

超连续谱激光光源研究进展*

杨未强^{1,2}, 宋锐^{1,2}, 韩凯^{1,2}, 侯静^{1,2}

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073;

2. 国防科技大学 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要: 高非线性光纤制造技术的成熟和光纤激光器性能的提升, 极大地促进了超连续谱光源的快速发展, 以光纤为非线性介质的超连续谱的产生成为当前研究热点。从可见光、近红外和中红外 3 个不同波段, 综述了超连续谱产生的技术方案与最新进展。当前, 可见光和近红外波段的超连续谱光源输出功率已经突破百瓦量级, 并出现了多芯光子晶体光纤、光纤放大器和随机光纤激光器产生超连续谱等众多新方案; 以氟化物光纤和亚碲酸盐光纤为非线性介质的中红外超连续谱, 输出功率也突破了十瓦量级; 在光谱拓展方面, 以硫系光纤为非线性介质的超连续谱, 输出光谱已扩展到 12 μm 以上。

关键词: 超连续谱; 非线性光学; 光子晶体光纤; 软玻璃光纤

中图分类号: O437; TN248 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2020)01-001-09



听语音
与作者互动
聊科研

Research progress of supercontinuum laser source

YANG Weiqiang^{1,2}, SONG Rui^{1,2}, HAN Kai^{1,2}, HOU Jing^{1,2}

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Along with the maturity of high-nonlinearity optical fiber manufacturing technology and the improvement of the performance of fiber lasers, the supercontinuum sources have entered a period of rapid development. Supercontinuum generation by using optical fibers as the non-linear media has become a research hotspot. The technical schemes and recent progress of supercontinuum generation were reviewed from three different bands: visible, near-infrared and mid-infrared. At present, the output power of the visible and near-infrared supercontinuum sources broke through 100 W. At the same time, many new schemes such as supercontinuum generation in multi-core photonic crystal fibers, fiber amplifiers and random fiber lasers were developed. The output power of mid-infrared supercontinuum generation by using fluoride and tellurite fibers as non-linear media, also reached 10 W. The output spectrum of supercontinuum generation with chalcogenide optical fibers as non-linear medium was extended to more than 12 μm .

Keywords: supercontinuum; nonlinear optics; photonic crystal fiber; soft glass fiber

超连续谱光源, 被形象地称为白光激光, 是一种新型激光器, 同时具有普通光源(自发辐射光)的宽光谱特性和单色激光光源的方向性、高空间相干性、高亮度等特征。超连续谱的产生通常是指窄带激光入射到非线性介质后, 入射激光在多种非线性效应(如调制不稳定性、自相位调制、交叉相位调制、四波混频、孤子自频移和受激拉曼散射等)和色散的综合影响下, 光谱得到极大展宽的现象^[1]。

1970年, 美国 Alfano 等首次报道了超连续谱的产生^[2-3], 利用皮秒激光泵浦固体非线性介质(BK7 光学玻璃), 获得了光谱范围覆盖 400 ~

700 nm 的超连续谱光源。早期超连续谱的产生主要集中在固体^[1-4]、气体^[5-7]和液体^[8]等非线性介质中, 不仅需要极高峰值功率的入射激光, 而且由此获得的超连续谱光束质量较差, 应用也受限。光纤可以很好地将激光约束在光纤纤芯中, 增加激光与物质相互作用的非线性效应, 降低超连续谱产生对激光功率的要求, 提升输出光的光束质量, 是超连续谱产生的理想介质。早在 1976 年, 就有光纤中产生超连续谱的报道^[9], 但是由于缺乏高功率脉冲光纤激光器和更有效的高非线性光纤, 超连续谱激光光源研究进展缓慢。光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)的发明和

* 收稿日期: 2019-03-16

基金项目: 国防科技大学科研计划资助项目(JS18-03-06)

作者简介: 杨未强(1983—), 男, 河北永年人, 助理研究员, 博士, E-mail: yangweiqiang_001@126.com

脉冲光纤激光器的性能提升,极大地促进了超连续谱的飞速发展^[1]。PCF 具有非线性系数高、色散灵活可调等优良特性,非常适合超连续谱的产生。1996 年第一根 PCF 成功制备^[10],2000 年贝尔实验室 Ranka 等首次报道了基于 PCF 的超连续谱激光实验研究^[11],获得了光谱覆盖 400 ~ 1500 nm 的高光束质量超连续谱光源,自此开启了超连续谱光源研究的新春天,该领域成为新的研究热点^[1]。

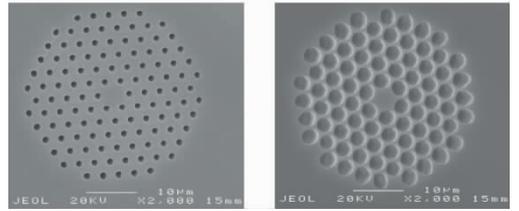
经多年发展,超连续谱的产生已有多种解决方案,在泵浦选择上有连续波激光、纳秒激光、皮秒激光、飞秒激光等,产生超连续谱的非线性介质有 PCF、普通光纤、增益光纤、软玻璃光纤等,超连续谱激光的光谱范围可以轻易覆盖可见至近红外波段,还可延伸至紫外、中红外波段,甚至远红外波段。超连续谱光源也获得了诸多实际应用,如光纤通信、精密时间及频率测量、光学相干层析成像和非线性光谱学等^[12-16]。本文重点介绍以光纤为非线性介质的超连续谱研究进展情况。

