

# 新型高功率中红外光纤激光材料与超连续谱 激光研究进展

贾志旭, 姚传飞, 李真睿, 贾世杰, 赵志鹏, 秦伟平, 秦冠仕\*

吉林大学电子科学与工程学院集成光电子学国家重点实验室, 吉林 长春 130012

**摘要** 制备出一种具有较好热稳定性和化学稳定性的氟碲酸盐玻璃光纤, 并利用其作为非线性介质研制出光谱范围覆盖  $0.6\sim 5.4\ \mu\text{m}$  的宽带超连续谱(SC)激光光源和平均功率约为 20 W、光谱范围覆盖  $1\sim 4\ \mu\text{m}$  的 SC 激光光源。主要对目前国内外高功率中红外 SC 激光光源的研究进展进行了总结, 包括氟化物玻璃光纤和氟碲酸盐玻璃光纤的材料特点和以其作为非线性介质的 SC 激光光源, 并对此类 SC 激光光源的进一步发展进行了展望。

**关键词** 超快激光; 超连续产生; 红外和远红外激光; 光纤激光; 激光材料; 非线性光学

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0508006

## Progress on Novel High Power Mid-Infrared Fiber Laser Materials and Supercontinuum Laser

Jia Zhixu, Yao Chuanfei, Li Zhenrui, Jia Shijie, Zhao Zhipeng, Qin Weiping, Qin Guanshi\*

*State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,  
Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China*

**Abstract** In this study, a fluorotellurite glass fiber with relatively good thermal and chemical stability was developed. Using this glass fiber as a nonlinear medium, the broadband supercontinuum (SC) generation of  $0.6\sim 5.4\ \mu\text{m}$  was experimentally obtained. An SC light source with an average power of about 20 W and a spectral range of  $1\sim 4\ \mu\text{m}$  was also obtained. This study mainly focuses on the recent progress on the high-power mid-infrared SC light sources, including the material characteristics of fluoride glass fibers and fluorotellurite glass fibers and the SC laser sources based on the former. The future development of such SC laser sources is prospected.

**Key words** ultrafast optics; supercontinuum generation; infrared and far-infrared laser; fiber laser; laser materials; nonlinear optics

**OCIS codes** 320.6629; 140.3070; 060.3510; 140.3380; 190.4370

## 1 引 言

超连续谱(SC)激光光源是当一束高峰值功率激光与介质相互作用时,在自相位调制、交叉相位调制、受激拉曼散射和光孤子产生与劈裂等多种非线性效应的共同作用下获得的一种具有宽带光谱输出的激光光源<sup>[1-2]</sup>。1970年,Alfano等<sup>[3-4]</sup>首次报道了玻璃中SC激光产生。从那之后,SC激光光源由于

其在光谱学研究、超短脉冲激光产生、光通信等诸多领域的应用前景而得到研究者的广泛关注。由于在光纤中较易获得高的激光功率密度,使得光纤被认为是研制SC激光光源的理想介质之一。20世纪90年代后期,具有色散和非线性特性可调以及无截止单模传输特性的光子晶体光纤(PCF)的研制成功更是掀起了宽带高亮度SC激光光源研究的热潮<sup>[5-8]</sup>。目前基于石英PCF的可见近红外SC激光

收稿日期: 2019-01-29; 修回日期: 2019-03-11; 录用日期: 2019-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(61527823, 61378004, 61605058, 61827821, 11474132)、吉林省重点科技研发项目(20180201120GX)、吉林省重大科技招标专项(20170203012GX)、装备预研教育部联合基金(6141A02022413)、吉林省优秀青年人才基金(20180520188JH)

\* E-mail: qings@jlu.edu.cn

光源的平均输出功率已经超过 200 W<sup>[9]</sup>。然而石英光纤因其红外透光窗口相对较窄(300~2500 nm),无法用于研制中红外波段 SC 激光光源。中红外波段涵盖许多重要分子的特性吸收谱线,使得工作中红外波段的 SC 激光光源在分子光谱学、化学气体检测、环境污染监测等领域有非常重要的应用<sup>[10-13]</sup>。中红外波段覆盖“水与氨基化合物的吸收峰”,可被所有含羟基或氨基的物质强烈吸收,这使该波段激光光源可用于医疗手术等领域;另外,3~5  $\mu\text{m}$  中红外波段是大气的重要红外透过窗口之一,工作波长覆盖 3~5  $\mu\text{m}$  的高功率 SC 激光光源可应用于大气通信以及红外光电对抗等领域。为满足应用需要,研究者探索出一系列在中红外波段具有低传输损耗的碲酸盐玻璃光纤、氟化物玻璃光纤和硫系玻璃光纤等用于中红外波段 SC 激光光源研制。其中硫系玻璃光纤具有高非线性系数、宽红外透过窗口,是研制宽带中红外 SC 激光光源的理想介质材料之一<sup>[14-17]</sup>。目前基于硫系玻璃光纤的 SC 激光光源的工作波长范围已覆盖至大于 13  $\mu\text{m}$ <sup>[18-20]</sup>。然而由于该类光纤的损伤阈值较低,目前基于硫系玻璃光纤的 SC 光源的最大输出功率仅约 565 mW<sup>[21]</sup>。在高功率中红外波段 SC 激光光源研究方面,研究人员利用具有较高激光损伤阈值的氟化物  $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$  (ZBLAN) 玻璃光纤作为非线性介质,研制出 10 W 量级中红外波段 SC 激光光源<sup>[22-27]</sup>。目前文献报道的基于 ZBLAN 玻璃光纤的 SC 激光光源的最大输出功率约 24.3 W,相应的光谱范围覆盖 1.9~3.3  $\mu\text{m}$ <sup>[25]</sup>。但是由于 ZBLAN 玻璃易潮解<sup>[28]</sup>,基于 ZBLAN 玻璃光纤的激光光源在长期运转、尤其是高功率运转过程中,光纤端面易损伤<sup>[29]</sup>,这在一定程度上影响了 ZBLAN 玻璃光纤在实用化高功率中红外光源研制中的应用。与氟化物玻璃和硫系玻璃相比,碲酸盐玻璃具有较好的热稳定性和化学稳定性。在基于碲酸盐玻璃光纤的 SC 激光光源研究方面,美国 NP Photonics 公司的 Thapa 等<sup>[30]</sup>和中国北京工业大学的 Shi 等<sup>[31]</sup>先后利用碲酸盐玻璃光纤作为非线性介质获得了瓦量级 SC 激光输出。另外,美国 NP Photonics 公司最近推出了一款光谱范围覆盖 1~5  $\mu\text{m}$  的 SC 激光光源产品,其输出功率也为瓦量级 (<http://www.npphotonics.com/mid-infrared-transport-fibers-1-5-m>)。最近,笔者研究组经过大量实验筛选出一种具有较好热稳定性和化学稳定性的氟碲酸盐玻璃,并利用其作为介质

材料设计制备出一系列氟碲酸盐玻璃光纤<sup>[32-35]</sup>。进一步利用这些氟碲酸盐玻璃光纤作为非线性介质,研制出光谱范围覆盖 0.6~5.4  $\mu\text{m}$  的宽带 SC 激光光源和平均功率约 20 W、光谱范围覆盖 1~4  $\mu\text{m}$  的 SC 激光光源。综上,目前可用于研制 10 W 量级 SC 激光光源的非线性介质主要有 ZBLAN 玻璃光纤和氟碲酸盐玻璃光纤。本文主要介绍了这两种光纤材料的特点及相应 SC 激光光源的研究进展。

