

高功率 3~5 微米波段超连续谱光纤激光研究进展

杨林永^{1,2,3}, 张斌^{1,2,3}, 侯静^{1,2,3*}¹国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;²脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;³高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073;

摘要 高功率 3~5 μm 波段中红外超连续谱激光器在环境监测、生物医疗、测绘计量、国防安全等领域有重要应用。在用于产生中红外超连续谱激光的非线性介质中, 光纤易于实现大的非线性系数, 且有效作用距离长、结构灵活、便于集成, 得到了广泛研究。近年来, 3~5 μm 波段高功率中红外超连续谱光纤激光的技术方案日益丰富, 性能指标逐步提升。总结了光谱覆盖 3~5 μm 的中红外超连续谱光纤激光的发展现状, 并对其发展趋势进行了展望。

关键词 激光光学; 超连续谱产生; 非线性效应; 光纤; 光纤放大器

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL202249.0101001

1 引言

激光自发明伊始就以其高单色性、高亮度、高相干性等特点成为了光学领域的研究热点。随着调 Q、锁模等超短脉冲激光技术的发展, 激光的峰值功率不断提升, 这给研究高功率条件下介质对光的响应特性提供了条件。当低功率的激光在介质中传输时, 介质对激光的响应是线性极化, 不产生新的频率成分(新的波长); 当介质中传输的激光具有足够高的峰值功率时, 介质中的束缚电子将在入射电场的感应下发生非线性极化^[1], 即介质对入射激光产生非线性响应, 新的频率成分由此产生。主导这个过程的效应被称为非线性效应, 主要包括调制不稳定性(MI)^[2-3]、自相位调制(SPM)^[4-6]、交叉相位调制(XPM)^[7-8]、受激拉曼散射(SRS)^[9-11]、四波混频(FWM)^[12-15]、拉曼孤子自频移(Raman SSFS)^[16-17]等。在色散和非线性效应的作用下, 激光光谱在介质中发生强烈的非线性展宽, 这一现象被称为超连续谱(SC)的产生, 输出光被称为超连续谱激光^[1,18]。

与卤素光源等传统宽谱光源相比, 超连续谱激光的空间相干性好且亮度高; 另外, 与传统激光单色

性高的特点不同, 超连续谱激光同时具有很宽的光谱范围和高的空间相干性。因此, 超连续谱激光在要求宽光谱、高光束质量的光谱学^[19-26]、环境监测^[27]、国防安全^[28]、测绘计量^[29-30]、生物医学^[31-32]等领域中得到了广泛的应用。具体应用举例如下。1) 应用于傅里叶变换红外光谱显微技术。2018 年, Borondics 等^[33]将光谱范围为 1.9~4.0 μm 、平均功率为 2 W 的中红外 SC 光源应用于傅里叶变换光谱学中, 获得了肝脏组织的衍射受限的高分辨率图像, 并将其与采用同步加速器光源获得的显微图像进行了对比分析, 结果表明, 中红外 SC 光源用于傅里叶变换红外光谱显微技术领域时, 与基于传统光源的测量系统相比, 具有体积小、快速、分辨率高等优势。2) 应用于有害物质检测。2018 年, Gasser 等^[34]在一套基于多次反弹衰减的全反射探测装置中将传统的热源替换为光谱覆盖范围为 1.75~4.2 μm 、平均功率为 75 mW 的中红外 SC 光源, 实现了过氧化氢水溶液浓度的探测。与传统的测量装置相比, 改进后的测量装置将噪声的抑制性能提升了 4 倍, 将探测极限提高了 3 倍, 实现了质量分数约为 0.1% 的过氧化氢水溶液浓度的快速在线探测。3) 应用于中红外光声光谱学。2018 年, Mikkonen

收稿日期: 2021-08-31; 修回日期: 2021-10-21; 录用日期: 2021-10-28

通信作者: *houjing25@sina.com

等^[35]将传统的光声光谱测量系统中的传统黑体辐射源替换为中红外 SC 光源,并对 1900 nm 波长附近的水蒸气吸收峰和 3300 nm 波长附近的甲烷吸收峰进行了测量,获得的信号分别增强了 70 倍和 19 倍。

由于介质的色散特性、泵浦光(入射介质的激光)的脉冲宽度、泵浦光波长所处的色散区域以及距离零色散波长(ZDW)的远近不同,在超连续谱产生过程中起主导作用的非线性效应也不同。表 1 给出了不同色散和脉冲宽度下起主导作用的非线性效应^[36]。当泵浦波长位于光纤的正常色散区,且泵浦脉冲宽度为皮秒以下时,起主导作用的非线性效应是自相位调制、四波混频和拉曼散射;当泵浦脉冲宽度在皮秒及其以上时,四波混频、拉曼散射和自相位调制将主导光谱的非线性展宽。当泵浦波长位于光纤的反常色散区,且宽度为皮秒以下时,非线性光谱展宽过程涉及的主要非线性效应为孤子分裂、拉曼孤子自频移和色散波产生;当脉冲宽度为皮秒及其以上时,则首先在调制不稳的影响下发生脉冲的分裂,然后通过拉曼孤子自频移和色散波产生等非线性效应产生新的光谱成分。导致的结果是,当泵浦波长位于光纤的反常色散区且靠近光纤 ZDW 时,输出光谱将向长波和短波两个方向扩展^[37-38];当泵浦波长位于光纤的反常色散区且远离光纤 ZDW 时,光谱主要向长波方向扩展^[39-40];而当泵浦波长位于光纤的正常色散区时,光谱将首先通过受激拉曼散射效应向长波方向扩展并形成多级级联的光谱峰。基于上述规律和常用光纤的色散特性,同时也受限于长波长光纤激光器的发展,高功率中红外超连续谱激光主要采取在反常色散区泵浦非线性光纤的技术路线。

表 1 不同色散和脉冲宽度下起主导作用的非线性效应^[36]

Condition	Sub-picosecond pulse	Picosecond and longer pulse
Normal group velocity dispersion	Self-phase modulation, four wave mixing, and Raman scattering	Four wave mixing, Raman scattering, and self-phase modulation
Anomalous group velocity dispersion	Soliton fission, Raman induced SFSS, and dispersive wave generation	Modulation instability, Raman induced SFSS, and dispersive wave generation

在电磁频谱中,从可见光到中红外波段,国际标准化组织给出的划分为:可见光(Visible)波段为

0.38~0.78 μm ;近红外(NIR)波段为 0.78~1.40 μm ;短波红外(SWIR)波段为 1.4~3.0 μm ;中红外(MIR)波段为 3~50 μm 。在激光技术领域中,一般将 2~5 μm 波段称为中红外波段。考虑到 2~2.5 μm 波段超连续谱激光可基于成熟的石英光纤而获得且输出功率已超 200 W^[41],本文主要聚焦于必须采用非石英光纤才能实现的 3~5 μm 波段超连续谱激光。

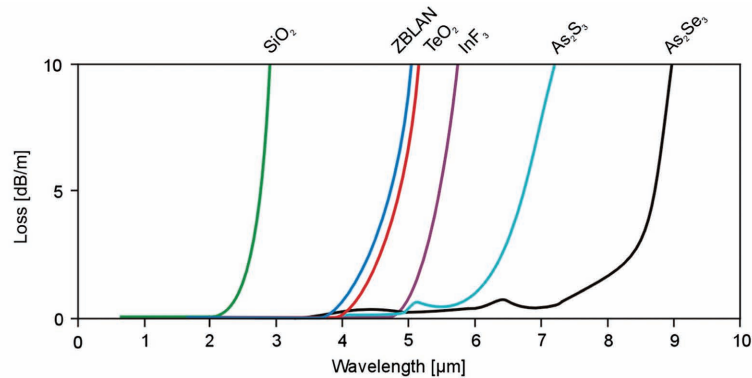
2 中红外光纤简介

自第一根光纤成功制备以来,研究人员已经基于石英、碲酸盐、氟化物、硫系玻璃等玻璃材料成功制备成实用光纤。如表 2 所示,不同玻璃具有不同的理化参数,成纤之后在色散特性、传输损耗特性、非线性特性以及热特性等方面也有明显不同。图 1 给出了不同基质光纤的典型长波损耗谱^[42]。石英光纤的自聚焦阈值高、转变温度高、热导率较高,因而功率承受能力强。但石英的声子能量很高,中红外波段的光在石英光纤中传输时会发生严重衰减,所以石英光纤不适合产生或传输中红外波段激光。碲酸盐玻璃光纤^[43-46]、氟化物光纤^[47-51]、硫系玻璃光纤^[52-53]在 3~5 μm 波段具有较低的损耗,其中氟化物光纤和硫系玻璃光纤最为成熟并已商用。

氟化物光纤主要是以氟化铝(AlF_3)、ZBLAN($\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$)或氟化铟(InF_3)等为基质材料的氟化物多组分玻璃光纤。这三种氟化物玻璃的 ZDW 均位于 1.6~1.8 μm ,因此适合采用 2 μm 或 1.5 μm 波段的光纤激光器作为泵浦源来产生大带宽的中红外波段超连续谱激光。其中, AlF_3 玻璃的长波透光性能最差,成纤后传光窗口的长波边仅约为 3.5 μm ,故 AlF_3 光纤较少用于非线性光纤;与 AlF_3 光纤相比,ZBLAN 玻璃的声子能量较低,ZBLAN 光纤在 2.4~4.5 μm 波段的传输损耗远低于石英光纤,且发展最为成熟,是实现中红外超连续谱激光的主流光纤。 InF_3 玻璃具有与 ZBLAN 玻璃相似的物理特性,但其声子能量更低,故 InF_3 光纤在 4.5~5.5 μm 波段具有更低的损耗。另外,由于氟化物玻璃的折射率与石英材料的折射率差别很小,将氟化物光纤与石英光纤进行熔接时,光纤端面的菲涅耳反射较小,易于实现低损耗光束耦合。当然,氟化物光纤的不足之处也较为明显:质地脆、易潮解、易腐蚀、转变温度低。故与石英光纤相比,氟化物光纤在处理和使用条件上更为苛刻;氟

表 2 常见光纤材料的典型理化参数^[54]Table 2 Typical physical and chemical parameters of common optical fibers^[54]

Characteristic	Parameter	Silica	Tellurite	Fluoride			Chalcogenide	
				AlF ₃	ZBLAN	InF ₃	As ₂ S ₃	As ₂ Se ₃
Dispersion characteristic	Material refractive index	1.45	~2	1.46	1.48-1.53	1.47-1.53	2.415	2.83
	Typical bulk ZDW / μm	1.26	2.13	-	1.71	~1.8	4.81	7.5
Loss characteristic	Phonon energy / cm^{-1}	1100	800	-	550	-	350	-
	Bulk transmission window / μm	0.2-3.5	0.4-5.0	-	0.3-7.5	0.3-9.5	0.8-7.0	1-15
	Fiber transmission window / μm	0.4-2.5	-	0.3-3.5	0.5-4.5	0.5-5.5	1.0-6.0	1.5-10.0
Nonlinear characteristic	Raman frequency shift /THz	13.2	21	-	~17.7	-	10.2	~7.2
	Self-focus threshold at 2 μm /MW	15.1	0.57	-	12	12	0.08	0.03
	Nonlinear refractive index /($10^{-20} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$)	2.6	19	-	3.3	-	300	1500
Thermal characteristic	Transition temperature / $^{\circ}\text{C}$	1000	300	367	260	300	185	178
	Thermal conductivity / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1.38	1.25	-	0.628	-	0.2	-
	Thermal expansion coefficient /(10^{-6} K^{-1})	0.55	12-17	18.6	17.2	-	14	-

图 1 常见光纤材料成纤之后的典型长波损耗谱^[42]Fig. 1 Typical fiber loss profiles in long-wavelength side for common fiber materials^[42]

化物光纤的非线性系数较低,要获得大带宽中红外超连续谱激光必须采用较长的光纤以实现充分的非线性积累。上述缺点可通过端面防护、提高散热效率等实现缓解。凭借在 3~5 μm 波段的低传输损耗和较高的成熟度,氟化物光纤在高功率中红外超连续谱激光领域得到了广泛研究。

碲酸盐玻璃拉制的光纤具有较高的非线性折射率,有利于光谱的非线性展宽,但与氟化物光纤相

比,其透射窗口范围较为有限^[42]。同时,碲酸盐玻璃的线性折射率较大,约为 2,因此碲酸盐玻璃光纤与石英光纤连接时光纤端面的菲涅耳反射较强。另外,碲酸盐玻璃的 ZDW 约为 2.3 μm ,当采用 1.5 μm 甚至 2 μm 波段激光泵浦时,光谱长波边必须先受激拉曼散射的作用下越过 ZDW,然后才可实现明显的光谱展宽。尽管可以通过制备微结构的方式将光纤的 ZDW 红移至 2 μm 附近,但微结构光

