  $\mu\text{m}$ 、1 ps 调 Q 激光器进行抽运,当峰值功率为 3.5 kW 时,获得了 0.85~2.35  $\mu\text{m}$  近红外超连续谱,如图 6 所示。2012年,美国斯坦福大学 Marandi 等<sup>[48]</sup>用 3  $\mu\text{m}$  OPO 飞秒激光器(脉宽为 100 fs,平均功率为 47 mW)激发  $\text{As}_2\text{S}_3$  拉锥光纤(拉锥前的纤芯和包层直径分别为 7  $\mu\text{m}$  和 160  $\mu\text{m}$ ,拉锥后光纤腰锥直径为 2.3  $\mu\text{m}$ ,拉锥长度为 20 mm)获得了 2.3~4.7  $\mu\text{m}$  的 30 dB 中红外 SC 谱,如图 7 所示。

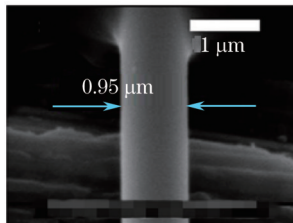


图5  $\text{As}_2\text{Se}_3$  拉锥光纤扫描电子显微镜图

Fig.5 Scanning electron microscope picture of fabricated  $\text{As}_2\text{Se}_3$  taper

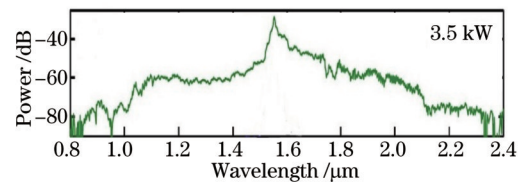


图6 峰值功率 3.5 kW 抽运输出的 SC 谱

Fig.6 Output SC spectrum pumped by 3.5 kW peak power

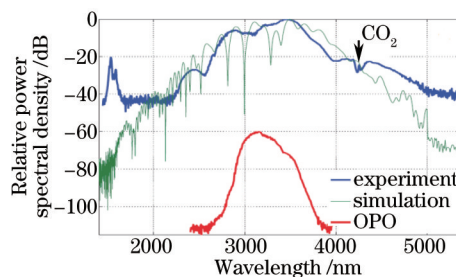


图7  $\text{As}_2\text{S}_3$  拉锥光纤对 OPO 抽运脉冲光谱的展宽

Fig.7 Output spectrum of OPO pulse broadened by the tapered  $\text{As}_2\text{S}_3$  fiber

#### 4.3 硫系光纤结构设计及 SC 谱输出理论研究

硫系光纤结构设计及 SC 谱输出理论与实验同步发展,通过数值分析硫系光纤的光纤结构参数、非线性效应和色散效应、初始脉冲参数对硫系光纤中 SC 谱产生的影响可对实验验证提供科学的依据。

早在2006年,英国南安普顿大学Price等<sup>[49]</sup>数值模拟了 $\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{S}_3$ 微结构光纤在不同 $A_{\text{eff}}$ 数值下的激光抽运阈值及中红外SC谱特性,计算结果表明:当 $A_{\text{eff}} \leq 8 \mu\text{m}^2$ 时,采用 $1.5\sim 2.0 \mu\text{m}$ 脉冲激光抽运,当脉宽为 $0.2 \text{ ps}$ ,能量 $1 \text{ nJ}$ 下即可产生SC谱,所需光纤长度仅为 $40 \text{ mm}$ ;当 $A_{\text{eff}} \approx 100 \mu\text{m}^2$ ,采用 $2.0 \mu\text{m}$ 波长以上脉冲激光抽运(脉宽小于 $1 \text{ ps}$ ,能量大于等于 $30 \text{ nJ}$ ),长度 $40 \text{ mm}$ 的硫系光纤能产生 $2.5 \mu\text{m}$ 宽SC谱。2009年,Roy等<sup>[50]</sup>模拟计算了四方格子 $\text{As}_2\text{S}_3$ 和 $\text{As}_2\text{Se}_3$ 微结构光纤的SC谱输出特性,当孔间距 $\Lambda = 4 \mu\text{m}$ ,孔直径 $d = 3.6 \mu\text{m}$ 时,采用峰值功率为 $600 \text{ W}$ , $200 \text{ fs}$ 的 $2.7 \mu\text{m}$ 脉冲激光抽运 $20 \text{ cm}$ 长度的 $\text{As}_2\text{S}_3$ 微结构光纤可产生 $1.90\sim 3.65 \mu\text{m}$ 的SC谱;当 $\Lambda = 5 \mu\text{m}$ , $d = 4.5 \mu\text{m}$ 时,采用 $4.1 \mu\text{m}$ ,脉宽为 $200 \text{ fs}$ 的脉冲激光抽运 $20 \text{ cm}$ 长度的 $\text{As}_2\text{Se}_3$ 微结构光纤,峰值功率为 $400 \text{ W}$ 时可产生 $2.95\sim 5.70 \mu\text{m}$ 的SC谱。

