

文章编号: 1000-7032(2024)01-0111-14

基于软玻璃光纤产生中红外超连续谱研究进展

刘艳婷, 黄飞飞*, 沈丹阳*, 华有杰, 张军杰, 徐时清

(中国计量大学 光电材料与器件研究院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 随着软玻璃光纤的发展和光纤激光器的进步,越来越多的研究人员采用以软玻璃光纤代替石英光纤的方式,得到高功率中红外超连续谱光源。通过广泛阅读国内外关于氟化物玻璃光纤、硫系玻璃光纤和碲酸盐玻璃光纤等软玻璃光纤产生超连续谱的相关文献,本文综述了近年来利用这三类光纤产生中红外超连续谱光源的研究进展。目前氟化物玻璃光纤在实验中的应用最为广泛,且研发进度较快,获得的中红外超连续谱覆盖范围在2~5 μm ,最大输出功率可达30 W;硫系玻璃光纤产生的中红外超连续谱光源带宽可达10 μm 以上,但输出功率较低;碲酸盐玻璃光纤由于材料中羟基难以去除,在中红外超连续谱的实验中进展较为缓慢;而氟碲酸盐光纤在近几年发展迅速,可能成为未来中红外超连续谱研究的理想介质。

关键词: 超连续谱; 中红外; 软玻璃光纤; 非线性光纤

中图分类号: TN248

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230274

Research Progress of Mid-infrared Supercontinuum Generation Based on Soft Glass Fiber

LIU Yanting, HUANG Feifei*, SHEN Danyang*, HUA Youjie, ZHANG Junjie, XU Shiqing

(Institute of Optoelectronic Materials and Devices, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

* Corresponding Authors, E-mail: huangfeifei@cjl. edu. cn; Shendy@cjl. edu. cn

Abstract: With the development of soft glass fiber and fiber laser, more and more researchers use soft glass fiber instead of quartz fiber to obtain high power mid-infrared supercontinuum source. Through extensive reading of the domestic and foreign literatures on supercontinuum generation in soft glass fibers such as fluoride, chalcogenide and tellurite glass fibers, the recent progress in the generation of mid-infrared supercontinuum source using these three types of fibers is reviewed. At present, fluoride glass fiber is widely used in the experiment, with the rapid progress in research and development. The spectrum coverage range of mid-infrared supercontinuum source is 2~5 μm , and the maximum output power is 30 W. The bandwidth of the mid-infrared supercontinuum source generated by chalcogenide glass fiber can reach more than 10 μm , but the output power is low. Because the hydroxyl groups in tellurite glass fibers are difficult to be removed, the progress in the experiment of mid-infrared supercontinuum is very slow. In recent years, the development of fluorotellurite fiber is rapid, and it may become an ideal medium for the future study of mid-infrared supercontinuum.

Key words: supercontinuum spectrum; mid-infrared; soft glass fiber; nonlinear optical fiber

1 引 言

激光因其相干性强、单色性好、方向性强和亮

度高等特点,在基础物理、化学分析和生物医学等基础研究领域得到了广泛应用。同时众多工业企业也开始寻求利用激光来解决所面临的痛点难

收稿日期: 2023-11-02; 修订日期: 2023-11-19

基金项目: 国家自然科学基金两化融合项目(U1909211); 国家自然科学基金面上项目(62075204); 浙江省自然科学基金项目(LA20A040001)

Supported by National Natural Science Foundation of China Joint Fund Project(U1909211); National Natural Science Foundation of China(62075204); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation(LZ20A040001)

题,而不同的产业应用需要激光参数各异的激光器,这对新型激光光源的开发提出了迫切需求。超连续激光光源相比普通激光来说,具有空间相干性好、光谱范围宽、高亮度等特点,其中 2~5 μm 波段在光谱学中涵盖了大多数分子指纹图谱,因此中红外超连续谱光源在红外对抗、医学影像、气体监测等领域具有非常广泛的应用前景。自 1970 年美国 Alfano 等利用皮秒激光器泵浦非线性玻璃产生了光谱覆盖范围在 400~700 nm 的超连续谱光源之后^[1-2],越来越多的科研人员开始把注意力转移到超连续谱光源的研究中。但是利用非线性玻璃介质产生超连续谱光源往往需要激光器拥有极高的峰值功率,同时产生的超连续光谱质量不高,使得其应用相当有限。而光纤由于全反射原理可以将激光约束在光纤纤芯内,增加激光与物质之间的非线性作用,从而降低对激光器的功率要求^[3],最终能够得到较高的超连续光谱质量,因此成为产生超连续谱的理想介质。1976 年,光纤首次作为非线性介质产生了超连续谱^[4],但是由于当时光纤制备工艺和激光技术都有待提高,导致超连续谱的研究进展一直较为缓慢。1996 年,英国 Russel 成功制备出第一根光子晶体光纤(Photonic crystal fiber, PCF)^[5],PCF 较高的非线性系数和色散可调性质使得其非常适合作为产生超连续谱的介质。2000 年,美国贝尔实验室利用 PCF 首次获得了光谱覆盖范围在 400~1 500 nm 的超连续谱^[6],由此开启了超连续谱产生的研究热潮。

早期用于产生超连续谱的石英光纤和 PCF,由于多声子吸收,超连续谱长波边往往被限制在 2.5 μm 以下,因此研究者们将产生超连续谱的材料替换成低声子吸收的软玻璃光纤。并且由于软玻璃光纤自身的自相位调制和交叉相位调制等非线性效应,使得种子脉冲在光纤中传输时,光谱得到展宽,利用脉冲持续时间和非线性特性的差异,能够获得不同的超连续谱输出特性。在之后的二十年时间里,光纤制备工艺和激光技术都取得了极大的研究进展,目前用于产生中红外超连续谱的非线性介质除了 PCF,还有石英光纤、增益光纤(掺杂稀土离子的特种玻璃光纤)、软玻璃光纤等。同时,根据不同的光纤规格,可以选择适合波段的激光器作为泵浦源,产生超连续谱^[3]的光谱覆盖范围也从开始的可见光波段到后来的近红外,再到紫外、中红外甚至可覆盖到远红外波段。其中,

中红外波段涵盖了许多重要分子的特性吸收谱线,使得中红外超连续谱光源在国防军事、环境监测、医学影像等领域应用广泛。石英光纤由于红外透过窗口较窄,所以不适合用于产生中红外超连续谱;而软玻璃光纤红外透过窗口较宽,是产生中红外超连续谱的理想光纤,常见的有氟化物光纤、硫系光纤和碲酸盐光纤,如氟化锆(ZBLAN, $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$)、氟化铟(InF_3)、硫化砷(As_2S_3)、硒化砷(As_2Se_3)、碲酸盐光纤等^[7]。其中氟化物光纤的研究和制备最为成熟且已商用,也是目前软玻璃光纤中可以获得最大输出功率的一类光纤;硫系光纤可获得超宽带高相干超连续谱光源;碲酸盐光纤由于羟基含量较高且难以去除,研究进展相对较为缓慢;而新型氟碲酸盐光纤在近几年发展速度较快,可能成为未来中红外超连续谱研究的理想介质。

2 氟化物光纤在中红外超连续谱中的研究进展

常用于产生中红外超连续谱的氟化物光纤主要为 ZBLAN 和 InF_3 光纤,其零色散波长(Zero dispersion wavelength, ZDW)一般在 1.6~1.8 μm ,因此常采用 1.5 μm 或者 2 μm 波长的光纤激光器作为泵浦源。其中 ZBLAN 光纤的传播损耗低于石英光纤,发展最快最成熟,是产生中红外超连续谱的主流软玻璃光纤; InF_3 光纤声子能量更低,损耗更小,但仍处在研究初期。不过氟化物光纤的缺陷也很明显,存在光纤脆弱易断、容易潮解、化学稳定性差、端面易损伤等问题,需要在实验中采取端面防护和水浴散热等措施保护光纤,因此对实验操作和环境的要求较高。且氟化物光纤的非线性系数相比于硫系光纤和碲酸盐光纤而言较低,一般需要较长的光纤长度积累非线性效应,以此获得大带宽的中红外超连续谱。

2.1 使用 ZBLAN 光纤产生中红外超连续谱

2006 年, Bartula 等利用 1.55 μm 的飞秒脉冲泵浦长度为 90 cm、芯径为 8.5 μm 的 ZBLAN 光纤,获得了光谱覆盖范围在 1.8~3.4 μm 、平均功率为 5 mW 的中红外超连续谱光源^[8]。同年, Xia 等将纳秒激光二极管放大后的输出脉冲作为泵浦源,泵浦 1 m 长的单模石英光纤,石英光纤的输出尾端以机械连接的方式连接 ZBLAN 光纤输入端,最终在 ZBLAN 光纤的输出端获得了光谱长波边

