

## 可见光至中红外光纤超连续谱的研究进展

龚虹韬, 张斌, 侯静\*

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 光纤超连续谱具有光谱宽、亮度高、空间相干性好等优势, 在光电对抗、气体探测、光学相干层析成像等领域应用前景广阔。针对不同应用场景对超连续谱性能提出的差异化需求, 分别从光纤超连续谱的功率提升、长波拓展、低噪声研究三个核心方向, 回顾了近年来在上述三个方面的研究进展, 总结了性能提升的技术路线, 并对未来的发展进行了展望, 旨在为高性能超连续谱的研制与应用提供帮助。

**关键词:** 超连续谱; 可见光至中红外; 高功率; 低噪声

**中图分类号:** O437; TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2026)02-200-14

## Research progress on visible to mid-infrared fiber-based supercontinuum

GONG Hongtao, ZHANG Bin, HOU Jing\*

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Fiber-based supercontinuum offer broad spectral bandwidth, high brightness, and excellent spatial coherence, showing great promise in applications such as electro-optical countermeasures, gas sensing, and optical coherence tomography. To address the diverse performance requirements of supercontinuum imposed by different application scenarios, this paper reviewed recent advances in three key directions of fiber-based supercontinuum: power scaling, long wave extension, and low noise research. The technical approaches tailored to enhance each specific performance metric were summarized, and an outlook on future developments was provided, aiming to serve as a reference for the development and application of high-performance supercontinuum.

**Keywords:** supercontinuum; visible to mid-infrared; high power; low noise

超连续谱(supercontinuum, SC)是一种新型的宽带光源。与激光的单色性不同,其光谱覆盖范围非常广,从几百纳米到几微米不等<sup>[1]</sup>。超连续谱在要求宽光谱、高亮度的领域(如光谱学<sup>[2-4]</sup>、气体探测<sup>[4-8]</sup>、生物医学<sup>[9-10]</sup>、光计算<sup>[11]</sup>、国防安全<sup>[12]</sup>等)有着广泛的应用。

超连续谱的产生基于激光在介质中的非线性效应,当激光的峰值功率足够高时,介质对入射电场的响应是非线性的,激光在传输过程中会产生新的频率成分,这一过程就是非线性效应。非线性效应主要有自相位调制(self-phase modulation, SPM)、调制不稳定(modulation instability, MI)、受激拉曼散射(stimulated Raman scattering, SRS)、交叉相位调制(cross-phase modulation, XPM)、四波混频(four-wave mixing, FWM)、孤子自频移(soliton self-frequency shift, SSFS)、光波破碎

(optical wave breaking, OWB)等<sup>[12]</sup>。高峰值功率脉冲激光入射到介质材料中,在介质的色散和非线性效应共同作用下,激光的光谱出现了剧烈的展宽,最终形成超连续谱<sup>[13-14]</sup>。

光纤作为一种波导结构,能够将光束束缚在微米尺度的纤芯内部,从而增强光与物质的相互作用,降低产生非线性效应所需要的峰值功率;同时,纤芯的波导约束有助于提升光束质量,实现高质量的超连续谱输出。目前基于光纤产生超连续谱已经成为超连续谱研究的重点<sup>[15]</sup>。

不同的应用场景对超连续谱提出了差异化的核心指标要求。光电对抗应用中,超连续谱输出功率直接关系到对敌方设备的毁伤能力,相比于传统的单色激光器,超连续谱光源凭借其宽谱的特性,可以同时覆盖硅基(可见光)、InGaAs(近红外)、HgCdTe(中红外)等探测器的响应波段,有

收稿日期:2025-11-18

第一作者:龚虹韬(2001—),男,四川巴中人,博士研究生,E-mail:ht\_gong233@163.com

\*通信作者:侯静(1975—),女,四川成都人,研究员,博士,博士生导师,E-mail:houjing25@sina.com

引用格式:龚虹韬,张斌,侯静. 可见光至中红外光纤超连续谱的研究进展[J]. 国防科技大学学报, 2026, 48(2): 200-213.

Citation: GONG H T, ZHANG B, HOU J. Research progress on visible to mid-infrared fiber-based supercontinuum[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2026, 48(2): 200-213.

效规避敌方采用窄带滤波等波长选择性抗干扰措施,具备宽谱致盲的能力。然而,由于能量分散在整个光谱中,其单位波长的功率密度低于同等总功率单波长的激光,因此提升超连续谱光源的输出功率以增强功率密度是光电对抗领域重要的研究方向。此外,更高的输出功率还可以增大传播距离和到靶功率,提升致盲能力。在光学相干层析成像等高精度成像应用中,超连续谱作为宽带光源,可以提高轴向分辨率,但是系统灵敏度与成像对比度则依赖于光源强度的稳定性,特别是相对强度噪声(relative intensity noise, RIN)会直接转化为背景噪声,限制探测能力,同时还会影响重复测量的稳定性<sup>[16-17]</sup>。因此,发展低噪声、高相干性的超连续谱光源,是推进其在测量领域实用化的关键。在气体探测、食品安全检测等领域,许多目标分子(如 CH<sub>4</sub>、CO、NH<sub>3</sub> 等)在中红外“指纹区”(2~5 μm)具有强特征吸收峰。为实现高灵敏度检测,超连续谱光源必须覆盖这些特征波长,这对光谱带宽尤其是向中红外的拓展能力提出了迫切需求<sup>[4,18]</sup>。

上述应用需求对超连续谱光源提出了多维度性能要求,其中输出功率、中红外光谱范围与强度噪声已成为制约其在光电对抗、痕量探测与高灵敏度成像等场景中实用化的关键问题。相较而言,其他参数(如偏振态、脉冲时序等)虽在特定系统中有重要作用,但功率、波长范围与噪声直接决定了光源是否可用,更具普适性。

基于此,本文以“功率提升—长波拓展—低噪声研究”为主线,梳理了近年来光纤超连续谱研究的进展。在功率提升方面,不仅关注平均功率的突破,还总结了具有时空非线性调控能力的新型光纤结构(渐变折射率光纤、长拉锥光纤)在实现高功率输出的同时,兼顾高光束质量的成果;在长波拓展方面,重点关注将光谱向 8~12 μm 波段延伸的研究进展,以最大化超连续谱的长波覆盖范围;在低噪声研究方面,聚焦非线性动力学对噪声的调控,总结正常色散区、反常色散区不同的强度噪声抑制路径。本文旨在为面向不同应用场景的高性能超连续谱光源研发提供设计参考。

## 1 超连续谱的功率提升

高功率超连续谱在光电对抗<sup>[19]</sup>、高光谱激光雷达<sup>[20]</sup>等领域有着非常重要的应用。目前,对高功率超连续谱功率的研究在可见光至近红外波段可以达到 kW 量级<sup>[21-24]</sup>,而在中红外波段,受限于中红外光纤材料的性质以及高功率近红外泵浦

源的不成熟,中红外波段的高功率超连续谱输出功率通常仅为 30~50 W<sup>[25-30]</sup>。下面,将具体介绍在可见光至近红外波段、中红外波段的高功率超连续谱工作。

### 1.1 可见光至近红外波段高功率超连续谱

可见光至近红外波段的高功率超连续谱的产生方案主要有两种:第一种是基于主振荡功率放大(master oscillator power amplifier, MOPA)结构的超连续谱产生,第二种是基于随机光纤激光器结构的超连续谱产生。

#### 1.1.1 基于 MOPA 结构的高功率超连续谱研究进展

MOPA 结构采用多级预放大器将脉冲种子激光的功率逐步提升,在最后一级主放大器将功率和峰值功率放大到所需的水平<sup>[31-32]</sup>。基于 MOPA 结构的高功率超连续谱可分为两类:放大后泵浦非线性光纤产生超连续谱<sup>[33-34]</sup>;在主放大器中直接产生超连续谱<sup>[21,35]</sup>。

光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)因高非线性和色散可调的特性被广泛用于可见光至近红外超连续谱产生<sup>[36-37]</sup>。但是 PCF 纤芯直径通常仅几微米,功率承受能力有限;同时,其模场和 MOPA 输出尾纤存在模场失配,导致熔接点处的损耗大,发热严重,限制了功率的进一步提升。为此研究人员提出了多芯光纤<sup>[38-39]</sup>、级联 PCF<sup>[40-41]</sup>以及长拉锥光纤<sup>[42]</sup>等方法来增大 PCF 输入端的模场直径,提升输出功率。截至目前,基于 PCF 的超连续谱最高平均功率仍由中国工程物理研究院的董克功团队于 2021 年报道:采用皮秒脉冲泵浦长拉锥 PCF 光纤实现的超连续谱平均功率为 314.7 W、光谱范围为 390~2 400 nm<sup>[42]</sup>。