在硫系微结构光纤的结构设计方面,为了获得平坦的中红外SC谱输出,研究者理论设计时将光纤的ZDW点移到短波区域,并可获得两个或多个ZDW,使其在抽运源选择上更加灵活,与此同时,通过设计小的纤芯和纤芯-空气高折射率差可以获得小的有效模场面积,增强光纤的非线性。2010年,美国马里兰大学Hu等通过<sup>[51]</sup>设计了一种五层空气孔环绕三角格子结构的 $\text{As}_2\text{Se}_3$ 微结构光纤,当 $d/\Lambda = 0.4$ , $\Lambda = 3 \mu\text{m}$ 时, $\lambda_{\text{ZDW}}$ 为 $2.6, 6.7 \mu\text{m}$ ,采用 $2.5 \mu\text{m}$ 脉冲激光抽运,可产生带宽超过 $4 \mu\text{m}$ 的中红外SC谱。该研究小组还进一步理论证明了用 $2.8 \mu\text{m}$ 的激光抽运 $\text{As}_2\text{S}_3$ 微结构光纤(光纤参数: $d/\Lambda = 0.4$ , $\Lambda = 3 \mu\text{m}$ , $\lambda_{\text{ZDW}}$ 为 $1.0, 6.1 \mu\text{m}$ ),可获得 $2.5\sim 6.2 \mu\text{m}$ 的红外SC谱<sup>[52]</sup>。2011年,国防科技大学Jin等<sup>[53]</sup>理论设计了一种双零色散点的四层空气孔环绕三角格子型 $\text{As}_2\text{S}_3$ 微结构光纤( $\lambda_{\text{ZDW}}$ 为 $1.99, 3.38 \mu\text{m}$ ),采用波长为 $2.0 \mu\text{m}$ ,脉宽为 $150 \text{ fs}$ 的激光激发,理论上在 $1.1\sim 5.5 \mu\text{m}$ 区域可实现SC谱输出。2013年,新加坡制造技术研究院Yuan<sup>[54]</sup>数值模拟了 $4.1 \mu\text{m}$ 飞秒激光(脉宽为 $500 \text{ fs}$ ,峰值功率为 $10 \text{ kW}$ )抽运 $6 \text{ cm}$ 长度的五层空气孔环绕三角格子型的 $\text{As}_2\text{Se}_3$ 硫系微结构光纤,可在整个 $2\sim 10 \mu\text{m}$ 中远红外区域产生平坦的SC谱。此外,研究者也尝试理论模拟硫系光纤在长工作波长的激光抽运下产生远红外SC可行性。2010年,加拿大蒙特利尔工程学院Ung等<sup>[55]</sup>理论设计了一种四层空气孔基于全内反射型结构的 $\text{As}_2\text{Se}_3$ 硫系微结构光纤,使光纤的零色散点位移至 $9.3\sim 10.6 \mu\text{m}$ 区域,色散曲线平坦且具有多重零色散点,用 $10.5 \mu\text{m}$ 波长的皮秒脉冲激光抽运 $10 \text{ cm}$ 长度光纤,能产生 $8.5\sim 11.6 \mu\text{m}$ 远红外SC谱。在硫系拉锥光纤方面,2011年,Salem等<sup>[56]</sup>理论模拟验证将 $\text{As}_2\text{S}_3$ 微结构光纤拉锥成束腰直径为 $1.3 \mu\text{m}$ 、长度为 $80 \mu\text{m}$ 的光纤锥( $\lambda_{\text{ZDW}} = 2.0 \mu\text{m}$ ),用波长为 $4.7 \mu\text{m}$ 的 $100 \text{ pJ}$ 脉冲激光抽运下可产生 $3.14\sim 6.33 \mu\text{m}$ 红外SC谱。