1 可见光波段增强的超连续谱光源产生

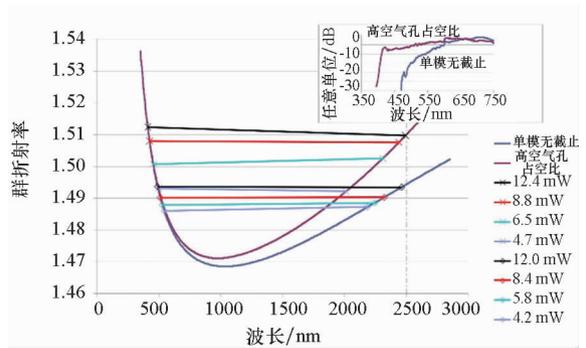
可见光波段增强的超连续谱通常简称为可见光超连续谱,该类型光源在生物医疗成像领域有着重要应用,如光学相干层析成像、荧光共焦显微成像、相干反斯托克斯拉曼散射显微成像等。脉冲激光泵浦 PCF 是产生可见光超连续谱的常用方案,通常有三种增加可见光成分的基本方法:一是,通过 PCF 的物理结构参数,灵活改变光纤的色散特性,从而满足可见光产生所需的匹配条件;二是,通过改变 PCF 的掺杂材料,调整光纤的色散和非线性特性,促进可见光产生;三是,采用多波长泵浦 PCF,充分利用自相位调制、四波混频等非线性效应产生可见光成分。也可综合使用几种基本方法来产生可见光超连续谱。

采用高空气孔比的 PCF^[17]、拉锥 PCF^[18]或级联 PCF^[19]都属于改变 PCF 结构参数提升可见光成分的方法。改变结构参数以及改变 PCF 的掺杂材料,都是为了调整光纤的群速度色散和非线性系数,使光谱在演化过程中更容易满足群速度匹配条件,以及获得更高效的非线性效应,从而有利于短波长光谱成分的产生。2008 年,英国巴斯大学 Stone 等对比分析了不同结构 PCF 对可见光超连续谱产生的影响^[17]。实验中使用的 PCF 参数和试验结果如图 1 所示。图 1(a)为常规单模无截止(Endless Single Mode, ESM)光纤,图 1(b)为高空气孔占空比光纤,两种光纤的纤芯尺寸均为

4.7 μm ,空气孔占空比分别为 0.43 和 0.77。图 1(c)为不同光纤的群折射率曲线,图中直线为不同输出功率下超连续谱的长波边界和短波边界的连线,图 1(c)中的插图为超连续谱的短波边界。使用高空气孔占空比的 PCF 明显拓展了超连续谱向可见光展宽的程度,和常规的单模无截止 PCF 相比,高空气孔占空比 PCF 在长波长区域的群折射率曲线更为陡峭,更容易实现与短波长区域的群速度匹配,有利于光谱的蓝移。



(a) 单模无截止光纤 (b) 高空气孔占空比光纤
(a) ESM fiber (b) HNL fiber



(c) 群折射率曲线

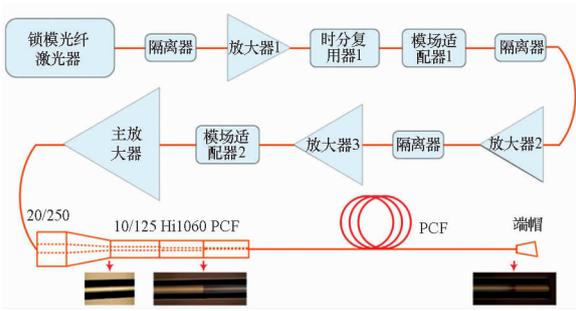
(c) Group index curves

图 1 不同结构 PCF 的群速度曲线和超连续谱产生结果
Fig. 1 Group index curves and supercontinuum generation for different structure of PCF

光纤中掺杂化合物可以提高 PCF 的非线性,如 PCF 中掺杂 GeO_2 可以增强拉曼响应和克尔效应^[20-21],但掺杂使光纤的零色散波长红移,为有效产生可见光超连续谱,通常需要拉锥或特殊结构设计(如 Y 形芯)改变光纤参数。多波长泵浦方案中,可通过非线性晶体倍频产生多波长泵浦源,或者通过 PCF 四波混频获得多波长泵浦源后再级联另一种 PCF 产生可见光超连续谱^[22]。

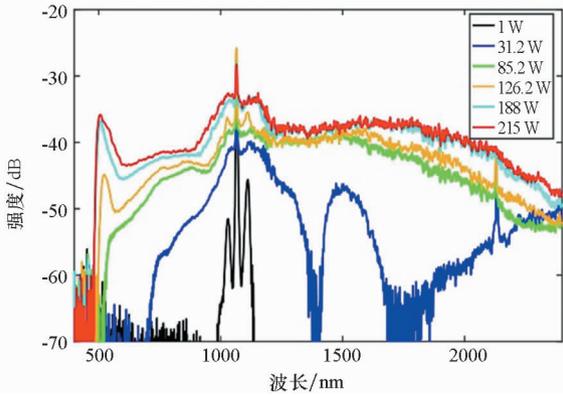
在遥感成像、遥感探测等领域,期望获得更高功率的超连续谱光源。为获得较高的非线性系数,用于产生超连续谱的 PCF 模场面积通常较小。而作为超连续谱产生的泵浦激光,为获得高功率需要选用较大模场面积的增益光纤。高功率超连续谱产生过程中选用的增益光纤与 PCF 的模场面积相差数倍甚至一个数量级以上。因此,为实现高功率超连续谱光源,不仅需要攻克高光

束质量的脉冲光纤激光器、高性能光子晶体光纤设计与制作等关键技术,还需要解决大模场光纤与 PCF 的低损耗熔接问题,目前常采用的技术方案有光纤拉锥、PCF 选择性空气孔塌缩、增加过渡光纤等^[23]。当前,基于单芯 PCF 的可见光超连续谱输出功率已突破百瓦量级。2018 年,中国工程物理研究院 Zhao 等基于单芯 PCF 实现了输出功率为 215 W 的可见光超连续谱光源,实验结构和输出光谱如图 2 所示^[24]。实验采用功率为 556 W 的皮秒脉冲光纤激光器泵浦一段纤芯直径为 4.8 μm 的 PCF,获得了输出功率为 215 W 的超连续谱,光谱覆盖 480 ~ 2000 nm,首次报道了光谱覆盖 500 nm 以下可见光,输出功率超过 200 W 的超连续谱光源。