相比于 PCF,多模光纤有着更高的功率承受能力。其中,渐变折射率多模光纤(graded-index multimode fiber, GRIN MMF)不仅可以支持更高的传输功率,而且渐变折射率分布引起的周期性光束自成像、与模间色散等相互作用,催生了丰富的时空非线性现象。其中最具代表性的包括几何参量不稳定性(geometric parametric instability, GPI)和克尔自清洁效应。2016 年,法国摩日大学 Krupa 等首次报道了 GPI 效应,采用 1 064 nm 的超短脉冲在正常色散区泵浦 GRIN MMF,在泵浦波长两侧产生了多个对称的频率边带<sup>[43]</sup>;2017 年该课题组报道了超短脉冲在 GRIN MMF 中传输时,光纤中的高阶模式会转移到基模,光束质量得到净化,这一现象被称为光束自清洁效应<sup>[44]</sup>。

GRIN MMF 凭借独特的光谱拓展、光束质量

优化机制,加上高功率承受能力,已经成为实现可见光至近红外高功率超连续谱的重要平台。研究人员陆续报道了在 GRIN MMF 中产生可见光波段的超连续谱<sup>[45-51]</sup>。2022 年,西安光机所张挺团队实现了 GRIN MMF 与放大器输出尾纤的熔接,首次报道了全光纤结构的 GRIN MMF 超连续谱,平均功率 2 W<sup>[47]</sup>。同年清华大学张海涛等将平均功率提高到了 25 W<sup>[48]</sup>。2023 年,西安光机所张挺团队进一步实现平均功率 30 W 输出<sup>[49]</sup>。同年本文课题组采用四级 MOPA 放大结构泵浦 10 m 长的 50/125  $\mu\text{m}$  GRIN MMF(实验装置结构见图 1(a)),在 620 W 的平均泵浦功率和 72 kW 峰值功率下,获得了平均输出功率 204 W、光谱覆盖范围 580 ~ 2 400 nm 的超连续谱,输出光束因自清洁效应在不同波长下均呈现近高斯的形状,见图 1(b)<sup>[50]</sup>。2025 年,北京工业大学也报道了 100.4 W 的超连续谱输出<sup>[51]</sup>。

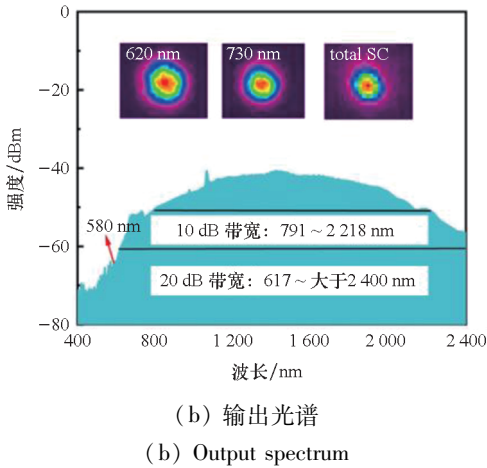
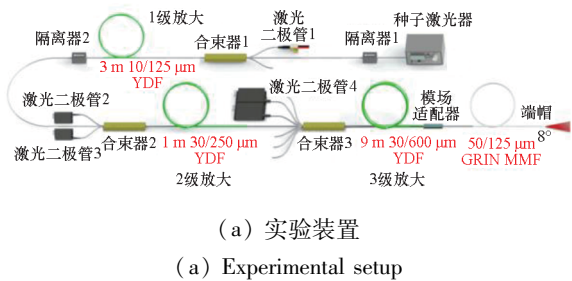


图 1 基于 GRIN MMF 的 204 W 可见光超连续谱产生<sup>[50]</sup>  
Fig. 1 Generation of 204 W visible supercontinuum based on GRIN MMF<sup>[50]</sup>

除了在 PCF 和 GRIN MMF 等光纤中展宽光谱,也可以在放大器结构中直接产生超连续谱<sup>[52]</sup>。方案优点是放大器尾纤无须与非线性光纤熔接,减小了损耗,具有实现千瓦级超连续谱输出的潜力。近年来,本文课题组围绕基于掺镱光纤(ytterbium-doped fiber, YDF)放大器直接输出超连续谱的功率提升开展了系统性的工

作。早期实现了 70 W 的输出功率<sup>[53]</sup>,2023 年,进一步实现了 714 W 的超连续谱输出,光谱范围为 690 ~ 2 350 nm<sup>[35]</sup>。

2024 年,本文课题组首次报道了基于长拉锥掺镱光纤(tapered ytterbium-doped fiber, T-YDF)放大器直接产生超连续谱,实验结构如图 2 所示<sup>[21]</sup>。自制的 T-YDF 输入和输出端的纤芯/包层直径分别约为 20/400  $\mu\text{m}$  和 30/600  $\mu\text{m}$ ,光纤长度为 20 m。在 7.5 MHz 的泵浦重复频率下,实现了 1 066 W 输出功率,光谱范围为 1 000 ~ 1 650 nm;最大输出功率下的光束质量测试表明,得益于长锥形光纤的使用,系统在 1 000 nm、1 064 nm 和 1 100 nm 三个波段均保持良好的光束质量,光束质量因子( $M^2$  因子)约为 2。尽管该工作验证了锥形光纤在改善光束质量上的潜力,但其光谱成分主要集中在近红外波段(1 000 ~ 1 650 nm),且光束质量仍有进一步提升空间。

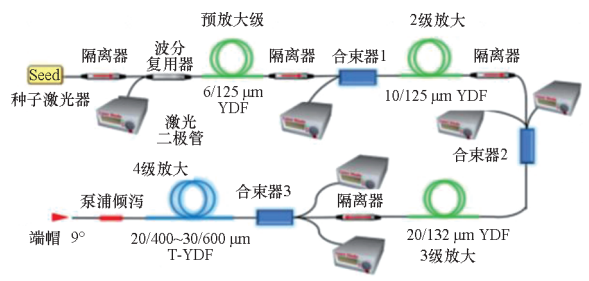


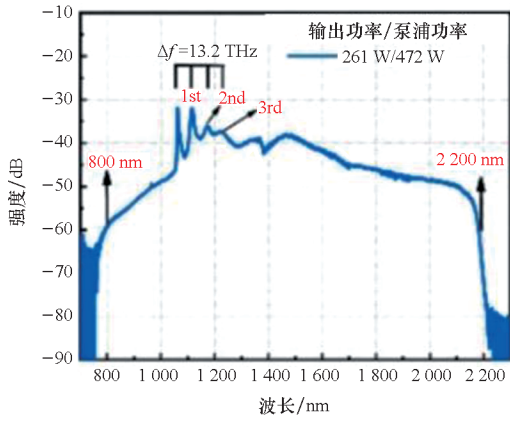
图 2 输出功率 1 066 W 的放大器超连续谱实验结构<sup>[21]</sup>

Fig. 2 Experimental setup of an amplifier-based supercontinuum source with an output power of 1 066 W<sup>[21]</sup>

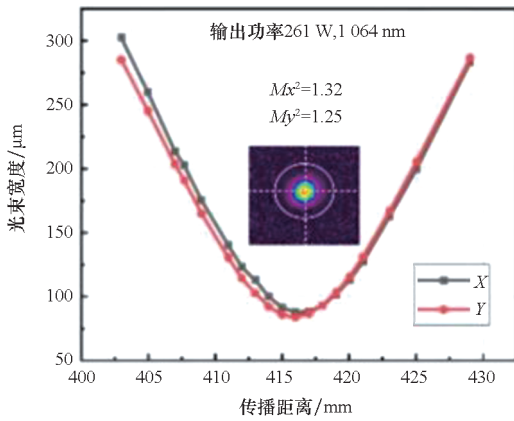
2025 年,本文课题组提出了一种混合架构<sup>[54]</sup>,在文献[21]的实验结构上,在 T-YDF 输出端熔接一段多模无源双包层长锥形光纤(multimode double-clad taper passive fiber, MM-DTF),光纤一端纤芯/包层直径为 30/600  $\mu\text{m}$ ,与 T-YDF 输出端匹配,另一端纤芯/包层直径为 20/400  $\mu\text{m}$ ,作为输出。通过优化盘绕直径(11 cm)、降低种子重复频率(5 MHz)来增强非线性效应与模式净化,最终在 261 W 输出功率下,光谱拓展至 800 ~ 2 200 nm,如图 3(a)所示。图 3(b)给出了 261 W 功率下光束质量的测试结果,在 1 064 nm 处的  $M^2$  约为 1.29。这些进展表明,通过光纤几何设计与系统参数协同优化,可在高功率下同步实现宽光谱与近衍射极限光束质量。