为 $4.5 \mu\text{m}$ 、平均输出功率为 23 mW 的中红外超连续谱光源^[9]。2007年,Chen 等通过改变脉冲占空比,泵浦 13 m 长的 ZBLAN 光纤获得了平均功率为 1.3 W 、光谱覆盖范围在 $0.8\sim 4 \mu\text{m}$ 、带宽超过 $3 \mu\text{m}$ 的中红外超连续谱光源^[10]。2009年,Xia 等以 1550 nm 的光纤激光器为泵浦源,利用端面对接的方式将 ZBLAN 与石英光纤耦合,在长 7 m 、芯径为 $8.9 \mu\text{m}$ 的 ZBLAN 光纤中得到的光谱覆盖范围与上文中 Chen 的光谱展宽结果相同,但将平均功率提高到 10.5 W ^[10-11]。同年,Qin 等用 $1.45 \mu\text{m}$ 的飞秒激光器泵浦 2 cm 长的 ZBLAN 光纤获得了从紫外到中红外的超宽带超连续谱,光谱范围在 $0.35\sim 6.28 \mu\text{m}$ ^[12],也是迄今为止在氟化物光纤中得到的最大带宽的超连续谱。2011年,法国 Duhant 等采用 $2 \mu\text{m}$ 的脉冲激光器直接泵浦长 5.3 m 、芯径为 $10.6 \mu\text{m}$ 的 ZBLAN 光纤,当泵浦光峰值功率为 5.5 kW 时,超连续谱的长波长达到 $3.8 \mu\text{m}$,此时平均功率为 490 mW ^[13]。2012年,Eckerle 等采用 $2 \mu\text{m}$ 的调 Q 锁模激光器泵浦长 15 m 、芯径为 $8 \mu\text{m}$ 的 ZBLAN 光纤,产生了平均功率为 1.08 W 、光谱覆盖范围在 $1.9\sim 3.6 \mu\text{m}$ 的中红外超连续谱光源^[14]。同年,丹麦 Moselund 等基于可见光超连续谱光源实验的经验,构建了第一个基于 $2 \mu\text{m}$ 锁模光纤激光器的中红外超连续谱光源系统,通过泵浦 6 m 长的 ZBLAN 光纤,获得了当时最宽的超连续谱,光谱覆盖范围在 $1.75\sim 4.4 \mu\text{m}$,输出平均功率为 550 mW ^[15]。在此之前,国内尚未有达到瓦级的中红外超连续谱光源的相关报道。直到 2012 年 12 月,国防科技大学 Yang 等以 $2 \mu\text{m}$ 的脉冲激光器为泵浦源,泵浦 ZBLAN 光纤,获得了输出平均功率为 1.2 W 、光谱范围在 $1.8\sim 4.3 \mu\text{m}$ 的中红外超连续谱,也是国内首次实现瓦级全光纤中红外超连续谱光源^[16]。

2013年,Yang 等以 $2 \mu\text{m}$ 锁模脉冲激光器为种子源,采用主振荡功率放大器(Main oscillating power amplifier, MOPA)系统,泵浦长 6.8 m 、芯径为 $8 \mu\text{m}$ 的 ZBLAN 光纤,获得了光谱覆盖范围在 $1.9\sim 3.9 \mu\text{m}$ 、平均功率为 7.11 W 的中红外超连续谱光源;采用相同的实验装置,泵浦长 8.4 m 、芯径为 $9 \mu\text{m}$ 的 ZBLAN 光纤,通过选择模场更匹配的光纤和高质量的端面处理技术,减小 ZBLAN 光纤与普通光纤之间的连接损耗,最终获得了平均功率为 13 W 、光谱覆盖范围在 $1.9\sim 4.3 \mu\text{m}$ 的

中红外超连续谱激光^[17],平均功率超过 2009 年 Xia 等在超连续谱实验中获得的 10.5 W 的输出功率,成为当时以软玻璃光纤为非线性介质产生中红外超连续谱光源的最大输出功率。2014年,Liu 等利用 Yang 的实验装置,使用脉冲重复频率(Pulse repetition rate, PRR)为 93.6 MHz 、脉冲宽度为 24 ps 的掺铥锁模脉冲激光器,泵浦长 10 m 、芯径为 $9 \mu\text{m}$ 的 ZBLAN 光纤,将平均功率提高到 21.8 W ,一度成为基于 ZBLAN 光纤产生中红外超连续谱光源的最大输出功率,对应的光谱覆盖范围在 $1.9\sim 3.8 \mu\text{m}$ ^[17-18];之后,Liu 等减小激光器腔长,将 PRR 提高到 250 MHz ,再次将平均功率提高到 24.3 W ,对应的光谱覆盖范围在 $1.9\sim 3.3 \mu\text{m}$ ^[19]。2016年,Zheng 等设计了一种集成的高功率全光纤中红外超连续谱实验装置,以中心波长为 1950 nm 的锁模脉冲激光器为种子源,经过两级放大后,以热拼接技术熔接石英光纤和 ZBLAN 光纤,ZBLAN 光纤长 8 m 、芯径为 $9 \mu\text{m}$,最终实现了最大输出平均功率为 10.67 W 、光谱覆盖范围在 $1.9\sim 4.1 \mu\text{m}$ 的中红外超连续谱光源,首次实现大功率全光纤超连续谱系统^[20]。2017年,Yin 等以 1550 nm 的脉冲激光器作为种子源,经过一个掺铟光纤放大器和两个铟/镱共掺光纤放大器放大激光脉冲,再经由一段 15 m 长的单模光纤进行频移,将产生的 $2 \mu\text{m}$ 的孤子脉冲注入掺铥光纤放大器(Thulium-doped fiber amplifier, TDFA)中,脉冲红移至 $2.6 \mu\text{m}$;以该系统为泵浦源,泵浦长 12 m 的单模 ZBLAN 光纤,当泵浦功率为 30.1 W 时,获得了平均功率为 15.2 W 、光谱覆盖范围在 $1.9\sim 4.2 \mu\text{m}$ 的中红外超连续谱光源。这种高功率泵浦系统为级联疏系光纤产生超连续谱光源提供了一种实验方案^[21]。

2019年,Yang 等以 1550 nm 的纳秒脉冲激光器为种子源,经过两级放大器,泵浦 ZBLAN 光纤,实验装置如图 1 所示。实验中所使用的 ZBLAN 光纤在 $2 \mu\text{m}$ 波段的基模面积与 TDFA 尾纤的基模面积匹配良好,将 ZBLAN 光纤输入端直接熔接至 TDFA 的尾纤,并在输出端熔接氟化铝光纤端帽,保护 ZBLAN 端面免受热损伤或潮解,成功地将超连续谱的输出功率提升至 30 W ,对应的光谱范围在 $1.9\sim 3.36 \mu\text{m}$,是目前国际上报道过的基于软玻璃光纤产生中红外超连续谱激光器的最高输出功率。图 2 显示了在不同 PRR 和脉冲持续时

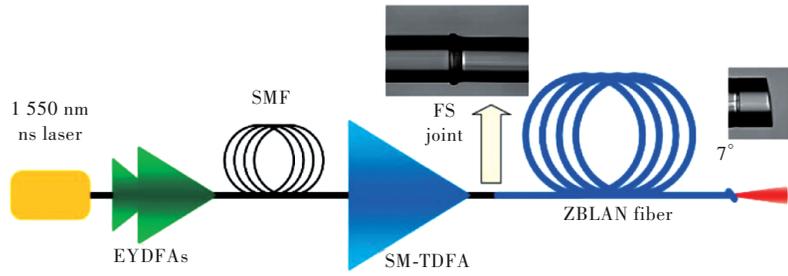


图1 30 W超连续谱光源的实验装置。EYDFA: 铒镱共掺光纤放大器; SMF: 单模光纤; SM-TDFA: 单模掺铥光纤放大器; FS: 融合拼接^[22]

Fig.1 Experimental setup of the 30 W supercontinuum laser source. EYDFA: erbium-ytterbium-codoped fiber amplifier; SMF: single-mode fiber; SM-TDFA: single-mode thulium-doped fiber amplifier; FS: fusion splice^[22]

间下的超连续谱输出功率随 TDFA 输出功率的函数关系, 可以观察到超连续谱功率随着 TDFA 输出功率的增加而呈线性增长, 这意味着生成的超连续谱没有扩展到 ZBLAN 光纤的高衰减区。从图 2 中可以看出, 在 3 MHz 3 ns 的情况下, 41 W 的 TDFA 输出功率能够获得 30.0 W 的超连续谱功率。TDFA 的最大输出功率限制了超连续谱激光器功率的进一步提升, 若能提高 TDFA 的输出功率, 超连续谱激光器的输出功率还会有持续增长的可能性。

当 PRR 为 3 MHz、脉冲持续时间为 1 ns 时, 不同 TDFA 输出功率下产生的超连续谱频谱演变如图 3(a) 所示, 可以看到, 随着 TDFA 输出功率的增加, 超连续光谱主要不对称地向长波长区域延伸。图 3(b) 描述了当 PRR 和脉冲持续时间分别为 3 MHz 3 ns、3 MHz 1 ns 和 2 MHz 1 ns 时, 在最大泵浦功率下的超连续谱频谱比较。当 PRR 为 3 MHz、脉冲持续时间为 3 ns 时, 检测到超连续谱有 30.0 W 的输出功率, 对应的超连续谱长波边限制