在抽运技术方面,2014年,丹麦科技大学从理论上验证了一种新的抽运方法可在硫系光纤中获得超宽SC谱,即采用ZBLAN光纤产生的 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 的SC谱抽运 $10 \text{ cm}$ 的 $\text{As}_2\text{Se}_3$ 微结构光纤,可实现 $0.9\sim 9 \mu\text{m}$ 的SC谱<sup>[20]</sup>,如图8所示, $\alpha_c$ 为光纤损耗。

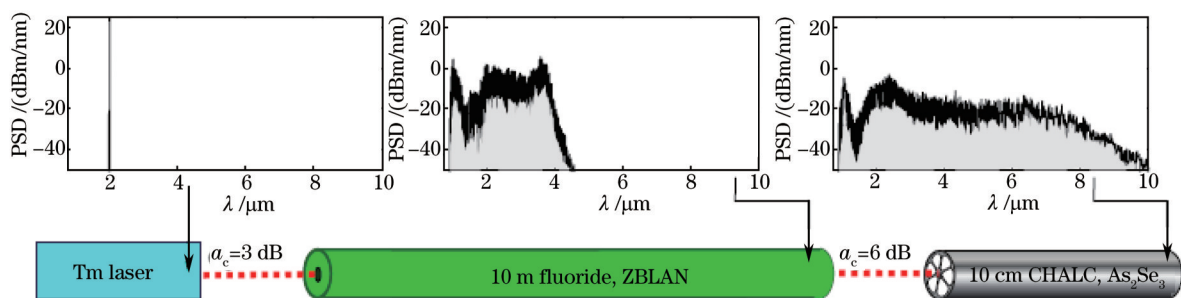


图8 ZBLAN 光纤输出的中红外 SC 谱抽运  $\text{As}_2\text{Se}_3$  光纤的装置原理图

Fig.8 Setup diagram of the output spectrum of  $\text{As}_2\text{Se}_3$  fiber pumped by mid-infrared SC spectra from ZBLAN fiber

## 5 存在的问题

虽然硫系玻璃光纤 SC 谱研究取得了很大的研究进展,但总体而言还存在以下明显问题:

1) 目前国际上已报道的能产生中红外 SC 谱的硫系玻璃光纤基本都以  $\text{As}_2\text{S}_3$  或  $\text{As}_2\text{Se}_3$  两种玻璃为基质材料,由于 As 元素有毒,这两种玻璃材料在制备过程以及后期的光纤拉制、测试、使用等诸多环节都存在明显的安全隐患,亟需探索新颖的无 As 环保型硫系玻璃材料。

2) 国际上硫系光纤的中红外 SC 谱实验主要基于悬吊芯的硫系微结构光纤和传统结构的拉锥光纤这两

种,缺乏灵活多样的光纤结构设计,对其他结构的硫系光纤的色散、中红外 SC 谱等非线性特性与不同结构、不同材料特性之间的内在关联缺乏系统研究。此外,悬吊芯结构的硫系微结构光纤制备复杂、抽运耦合时效率低、难度大、光纤限制损耗高,需要设计和制备新型结构硫系光纤。

3) 在硫系光纤中红外 SC 谱的抽运技术方面,现有的理论和方法主要依据时域非线性薛定谔方程理论数值模拟和单波长脉冲激光器抽运实验方案,对不同类型和不同结构硫系光纤中的非线性过程缺乏准确的描述。实验中基本采用单波长脉冲激光抽运,但难以获得极宽(大于 5  $\mu\text{m}$ )中红外 SC 谱输出,而且对脉冲激光作用下硫系光纤材料的损伤阈值和特性也鲜有问津。

4) 国际上多家商业公司已开发出波段覆盖可见至近红外波段(约为 2  $\mu\text{m}$ )的 SC 谱输出的光纤耦合模块产品,但到目前为止尚无商用的硫系光纤耦合模块,因此,需要对硫系光纤耦合封装技术进行相关的积极探索,以解决硫系光纤红外 SC 谱光源的实用化问题。