1.1.2 基于随机光纤激光器结构的高功率超连续谱研究进展

随机光纤激光器利用光纤中的瑞利散射提供



(a) 输出光谱  
(a) Output spectrum



(b) 光束质量测试  
(b) Beam quality measurement

图3 混合架构的261 W超连续谱产生<sup>[54]</sup>

Fig. 3 261 W supercontinuum generation using a hybrid architecture<sup>[54]</sup>

分布式的随机反馈,当反馈增益大于损耗时,可以实现激光振荡输出<sup>[55]</sup>。瑞利散射能够提供宽带

的反馈,使其能够产生超连续谱。为了获得足够的反馈增益,系统需要使用长无源光纤,SPM、XPM、SRS等非线性效应得以有效激发,实现光谱展宽。与1.1.1节基于MOPA结构产生超连续谱不同,基于随机光纤激光器结构可以使用连续光泵浦,避免了脉冲泵浦的高峰值功率对光纤毁伤,这使得随机光纤激光在产生高功率超连续谱上具有显著的优势<sup>[56]</sup>。

2018年,电子科技大学饶云江团队<sup>[57]</sup>首次报道了基于随机光纤激光器结构输出超连续谱,验证了基于随机激光器产生超连续谱的能力。后续许多研究者在功率提升上开展了工作。2020年,印度纳米科学研究所 Arun等<sup>[58]</sup>提出基于拉曼散射的双波长泵浦结构,获得了输出功率70 W、光谱范围850~1900 nm的超连续谱。2022年,上海光学精密机械研究所冯衍团队<sup>[59]</sup>采用掺镱光纤放大器对种子激光进行功率放大,将泵浦源的功率提升到了300 W,最终获得了输出平均功率134 W、光谱范围852~2055 nm的超连续谱输出。

2022年,清华大学的肖起榕团队提出了多波长泵浦的全开腔随机光纤激光器结构<sup>[24]</sup>,实验结构如图4所示。将放大后的拉曼光纤激光振荡器和掺镱光纤激光振荡器的双波长泵浦光同时注入415 m的46/400 μm双包层掺锗光纤(germanium doped fiber, GDF)中,在全开腔拉曼光纤振荡器中实现了平均功率3 kW、20 dB光谱带宽为1094~1668 nm的超连续谱输出,这一报道充分体现了随机光纤激光器在产生高功率超连续谱上的巨大能力,但是功率的进一步提升受限于指数增长的反向输出功率。

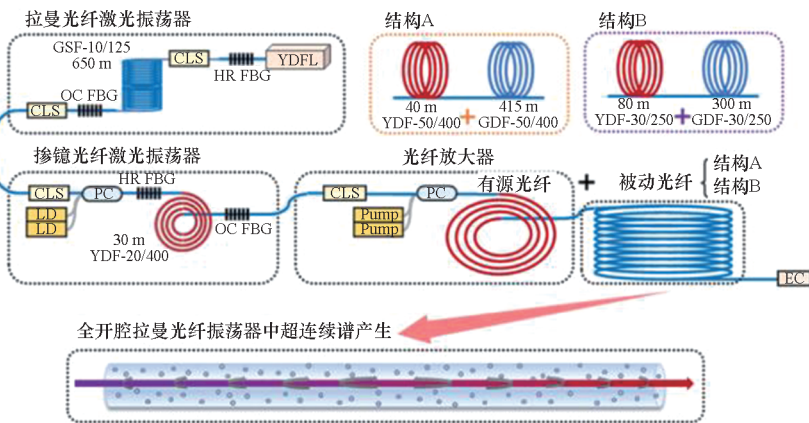


图4 全开腔随机光纤激光器产生3000 W超连续谱实验装置图<sup>[24]</sup>

Fig. 4 Experimental setup of a 3000 W supercontinuum generation based on full-open cavity random fiber laser<sup>[24]</sup>

2023年,本文课题组提出了基于单级振荡器结构的半开腔随机光纤激光器产生高功率超连续谱<sup>[22]</sup>。在泵浦功率为1847 W时,实现

1300 W平均功率,20 dB光谱带宽为1035~1796 nm,光-光的转换效率达66%。该转换效率是目前报道的随机光纤激光器输出超连续

谱中的最高水平。同时激光器只有单级振荡器,结构简单,反馈器件的存在进一步增强了时域稳定性。

### 1.1.3 产生方案对比

综上所述,当前可见光至近红外波段的高功率超连续谱产生主要基于 MOPA 结构与随机光纤激光器结构,表 1 总结了不同方案在输出功率、光谱带宽、光束质量等方面的结果,各类方案都各具优势,但也面临不同的技术挑战。

基于 MOPA 结构的方案通过不同的非线性

性介质,可实现从紫外到近红外的超宽带输出;其中,PCF 在短波拓展(可至 390 nm)方面表现突出,但受限于模场失配与小纤芯,功率进一步提升受限;GRIN MMF 得益于克尔自清洁效应和 GPI,实现了 204 W 的输出功率、近高斯光束输出和短波拓展,具有高亮度应用潜力;基于掺镱光纤直接展宽的 MOPA 方案则在高功率输出上更有优势,已实现 1 066 W 的高功率输出,但其光谱范围偏窄,难以实现短波拓展。

表 1 可见光至近红外高功率超连续谱产生方案对比

Tab.1 Comparison of high-power supercontinuum generation schemes from visible to near-infrared

方案类型		输出功率/W	光谱带宽/nm	光束质量	优势	主要挑战
基于 MOPA 结构	PCF	314.7 <sup>[42]</sup>	390 ~ 2 400		短波拓展强	高功率受限
	GRIN MMF	204 <sup>[50]</sup>	580 ~ 2 400	近高斯光束	光束质量高	高峰值泵浦
	T-YDF	1 066 <sup>[21]</sup>	1 000 ~ 1 650	$M^2 \approx 2$	功率高	短波拓展受限
	MM-DTF	261 <sup>[54]</sup>	800 ~ 2 200	$M^2 \approx 1.29$	光束质量高	高峰值泵浦
基于随机光纤激光器结构		1 300 <sup>[22]</sup>	1 035 ~ 1 796			
	GDF	(半开腔)	(半开腔)		功率高	短波拓展受限
		3 000 <sup>[24]</sup>	925 ~ 1 862			
	(全开腔)	(全开腔)				

值得注意的是,随着 GRIN MMF、长拉锥光纤等具有时空非线性效应的新型光纤的发展,MOPA 技术的发展逐渐转向“高功率-高光束质量-宽带光谱”的协同优化。目前,基于这两种光纤均已实现 200 W 量级、近高斯光束的超连续谱输出,其中文献[54]报道了在 1 064 nm 处  $M^2 \approx 1.29$  的高光束质量超连续谱。这为实现高亮度超连续谱光源提供了切实可行的技术路径。尽管当前输出功率距离千瓦量级仍有差距,但 GRIN MMF 和长拉锥光纤均属于少模或者多模光纤,其功率提升能力还未达到物理极限。未来通过优化泵浦参数、盘绕直径、热管理方式以及光纤结构设计等,有望在维持  $M^2 \leq 1.3$  的同时,进一步提升输出功率,甚至是实现千瓦级功率的目标。

相比之下,随机光纤激光器方案采用连续光泵浦避免了高峰值功率带来的非线性损伤,且结构简单,已实现 1.3 kW(半开腔)乃至 3 kW(全开腔)的超高功率输出,展现出卓越的功率扩展潜力。然而,该方案普遍可见光谱成分不足,短波拓展受限。