## 2 高功率中红外光纤激光材料

### 2.1 氟化物玻璃材料

现阶段研制高功率中红外 SC 光纤激光光源所选用的非线性介质主要是一种组分为 ZBLAN 的氟化物玻璃光纤。ZBLAN 玻璃具有较宽的中红外透过窗口(0.3~7  $\mu\text{m}$ )和较低的声子能量(约 580  $\text{cm}^{-1}$ )。目前市场上已有商用的 ZBLAN 玻璃光纤,其在 0.5~4  $\mu\text{m}$  波段的损耗小于 0.3 dB/m (Fiberlabs Inc. <https://www.fiberlabs-inc.com/technology/>)。基于 ZBLAN 玻璃光纤的 SC 激光光源的光谱范围已覆盖紫外 6.28  $\mu\text{m}$  波段<sup>[36]</sup>,最大平均输出功率已大于 20 W<sup>[24-25]</sup>。但是 ZBLAN 光纤的抗潮解能力较差,Bei 等<sup>[28]</sup>在室温下将 ZBLAN 玻璃浸泡在水中 0、5、30、60、90 min 后,玻璃的表面观察到明显的水解层,而且玻璃在 2.9  $\mu\text{m}$  波段出现明显的羟基吸收峰,如图 1 所示。这使得相关光纤激光器在使用过程中,尤其是在高功率工作模式下,输出光纤端面易损伤。最近,加拿大拉瓦尔大学的 Aydin 等<sup>[29]</sup>研究了基于 ZBLAN 光纤的高功率中红外光纤激光器的长期稳定性。当中红外激光输出功率为 20 W、光纤输出端加未掺杂 ZBLAN 光纤作为保护端帽时,激光器运转约 10 min 后,即观察到 ZBLAN 端帽损坏。因此,为了进一步提高中红外激光光源的输出功率和长期稳定性,需要探索新的中红外光纤激光材料。

### 2.2 氟碲酸盐玻璃材料

针对氟化物玻璃化学稳定性和热稳定性差这一问题,笔者研究组经过几年的实验探索,筛选出了一种组分为  $\text{TeO}_2\text{-BaF}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  (TBY) 的氟碲酸盐玻璃<sup>[32]</sup>。TBY 玻璃具有较宽的红外透过窗口(0.4~6  $\mu\text{m}$ ),其玻璃转变温度(约 424  $^\circ\text{C}$ )比 ZBLAN 玻璃的转变温度(约 252  $^\circ\text{C}$ )高出约 172  $^\circ\text{C}$ 。根据文献报道,ZBLAN 玻璃与水接触时会发生强烈的水解反应<sup>[28]</sup>,不利于基于 ZBLAN 玻璃光纤的高功率激

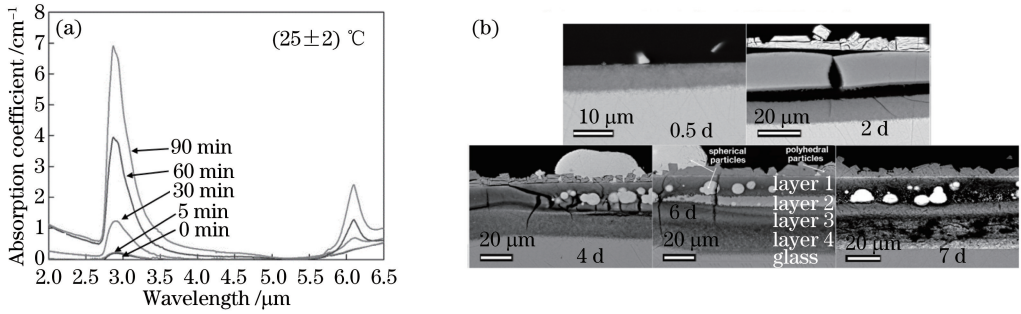


图 1 ZBLAN 玻璃经不同时间浸水处理后的吸收光谱和表面照片<sup>[28]</sup>。(a) ZBLAN 玻璃浸泡在水中 0、5、30、60、90 min 后的吸收光谱；(b) ZBLAN 玻璃浸水处理 0.5、2、4、6、7 d 后表面的照片

Fig. 1 Absorption spectra and surface photos of ZBLAN glass after dipping in water for different time<sup>[28]</sup>. (a) Absorption spectra of ZBLAN glass after dipping in water for 0, 5, 30, 60, and 90 min, respectively; (b) photos of ZBLAN glass surface dipping in water for 0.5, 2, 4, 6, and 7 d, respectively

光光源的长时间稳定运转。为了验证 TBY 玻璃的抗潮解能力，笔者研究组将抛光后的 TBY 玻璃样品浸于水中处理 12 d，其透射光谱与浸水处理前相比均未观察到明显变化<sup>[37]</sup>。图 2 给出了 TBY 玻璃样品浸水处理前后透过光谱。另外，浸水处理前后，玻璃样品质量未测到明显变化，样品表面未形成含水层。该实验结果表明 TBY 玻璃具有良好的抗潮解能力。另外，根据文献报道，利用空气包层的碲酸盐微结构光纤作为非线性介质，研制出的 SC 光源在长期使用过程中，其长波带边被限制在 3 μm 左右<sup>[38]</sup>。这是因为随着时间的推移，空气中的灰尘或水分子会进入空气孔进而粘附在纤芯表面，导致光纤损耗（尤其是波长大于 3 μm 区域）的增加，相关器件性能下降。针对这一问题，实验中笔者研究组选用一种与 TBY 玻璃具有较大折射率差、而热性质相近的 ABCYSMT (AlF<sub>3</sub>-BaF<sub>2</sub>-CaF<sub>2</sub>-YF<sub>3</sub>-SrF<sub>2</sub>-MgF<sub>2</sub>-TeO<sub>2</sub>) 玻璃作为包层材料，探索制备出一种具有较大数值孔径 (NA) 的全固态氟碲酸盐光纤<sup>[34-35]</sup>。测试结果表明，ABCYSMT 玻璃也具有较

好的抗潮解能力，如图 2 所示。

热机械性质是表征材料在高功率激光应用潜力方面的另一个重要因素，相关品质因子可表示为<sup>[39-40]</sup>

$$R_s = \frac{k(1-\nu)}{\alpha E} \sigma_F, \quad (1)$$

式中， $k$  为热导率， $\nu$  为泊松比， $\alpha$  为热膨胀系数， $E$  为弹性模量， $\sigma_F$  为断裂强度。根据相关测试参数，笔者研究组计算了 TBY 和 ABCYSMT 玻璃的热品质因子，相关参数和计算结果如表 1 所示<sup>[37]</sup>。计算结果表明，TBY 和 ABCYSMT 玻璃的热品质因子分别约为 ZBLAN 玻璃的 1.56 倍和 1.91 倍。这表明与 ZBLAN 玻璃相比，TBY 和 ABCYSMT 玻璃在高功率激光应用中可承受更强的热冲击。基于 TBY 和 ABCYSMT 玻璃的全固态高数值孔径氟碲酸盐玻璃光纤可用于研制高功率中红外激光光源。表 1 ZBLAN, TBY 和 ABCYSMT 玻璃的热机械性质参数<sup>[37]</sup>

