

软玻璃光纤中红外超连续谱研究进展

黎宇^{1,2**}, 廖梅松^{1*}, 薛天锋¹, 贝家芳³, 胡丽丽¹, 张龙¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³澳大利亚阿德莱德大学光子和先进传感研究所, 阿德莱德 SA 5005

摘要 软玻璃光纤在中红外超连续谱的产生方面有广泛的应用,是目前研究的热点。综述了氟化物光纤、硝酸盐光纤以及硫化物光纤中产生中红外超连续谱的研究进展。在氟化物光纤中产生了目前最大功率的中红外超连续谱;硝酸盐光纤特别是微结构硝酸盐光纤在中红外超连续谱中的应用十分广泛;在硫化物光纤中产生了目前最宽的中红外超连续谱。

关键词 非线性光学; 中红外超连续谱; 氟化物光纤; 硝酸盐光纤; 硫化物光纤

中图分类号 TN244

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.080001

Research Progress of Mid-Infrared Supercontinuum in Soft Glass Fiber

Li Yu^{1,2**}, Liao Meisong^{1*}, Xue Tianfeng¹, Bei Jiafang³, Hu Lili¹, Zhang Long¹

¹Key Laboratory of Material Science for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Institute for Photonics and Advanced Sensing (IPAS), University of Adelaide, Adelaide SA 5005, Australia

Abstract Soft glass fibers have been widely applied in generation of mid-infrared supercontinuum, and have become a research focus. This article reviews the research progress of mid-infrared supercontinuum in fluoride fibers, tellurite fibers and chalcogenide glass fibers. The highest power of mid-infrared supercontinuum has been achieved in the fluoride glass fiber; tellurite glass fibers (in particular, microstructured) are widely applied in the mid-infrared supercontinuum; and chalcogenide glass fibers have been found to possess the broadest mid-infrared supercontinuum.

Key words nonlinear optics; mid-infrared supercontinuum; fluoride fiber; tellurite fiber; chalcogenide fiber

OCIS codes 190.4370; 060.2390; 160.3380

1 引言

中红外光源在生物医学、大气探测、红外对抗等领域有十分广泛的应用^[1-3]。常用的中红外激光光源有光参量振荡器(OPO)、光参量放大器(OPA)和量子级联激光器(QCL)等。OPA和OPO结构相对复杂,易受环境的影响^[4]。近些年,在中红外光纤中产生中红外超连续谱激光受到越来越多研究人员的关注,这为中红外光源提供了一条新的产生途径。

超连续谱是指入射光进入非线性介质中,在多

种非线性效应的作用下,输出光谱得到极大展宽的现象。超连续谱由两个重要的部分组成:抽运源和非线性介质。产生中红外超连续谱要求介质在中红外波段具有良好的透过率,有较高的非线性。用于产生中红外超连续谱的光纤有氟化物光纤、硝酸盐光纤和硫系光纤。

目前,日本、丹麦、波兰、加拿大和德国的一些研究机构在进行相关的研究,国内的国防科技大学、北京理工大学和宁波大学等也进行了相关的研究。

本文分别介绍了利用氟化物光纤、硝酸盐光纤

收稿日期: 2018-01-22; 修回日期: 2018-02-13; 录用日期: 2018-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61475171)、上海市自然科学基金(17ZR1433900,17ZR1434200)

* E-mail: liaomeisong@siom.ac.cn; ** E-mail: 415860719@qq.com

和硫系光纤作为非线性介质产生中红外超连续谱的研究进展。

2 氟化物光纤中红外超连续谱研究进展

氟化物光纤具有高损伤阈值,能够产生平均功率为几瓦至几十瓦的中红外超连续谱^[5]。用于产生中红外超连续谱的氟化物光纤分为两类:氟锆玻璃(ZrF_4 - BaF_2 - LaF_3 - AlF_3 - NaF , ZBLAN)光纤和氟钽玻璃(InF_3 - ZnF_2 - SrF_2 - BaF_2 - GaF_3 - CaF_2 , IZSBGC)光纤。

2.1 ZBLAN 光纤

ZBLAN 光纤的制备工艺较为成熟,实验室所用的 ZBLAN 光纤主要从供应商处购买,其中红外超连续谱中的研究集中在抽运源方面。商用氟化物光纤的损耗在 0.3 dB/m 以下,故能用长达 20 m 的光纤来产生中红外超连续谱^[6];由于光纤在长波处的损耗增加,ZBLAN 光纤产生的超连续谱一般不超过 4.5 μm 。

2006 年,Bartula 等^[7]第一次用 90 cm 长的 ZBLAN 光纤产生了 1.8~3.4 μm 的中红外超连续谱。2007 年,Chen 等^[8]利用 10 m 长的 ZBLAN 光

纤产生了平均功率为 1.3 W 的 1~4 μm 的超连续谱。2010 年,Qin 等^[9]用 1.45 μm 的飞秒激光器抽运一段 2 cm 的 ZBLAN 光纤产生了 0.35~6.28 μm 的超连续谱。随着 ZBLAN 光纤产生超连续谱的发展,为了实现中红外超连续谱激光器的应用,近几年的发展方向集中在全光纤化和高功率。

皮秒或纳秒级抽运光在光纤的反常色散区时,第一阶段超连续谱的产生主要受调制不稳定性影响,随后在光纤中会有受激拉曼红移以及色散波等效应使得超连续谱展宽,商用 ZBLAN 光纤的零色散波长在 1.5~1.9 μm 之间。2013 年,Heidt 等^[10]利用 33 ps 的抽运光在 2008 nm 处抽运 7 m 长的 ZBLAN 光纤产生了 0.75~4 μm 的超连续谱,值得注意的是,光谱在 2450~3750 nm 波段的平坦度为 1.5 dB,这是目前该波段内最为平坦的超连续谱。

为了实现中红外超连续谱激光器的产品化,全光纤的超连续谱产生装置是必要的,而实现全光纤的最大难点是光纤的熔接。2014 年,Yang 等^[11]利用长度为 8.4 m、纤芯为 9 μm 的 ZBLAN 光纤产生了平均功率为 13 W、宽度为 1.9~4.3 μm 的超连续谱。图 1 所示为产生超连续谱的实验装置示意图。