(a) 实验结构

(a) Experimental setup



(b) 超连续谱输出光谱

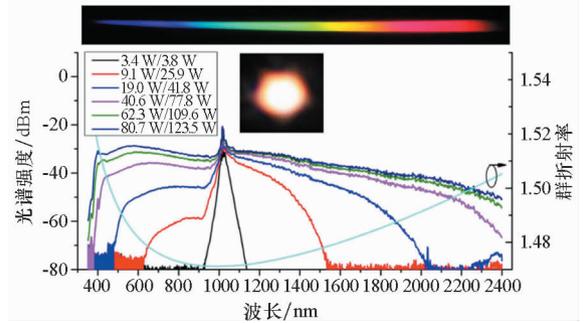
(b) Spectra of output supercontinuum

图 2 215 W 的可见光超连续谱

Fig.2 215 W visible supercontinuum

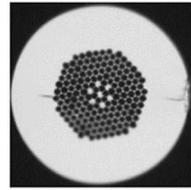
单芯 PCF 的模场面积较小,进一步提升功率的难度较大。从理论上讲,采用多芯 PCF 在大功率可见光超连续谱产生方面具有较大潜力,多芯 PCF 的有效模场面积大,容易实现与泵浦激光的模场匹配,可承受更高的功率,而且结构设计灵活,可获得有利于可见光超连续谱产生的色散特性。近年来,基于多芯 PCF 的可见光超连续谱输出功率得到了不断提升^[25-28]。2017 年,国防科

技大学 Qi 等以七芯 PCF 为非线性介质,获得了输出功率为 80.7 W、光谱覆盖 350 ~ 2400 nm 的可见光超连续谱,实验结果如图 3(a)所示,超连续谱在整个可见光波段的谱功率密度均大于 50 mW/nm ^[29]。图 3(b)为实验中所使用的七芯 PCF 截面图,其空气孔直径、间距和占空比分别为 3.33 μm 、3.91 μm 和 0.85。



(a) 输出光谱

(a) Output spectrum



(b) 七芯 PCF 截面图

(b) Cross-section of seven-core PCF

图 3 基于七芯 PCF 的可见光超连续谱演化图

Fig.3 Visible supercontinuum spectra evolution for a seven-core PCF

2 近红外波段超连续谱光源产生

近红外波段超连续谱光源是指输出光谱的主要成分处于 0.8 ~ 2.5 μm 之间的超连续谱。当前,产生近红外波段超连续谱的方式主要有以下三种:一是使用脉冲光纤激光器泵浦 PCF 或普通光纤;二是在脉冲光纤放大器中直接产生近红外超连续谱;三是用随机光纤激光器产生近红外超连续谱。

使用脉冲光纤激光器泵浦 PCF 产生近红外超连续谱^[30-31]的实验方案与可见光超连续谱产生时的相同,但比可见光产生的限制条件少,不需要满足可见光产生时的群速度匹配。脉冲激光泵浦普通光纤也可以产生近红外超连续谱^[32-33],普通光纤的零色散点在 1.3 μm 左右,使用常见的 1 μm 波段脉冲激光作为泵浦源时,泵浦光处于正常色散区,拉曼效应和自相位调制会促使激光频率红移,产生近红外超连续谱。在大功率超连续谱产生方面,PCF 也实现了数百瓦的超连续谱输

出。2018 年,中国工程物理研究院攻克了千瓦级皮秒脉冲光纤激光器、PCF 高效耦合等技术难题,实现了全光纤结构、输出功率为 563 W 的超连续谱光源^[34]。

在光纤放大器中直接产生超连续谱时,放大器的增益过程与非线性效应、色散效应共同作用促使光谱展宽,光谱展宽后处于增益范围内的新光谱成分会得到放大,从而又促进了非线性效应。该方案中,可以使用较大模场面积的增益光纤作为非线性介质,在大功率超连续谱产生方面极具潜力,掺镱光纤放大器^[35-36] (Ytterbium-Doped Fiber Amplifier, YDFA)、铒/镱共掺光纤放大器^[37]和掺铥光纤放大器^[38-42] (Thulium-Doped Fiber Amplifier, TDFA)中均有超连续谱产生^[1]。2013 年,国防科技大学 Song 等基于掺镱光纤放大器实现了 177 W 的近红外超连续谱输出,掺镱光纤的纤芯直径为 30 μm ,输出超连续谱的 10 dB 光谱宽度为 740 nm,输出结果如图 4 所示^[43]。2019 年,复旦大学 Yao 等基于掺铥光纤放大器实现了 142 W 的超连续谱输出,掺铥光纤的纤芯直径为 25 μm ,输出超连续谱的 10 dB 光谱宽度为 615 nm,输出结果如图 5 所示^[44]。

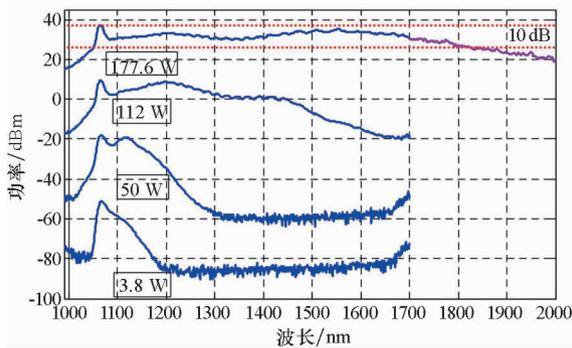


图 4 基于 YDFA 的 177 W 超连续谱
Fig. 4 177 W supercontinuum in YDFA

随机光纤激光器是一种新型的光纤激光器^[45-48],可利用光纤中的瑞利散射提供随机分布反馈,从而代替传统激光器的谐振腔结构,还可以利用被动光纤中的受激拉曼散射提供增益,具有结构简单、时域稳定等优点。2010 年,英国阿斯顿大学 Turitsyn 等运用了一种开腔结构的随机激光器,利用光纤中的瑞利散射和拉曼效应实现激光反馈和增益放大,首次提出随机分布反馈光纤激光器概念^[45]。近年来,随机光纤激光器发展迅速,在理论和实验研究上均取得了较大进展,在大功率光纤激光器研制方面,随机光纤激光器的输出功率已突破 3000 W^[49]。当前,利用随机光纤激光器产生超连续谱的研究尚处于起步阶段,但