## 1.2 中红外波段高功率超连续谱

中红外波段一般指波长在 2 ~ 20  $\mu\text{m}$  的电磁

波。石英光纤的声子能量高,传输中红外波段的光损耗非常大,不能作为中红外的传输介质。图 5 给出了常见光纤材料成纤后在长波边界典型的损耗谱。硝酸盐光纤、ZBLAN ( $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$ ) 光纤的低损耗传输边界大约为 4  $\mu\text{m}$ , 氟化铟 ( $\text{InF}_3$ ) 光纤的传输边界约为 5  $\mu\text{m}$ , 硫系光纤的传输边界可达 6  $\mu\text{m}$  及以上,  $\text{As}_2\text{Se}_3$  光纤的传输边界最长,可以达到 8  $\mu\text{m}$ 。

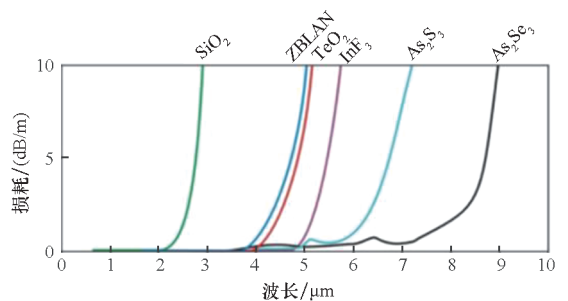


图 5 常见光纤材料成纤后在长波边界典型的损耗谱<sup>[60]</sup>

Fig.5 Typical attenuation spectra at the long-wavelength edge for common fiber materials after being fabricated into fibers<sup>[60]</sup>

选择合适的中红外光纤用于产生高功率超连续谱,除了需要考虑光纤传输中红外波段光的损

耗,还需要考虑光纤的理化性质和非线性特性。表2给出了上述几种光纤的理化特性和非线性的特征参数<sup>[61]</sup>。

从表2可以看出,硫系光纤的非线性折射率要比碲酸盐光纤、氟化物光纤高出1~2个数量级,同时传光边界也是最长的,但硫系光纤的转变温度

(约为180℃)和自聚焦阈值非常低,在高平均功率和高峰值功率泵浦下,容易发生损伤,这极大限制了其在高功率中红外超连续谱产生上的能力。目前基于硫系光纤的中红外超连续谱激光的最高功率仅为1.13 W<sup>[62]</sup>,硫系光纤主要适用于实验级的中红外长波拓展研究,这一点将在第2节中进行介绍。

表2 常见光纤典型的理化参数<sup>[61]</sup>

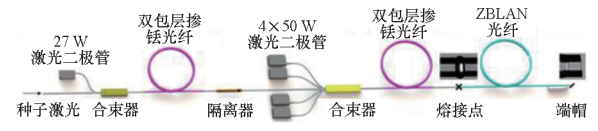
Tab.2 Typical physicochemical parameters of common optical fibers<sup>[61]</sup>

光纤	非线性折射率/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$ )	玻璃的零色散 波长/ $\mu\text{m}$	折射率	自聚焦阈值 @ 2 $\mu\text{m}/\text{MW}$	转变温度/ $^{\circ}\text{C}$
石英	$2.6 \times 10^{-20}$	1.26	1.45	15.1	1 000
碲酸盐	$19 \times 10^{-20}$	2.13	约为2	0.57	300
氟化物	ZBLAN	$3.3 \times 10^{-20}$	1.48 ~ 1.53	12	260
	$\text{InF}_3$		1.47 ~ 1.53	12	300
硫系	$\text{As}_2\text{S}_3$	$300 \times 10^{-20}$	2.415	0.08	185
	$\text{As}_2\text{Se}_3$	$1\,500 \times 10^{-20}$	2.836	0.03	178

氟化物光纤的非线性折射率是三种中红外光纤中最小的,但是氟化物光纤(ZBLAN、 $\text{InF}_3$  光纤)商用产品已经较为成熟,同时氟化物光纤的折射率约为1.5,接近石英光纤折射率,可以进行石英-氟化物光纤的低损耗熔接,有利于实现全光纤的高功率中红外超连续谱。

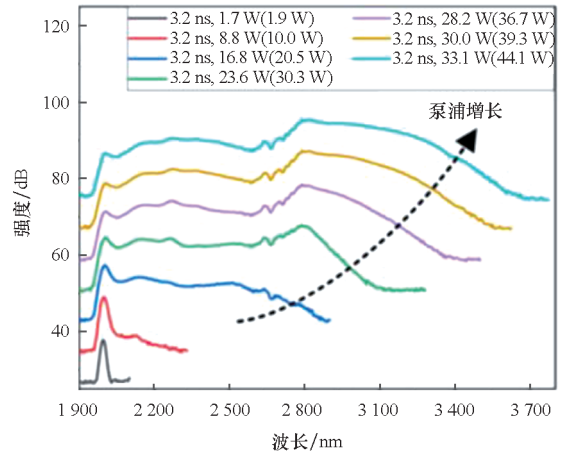
2014年,北京工业大学刘昆等<sup>[63]</sup>报道了在单模ZBLAN光纤中产生的平均功率21.8 W、光谱范围1.9~3.8  $\mu\text{m}$ 的超连续谱,是当时的最高水平。2015年,该课题组首次将类噪声脉冲用于中红外超连续谱产生<sup>[64]</sup>,低重频2  $\mu\text{m}$ 类噪声脉冲放大后泵浦ZBLAN光纤,最大输出功率为14.3 W,光谱范围为1.9~3.62  $\mu\text{m}$ 。2019年,本文课题组首次报道了波长覆盖3  $\mu\text{m}$ 以上的30 W中红外超连续谱激光<sup>[25]</sup>,光谱宽度覆盖1.9~3.35  $\mu\text{m}$ 。2020年,本文课题组进一步优化ZBLAN光纤参数<sup>[65]</sup>,实现了长波边界拓展至4  $\mu\text{m}$ 以上、平均功率20.6 W、光谱覆盖范围1.92~4.92  $\mu\text{m}$ 的中红外超连续谱。2023年,本文课题组采用低重频2  $\mu\text{m}$ 类噪声脉冲种子<sup>[27]</sup>,经过MOPA结构放大后泵浦ZBLAN光纤,实现了平均功率33.1 W、光谱范围1.9~3.68  $\mu\text{m}$ 的超连续谱,转换效率为75.06%(实验结构和光谱见图6)。

$\text{InF}_3$  光纤对比ZBLAN光纤,前者有更优异的长波透射性能和更高的物理稳定性,是兼具高功率输出和波长拓展的关键介质。2018年,加拿大国防研究中心的Théberge等<sup>[66]</sup>报道了平均功率



(a) 实验装置

(a) Experimental setup



(b) 输出光谱

(b) Output spectrum

图6 类噪声脉冲泵浦的平均功率33.1 W的超连续谱产生<sup>[27]</sup>

Fig. 6 Supercontinuum generation pumped by noise-like pulses with an average power of 33.1 W<sup>[27]</sup>

1 W、波长覆盖范围1~5  $\mu\text{m}$ 的 $\text{InF}_3$ 光纤超连续谱。2020年,本文课题组<sup>[67]</sup>进一步提升其功率,报道了11.8 W、光谱覆盖1.9~4.9  $\mu\text{m}$ 的 $\text{InF}_3$ 光纤超连续谱。2022年,深圳大学郭春雨团队<sup>[68]</sup>

采用低重频 2 μm 类噪声脉冲泵浦 InF<sub>3</sub> 光纤,实现了输出功率 1.45 W、波长范围 1.5 ~ 4.1 μm 的超连续谱。

相比氟化物光纤,碲酸盐光纤目前没有商用的产品,但其非线性折射率比氟化物光纤高大约一个数量级,碲酸盐光纤的研制及其在中红外非线性频率变换中的应用是当前的热点<sup>[28-29]</sup>。

2023 年吉林大学焦亚东等<sup>[30]</sup>首次报道了 50 W 量级中红外超连续谱激光,这也是目前中红外超连续谱的最高输出功率纪录。产生超连续谱的非线性介质是吉林大学自行拉制的氟碲酸盐光纤,纤芯和包层材料分别为 70TeO<sub>2</sub>-20BaF<sub>2</sub>-10Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (70TBY) 和 65TeO<sub>2</sub>-25BaF<sub>2</sub>-10Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (65TBY),纤芯直径为 14 μm,包层直径为 220 μm,零色散波长位于 1 994 nm。图 7(a)是实验的装置图,2 μm 拉曼孤子经过掺铥光纤放大器(thulium-doped fiber amplifier, TDFA)放大后泵浦 48 cm 长的氟碲酸盐光纤。图 7(b)给出了输出功率与 TDFA 泵浦功率的关系,当 TDFA 的最大泵浦功率为 73.35 W 时,获得了最大的输出功率 50.22 W,20 dB 带宽为 1 404 ~ 3 228 nm。由于采用了较短的非线性光纤(仅 48 cm)以降低传输损耗,非线性效应积累不足,长波展宽受限,因此其长波边界较此前 30 W 量级的超连续谱更短。