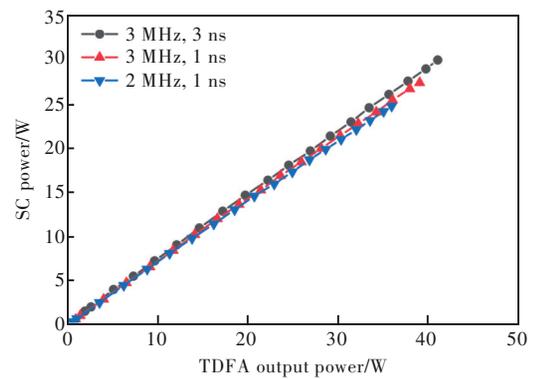


图2 PRR 和脉冲持续时间为 3 MHz 3 ns、3 MHz 1 ns 和 2 MHz 1 ns 时, 超连续谱功率与 TDFA 输出功率的函数关系^[22]

Fig.2 Supercontinuum power as a function of the TDFA output power under PRR and pulse duration of 3 MHz 3 ns, 3 MHz 1 ns and 2 MHz 1 ns^[22]

在 $3.36 \mu\text{m}$ ^[22]。

次年, 该课题组基于上述实验装置, 通过重新设计与泵浦源尾纤的模场直径完美匹配的 ZBLAN 光纤, 将 ZBLAN 光纤芯径设定为 13.5

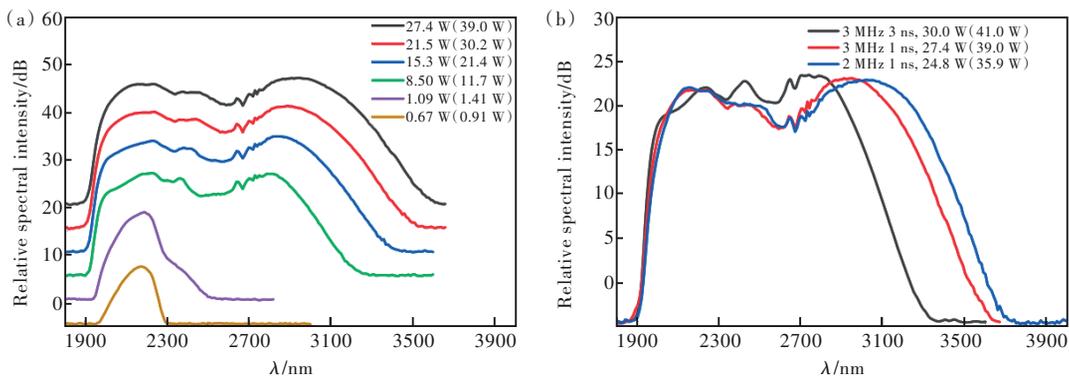


图3 (a) PRR 和脉冲持续时间为 3 MHz、1 ns 时, 不同 TDFA 输出功率下的超连续谱频谱演变; (b) PRR 和脉冲持续时间分别为 3 MHz 3 ns、3 MHz 1 ns 和 2 MHz 1 ns 时, 在最大泵浦功率下的超连续谱频谱比较^[22]

Fig.3 (a) Supercontinuum spectrum evolution under different TDFA output power for PRR of 3 MHz and pulse duration of 1 ns. (b) Supercontinuum spectrum comparison with maximal pump power under PRR and pulse duration of 3 MHz 3 ns, 3 MHz 1 ns and 2 MHz 1 ns^[22]

μm , 实现了 ZBLAN 光纤与石英光纤的低损耗耦合, 得到最大输出功率为 20.6 W、光谱范围在 1.92~4.29 μm 的中红外超连续谱光源, 也是第一台长波长突破 4 μm 、功率超过 20 W 的中红外超连续谱激光器^[23]。

使用 ZBLAN 光纤产生中红外超连续谱的研究中, 通常选择 1.5 μm 或者 2 μm 波段的激光器作为泵浦源, 芯径在 9 μm 左右、光纤长度在 10 m

左右的 ZBLAN 光纤作为非线性光纤。目前, 在 ZBLAN 光纤中可实现的超连续谱最大输出功率可达到 30 W, 也是迄今为止在软玻璃光纤产生中红外超连续谱的研究中可得到的最高输出功率。随着光纤耦合技术的改进, 全光纤结构的 ZBLAN 光纤超连续谱产生装置将进一步提高超连续谱输出功率。表 1 直观展示了基于 ZBLAN 光纤的中红外超连续谱光源的研究进展。

表 1 基于 ZBLAN 光纤的中红外超连续谱光源研究进展

Tab. 1 Research progress of mid-infrared supercontinuum spectrum light source based on ZBLAN optical fiber

Fiber	Pump	Supercontinuum bandwidth/ μm	Power/W	Year	Ref.
ZBLAN	1.55 μm /2 ns/5 kHz	0.8~4.5	0.023	2006	[9]
SMF-ZBLAN	1.548 μm /2 ns/300 kHz	0.8~4	1.3	2007	[10]
SMF-ZBLAN	1.542 μm /400 ps/1.54 MHz	0.8~4	10.5	2009	[11]
ZBLAN	1.45 μm /180 fs/1 kHz	0.35~6.28		2009	[12]
ZBLAN	1.995 μm /7 ns/10 kHz	1.55~3.8	0.490	2011	[13]
ZBLAN	2 μm /2 ns/60 kHz	1.9~3.6	1.08	2012	[14]
ZBLAN	1.95 μm /1 ps/40 MHz	1.75~4.4	0.550	2012	[15]
ZBLAN	1.985 μm /2 ns/50 kHz	1.8~4.3	1.2	2012	[16]
ZBLAN	1.96 μm /26.7 ps/29.39 MHz	1.9~4.3	13	2013	[17]
ZBLAN	1.963 μm /16 ps/42 MHz	1.9~3.8	21.8	2014	[18]
ZBLAN	1.95 μm /12.58 ps/75.4 MHz	1.9~4.1	10.67	2016	[20]
ZBLAN	1.55 μm /1 ns/6 MHz	1.9~4.2	15.2	2017	[21]
ZBLAN	1.55 μm /3 ns/3 MHz	1.9~3.35	30	2019	[22]
ZBLAN	1.55 μm /3 ns/3 MHz	1.92~4.29	20.6	2020	[23]

2.2 使用 InF₃ 光纤产生中红外超连续谱

2013年, Theberge 等以光学参量放大器(Optical parametric amplifier, OPA)为泵浦源, 泵浦长 9.5 m、芯径为 16 μm 的 InF₃ 光纤, 获得了超连续谱在 20 dB 光谱平坦度的光谱范围在 2.7~4.7 μm , 比同等实验条件下 ZBLAN 光纤产生的光谱增宽两倍, 平均输出功率为 0.1 mW^[24]。InF₃ 光纤由于在 2~5 μm 的超低损耗, 成为了在宽光谱范围产生多瓦级超连续最有潜力的光纤; 但在之后的两年里, 利用 InF₃ 光纤产生的中红外超连续谱长波边都没有达到 5 μm 。直到 2016 年, Gauthier 等将 2.75 μm 的 OPA 作为种子源, 以泵浦 ZBLAN 光纤产生的超连续谱输出功率为泵浦信号, 泵浦长 15 m、芯径为 13.5 μm 的 InF₃ 光纤, 实验装置如图 4 所示。当 ZBLAN 光纤产生的超连续光谱范围在 2.6~3.1 μm 时, 在 InF₃ 光纤中获得了平均功率为 8 mW、光谱覆盖范围在 2.4~5.4 μm 的中红外超连续谱激光^[25], 这也是基于 InF₃ 光纤产生的超连续光谱首次突破 5 μm 以上。

同年, Michalska 等以皮秒脉冲激光器泵浦长 9 m、芯径为 13.5 μm 的 InF₃ 光纤, 得到了平均功率为 7.8 mW、光谱覆盖范围在 1.9~5.25 μm 的中红外超连续谱激光^[26], 这是使用 InF₃ 光纤产生超连续谱首次覆盖 2~5 μm 波段、同时光谱平坦度保持在 5 dB 的中红外超连续谱激光器。2018 年, Gauthier 等改进了实验装置, 通过泵浦长 14 m、芯径为 11 μm 的 InF₃ 光纤, 产生了平均功率为 145 mW、光谱覆盖范围在 2.6~5.4 μm 的中红外超连续谱激光^[27]。2018 年, Liang 等以掺铋光纤激光器为泵浦源, 在泵浦 InF₃ 光纤产生中红外超连续谱激光的实验中, 取得了较大的研究进展。他们采用如图 5 所示的 MOPA 系统构成的 2 μm 皮秒脉冲激光器为泵浦源, 泵浦 InF₃ 光纤, 获得了平均功率为 1.76 W、光谱覆盖范围在 0.75~5.1 μm 的超连续谱激光^[28]。这是在基于 InF₃ 光纤产生中红外超连续谱光源的实验中, 输出功率首次突破 1 W。