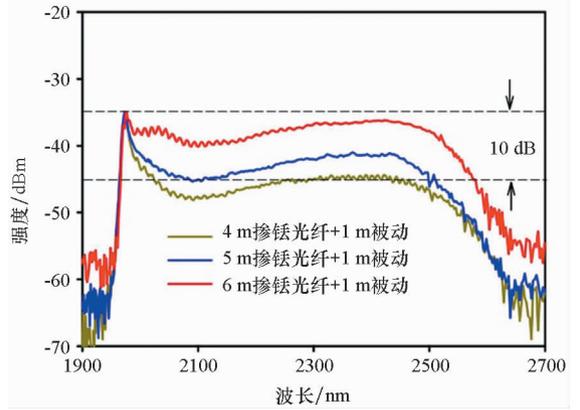


图 5 基于 TDFA 的 142 W 超连续谱
Fig. 5 142 W supercontinuum in TDFA

该方案作为一种高鲁棒性、高性价比的实现方案,具有很大的商业潜力。2016 年,上海交通大学 Tang 等将随机光纤激光器作为泵浦源,研究了硫化物光纤中超连续谱的产生^[50]。2017 年,电子科技大学 Ma 等首次报道了随机光纤激光器中直接产生超连续谱的实验研究^[51],实验结构如图 6 所示。随机光纤激光器采用半开腔结构,中心工作波长为 1365 nm 的拉曼激光器为泵浦源,半开腔中光纤光栅的中心工作波长为 1461 nm,被动光纤的长度约为 16 km。当泵浦功率为 3.177 W 时,得到了 20 dB 宽度为 250 nm 的超连续谱输出,结果如图 7 所示。基于该方法,课题组还进一步优化了实验结果^[52]。

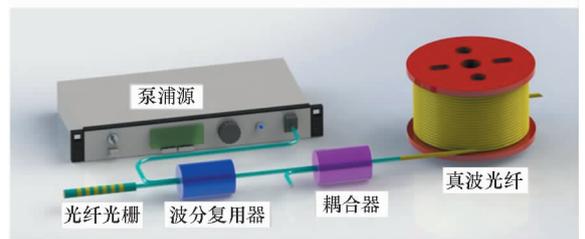


图 6 随机光纤激光器直接产生超连续谱的实验结构
Fig. 6 Experimental setup of supercontinuum generation seeded by random fiber laser

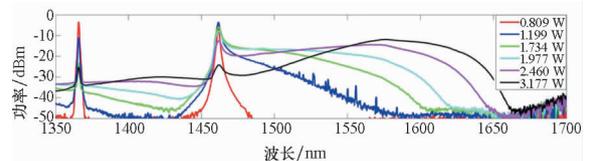


图 7 随机光纤激光器中产生超连续谱的输出光谱
Fig. 7 Supercontinuum spectra based on random fiber laser

3 中红外波段超连续谱光源产生

中红外波段超连续谱并没有严格的定义,也有文献将 2 ~ 2.5 μm 波段的超连续谱称作中红

外超连续谱。通常情况下,在军事领域将 3 ~ 5 μm 波段称为中红外波段。本文所指的中红外超连续谱是长波边超过 3 μm 的超连续谱光源。由于中红外波段的超连续谱光源处于大气传输窗口,涵盖众多分子的特征谱线^[53],在生物医学、环境监测和国防安全等领域有广阔的应用前景^[54-55],是当前超连续谱研究热点之一。普通石英(SiO_2)光纤对于 3 μm 以上的光具有较大的传输损耗,中红外超连续谱的产生主要使用软玻璃光纤,常见的软玻璃光纤材料有:氟化物玻璃、亚碲酸盐玻璃和硫系玻璃^[1],不同光纤传输损耗曲线如图 8 所示^[56]。中红外超连续谱产生的技术难点在于以下几个方面:一是高性能软玻璃光纤的制造;二是适合超连续谱产生的泵浦光源研制;三是软玻璃光纤的端面处理与低损耗连接。与石英光纤相比,软玻璃光纤呈现易碎、易断的脆弱物理特性,且材料的熔点较低,例如 ZBLAN 材料的熔点为 455 $^\circ\text{C}$ ^[57],而石英材料的熔点高达 1434 $^\circ\text{C}$,因此软玻璃难以实现和普通光纤的低损耗连接。

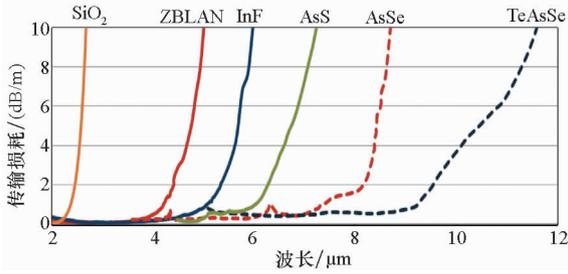


图 8 不同材料光纤的传输损耗曲线
Fig. 8 Transmission loss curves of fibers with different materials

氟化物光纤拉制技术成熟,且材料的自聚焦阈值高于亚碲酸盐和硫系玻璃^[56],更适合高功率中红外超连续谱的产生;但由于传输损耗的限制,以氟化物光纤为非线性介质的中红外超连续谱长波边难以突破 5 μm 。用于产生中红外超连续谱的氟化物光纤主要有两类:ZBLAN 光纤和 InF_3 光纤。

2006 年,美国威斯康星大学麦迪逊分校 Hagen 等首次提出了 1.55 μm 脉冲激光泵浦 ZBLAN 光纤产生中红外超连续谱的研究^[58],获得了光谱覆盖 1.8 ~ 3.4 μm 、输出功率为 5 mW 的超连续谱。2009 年,美国密西根大学 Xia 等以 ZBLAN 为非线性光纤,首次获得了平均功率超过 10 W 的中红外超连续谱,输出光谱覆盖 0.8 ~ 4 μm ^[59]。早期的研究中,中红外超连续谱产生