纤往往具有有效模场面积较小、损伤阈值较低等劣势,不利于获得高功率中红外超连续谱激光。

硫系玻璃材料以商用的 As_2S_3 、 As_2Se_3 等为代表,与氟化物玻璃相比,硫系玻璃的声子能量更低,硫系玻璃光纤的透光窗口向长波方向明显扩展;硫系玻璃光纤的非线性折射率更高,故对泵浦源的脉冲峰值功率要求较低。 As_2Se_3 光纤的传光窗口长波边可达 $9\ \mu m$ ^[42],通过光纤级联泵浦甚至可以实现光谱长波边大于 $11\ \mu m$ 的中红外超连续谱激光^[55]。但由于硫系玻璃材料的自聚焦阈值很低(不足石英材料和氟化物玻璃的 1%,如表 2 所示),在高峰值功率和高平均功率泵浦条件下,硫系玻璃光纤易发生损伤。目前,硫系玻璃光纤中红外超连续谱激光器的最高功率(1.13 W)^[56]比氟化物光纤中红外超连续谱激光器的最高功率(30 W)^[57]低一个量级以上。另外,硫系玻璃材料的 ZDW 大于 $4\ \mu m$,因此直接采用波长在 $2\ \mu m$ 以下的石英光纤基光源作为泵浦源并不适用于在硫系玻璃光纤中获得大带宽的中红外超连续谱激光。除此之外,硫系玻璃的折射率往往大于 2.4,表明其与折射率较低的光纤进行耦合时,端面的菲涅耳反射也较强。

综上所述,与其他种类光纤相比,氟化物光纤在 $3\sim 5\ \mu m$ 波段的传输损耗低,损伤阈值高,易于与低损耗的石英光纤耦合,是实现 $3\sim 5\ \mu m$ 波段高功率中红外超连续谱激光的首选非线性介质。

3 中红外超连续谱光纤激光器的基本方案

超连续谱光纤激光器主要包含泵浦源和非线性光纤两大部分。其中,泵浦源为非线性光纤提供输

入激光,是超连续谱激光器的“驱动器”,具体为多种形式的激光器或放大器系统;非线性光纤是超连续谱激光产生的媒介,是“超连续谱激光产生器”或“光谱展宽器”,具体是具有不同色散和非线性特性的光纤。按照非线性光纤是否为有源光纤,可将中红外超连续谱光纤激光器分为两大类,即基于无源非线性光纤和基于光纤放大器的中红外超连续谱光纤激光器。

基于无源非线性光纤的超连续谱激光器可以根据不同的泵浦源形式,如空间结构的光参量振荡器(OPO)或光参量放大器(OPA)以及脉冲光纤激光器,进行进一步分类。因 OPO 和 OPA 等输出功率较为有限,故采用 OPO 或者 OPA 作为泵浦源的超连续谱激光器的输出功率较低。高功率中红外超连续谱激光器主要采用光纤激光泵浦的方案,典型构型为“高峰值功率脉冲光源+非掺杂非线性光纤”,主要由脉冲种子源、若干级光纤放大器(含若干级预放大器以及一级主放大器)和非线性光纤组成,如图 2(a)所示,其中 ISO 为隔离器,AMP 为放大器,BP 为带通滤波器。该方案往往采用较为成熟的高功率 $1.5\ \mu m$ 或 $2\ \mu m$ 波段的光纤激光光源作为泵浦源。将光纤放大器输出的高峰值功率激光脉冲耦合进非线性光纤中,在光纤色散和非线性效应的作用下实现非线性光谱展宽,获得中红外超连续谱激光输出。目前平均功率在 10 W 以上的中红外超连续谱激光器均是基于本方案实现的^[58-63]。

基于光纤放大器的中红外超连续谱激光器,典型构型为“脉冲激光器+中红外光纤放大器”,主要由脉冲种子源和中红外光纤放大器组成,如图 2(b)所示。这种超连续谱激光器将脉冲峰值功率提升与非线性光谱展宽过程集中到有源中红外光纤(即最

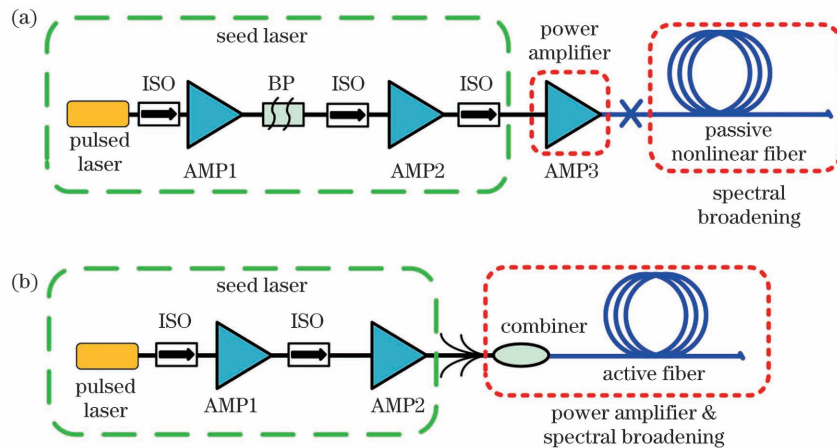


图 2 高功率中红外超连续谱光纤激光技术方案。(a)基于无源非线性光纤;(b)基于光纤放大器

Fig. 2 Technical schemes of high power MIR-SC fiber lasers. (a) Based on passive nonlinear fiber; (b) based on fiber amplifier

后一级光纤放大器)中,在光纤放大器中直接产生中红外超连续谱激光^[64]。因此,这种超连续谱激光器的结构更加紧凑,且在电-光转换效率方面存在一定优势。为了充分发挥中红外光纤声子能量低的优势,这种方案大多以 2.7~3 μm 波段的激光为信号光,利用稀土离子在 2.7~3 μm 波段的发射带获得增益,因此获得的超连续谱中绝大部分光谱成分位于 2.7 μm 以上波段,且 3 μm 以上波段的功率比例通常能达到 60%以上^[64-67]。

4 基于无源 ZBLAN 光纤的 3~5 μm 波段高功率超连续谱激光器

无源 ZBLAN 光纤是最早、最广泛应用于中红外超连续谱光纤激光器中的中红外非线性光纤。早期的研究主要以 1.5 μm 波段激光器作为泵浦源^[39,68-69]。随着掺铥光纤激光技术的发展,2 μm 波段光纤激光器成为 ZBLAN 光纤的主流泵浦源^[59-60,70-72]。后来,为了实现超连续谱光谱长波边向长波方向的进一步扩展并提高超连续谱的光谱平坦性,研究者又广泛采用了首先在石英光纤中获得光谱范围为 2~2.5 μm 的光纤激光、再泵浦 ZBLAN 光纤的技术方案^[57,62,73-76]。

4.1 基于近红外波段(1.5 μm 波段)光纤激光的泵浦源

2006 年, Hagen 等^[39]首次报道了基于 ZBLAN 光纤的中红外超连续谱激光器。首先,将 1.55 μm 波段飞秒脉冲通过透镜耦合进一段单模石英光纤中,在拉曼孤子自频移效应作用下,光谱长波边频移至 2.2 μm 附近。然后,使用透镜对将石英光纤输出的激光脉冲耦合进一段纤芯直径为 8.5 μm、长度为 91 cm 的 ZBLAN 光纤中,光谱在 Raman SSFS 的作用下进一步向长波方向扩展,最终获得了平均功率为 5 mW、光谱范围为 1.8~3.4 μm 的中红外超连续谱激光。采用峰值功率更高的固体脉冲激光器作为泵浦源,在长度很短的 ZBLAN 光纤中可产生长波边更长的中红外超连续谱激光。2009 年, Qin 等^[77]利用一个飞秒 OPA 系统泵浦一段长度仅为 2 cm 的 ZBLAN 光纤,得到了长波边达 6.28 μm 的中红外超连续谱激光。得益于泵浦脉冲超高的峰值功率,很短的 ZBLAN 光纤就可以将超连续谱光谱长波边扩展至光纤透光窗口长波边之外,同时得益于非线性光纤很短的长度, ZBLAN 光纤中 4.5 μm 以上波段光谱成分的多声子吸收损耗也不明显。然而,受限于固体飞秒脉冲激光器的平均功率,中红外超连续谱

激光平均功率的提升空间极其有限。

与飞秒和皮秒脉冲泵浦源相比,纳秒脉冲泵浦源易于实现较高的占空比,因此更利于提升平均功率。随着铒镱共掺光纤放大器(EYDFA)技术的发展,1.5 μm 波段纳秒脉冲激光器的输出功率迅速提升,成为超连续谱激光器功率提升的有效手段。同时,为了避免泵浦波长(~1.55 μm)与 ZBLAN 光纤 ZDW(~1.6 μm)的失配, Xia 等^[68]提出了在 1.55 μm 波段泵浦源和 ZBLAN 光纤之间插入一段单模石英光纤的设计。在单模石英光纤中,1.55 μm 纳秒脉冲首先在 MI 的主导下发生脉冲分裂,形成众多高峰值功率的孤子脉冲;然后,在石英光纤和 ZBLAN 光纤中,基于 Raman SFSS 等机制,光谱向长波方向扩展,形成超连续谱激光,这一步的光谱演化机制与文献[39]相似。宏观上看,在单模石英光纤输出端,孤子群脉冲的光谱长波边扩展至 2 μm 以上,因此泵浦激光的光谱越过了 ZBLAN 光纤的 ZDW,进入反常色散区。进而,当孤子群脉冲被耦合进 ZBLAN 光纤后,孤子脉冲在反常色散条件下,在自相位调制、参量四波混频、Raman SFSS 等机制的主导下进一步向长波方向扩展,最终获得光谱长波边展宽至 4 μm 波段的中红外超连续谱激光^[68,78]。凭借上述设计, Xia 等^[68]于 2006 年实现了 23 mW 的中红外超连续谱激光输出,并在次年将功率提升至瓦量级^[79]。

2009 年,该研究组将 ZBLAN 光纤输出的超连续谱激光的平均功率提升至 10 W 量级。该研究采用 1.55 μm 波段的三级放大器结构,泵浦源脉冲峰值功率为 6.1 kW,利用端面对接技术实现了石英与 ZBLAN 光纤的光束耦合,在长度为 7 m、纤芯直径为 8.9 μm 的 ZBLAN 光纤中实现了平均功率为 10.5 W、光谱范围为 0.8~4.0 μm 的中红外超连续谱激光^[58],光谱如图 3 所示。随后, Swiderski

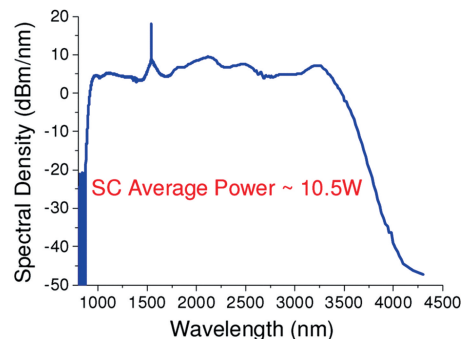


图 3 输出功率为 10.5 W 的超连续谱激光光谱^[58]

Fig. 3 SC laser spectrum at output power of 10.5 W^[58]

等^[69]也报道了基于 1.5 μm 波段光纤激光泵浦源的中红外超连续谱激光,平均功率为 5.24 W,光谱范围为 0.9~4 μm 。

4.2 基于短波红外波段(2 μm 波段)光纤激光的泵浦源

随着掺铥光纤激光技术的发展,2 μm 波段脉冲光纤激光器的性能得到快速提升。与 1.5 μm 波段激光相比,2 μm 波段位于 ZBLAN 光纤的反常色散区,因此采用 2 μm 光纤激光直接泵浦氟化物光纤即可产生光谱主要向长波方向扩展的中红外超连续谱激光^[70],而不必在泵浦源和非线性光纤之间插入一段单模石英光纤作为过渡。

2011 年, Duhant 等^[70]首次报道了采用 2 μm 波段脉冲光纤激光器直接泵浦 ZBLAN 光纤实现中红外超连续谱激光输出的实验结果。实验中使用波长为 1995 nm 的增益开关掺铥光纤激光器作为泵浦源,脉冲峰值功率最大为 9 kW。泵浦激光通过端面对接方式耦合进一段长度为 5.3 m、纤芯直径为 10.6 μm 的 ZBLAN 光纤中。当耦合进 ZBLAN 光纤的脉冲峰值功率为 5.5 kW 时,超连续谱激光光谱的长波边达到 3800 nm,如图 4 所示。此时,超连续谱激光的功率为 490 mW,基于长波通滤波片测得的 2500 nm 以上波段的功率占比为 47%。2012 年, Eckerle 等^[71]报道了基于 2 μm 波段调 Q 锁模激光器的中红外超连续谱激光器,平均功率为 1.08 W,光谱范围为 1.9~3.6 μm 。