2019 年, Yehouessi 等以中心波长为 2 μm 、脉冲宽度为 400 ps、PRR 为 200 kHz 的脉冲激光器泵

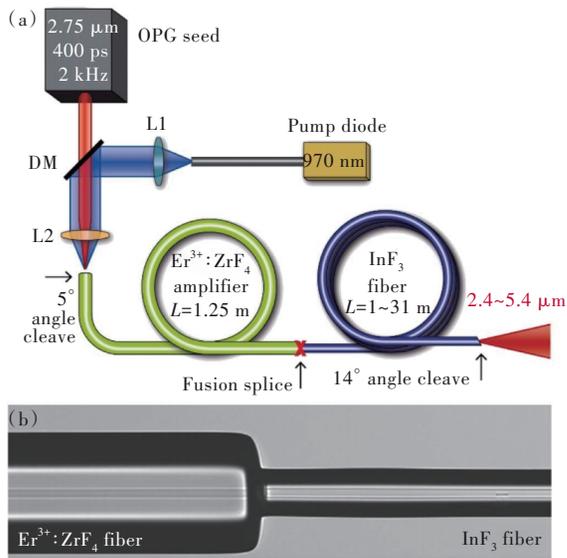


图 4 (a)Er³⁺:ZrF₄光纤放大器泵浦 InF₃光纤产生超连续谱源实验装置;(b)Er³⁺:ZrF₄光纤和 InF₃光纤之间熔接接头图像。OPG:光学参量产生器;L1,L2:耦合透镜;DM:二向色镜^[25]

Fig.4 (a)Experimental setup of the InF₃-based supercontinuum source pumped by an Er³⁺:ZrF₄ fiber amplifier. (b)Image of the fusion splice between the Er³⁺-doped ZrF₄ fiber and the InF₃ fiber. OPG: optical parametric generation; L1, L2: coupling lenses; DM: dichroic mirror^[25]

浦 60 m 长的 InF₃ 光纤,得到平均功率为 3 W、20 dB 光谱范围在 1.9~4.65 μm 的中红外超连续谱激光^[29]。之后,为了提升 InF₃ 光纤产生的超连续

谱输出功率,Yang 等结合 Yehouessi 的实验装置、光纤熔接技术和端帽技术,将 InF₃ 光纤的输出功率提升至 11.3 W,对应的光谱范围在 0.8~4.7 μm^[29-30]。这是在 InF₃ 光纤产生中红外超连续谱光源的研究中输出功率首次突破 10 W,且功率转化效率高达 66.5%。2020 年,Scurria 等使用调 Q 掺铊光纤振荡器为泵浦源,泵浦芯径为 7.5 μm 的 InF₃ 光纤,当泵浦功率为 10 W 时,获得了输出功率为 7 W、光谱长波边可展宽至 4.7 μm、20 dB 光谱范围在 2.0~3.9 μm 的中红外超连续谱光源,不同泵浦功率下测得的输出光谱如图 6 所示^[31]。这是利用振荡器激光系统泵浦 InF₃ 光纤首次产生瓦级的中红外超连续谱激光。

随后,Yang 等为提高长波边的输出功率,在仔细研究了 PRR 对超连续谱特性的影响后,发现随着 PRR 的降低,波长超过 3 μm 的部分光谱强度增强,当 PRR 降低到 1.5 MHz 时,实验中最大泵浦功率为 18.3 W,获得中红外超连续谱的输出功率为 11.8 W。这也是目前在 InF₃ 光纤中产生中红外超连续谱光源的最大平均功率,其光谱覆盖范围在 1.9~4.9 μm,输出光谱如图 7 所示^[32]。

2021 年,Swiderski 等利用 1 550 nm 的光纤激光器为种子源,经过两级掺铊光纤放大器和一级铈共掺光纤放大器,在一段单模石英光纤中将脉冲长波边红移至 2.4 μm,石英光纤的输出脉冲经过 TDFA,将输出光谱的长波边扩展至 2.7 μm,组成一个

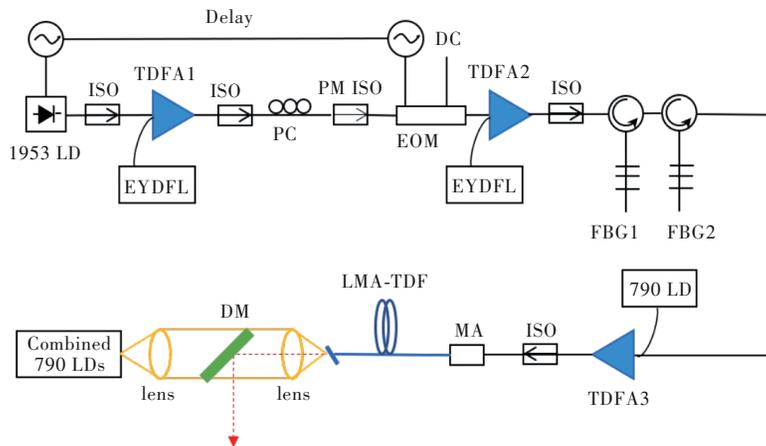
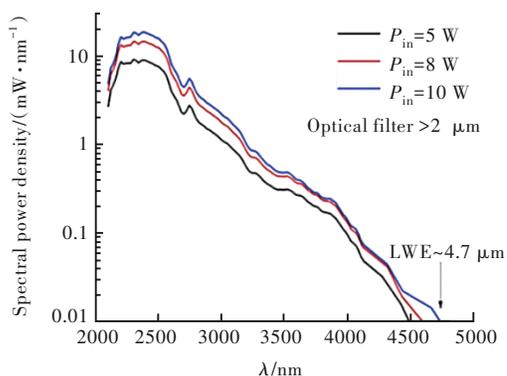


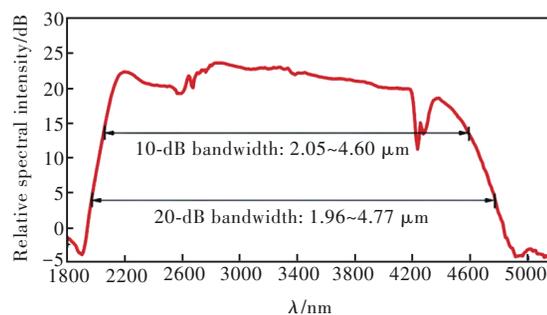
图 5 MOPA 系统原理图。1953 LD:1 953 nm 激光二极管;ISO:隔离器;EYDFL:铈共掺光纤激光器;PC:极化控制器;PM ISO:偏振保持隔离器;DC:直流电;EOM:电光调制器;FBG:光纤布拉格光栅;790 LD:790 nm 激光二极管;MA:模式适配器;LMA-TDF:大模场掺铊光纤;DM:二向色镜^[28]

Fig.5 Schematic of the MOPA system. 1 953 LD: laser diode at 1 953 nm; ISO: isolator; EYDFL: erbium/ytterbium co-doped fiber laser; PC: polarization controller; PM ISO: polarization maintaining isolator; DC: direct current; EOM: electro-optic modulator; FBG: fiber Bragg grating; 790 LD: Laser diode at 790 nm; MA: mode adaptor; LMA-TDF: large-mode-area thulium doped fiber; DM: dichroic mirror^[28]

图 6 三种不同泵浦功率下的输出光谱^[31]Fig.6 Output spectra for three different launched pump power levels^[31]

全光纤激光器系统。激光器的输出脉冲经过两块防反射透镜,耦合进入 InF_3 光纤,获得了输出功率为 2.95 W、光谱覆盖范围在 1.9~5.13 μm 的中红外超连续谱光源,这是目前基于 InF_3 光纤产生中红外超连续谱长波边超过 5.1 μm 的最高输出功率^[33]。

虽然 InF_3 光纤在中红外超连续谱中的研究起

图 7 信号 PRR 为 1.5 MHz、超连续谱功率为 11.8 W 时产生的频谱详情^[32]Fig.7 Spectral details of the generated supercontinuum with signal PRR of 1.5 MHz and supercontinuum power of 11.8 W^[32]

步较晚,但随着光纤制备工艺的精进,目前在 InF_3 光纤中产生中红外超连续谱的最大输出功率也达到了 11.8 W,光谱长波边展宽至 5.4 μm ,在中红外超连续谱研究中的发展潜力不容小觑。表 2 直观展示了基于 InF_3 光纤的中红外超连续谱光源的研究进展。

表 2 基于 InF_3 光纤的中红外超连续谱光源研究进展Tab. 2 Research progress of mid-infrared supercontinuum spectrum light source based on InF_3 optical fiber