2025 年,北京工业大学李平雪团队<sup>[28]</sup>采用拉锥技术对大模场 TBY 光纤进行设计,增大非线性性的同时优化光纤色散曲线,这种设计促进了拉曼孤子的“接力裂变”和快速频移,极大拓宽了光谱展宽,最高平均功率可达 10.5 W,此时光谱长波边界达到了 5.1 μm,10 dB 带宽的长波边界为 4.64 μm。这一工作为 4 ~ 5 μm 波段的波长拓展和功率提升提供了重要参考。

综合上述报道,氟化物光纤已经实现 30 W 量级的平均功率,但是氟化物光纤容易潮解的特性,使得基于氟化物光纤的高功率超连续谱的系统长期稳定性受限。相比之下,碲酸盐光纤的抗潮解能力更强、转变温度更高,是极具潜力的中红外超连续谱产生介质,已经实现了 50 W 量级的超连续谱输出。同时,基于 TBY 的中红外超连续谱的长波占比较少、光谱平坦度不够,可以通过拉锥的方式来优化非线性动力学过程,拓展光谱平坦度和光谱范围。

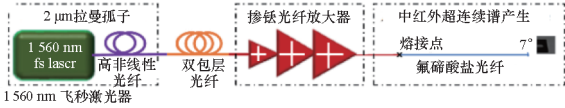
### 2 超连续谱的长波拓展

在中红外波段,3 ~ 5 μm 和 8 ~ 12 μm 波段是两个重要的大气传输窗口,众多官能团在这两个波段有吸收,形成了“分子指纹区”。然而,在中红外光纤材料中,仅硫系光纤能够低损耗传输 5 μm 以上的光波,因而成为中红外长波拓展研究的主流选择<sup>[69]</sup>。

目前,有阶跃折射率的 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 光纤和 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 光纤已经实现了商用化(如 art photonics、IRflex 公司),基于这两种光纤产生的超连续谱长波边界分别可达 13 μm 和 15.5 μm<sup>[70-71]</sup>。然而,受限于较低的激光损伤阈值,其端面在高峰值功率泵浦下易发生损伤,系统的长期可靠性难以保证。

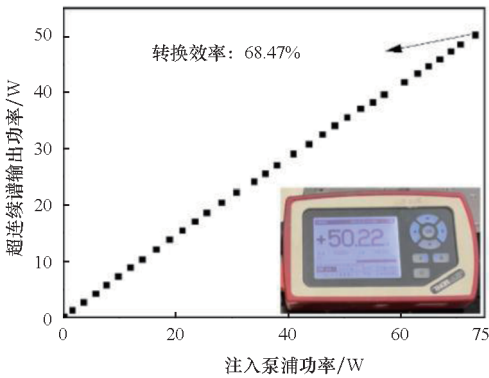
为了提升光纤的激光损伤阈值,使其能够承受更高峰值功率的泵浦光,从而促进光谱展宽并增强系统长期运行的稳定性,调控硫系玻璃材料的组分是一种关键策略。研究表明,在不同基质的硫系玻璃中引入锗(Ge)元素可显著强化其网络结构,形成更稳定的连接,进而提高材料的激光损伤阈值。例如,宁波大学戴世勋课题组系统研究了在硒(Se)基和碲(Te)基硫系玻璃中掺杂锗的影响,证实该策略在两类体系中均能有效提升损伤阈值<sup>[72-74]</sup>。此外,江苏师范大学杨志勇课题组于 2021 年报道了一种具有高激光损伤阈值的掺锗硫(S)基玻璃<sup>[75]</sup>。

基于上述的研究,研究人员进一步聚焦于低损耗掺锗硫系玻璃的研究,旨在降低长波的多声



(a) 实验装置

(a) Experimental setup



(b) 输出功率随着泵浦功率的变化

(b) Output power varies with pump power

图 7 基于氟碲酸盐光纤的平均功率 50.22 W 的超连续谱产生<sup>[30]</sup>

Fig. 7 Generation of supercontinuum based on fluorotellurite fiber with an average output power of 50.22 W<sup>[30]</sup>

子吸收损耗,从而为实现更宽光谱、更高功率的超连续谱输出提供材料支撑。2020年,宁波大学王训四课题组<sup>[76]</sup>提出了双层剥离式挤出工艺,制备了低损耗 Ge-As-Se 玻璃和光纤,光纤的损耗普遍低于 1 dB/m,在 6.3 μm 处损耗最低,仅为 0.2 dB/m。利用制备的光纤,实现了 1.4 ~ 13.7 μm 的平坦中红外超连续谱,10 dB 带宽为 3.3 ~ 12.2 μm。2021年,勃艮第大学的 Lemière 等<sup>[18]</sup>制备了 Ge-Se-Te 阶跃折射率光纤,形成预制棒前的多次提纯,有效地减少了氢键和氧键的非本征吸收损耗。采用波长 8.15 μm、峰值功率 200 kW 的激光泵浦 44 mm 的光纤,实现了 1.7 ~ 18 μm 的输出,是目前硫系光纤最宽的超连续谱光谱范围。2024年,宁波大学戴世勋课题组<sup>[77]</sup>提出在多级动态蒸馏工艺中引入微米级过滤器,去除金属杂质颗粒,制备了低损耗 AsSe/GeAsSe 光纤,在 10.6 μm 波长下,该光纤可承受 7.2 W 的入射 CO<sub>2</sub> 激光功率,输出功率密度高达 (2.33 ± 0.02) kW/cm<sup>2</sup>。2025年,俄罗斯科学院 Velmuzhov 等<sup>[78]</sup>研究了 (GeTe<sub>y</sub>)<sub>100-x</sub>(AgI)<sub>x</sub> 玻璃体系,在 10.6 μm 处实现了 (0.79 ± 0.04) dB/m 的损耗,这是基于全反射工作原理的光纤在该波长处的最低损耗。

限制超连续谱长波拓展的因素,一个是光纤材料的性能,另一个是泵浦波长与光纤零色散点的不匹配,在零色散波长 (zero-dispersion wavelength, ZDW) 附近泵浦才能得到最大的光谱展宽,但是硫系阶跃光纤的零色散点一般大于 5 μm。为了实现有效的光谱展宽,研究人员提出了氟化物-硫系光纤级联泵浦的方式,氟化物光纤先将泵浦激光的波长拓展到 4 ~ 5 μm,再将输出耦合到硫系光纤中,进一步实现波长拓展。2020年,本文课题组报道了 InF<sub>3</sub> 级联 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 光纤<sup>[79]</sup>,实现了 2.3 ~ 9.5 μm 的超连续谱,这是级联方案的最宽光谱。2021年,宁波大学严斌等<sup>[80]</sup>采用 ZBLAN 级联 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 光纤,在 2 μm 泵浦下实现了平均功率大于 1 W、光谱覆盖 2 ~ 6.5 μm 的超连续谱输出。

除了级联泵浦,另一种方案是通过微结构或者拉锥的方式,改变 ZDW 位置,使其向短波方向移动。2018年,宁波大学王训四课题组<sup>[81]</sup>首次采用复合挤压法制备了四孔结构的碲基悬浮芯光纤,ZDW 为 4.9 μm,采用 5 μm 光学参量放大器 (optical parametric amplifier, OPA) 泵浦获得光谱覆盖范围 1.7 ~ 11.3 μm 的超连续谱。2020年,孟加拉国陆军科技大学的 Islam 等<sup>[82]</sup>首次报道了