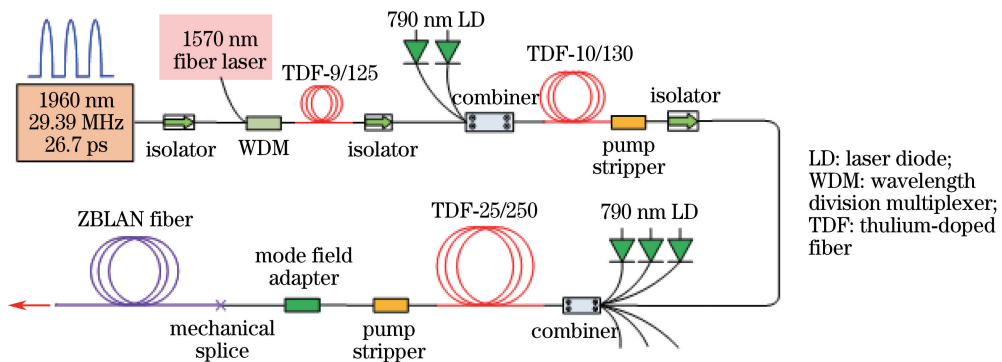


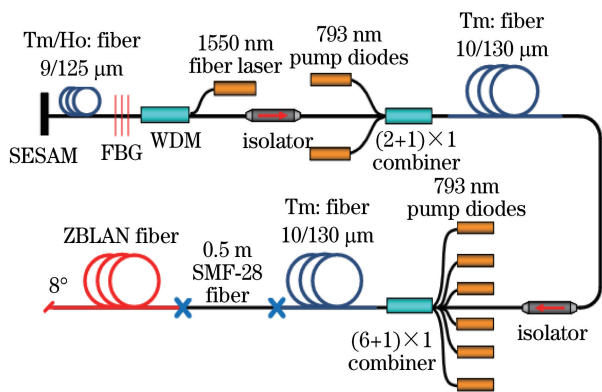
图 1 超连续谱产生的实验装置示意图^[11]

Fig. 1 Experimental setup for generation of supercontinuum^[11]

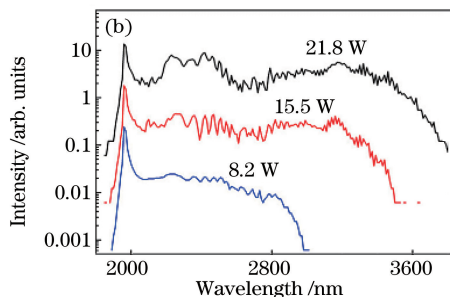
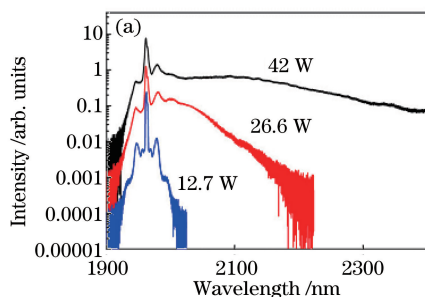
该实验装置实现了全光纤化,一个 1.96 μm 被动锁模光纤激光器,发出重复频率为 29.39 MHz、脉宽为 26.7 ps 的种子脉冲。种子光的功率是 3 mW,经过一次放大后,功率为 130 mW,脉冲没有明显的光谱展宽;经过第二次放大后,功率为 3.2 W,自相位调制(SPM)和调制不稳定性(MI)使得脉冲稍往长波方向移动;经过第三次放大之后,功率为 62.1 W,脉冲宽度展宽为 1.9~2.7 μm 。在制备模场适配器时,大模场光纤经过拉锥与扩芯的单模光纤进行熔接,经过放大后的脉冲通过物理叠接的方式由单模光纤耦合入

ZBLAN 光纤,经过非线性作用,最后产生平均功率为 13 W、宽度为 1.9~4.3 μm 的超连续谱。

由于 ZBLAN 光纤的高损伤阈值,其在高功率中红外超连续谱中得到了广泛的研究。为了获得高功率超连续谱,研究人员一般利用光纤放大器对抽运光进行多级放大,然后再对光纤进行抽运。2014 年,Liu 等^[5]利用长度为 10 m、纤芯直径为 9 μm 的 ZBLAN 光纤产生了平均功率为 21.8 W、宽度为 1.9~3.8 μm 的超连续谱,这是目前功率最大的中红外超连续谱。图 2 所示为产生该超连续谱的实验装置示意图。

图2 超连续谱产生的实验装置示意图^[5]Fig. 2 Experimental setup for generation of supercontinuum^[5]

该装置由一个掺铥的锁模光纤激光器发出重复频率为 93.6 MHz、脉宽为 24 ps 的 1963 nm 种子脉冲。经过两级掺铥光纤放大器之后，抽运脉冲的平均功率达到 42 W，脉宽展宽到 1.9~2.4 μm ，如图 3(a) 所示。经过放大的脉冲抽运 ZBLAN 光纤产生了平

图3 (a) 经过两次放大的抽运脉冲光谱; (b) 超连续谱的输出光谱^[5]Fig. 3 (a) Spectra of pumping pulse after two amplifiers; (b) output spectra of the supercontinuum^[5]

2.2 IZSBGC 光纤

ZBLAN 光纤在 4 μm 以上的损耗逐渐增大，其产生的超连续谱大部分在 4.5 μm 以内。IZSBGC 光纤和 ZBLAN 光纤相比声子能量较低，因此透过范围更宽，且 IZSBGC 光纤具有更好的化学稳定性^[14]，产生的超连续谱可以达到 5.5 μm 。图 4 为 ZBLAN 光纤和 IZSBGC 光纤损耗光谱的比较^[15]。

为了比较 IZSBGC 光纤和 ZBLAN 光纤在产生中红外超连续谱方面的差异，2013 年，Th  berge 等^[15]利用阶跃型 IZSBGC 光纤产生了平坦度为 20 dB 的 2.7~4.7 μm 的超连续谱。使用的 IZSBGC 光纤的零色散波长为 1.83 μm ，并且在 1.8~4 μm 之间的色散平坦。在相同条件下抽运长度为 9.5 m 的 IZSBGC 光纤和 9 m 的 ZBLAN 光纤，前者产生的超连续谱的宽度是后者的两倍。

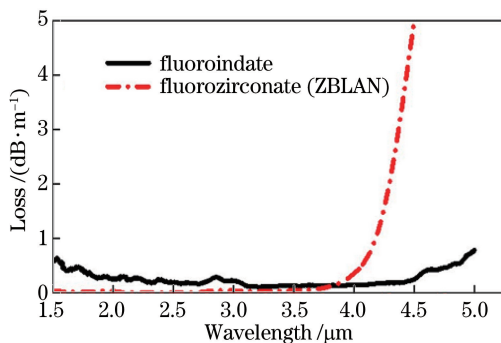
2015 年，美国索雷博公司 Salem 等^[16]利用长

均功率为 21.8 W、宽度为 1.9~3.8 μm 的超连续谱，如图 3(b) 所示。

2016 年，Zheng 等^[12]利用全光纤化的超连续谱产生装置抽运长度为 8 m、纤芯为 9 μm 的 ZBLAN 光纤，产生了平均功率为 10.67 W、谱宽为 1.9~4.1 μm 的中红外超连续谱。

上述研究所用 ZBLAN 光纤均为商用阶跃型光纤。2015 年，Jiang 等^[13]制备了 ZBLAN 光子晶体光纤 (PCF)，并在其中产生了 200~2500 nm 的超连续谱。这也是 ZBLAN 光子晶体光纤第一次应用于中红外超连续谱的产生。