Fiber system	Pump	Supercontinuum bandwidth/ μm	Power/W	Year	Ref.
InF_3	3.4 $\mu\text{m}/70$ fs	2.7~4.7	0.000 1	2013	[24]
Er: $\text{ZrF}_4 + \text{InF}_3$	2.75 $\mu\text{m}/400$ ps/2 kHz	2.4~5.4	0.008	2016	[25]
InF_3	2.02 $\mu\text{m}/70$ ps/1 kHz	1.9~5.25	0.007 8	2016	[26]
Er: ZBLAN+ InF_3	2.8 $\mu\text{m}/400$ ps/20 kHz	2.6~5.4	0.145	2018	[27]
ZBLAN+ InF_3	2 $\mu\text{m}/35$ ps/1 MHz	0.75~5.1	1.76	2018	[28]
InF_3		1.9~4.65	3	2019	[29]
InF_3	1.956 $\mu\text{m}/60$ ps/33 MHz	0.8~4.7	11.3	2019	[30]
ZBLAN- InF_3	2 $\mu\text{m}/500$ ns/40 MHz	2.0~4.7	7	2020	[31]
InF_3	1.55 $\mu\text{m}/1$ ns/3 MHz	1.9~4.9	11.8	2020	[32]
InF_3	1.55 $\mu\text{m}/900$ ps/550 kHz	1.9~5.13	2.95	2021	[33]

3 其他软玻璃光纤在中红外超连续谱中的研究进展

3.1 使用硫系光纤产生中红外超连续谱

相比于氟化物光纤和硝酸盐光纤,硫系光纤拥有更宽的红外透过窗口,同时其非线性折射率更是比石英光纤、其他软玻璃光纤高一个甚至几个数量级。目前,在基于 As_2Se_3 或 As_2S_3 光纤获得超连续谱的研究方案中,泵浦级联光纤的实验方案成为一大主流方向。2012年,Gattass 等通过泵浦石英光纤和 As_2S_3 光纤的级联光纤,获得了输出功率为 565 mW、20 dB 光谱范围在 1.9~4.8 μm 的

中红外超连续谱激光^[34]。2016年,Yin 等采用 TDFA 作为泵浦源,级联氟化物光纤和硫系光纤产生超连续谱激光,其中硫系光纤为长 2.5 m 的 As_2S_3 光纤,TDFA 的输出尾纤与氟化物光纤输入端直接熔接,氟化物光纤的输出光通过两个透镜耦合进硫系光纤,获得了 10 dB 的光谱带宽为 3 050 nm、对应波长范围在 2.09~5.14 μm 、平均输出功率为 62.8 mW 的光谱平坦型中红外超连续谱光源^[35]。2017年,Yin 等首先利用长 11 m、芯径为 9 μm 、纤芯数值孔径(Numerical aperture, NA)为 0.27 的 ZBLAN 光纤,将超连续谱激光从 2~2.5 μm 展宽到 2~4.2 μm 。再将 ZBLAN 光纤输出的

激光通过空间耦合的方式耦合进长 0.25 m、芯径为 7 μm 、NA 为 0.3 的 As_2S_3 光纤, 获得了最高输出功率为 146 mW、光谱覆盖范围在 2~5 μm 的中红外超连续谱激光。随后改变实验方案, 将 ZBLAN 光纤的输出尾纤与 As_2S_3 光纤采用端面耦合的方式对接, 并用玻璃套管法将其封装成全光纤结构, 最终得到了最高输出功率为 97.1 mW 的中红外超连续谱光源, 这也是国际上在全光纤结构中首次获得百毫瓦级的 2~5 μm 中红外超连续谱激光。之后, Yin 等用上述全光纤级联方案泵浦长波损耗更低, 长 5 m、芯径为 12 μm 、NA 为 0.3 的 As_2Se_3 光纤, 当种子激光的 PRR 为 10 kHz 时, 获得了平均功率为 9.28 mW 的 2~5 μm 的中红外超连续谱输出激光^[36]。2020 年, Yao 等采用 2~2.5 μm 的 T DFA 作为泵浦源, 通过泵浦 InF_3 和 As_2Se_3 的级联光纤, 获得了平均功率大于 6 mW、光谱覆盖范围在 2.3~9.5 μm 的中红外超连续谱激光, 其中 20 dB 光谱范围在 2330~9280 nm, 带宽达到 6950 nm^[37]。2021 年, Yan 等采用 2~2.5 μm 波段的光纤激光器为泵浦源, 通过 ZBLAN 光纤级联 As_2S_3 光纤, 产生了平均功率为 1.13 W、光谱范围在 2~6.5 μm 的中红外超连续谱激光^[38]。

同年, Swiderski 等利用如图 8 所示的光纤激光系统, 泵浦 InF_3 光纤, 获得了超连续谱输出功率为 2.95 W, 光谱覆盖范围在 1.9~5.13 μm , 通过空间耦合方式将 As_2S_3 光纤级联 InF_3 光纤, 最终超连续光谱长波边扩展至 5.58 μm ^[33]。这是目前为

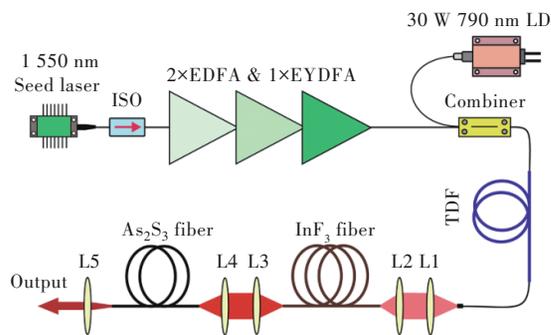


图 8 级联 InF_3 和 As_2S_3 光纤产生超连续谱的实验装置。EDFA: 掺铒光纤放大器; EYDFA: 钕镱共掺光纤放大器; LD: 激光二极管; TDF: 掺铊光纤; L1~L5: 透镜; ISO: 隔离器^[33]

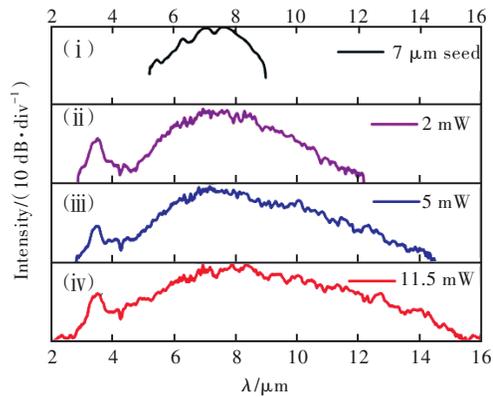
Fig.8 Experimental setup for supercontinuum generation in cascaded InF_3 and As_2S_3 fibers. EDFA: Er^{3+} -doped fiber amplifier; EYDFA: $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}$ -doped fiber amplifier; LD: laser diode; TDF: Tm^{3+} -doped fiber; L1~L5: lenses; ISO: optical isolator^[33]

止首次利用 InF_3 光纤级联泵浦 As_2S_3 光纤产生超连续谱的报道。

2020 年, Zhong 等采用双重剥离挤压法制备高光学质量的预制棒及其硫系光纤 (Ge-As-Se), ZDW 为 6.3 μm , 在 6 μm 处泵浦 18 cm 长的该光纤, 产生了光谱覆盖在 3.3~12.2 μm 的中红外超连续谱; 光谱平坦度为 40 dB 时, 对应的光谱范围在 1.4~13.7 μm , 具有目前基于硫系光纤产生超连续谱的最高光谱平坦率, 为 72.4%^[39]。2021 年, Feng 等制备了一种低损耗、无砷的硫系光纤 (Ge-Sb-S), 用飞秒激光器在 4 μm 处泵浦 22 cm 长的该光纤, 产生了光谱范围在 1.56~7.59 μm 的中红外超连续谱, 光谱平坦度为 30 dB。这一结果远远优于以往报道的任何 As_2S_3 光纤, 而且随着硫系玻璃制造工艺的进一步改进, 预计未来光纤的传输损耗将继续降低。无砷 Ge-Sb-S 光纤也为国防安全、生物光子学甚至环保工业的发展进步提供了可能^[40]。2022 年, Gao 等基于芯径为 8 μm 的硫系 PCF 进行产生超连续谱的数值仿真, 模拟得到了光谱范围在 3~25 μm 的超宽带超连续谱, 这说明硫系光纤在超连续谱光源产生的研究中有着巨大的发展潜力^[41]。

与 S 基或 Se 基玻璃光纤相比, Te 基硫系玻璃光纤由于 Te 的高原子量, 因而具有较高的非线性和超宽的透过窗口, 因此成为产生中红外超连续谱的理想候选者^[42]。2014 年, Petersen 等利用自制的 ZDW 为 5.83 μm 、芯径为 16 μm 的 As_2Se_3 光纤, 在 6.3 μm 处泵浦该光纤, 产生了光谱范围在 1.4~13.3 μm 的中红外超连续谱激光^[43]。2016 年, Wang 等制备了芯径为 70 μm 、ZDW 为 10.5 μm 的低损耗阶跃型碲基硫系光纤, 实验中泵浦 23 cm 的该光纤, 产生了光谱范围在 1.5~14 μm 的超连续谱^[44]。次年, Zhao 等制备了芯径为 7 μm 、ZDW 仍为 10.5 μm 的低损耗阶跃型碲基硫系光纤, 当种子泵浦波长为 7 μm 时, 在正常色散区泵浦长度为 14 cm 的该光纤, 图 9 给出了 7 μm 种子源的输出光谱和三种不同泵浦功率下测得的超连续谱。可以看到, 当泵浦功率为 11.5 mW 时, 产生了光谱范围在 2~16 μm 的超连续谱^[45]。这是迄今为止在硫系光纤中产生的最宽超连续谱。