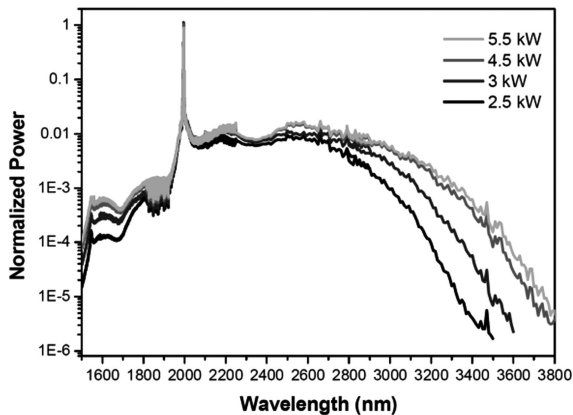


图 4 2 μm 波段脉冲光纤激光器直接泵浦 ZBLAN 光纤获得的超连续谱光谱^[70]

Fig. 4 SC laser spectra obtained by directly pumping ZBLAN fiber with 2 μm pulsed fiber laser^[70]

2013 年,本课题组报道了基于 2 μm 光纤主振荡功率放大器(MOPA)系统泵浦源的中红外超连续谱激光器^[72]。采用一个半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模的 1960 nm 皮秒掺铥光纤激光器和

三级光纤放大器作为泵浦源,实现了平均功率为 7.11 W、光谱范围为 1.9~3.8 μm 的中红外超连续谱激光^[72]。为了提升超连续谱激光的平均功率,次年,本课题组优化了掺铥光纤放大器(TDFA)结构,当泵浦功率为 20.7 W 时,获得的中红外超连续谱激光的平均功率为 13 W^[59]。与文献[72]相比,泵浦脉冲的峰值功率有明显提升,超连续谱的光谱长波边达到 4 μm 以上,超连续谱的光谱覆盖范围为 1.9~4.3 μm 。超连续谱激光的光谱如图 5 所示。实际上,在最后一级掺铥光纤放大器中,在非线性的作用下,泵浦脉冲的光谱发生了较强烈的非线性展宽,形成了波长为 1.9~2.7 μm 的超连续谱激光。

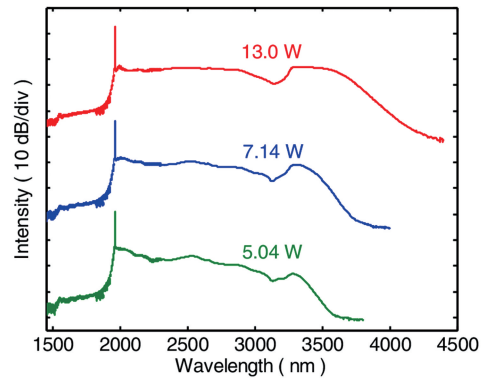


图 5 功率为 13 W 的中红外超连续谱激光器的输出光谱^[59]

Fig. 5 Spectra of SC laser with output power of 13 W^[59]

2014 年, Liu 等^[60]利用类似的 2 μm 皮秒光纤 MOPA 系统泵浦 ZBLAN 光纤,将中红外超连续谱光纤激光的平均功率提升至 20 W 量级。泵浦源尾纤与 ZBLAN 光纤通过机械连接实现光束耦合。当泵浦功率达到最大值 42 W 时,超连续谱激光的最大输出功率为 21.8 W,光谱如图 6 所示,光谱覆盖范围为 1.9~3.8 μm ,10 dB 光谱的范围为 1.95~

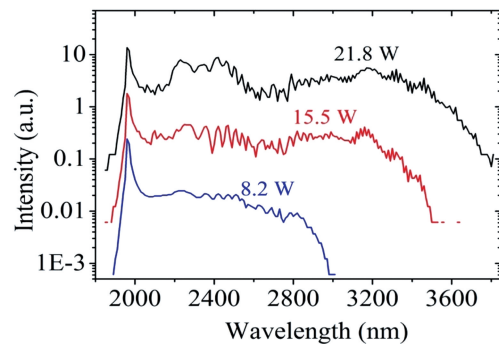


图 6 功率为 21.8 W 的中红外超连续谱激光器的输出光谱^[60]

Fig. 6 Spectra of SC laser with output power of 21.8 W^[60]

3.5 μm ^[60]。通过减小种子激光器的腔长并进一步将种子脉冲的重复频率增大至 250 MHz, 该研究组将超连续谱激光的平均功率提升至 24.3 W, 光谱覆盖范围为 1.9~3.3 μm ^[80]。

在上述报道中, 泵浦激光器与非线性 ZBLAN 光纤均通过透镜耦合或机械连接(端面对接)的方式实现光束耦合。在这种耦合方式中, ZBLAN 光纤的端面处于无防护状态, 在高功率条件下长时间工作时端面易于损伤, 且 ZBLAN 光纤受热变形将导致耦合效率下降。中红外超连续谱激光器输出功率的提高对耦合效率和耦合可靠性提出了越来越高的要求, 探索耦合效率和可靠性更高的耦合方式势在必行。

石英光纤与 ZBLAN 光纤在热膨胀系数、转变温度上存在很大差异(如表 2 所示, 两者的热膨胀系数分别为 $5.5 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ 和 $172 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, 转变温度分别为 1000 $^{\circ}\text{C}$ 和 260 $^{\circ}\text{C}$), 且高温条件下石英(SiO_2)与氟离子(F^-)反应, 生成气态 SiF_4 ^[81], 造成光纤变性。因此, 实现两者的熔融连接(亦即熔接)难度很大; 熔接点处易形成应力积累; 若熔接温度过

高, ZBLAN 光纤会变形或者因化学反应而变质; 若熔接温度过低, 则无法实现有效熔接。因此, 无法使用常规的石英光纤熔接技术将石英光纤与 ZBLAN 光纤熔接起来。

随着软玻璃光纤后处理技术的成熟, 石英光纤与 ZBLAN 光纤的熔接技术得到突破^[75], 具体是通过非对称熔接技术, 通过精确调节熔接参数, 实现石英-ZBLAN 光纤的低损耗熔接。目前已报道的石英光纤与氟化物光纤熔接点的插入损耗最低可达 0.03 dB^[82]。目前, 熔接已经成为提高石英光纤与 ZBLAN 光纤耦合效率和耦合可靠性的最佳选择。

2016 年, 本课题组基于石英光纤与 ZBLAN 光纤的熔接技术, 实现了全光纤一体化的中红外超连续谱激光器, 获得了平均功率为 550.8 mW、光谱范围为 0.8~4.5 μm 的中红外超连续谱激光^[75]。图 7 给出了该研究中实现的全光纤超连续谱激光器的结构和石英-ZBLAN 光纤熔接点的显微照片^[75]。这是首个基于石英-ZBLAN 光纤熔接点的中红外全光纤超连续谱激光的报道。

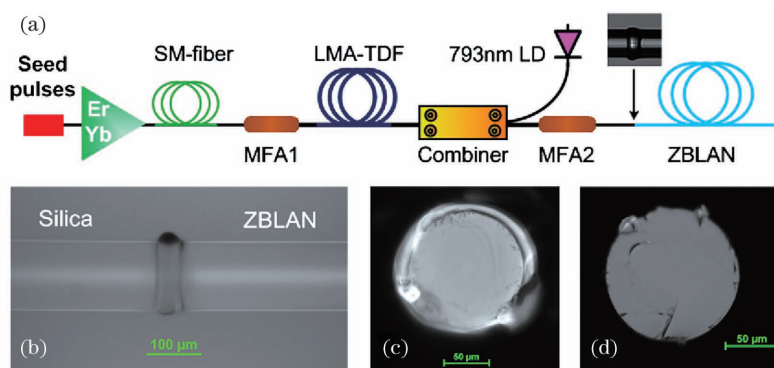


图 7 全光纤超连续谱激光器^[75]。(a)实验装置示意图;(b)熔接点显微图;熔接点(c)石英光纤和(d)ZBLAN 光纤一侧端面的显微照片

Fig. 7 All-fiber SC laser^[75]. (a) Schematic of experimental setup; (b) microscope photo of fusion splicing joint; photos of end surfaces of (c) silica and (d) ZBLAN fibers after pulling apart

2016 年, 研究者报道了基于石英-ZBLAN 光纤熔接技术的 10 W 级中红外超连续谱激光器。以平均功率为 16.3 W 的皮秒脉冲泵浦 ZBLAN 光纤, 实现了平均功率为 10.67 W、光谱覆盖范围为 1.9~4.1 μm 的中红外超连续谱激光。

4.3 基于短波红外波段(2~2.5 μm 波段)光纤激光的泵浦源

采用 2 μm 皮秒脉冲泵浦 ZBLAN 光纤可以获得 10 W 以上的中红外超连续谱激光, 但由于泵浦脉冲的能量主要集中在泵浦波长附近, 在非线性光谱展宽过程中, 低峰值功率脉冲部分难以转化为超连续谱, 因此在产生的超连续谱激光光谱中存在一

个光谱尖峰, 这限制了超连续谱中长波功率比例的提升以及超连续谱光谱长波边的进一步扩展。

2011 年, Kulkarni 等^[73]报道了基于光谱平坦型 2~2.5 μm 超连续谱激光泵浦源的中红外超连续谱激光, 实验方案如图 8 所示。1550 nm 脉冲在预放大器中实现峰值功率提升后, 在单模光纤中发生脉冲分裂和光谱展宽, 获得了光谱覆盖 2 μm 波段的种子脉冲。在后续的大模面积 TDFA 中, 1.8 μm 波段以下的光谱成分被 Tm^{3+} 吸收, 2 μm 波段脉冲被放大, 形成了光谱范围为 2~2.5 μm 波段的超连续谱激光。在 ZBLAN 光纤中, 2~2.5 μm 波段超连续谱激光在拉曼孤子自频移等效

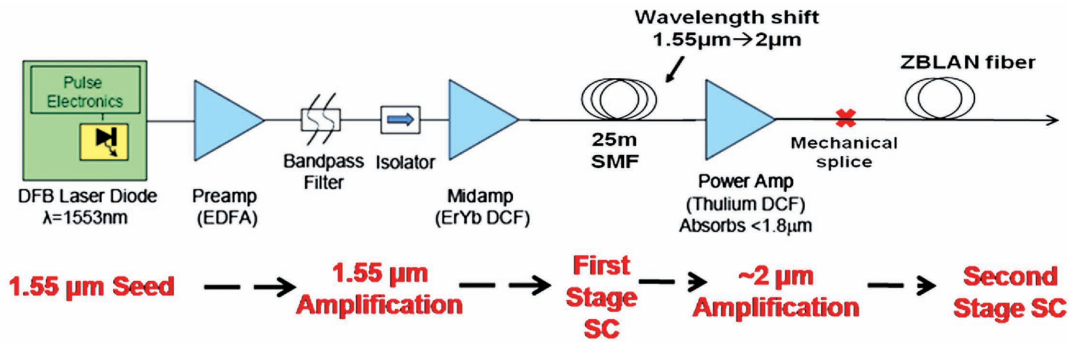


图 8 光谱平坦型中红外超连续谱激光器的实验方案示意图^[73]

Fig. 8 Experimental layout of spectrally-flat MIR-SC laser^[73]

应的作用下,进一步向长波方向红移。该研究在种子光脉冲的重复频率为 500 kHz、脉冲宽度为 1 ns 的条件下,实现了平均功率为 2.6 W、光谱范围为 1.9~4.5 μm 的中红外超连续谱激光,光谱如图 9 所示^[73]。与 2 μm 皮秒脉冲相比,2~2.5 μm 波段超连续谱激光向长波方向实现光谱扩展时,由于量子亏损较小,因此在功率转换效率上存在一定优势;另外,后者往往是具有高峰值功率的孤子群脉冲,因此也更易于实现中红外超连续谱激光光谱长波边的进一步扩展。由于 2~2.5 μm 波段超连续谱激光作为泵浦源获得的中红外超连续谱激光在光谱上没有泵浦残余尖峰,整个光谱呈现出较为平坦的特征,因此这种超连续谱激光也被称为“光谱平坦型超连续谱激光”。2014 年, Liu 等^[74]采用相似的技术方案,在 ZBLAN 光纤中获得了平均功率为 16.2 W、光谱范围为 1.9~3.5 μm 的超连续谱激光。

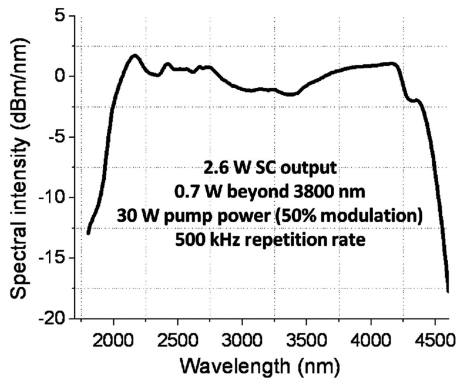


图 9 光谱平坦型中红外超连续谱激光器的输出光谱^[73]

Fig. 9 Output spectrum of spectrally-flat MIR-SC laser^[73]

2016 年,本课题组基于石英光纤与 ZBLAN 光纤的低损耗熔接技术和 2~2.5 μm 泵浦源,实现了平均功率为 550.8 mW、光谱范围为 0.8~4.5 μm (1.5 dB 光谱覆盖范围为 2642~4065 nm) 的中红外超连续谱激光,其中 3.8 μm 以上光谱成分的功