以 AsSe<sub>2</sub> 为背景材料设计三孔悬芯光纤,纤芯的三个连接处用氯仿 (CHCl<sub>3</sub>) 填充,光纤 ZDW 为 2.5 μm,采用泵浦波长 2.64 μm、脉冲宽度 50 fs、峰值功率 10 kW 的光源泵浦,产生了 1 ~ 14 μm 的超连续谱,这是在硫系悬芯光纤中获得的最宽光谱。相比之下,光纤拉锥对色散的调控不需要设计复杂的光纤结构,更容易实现。2019年日本丰田技术研究所 Sain 等<sup>[83]</sup>将 AsSe<sub>2</sub>/As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 阶跃光纤的纤芯直径从 15 μm 拉锥到 3 μm,ZDW 从 5.19 μm 减小到了 3.02 μm。采用波长 3.5 μm、脉宽 200 fs 的激光泵浦 4 cm 长的锥形光纤,输出光谱范围为 1.5 ~ 14.5 μm。该报道体现了拉锥对色散的有效调控。但拉锥的过程容易造成光纤的损伤,同时拉锥区域的机械强度也会降低。

综上所述,超连续谱的长波拓展是基于硫系光纤开展的,材料的优化围绕提高损伤阈值、降低光纤损耗展开,这对于超连续谱的波长拓展、传输以及稳定性提升非常重要;氟化物硫系光纤级联方案、微结构光纤和拉锥光纤方案,则提供了灵活的色散调控能力,使用更短波长泵浦、更简单光源泵浦产生宽带超连续谱成为可能。上述的方案,已经能够实现波长边界达 10 μm 及以上的超连续谱输出。

### 3 超连续谱的低噪声研究

超连续谱凭借其独特的宽谱特性,在光频梳、生物医学光子学等领域展现出重要的应用前景。然而在光学相干层析成像<sup>[17]</sup>、非线性脉冲压缩<sup>[1,84]</sup>等噪声敏感的应用中,基于光纤的超连续谱产生受限于噪声特性,难以满足实际需求。

在超连续谱光源中,主要采用 RIN 作为核心的评价指标。RIN 是指光脉冲序列平均功率在一定时间跨度内的波动,表征了光脉冲序列平均功率的稳定性,定义为:

$$RIN = \frac{\langle \Delta P(t)^2 \rangle_T}{\langle P(t) \rangle_T^2} \quad (1)$$

式中,  $\langle \Delta P(t)^2 \rangle_T$  和  $\langle P(t) \rangle_T$  分别表示在测量时间  $T$  内光功率均方波动和脉冲序列的平均光功率。RIN 在频域上用功率谱密度 (power spectral density, PSD) 表示, PSD 表示每 Hz 带宽内的噪声功率,单位是 dB/Hz;将 PSD 在频域范围内积分(一般为 1 kHz ~ 1 MHz)再开方,得到积分均方根 RIN,通常用百分比表示,以量化总强度波动水平<sup>[85]</sup>。

超连续谱源的噪声主要来源于泵浦噪声、非线性效应引起的噪声放大以及量子极限下的散粒噪声,其中散粒噪声代表了系统理论上的噪声极

限。由于超连续谱的产生依赖于强非线性过程,泵浦脉冲中强度噪声会在光谱展宽过程中被显著放大,因此,低噪声泵浦源是实现低噪声超连续谱的前提。目前,飞秒锁模激光器因其本征 RIN 极低(通常 $\leq 0.1\%$ )而成为主流泵浦选择<sup>[85]</sup>。在此基础上,低噪声超连续谱产生的典型方案是飞秒脉冲泵浦全正色散<sup>[1]</sup>(all-normal-dispersion, ANDi)光纤。在 ANDi 光纤中,光谱展宽主要由相干的 SPM 和 OWB 主导,由噪声引发的 MI 及其导致的孤子分裂和 SSFS 等过程被抑制,避免了对泵浦源噪声的进一步放大,尽管如此,FWM 和 SRS 带来的噪声仍然无法通过正常色散区的选择来避免。因此,低噪声超连续谱光源的噪声极限通常受限于泵浦源噪声和散粒噪声,通过优化非线性动力学路径和光纤参数,可使光谱展宽由相干的 SPM 和 OWB 过程主导,从而将输出超连续谱的 RIN 降至接近泵浦源的噪声水平。

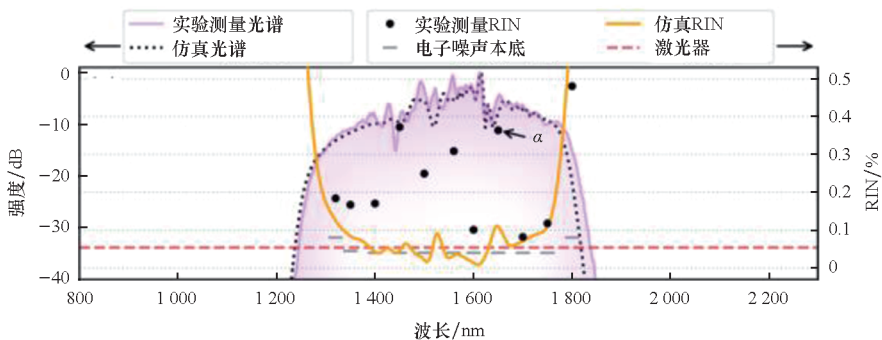
2017 年伯尔尼大学的 Heidt 等<sup>[86]</sup>发现飞秒脉冲泵浦 ANDi 光纤时,FWM/SRS 的耦合过程会导致噪声放大增益的饱和,从而抑制噪声的进一步放大,提升相干性。同时还指出,FWM/SRS 的耦合强度与光纤色散的大小相关,选用色散低且色散曲线平坦的光纤,将有利于宽带高相干超连续谱的产生。除此之外,一些研究还发现 ANDi 光纤对于抵抗泵浦源强度波动带来的噪声有着良好的表现<sup>[87]</sup>。

要想进一步实现低噪声超连续谱,需要额外考虑偏振调制不稳定性(polarization modulation instability, PMI)的作用,PMI 具有矢量性质,在光纤的正常和反常色散区均可以产生<sup>[13]</sup>。2020 年 Heidt 等提出了 2  $\mu\text{m}$  超连续谱全光纤放大器实验结构<sup>[88]</sup>,实验中发现噪声的测量结果严重依赖于泵浦光的偏振态。为了抑制 PMI,将实验系统中的光纤全部替换为保偏光纤,并将泵浦激光的偏振态对准保偏 ANDi 的主轴方向,得到了与泵浦脉冲接

近的 RIN,验证了保偏光纤对于 PMI 的抑制作用。

2022 年,Heidt 课题组提出了高阶孤子压缩级联 OWB 的全保偏近红外低噪声 SC<sup>[89]</sup>,实验采用 90 fs、40 MHz 的 1 560 nm 超短脉冲泵浦待测光纤,待测光纤是 PM1550-XP 光纤熔接了 PM2000D 光纤的混合光纤,两款光纤均为保偏光纤。1 560nm 的泵浦波长位于 PM1550-XP 的反常色散区,而 PM2000D 在整个 1~2  $\mu\text{m}$  波段均位于正常色散区。超短脉冲首先被泵浦到长度为 6.2 cm 的 PM1550-XP,在 SPM 和负色散的作用下高阶孤子被压缩到 15.9 fs,脉冲再入射到正常色散的 PM2000D 光纤中产生超连续谱。压缩后的脉冲宽度变窄,峰值功率提升,OWB 过程的特征作用长度从 1.7 cm 减小到 0.1 cm,而 PMI 和 SRS 等过程的特征长度远大于 0.1 cm,使用短的 PM2000D,PMI 和 SRS 等过程被抑制。图 8(a)和图 8(b)分别是直接泵浦 PM2000D 光纤和泵浦混合光纤的光谱和 RIN 测量结果。泵浦混合光纤后获得了显著的光谱展宽,同时还能保持接近泵浦源的 RIN 值。结果表明了级联高阶孤子压缩和 OWB 的优势,同时该方法具有普适性,可拓展到其他波段的超连续谱产生中。

上面介绍的低噪声的超连续谱产生均是在正常色散泵浦实现光谱展宽。2023 年丹麦技术大学的 Bang 的课题组<sup>[90]</sup>,提出了一种在反常色散区泵浦产生超连续谱的噪声抑制机制。将反常色散光纤输出的孤子群耦合到一段正常色散光纤中,在正常色散光纤中单个孤子光谱展宽,孤子群光谱发生重叠,从而有效降低噪声。这一想法在中红外超连续谱的产生中进行了研究与验证<sup>[90]</sup>,实验结构如图 9(a)所示。泵浦源的波长大于 2 000 nm,脉冲宽度为 500 ps,脉冲耦合到 ZBLAN 光纤,在 MI 和 SSFS 的作用下波长向长波拓展。然后将 ZBLAN 光纤的输出耦合到正常色散的 As-S 光纤(ZDW @ 6.17  $\mu\text{m}$ )中。图 9(b)仿真