的泵浦源主要为 1.55 μm 脉冲光纤激光器。近年来掺铥光纤激光器取得了快速的发展,与 1.55 μm 相比,2 μm 波段更易获得高功率输出,且 2 μm 波长离中红外波段更近,因此基于 2 μm 脉冲光纤激光器提升中红外超连续谱的输出功率和长波长的功率比例成为新的尝试。2014 年,国防科技大学 Yang 等以 2 μm 波段脉冲光纤激光器及放大器为泵浦源,以 ZBLAN 光纤为非线性介质,实现了平均功率为 13 W、光谱覆盖 1.9 ~ 4.3 μm 的中红外超连续谱,实验方案及结果如图 9 所示^[60]。随后,北京工业大学 Liu 等采用类似方案,获得了功率为 21.8 W、光谱范围为 1.9 ~ 3.8 μm 的中红外超连续谱^[61]。2017 年,国防科技大学 Yin 等进一步改进实验方案,实现了全光纤结构、输出光谱超平坦的 15.2 W、1.9 ~ 4.2 μm 中红外超连续谱^[62]。

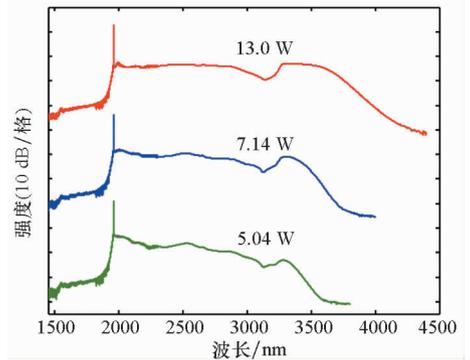
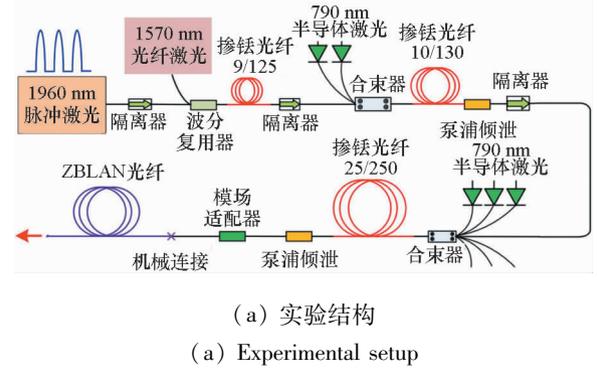


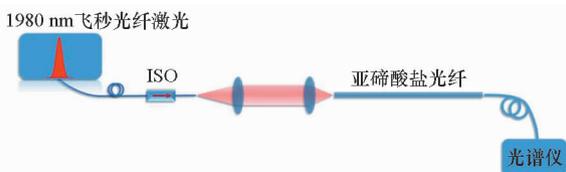
图 9 基于 2 μm MOPA 系统的高功率中红外超连续谱
Fig. 9 High power mid-infrared supercontinuum generation pumped by a 2 μm MOPA system

由于传输损耗的限制,基于 ZBLAN 光纤的超连续谱长波边限制在 4.5 μm 左右, InF_3 光纤与 ZBLAN 光纤具有相似的物理特性,但在 4 ~ 5 μm 波段的传输损耗较低。随着 InF_3 光纤制造和处理技术的成熟,近年来以 InF_3 为非线性介质产生中红外超连续谱的输出性能不断得到提升^[63-66]。

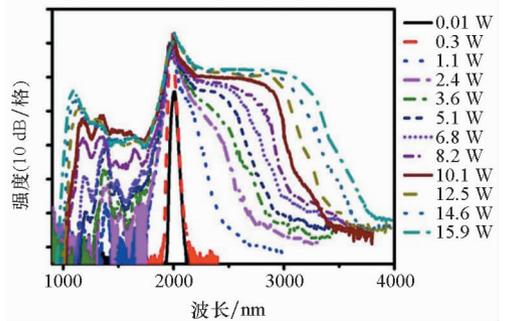
2018 年,国防科技大学突破了石英光纤与 InF_3 光纤的低损耗熔接技术($2\ \mu\text{m}$ 波长处的熔接损耗低至 $0.07\ \text{dB}$),利用宽谱掺铋光纤放大器输出的 $2\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 宽谱激光泵浦 InF_3 光纤,实现了平均功率为 $1.35\ \text{W}$ 、光谱覆盖范围为 $1.5\sim 5.2\ \mu\text{m}$ 以及平均功率为 $4.06\ \text{W}$ 、光谱覆盖范围为 $1.9\sim 5.1\ \mu\text{m}$ 的光谱平坦型中红外超连续谱^[66]。

亚碲酸盐玻璃是指含有 TeO_2 的化合物玻璃,大多数亚碲酸盐玻璃的透光范围和氟化物玻璃相近,但其非线性系数要高于氟化物^[1]。由于亚碲酸盐材料中的 OH^- 振动吸收损耗问题(主要位于 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 波段)难以解决,亚碲酸盐光纤在中红外波段的损耗要远大于氟化物光纤,这是长期以来亚碲酸盐光纤没有得到商业化应用的主要原因之一。通过脱水技术创新,减少材料中的 OH^- 含量是提升亚碲酸盐光纤传输效率的关键,近年来的研究中,通过掺入卤族元素降低 OH^- 吸收,可将亚碲酸盐光纤的吸收峰降至 $10\ \text{dB/m}$ 左右^[67-68]。2013 年,美国 NP Photonics 公司采用独特的脱水技术,制造出超低 OH^- 含量的亚碲酸盐玻璃,成功拉制出在可见光到中红外波段($0.6\sim 4.5\ \mu\text{m}$)传输损耗均小于 $0.5\ \text{dB/m}$ 的高质量光纤,并以 $2\ \mu\text{m}$ 脉冲激光作为泵浦源,实现了输出功率为 $1.2\ \text{W}$ 、光谱范围为 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 的中红外超连续谱^[69]。2018 年,吉林大学 Yao 等研制了低损耗的亚碲酸盐光纤,并利用 $2\ \mu\text{m}$ 波段飞秒脉冲光纤激光器作为泵浦源,实现了平均功率为 $10.4\ \text{W}$ 、光谱覆盖范围为 $0.9\sim 3.9\ \mu\text{m}$ 的中红外超连续谱,证实了亚碲酸盐光纤实现高功率中红外超连续谱的潜力^[70]。实验结构和输出光谱如图 10 所示,图 10(b) 中标注的功率为 $1980\ \text{nm}$ 飞秒激光器的输出功率,当飞秒激光器的功率为 $15.9\ \text{W}$ 时,超连续谱输出功率为 $10.4\ \text{W}$ 。