率为 116.1 mW,占总功率的比例为 21.1%^[75]。

随着超连续谱激光光谱扩展到 ZBLAN 光纤的高损耗区(4.2 μm 以上),输出光纤端面在高功率条件下的产热急剧增加,无防护的氟化物光纤的输出端面极易因水蒸气中 OH⁻ 的侵蚀而出现端面损伤的现象,进而出现端面烧毁。端面防护成为氟化物光纤基高功率中红外超连续谱激光性能提升的必由之路。实际上,研究人员在进行高功率 2.8~3.0 μm 光纤激光器研究时也指出,对于工作波长在水分子强吸收区域的光纤激光器,输出端面损伤是限制激光器性能提升的瓶颈^[83-86]。制备光纤端帽是实现氟化物光纤端面防护的有效手段。

2017 年,本课题组在单模 ZBLAN 光纤输出端制备了多模 ZBLAN 光纤端帽,实现了平均功率为 15.2 W 的高功率全光纤中红外超连续谱激光^[62]。超连续谱激光光谱如图 10 所示。当泵浦源输出功率为 30.1 W 时,ZBLAN 光纤输出的超连续谱激光的平均功率为 15.2 W,光谱覆盖范围为 1.9~4.2 μm,10 dB 光谱范围为 1.96~4.05 μm。在该研究中,获得的超连续谱激光的 2.4, 3.0, 3.8 μm 以上光谱成分的功率分别为 12.5, 8.1, 1.08 W,对应的功率占比分别为 82.3%、53.2%、7.1%。

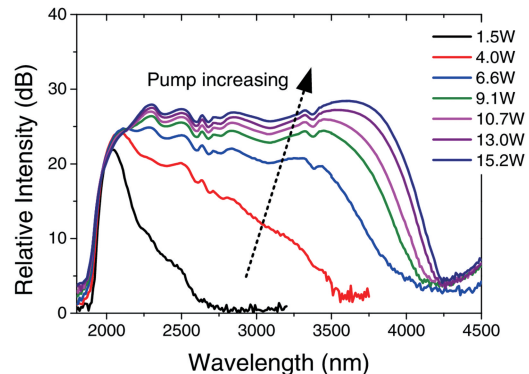


图 10 超连续谱激光光谱随输出功率的演化^[62]

Fig. 10 SC laser spectra for different output powers^[62]

3.8 μm 以上波段的平均功率突破了 1 W^[62]。

综合考虑氟化物光纤的非线性系数和传输损耗等特性,目前采用的非线性氟化物光纤的纤芯直径绝大多数在 10 μm 以下。尽管大模面积掺铥光纤放大器(LMA-TDFA)在提升泵浦脉冲峰值功率和平均功率方面有较强的优势,但较大的纤芯直径(25 μm)导致其难以与氟化物非线性光纤实现直接低损耗耦合。使用一个模场匹配器(MFA)作为过渡,以纤芯直径为 7~8 μm 的小芯径光纤作为输出光纤与 ZBLAN 光纤进行耦合^[62,73,75]。但此方案中 MFA 带来的损耗仍不能完全避免,且 2~

2.5 μm 超连续谱激光的长波成分在小芯径石英光纤中的损耗大,这在相当程度上削弱了 LMA-TDFA 的优势。

2019 年,本课题组基于 AlF_3 光纤端帽和小芯径 2~2.5 μm 超连续谱激光系统,将中红外超连续谱激光的最高平均功率提升至 30 W,实验结构和超连续谱光谱如图 11 所示^[57]。在该研究中,主放大器 TDFA 的纤芯直径和过渡光纤的纤芯直径均为 10 μm 。在最大泵浦功率为 41.0 W 的条件下,获得了平均功率为 30 W、光谱范围为 1.9~3.35 μm 的中红外超连续谱激光^[57]。

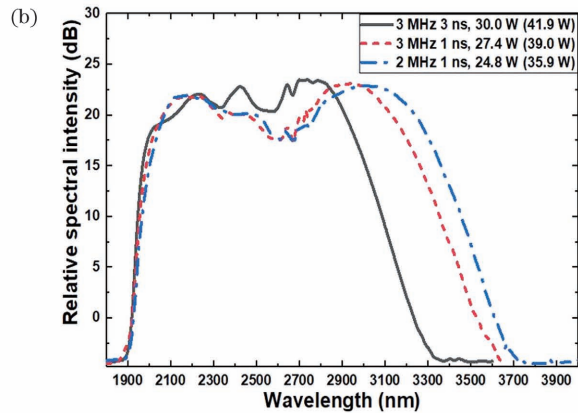
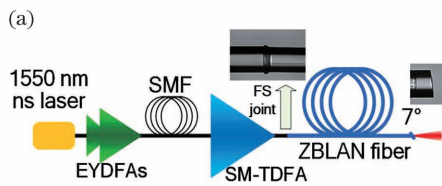


图 11 平均功率为 30 W 的中红外超连续谱激光器^[57]。(a)结构示意图;(b)光谱

Fig. 11 MIR-SC laser with average power of 30 W^[57]. (a) Structural diagram; (b) spectra

为了进一步减小石英光纤与 ZBLAN 光纤之间的耦合损耗并提升高功率光谱平坦型中红外超连续谱激光的光谱覆盖范围,2020 年,本课题组重新设计了 ZBLAN 光纤参数,实现了平均功率为 20.6 W、光谱范围为 1.92~4.29 μm 的中红外超连续谱激光^[76],光谱如图 12 所示。

基于无源 ZBLAN 光纤的高功率(输出功率 > 10 W)中红外超连续谱激光的研究总结如表 3 所示,其中 SM-TDFA 为单模掺铥石英光纤放大器。可以看到,从功率提升和光谱范围扩展的角度来看,高功率、长波长泵浦源和高效率低损耗耦合技术是提升无源 ZBLAN 光纤输出超连续谱激光性能的重要途径。

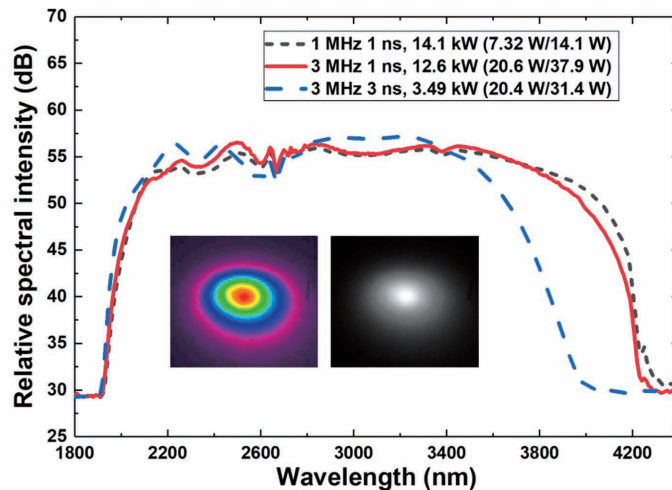


图 12 平均功率为 20.6 W 的中红外超连续谱激光的光谱^[76]

Fig. 12 MIR-SC laser spectra for average power of 20.6 W^[76]

表 3 基于非掺杂氟化物光纤的输出功率 >10 W 的超连续谱激光器参数

Table 3 Parameters of SC lasers with output power >10 W based on undoped fluoride fibers

Year	Central wavelength of seed laser	Pulse duration	Pulse repetition rate	Amplifier type	Output power of fiber amplifier	Coupling method	Coupling efficiency	SC characteristic			Ref.
								Spectral range / μm	Power / W	Conversion efficiency / %	
2009	1550 nm	400 ps	3.33 MHz	EYDFA	20.2 W	Mechanical splice	>60%	0.8–4.0	10.5	52.0	[58]
2013	1960 nm	26.7 ps	29.4 MHz	LMA-TDFA	31.5 W	Mechanical splice	@1.15 W, 66% @31.5 W	1.9–4.3	13	41.3	[59]
2014	2.0–2.5 μm			SM-TDFA		Mechanical splice	80%	1.9–3.5	16.2	–	[74]
2014	1963 nm	24 ps	93.6 MHz	SM-TDFA	42 W	Mechanical splice	70%–80%	1.9–3.8	21.8	51.9	[60]
2016	1950 nm	12.6 ps	75.4 MHz	LMA-TDFA	16.3 W	Fusion splice	80.2%	1.9–4.1	10.67	65.3	[61]
2017	2.0–2.7 μm	1 ns	6 MHz	LMA-TDFA	30.1 W	Fusion splice		1.9–4.25	15.2	50.5	[62]
2019	1.9–2.6 μm	3 ns	3 MHz	SM-TDFA	41.9 W	Fusion splice	94.4% @2000 nm	1.9–3.35	30.0	73.1	[57]
2020	2.0–2.6 μm	1 ns	3 MHz	SM-TDFA	37.9 W	Fusion splice	94.2% @2000 nm	1.92–4.29	20.6	54.3	[57]

5 基于 ZBLAN 光纤放大器的 3~5 μm 波段高功率超连续谱激光器

对于基于无源非线性光纤的高功率中红外超连续谱激光器,由于泵浦波长多位于 2.5 μm 波段以下,泵浦光在产生中红外超连续谱激光的过程中向长波方向的转换不彻底,造成超连续谱激光光谱在 2~3 μm 波段存在相当比例的能量残余,3 μm 以上光谱成分的功率占比一般不超过 60%。利用 3 μm 波段脉冲激光作为种子,在有源 ZBLAN 光纤中放大的同时直接产生中红外超连续谱激光是提高长波

功率比例的有效方法。

2015 年, Gauthier 等^[64] 报道了基于 ZBLAN 光纤放大器的中红外超连续谱激光器。图 13 给出了其实验装置示意图以及光谱。该研究的种子源为波长为 2.75 μm 的光参量产生器(OPG),种子脉冲宽度为 400 ps,脉冲重复频率为 2 kHz,平均功率为 2 mW。种子激光经透镜耦合进 $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤。光纤放大器输出的中红外超连续谱激光的平均功率为 154 mW,斜率效率为 4.5%,3 μm 以上光谱成分的功率占比最高为 82%。功率提升受限于放大器的自激振荡^[64]。

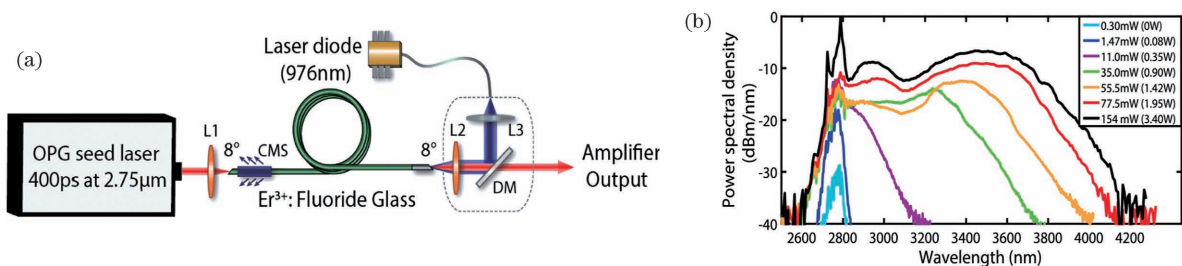


图 13 $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤放大器^[64]。(a)实验装置结构示意图;(b)超连续谱激光的光谱特性

Fig. 13 $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ fiber amplifier^[64]. (a) Layout of experimental setup; (b) spectral characteristics of SC laser

2018 年,该研究组对上述实验装置进行了优化,将种子光的重复频率提升至 20 kHz,实现了最大平均功率为 485 mW 的中红外超连续谱激光,放

大器的斜率效率为 28.7%,3 μm 以上光谱成分的功率占比为 82%,光谱覆盖范围为 2.7~4.2 μm ,超连续谱激光的光谱如图 14 所示^[65]。该研究表

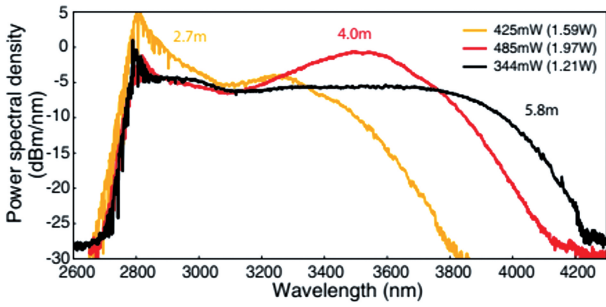


图 14 输出光谱随 Er³⁺:ZBLAN 光纤长度的变化^[65]

Fig. 14 Output spectra for different Er³⁺:ZBLAN fiber lengths^[65]