## 6 结 论

硫系光纤目前被公认为是唯一可实现从中红外到远红外的超宽红外 SC 谱输出的非线性光纤,随着相关光纤制作工艺、传输理论、性能测试和器件耦合技术的不断改进和完善,相信未来硫系光纤在中红外 SC 谱应用领域具有极为广阔的前景。

## 参 考 文 献

- 1 R R Alfano, S L Shapiro. Observation of self-phase modulation and small-scale filaments in crystals and glasses[J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24(11): 592.
- 2 Yang Weiqiang, Zhang Bin, Xue Guanghui, *et al.*. 13  $\mu\text{m}$  all fiber mid-infrared supercontinuum source[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0305001.  
杨未强, 张 斌, 薛光辉, 等. 13  $\mu\text{m}$  全光纤中红外超连续谱光源[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0305001.
- 3 J G Daly. Mid-infrared laser applications[C]. *Optics, Electro-Optics, and Laser Applications in Science and Engineering*, 1991: 94-99.
- 4 R W Waynant, I K Ilev, I Gannot. Mid-infrared laser applications in medicine and biology[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2001, 359(1780): 635-644.
- 5 P Werle, F Slemr, K Maurer, *et al.*. Near- and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, 37(2): 101-114.
- 6 Y Yu, X Gai, T Wang, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation in chalcogenides[J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(8): 1075-1086.
- 7 U Willer, M Saraji, A Khorsandi, *et al.*. Near- and mid-infrared laser monitoring of industrial processes, environment and security applications[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(7): 699-710.
- 8 V Kumar, A George, W Reeves, *et al.*. Extruded soft glass photonic crystal fiber for ultrabroad supercontinuum generation[J]. *Opt Express*, 2002, 10(25): 1520-1525.
- 9 D D Hudson, E C Mägi, A C Judge, *et al.*. Highly nonlinear chalcogenide glass micro/nanofiber devices: Design, theory, and octave-spanning spectral generation[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(23): 4660-4669.
- 10 S Fujino, K Morinaga. Material dispersion and its compositional parameter of oxide glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1997, 222: 316-320.
- 11 P France, S Carter, M Moore, *et al.*. Progress in fluoride fibres for optical communications[J]. *British Telecom Technology Journal*, 1987, 5(2): 28-44.
- 12 S R Friberg, P W Smith. Nonlinear optical glasses for ultrafast optical switches[J]. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 1987, 23(12): 2089-2094.
- 13 E Vogel, M Weber, D Krol. Nonlinear optical phenomena in glass[J]. *Physics and Chemistry of Glasses*, 1991, 32(6): 231-254.
- 14 S Shabahang, G Tao, M P Marquez, *et al.*. Low threshold supercontinuum generation in highly nonlinear robust step-index chalcogenide nanotapers[C]. *Frontiers in Optics*, 2013: FTu5B.2.
- 15 D P Wei, T Galstian, I Smolnikov, *et al.*. Spectral broadening of femtosecond pulses in a single-mode As-S glass fiber [J]. *Opt Express*, 2005, 13(7): 2439-2443.
- 16 M El-Amraoui, G Gadret, J Jules, *et al.*. Microstructured chalcogenide optical fibers from As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> glass: towards new IR