(a) 直接泵浦 PM2000D 光纤

(a) Direct pumping of PM2000D fiber

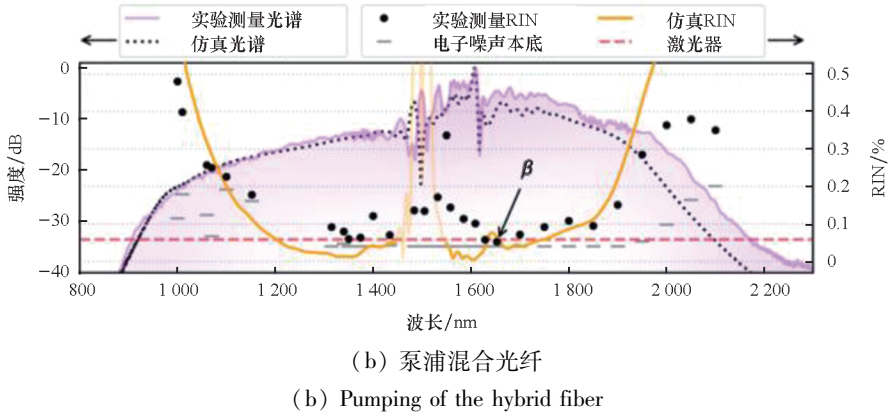
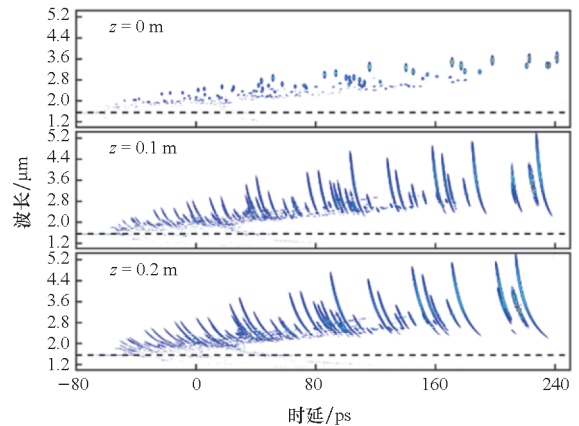


图 8 光谱和 RIN 测试结果<sup>[89]</sup>

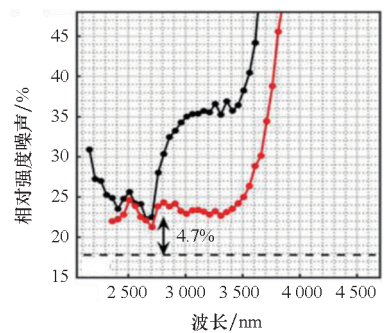
Fig. 8 Spectral and RIN measurement results<sup>[89]</sup>

了 As-S 光纤中的动力学过程,可以看到,ZBLAN 输出耦合到 As-S 光纤中的是孤子群,单个孤子的光谱宽度窄,孤子间光谱重叠少,在 As-S 光纤中传播 0.1 m 后,单个孤子光谱展宽,孤子间光谱有较大重叠,起到了对噪声的平均作用,继续传播至 0.2 m,光谱变化较小,说明平均作用主要发生在前 0.1 m。图 9(c)展示了实验测量的相对强度噪声,黑色和红色曲线分别为仅使用 ZBLAN 光纤时和级联 As-S 光纤后的噪声水平。对比可见,级联 As-S 光纤后,2 800 nm ~ 3 500 nm 波段内的噪声水平明显低于仅有 ZBLAN 光纤,尽管在更长波段,光谱功率密度下降导致噪声有所提高,但是级联 As-S 光纤仍然能维持更低的噪声水平。

综上所述,目前对低噪声的超连续谱激光的研究,从飞秒脉冲泵浦全正色散光纤的技术路线不断发展。在光纤类型全面和光纤控制技术成熟的近红外波段,基于保偏光纤的超连续谱激光在噪声特性上优于非保偏光纤,通过进一步级联高阶孤子压缩和光波破碎的非线性过程,可以将噪声特性提升到接近飞秒脉冲泵浦源的噪声特性。除了正常色散区泵浦,研究人员也开展了反常色散区泵浦的低噪声超连续谱



(b) ZBLAN 光纤输出耦合到 As-S 光纤中的动力学过程  
(b) Dynamics of the output from the ZBLAN fiber coupled into the As-S fiber

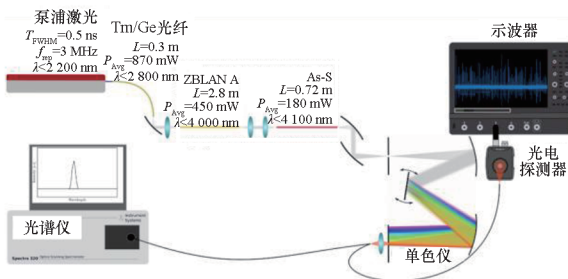


(c) 噪声特性测试  
(c) Noise characterization measurements

图 9 正色散 As-S 光纤对 ZBLAN 超连续谱激光的噪声抑制<sup>[90]</sup>

Fig. 9 Noise suppression of ZBLAN-based supercontinuum laser using normal dispersion As-S fiber<sup>[90]</sup>

研究,发现在超连续谱输出前将其耦合到一小段正常色散光纤中,孤子群光谱展宽带来的光谱重叠可以极大地降低噪声水平,并在中红外超连续谱产生中进行了验证。



(a) 实验装置  
(a) Experimental setup

## 4 总结与展望

近年来,基于光纤的超连续谱激光研究取得了很大的进展,其在功率、谱宽、噪声等核心指标上的突破,极大地拓展了其在精密测量、生物医学成像、光谱学和工业加工等领域的应用前景。

在功率提升方面,对于可见光至近红外波段的超连续谱激光,基于 MOPA 结构的超连续谱已经能够实现百瓦至千瓦量级的输出功率,基于随机光纤激光器结构更是实现了 3 kW 的输出功率;GRIN MMF 和长锥形光纤具有特殊的时空非线性效应,可以兼具高功率和高光束质量,已经实现了 200 W 量级的输出功率,同时有着良好的光束质量。随着进一步优化光纤的参数以及泵浦源,相信有望实现更高的输出功率、更好的光束质量。对于中红外超连续谱光纤激光,虽然受限于光纤材料本身,目前公开报道的中红外超连续谱功率在 30 ~ 50 W,但相信随着泵浦参数以及光纤组分的进一步优化,有望实现近百瓦量级的中红外超连续谱。

在长波拓展方面,研究重点已从传统的石英光纤转向具有更宽透明窗口的特种材料。硫系光纤因其中远红外的优异透过性,成为研究热点。通过优化光纤材料、改进拉制工艺以及对光纤的特殊结构设计,已经能够实现波长大于 10  $\mu\text{m}$  的光纤超连续谱,长波边界最长已经拓展到 18  $\mu\text{m}$ ,为实现整个“分子指纹区”覆盖的超连续谱奠定了基础。

在低噪声方面,基于负色散光纤级联正色散光纤的方案被提出。但是由于泵浦条件的不同以及光纤中主导的非线性效应不同,对噪声抑制的原理并不一样,分别实现了时域上单个脉冲和孤子群脉冲的噪声抑制。

这些研究成果为光纤超连续谱朝着更高功率、更宽光谱以及更低噪声持续发展奠定了重要基础。要实现进一步突破,第一是需要不断推动光纤材料的创新,开发和拉制具备高非线性系数、低传输损耗、理化性质优良的光纤<sup>[29]</sup>,这对提升超连续谱功率、提升光束质量、拓展光谱范围具有重要意义。第二是发展先进的光纤处理工艺,特别是针对中红外软玻璃光纤,需突破石英与软玻璃光纤的非对称熔接、光纤的精准拉锥等工艺<sup>[28,91]</sup>。这些工艺是实现全光纤化集成、提升系统长期稳定性的核心保障。第三是推动非线性理论研究学习与机器学习等深度融合<sup>[92-93]</sup>,实现对光谱形状、宽度、平坦度的精确预测与自主优化,从而