明,当种子光占比和平均功率都较低时,通过提升信号光重复频率和平均功率可明显提高 ZBLAN 光纤放大器的斜率效率和自激振荡阈值。

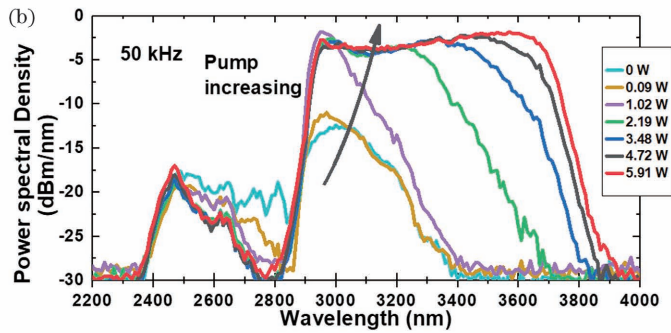
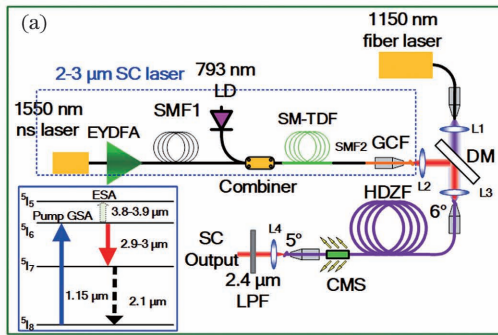


图 15 Ho³⁺:ZBLAN 光纤放大器^[66]。(a)实验装置示意图;(b)SC 光谱

Fig. 15 Ho³⁺:ZBLAN fiber amplifier^[66]. (a) Layout of experimental setup; (b) SC spectra

为了提高 ZBLAN 光纤放大器的输出功率,本课题组以纤芯直径为 15 μm 的 Er³⁺:ZBLAN 光纤为媒介,实现了平均功率为 1.84 W、光谱覆盖范围为 2.7~4.25 μm 的中红外超连续谱激光^[67]。在该研究中,放大器的斜率效率为 21.3%。3 μm 以上光谱成分的功率占比为 74.4%^[67],对应的 3 μm 以上光谱成分的平均功率为 1.36 W。超连续谱激光的光谱如图 16 所示,其中 EDZFA 为 Er³⁺:ZBLAN 光纤放大器。

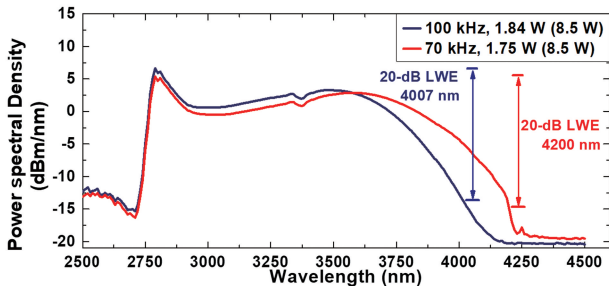


图 16 基于 EDZFA 的中红外超连续谱激光器的输出光谱^[67]

Fig. 16 Output spectra of MIR-SC laser based on EDZFA^[67]

相比于文献[64]中的空间结构 OPG 种子源,光纤脉冲源的结构更加紧凑,输出功率也更高。本课题组将超连续谱激光器作为种子源,制备了基于 Ho³⁺:ZBLAN 光纤放大器的中红外超连续谱激光^[66]。该研究的实验方案如图 15 所示。首先用 2~2.5 μm 波段的超连续谱激光泵浦一段氧化锗光纤,将光谱扩展至 3 μm 波段;然后以该超连续谱激光为种子,在 Ho³⁺:ZBLAN 光纤放大器中放大,获得中红外超连续谱激光,光谱范围为 2.8~3.9 μm,平均功率为 411 mW,斜率效率为 11%。其中,3 μm 以上光谱成分的功率占比为 90.6%^[66],对应的平均功率为 372 mW。该超连续谱激光的光谱扩展受 Ho³⁺ 激发态吸收 (⁵I₆ → ⁵I₅) 的限制^[66]。

实现全光纤一体化是进一步提高 ZBLAN 光纤放大器输出功率和稳定性的有效途径。2020 年,本课题组报道了基于石英光纤信号-泵浦合束器的 ZBLAN 全光纤放大器,实验装置如图 17(a) 所示^[87]。利用一个石英光纤合束器将 976 nm 泵浦光和 2~2.5 μm 超连续谱激光合束,在一段非掺杂 ZBLAN 光纤中制备了 2.8 μm 超连续谱种子光并传输 976 nm 包层光,在 Er³⁺:ZBLAN 光纤中实现了信号放大,避免了空间器件的使用,首次实现了 ZBLAN 光纤放大器的全光纤一体化。该研究实现了最大功率为 4.96 W(斜率效率为 17.3%)、3 μm 以上光谱成分的功率为 3.4 W 的中红外超连续谱激光。不同泵浦功率条件下超连续谱激光的光谱演化如图 17(b)所示。实现 ZBLAN 光纤放大器全光纤化的意义不仅在于简化系统结构,还在于提高光束耦合的效率和可靠性,消除了可能导致系统失效的隐患。

可以看出,以 3 μm 波段脉冲激光器为种子源的 ZBLAN 光纤放大器在长波功率占比和系统紧凑度上具有优势,且输出功率也在不断提升,但仍有以

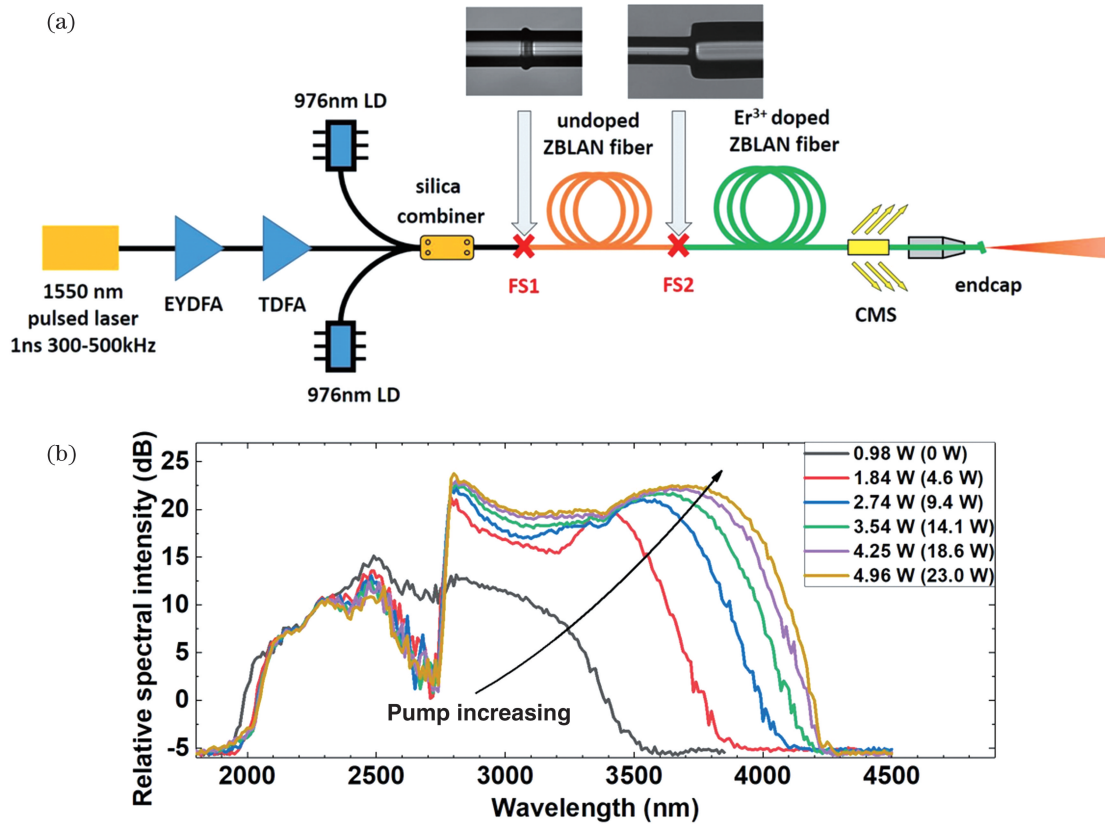


图 17 全光纤 $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 放大器^[87]。(a) 实验装置示意图；(b) 超连续谱激光的光谱演化图
Fig. 17 $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ all-fiber amplifier^[87]. (a) Layout of experimental setup; (b) SC spectral evolution

下问题亟待解决:1) 受限于中红外光纤器件的制备技术, $3\ \mu\text{m}$ 波段全光纤脉冲种子源仍然较为缺乏; 2) ZBLAN 光纤放大器的效率尚未突破 30%。这表明基于 ZBLAN 光纤放大器方案的中红外超连续谱激光器还有较大的发展空间。

6 基于无源 InF_3 光纤的 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段高功率超连续谱激光器

虽然 ZBLAN 光纤输出的中红外超连续谱激光的平均功率不断提升, 但光谱扩展明显受限于 ZBLAN 光纤的长波损耗谱。由表 2 和图 1 可知, 同属氟化物玻璃的 InF_3 玻璃具有优于 ZBLAN 玻璃的长波透过性能, 且其他理化参数相近, 因此, InF_3 光纤也成为发展高功率中红外超连续谱激光的重要介质, 百毫瓦级、瓦级以及十瓦级中红外超连续谱激光相继实现, 对应的光谱长波边分别可达 $5.4\ \mu\text{m}$ ^[65]、 $5.2\ \mu\text{m}$ ^[88]、 $4.9\ \mu\text{m}$ ^[82]。

表 4 给出了目前基于 InF_3 光纤的中红外超连续谱激光器的参数。 InF_3 光纤被用作中红外超连续谱激光的产生介质始于 2013 年, 研究者以 OPA 作为泵浦源, 利用工作波长为 $3.4\ \mu\text{m}$ 、脉冲宽度为 70 fs 的超短脉冲泵浦一段长度为 9.5 m、纤芯直径为 $16\ \mu\text{m}$ 、纤芯数值孔径 (NA) 为 0.14 的 InF_3 光纤, 获得了 20 dB 光谱范围为 $2.7\sim 4.7\ \mu\text{m}$ 、平均功率为 0.1 mW 的中红外超连续谱激光。从 2013 年到 2015 年, InF_3 光纤中产生的超连续谱激光的光谱覆盖范围均未达到 $5\ \mu\text{m}$ ^[17,89-92]。高平均功率光纤基泵浦源的发展促进了基于 InF_3 光纤的中红外超连续谱激光器性能的跃升: 2016 年, 基于 InF_3 光纤的超连续谱激光的长波边被扩展至 $5\ \mu\text{m}$ 以上^[40,93]; 2018 年, 基于 InF_3 光纤的超连续谱激光器的平均功率突破了 1 W^[88,94-95]。下面对基于 InF_3 光纤的中红外超连续谱激光研究进行介绍。

表 4 基于非掺杂 InF₃ 光纤的超连续谱激光器的参数
Table 4 Parameters of SC lasers based on undoped InF₃ fibers

Year	Seed laser pulse duration	Pulse repetition rate	Amplifier type	Pump wavelength	Output power of fiber amplifier	Core diameter / μm	Coupling method	SC characteristic			Ref.
								20 dB spectral range / μm	Power / W	Conversion efficiency / %	
2013	70 fs		OPA	3.4 μm		16	Lens coupling	2.7–4.7	0.0001	–	[89]
2016	400 ps	2 kHz	EDZFA	2.7–3.1 μm	21.8 mW	13.5	Lens coupling/fusion splice	2.5–5.3	0.008	37.4	[93]
2016	70 ps	1 kHz	OPG	2.02 μm		9	Lens coupling	1.9–5.3	0.008	–	[40]
2018	400 ps	20 kHz	EDZFA			10	Lens coupling/fusion splice	2.75–5.40	0.145	–	[65]
2015	100 fs	50 MHz	TDFA	1.9–2.2 μm	570 mW	7	Lens coupling	1.25–4.20	0.25	43.9	[91]
2018	50 ps	1 MHz	TDFA	1.9–2.7 μm	2.3 W	9.5	Mechanical splice	1.7–4.9	1.0	43.5	[94]
2018	1 ns	100 kHz	TDFA	2.0–2.7 μm	2.27 W	7.5	Fusion splice	1.60–5.07	1.35	59.5	[88]
	1 ns	1 MHz	TDFA	2.0–2.7 μm	6.41 W			2.0–4.8	4.06	63.3	
2018	35 ps	1 MHz	TDFA	1950 nm	6.36 W	9	Lens coupling	0.75–4.9	1.76	27.7	[95]
2019	400 ps	200 kHz	TDFA	1960 nm	4.9 W	7.5	Lens coupling	1.90–4.65	3	60	[96]
2020	90 ns	60 kHz	TDFA	2 μm	15 W	7.5	Lens coupling	2.0–3.9	7	46.7	[97]
2019	60 ps	33 MHz	TDFA	2 μm	17 W	7.5	Fusion splice	1.85–4.53	11.3	66.5	[98]
2020	1 ns	1.5 MHz	TDFA	2.0–2.7 μm	18.3 W	7.5	Fusion splice	1.96–4.77	11.8	64.5	[82]