- broadband sources[J]. *Opt Express*, 2010, 18(25): 26655–26665.
- 17 L Shaw, P Thielen, F Kung, *et al.*. IR supercontinuum generation in As–Se photonic crystal fiber[C]. *Conf Adv Solid State Lasers (ASSL)*, Seattle, WA, 2005: TuC5.
- 18 R R Gattass, L Brandon Shaw, V Nguyen, *et al.*. All-fiber chalcogenide-based mid-infrared supercontinuum source[J]. *Optical Fiber Technology*, 2012, 18(5): 345–348.
- 19 A Heidt, J Price, C Baskiotis, *et al.*. Mid-infrared ZBLAN fiber supercontinuum source using picosecond diode-pumping at 2  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt Express*, 2013, 21(20): 24281–24287.
- 21 A Tuniz, G Brawley, D Moss, *et al.*. Two-photon absorption effects on Raman gain in single mode  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide glass fiber[J]. *Opt Express*, 2008, 16(22): 18524–18534.
- 22 W Gao, Z Duan, K Asano, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation in a four-hole  $\text{As}_2\text{S}_5$  chalcogenide microstructured optical fiber[J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2014, 116(4): 847–853.
- 23 U Møller, Y Yu, C R Petersen, *et al.*. High average power mid-infrared supercontinuum generation in a suspended core chalcogenide fiber[C]. *Nonlinear Photonics*, 2014: JM5A. 54.
- 24 A Marandi, C W Rudy, V G Plotnichenko, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation in tapered chalcogenide fiber for producing octave-spanning frequency comb around 3  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt Express*, 2012, 20(22): 24218–24225.
- 25 R R Gattass, L Brandon Shaw, V Nguyen, *et al.*. All-fiber chalcogenide-based mid-infrared supercontinuum source[J]. *Optical Fiber Technology*, 2012, 18(5): 345–348.
- 26 I Savellii, O Mouawad, J Fatome, *et al.*. Mid-infrared 2000-nm bandwidth supercontinuum generation in suspended-core microstructured Sulfide and Tellurite optical fibers[J]. *Opt Express*, 2012, 20(24): 27083–27093.
- 27 S Shabahang, M P Marquez, G Tao, *et al.*. Octave-spanning infrared supercontinuum generation in robust chalcogenide nanotapers using picosecond pulses[J]. *Opt Letters*, 2012, 37(22): 4639–4641.
- 28 Shi Chunzheng, Li Min, Liao Yanbiao, *et al.*. Dispersion measurement of  $\text{As}_2\text{S}_3$  fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(5): 535–538.  
施纯峥, 黎敏, 廖延彪, 等. 硫系光纤的色散测量[J]. *光学学报*, 2002, 22(5): 535–538.
- 29 Q Zhang, M Li, Q Hao, *et al.*. Fabrication and characterization of on-chip optical nonlinear chalcogenide nanofiber devices[J]. *Opt Lett*, 2010, 35(22): 3829–3831.
- 30 C Lin, H Tao, X Zheng, *et al.*. Second-harmonic generation in IR-transparent  $\beta$ - $\text{GeS}_2$  crystallized glasses[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(4): 437–439.
- 31 G Yang, H Jain, A Ganjoo, *et al.*. A photo-stable chalcogenide glass[J]. *Opt Express*, 2008, 16(14): 10565–10571.
- 32 G Lenz, J Zimmermann, T Katsufuji, *et al.*. Large Kerr effect in bulk Se-based chalcogenide glasses[J]. *Opt Lett*, 2000, 25(4): 254–256.
- 33 A Jin, Z Wang, J Hou, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation in arsenic trisulfide microstructured optical fibers[C]. *SPIE/OSA/IEEE Asia Communications and Photonics*, 2011, 8307: 83070V.
- 34 Wang Xiaoyan, Li Shuguang, Liu Shuo, *et al.*. Mid-infrared  $\text{As}_2\text{S}_3$  chalcogenide glass broadband normal dispersion photonic crystal fiber with high birefringence and high nonlinearity[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(6): 367–372.  
王晓琰, 李曙光, 刘硕, 等. 中红外高双折射高非线性宽带正常色散  $\text{As}_2\text{S}_3$  光子晶体光纤[J]. *物理学报*, 2011, 60(6): 367–372.
- 35 Xia Lanye, Wen Jianguo, Zhao Chujun, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation from microstructured chalcogenide fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(4): 67–71.  
夏兰叶, 文建国, 赵楚军, 等. 微结构硫化物光纤中中红外超连续谱的产生[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(4): 67–71.
- 36 Yang Peilong, Dai Shixun, Yi Changshen, *et al.*. Design and performance of mid-IR dispersion in photonic crystal fiber prepared from a flattened chalcogenide glass[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(1): 014210.  
杨佩龙, 戴世勋, 易昌申, 等. 中红外色散平坦硫系光子晶体光纤设计及性能研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(1): 014210.
- 37 S Wei, Y Xu, S Dai, *et al.*. Theoretical studies on mid-infrared amplification in  $\text{Ho}^{3+}$ -doped chalcogenide glass fibers[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2013, 416: 64–68.
- 38 C Yi, P Zhang, F Chen, *et al.*. Fabrication and characterization of  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{S}_{65}$  chalcogenide glass for photonic crystal fibers[J]. *Applied Physics B*, 2014, 116(3): 653–658.
- 39 Lü Sheqin, Li Chaoran, Wu Yuehao, *et al.*. Research progress of micro/nano-optical device based on chalcogenide glass[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(5): 050001.  
吕社钦, 李超然, 吴越豪, 等. 硫系玻璃微纳光器件研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 050001.