用于产生中红外超连续谱的 ZBLAN 光纤，长度一般在 10 m 左右，最长可以到 20 m。同时，ZBLAN 光纤产生的超连续谱的平均功率在 10 W 左右，最大可达 21.8 W，这是目前在中红外光纤中产生的最高功率的超连续谱。随着光纤熔接技术的发展，ZBLAN 光纤产生超连续谱的全光纤化将更为成熟，这为之后的集成产品化奠定了基础。

图4 ZBLAN 光纤和氟化钽光纤的损耗光谱^[15]Fig. 4 Loss spectra of ZBLAN and fluoroindate fibers^[15]

度为 55 cm、纤芯为 7 μm 的 IZSBGC 光纤，产生了 1.25~4.6 μm 的超连续谱。研究人员通过调节光纤纤芯的大小来调控 IZSBGC 光纤的色散，最终选择 7 μm 的纤芯作为实验样品，其零色散波长为 1.9 μm ，实验分别研究了两种不同长度的 IZSBGC

光纤对超连续谱的影响,实验结果如图 5 所示。

30 cm 和 55 cm 长的 IZSBGC 光纤输出光谱的能量分别为 258 mW 和 247 mW,20 dB 光谱带宽分别为 2250 nm 和 2980 nm。由此可得,由于光纤的损耗,光纤越长,输出的超连续谱平均功率越低。

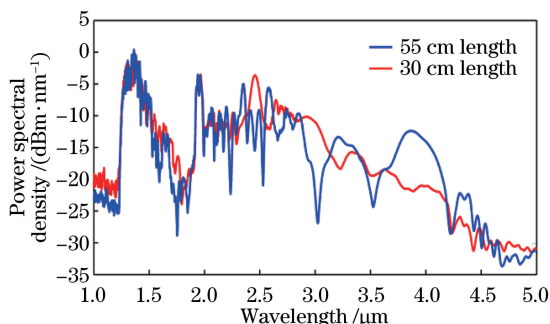


图 5 两种不同长度的 InF_3 光纤的超连续谱输出光谱^[16]

Fig. 5 Output spectra of supercontinuum in two fluoroindate fibers with different lengths^[16]

不同的抽运功率和抽运位置产生的超连续谱也会变化^[17],通过这些研究可以找到最佳的抽运波长及抽运功率。2016 年,Michalska 等^[18]利用 IZSBGC 光纤产生了 5 dB 的 2~5 μm 中红外超连续谱,这是目前最平坦的 2~5 μm 超连续谱。实验所用光纤的零色散波长为 1.72 μm ,并且在 2~4.4 μm 波段色散平坦。实验用 OPO 产生 70 ps、1 kHz 的种子光,探究不同抽运波长和不同抽运功率对超连续谱产生的影响,研究得出在 2.02 μm 处抽运 9 m 长的氟化铟光纤能够得到 5 dB 的 2~5 μm 中红外超连续谱,实验结果如图 6 所示。

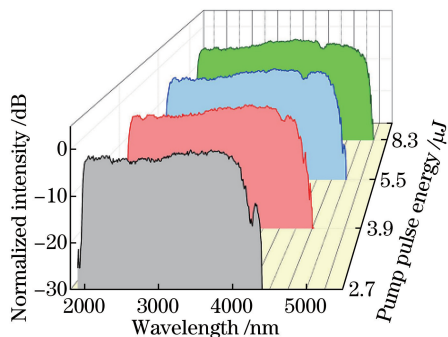


图 6 抽运脉冲能量分别为 2.7,3.9,5.5,8.8 μJ 时产生的超连续谱^[18]

Fig. 6 Supercontinuum spectra obtained from fluoroindate fiber pumped at pump pulse energies of 2.7, 3.9, 5.5, and 8.8 μJ ^[18]

氟化铟光纤产生中红外超连续谱的研究目前处于初期阶段,随着氟化铟光纤制备技术的成熟,进一步降低其损耗,使其能够在中红外超连续谱中有更

加广泛的应用。

氟化物光纤中红外超连续谱的研究主要是围绕抽运源展开的。一般而言,高抽运功率会产生更宽、功率更高的超连续谱,而其最大谱宽受到光纤自身透射范围的限制,最高功率则由材料的损伤阈值决定;在反常色散区抽运光纤,有益于产生更宽的超连续谱;光纤熔接技术的提高,有助于实现全光纤超连续谱产生装置。由于氟化物玻璃的热稳定性以及料性相对较差,因此实验室制备的氟化物光纤极少,这成为一个新的研究方向,在研究氟化物光纤中红外超连续谱时可以考虑光纤的设计与制备。

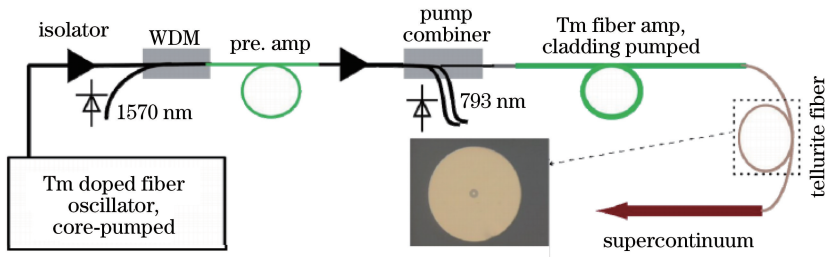
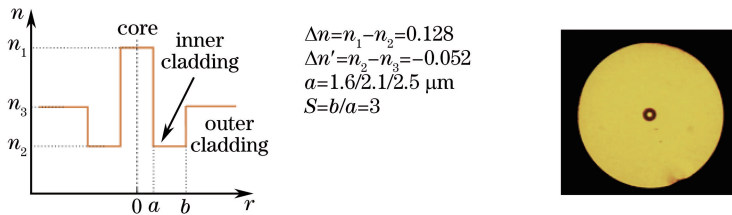
3 硝酸盐光纤中红外超连续谱研究进展

硝酸盐玻璃相对于氟化物玻璃而言,化学稳定性更好,同时其非线性折射率比氟化物玻璃高一个数量级,用其产生超连续谱的光纤长度在 1 m 以内。由于硝酸盐玻璃稳定性以及料性相对较好,故可以利用管棒法、挤压法以及吸铸法等进行预制棒的制备,其在制备微结构光纤方面相对容易,所以硝酸盐光纤中红外超连续谱的研究主要围绕光纤的结构开展。