2016 年, Gauthier 等^[93] 以一个非线性 Er³⁺: ZBLAN 光纤放大器作为 InF₃ 光纤的泵浦源, 当泵浦脉冲的超连续谱光谱范围为 2.6~3.1 μm 时, 可实现光谱覆盖范围为 2.4~5.4 μm 的超连续谱激光, 平均功率为 8 mW。同年, Michalska 等^[40] 以光参量产生器输出的皮秒脉冲泵浦一段 9 m 长的 InF₃ 光纤, 获得了光谱覆盖范围为 1.9~5.25 μm 的中红外超连续谱激光, 平均功率为 7.8 mW。2018 年, Gauthier 等^[65] 在文献[93]的基础上对实验装置进行了改进, 在一段长度为 14 m、纤芯直径为 11~12 μm 的 InF₃ 光纤中获得了平均功率为 145 mW 的 2.6~5.4 μm 中红外超连续谱激光。该研究表明, 当非线性光纤支持高阶模式传输时, 高阶模的色散特性对超连续谱激光光谱的演化的影响不可忽略; 当高阶模成分的光谱展宽至该模式的第二

个 ZDW 时, 能量将在第二个 ZDW 左侧堆积, 形成一个光谱尖峰, 这不利于光谱的持续红移^[65]。

掺铋光纤放大器为基于 InF₃ 光纤的中红外超连续谱激光器提供了性能优异的泵浦源。2018 年, Liang 等^[95] 基于峰值功率为百千瓦级的 2 μm 波段皮秒光纤激光器, 在 InF₃ 光纤中实现了光谱覆盖范围为 0.75~5.1 μm 、平均功率为 1.76 W 的中红外超连续谱激光。在该研究中, 泵浦源的布局和中红外超连续谱激光的光谱分别如图 18(a)、(b) 所示。该泵浦源包括一个工作波长为 1950 nm 的增益开关激光二极管和四级 TDFA。泵浦光的脉冲宽度为 35 ps, 脉冲重复频率为 1 MHz, 平均功率为 10.34 W。在长度为 10 m、纤芯直径为 9 μm 的 InF₃ 光纤中, 获得的超连续谱激光的光谱范围为 0.75~5.1 μm , 平均功率为 1.76 W。其中, 波长大

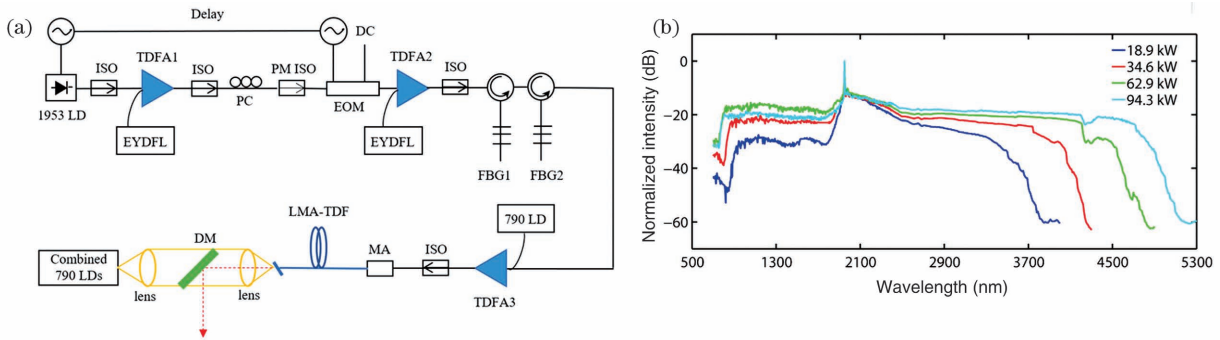


图 18 0.75~5.1 μm 超连续谱激光器^[95]。(a)实验装置图;(b)超连续谱光谱

Fig. 18 0.75~5.1 μm SC laser^[95]. (a) Layout of experimental setup; (b) SC spectra

于 2900 nm 和 3500 nm 的光谱成分的功率分别为 0.56 W 和 0.33 W。端面损伤限制了超连续谱平均功率的进一步提升。

2018 年,研究者报道了基于 2~2.5 μm 超连续谱激光泵浦源和 InF₃ 光纤的光谱平坦型中红外超连续谱激光^[94]。在该研究中,泵浦源的种子脉冲的工作波长为 1550 nm,脉冲宽度和脉冲重复频率分别为 50 ps 和 1 MHz。通过切平角、机械对接方式将 TDFA 输出的 1.9~2.7 μm 超连续谱激光脉冲耦合进 InF₃ 光纤。低功率时耦合效率可达 80%,但高功率条件时下降至 60%,研究者将其归因于 TDFA 中的光谱展宽和长波长模场直径的增加^[94]。当泵浦光功率达到最大值 2.3 W 时,实现的超连续谱激光的平均功率为 1.0 W,光谱覆盖范围为 1.0~5.0 μm,20 dB 光谱范围为 1.7~4.9 μm。

本课题组基于石英-氟化物光纤熔接技术,实现

了基于 2~2.5 μm 超连续谱激光泵浦源和 InF₃ 光纤的全光纤化光谱平坦型中红外超连续谱激光^[88]。该研究的实验装置和超连续谱激光的光谱如图 19 所示。采用石英-氟化物光纤熔接技术实现了泵浦激光的高效率耦合,熔接点在 2000 nm 处的熔接损耗仅为 0.07 dB。得益于高效率、高可靠性的熔融连接和多模 ZBLAN 光纤端帽,在泵浦功率为 2.27 W 时,实现了光谱范围为 1.5~5.2 μm(20 dB 光谱范围为 1.6~5.07 μm)、平均功率为 1.35 W 的中红外超连续谱激光,功率转换效率为 59.5%。在 10 min 的功率稳定性测试中,该超连续谱激光器的功率不稳定性(均方根)仅为 0.32%。该研究表明,高效率的泵浦光耦合可以直接提高超连续谱激光的平均功率,熔接带来的超低损耗可明显减小非线性光纤耦合端的热管理压力,有助于提高超连续谱激光系统的功率承载水平。

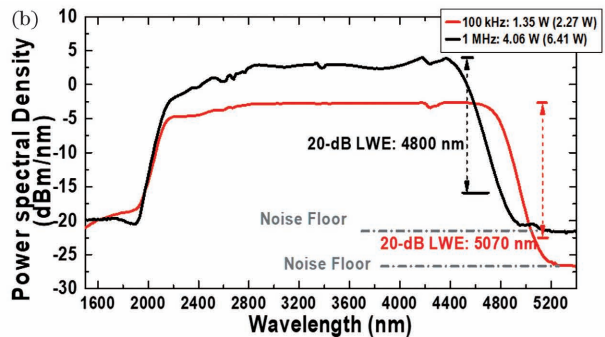
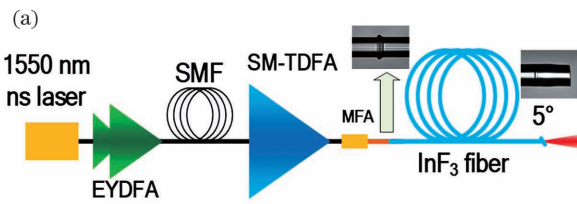


图 19 基于 InF₃ 光纤的瓦级超连续谱激光实验^[88]。(a)装置;(b)超连续谱激光光谱

Fig. 19 Experiment of watt level SC laser based on InF₃ fiber^[88]. (a) Experimental setup; (b) SC laser spectra

2019 年,研究者报道了以 2 μm 波段亚纳秒光纤放大器系统为泵浦源的 1.9~4.65 μm 中红外超连续谱激光器。泵浦脉冲的脉冲宽度为 400 ps,重复频率为 200 kHz。通过透镜组将泵浦脉冲从泵浦源耦合进 InF₃ 光纤。当最大泵浦功率为 4.9 W 时,在 60 m 长的 InF₃ 光纤中制备了 20 dB 光谱(不包含 2 μm 处泵浦光的残余尖峰)范围为 1.9~4.65 μm、

功率为 3 W 的中红外超连续谱激光,功率转换效率为 60%,超连续谱激光的光谱如图 20 所示。

为了提升 InF₃ 光纤输出的超连续谱激光的平均功率,本课题组利用 2 μm 波段锁模皮秒光纤激光光源,结合石英-InF₃ 光纤熔接技术和 InF₃ 光纤端帽技术,将 InF₃ 基中红外超连续谱激光的平均功率提升至 11.3 W^[98]。与文献^[95]相似,由于泵

浦光的波长与 InF_3 光纤的 ZDW 较近, 因此获得的超连续谱激光的光谱在短波和长波方向上均有明显展宽, 光谱范围为 $0.8 \sim 4.7 \mu\text{m}$ 。光谱如图 21 所示^[98]。

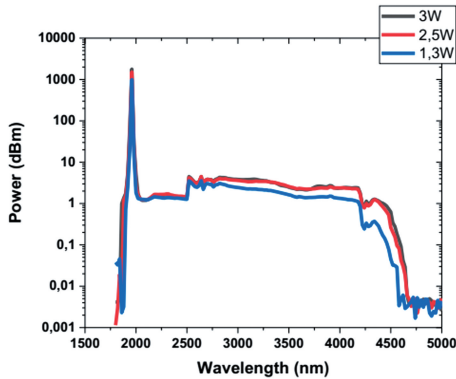


图 20 InF_3 光纤输出的超连续谱激光的光谱随泵浦功率的变化^[96]

Fig. 20 Spectra of SC laser based on InF_3 fiber for different pump powers^[96]

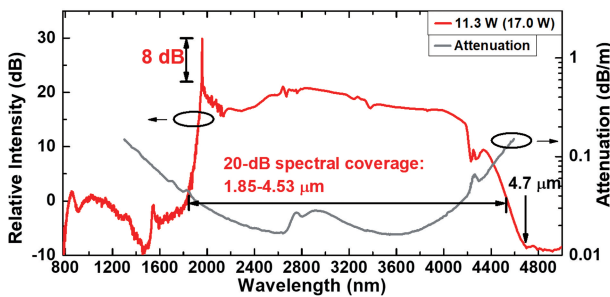


图 21 1960 nm 皮秒光纤激光泵浦的 10 W 级中红外超连续谱激光的光谱^[98]

Fig. 21 Spectra of 10 W level MIR SC laser pumped by 1960 nm picosecond laser^[98]

2020 年, Scurria 等^[97]通过透镜以调 Q 包络宽度为 90 ns、重复频率为 60 kHz 的 $2 \mu\text{m}$ 波段调 Q 锁模激光器耦合泵浦 InF_3 光纤, 实现了平均功率为 7 W、光谱长波边为 $4.7 \mu\text{m}$ 的超连续谱激光, 20 dB 光谱范围为 $2.0 \sim 3.9 \mu\text{m}$ 。受限于泵浦源较低的脉冲峰值功率, 该超连续谱激光的长波光谱成分较弱。

为了提升 InF_3 光纤基中红外超连续谱激光的长波功率水平, 2020 年, 本课题组基于优化的 $1.9 \sim 2.6 \mu\text{m}$ 超连续谱激光泵浦源, 在 InF_3 光纤中获得了光谱范围为 $1.9 \sim 4.9 \mu\text{m}$ 、平均功率为 11.8 W 的高功率全光纤光谱平坦型中红外超连续谱激光, 超连续谱激光的光谱如图 22 所示^[82]。测得的 $3.8 \mu\text{m}$ 以上波段的光谱成分功率为 2.18 W, 占总功率的比例为 18.5%。该功率数值刷新了基于软玻璃光纤获得的同波段超连续谱激光的功率记录。

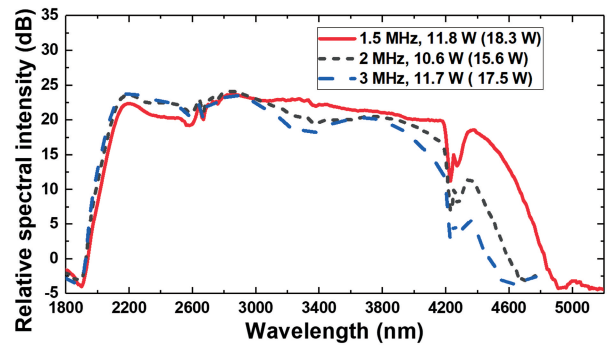


图 22 平均功率为 11.8 W 的中红外超连续谱激光的光谱^[82]

Fig. 22 MIR-SC laser spectra for average power of 11.8 W^[82]

从 InF_3 光纤基中红外超连续谱激光的发展历程来看, 采用光纤基泵浦源、实现泵浦源与 InF_3 光纤的低损耗熔接以及在 InF_3 光纤输出端制备光纤端帽的方法, 已成为 InF_3 光纤基高功率中红外超连续谱激光光谱进一步展宽、输出功率进一步提高的主流技术手段。