Table 1 Thermal and mechanical properties of ZBLAN, TBY and ABCYSMT glasses<sup>[37]</sup>

Parameter	ZBLAN	TBY	ABCYSMT
$k / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	0.63	0.56	0.79
$\nu$	0.31	0.23	0.27
$\alpha / (10^{-6} \text{K}^{-1})$	17.2	14.8	15.4
$E / \text{GPa}$	58.3	56.53	72.52
$\sigma_F / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	0.32	0.42	0.51
$R_s / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1/2})$	0.138	0.215	0.263

### 3 高功率中红外 SC 激光光源研究进展

#### 3.1 基于 ZBLAN 玻璃光纤的 SC 激光光源

2006 年，美国威斯康星大学的 Hagen 等<sup>[41]</sup>使用脉冲宽度为 900 fs 的 1560 nm 锁模光纤激光器作为抽运源，在 91 cm 长的 ZBLAN 光纤中获得了光谱范围覆盖 1.8~3.4 μm 的中红外 SC 激光。由

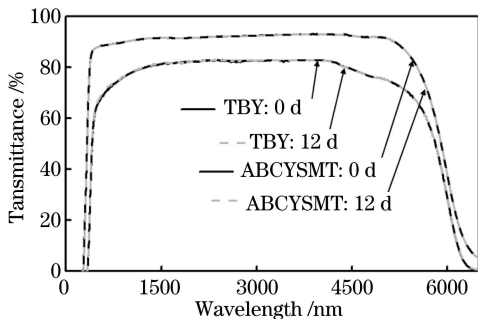


图 2 浸水前后 TBY 玻璃和 ABCYSMT 玻璃的透过光谱<sup>[37]</sup>

Fig. 2 Transmission spectra of TBY and ABCYSMT glasses before and after dipping in water<sup>[37]</sup>

于在波长大于  $3.5 \mu\text{m}$  区域, ZBLAN 玻璃光纤的损耗迅速增大, 如图 3 所示 (Fiberlabs Inc. <https://www.fiberlabs-inc.com/technology/>), 这在一定程度上限制了相应 SC 激光光源的工作波长范围进一步向长波拓展。为解决这一问题, 2009 年, 日本丰田工业大学的 Qin 等<sup>[36]</sup> 提出将光纤损耗与非线性光学效应协同控制实现光谱展宽。他们利用具有兆瓦量级峰值功率的  $1450 \text{ nm}$  飞秒激光作为抽运源, 在  $2 \text{ cm}$  长的 ZBLAN 玻璃光纤获得了覆盖  $0.35 \sim 6.28 \mu\text{m}$  波段的 SC 激光光源, 结果如图 4 所示, 平均输出功率为毫瓦量级。

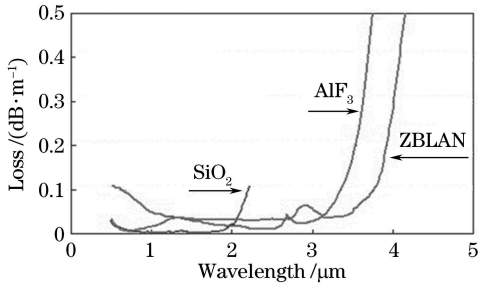


图 3 石英、氟化铝基和 ZBLAN 玻璃光纤的损耗谱  
Fig. 3 Loss spectra of silica,  $\text{AlF}_3$  and ZBLAN glass fiber

在基于 ZBLAN 玻璃光纤的高功率 SC 激光光源研究方面, 2009 年, 美国密歇根大学的 Xia 等<sup>[22]</sup> 提出利用高平均功率的  $1.5 \mu\text{m}$  纳秒脉冲光纤激光器作为抽运源, 将中红外 SC 激光光源的功率提升至  $10.5 \text{ W}$ , 其光谱范围覆盖  $0.8 \sim 3.5 \mu\text{m}$  波段。

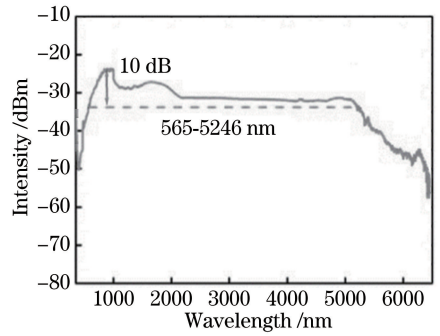


图 4 当  $1450 \text{ nm}$  飞秒激光的平均抽运功率固定为  $20 \text{ mW}$  时, 从  $2 \text{ cm}$  长氟化物玻璃光纤输出端测得的 SC 光谱<sup>[36]</sup>  
Fig. 4 Measured SC spectrum from 2-cm-long fluoride fiber end when average pump power of  $1450 \text{ nm}$  femtosecond laser is fixed at  $20 \text{ mW}$ <sup>[36]</sup>

但其能量主要集中在  $0.8 \sim 2 \mu\text{m}$  波段, 在波长大于  $2 \mu\text{m}$  波段 ( $2 \sim 3.5 \mu\text{m}$ ) 的平均功率仅为瓦量级, 且光谱平坦性也相对较差。为了进一步提高 SC 激光光源在中红外波段的功率水平, 2014 年, 北京工业大学 Liu 等<sup>[24]</sup> 选用工作波长更长的高功率  $1963 \text{ nm}$  皮秒脉冲激光系统作为抽运源, 利用 ZBLAN 玻璃光纤作为非线性介质, 搭建 SC 激光系统, 实验装置如图 5 所示。其所用种子激光为基于  $\text{Tm}/\text{Ho}$  共掺光纤的  $1963 \text{ nm}$  锁模光纤激光器, 种子激光经两级掺铥光纤放大器放大后输入约  $10 \text{ m}$  长的 ZBLAN 玻璃光纤, 当抽运功率为  $42 \text{ W}$  时, 获得的 SC 激光光源平均输出功率为  $21.8 \text{ W}$ , 其光谱范围覆盖  $1.9 \sim 3.8 \mu\text{m}$ , 如图 6 所示<sup>[24]</sup>。

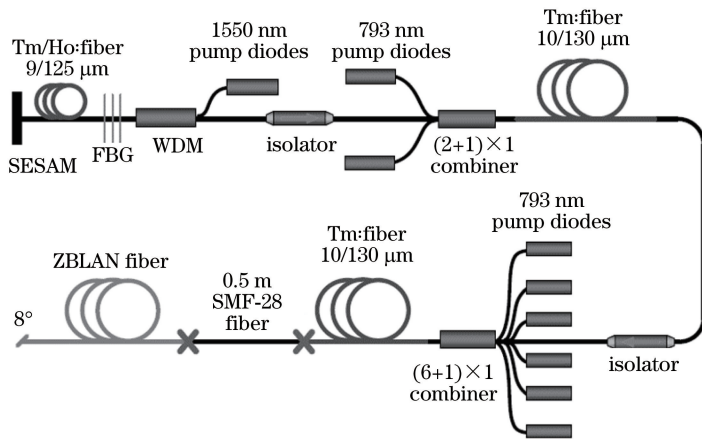


图 5 高功率中红外 SC 光谱测试系统示意图<sup>[24]</sup>  
Fig. 5 Schematic of high-power mid-IR SC system<sup>[24]</sup>