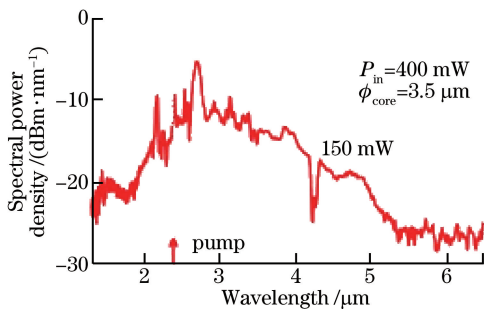
研究硝酸盐光纤超连续谱时,材料中 OH 会使光纤的损耗在 3.3 μm 处增大,因此需要一定的除水措施以降低硝酸盐光纤在 3.3 μm 处的损耗。2013 年,NP Photonics 公司 Thapa 等^[19]利用经过除水工艺制备的 W 型硝酸盐光纤产生中红外超连续谱。利用 W 型结构,将硝酸盐光纤的零色散波长调整到 1.9 μm 。如图 7 所示,研究用一个锁模掺铽的光纤振荡器发出脉宽为 1 ps、重复频率为 32 MHz、中心波长为 1922 nm 的脉冲,经过两次放大之后,脉宽达到 26 ps,平均功率为 3 W,然后通过石英光纤的过渡耦合进 1 m 的硝酸盐光纤中产生了 1~5 μm 的超连续谱。

2016 年,Kedenburg 等^[20]利用 W 型硝酸盐光纤产生了中红外超连续谱。研究所用光纤的折射率分布和光纤截面如图 8 所示。实验利用长 15 cm、纤芯为 5 μm 、零色散波长为 1.9 μm 的光纤,产生了 1.7~4.3 μm 的中红外超连续谱。W 型光纤能够将光纤的零色散点从 2 μm 调整到 1.9 μm ,这样利用 2 μm 的激光器对其进行抽运时,抽运位置位于反常色散区内,有助于色散波的产生,从而增加超连续谱的宽度。

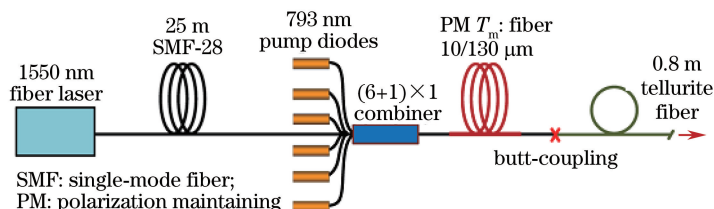
W 型硝酸盐光纤结构能够调整光纤的色散,对零色散波长和色散大小进行相关调控,有助于产生更宽、更平坦的超连续谱。

图 7 超连续谱产生的实验装置示意图^[19]Fig. 7 Experimental setup for generation of supercontinuum^[19]图 8 W型碲酸盐光纤的折射率分布及光纤截面^[20]Fig. 8 Refractive index profile and microscope image of the fiber end-face of the W-type tellurite fiber^[20]

随后在 2017 年, Kedenburg 等^[21] 又利用其制备的阶跃型碲酸盐光纤, 研究了不同纤芯、不同光纤长度、不同抽运位置对超连续谱的影响, 获得产生最宽超连续谱的最佳条件。最终实验确定光纤的长度为 9 cm, 纤芯为 3.5 μm , 抽运波长为 2.4 μm , 产生了最宽的超连续谱, 如图 9 所示。

图 9 9 cm 的阶跃型碲酸盐光纤产生的超连续谱^[21]Fig. 9 Supercontinuum spectrum in 9 cm step-index tellurite glass fiber^[21]

2016 年, Shi 等^[22] 利用其制备的低损耗碲酸盐阶跃型光纤产生了 1.975~3 μm 的中红外超连续谱

图 10 超连续谱产生的实验装置示意图^[22]Fig. 10 Experimental setup for generation of supercontinuum^[22]

(图 10)。其制备的光纤纤芯为 11 μm , 零色散波长为 2.2 μm 。研究用 1550 nm 的光纤激光器发射 6 ns、重复频率为 150 kHz、最大平均功率为 4.5 W 的脉冲, 经过 25 m 长单模光纤后, 脉冲展宽, 波长红移至 2.4 μm , 功率降到 3 W。然后进入掺铥光纤放大器内, 经过一个单模光纤耦合到 0.8 m 的碲酸盐光纤中, 产生超连续谱。实验最终产生了 2.1 W 的 1.97~3 μm 超连续谱。值得注意的是, 整个 2~3 μm 波段的平坦度在 3 dB 以内。这也是目前在碲酸盐中产生的功率最高的超连续谱。

碲酸盐光纤超连续谱的产生不仅在阶跃型或者 W 型光纤中有一些研究, 在微结构光纤中也得到了广泛的研究。由于碲酸盐微结构光纤存在空气孔, 所以其调节色散的能力比 W 型光纤强得多。

2008 年, Domachuk 等^[23] 用 8 mm 的碲酸盐光子晶体光纤, 产生了 0.789~4.87 μm 的超连续谱, 所用光纤的零色散波长为 1.38 μm 。同年, Feng 等^[24] 利用 9 cm 的大模场碲酸盐光子晶体光纤产生了 0.9~2.5 μm 的超连续谱。2009 年, Liao 等^[25] 用 6 cm 的碲

酸盐光子晶体光纤研究不同抽运波长以及不同的空气孔对超连续谱的影响,光纤的零色散波长为 $1 \mu\text{m}$ 。2010年,Qin等^[26]利用35 cm四孔微结构碲酸盐光纤,产生了900~2800 nm的超连续谱。

2012年,Savelii等^[27]利用制备的悬芯碲酸盐光纤产生了0.75~2.8 μm 的超连续谱。光纤截面

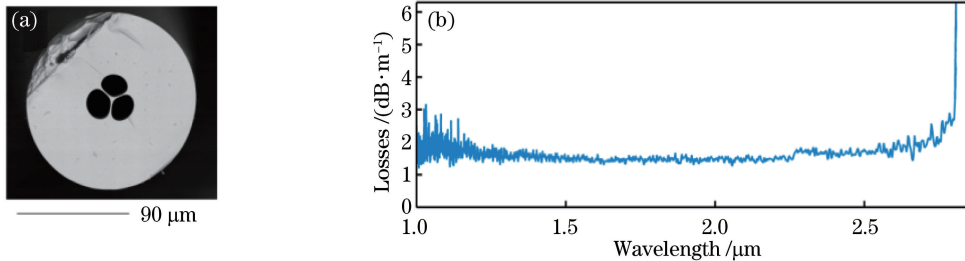


图 11 (a) 光纤端面; (b) 光纤损耗^[27]

Fig. 11 (a) Profile of the tellurite fiber end; (b) fiber losses of the tellurite fiber^[27]