7 基于其他无源非线性光纤的 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段高功率超连续谱激光器

除了上述无源氟化物光纤, 近年来, 研究人员还利用其他种类的无源非线性光纤, 如氟硝酸盐玻璃光纤^[63,99]、硫系玻璃光纤^[56]等, 在高功率 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段超连续谱激光领域开展了研究工作。2018 年, Yao 等^[63]报道了基于空间耦合结构和短氟硝酸盐玻璃光纤的高功率中红外超连续谱激光, 平均功率为 10.4 W, 20 dB 光谱覆盖范围为 $1.8 \sim 3.3 \mu\text{m}$ 。在该研究中, 泵浦源为一个 $2 \mu\text{m}$ 波段啁啾脉冲放大 (CPA) 系统, 氟硝酸盐玻璃光纤的纤芯 NA 为 0.45 (纤芯材料为 $70\text{TeO}_2-20\text{BaF}_2-10\text{Y}_2\text{O}_3$), 最低传输损耗为 0.4 dB/m。2019 年, 该研究组对实验结构进行了优化, 提高了泵浦源的输出功率, 并采用纤芯直径更大的非线性光纤, 实现了平均功率为 19.6 W 的中红外超连续谱激光, 光谱覆盖范围为 $1 \sim 3.8 \mu\text{m}$ 。超连续谱激光的光谱随功率的演化如图 23 所示。若不考虑 $2 \mu\text{m}$ 处的泵浦光残余尖峰, 20 dB 光谱覆盖范围为 $1.3 \sim 3.4 \mu\text{m}$ ^[99]。

硫系玻璃光纤在 $5 \mu\text{m}$ 以上波段具有较低的损耗, 研究人员自 2012 年起就基于光纤泵浦源和硫系玻璃光纤开展了高功率 (输出功率在百毫瓦以上) 中红外超连续谱激光的研究^[55,100-102], 但输出功率的提升缓慢。2021 年, Yan 等^[56]基于 $2 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 波段超连续谱激光器和 ZBLAN- As_2S_3 级联非线性光

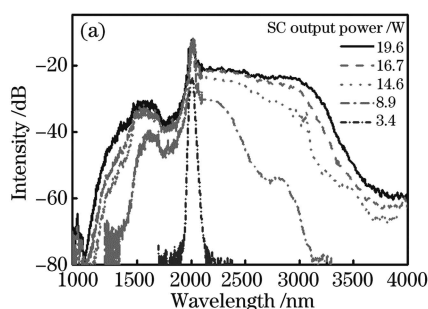


图 23 氟碲酸盐玻璃光纤输出的 19.6 W 中红外超连续谱激光的光谱^[99]

Fig. 23 Spectra of 19.6 W MIR-SC laser based on tellurite fiber^[99]

纤,报道了平均功率为 1.13 W、光谱范围为 2~6.5 μm (20 dB 光谱范围为 2~6.25 μm) 的中红外超连续谱激光,光谱如图 24 所示。该研究表明,泵浦光与 As_2S_3 光纤的低效率耦合以及 As_2S_3 光纤端面的损伤仍是 As_2S_3 光纤基中红外超连续谱激光器发展的重要限制因素^[56]。

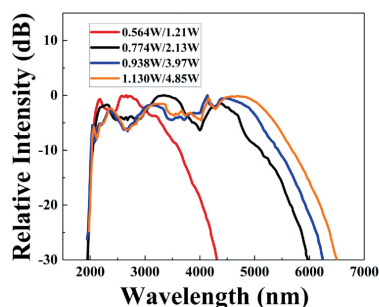


图 24 基于 As_2S_3 光纤的瓦级中红外超连续谱激光器的光谱^[56]

Fig. 24 Spectra of watt-level SC laser based on As_2S_3 fiber^[56]

8 结束语

工作在 3~5 μm 波段的中红外超连续谱激光在环境监测、生物医疗、测绘计量、国防安全等领域具有重要的应用前景。近年来,3~5 μm 波段中红外超连续谱光纤激光器取得了长足的发展。展望未来,其发展趋势如下。

1) 输出功率不断提高。随着近红外和短波红外波段光纤激光技术、软玻璃光纤处理技术的不断发展,基于氟化物光纤的中红外超连续谱光纤激光器的输出功率不断提升,目前已达 30 W^[57]。由于中红外光纤激光技术的发展和超连续谱激光器需求的牵引,3~5 μm 波段中红外超连续谱光纤激光器的输出功率必将进一步提升。

2) 功率转换效率逐渐提高。在早期的研究中,

低效的空间耦合方式和较高的光纤传输损耗限制了超连续谱激光器功率转换效率的提高。随着端面对接、熔融连接等低损耗光束耦合技术的发展和低损耗光纤的成功研制以及泵浦波长的红移,超连续谱激光器的功率转换效率逐渐提高。目前,基于无源 InF_3 光纤且光谱长波边突破 5 μm 的中红外超连续谱激光的功率转换效率已接近 60%。可以期待,随着中红外光纤传输损耗的进一步降低和泵浦波长的进一步红移,功率转换效率仍存在提升空间。

3) 光谱特性不断优化。受泵浦激光器工作波长较短或光谱较窄等限制,早期的高功率中红外超连续谱光纤激光的短波成分的功率占比较高,或在泵浦波长处存在一个残余光谱尖峰。在超连续谱激光器作为泵浦源后,光谱平坦型中红外超连续谱激光得到了广泛研究,长波光谱成分的功率占比得到明显提升。随着长波长泵浦源技术的发展,光谱特性(如光谱形状和长波功率占比等)的进一步优化成为明显趋势。

4) 泵浦波长逐渐向长波方向推进。从高功率超连续谱光纤激光的发展历程可以发现,随着光纤激光技术的发展,中红外高功率超连续谱激光的泵浦波长逐渐向长波方向移动,从 1.5 μm 波段发展至 2 μm 波段,再到 2~2.5 μm 波段,目前推进至 3 μm 波段。泵浦波长的增大有利于减小泵浦光转换为中红外超连续谱激光时的量子亏损,减少产热,提高功率转换效率。可以预见,泵浦波长向长波方向推进也是中红外超连续谱光纤激光器的一个重要趋势。

可以期待,在不久的将来,高功率中红外超连续谱光纤激光将从实验研究走向实际应用,在科研、生产和生活中发挥独特作用。

参 考 文 献

- [1] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics[M]. Amsterdam: Academic Press, 2007.
- [2] Hasegawa A. Generation of a train of soliton pulses by induced modulational instability in optical fibers[J]. Optics Letters, 1984, 9(7): 288-290.
- [3] van Simaey G E, Emplit P, Haelterman M. Observation of modulational instability recurrence in optical fibers[C]//Nonlinear Guided Waves and Their Applications, March 26, 2001, Clearwater, Florida. Washington, D.C.: OSA, 2001: WB5.
- [4] Alfano R R, Shapiro S L. Observation of self-phase modulation and small-scale filaments in crystals and glasses[J]. Physical Review Letters, 1970, 24(11): 592.

- [5] Ippen E P, Shank C V, Gustafson T K. Self-phase modulation of picosecond pulses in optical fibers[J]. Applied Physics Letters, 1974, 24(4): 190-192.
- [6] Stolen R H, Lin C. Self-phase-modulation in silica optical fibers[J]. Physical Review A, 1978, 17(4): 1448-1453.
- [7] Genty G, Lehtonen M, Ludvigsen H. Effect of cross-phase modulation on supercontinuum generated in microstructured fibers with sub-30 fs pulses[J]. Optics Express, 2004, 12(19): 4614-4624.
- [8] Agrawal G P, Baldeck P L, Alfano R R. Modulation instability induced by cross-phase modulation in optical fibers[J]. Physical Review A, 1989, 39(7): 3406-3413.
- [9] Coen S, Chau A H L, Leonhardt R, et al. Supercontinuum generation by stimulated Raman scattering and parametric four-wave mixing in photonic crystal fibers [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2002, 19(4): 753-764.
- [10] Dianov E M, Bufetov I A, Mashinsky V M, et al. Raman fibre lasers based on heavily GeO₂-doped fibres[J]. Quantum Electronics, 2005, 35(5): 435-441.
- [11] Chen H W, Jin A J, Yang W Q, et al. Generation of a compact high-power high-efficiency normal-dispersion pumping supercontinuum in silica photonic crystal fiber pumped with a 1064-nm picosecond pulse [J]. Chinese Physics B, 2013, 22(6): 064211.
- [12] Yatsenko Y P, Pryamikov A D, Mashinsky V M, et al. Four-wave mixing with large Stokes shifts in heavily Ge-doped silica fibers [J]. Optics Letters, 2005, 30(15): 1932-1934.
- [13] Kudlinski A, Pureur V, Bouwmans G, et al. Experimental investigation of combined four-wave mixing and Raman effect in the normal dispersion regime of a photonic crystal fiber[J]. Optics Letters, 2008, 33(21): 2488-2490.
- [14] Li Y, Hou J, Jiang Z F, et al. Cascaded four-wave mixing generation with hybrid pump [C]//Advanced Solid-State Lasers Congress, October 27-November 1, 2013, Paris, France. Washington, D.C.: OSA, 2013: JTh2A.03.
- [15] Hou J, Li Y, Leng J Y, et al. Cascaded four-wave mixing generation in photonic crystal fibers [J]. Applied Physics B, 2013, 113(4): 611-618.
- [16] Sorokina I T, Dvoyrin V V, Tolstik N, et al. Mid-IR ultrashort pulsed fiber-based lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(5): 99-110.
- [17] Tang Y X, Wright L G, Charan K, et al. Generation of intense 100 fs solitons tunable from 2 μm to 4.3 μm in fluoride fiber [J]. Optica, 2016, 3(9): 948-951.
- [18] Dudley J M, Taylor J R. Supercontinuum generation in optical fibers [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [19] Mandon J, Guelachvili G, Picqué N. Fourier transform spectroscopy with a laser frequency comb [J]. Nature Photonics, 2009, 3(2): 99-102.
- [20] Keilmann F, Gohle C, Holzwarth R. Time-domain mid-infrared frequency-comb spectrometer [J]. Optics Letters, 2004, 29(13): 1542-1544.
- [21] Schliesser A, Brehm M, Keilmann F, et al. Frequency-comb infrared spectrometer for rapid, remote chemical sensing[J]. Optics Express, 2005, 13(22): 9029-9038.
- [22] Udem T. Frequency comb benefits [J]. Nature Photonics, 2009, 3(2): 82-84.
- [23] Picqué N, Hänsch T W. Frequency comb spectroscopy [J]. Nature Photonics, 2019, 13(3): 146-157.
- [24] Kaminski C F, Watt R S, Elder A D, et al. Supercontinuum radiation for applications in chemical sensing and microscopy [J]. Applied Physics B, 2008, 92(3): 367-378.
- [25] Kasparian J, Rodriguez M, Me jean G, et al. White-light filaments for atmospheric analysis[J]. Science, 2003, 301(5629): 61-64.
- [26] 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.
- [27] Cezard N, Dobroc A, Canat G, et al. Supercontinuum laser absorption spectroscopy in the mid-infrared range for identification and concentration estimation of a multi-component atmospheric gas mixture [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8182: 81820V.
- [28] Th Bekman H H P, van den Heuvel J C, van Putten F J M, et al. Development of a mid-infrared laser for study of infrared countermeasures techniques [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5615: 27-38.
- [29] Méjean G, Kasparian J, Salmon E, et al. Towards a supercontinuum-based infrared lidar [J]. Applied Physics B, 2003, 77(2/3): 357-359.
- [30] Israelsen N M, Petersen C R, Barh A, et al. Real-time high-resolution mid-infrared optical coherence tomography [J]. Light, Science & Applications, 2019, 8: 11.
- [31] Labrüyère A, Tonello A, Couderc V, et al. Compact supercontinuum sources and their biomedical applications[J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18(5): 375-378.