为了进一步提高 SC 激光光源在中红外波段的平坦性和红外转换效率, 2017 年, 国防科技大学的 Yin 等<sup>[27]</sup> 通过调控 SC 激光系统中光谱演化过程, 最终获得了平均功率为  $15.2 \text{ W}$ 、光谱范围覆盖  $1.9 \sim 4.2 \mu\text{m}$

的平坦 SC 激光光源, 如图 7 所示。其  $10 \text{ dB}$  光谱带宽为  $2090 \text{ nm}$  ( $1960 \sim 4050 \text{ nm}$ ), 在波长大于  $3 \mu\text{m}$  和大于  $3.8 \mu\text{m}$  波段范围功率分别为  $8.1 \text{ W}$  和  $1.08 \text{ W}$ , 功率占比分别为  $53.2\%$  和  $7.1\%$ 。



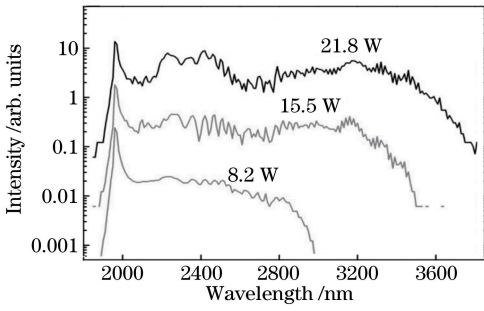


图 6 平均输出功率为 8.2, 15.5, 21.8 W 的 SC 光源光谱<sup>[24]</sup>

Fig. 6 Output SC spectra with average output powers of 8.2, 15.5, and 21.8 W<sup>[24]</sup>

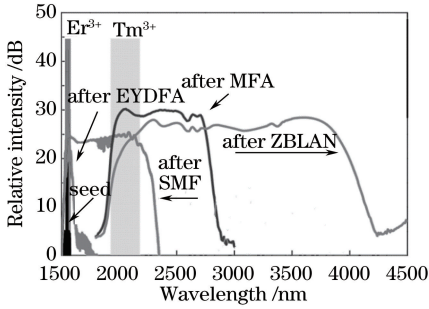


图 7 系统中不同位置光谱对比<sup>[27]</sup>

Fig. 7 Spectral comparison at different positions in the system<sup>[27]</sup>

另外,与 ZBLAN 玻璃光纤相比,InF<sub>3</sub>基玻璃光纤具有更宽的红外透过窗口<sup>[42-44]</sup>,是另外一种可用于研制宽带 SC 激光光源的氟化物光纤。2016 年,加拿大拉瓦尔大学的 Gauthier 等<sup>[42]</sup>利用工作波长为 2.75 μm 的皮秒激光器抽运 15 m 长的 InF<sub>3</sub>基玻璃光纤,获得了平均功率约为 8.0 mW、光谱范围覆盖 2.4~5.4 μm 的 SC 激光光源。2018 年,国防科技大学 Yang 等<sup>[44]</sup>搭建了基于 InF<sub>3</sub>基玻璃光纤的全光纤 SC 激光光源。其利用掺铥光纤激光放大系统抽运一段 10 m 长的 InF<sub>3</sub>基玻璃光纤,获得了平

均输出功率为 4.06 W、光谱覆盖范围 1.9~5.1 μm 的中红外 SC 激光光源。但是由于氟化物玻璃易潮解,相关激光器件在使用过程中,尤其是在高功率模式下,光纤端面易损伤,这使得该类激光器件输出功率水平难以进一步提升。

### 3.2 基于氟磷酸盐玻璃光纤的 SC 激光光源

考虑在光纤包层中引入空气孔结构,通过调整空气孔的分布、尺寸以及其与纤芯面积的比例,可实现对光纤色散、非线性系数、模式和限制损耗等参数的调控,使得微结构光纤成为研制宽带 SC 激光光源的理想非线性介质之一<sup>[1,45]</sup>。2016 年,利用 TBY 玻璃作为基质材料,笔者研究组<sup>[33]</sup>设计并制备出了一种“轮式结构”的氟磷酸盐微结构光纤,光纤截面如图 8 中插图所示,纤芯被 6 个空气孔所围绕,其直径约为 6 μm。采用回切法测得该光纤在 1560 nm 处损耗约为 3.2 dB/m。由于色散渐减微结构光纤的色散沿光纤长度连续变化,使得在宽光谱范围内满足四波混频或色散波产生的相位匹配条件。因此利用其作为非线性介质,有利于获得宽带、平坦 SC 激光光源<sup>[1]</sup>。实验中笔者研究组利用自制光纤拉伸系统,制备了拉锥氟磷酸盐微结构光纤,锥区最小光纤直径约为 1.1 μm。图 8(a)给出了纤芯直径随位置的变化关系。在光纤长度为 0~5 cm 范围内,纤芯直径约为 6 μm;随着光纤长度从 5 cm 增加至 7 cm,纤芯直径相应地从 6 μm 逐渐减小至 1.1 μm;随着光纤从 7 cm 增加至 8.3 cm,纤芯直径相应地从 1.1 μm 逐渐增大至 6 μm;光纤长度在 8.3~25 cm 范围内时,纤芯直径保持不变。锥区总长度约为 3.3 cm。笔者研究组计算了当纤芯直径分别为 6、3、1.1 μm 时基模的群速度色散(GVD)曲线,结果如图 8(b)所示,其零色散波长分别为 1730、1410、1003 nm。其相应的非线性系数分别为 152、576、4020 km<sup>-1</sup>·W<sup>-1</sup>。

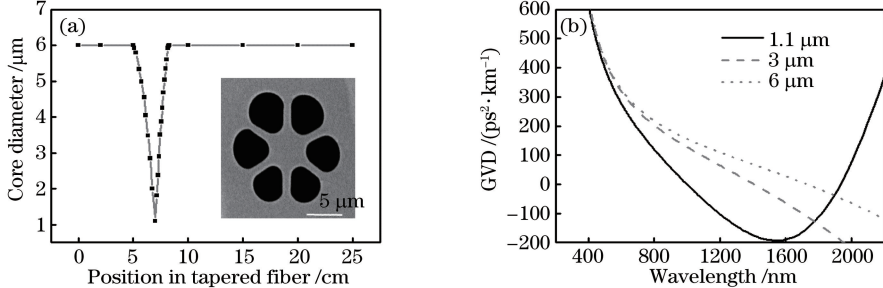


图 8 拉锥氟磷酸盐微结构光纤的芯径变化和不同芯径光纤的群速度色散(GVD)曲线<sup>[33]</sup>。(a)芯径随位置的变化关系,插图:未拉锥光纤端面的扫描电镜照片;(b)芯径分别为 1.1、3 和 6 μm 的光纤 GVD 曲线

Fig. 8 Core diameter variance in tapered fluorotellurite microstructured fiber and GVD curves of fiber segments with different core diameters<sup>[33]</sup>. (a) Core diameter versus position in the fiber, inset: scanning electron micrograph of untapered fiber; (b) calculated GVD curves of fiber segments with core diameters of 1.1, 3, and 6 μm, respectively