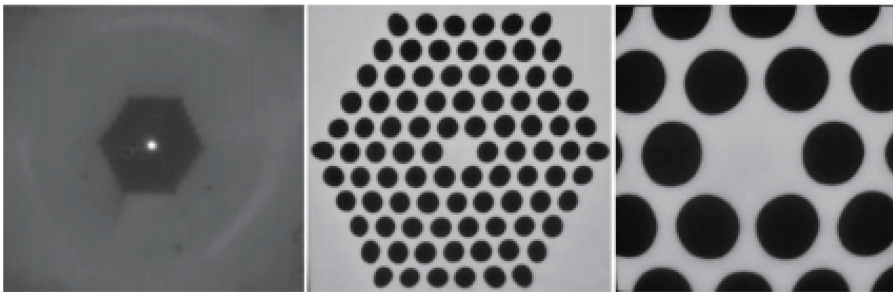


图 12 光纤截面^[29]

Fig. 12 Profile of the tellurite photonic crystal fiber^[29]

碲酸盐超连续谱的研究主要集中在光纤上,阶跃型碲酸盐光纤的零色散波长在 $2 \mu\text{m}$ 附近,而微结构碲酸盐光纤可以将光纤的零色散波长调节到 $1 \mu\text{m}$ ^[25],这使抽运源的选择更加灵活;碲酸盐光纤的化学稳定性优于氟化物光纤,这有利于其相对稳定的使用;同时由于具有相对较长的料性,所以在微结构碲酸盐光纤方面有大量的研究,微结构碲酸盐光纤可以调控色散的大小,在全正色散的光纤中产生的超连续谱具有高相干性,这也是未来的研究方向之一。

4 硫化物光纤中红外超连续谱研究进展

与氟化物光纤和碲酸盐光纤相比,硫化物光纤的透过范围更宽,非线性折射率更大,所以其中红外非线性领域应用较为广泛。硫化物光纤在超连续谱方面的研究主要集中在谱的宽度,制备预制棒的方法主要是挤压法。

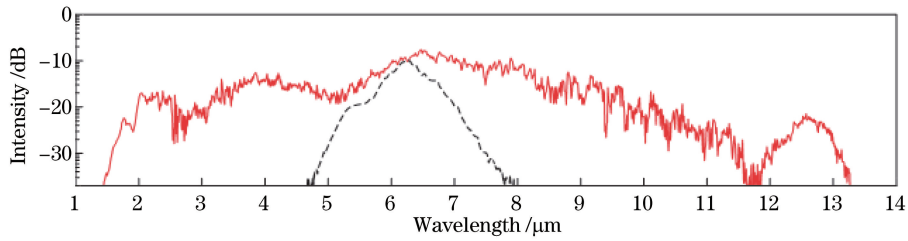
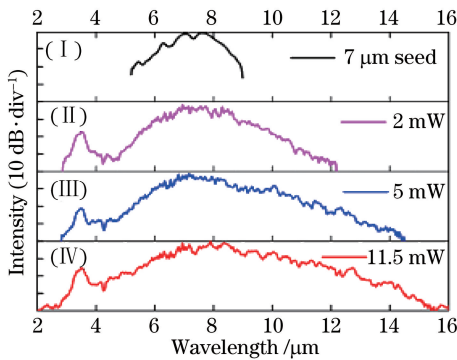
和损耗如图 11 所示,所用光纤的零色散波长为 $1.66 \mu\text{m}$ 。2015年,Belal等^[28]利用制备的两孔悬芯碲酸盐光纤产生了 $3 \mu\text{m}$ 的超连续谱。

2013年,Klimczak等^[29]利用2 cm的碲酸盐光子晶体光纤,产生了800~2500 μm 的超连续谱,光纤截面如图 12 所示。

2009年,Gattass等^[30]利用 As_2S_3 光纤制备了一个全光纤超连续谱光源,超连续谱的20 dB带宽为 $1.9\sim 4.8 \mu\text{m}$,输出功率为565 mW。

2014年,Petersen等^[31]利用挤压法制备了纤芯为 $16 \mu\text{m}$ 的 As_2Se_3 光纤,光纤的零色散波长为 $5.83 \mu\text{m}$,长度为8.8 cm。在 $6.3 \mu\text{m}$ 处抽运该光纤,产生了 $1.4\sim 13.3 \mu\text{m}$ 的中红外超连续谱,如图 13 所示。

由于硫化物光纤中碲化物的透过范围可以达到 $20 \mu\text{m}$,为了得到更宽的超连续谱,2016年,Zhao等^[32]利用多级挤压法制备了低损耗阶跃型碲化物光纤。光纤的纤芯为 $70 \mu\text{m}$,零色散波长为 $10.5 \mu\text{m}$,实验用23 cm长的光纤,产生了 $1.5\sim 14 \mu\text{m}$ 的超连续谱。随后在2017年,Zhao等^[33]制备了碲化物的阶跃型光纤,光纤的纤芯为 $7 \mu\text{m}$,零色散波长为 $10.5 \mu\text{m}$ 。实验用17 cm的光纤,产生了 $2\sim 16 \mu\text{m}$ 的超连续谱,这是目前最宽的超连续谱。图 14 为不同抽运功率下的超连续谱。

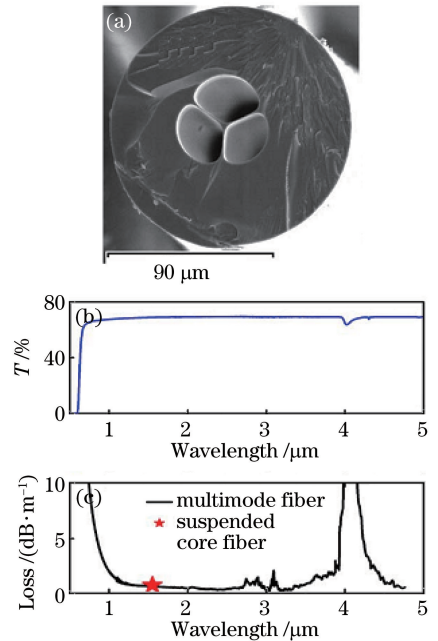
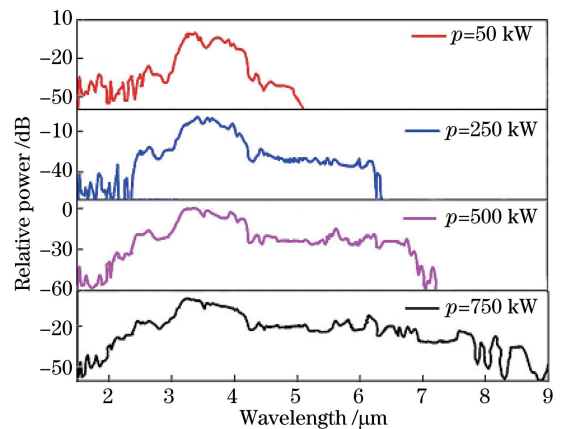
图 13 超连续谱的输出光谱^[31]Fig. 13 Output spectra of the supercontinuum^[31]图 14 抽运脉冲平均功率分别为 2,5,11.5 mW 时得到的超连续谱^[33]Fig. 14 Supercontinuum in chalcogenide glass fiber at pumping powers of 2, 5, and 11.5 mW^[33]