- [32] Seddon A B. Potential for using mid-infrared light for non-invasive, early-detection of skin cancers in vivo [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8576: 85760V.
- [33] Borondics F, Jossent M, Sandt C, et al. Supercontinuum-based Fourier transform infrared spectromicroscopy [J]. *Optica*, 2018, 5(4): 378-381.
- [34] Gasser C, Kilgus J, Harasek M, et al. Enhanced mid-infrared multi-bounce ATR spectroscopy for online detection of hydrogen peroxide using a supercontinuum laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 12169-12179.
- [35] Mikkonen T, Amiot C, Aalto A, et al. Broadband cantilever-enhanced photoacoustic spectroscopy in the mid-IR using a supercontinuum[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 5094-5097.
- [36] Alexander V V, Kulkarni O P, Kumar M, et al. Modulation instability initiated high power all-fiber supercontinuum lasers and their applications [J]. *Optical Fiber Technology*, 2012, 18(5): 349-374.
- [37] Yang L Y, Zhang B, Yin K, et al. 0.6–3.2 μm supercontinuum generation in a step-index Germanium-core fiber using a 4.4 kW peak-power pump laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 12600-12606.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 39138.
- [41] Yin K, Zhu R Z, Zhang B, et al. Ultrahigh-brightness, spectrally-flat, short-wave infrared supercontinuum source for long-range atmospheric applications [J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20010-20020.
- [42] Swiderski J. High-power mid-infrared supercontinuum sources: current status and future perspectives [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2014, 38(5): 189-235.
- [43] Wang J S, Vogel E M, Snitzer E. Tellurite glass: a new candidate for fiber devices [J]. *Optical Materials*, 1994, 3(3): 187-203.
- [44] Kumar V V R K, George A K, Knight J C, et al. Tellurite photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2003, 11(20): 2641-2645.
- [45] Domachuk P, Wolchover N A, 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.
- [46] Lin A X, Zhang A D, Bushong E J, et al. Solid-core tellurite glass fiber for infrared and nonlinear applications [J]. *Optics Express*, 2009, 17(19): 16716-16721.
- [47] Kanamori T, Sakaguchi S. Preparation of elevated NA fluoride optical fibers [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1986, 25(6): L468-L470.
- [48] Carter S F, Williams J R, Moore M W, et al. Prospects for ultra-low-loss fluoride fibres at BTRL [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1992, 140: 153-158.
- [49] Massicott J F, Brierley M C, Wyatt R, et al. Low threshold, diode pumped operation of a green, Er^{3+} doped fluoride fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(24): 2119-2120.
- [50] Adam J L. Fluoride glass research in France: fundamentals and applications [J]. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2001, 107(2): 265-270.
- [51] Bei J F, Monro T M, Hemming A, et al. Reduction of scattering loss in fluoroindate glass fibers [J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(9): 1285-1301.
- [52] Vasil'Ev A V, Devyatikh G G, Dianov E M, et al. Two-layer chalcogenide-glass optical fibers with optical losses below 30 dB/km [J]. *Quantum Electronics*, 1993, 23(2): 89-90.
- [53] Hilton A R, Kemp S. Chalcogenide glasses for infrared optics [M]. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [54] Tao G M, Ebendorff-Heidepriem H, Stolyarov A M, et al. Infrared fibers [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(2): 379-458.
- [55] Martinez R A, Plant G, Guo K W, et al. Mid-infrared supercontinuum generation from 1.6 μm to $>11 \mu\text{m}$ using concatenated step-index fluoride and chalcogenide fibers[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 296-299.
- [56] Yan B, Huang T, Zhang W, et al. Generation of Watt-level supercontinuum covering 2–6.5 μm in an all-fiber structured infrared nonlinear transmission system [J]. *Optics Express*, 2021, 29(3): 4048-4057.
- [57] Yang L Y, Li Y, Zhang B, et al. 30-W supercontinuum generation based on ZBLAN fiber in an all-fiber configuration[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(9): 1061-1065.

- [58] Xia C N, Xu Z, Islam M N, et al. 10.5 W time-averaged power mid-IR supercontinuum generation extending beyond 4 μm with direct pulse pattern modulation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 422-434.
- [59] 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.
- [60] Liu K, Liu J, Shi H X, et al. High power mid-infrared supercontinuum generation in a single-mode ZBLAN fiber with up to 21.8 W average output power[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24384-24391.
- [61] Zheng Z J, Ouyang D Q, Zhao J Q, et al. Scaling all-fiber mid-infrared supercontinuum up to 10 W-level based on thermal-spliced silica fiber and ZBLAN fiber[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(4): 135-139.
- [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] 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.
- [64] Gauthier J C, Fortin V, Duval S, et al. In-amplifier mid-infrared supercontinuum generation[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5247-5250.
- [65] Gauthier J C, Robichaud L R, Fortin V, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in fluoride fiber amplifiers: current status and future perspectives[J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(6): 1-14.
- [66] Yang L Y, Zhang B, Yin K, et al. Spectrally flat supercontinuum generation in a holmium-doped ZBLAN fiber with record power ratio beyond 3 μm [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(5): 417-421.
- [67] Yang L Y, Zhang B, Wu T Y, et al. Watt-level mid-infrared supercontinuum generation from 2.7 μm to 4.25 μm in an erbium-doped ZBLAN fiber with high slope efficiency[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(13): 3061-3064.
- [68] 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]. *Optics Letters*, 2006, 31(17): 2553-2555.
- [69] 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.
- [70] 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 1995 nm[C]//2011 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and 12th European Quantum Electronics Conference (CLEO EUROPE/EQEC), May 22-26, 2011, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2011.
- [71] Eckerle M, Kieleck C, Swiderski J, et al. Actively Q-switched and mode-locked Tm³⁺-doped silicate 2 μm fiber laser for supercontinuum generation in fluoride fiber[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 512-514.
- [72] 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.
- [73] Kulkarni O P, Alexander V V, Kumar M, et al. Supercontinuum generation from ~ 1.9 μm to 4.5 μm in ZBLAN fiber with high average power generation beyond 3.8 μm using a thulium-doped fiber amplifier[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28(10): 2486-2498.
- [74] Liu J, Liu K, Shi H X, et al. High-power all-fiber mid-infrared supercontinuum laser source[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(9): 0902004. 刘江, 刘昆, 师红星, 等. 高功率全光纤中红外超连续谱激光光源[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0902004.
- [75] 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.
- [76] 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]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(18): 5122-5127.
- [77] Qin G S, Yan X, Kito C, et al. Ultrabroadband supercontinuum generation from ultraviolet to 6.28 μm in a fluoride fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(16): 161103.
- [78] Abeeluck A K, Headley C, Jørgensen C G. High-power supercontinuum generation in highly nonlinear, dispersion-shifted fibers by use of a continuous-wave Raman fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(18): 2163-2165.
- [79] Xia C N, Kumar M, Cheng M Y, et al. Supercontinuum generation in silica fibers by amplified nanosecond laser diode pulses[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 789-797.
- [80] Liu K, Liu J, Shi H X, et al. 24.3 W mid-infrared supercontinuum generation from a single-mode

- ZBLAN fiber pumped by thulium-doped fiber amplifier [C] // *Advanced Solid State Lasers*, November 16-21, 2014, Shanghai, China. Washington, D.C.: OSA, 2014: AM3A.6.
- [81] Cozic S, Boivinet S, Pierre C, et al. Splicing fluoride glass and silica optical fibers [J]. *EPJ Web of Conferences*, 2019, 215: 04003.
- [82] Yang L, 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]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 14973-14979.
- [83] Faucher D, Bernier M, Androz G, et al. 20 W passively cooled single-mode all-fiber laser at 2.8 μm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1104-1106.
- [84] Fortin V, Bernier M, Bah S T, et al. 30 W fluoride glass all-fiber laser at 2.94 μm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2882-2885.
- [85] Aydin Y O, Fortin V, Vallée R, et al. Towards power scaling of 2.8 μm fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(18): 4542-4545.
- [86] Aydin Y O, Maes F, Fortin V, et al. Endcapping of high-power 3 μm fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20659-20669.
- [87] Deng K X, Yang L Y, Zhang B, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in an all-fiberized Er-doped ZBLAN fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(23): 6454-6457.
- [88] 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.
- [89] Théberge F, Daigle J F, Vincent D, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in fluoroindate fiber [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4683-4685.
- [90] 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.
- [91] 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 μm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): 30592-30602.
- [92] Michalska M, Grzes P, Hlubina P, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in a fluoroindate fiber with 1.4 W time-averaged power [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(4): 045101.
- [93] Gauthier J C, Fortin V, Carrée J Y, et al. Mid-IR supercontinuum from 2.4 μm to 5.4 μm in a low-loss fluoroindate fiber [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(8): 1756-1759.
- [94] 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.
- [95] 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]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 6490-6498.
- [96] 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 InF_3 fiber [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10902: 1090207.
- [97] 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]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 7672-7677.
- [98] Wu T Y, Yang L Y, Dou Z Y, et al. Ultra-efficient, 10-watt-level mid-infrared supercontinuum generation in fluoroindate fiber [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(9): 2378.
- [99] 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]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508006.
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.
- [100] Gattass R R, Brandon Shaw L, Nguyen V Q, et al. All-fiber chalcogenide-based mid-infrared supercontinuum source [J]. *Optical Fiber Technology*, 2012, 18(5): 345-348.
- [101] Théberge F, Bérubé N, Poulain S, et al. Infrared supercontinuum generated in concatenated InF_3 and As_2Se_3 fibers [J]. *Optics Express*, 2018, 26(11): 13952-13960.
- [102] Robichaud L R, Duval S, Pleau L P, et al. High-power supercontinuum generation in the mid-infrared pumped by a soliton self-frequency shifted source [J]. *Optics Express*, 2020, 28(1): 107-115.

Progress on High-Power Supercontinuum Laser Sources at 3–5 μm

Yang Linyong^{1,2,3}, Zhang Bin^{1,2,3}, Hou Jing^{1,2,3*}

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

² State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

³ Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract High-power mid-infrared supercontinuum (MIR-SC) lasers ranging 3–5 μm find important applications in the fields of environmental monitoring, bio-medicine, metrology, national security, and etc. Fibers have been serving as popular nonlinear media for SC generation due to the merits of large nonlinear coefficients, long effective nonlinear interaction lengths, feasible structures, and being suitable for all-fiber integration. In recent years, new schemes for fiber-based MIR-SC lasers have been developed and the performance of such MIR-SC lasers has been significantly promoted along with the progress in the techniques of fiber-based pump lasers and fabrication/post-treatment of mid-infrared fibers. In this paper, the current status of fiber-based MIR-SC lasers covering the 3–5 μm region is reviewed and the future development is prospected.

Significance Compared with traditional broadband light sources such as halogen light sources, the SC lasers have good spatial coherence and high brightness. In addition, different from the traditional lasers with high monochromaticity, the SC lasers have both a wide spectral range and high spatial coherence. It has become the unremitting pursuit of researchers to obtain SC lasers with high powers and wide spectra. In the past decade, the MIR-SC laser sources have been developed rapidly. Parameters including output power and spectral range are constantly improved. However, there are still some unfavorable factors that limit the development of MIR-SC lasers. It is meaningful for the further development of MIR-SC lasers to make a systematic summary of the development status and analyze the developing trend of MIR-SC lasers.

Progress In this paper, the characteristics of MIR-SC lasers are first introduced, and then the mid-infrared fibers are introduced. Next, the development statuses of mid-infrared SC lasers based on passive ZBLAN fibers, active ZBLAN fibers, passive InF_3 fibers, and other nonlinear fibers are introduced in turn. Herein, the state-of-the-art research results of MIR-SC lasers are reviewed. Finally, the development trend of mid-infrared SC lasers is prospected.

Conclusions and Prospects High-power SC laser sources have a variety of potential applications including active hyperspectral imaging, long-range environmental sensing, homeland security, and so on. The growing trends of MIR-SC lasers are mainly listed as below.

1) Output power is increasing. With the technological development of near-infrared and short-wave infrared fiber lasers and soft glass fiber processing, the output powers of mid-infrared SC fiber lasers based on fluoride fibers have been continuously improved to 30 W. With the development of mid-infrared fiber laser technology and the demand for SC lasers, the output powers of 3–5 μm mid-infrared SC fiber lasers should be further improved.

2) Power conversion efficiency is gradually improved. In the early research, the inefficient spatial coupling and high fiber transmission loss limit the improvement of power conversion efficiency of SC lasers. With the development of low-loss beam coupling technologies such as end-butting and fusion splicing, the successful development of low-loss optical fibers, and the red shift of pump wavelength, the power conversion efficiency of SC lasers has been gradually improved. It can be expected that with the further reduction of transmission loss in mid-infrared fibers and the further red shift of pump wavelength, there is still room for improvement in power conversion efficiency.

3) Optimization of spectral characteristics is continuing. Due to the limitation of the short wavelength or narrow spectrum of the pump laser, the short-wavelength component of the early high-power mid-infrared SC fiber laser has a high proportion of power, or there is a residual spectral peak at the pump wavelength. After the emergence of SC lasers as pumping sources, spectrally flat mid-infrared SC lasers have been widely studied, and the power ratio of long-wavelength spectral components has been significantly improved. With the development of long-wavelength pump source technology, the spectral characteristics (such as spectral shape and long-wavelength power ratio) have become a clear trend.

4) Pump wavelength is gradually moving in the long wavelength direction. From the development of high-power SC fiber lasers, it can be found that with the development of fiber laser technology, the pump wavelength of mid-infrared high-power SC laser gradually moves in the long wavelength direction, from the 1.5 μm band to the 2 μm band, then to the 2–2.5 μm band, and now to 3 μm band. The increase of the pump wavelength is beneficial to reduce the quantum defect, reduce the heat generation, and improve the power conversion efficiency during the conversion from the pump light to the mid-infrared SC laser. It can be predicted that pumping wavelength would be extended to long wavelength, which is an important trend of mid-infrared SC fiber lasers.

It can be expected that in the near future, high-power mid-infrared SC fiber lasers would move from experimental researches to practical applications, and play a unique role in scientific researches, production, and daily life.

Key words laser optics; supercontinuum generation; nonlinear effect; optical fiber; optical fiber amplifiers