硫系玻璃包括单组分的 As_2Se_3 、 As_2S_3 、 GeS_2 玻璃及含 As、Sb、Se、He 和 S 等的多组分玻璃^[1]。硫系材料的零色散波长均在 $4\ \mu\text{m}$ 以上,普通硫系光纤难以找到适合超连续谱产生的泵浦源,可以灵活设计色散特性的硫系 PCF 为研究对象,



(a) 实验结构
(a) Experimental setup



(b) 输出光谱
(b) Output spectra

图 10 基于亚碲酸盐光纤的高功率中红外超连续谱
Fig. 10 High power mid-infrared supercontinuum generation in a Tellurite fiber

开展了大量的理论研究^[71-77]。在实验研究方面,由于硫系光纤的损伤阈值要低于氟化物光纤和亚碲酸盐光纤,基于硫系光纤难以实现高功率激光,目前报道的基于硫系光纤的中红外超连续谱输出功率均在瓦量级以下^[78-82]。2012 年,美国海军实验室 Gattass 等报道了以阶跃型折射率 As_2S_3 硫系光纤为非线性介质,全光纤中红外超连续谱光源产生的实验研究,实现了输出功率为 $565\ \text{mW}$ 、光谱覆盖 $1.9\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 的中红外超连续谱^[1,80],为当时报道的基于硫系玻璃光纤产生中红外超连续谱的最高功率。此后的研究中,在功率提升上并没有大的突破。近年来,基于硫系光纤的中红外超连续谱在光谱拓展上取得了较多进展^[83-89],已有众多长波长边界超过 $12\ \mu\text{m}$ 的超连续谱产生的实验研究。例如文献[88]中,输出中心波长为 $5\ \mu\text{m}$ 的飞秒激光泵浦一段 $22\ \text{cm}$ 长的硫化物光纤,实现了输出光谱范围为 $2\sim 14\ \mu\text{m}$ 的超连续谱($-10\ \text{dB}$ 内的光谱范围为 $3.2\sim 12.1\ \mu\text{m}$),实验结果如图 11 所示。

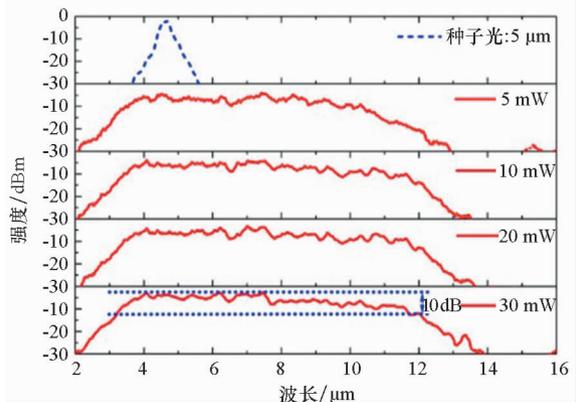


图 11 飞秒激光泵浦硫系光纤产生超连续谱的光谱
Fig. 11 Spectra of supercontinuum generation in a chalcogenide fiber pumped by a femtosecond laser

4 结论

以上是对超连续谱激光光源研究进展的总结。随着光纤激光器的快速发展,以及高性能非线性光纤设计制造技术的成熟,超连续谱光源也在近年来得到了快速发展。目前,可见光和近红外波段超连续谱技术已经比较成熟,已有商用产品,在生物医学、非线性光谱学、精密测量等领域获得了实际应用。中红外超连续谱光源的产生方面,由于软玻璃光纤的物理特性脆弱,中红外非线性光纤的设计、制作与处理难度相对较大,目前相关研究还处于科学实验阶段,但在输出功率和性能方面也得到了很大的进展。未来,超连续谱激光光源在性能指标提升、光谱拓展与调控等方面将会得到进一步的发展,超连续谱光源的应用范围也将越来越广泛。

参考文献 (References)

- [1] 杨未强. 高功率全光纤中红外超连续谱光源研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2014: 1-19.
YANG Weiqiang. The study on high-power all-fiber mid-infrared supercontinuum generation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014: 1-19. (in Chinese)
- [2] 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(11): 584-587.
- [3] 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(11): 592-594.
- [4] Corkum P B, Ho P P, Alfano R R. Generation of infrared supercontinuum covering 3-14 μm in dielectrics and semiconductors [J]. *Optics Letters*, 1985, 10(12): 624-626.
- [5] Gosnell T R, Taylor A J, Greene D P. Supercontinuum generation at 248 nm using high-pressure gases [J]. *Optics Letters*, 1990, 15(2): 130-132.
- [6] Francois V, Ilkov F A, Chin S L. Supercontinuum generation in CO₂ gas accompanied by optical breakdown [J]. *Journal of Physics B*, 1992, 25: 2709-2724.
- [7] Corkum P B, Rolland C, Srinivasan-Rao T. Supercontinuum generation in gases [J]. *Physical Review Letters*, 1986, 57(18): 2268-2271.
- [8] Jimbo T, Caplan V L, Li Q X. Enhancement of ultrafast supercontinuum generation in water by the addition of Zn²⁺ and K⁺ cations [J]. *Optics Letters*, 1987, 12(7): 477-479.
- [9] Lin C, Stolen R H. New nanosecond continuum for excited-state spectroscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 1976, 28(4): 216-218.
- [10] Knight J C, Birks T A, Russell P S J. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [11] 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.
- [12] Futami F, Kikuchi K. Low-noise multi-wavelength transmitter using spectrum-sliced supercontinuum generated from a normal group-velocity dispersion fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(1): 73-75.
- [13] Udem T, Holzwarth R, Hänsch T W. Optical frequency metrology [J]. *Nature*, 2002, 416(6877): 233-237.
- [14] Diddams S A, Bergquist J C, Jefferts S R. Standards of time and frequency at the outset of the 21st century [J]. *Science*, 2004, 306(5700): 1318-1324.
- [15] Lim H, Jiang Y, Wang Y, et al. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography with a fiber laser source at 1 μm [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(10): 1171-1173.
- [16] Kano H, Hamaguchi H. Characterization of a supercontinuum generated from a photonic crystal fiber and its application to coherent Raman spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(23): 2360-2362.
- [17] Stone J M, Knight J C. Visibly "white" light generation in uniform photonic crystal fiber using a microchip laser [J]. *Optics Express*, 2008, 16(4): 2670-2675.
- [18] Chen H H, Chen Z L, Zhou X F, et al. Ultraviolet-extended flat supercontinuum generation in cascaded photonic crystal fiber tapers [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(8): 085401.
- [19] Travers J C, Popov S V, Taylor J R. Extended blue supercontinuum generation in cascaded holey fibers [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(23): 3132-3134.
- [20] Frosz M H, Moselund P M, Rasmussen P D, et al. Increasing the blue-shift of a supercontinuum by modifying the fiber glass composition [J]. *Optics Express*, 2008, 16(25): 21076-21086.
- [21] Kudlinski A, Bouwmans G, Vanvincq O, et al. White-light cw-pumped supercontinuum generation in highly GeO₂-doped-core photonic crystal fibers [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(23): 3631-3633.
- [22] Xiong C L, Chen Z L, Wadsworth W J. Dual-wavelength-pumped supercontinuum generation in an all-fiber device [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27: 1638-1643.
- [23] 侯静, 陈胜平, 陈子伦, 等. 高功率超连续谱光源研究进展与关键技术分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(8): 96-108.
HOU Jing, CHEN Shengping, CHEN Zilun, et al. Recent developments and key technology analysis of high power supercontinuum source [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(8): 96-108. (in Chinese)
- [24] Zhao L, Li Y, Guo C, et al. Generation of 215 W supercontinuum containing visible spectra from 480 nm [J]. *Optics Communications*, 2018, 452: 118-120.
- [25] Yan P, Jia Y, Su H, et al. Broadband continuum generation in an irregularly multicore microstructured optical fiber [J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(6): 355-357.
- [26] Manili G, Modotto D, Minoni U, et al. Modal four-wave mixing supported generation of supercontinuum light from the infrared to the visible region in a birefringent multi-core microstructured optical fiber [J]. *Optical Fiber Technology*, 2011, 17(3): 160-167.
- [27] Fang X, Hu M, Huang L, et al. Multiwatt octave-spanning