利用上述拉锥氟碲酸盐微结构光纤作为非线性介质,自制 1560 nm 飞秒光纤激光器作为抽运源,搭建了 SC 激光实验系统,如图 9 所示。1560 nm 飞秒光纤激光器的脉冲宽度约为 130 fs,重复频率约为 50 MHz,最大输出功率约为 600 mW。抽运激光通过透镜系统耦合进入氟碲酸盐微结构光纤,耦合效率约为 50%。随着抽运激光功率的增加,笔者研究组获得了光谱范围覆盖 470~2770 nm 的 SC 激光输出,实验结果如图 10(a)所示<sup>[33]</sup>。其光谱展宽机制主要为自相位调制、孤子劈裂、孤子自频移、以

及红移和蓝移色散波的产生。色散波波长由孤子的波长和相位匹配条件共同决定。计算结果显示,当孤子的中心波长为 2200 nm 时,随着芯径从 6 μm 减小到 1.3 μm,对应的色散波的中心波长从 1360 nm 变化到 650 nm。这一变化趋势和实验结果符合得非常好。作为对比,笔者研究组采用相同抽运激光参数,测试了未拉锥光纤(芯径约为 6 μm)中的 SC 激光产生,获得了光谱范围覆盖 1070~2700 nm 的 SC 激光输出,实验结果如图 10(b)所示<sup>[33]</sup>。

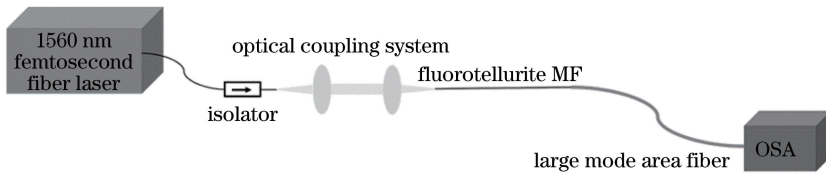


图 9 SC 产生实验装置示意图<sup>[33]</sup>

Fig. 9 Schematic of experimental setup for SC generation<sup>[33]</sup>

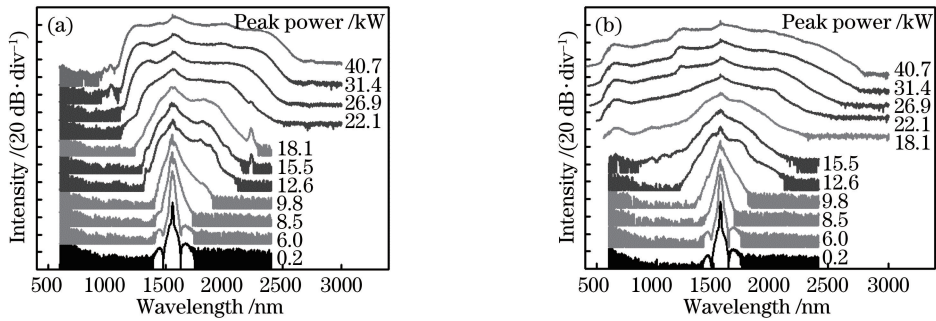


图 10 不同抽运功率下氟碲酸盐微结构光纤(MF)中输出 SC 光谱图<sup>[33]</sup>。(a)拉锥光纤;(b)未拉锥光纤

Fig. 10 Output SC spectra from fluorotellurite microstructured fiber (MF) for different pump powers<sup>[33]</sup>.

(a) Tapered fluorotellurite fiber; (b) untapered fluorotellurite fiber

虽然包层中带有空气孔的微结构光纤在宽带 SC 激光光源研制方面具有一定的优势。但是,微结构光纤在长期使用或存放过程中,空气中的水分子或灰尘会进入光纤包层中的空气孔进而粘附在纤芯表面,导致光纤损耗(尤其是在波长大于 3 μm 波段)明显增加,使得基于碲酸盐微结构光纤的 SC 激光光源的长波带边被限制在 3 μm 左右<sup>[38]</sup>。考虑这一问题,笔者研究组选用 TBY 和 ABCYSMT 玻璃分别作为纤芯和包层材料,研制出了一种低损耗全固态高数值孔径氟碲酸盐玻璃光纤<sup>[34-35]</sup>,用于研制宽带、高功率中红外 SC 激光光源。

在宽带 SC 激光光源研究方面,最近笔者研究组选用初始芯径约为 6 μm,背底损耗约为 1.7 dB/m 的全固态高数值孔径氟碲酸盐玻璃光纤,结合光纤

拉锥技术,制备出色散渐减的拉锥氟碲酸盐玻璃光纤,其总长度约为 3.05 cm,其中锥区长度约为 1.05 cm。在光纤拉锥区,光纤芯径从 6 μm 逐渐减小至 1.4 μm,如图 11(a)所示。图 11(b)给出了芯径分别为 6.0、5.0、4.0、3.0、2.6、2.2、1.8、1.4 μm 的氟碲酸盐玻璃光纤中基模的 GVD 曲线,其零色散波长分别为 1700、1619、1516、1390、1328、1263、1195、1180 nm。当纤芯直径为 3.0、2.6、2.2、1.8、1.4 μm 时,光纤中基模的色散曲线出现了第二个零色散波长,其值分别为 4200、3551、2940、2317、1655 nm。利用氟碲酸盐玻璃的非线性折射率 ( $3.5 \times 10^{-19} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ )算得在 2 μm 波长处上述不同芯径光纤的非线性系数分别为 69、97、143、232、291、374、488、632  $\text{km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

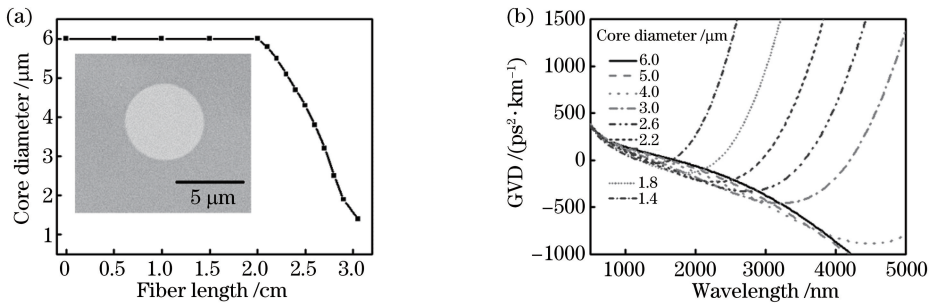


图 11 拉锥氟碲酸盐玻璃光纤的芯径变化和不同芯径光纤的群速度色散(GVD)曲线。(a)拉锥氟碲酸盐光纤的纤芯直径和光纤位置的关系,插图:未拉锥氟碲酸盐光纤的截面扫描电镜照片;(b)计算的不同芯径氟碲酸盐光纤的 GVD 曲线

Fig. 11 Core diameters of tapered fluorotellurite glass fiber and GVD curves of fiber segments with different core diameters. (a) Core diameter of tapered fluorotellurite fiber versus position in the fiber, inset: scanning electron micrograph of untapered fluorotellurite fiber; (b) calculated GVD curves of fluorotellurite fibers with different core diameters