2019 年, Wang 等利用 OPA 系统, 在 8 μm 处泵浦 17 cm 长的单模阶跃折射率碲基硫系光纤, 获得了光谱范围在 2.3~14.5 μm 的中红外超连续

图 9 泵浦波长为 7 μm 时实验的超连续光谱^[45]Fig.9 Experimental supercontinuum spectra pumped at 7 μm ^[45]

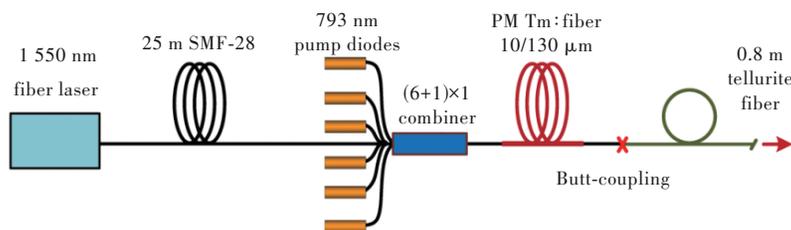
谱。然而, Te 基玻璃的材料色散通常超过 10.5 μm , 因此实验中需要将 ZDW 转换为更短的波长, 从而能够使用在 ZDW 附近的商用光纤激光器作为泵浦源, 用于超连续光谱产生的研究中^[42]。2018 年, Wu 等首次采用复合挤压法制备了四孔结构的碲基悬浮芯光纤, 其芯径为 5 μm , ZDW 为 4.9 μm , 将 OPA 作为泵浦源, 以 25 mW 的泵浦功率, 在 5 μm 处泵浦长 20 cm 的该光纤, 最终获得了光谱覆盖范围在 1.7~11.3 μm 的超连续谱^[46]。与 Shi 产生超连续谱的结果对比^[47], 可以发现阶跃折射率光纤和悬浮芯光纤产生的超连续谱差异是由截止波长决定的, 而截止波长又受到光纤结构的影响, 该结果为后续的研究发展方向提供了一个新思路。

硫系光纤具有软玻璃光纤中最宽的红外透过窗口和最高的非线性系数, 低泵浦功率下也能在

较短的光纤中产生较宽的超连续谱, 目前在硫系光纤中获得的最大带宽的超连续光谱范围在 2~16 μm ; 不过, 由于硫系光纤的损伤阈值较低, 超连续谱最大输出功率仅为 1.13 W。未来的研究方向可以考虑硫系微结构光纤的设计与制备。

3.2 使用碲酸盐光纤产生中红外超连续谱

相比氟化物光纤, 碲酸盐光纤具有化学稳定性好、非线性折射率高的优势。但在产生超连续谱的研究中, 材料中的一 OH 使碲酸盐光纤在 3.3 μm 处损耗增大, 需要通过除羟基工艺降低损耗。2013 年, Thapa 等以脉冲宽度为 1 ps、PRR 为 32 MHz、中心波长为 1922 nm 的皮秒脉冲激光器为种子源, 种子输出脉冲经过两级放大后, 进入经除水措施后的 1 m 长 W 型碲酸盐光纤, 其 ZDW 为 1.9 μm , 最后得到了 1~5 μm 的超连续谱^[48]。2016 年, Kedenburg 等采用反馈式光学参量振荡器为泵浦源, 泵浦长 15 cm、芯径为 5 μm 、ZDW 为 1.9 μm 的 W 型碲酸盐光纤, 获得了光谱覆盖范围在 1.7~4.3 μm 的中红外超连续谱激光^[49]。同年, Shi 等采用图 10 所示的实验装置, 以波长为 1550 nm、PRR 为 150 kHz、脉冲宽度为 6 ns 的光纤激光器为种子源, 种子输出脉冲经过 25 m 长的单模光纤展宽后, 进入 TDFA 中, 由一段石英光纤耦合进长 0.8 m、芯径为 11 μm 、ZDW 为 2.2 μm 的低损耗碲酸盐光纤, 获得了平均功率为 2.1 W、光谱覆盖范围在 1.97~3 μm 的中红外超连续谱激光^[47], 超连续谱的功率转换高达 87%, 也是目前在碲酸盐光纤中获得的最高输出功率的超连续谱激光。

图 10 由脱水碲酸盐光纤产生超连续谱实验装置^[47]Fig.10 Experimental setup for generating mid-IR supercontinuum from dehydrated tellurite fiber^[47]

2017 年, Kedenburg 等基于阶跃折射率碲酸盐光纤产生中红外超连续谱光源的研究中, 以光学参量振荡器为泵浦源, 泵浦波长为 2400 nm, 泵浦长 9 cm、芯径为 3.5 μm 的阶跃折射率碲酸盐光纤, 当最大泵浦功率为 400 mW 时, 获得了输出功率为 150 mW、光谱覆盖范围在 1.3~5.3 μm 的超连续谱光源, 首次将光谱长波边突破至 5 μm

以上^[50]。

尽管在这一领域取得了很大的进展, 但为了获得性能更高的超连续谱光源, 仍需要探索具有较宽的透射窗口、良好的化学稳定性和热稳定性的新型玻璃光纤。硫系光纤红外透过窗口较大, 非线性折射率也较高, 但是其 ZDW 较大, 而泵浦源波长应接近光纤材料的反常近零色散区, 以实

现光谱的最大展宽,因此需要长波长的激光器泵浦。然而,长波长的激光泵浦源又是目前中红外研究中面临的挑战之一,两者互为需求的根本矛盾,极大地影响了研究进展。碲酸盐玻璃光纤有着较高的非线性折射率、良好的化学稳定性和热稳定性,但是碲酸盐玻璃中的羟基(—OH)含量较高,其易与材料中的阳离子反应并参与玻璃组成,而以目前工艺水平很难完全去除羟基。氟化物玻璃光纤损耗低,声子能量低,色散小,但是易潮解,光纤端面易损伤。考虑到上述软玻璃光纤存在的这些问题,研究人员们提出并开始探索一种新型玻璃光纤,即将氟化物组分、氧化物组分和碲酸盐玻璃经过组分设计和调控制备的氟碲酸盐玻璃。其在保证氟化物玻璃优异的发光带宽及低损耗的同时,通过引入碲酸盐玻璃来提高其化学稳定性和热稳定性,其中的氧化物组分可以明显提高玻璃转变温度,因此逐渐成为研究者产生中红外超连续谱的研究对象。

2016年,Wang等首次使用锥形氟碲酸盐微结构光纤,产生了光谱范围在470~2770 nm的宽带超连续谱^[51],之后该团队首次制备出最小芯径为0.65 μm的锥形氟碲酸盐微结构光纤。以锥形氟碲酸盐微结构光纤为非线性介质,在1560 nm的飞秒光纤激光器的泵浦下,获得了光谱范围在437~2850 nm的宽带超连续谱^[52]。实验结果表明,短长度(几厘米)的锥形氟碲酸盐微结构光纤是产生覆盖可见光到中红外光谱区域的宽带超连续谱的有希望的候选者,适合产生高相干超连续谱。2017年,Li等用1980 nm的飞秒光纤激光器泵浦4 cm长的锥形氟碲酸盐微结构光纤,产生了1.4~4 μm的相干超连续谱^[53]。实验结果再次验证,锥形氟碲酸盐微结构光纤是产生高相干中红外超连续谱的理想非线性介质。虽然微结构光纤在调控色散、减小损耗、增大非线性方面优势明显,但光纤端面与空气接触,纤芯材料与空气之间的导热率相差较大,在高功率泵浦条件下,不利于光纤散热,光纤结构容易损伤。因此,在高功率超连续谱的研究中,常采用全固态光纤作为非线性介质。2017年,Jia等采用棒管法制备了全固态氟碲酸盐光纤,以长0.6 m、芯径为7 μm的全固态氟碲酸盐光纤为非线性介质,2 μm的飞秒光纤激光器为泵浦源,在泵浦功率为10.48 W时,获得了输出功率为4.5 W、光谱范围在1017~3438 nm的

超连续谱^[54],是当时报道的基于碲酸盐光纤或氟碲酸盐光纤产生中红外超连续谱光源的最高输出功率。结果表明,全固态氟碲酸盐光纤是一种发展潜力巨大的非线性介质,可用于构建高功率中红外超连续谱光源。

2018年,Yao等采用2 μm的啁啾脉冲放大器,泵浦一段纤芯NA为0.45的氟碲酸盐光纤,产生了平均功率为10.4 W、20 dB光谱范围在1.8~3.3 μm的中红外超连续谱激光^[55];次年,该课题组对实验装置优化后,通过泵浦芯径更大的氟碲酸盐光纤,实现了平均功率为19.6 W、光谱覆盖范围在1~3.8 μm的超连续谱激光^[56]。2020年,Li等利用1.9~2.5 μm的超连续谱激光泵浦氟碲酸盐光纤,获得了输出功率为22.7 W、光谱覆盖范围在0.93~3.95 μm的超连续谱光源^[57]。2022年,Guo等以2 μm的拉曼孤子光纤激光器为种子源,泵浦长0.56 m的氟碲酸盐光纤,最终实现了输出功率为25.8 W、光谱范围在0.93~3.99 μm的超连续谱光源,这也是目前基于氟碲酸盐光纤产生全光纤中红外超连续谱光源的研究中首次突破25 W^[58]。这些研究结果证实氟碲酸盐光纤在超连续谱产生中有着极好的光谱展宽效果和耦合效率,有望用于研制更宽光谱和更高功率的中红外超连续谱光源。