- supercontinuum generation in multicore photonic-crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(12): 2292–2294.
- [28] Hongwei C, Huifeng W, Tong L, et al. All-fiber-integrated high-power supercontinuum sources based on multi-core photonic crystal fibers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 1–8.
- [29] Qi X, Chen S, Li Z, et al. High-power visible-enhanced all-fiber supercontinuum generation in a seven-core photonic crystal fiber pumped at 1016 nm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1019–1022.
- [30] Chen H W, Jin A J, Yang W Q, et al. Generation of compact high-power high-efficiency normal-dispersion supercontinuum in silica photonic crystal fiber pumped with 1064 nm picosecond pulse [J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(6): 409–413.
- [31] Hongwei C, Zilun C, Shengping C, et al. Hundred-watt-level, all-fiber-integrated supercontinuum generation from photonic crystal fiber [J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6(3): 032702.
- [32] Walewski J W, Filipa J A, Hagen C L, et al. Standard single-mode fibers as convenient means for the generation of ultrafast high-pulse-energy super-continua [J]. *Applied Physics B*, 2006, 83(1): 75–79.
- [33] Zaytsev A, Lin C H, You Y J, et al. Supercontinuum generation by noise-like pulses transmitted through normally dispersive standard single-mode fibers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 16056–16062.
- [34] 董克攻, 张昊宇, 黎玥, 等. 全光纤白光超连续谱实现 563 W 输出 [J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(10): 1–2. DONG Kegong, ZHANG Haoyu, LI Yue, et al. Generation of 563 W all-fiber white-light supercontinuum source [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(10): 1–2. (in Chinese)
- [35] Song R, Hou J, Chen S, et al. High power supercontinuum generation in a nonlinear ytterbium-doped fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(9): 1529–1531.
- [36] Roy A, Leproux P, Roy P, et al. Supercontinuum generation in a nonlinear Yb-doped, double-clad, microstructured fiber [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(4): 788–791.
- [37] Zhang B, Hou J, Liu P Z, et al. Flat supercontinuum generation covering C-band to U-band in two-stage Er/Yb codoped double-clad fiber amplifier [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(11): 1895–1898.
- [38] Yang W Q, Zhang B, Hou J, et al. Gain-switched and mode-locked Tm/Ho-codoped 2 μm fiber laser for mid-IR supercontinuum generation in a Tm-doped fiber amplifier [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(4): 045106.
- [39] Yang W Q, Zhang B, Hou J, et al. Mid-IR supercontinuum generation in Tm/Ho codoped fiber amplifier [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(5): 055107.
- [40] Swiderski J, Michalska M. Mid-infrared supercontinuum generation in a single-mode thulium-doped fiber amplifier [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(3): 035105.
- [41] Geng J, Wang Q, Jiang S. High-spectral-flatness mid-infrared supercontinuum generated from a Tm-doped fiber amplifier [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(7): 834–840.
- [42] Alexander V V, Shi Z, Islam M N, et al. Power scalable > 25 W supercontinuum laser from 2 to 2.5 μm with near-diffraction-limited beam and low output variability [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2292–2294.
- [43] Song R, Hou J, Chen S P, et al. Near-infrared supercontinuum generation in an all-normal dispersion MOPA configuration above one hundred watts [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(1): 015401.
- [44] Yao W, Shao Z, Shen C, et al. Gain-switched laser diode seeded TDFA with 409 W picosecond pulses and 142 W spectrally flat supercontinuum output [J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 1276–1282.
- [45] Turitsyn S K, Babin S A, El-Taher A E, et al. Random distributed feedback fibre laser [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(4): 231–235.
- [46] Turitsyn S K, Babin S A, Churkin D V, et al. Random distributed feedback fibre laser [J]. *Physics Reports*, 2014, 542(2): 133–193.
- [47] Ahmad H, Zulkifli M Z, Jemangin M H, et al. Distributed feedback multimode Brillouin-Raman random fiber laser in the S-band [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(5): 055102.
- [48] Pang M, Bao X, Chen L. Observation of narrow linewidth spikes in the coherent Brillouin random fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1866–1868.
- [49] Xu J, Ye J, Zhou P, et al. Tandem pumping architecture enable high power random fiber laser with near-diffraction-limited beam quality [J]. *Science China Technological Science*, 2019, 62(1): 80–86.
- [50] Tang Y, Li F, Xu J. Watt-level supercontinuum generation in As_2Se_3 fibers pumped by a 2-micron random fiber laser [J]. *Laser Physics*, 2016, 26(5): 055402.
- [51] Ma R, Rao Y J, Zhang W L, et al. Backward supercontinuum light source by random distributed feedback fiber laser [C]// *Proceedings of 25th International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2017.
- [52] Ma R, Rao Y J, Zhang W L, et al. Backward supercontinuum generation excited by random lasing [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 901105.
- [53] Willer U, Saraji M, Khorsandi A, et al. Near- and mid-infrared laser monitoring of industrial process, environment and security application [J]. *Optical Lasers Engineering*, 2006, 44: 699–710.
- [54] Xia C. Mid-infrared supercontinuum laser system and its biomedical applications [D]. USA: University of Michigan, 2009.