阶跃型硫化物光纤产生的中红外超连续谱研究集中在谱宽上,也有一部分研究人员研究微结构硫化物中产生的中红外超连续谱。

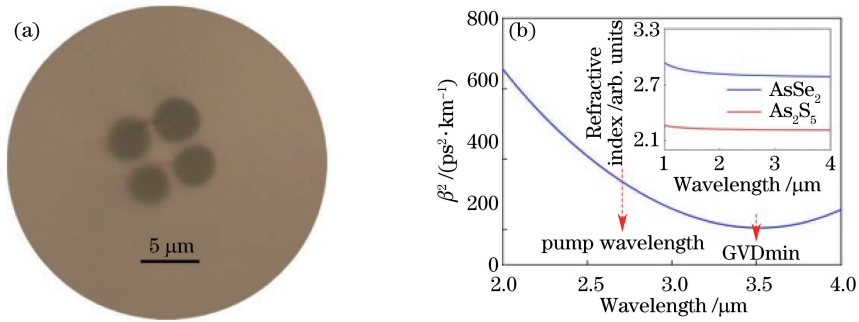
大部分阶跃型硫化物光纤的零色散波长在 $5 \mu\text{m}$ 处,这不利于抽运源的选择,因此有一部分研究围绕硫化物微结构光纤的超连续谱产生进行。2014 年, Mouawad 等^[34] 制备了在 $1\sim 4 \mu\text{m}$ 损耗小于 2 dB/m 的 As_2S_3 悬芯光纤。光纤截面、玻璃透过率以及光纤损耗如图 15 所示。实验用机械钻孔加工光纤预制棒,光纤纤芯的直径为 $3.4 \mu\text{m}$,零色散波长为 $2.4 \mu\text{m}$,实验用 $2.5 \mu\text{m}$ 的脉冲抽运 2 cm 的光纤产生了 $0.6\sim 4.1 \mu\text{m}$ 的超连续谱。

为了研究不同的抽运功率对超连续谱的影响,找到合适的抽运功率,2017 年, Han 等^[35] 制备了硫化物悬芯光纤。利用机械钻孔的方式制备光纤预制棒,最终制备的光纤纤芯为 $6 \mu\text{m}$,零色散波长为 $3.2 \mu\text{m}$ 。实验用 15 cm 的硫化物光纤,在峰值功率为 750 kW 时产生了最宽的 $2\sim 8 \mu\text{m}$ 超连续谱,如图 16 所示。

2016 年, Liu 等^[36] 利用全正色散全固态的硫化物微结构光纤产生了高相干性的中红外超连续谱,光纤的结构和色散分布如图 17 所示。

图 15 (a) 光纤截面; (b) 玻璃的透过光谱; (c) 光纤损耗^[34]
Fig. 15 (a) Profile of the fiber; (b) transmission spectrum of the glass; (c) fiber loss^[34]图 16 抽运脉冲峰值功率分别为 50,250,500,750 kW 时得到的超连续谱^[35]Fig. 16 Supercontinuum in chalcogenide glass fiber at pumping peak powers of 50, 250, 500 and 750 kW^[35]

除此之外,近年来还有大量的研究集中在模拟硫化物光子晶体光纤中超连续谱的产生以及硫化物

图 17 (a) 光纤截面; (b) 光纤的色散曲线^[36]Fig. 17 (a) Profile of the fiber; (b) dispersion curve of the fiber^[36]

光纤和氟化物光纤复合产生中红外超连续谱的研究^[37-41],这也为在硫化物光纤中产生中红外超连续谱的研究提供了新的方向。

硫化物光纤具有最宽的中红外透过范围,所以产生了目前在中红外波段最宽的超连续谱^[33]。由于硫化物光纤的非线性折射率比氟化物光纤高两个

数量级以上,所以用较短的光纤就能够产生足够的非线性效应。硫化物光纤能够产生很宽的超连续谱,但是其损伤阈值很低,所以产生的超连续谱的平均功率不超过 1 W。目前硫化物光子晶体光纤研究较少,这也可能是未来的发展方向之一。

表 1 按照不同的光纤种类总结了近年来中红外

表 1 中红外光纤产生的超连续谱

Table 1 Supercontinuum in mid-infrared fibers

No.	Pump source				Fiber glass	Nonlinear medium		Supercontinuum			Ref.
	PW / μm	Pulse width / ps	Pumping power / mW	Pumping repetition rate / kHz		Length/core diameter	ZDW / μm	Spectrum / μm	Power / mW	Flatness / dB	
1	1.963	24	42000	93600	ZBLAN	10 m/9 μm	1.57	1.9-3.8	21800	NA	[5]
2	1.55	1000	30100	6000	ZBLAN	12 m/9 μm	1.49	1.9-4.2	15200	NA	[42]
3	1.96	26	NA	47400	ZBLAN	10 m/8 μm	1.49	1.9-3.9	7110	30	[43]
4	1.55	1000	5000	700	ZBLAN	7.5 m/7 μm	1.9	0.85-4.2	2240	40	[44]
5	1.963	0.5	62100	29390	ZBLAN	8.4 m/9 μm	1.57	1.9-4.3	13000	NA	[11]
6	1.95	12.58	16300	75400	ZBLAN	8 m/9 μm	1.57	1.9-4.1	10670	20	[12]
7	1.994	25000	2200	26	ZBLAN	20 m/6.8 μm	1.9	1.8-4.15	1250	NA	[6]
8	2.05	1000	1960	1	ZBLAN	11 m/8 μm	1.5	0.8-4.5	550.8	40	[45]
9	2	250	2300	26	ZBLAN	20 m/7 μm	1.9	1.9-3.8	740	30	[46]
10	3.4	0.07	NA	NA	IZSBGC	9.5 m/16 μm	1.83	2.7-4.7	NA	20	[15]
11	2.02	70	NA	1	IZSBGC	9 m/9 μm	1.72	2.0-5.0	NA	5	[18]
12	2.75	400	978	2	IZSBGC	15 m/13.5 μm	1.7	2.4-5.4	NA	20	[47]
13	2.1	0.1	570	50000	IZSBGC	0.55 m/7 μm	1.9	1.25-4.6	247	35	[16]
14	1.922	26	3000	32000	Tellurite	100 cm/5 μm	1.9	1.0-5.0	1200	NA	[19]
15	1.55	6000	9800	150	Tellurite	80 cm/11 μm	2.2	1.975-3	2100	3	[22]
16	3.2	0.48	460	43000	Tellurite	15 cm/5 μm	1.9	2.6-4.6	130	35	[20]
17	2.4	0.3	400	43000	Tellurite	9 cm/3.5 μm	2	1.3-5.3	150	20	[21]
18	2.19	1000	291	100	Chalcogenide	300 cm/7 μm	6.6	2.0-4.0	140	20	[48]
19	4.8	0.15	150	1	Chalcogenide	20 cm/10 μm	4.5	1.4-8.8	NA	NA	[49]
20	6.3	0.1	0.76	1	Chalcogenide	8.8 cm/16 μm	5.83	1.4-13.3	0.15	30	[31]
21	7	0.15	11.5	1	Chalcogenide	17 cm/7 μm	10.5	2.0-16.0	NA	40	[33]
22	4.5	0.15	NA	1	Chalcogenide	23 cm/70 μm	10.5	1.5-14	NA	30	[32]
23	5	0.15	0.45	1	Chalcogenide	100 cm/200 μm	4.9	1.4-7.0	NA	30	[50]
24	2.8	400	NA	2	Chalcogenide	3.5 m/18 μm	7	3.0-8.0	1.5	NA	[51]
25	4.485	0.33	66	21000	Chalcogenide	11 cm/6 μm	4.2-7.3	2.2-12	17	NA	[52]
26	9.8	0.17	0.5	1	Chalcogenide	3 cm/15 μm	5.5	2.0-15.1	NA	NA	[53]
27	2.6	0.2	192	76000	Chalcogenide	2.4 cm/3.2 μm	2.52	1.5-4.61	NA	NA	[54]
28	4.7	0.32	34	21000	Chalcogenide	18 cm/4.5 μm	3.5	1.7-7.5	15.6	20	[55]
29	3.3	0.15	1.125	1	Chalcogenide	15 cm/6 μm	3.2	2.0-8.0	NA	NA	[35]
30	2.5	0.2	78	80000	Chalcogenide	2 cm/3.4 μm	2.4	0.6-4.1	NA	40	[34]