碲酸盐光纤的ZDW在2 μm左右,不过其具有良好的化学稳定性和热稳定性,更容易制备微结构光纤,碲酸盐微结构光纤的ZDW可以调整至1 μm左右,使得泵浦源的选择更多。而且碲酸盐光纤的非线性折射率介于氟化物光纤和硫系光纤之间,在较短的光纤中就能得到宽带超连续谱,目前产生的超连续谱长波边可达5.3 μm。但是,因其材料中的羟基难以去除,限制了其在中红外超连续谱中的研究进展。综合上述氟化物光纤和碲酸盐光纤在产生中红外超连续谱研究中的优缺点,经过组分设计和调控,在碲酸盐玻璃中混合氟化物组分和氧化物组分,制备出氟碲酸盐玻璃,在保证氟化物玻璃优异的发光带宽及低损耗的同时,通过引入碲酸盐玻璃来提高其化学稳定性和热稳定性。其中的氧化物组分可以明显提高玻璃转变温度,因此氟碲酸盐光纤成为产生高功率宽带中红外超连续谱光源的理想介质。表3直观展示了除氟化物光纤外,其他软玻璃光纤关于产生中红外超连续谱光源的研究进展。

表 3 基于其他软玻璃光纤的中红外超连续谱光源研究进展

Tab. 3 Research progress of mid-infrared supercontinuum spectrum light source based on other soft glass optical fibers

Fiber type	Length/m	Pump	Power/W	Supercontinuum bandwidth/ μm	Year	Ref
石英- As_2S_3	2	1.55 $\mu\text{m}/40$ ps/10 MHz	0.565	1.9~4.8(20 dB)	2012	[34]
ZBLAN- As_2S_3	2.5		0.0628	2.09~5.14(10 dB)	2016	[35]
ZBLAN- As_2Se_3	5	1.55 $\mu\text{m}/1$ ns/10 kHz	0.00928	2.23~5.45(10 dB)	2017	[36]
InF_3 - As_2Se_3		2~2.5 $\mu\text{m}/\text{TDF A}$	0.006	2.3~9.5	2020	[37]
ZBLAN- As_2S_3	4	1.55 $\mu\text{m}/1$ ns/600 kHz	1.13	2~6.5	2021	[38]
Ge-As-Se	0.18	6 $\mu\text{m}/150$ fs/1 kHz		1.4~13.7(40 dB)	2020	[39]
Ge-Sb-S	0.22	4 $\mu\text{m}/150$ fs/1 kHz		1.56~7.59(30 dB)	2021	[40]
As_2Se_3	0.088	6.3 $\mu\text{m}/100$ fs/1 kHz		1.4~13.3	2014	[43]
碲基硫系	0.17	4.5 $\mu\text{m}/150$ fs/1 kHz		2.3~14.5	2019	[42]
碲基硫系	0.23	4.5 $\mu\text{m}/150$ fs/1 kHz		1.5~14	2016	[44]
碲基硫系	0.14	7 $\mu\text{m}/150$ fs/1 kHz		2~16	2017	[45]
碲基悬浮芯	0.20	5 $\mu\text{m}/150$ fs/1 kHz		1.7~11.3	2018	[46]
W-碲酸盐	0.15	3 $\mu\text{m}/500$ fs/43 MHz	0.160	1.7~4.3	2016	[49]
碲酸盐	0.8	1.55 $\mu\text{m}/6$ ns/150 kHz	2.1	1.97~3	2016	[47]
碲酸盐	0.09	2.4 $\mu\text{m}/450$ fs/43 MHz	0.150	1.3~5.3	2017	[50]
氟碲酸盐	0.04	1.98 $\mu\text{m}/170$ fs/50 MHz		1.4~4	2017	[53]
氟碲酸盐	0.6	1.98 $\mu\text{m}/200$ fs/50 MHz	10.4	0.95~3.9	2018	[55]
氟碲酸盐		2 $\mu\text{m}/196$ fs/50 MHz	19.6	1~3.8	2019	[56]
氟碲酸盐	0.6	1.9~2.5 μm	22.7	0.93~3.59	2020	[57]
氟碲酸盐	0.56	1.93~2.5 μm	25.8	0.93~3.99	2022	[58]

4 结 论

本文简要介绍了近年来在软玻璃光纤中产生中红外超连续谱光源的研究进展。目前,常用于产生中红外超连续谱的软玻璃光纤主要有氟化物玻璃光纤、硫系玻璃光纤和碲酸盐玻璃光纤等。其中,氟化物光纤在高功率中红外超连续谱光源的研究中占据主流位置,但由于光纤材料的多声子吸收,其超连续光谱被限制在 $5 \mu\text{m}$ 以下。因此,在高相干宽带宽中红外超连续谱光源研究中常用硫系光纤,而硫系光纤的 ZDW 通常在 $10.5 \mu\text{m}$ 左右,通过创新工艺改变光纤结构,可以使得 ZDW 有下移的可能;否则就

需要长波长的激光器泵浦,而长波长的商业泵浦源也是如今市面上所欠缺的,因此其发展受到限制。碲酸盐光纤因为材料纯度不足,导致损耗较大,在研究中进展稍显缓慢。但融合了氟化物光纤和碲酸盐光纤优点的氟碲酸盐光纤有着较高的非线性系数、热稳定性和化学稳定性,因此可以在较短的光纤中实现光谱的快速展宽,具有极大的发展潜力,为今后的研究工作提供了新思路。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230274>.

参 考 文 献:

- [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 W Q. *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 $4\ 000$ to $7\ 000 \text{ \AA}$ via four-photon coupling in glass [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, 24(11): 584-587.
- [3] 杨未强, 宋锐, 韩凯, 等. 超连续谱激光光源研究进展 [J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(1): 1-9.
 YANG W Q, SONG R, HAN K, et al. Research progress of supercontinuum laser source [J]. *J. Natl. Univ. Def. Technol.*, 2020, 42(1): 1-9. (in Chinese)
- [4] LIN C, STOLEN R H. New nanosecond continuum for excited-state spectroscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1976, 28(4):

- 216-218.
- [5] KNIGHT J C, BIRKS T A, RUSSELL P S J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [6] 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]. *Opt. Lett.*, 2000, 25(1): 25-27.
- [7] 侯绍冬, 闫培光, 阮双琛. 中红外超快光纤激光器研究进展 [J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(11): 111005.
HOU S D, YAN P G, RUAN S C. Recent advances in mid-infrared ultrafast fiber laser technology [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2021, 33(11): 111005. (in Chinese)
- [8] BARTULA R J, HAGEN C L, WALEWSKI J W, *et al.* Generation of pulsed ultra-violet and mid-infrared supercontinua in standard single-mode fiber [C]. *Proceedings of the Laser Applications to Chemical, Security and Environmental Analysis 2006, Incline Village*, 2006: 91-93.
- [9] XIA C N, KUMAR M, KULKARNI O P, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation to 4.5 μm in ZBLAN fluoride fibers by nanosecond diode pumping [J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31(17): 2553-2555.
- [10] XIA C N, KUMAR M, CHENG M Y, *et al.* Power scalable mid-infrared supercontinuum generation in ZBLAN fluoride fibers with up to 1.3 watts time-averaged power [J]. *Opt. Express*, 2007, 15(3): 865-871.
- [11] XIA C N, ZHAO X, 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 J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2009, 15(2): 422-434.
- [12] QIN G S, XIN Y, KITO C, *et al.* Ultrabroadband supercontinuum generation from ultraviolet to 6.28 μm in a fluoride fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95(16): 161103.
- [13] DUHANT M, RENARD W, CANAT G, *et al.* Improving mid-infrared supercontinuum generation efficiency by pumping a fluoride fiber directly into the anomalous regime at 1 995 nm [C]. *Proceedings of the CLEO/Europe and EQEC 2011 Conference Digest, Munich*, 2011: CD9_1.
- [14] ECKERLE M, KIELECK C, ŚWIDERSKI J, *et al.* Actively Q-switched and mode-locked Tm³⁺-doped silicate 2 μm fiber laser for supercontinuum generation in fluoride fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(4): 512-514.
- [15] MOSELUND P M, PETERSEN C, DUPONT S, *et al.* Supercontinuum: broad as a lamp, bright as a laser, now in the mid-infrared [C]. *Proceedings of SPIE 8381, Laser Technology for Defense and Security VIII, Baltimore*, 2012: 83811A.
- [16] 杨未强, 张斌, 侯静, 等. 国内首次实现瓦级全光纤中红外超连续谱光源 [J]. *中国激光*, 2013, 40(4): 0402009.
YANG W Q, ZHANG B, HOU J, *et al.* The first time in China to realize a watt-level all-fiber mid-infrared supercontinuum light source [J]. *Chin. J. Lasers*, 2013, 40(4): 0402009. (in Chinese)
- [17] 杨未强, 张斌, 薛光辉, 等. 13 W 全光纤中红外超连续谱光源 [J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 030500.
YANG W Q, ZHANG B, XUE G H, *et al.* 13 W all-fiber mid-infrared supercontinuum light source [J]. *Chin. J. Lasers*, 2014, 41(3): 030500. (in Chinese)
- [18] 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]. *Opt. Express*, 2014, 22(20): 24384-24391.
- [19] 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]. *Proceedings of the Advanced Solid State Lasers, Shanghai*, 2014: AM3A.6.
- [20] 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 Res.*, 2016, 4(4): 135-139.
- [21] 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 μm [J]. *Opt. Lett.*, 2017, 42(12): 2334-2337.
- [22] YANG L Y, LI Y, ZHANG B, *et al.* 30-W supercontinuum generation based on ZBLAN fiber in an all-fiber configuration [J]. *Photonics Res.*, 2019, 7(9): 1061-1065.
- [23] YANG L Y, ZHANG B, HE X, *et al.* 20.6 W mid-infrared supercontinuum generation in ZBLAN fiber with spectrum of 1.9-4.3 μm [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2020, 38(18): 5122-5127.
- [24] THÉBERGE F, DAIGLE J F, VINCENT D, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation in fluorindate fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2013, 38(22): 4683-4685.
- [25] GAUTHIER J C, FORTIN V, CARRÉE J Y, *et al.* Mid-IR supercontinuum from 2.4 to 5.4 μm in a low-loss fluoroin-