笔者研究组利用上述拉锥全固态高数值孔径氟碲酸盐玻璃光纤作为非线性介质、自制约  $2 \mu\text{m}$  飞秒光纤激光器作为抽运源,搭建了 SC 激光实验系统,如图 12 所示。 $2 \mu\text{m}$  飞秒激光器的脉冲宽度约为 196 fs、重复频率约为 50 MHz、最大输出功率约为 3 W。图 12(b)和(c)分别给出了  $2 \mu\text{m}$  飞秒激光器的输出光谱和单脉冲轮廓图。抽运激光通过透镜

系统耦合进入氟碲酸盐玻璃光纤,耦合效率约为 80%。产生的 SC 光谱利用测量范围为 600 ~ 1700 nm(AQ6370)和 1200 ~ 2400 nm(AQ6375)的光谱分析仪(OSA)测得。更长波长(大于 2400 nm)的光谱通过带有铈化钢探测器的光栅光谱仪测得。使用功率计直接从拉锥氟碲酸盐玻璃光纤的输出端测得输出功率。

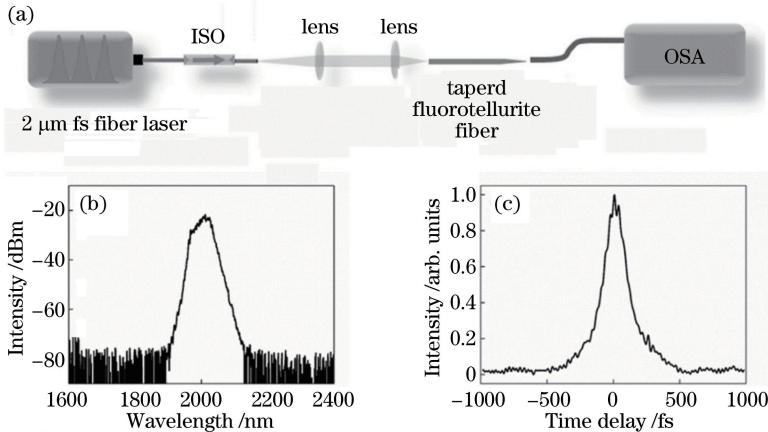


图 12 测试系统示意图和抽运激光参数。(a) SC 产生的实验装置图;(b)  $2 \mu\text{m}$  飞秒激光器的输出光谱;(c)抽运激光器的单脉冲轮廓图

Fig. 12 Schematic of experimental setup and parameters of pump laser. (a) Experimental setup for SC generation; (b) output spectrum of  $2 \mu\text{m}$  femtosecond laser; (c) single pulse profile of pump laser

图 13(a)给出了抽运激光平均输出功率不同时,从拉锥氟碲酸盐玻璃光纤中输出的 SC 激光光谱。随着抽运激光的平均功率从 0.26 W 逐渐增加到 1.57 W,在自相位调制、高阶孤子产生、孤子自频移以及蓝移和红移色散波的产生等多种非线性效应的共同作用下,光谱得到极大的展宽。当抽运光的平均功率约为 1.57W 时,笔者研究组获得了光谱范围在 600 ~ 5400 nm 的宽带 SC 激光光源,其输出功

率约为 0.85 W,相应的光光转换效率约为 54.1%,如图 13(b)所示。除残余抽运激光外,上述 SC 激光光源的 20 dB 带宽覆盖 0.6 ~ 4.2  $\mu\text{m}$ 。在约 4270 nm 波长处的光谱凹陷为空气中  $\text{CO}_2$  的吸收所致。该结果表明氟碲酸盐玻璃光纤可用于研制光谱覆盖范围从可见光到 5400 nm 的超宽带 SC 激光光源。

在高功率中红外 SC 激光光源研究方面,笔者

研究组通过优化  $2\ \mu\text{m}$  飞秒光纤激光放大系统, 将其平均输出功率提升至约  $40\ \text{W}$ 。图 14(a)和(b)给出了  $2\ \mu\text{m}$  飞秒光纤激光放大系统输出平均功率为  $40\ \text{W}$  时的光谱和平均输出功率随  $793\ \text{nm}$  抽运激光功率的变化关系。利用上述高功率  $2\ \mu\text{m}$  飞秒光纤激光系统作为抽运源、全固态高数值孔径氟碲酸盐玻璃光纤作为非线性介质, 笔者研究组搭建出高

功率中红外 SC 激光测试系统, 如图 14(c)所示。 $2\ \mu\text{m}$ 飞秒光纤激光系统的输出尾纤芯径约  $10\ \mu\text{m}$ , 高数值孔径氟碲酸盐玻璃光纤的芯径约为  $11\ \mu\text{m}$  (如图 15 中插图所示), 图 15 给出了芯径约为  $11\ \mu\text{m}$ 高数值孔径氟碲酸盐玻璃光纤中的色散曲线, 其零色散波长约为  $1954\ \text{nm}$ 。两光纤通过机械对接的方式连接, 相应的耦合效率约为  $80\%$ 。

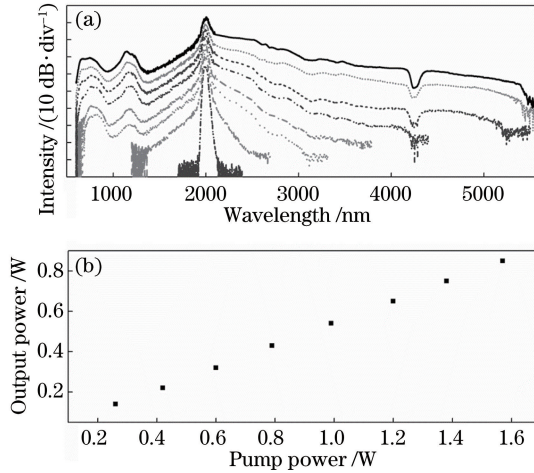


图 13 不同抽运功率下, 拉锥氟碲酸盐光纤中输出的 SC 光谱及相应的功率。(a)拉锥氟碲酸盐光纤中产生的 SC 光谱随抽运激光平均功率的变化关系, 从下至上, 抽运激光平均依次为  $0.26$ 、 $0.42$ 、 $0.6$ 、 $0.79$ 、 $0.99$ 、 $1.2$ 、 $1.38$ 、 $1.57\ \text{W}$ ; (b) SC 激光光源的平均功率随抽运激光平均功率的变化关系

Fig. 13 Output SC spectra and relative powers from tapered fluorotellurite fiber for different pump powers. (a) Measured SC spectra from tapered fiber for different average pump powers of  $0.26$ ,  $0.42$ ,  $0.6$ ,  $0.79$ ,  $0.99$ ,  $1.2$ ,  $1.38$  and  $1.57\ \text{W}$  from bottom to top, respectively; (b) average output power of SC laser source versus pump power