Note: PW, pumping wavelength; ZDW, zero-dispersion wavelength; NA, not applicable.

光纤产生的超连续谱。

5 结束语

氟化物光纤的损伤阈值较高,在高功率中红外超连续谱方面有广泛的应用。利用 ZBLAN 光纤,目前中红外超连续谱的最高功率可以达到 21.8 W;在氟化物光纤中产生了 2450~3750 nm 波段最为平坦的超连续谱;大部分实验室所用的氟化物光纤直接从供应商处购买,所以研究主要集中在抽运源方面;氟化物玻璃的料性短且热稳定差,所以其在微结构光纤方面的研究较少。

氟化物光纤产生超连续谱的发展方向:利用功率更高的抽运源抽运 ZBLAN 光纤产生更高功率的超连续谱;从氟化物光纤的设计和制备的角度对中红外超连续谱进行相关的研究。

碲酸盐玻璃的红外透过范围略小于氟化物玻璃,但非线性折射率比氟化物玻璃大一个数量级,用于产生超连续谱的碲酸盐光纤的长度在 1 m 以内;碲酸盐玻璃的稳定性和料性优于氟化物光纤,所以更易于制备微结构光纤用于色散的调控,这有助于抽运源的选择以及平坦超连续谱的产生;碲酸盐玻璃相较于其他两种玻璃而言,水杂质难以去除,因而光纤在 3.3 μm 处的损耗较大,限制了其中红外方面的应用。

碲酸盐光纤产生超连续谱的发展方向:利用光纤的设计影响超连续谱的性质,设计全正色散的光纤有助于产生高相干性的超连续谱;在抽运源方面可以考虑全光纤的产生装置。

在三种光纤中,硫化物光纤的透过范围最宽,大部分研究集中在超连续谱的宽度方面。目前利用碲化物光纤能够产生最宽的中红外超连续谱为 2~16 μm ;由于具有最大的非线性折射率,所以用于产生超连续谱的光纤长度可以很短,Cheng 等利用 3 cm 的碲化物光纤产生了 2~15.1 μm 的超连续谱;硫化物光纤的损伤阈值较低,所以产生的超连续谱的平均功率在三种光纤中是最低的。

硫化物光纤产生超连续谱的发展方向:尝试制备硫化物光子晶体光纤,并研究其中的超连续谱;探究更宽的中红外超连续谱。

参 考 文 献

[1] Luo Y, Liang X B, Li C, *et al.* Influence of supercontinuum laser on bioluminescence imaging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*,

2016, 53(12): 121401.

罗韵, 梁小宝, 李超, 等. 超连续谱激光对生物荧光激发效应的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 121401.