- date fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2016, 41(8): 1756-1759.
- [26] MICHALSKA M, MIKOLAJCZYK J, WOJTAS J, *et al.* Mid-infrared, super-flat, supercontinuum generation covering the 2–5 μm spectral band using a fluoroindate fibre pumped with picosecond pulses [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6(1): 39138.
- [27] GAUTHIER J C, ROBICHAUD L R, FORTIN V, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation in fluoride fiber amplifiers: current status and future perspectives [J]. *Appl. Phys. B*, 2018, 124(6): 122.
- [28] LIANG S J, XU L, FU Q, *et al.* 295-kW peak power picosecond pulses from a thulium-doped-fiber MOPA and the generation of watt-level >2.5-octave supercontinuum extending up to 5 μm [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(6): 6490-6498.
- [29] YEHOUESSI J P, VIDAL S, CARRÉE J Y, *et al.* 3 W Mid-IR supercontinuum extended up to 4.6 μm based on an all-PM thulium doped fiber gain-switch laser seeding an InF3 fiber [C]. *Proceedings of SPIE 10902, Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials and Devices XVIII, San Francisco*, 2019: 1090207.
- [30] WU T Y, YANG L Y, DOU Z Y, *et al.* Ultra-efficient, 10-watt-level mid-infrared supercontinuum generation in fluoroindate fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2019, 44(9): 2378-2381.
- [31] SCURRIA G, MANEK-HÖNNINGER I, CARRÉ J Y, *et al.* 7 W mid-infrared supercontinuum generation up to 4.7 μm in an indium-fluoride optical fiber pumped by a high-peak power thulium-doped fiber single-oscillator [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(5): 7672-7677.
- [32] YANG L Y, ZHANG B, HE X, *et al.* High-power mid-infrared supercontinuum generation in a fluoroindate fiber with over 2 W power beyond 3.8 μm [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(10): 14973-14979.
- [33] SWIDERSKI J, GRZES P. High-power mid-IR supercontinuum generation in fluoroindate and arsenic sulfide fibers pumped by a broadband 1.9–2.7 μm all-fiber laser source [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2021, 141: 107178.
- [34] GATTASS R R, SHAW L B, NGUYEN V Q, *et al.* All-fiber chalcogenide-based mid-infrared supercontinuum source [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2012, 18(5): 345-348.
- [35] 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.
YIN K, ZHANG B, CAI Z, *et al.* Optical fiber pumping 2.0–5.5 μm spectral flat mid-infrared supercontinuum light source [J]. *Chin. J. Lasers*, 2016, 43(12): 1215001. (in Chinese)
- [36] 殷科. 光纤抽运 2~5 μm 超连续谱激光光源研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
YIN K. *Study on Fiber-pumped 2–5 μm Supercontinuum Laser Source* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [37] 姚金妹, 张斌, 侯静. 2.3~9.5 μm 全光纤中红外超连续谱光源 [J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1216002.
YAO J M, ZHANG B, HOU J. 2.3–9.5 μm all-fiber mid-infrared supercontinuum light source [J]. *Chin. J. Lasers*, 2020, 47(12): 1216002. (in Chinese)
- [38] YAN B, HUANG T, ZHANG W W, *et al.* Generation of watt-level supercontinuum covering 2–6.5 μm in an all-fiber structured infrared nonlinear transmission system [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(3): 4048-4057.
- [39] ZHONG M H, LIANG X L, JIAO K, *et al.* Low-loss chalcogenide fiber prepared by double peeled-off extrusion [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2020, 38(16): 4533-4539.
- [40] FENG Z, WANG J, WU G L, *et al.* Arsenic-free low-loss sulfide glass fiber for mid-infrared supercontinuum generation [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 113(11): 103618.
- [41] GAO W Q, DAI W W, ZHENG Z Q, *et al.* Simulation and analysis of supercontinuum generation in the waveband up to 25 μm [J]. *Appl. Opt.*, 2022, 61(23): 6697-6703.
- [42] WANG X G, ZHAO Z M, WANG X S, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation in low-loss single-mode Te-rich chalcogenide fiber [J]. *Opt. Mater. Express*, 2019, 9(8): 3487-3493.
- [43] 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]. *Nat. Photonics*, 2014, 8(11): 830-834.
- [44] ZHAO Z M, WANG X S, DAI S X, *et al.* 1.5–14 μm midinfrared supercontinuum generation in a low-loss Te-based chalcogenide step-index fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2016, 41(22): 5222-5225.
- [45] 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 Rev.*, 2017, 11(2): 1700005.
- [46] WU B, ZHAO Z M, WANG X S, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation in a suspended-core tellurium-based

- chalcogenide fiber [J]. *Opt. Mater. Express*, 2018, 8(5): 1341-1348.
- [47] 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]. *Opt. Mater. Express*, 2016, 6(12): 3967-3976.
- [48] 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 8898, Technologies for Optical Countermeasures X*; and *High-power Lasers 2013: Technology and Systems, Dresden*, 2013: 889808.
- [49] 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]. *APL Photonics*, 2016, 1(8): 086101.
- [50] KEDENBURG S, STRUTYNSKI C, KIBLER B, *et al.* High repetition rate mid-infrared supercontinuum generation from 1.3 to 5.3 μm in robust step-index tellurite fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2017, 34(3): 601-607.
- [51] WANG F, WANG K K, YAO C F, *et al.* Tapered fluorotellurite microstructured fibers for broadband supercontinuum generation [J]. *Opt. Lett.*, 2016, 41(3): 634-637.
- [52] WANG F, JIA Z X, YAO C F, *et al.* Supercontinuum generation from 437 to 2 850 nm in a tapered fluorotellurite microstructured fiber [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2016, 13(12): 125101.
- [53] LI N, WANG F, YAO C F, *et al.* Coherent supercontinuum generation from 1.4 to 4 μm in a tapered fluorotellurite microstructured fiber pumped by a 1 980 nm femtosecond fiber laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, 110(6): 061102.
- [54] JIA Z X, YAO C F, JIA S J, *et al.* 4.5 W supercontinuum generation from 1 017 to 3 438 nm in an all-solid fluorotellurite fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, 110(26): 261106.
- [55] 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.
- [56] 贾志旭, 姚传飞, 李真睿, 等. 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 [J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508006.
- JIA Z X, YAO C F, LI Z R, *et al.* Progress on novel high power mid-infrared fiber laser materials and supercontinuum laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2019, 46(5): 0508006. (in Chinese)
- [57] LI Z R, JIA Z X, YAO C F, *et al.* 22.7 W mid-infrared supercontinuum generation in fluorotellurite fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2020, 45(7): 1882-1885.
- [58] GUO X H, JIA Z X, JIAO Y D, *et al.* 25.8 W all-fiber mid-infrared supercontinuum light sources based on fluorotellurite fibers [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2022, 34(7): 367-370.



刘艳婷(1997-),女,河南驻马店人,硕士研究生,2021年于广东石油化工学院获得学士学位,主要从事中红外超连续谱光源方面的研究。
E-mail: Liuyanting1118@163.com



沈丹阳(1993-),男,浙江杭州人,博士,讲师,2022年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事超快激光与物质相互作用方面的研究。
E-mail: Shendy@cjlu.edu.cn



黄飞飞(1988-),女,江苏扬州人,博士,副教授,2015年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事光电功能材料与器件方面的研究。
E-mail: huangfeifei@cjlu.edu.cn