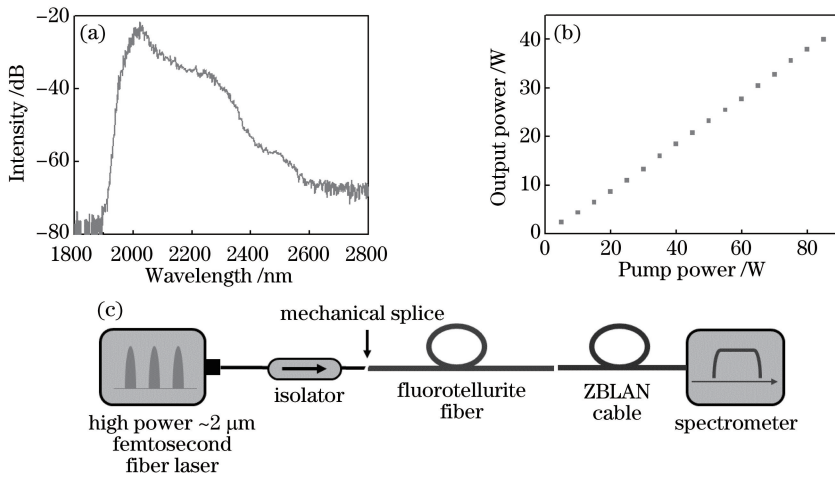


图 14 抽运激光参数及相应测试系统示意图。(a)平均输出功率为  $40\ \text{W}$  时,  $2\ \mu\text{m}$  飞秒激光放大系统的输出光谱; (b)  $2\ \mu\text{m}$  飞秒激光放大系统的输出功率随  $793\ \text{nm}$  抽运激光功率的变化关系图; (c)高功率 SC 激光产生的实验装置图

Fig. 14 Parameters of pump laser and schematic of experimental setup. (a) Output spectrum of  $2\ \mu\text{m}$  femtosecond laser amplifying system when average output power is  $40\ \text{W}$ ; (b) output power of  $2\ \mu\text{m}$  femtosecond laser amplifying system versus pump power of  $793\ \text{nm}$  pump laser; (c) experimental setup for high-power SC laser generation



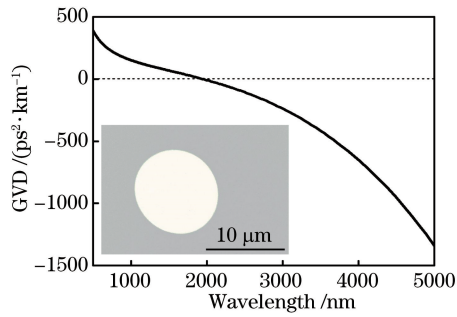


图 15 芯径为 11  $\mu\text{m}$  的全固态高 NA 氟碲酸盐玻璃光纤色散曲线, 插图: 光纤端面的扫描电镜照片

Fig. 15 Calculated dispersion curve of all-solid high-NA fluorotellurite fiber with core diameter of 11  $\mu\text{m}$ , inset: scanning electron micrograph of fiber end

随着抽运功率的增加, 在自相位调制、高阶孤子产生、孤子劈裂、孤子自频移等多种非线性效应的共同作用下, 光谱逐渐展宽。当 2  $\mu\text{m}$  抽运激光功率为 32.8 W 时, 获得了平均输出功率为 19.6 W、光谱范围

覆盖 1~4  $\mu\text{m}$  波段的 SC 激光光源, 结果如图 16(a) 所示。图 16(b) 给出了 SC 激光光源输出功率随 2  $\mu\text{m}$  抽运激光功率的变化关系, 其光光转换效率约为 60%。实验过程中, 未观察到光纤端面明显损伤。

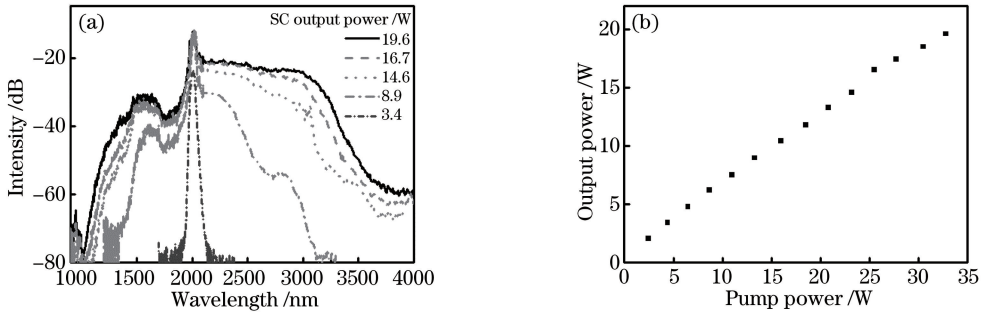


图 16 不同抽运功率下, 拉锥氟碲酸盐玻璃光纤中输出的 SC 光谱及相应的功率。(a) 不同 1980 nm 抽运激光功率下, 全固态高 NA 氟碲酸盐光纤中输出的 SC 光谱; (b) SC 激光光源的输出功率随抽运激光功率变化关系

Fig. 16 Output SC spectra and relative powers from tapered fluorotellurite fiber for different pump powers. (a) Measured SC spectra from all solid high-NA fluorotellurite fiber for different average pump powers of 1980 nm fiber laser; (b) output power of obtained SC light source versus pump power

## 4 结束语

由于在基础科学研究、环境监测、生物医疗和国防安全等领域的重大应用前景, 高功率中红外 SC 激光光源成为近年来研究者关注的热点问题之一。目前可用于研制平均输出功率大于 10 W 的 SC 激光光源的非线性介质主要有 ZBLAN 玻璃光纤和氟碲酸盐玻璃光纤。ZBLAN 玻璃光纤是一种较为成熟的商品光纤, 利用其作为非线性介质, 已获得平均输出功率约为 20 W 的 SC 激光光源。但是 ZBLAN 玻璃光纤的抗潮解能力较差, 相关激光器件在长期工作过程中, 尤其是在高功率工作模式下, 光纤端面易损伤, 限制了该类器件输出功率的进一步提升。与 ZBLAN 玻璃光纤相比, 笔者研究组最近研制出的基于 TBY 玻璃的氟碲酸盐玻璃光纤具有较好的

抗潮解能力和较大的热品质因子, 是一种新型高功率中红外激光材料。最近, 利用该类光纤作为非线性介质, 笔者研究组研制出平均输出功率约为 20 W 的中红外 SC 激光光源, 该光源表现出较好的长期稳定性。

目前, 本研究组制备出的氟碲酸盐玻璃光纤的损耗还比较高 (约 0.3 dB/m), 在以后的工作中, 本研究组将通过优化氟碲酸盐光纤制备工艺参数, 进一步降低光纤的损耗; 系统研究光纤的强度等参数, 研制几种特定型号的氟碲酸盐玻璃光纤, 并尝试将其进行商业化推广。在 SC 激光光源研究方面, 通过优化氟碲酸盐玻璃光纤结构参数、抽运激光参数以及 SC 激光光源系统参数, 选用合适的热管理模式, 有望研制出平均输出功率百瓦量级、光谱范围覆盖 2~5  $\mu\text{m}$  的中红外 SC 激光光源。