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Swiderski J. High-power mid-infrared supercontinuum sources: current status and future perspectives[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2014, 38(5): 189-235.
- [5] 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.
- [6] Swiderski J, Michalska M, Kieleck C, *et al.* High power supercontinuum generation in fluoride fibers pumped by 2 μm pulses[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(2): 150-153.
- [7] Bartula R, Hagen C, Walewski J, *et al.* Generation of pulsed ultra-violet and mid-infrared super-continua in standard single-mode fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18: 91-93.
- [8] Chen X, Kumar M, Cheng M, *et al.* Power scalable mid-infrared supercontinuum generation in ZBLAN fluoride fibers with up to 1.3 watts time-averaged power[J]. *Optics Express*, 2007, 15(3): 865-871.
- [9] Qin G, Yan X, Liao M, *et al.* Ultra-broadband supercontinuum generation from ultraviolet to 6.28 μm in a fluoride fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 95: 161103.
- [10] Heidt A, Price J, Baskiotis C, *et al.* Mid-infrared ZBLAN fiber supercontinuum source using picosecond diode-pumping at 2 μm [J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 24281-24287.
- [11] 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.
- [12] Zheng Z, Zhao J, Liu M, *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.
- [13] Jiang X, Joly N, Finger M, *et al.* Deep-ultraviolet to mid-infrared supercontinuum generated in solid-core ZBLAN photonic crystal fiber[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9: 133-139.
- [14] Bei J, Foo H, Qian G, *et al.* Experimental study of chemical durability of fluorozirconate and fluoroindate glasses in deionized water [J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(6): 1213-1226.
- [15] Théberge F, Daigle J, Vincent D. Mid-infrared supercontinuum generation in fluoroindate fiber[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4683-4685.
- [16] Salem R, Jiang Z, Liu D, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation spanning 1.8 octaves using step-index indium fluoride fiber pumped by a femtosecond fiber laser near $2\ \mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): 30593-30602.
- [17] Gao P F, Li X H, Luo W F, *et al.* Numerical simulation of effect of pump wavelength on mid-infrared supercontinuum [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0703023.
高鹏飞, 李晓辉, 罗文峰, 等. 抽运波长对中红外超连续谱影响的数值模拟 [J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0703023.
- [18] Michalska M, Mikolajczyk J, Wojtas J, *et al.* Mid-infrared, super-flat, supercontinuum generation covering the $2\text{-}5\ \mu\text{m}$ spectral band using a fluoroindate fibre pumped with picosecond pulses[J]. *Science Reports*, 2016, 6: 39138.
- [19] 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.
- [20] Kedenburg S, Steinle T, Mörz F, *et al.* Solitonic supercontinuum of femtosecond mid-IR pulses in W-type index tellurite fibers with two zero dispersion wavelengths[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 1(8): 086101.
- [21] Kedenburg S, Strutynski C, Kibler B, *et al.* High repetition rate mid-infrared supercontinuum generation from 1.3 to $5.3\ \mu\text{m}$ in robust step-index tellurite fibers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): 601-607.
- [22] Shi H, Feng X, Tan F, *et al.* Multi-watt mid-infrared supercontinuum generated from a dehydrated large-core tellurite glass fiber [J]. *Optics Express*, 2016, 6(12): 3967-3076.
- [23] Domachuk P, Wolchove N, Cronin-Golomb M, *et al.* Over 4000 nm bandwidth of mid-IR supercontinuum generation in sub-centimeter segments of highly nonlinear tellurite PCFs [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7161-7168.
- [24] Feng X, Loh W, Flanagan J, *et al.* Single-mode tellurite glass holey fiber with extremely large mode area for infrared nonlinear applications [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 13651-13656.
- [25] Liao M, Chaudhari C, Qin G, *et al.* Tellurite microstructure fibers with small hexagonal core for supercontinuum generation [J]. *Optics Express*, 2009, 17(14): 12174-12182.
- [26] Qin G, Yan X, Kito C, *et al.* Highly nonlinear tellurite microstructured fibers for broadband wavelength conversion and flattened supercontinuum generation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(4): 043108.
- [27] Savelii I, Mouawad O, Fatome J, *et al.* Mid-infrared 2000-nm bandwidth supercontinuum generation in suspended-core microstructured sulfide and tellurite optical fibers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(24): 27083-27093.
- [28] Belal M, Xu L, Horak P, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation in suspended core tellurite micro structured optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(10): 2237-2240.
- [29] Klimczak M, Stepniewski G, Bookey H, *et al.* Broadband infrared supercontinuum generation in hexagonal-lattice tellurite photonic crystal fiber with dispersion optimized for pumping near $1560\ \text{nm}$ [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4679-4682.
- [30] Gattass R, Shaw L, Nguyen V, *et al.* All-fiber chalcogenide-based mid-infrared supercontinuum source[J]. *Optical Fiber Technology*, 2012, 18: 345-348.
- [31] Petersen C, Møller U, Kubat I, *et al.* Mid-infrared supercontinuum covering the $1.4\text{-}13.3\ \mu\text{m}$ molecular fingerprint region using ultra-high NA chalcogenide step-index fibre [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8: 830-834.
- [32] Zhao Z, Wang X, Dai S, *et al.* $1.5\text{-}14\ \mu\text{m}$ mid-infrared supercontinuum generation in a low-loss Te-based chalcogenide step-index fiber [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5222-5225.
- [33] Zhao Z, Wu B, Wang X, *et al.* Mid-infrared supercontinuum covering $2.0\text{-}16\ \mu\text{m}$ in a low-loss

- telluride single-mode fiber [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(2): 1700005.
- [34] Mouawad O, Picot-Clément J, Amrani F, *et al.* Multioctave midinfrared supercontinuum generation in suspended-core chalcogenide fibers [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(9): 2684-2687.
- [35] Han X, You C, Dai S, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation in a three-hole Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅ chalcogenide suspended-core fiber [J]. *Optical Fiber Technology*, 2017, 34: 74-79.
- [36] 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.
- [37] Jamatia P, Saini T, Kumar A, *et al.* Design and analysis of a highly nonlinear composite photonic crystal fiber for supercontinuum generation: visible to mid-infrared [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(24): 6775-6781.
- [38] Wu Y. 2-10 μm mid-infrared supercontinuum generation in As₂Se₃ photonic crystal fiber [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(9): 095107.
- [39] Diouf M, Salem A, Cherif R, *et al.* High power broadband mid-infrared supercontinuum fiber laser using a novel chalcogenide AsSe₂ photonic crystal fiber [J]. *Optical Materials*, 2016, 55: 10-16.
- [40] Zhang P, Ma B, Zhang J, *et al.* Simulation study of mid-infrared supercontinuum generation in Ge₂₃Sb₁₂S₆₅-based chalcogenide photonic crystal fiber [J]. *Optik*, 2016, 127: 2732-2736.
- [41] Yin K, Zhang B, Cai Z, *et al.* Fiber-pumped 2.0-5.5 μm supercontinuum laser source [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1215001.
殷科, 张斌, 蔡振, 等. 光纤抽运 2.0~5.5 μm 光谱平坦型中红外超连续谱光源 [J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1215001
- [42] 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.
- [43] Yang W, Zhang B, Yin K, *et al.* High power all fiber mid-IR supercontinuum generation in a ZBLAN fiber pumped by a 2 μm MOPA system [J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 19732-19742.
- [44] Swiderski J, Michalska M. High-power supercontinuum generation in a ZBLAN fiber with very efficient power distribution toward the mid-infrared [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 910-913.
- [45] Yin K, Zhang B, Yao J, *et al.* Highly stable, monolithic, single-mode mid-infrared supercontinuum source based on low-loss fusion spliced silica and fluoride fibers [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(5): 946-949.
- [46] Swiderski J, Michalska M, Maze G. Mid-IR supercontinuum generation in a ZBLAN fiber pumped by a gain-switched mode-locked Tm-doped fiber laser and amplifier system [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 7851-7857.
- [47] Gauthier J, Fortin V, Carrée J, *et al.* Mid-IR supercontinuum from 2.4 to 5.4 μm in a low-loss fluoroindate fiber [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(8): 1756-1759.
- [48] Yao J, Zhang B, Yin K, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation in step-index As₂S₃ fibers pumped by a nanosecond shortwave-infrared supercontinuum pump source [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 15093-15100.
- [49] Luo B, Wang Y, Dai S, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation in As₂Se₃-As₂S₃ chalcogenide glass fiber with high NA [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(12): 2464-2469.
- [50] Zhang P, Yang P, Wang X, *et al.* Broadband mid-infrared supercontinuum generation in 1-meter-long As₂S₃-based fiber with ultra-large core diameter [J]. *Optics Express*, 2016, 24(25): 28400-28408.
- [51] Robichaud L, Fortin V, Gauthier J, *et al.* Compact 3-8 μm supercontinuum generation in a low-loss As₂Se₃ step-index fiber [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4605-4608.
- [52] Zhang B, Yu L, Zhai C, *et al.* High brightness 2.2-12 μm mid-infrared supercontinuum generation in a nontoxic chalcogenide step-index fiber [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2016, 99(8): 2565-2568.
- [53] Cheng T, Nagasaka K, Tuan T, *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.
- [54] Gao W, Amraoui M, Liao M, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation in a suspended-core As₂S₃ chalcogenide microstructured optical fiber [J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9573-9583.
- [55] 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.