- [55] Ke K, Xia C, Islam M N, et al. Mid-infrared absorption spectroscopy and differential damage in vitro between lipids and proteins by an all-fiber-integrated supercontinuum laser [J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 12627–12640.
- [56] Moselund P M, Petersen C, Dupont S, et al. Supercontinuum; broad as a lamp bright as a laser, now in the midinfrared [C]// *Proceedings of SPIE*, 2012.
- [57] Adam J L. Fluoride glass research in France; fundamentals and applications [J]. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2001, 107: 265–270.
- [58] 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.
- [59] Xia C, 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.
- [60] Yang W, Zhang B, Xue G, 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.
- [61] Liu K, Liu J, Shi H, 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.
- [62] Yin K, Zhang B, Yang L, et al. 15.2 W spectrally flat all-fiber supercontinuum laser source with >1 W power beyond 3.8 μm [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(12): 2334–2337.
- [63] Théberge F, Daigle J F, Vincent D, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in fluoroindate fiber [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4683–4685.
- [64] Swiderski J, Théberge F, Michalska M, et al. High average power supercontinuum generation in a fluoroindate fiber [J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(1): 015106.
- [65] Théberge 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.
- [66] Yang L, Zhang B, Jin D, et al. All-fiberized, multi-watt 2–5 μm supercontinuum laser source based on fluoroindate fiber with record conversion efficiency [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(21): 5206–5209.
- [67] Feng X, Shi J, Segura M, et al. Halo-tellurite glass fiber with low OH content for 2–5 μm mid-infrared nonlinear applications [J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 18949–18954.
- [68] Savelli 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.
- [69] 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 μm [C]// *Proceedings of SPIE*, 2013.
- [70] 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.
- [71] Price J H V, Monro T M, Ebendorff-Heidepriem H, et al. Non-silica microstructured optical fibers for mid-IR supercontinuum generation from 2 μm –5 μm [C]// *Proceedings of SPIE*, 2006.
- [72] Roy S, Chaudhuri P R. Supercontinuum generation in visible to mid-infrared region in square-lattice photonic crystal fiber made from highly nonlinear glass[J]. *Optics Communications*, 2009, 282: 3448–3455.
- [73] Ung B, Skorobogatiy M. Chalcogenide microporous fibers for linear and nonlinear applications in the mid-infrared [J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8647–8659.
- [74] Hu J, Menyuk C R, Shaw L B, et al. Maximizing the bandwidth of supercontinuum generation in As_2S_3 chalcogenide fibers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 6722–6739.
- [75] Hu J, Menyuk C R, Shaw L B, et al. Computational study of 3–5 μm source created by using supercontinuum generation in As_2S_3 chalcogenide fibers with a pump at 2 μm [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(17): 2907–2909.
- [76] Weiblen R J, Docherty A, Hu J, et al. Calculation of the expected bandwidth for a mid-infrared supercontinuum source based on As_2S_3 chalcogenide photonic crystal fibers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26666–26674.
- [77] Kubat I, Petersen C R, Møller U V, et al. Thulium pumped mid-infrared 0.9–9 μm supercontinuum generation in concatenated fluoride and chalcogenide glass fibers [J]. *Optics Express*, 2014, 22(4): 3959–3967.
- [78] Yeom D I, Mägi E C, Lamont M R E, et al. Low-threshold supercontinuum generation in highly nonlinear chalcogenide nanowires [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(7): 660–662.
- [79] Hudson D D, Dekker S A, Mägi E C, et al. Octave spanning supercontinuum in an As_2S_3 taper using ultralow pump pulse energy [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1122–1124.
- [80] Gattass R R, Shaw L B, Nguyen V Q, et al. All-fiber chalcogenide-based mid-infrared supercontinuum source [J]. *Optical Fiber Technology*, 2012, 18(5): 345–348.
- [81] 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.
- [82] Yao J, Zhang B, Yin K, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in step-index As_2S_3 fibers pumped by a nanosecond shortwave-infrared supercontinuum pump source [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 15093–15100.
- [83] Petersen C, 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 fiber [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(11): 830–834.
- [84] Cheng T, 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]. *Optical Letters*, 2016, 41(9): 2117–2120.
- [85] Zhao Z, Wang X, Dai S, et al. 1.5–14 μm mid-infrared supercontinuum generation in a low-loss Te-based chalcogenide step-index fiber [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5222–5225.
- [86] Zhao Z, Wu B, Wang X, 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): 1770023.
- [87] Han X, You C, Dai S, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in a three-hole $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$ chalcogenide suspended-core fiber [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 34: 74–79.
- [88] Jiao K, Yao J, Zhao Z, et al. Mid-infrared flattened supercontinuum generation in all-normal dispersion tellurium chalcogenide fiber [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2036–2043.
- [89] Lemiere A, Desevedavy F, Mathey P, et al. Mid-infrared supercontinuum generation from 2 to 14 μm in arsenic- and antimony-free chalcogenide glass fibers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(2): A183–A192.