## 参 考 文 献

- [1] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1135-1181.
- [2] Herrmann J, Griebner U, Zhavoronkov N, *et al.* Experimental evidence for supercontinuum generation by fission of higher-order solitons in photonic fibers[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(17): 173901.
- [3] Alfano R R, Shapiro S L. Emission in the region 4000 to 7000 Å via four-photon coupling in glass[J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24: 584-587.
- [4] Alfano R R, Shapiro S L. Observation of self-phase modulation and small-scale filaments in crystals and glasses[J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24: 592-594.
- [5] Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(1): 25-27.
- [6] Knight J C. Photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 847-851.
- [7] Russell P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, 299(5605): 358-362.
- [8] Reeves W H, Skryabin D V, Biancalana F, *et al.* Transformation and control of ultra-short pulses in dispersion-engineered photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2003, 424(6948): 511-515.
- [9] Zhao L, Li Y, Guo C, *et al.* Generation of 215 W supercontinuum containing visible spectra from 480 nm[J]. *Optics Communications*, 2018, 425: 118-120.
- [10] Hartl I, Li X D, Chudoba C, *et al.* Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(9): 608-610.
- [11] Wildanger D, Rittweger E, Kastrup L, *et al.* STED microscopy with a supercontinuum laser source[J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9614-9621.
- [12] Brown D M, Shi K B, Liu Z W, *et al.* Long-path supercontinuum absorption spectroscopy for measurement of atmospheric constituents[J]. *Optics Express*, 2008, 16(12): 8457-8471.
- [13] Wallace J. IR supercontinuum laser helps defend helicopters[N]. *Laser Focus World*, 2010, Sept 3.
- [14] Sanghera J S, Aggarwal I D, Busse L E, *et al.* Chalcogenide optical fibers target mid-IR applications[J]. *Laser Focus World*, 2005, 41(4): 83-87.
- [15] Harbold J M, Ilday F O, Wise F W, *et al.* Highly nonlinear Ge-As-Se and Ge-As-S-Se glasses for all-optical switching[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(6): 822-824.
- [16] Slusher R E, Lenz G, Hodelin J, *et al.* Large Raman gain and nonlinear phase shifts in high-purity As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> chalcogenide fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, 21(6): 1146-1155.
- [17] Feng X, Mairaj A K, Hewak D W, *et al.* Nonsilica glasses for holey fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(6): 2046-2054.
- [18] 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.
- [19] Cheng T L, Nagasaka K, Tuan T H, *et al.*, Mid-infrared supercontinuum generation spanning 2.0 to 15.1 μm in a chalcogenide step-index fiber[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 2117-2120.
- [20] 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.
- [21] Gattass R R, Brandon Shaw L, Nguyen V Q, *et al.* All-fiber chalcogenide-based mid-infrared supercontinuum source[J]. *Optical Fiber Technology*, 2012, 18(5): 345-348.
- [22] Xia C N, Xu Z, Islam M N, *et al.* 10.5 W time-averaged power mid-IR supercontinuum generation extending beyond 4 μm with direct pulse pattern modulation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 422-434.
- [23] Yang W Q, Zhang B, Xue G H, *et al.* Thirteen watt all-fiber mid-infrared supercontinuum generation in a single mode ZBLAN fiber pumped by a 2 μm MOPA system[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1849-1852.
- [24] Liu K, Liu J, Shi H X, *et al.* High power mid-infrared supercontinuum generation in a single-mode ZBLAN fiber with up to 21.8 W average output power[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24384-24391.
- [25] Liu K, Liu J, Shi H X, *et al.* 24.3 W mid-infrared supercontinuum generation from a single-mode ZBLAN fiber pumped by thulium-doped fiber amplifier[C] // *Advanced Solid State Lasers*, OSA Technical Digest (online), Nov. 16-21, 2014, Shanghai, China. Washington D C: OSA, 2014: AM3A.6.
- [26] Zheng Z J, Ouyang D Q, Zhao J Q, *et al.* Scaling all-fiber mid-infrared supercontinuum up to 10 W-

- level based on thermal-spliced silica fiber and ZBLAN fiber[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(4): 135-139.
- [27] Yin K, Zhang B, Yang L Y, *et al.* 15. 2 W spectrally flat all-fiber supercontinuum laser source with  $> 1$  W power beyond  $3.8 \mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(12): 2334-2337.
- [28] Bei J F, Foo H T C, Qian G J, *et al.* Experimental study of chemical durability of fluorozirconate and fluoroindate glasses in deionized water [J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(6): 1213-1226.
- [29] Aydin Y O, Fortin V, Vallée R, *et al.* Towards power scaling of  $2.8 \mu\text{m}$  fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(18): 4542-4545.
- [30] Thapa R, Rhonehouse D, Nguyen D, *et al.* Mid-IR supercontinuum generation in ultra-low loss, dispersion-zero shifted tellurite glass fiber with extended coverage beyond  $4.5 \mu\text{m}$  [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8898: 889808.
- [31] Shi H X, Feng X, Tan F Z, *et al.* Multi-watt mid-infrared supercontinuum generated from a dehydrated large-core tellurite glass fiber [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(12): 3967-3976.
- [32] Yao C F, He C F, Jia Z X, *et al.* Holmium-doped fluorotellurite microstructured fibers for  $2.1 \mu\text{m}$  lasing [J]. *Optics Letters*, 2015, 40 (20): 4695-4698.
- [33] Wang F, Wang K K, Yao C F, *et al.* Tapered fluorotellurite microstructured fibers for broadband supercontinuum generation [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(3): 634-637.
- [34] Jia Z X, Yao C F, Jia S J, *et al.* 4. 5 W supercontinuum generation from 1017 to 3438 nm in an all-solid fluorotellurite fiber [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(26): 261106.
- [35] Jia X, Yao F, Jia J, *et al.* Supercontinuum generation covering the entire  $0.4\text{-}5 \mu\text{m}$  transmission window in a tapered ultra-high numerical aperture all-solid fluorotellurite fiber [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(2): 025102.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Savellii I, Desevedavy F, Jules J C, *et al.* Management of OH absorption in tellurite optical fibers and related supercontinuum generation [J]. *Optical Materials*, 2013, 35(8): 1595-1599.
- [39] Penilla E H, Devia-Cruz L F, Duarte M A, *et al.* Gain in polycrystalline Nd-doped alumina: leveraging length scales to create a new class of high-energy, short pulse, tunable laser materials [J]. *Light: Science & Applications* 2018, 7: 33.
- [40] Campbell J H, Suratwala T I. Nd-doped phosphate glasses for high-energy/high-peak-power lasers [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2000, 263/264: 318-341.
- [41] Hagen C L, Walewski J W, Sanders S T. Generation of a continuum extending to the midinfrared by pumping ZBLAN fiber with an ultrafast 1550-nm source [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(1): 91-93.
- [42] Gauthier J C, Fortin V, Carrée J Y, *et al.* Mid-IR supercontinuum from  $2.4$  to  $5.4 \mu\text{m}$  in a low-loss fluoroindate fiber [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(8): 1756-1759.
- [43] Thérberge F, Bérubé N, Poulain S, *et al.* Watt-level and spectrally flat mid-infrared supercontinuum in fluoroindate fibers [J]. *Photonics Research*, 2018, 6 (6): 609-613.
- [44] Yang L Y, Zhang B, Jin D H, *et al.* All-fiberized, multi-watt  $2\text{-}5\text{-}\mu\text{m}$  supercontinuum laser source based on fluoroindate fiber with record conversion efficiency [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5206-5209.
- [45] Dudley J M, Coen S. Coherence properties of supercontinuum spectra generated in photonic crystal and tapered optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(13): 1180-1182.