- 40 Cao Fengzhen, Zhang Peiqing, Dai Shixun, *et al.*. Research of high nonlinear chalcogenide photonic crystal fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 060003.  
曹凤珍, 张培晴, 戴世勋, 等. 高非线性硫系玻璃光子晶体光纤研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 060003.
- 41 J Sanghera, C Florea, L Shaw, *et al.*. Non-linear properties of chalcogenide glasses and fibers[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2008, 354(2): 462-467.
- 42 J Fatome, C Fortier, T N Nguyen, *et al.*. Linear and nonlinear characterizations of chalcogenide photonic crystal fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(11): 1707-1715.
- 43 M El-Amraoui, J Fatome, J C Jules, *et al.*. Strong infrared spectral broadening in low-loss As-S chalcogenide suspended core microstructured optical fibers[J]. *Opt Express*, 2010, 18(5): 4547-4556.
- 44 M El-Amraoui, G Gadret, J C Jules, *et al.*. Microstructured chalcogenide optical fibers from As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> glass: towards new IR broadband sources[J]. *Opt Express*, 2010, 18(25): 26655-26665.
- 45 W Gao, M El Amraoui, M Liao, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation in a suspended-core As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> chalcogenide microstructured optical fiber[J]. *Opt Express*, 2013, 21(8): 9573-9583.
- 46 M Liao, C Chaudhari, G Qin, *et al.*. Fabrication and characterization of a chalcogenide-tellurite composite microstructure fiber with high nonlinearity[J]. *Opt Express*, 2009, 17(24): 21608-21614.
- 47 D I Yeom, E C Mägi, M R E Lamont, *et al.*. Low-threshold supercontinuum generation in highly nonlinear chalcogenide nanowires[J]. *Opt Letters*, 2008, 33(7): 660-662.
- 48 A Marandi, C W Rudy, N C Leindecker, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation from 2.4 μm to 4.6 μm in tapered chalcogenide fiber[C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, 2012: CTh4B.5.
- 49 J H V Price, T M Monroe, H Ebendorff-Heidepriem, *et al.*. Non-silica microstructured optical fibers for mid-IR supercontinuum generation from 2 μm~5 μm[C]. *SPIE*, 2006, 6102: 61020A.
- 50 S Roy, P Roy Chaudhuri. Supercontinuum generation in visible to mid-infrared region in square-lattice photonic crystal fiber made from highly nonlinear glasses[J]. *Opt Commun*, 2009, 282(17): 3448-3455.
- 51 J Hu, C R Menyuk, L B Shaw, *et al.*. Maximizing the bandwidth of supercontinuum generation in As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> chalcogenide fibers[J]. *Opt Express*, 2010, 18(7): 6722-6739.
- 52 R J Weiblen, A Docherty, J Hu, *et al.*. Calculation of the expected bandwidth for a mid-infrared supercontinuum source based on As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> chalcogenide photonic crystal fibers[J]. *Opt Express*, 2010, 18(25): 26666-26674.
- 53 A Jin, Z Wang, J Hou, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation in arsenic trisulfide microstructured optical fibers[C]. *SPIE*, 2011, 8307: 83070V.
- 54 W Yuan. 2-10 μm Mid-infrared supercontinuum generation in As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> photonic crystal fiber[C]. *Frontiers in Optics*, 2013: FTu5B.3.
- 55 B Ung, M Skorobogatiy. Chalcogenide microporous fibers for linear and nonlinear applications in the mid-infrared[J]. *Opt Express*, 2010, 18(8): 8647-8659.
- 56 A Ben Salem, R Cherif, M Zghal. Tapered As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> chalcogenide photonic crystal fiber for broadband mid-infrared supercontinuum generation[C]. *Frontiers in Optics*, 2011: FMG6.

栏目编辑: 史 敏