使按需定制的“智能”宽谱光源,灵活适配光学相干层析成像、光谱成像等多样化应用场景,甚至利用光纤的非线性过程进行光计算<sup>[11]</sup>。相信随着以上技术的持续突破与创新,超连续谱有望成为兼具紧凑性、高稳定性、高功能性的宽谱光源,在科学研究、医疗健康、国防安全等领域发挥重要作用。

## 参考文献 (References)

- [1] ALFANO R R. The supercontinuum laser source: the ultimate white light[M]. 3rd ed. New York: Springer, 2016.
- [2] OSTASZEWSKI C J, STUART N M, LESKO D M B, et al. Effects of coadsorbed water on the heterogeneous photochemistry of nitrates adsorbed on TiO<sub>2</sub>[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2018, 122(31): 6360-6371.
- [3] RAMASESHA K, DE MARCO L, MANDAL A, et al. Water vibrations have strongly mixed intra- and intermolecular character[J]. Nature Chemistry, 2013, 5(11): 935-940.
- [4] ZORIN I, GATTINGER P, EBNER A, et al. Advances in mid-infrared spectroscopy enabled by supercontinuum laser sources[J]. Optics Express, 2022, 30(4): 5222-5254.
- [5] JAHROMI K E, PAN Q, HØGSTEDT L, et al. Mid-infrared supercontinuum-based upconversion detection for trace gas sensing[J]. Optics Express, 2019, 27(17): 24469-24480.
- [6] ESLAMI JAHROMI K, NEMATOLLAHI M, PAN Q, et al. Sensitive multi-species trace gas sensor based on a high repetition rate mid-infrared supercontinuum source[J]. Optics Express, 2020, 28(18): 26091-26101.
- [7] JAHROMI K E, NEMATOLLAHI M, KREBBERS R, et al. Fourier transform and grating-based spectroscopy with a mid-infrared supercontinuum source for trace gas detection in fruit quality monitoring[J]. Optics Express, 2021, 29(8): 12381-12397.
- [8] ZHENG T T, HUANG K, SUN B, et al. High-speed mid-infrared single-photon upconversion spectrometer[J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(9): 2300149.
- [9] LABRUYÈRE A, TONELLO A, COUDERC V, et al. Compact supercontinuum sources and their biomedical applications[J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18(5): 375-378.
- [10] SEDDON A B. Potential for using mid-infrared light for non-invasive, early-detection of skin cancers in vivo[C]// Proceedings of Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment, 2013: 85760V.
- [11] ISKANDAR MUDA A M, TEGİN U. Optical computing with supercontinuum generation in photonic crystal fibers[J]. Optics Express, 2025, 33(4): 7852-7861.
- [12] BEKMAN H H P T, VAN DEN HEUVEL J C, VAN PUTTEN F J M, et al. Development of a mid-infrared laser for study of infrared countermeasures techniques[C]// Proceedings of European Symposium on Optics and Photonics for Defence and Security, 2004: 27-38.
- [13] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics[M]. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2001.
- [14] DUDLEY J M, TAYLOR J R. Supercontinuum generation in optical fibers[M]. Cambridge: Cambridge University

- Press, 2010.
- [15] V H, ASHOK N, REDDY S K, et al. Supercontinuum generation: a comprehensive review of experimental and material advances [J]. *Applied Materials Today*, 2025, 45: 102804.
- [16] BARRICK J, DOBLAS A, GARDNER M R, et al. High-speed and high-sensitivity parallel spectral-domain optical coherence tomography using a supercontinuum light source[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5620–5623.
- [17] RAO D S S, JENSEN M, GRÜNER-NIELSEN L, et al. Shot-noise limited, supercontinuum-based optical coherence tomography[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 133.
- [18] LEMIERRE A, BIZOT R, DÉSEVÉDAVY F, et al. 1.7–18  $\mu\text{m}$  mid-infrared supercontinuum generation in a dispersion-engineered step-index chalcogenide fiber [J]. *Results in Physics*, 2021, 26: 104397.
- [19] QU Z, XING H, WANG D W, et al. Study of application and key technology of the high-energy laser weapon in optoelectronic countermeasure [C]//*Proceedings of AOPC 2015: Micro/Nano Optical Manufacturing Technologies; and Laser Processing and Rapid Prototyping Techniques*, 2015: 967307.
- [20] MANNINEN A, KÄÄRIÄINEN T, PARVIAINEN T, et al. Long distance active hyperspectral sensing using high-power near-infrared supercontinuum light source [J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7172–7177.
- [21] DAI J N, HONG Z F, PAN Z Y, et al. Kilowatt-level supercontinuum generation employing a homemade taper-shaped ytterbium-doped fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2024, 49(20): 5929–5932.
- [22] JIANG L, WU J M, SONG R, et al. Kilowatt-level supercontinuum generation in a single-stage random fiber laser with a half-open cavity[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2023, 11: e80.
- [23] QI T C, LI D, WANG Z H, et al. Spectral pedestal during the kilowatt-level amplification of a random fiber laser operating near the lasing threshold [J]. *Optics Express*, 2022, 30(1): 296–307.
- [24] QI T C, YANG Y S, LI D, et al. Kilowatt-level supercontinuum generation in random Raman fiber laser oscillator with full-open cavity [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(21): 7159–7166.
- [25] 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.
- [26] YANG L Y, YANG Y K, ZHANG B, et al. Record power and efficient mid-infrared supercontinuum generation in Germania fiber with high stability [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2022, 10: e36.
- [27] ZHU X R, ZHAO D S, ZHANG B, et al. Spectrally flat mid-infrared supercontinuum pumped by a high power 2  $\mu\text{m}$  noise-like pulse [J]. *Optics Express*, 2023, 31(8): 13182–13194.
- [28] YANG L J, YAO C F, WANG X, et al. Precisely tapered fluorotellurite fiber-enabled Raman soliton relay fission for generating a 4–5  $\mu\text{m}$  mid-infrared high-power laser [J]. *Photonics Research*, 2025, 13(8): 2281–2290.
- [29] WANG J, WANG S B, ZHOU X B, et al. Generation of tunable Raman soliton and dispersive wave beyond 4  $\mu\text{m}$  in centimeter-length fluorotellurite fibers[J]. *Light: Science & Application*, 2025, 14(1): 340.
- [30] JIAO Y D, JIA Z X, ZHANG C Y, et al. Over 50 W all-fiber mid-infrared supercontinuum laser [J]. *Optics Express*, 2023, 31(19): 31082–31091.
- [31] BIAN Y X, JIAO K R, WU X C, et al. Utilizing phase-shifted long-period fiber grating to suppress spectral broadening of a high-power fiber MOPA laser system [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e39.
- [32] MA P F, XIAO H, MENG D R, et al. High power all-fiberized and narrow-bandwidth MOPA system by tandem pumping strategy for thermally induced mode instability suppression[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: e57.
- [33] LI X H, HUANG X W, HU X C, et al. Recent progress on mid-infrared pulsed fiber lasers and the applications [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 158(Part B): 108898.
- [34] HUI Z Q, ZHANG X L, XU W S, et al. 500-nm broadband light generation in highly nonlinear dispersion shifted fiber by soliton laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 157: 108712.
- [35] JIANG L, SONG R, HE J R, et al. 714 W all-fiber supercontinuum generation from an ytterbium-doped fiber amplifier [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 161: 109168.
- [36] DUDLEY J M, TAYLOR J R. Ten years of nonlinear optics in photonic crystal fibre[J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(2): 85–90.
- [37] WANG T X, YU S Z, LIU Z Y, et al. All-fiber ultraflat supercontinuum generation in photonic crystal fibers covering 492.4–2009.8 nm with 3-dB bandwidth[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 189: 113051.
- [38] QI X, CHEN S P, LI Z H, et al. High-power visible-enhanced all-fiber supercontinuum generation in a seven-core photonic crystal fiber pumped at 1016nm[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 1019–1022.
- [39] BI W J, LIU Y Y, LI X, et al. Micro-joule level visible supercontinuum generation in seven-core photonic crystal fibers pumped by a 515 nm laser[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(20): 5041–5044.
- [40] ZHANG Y C, YUAN J H, WANG K R, et al. Cascaded-tapered silica photonic crystal fiber for supercontinuum generation [J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(12): 126107.
- [41] PETERSEN C R, LOTZ M B, WOYESSA G, et al. Nanoimprinting and tapering of chalcogenide photonic crystal fibers for cascaded supercontinuum generation [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5505–5508.
- [42] ZHANG H Y, LI F Y, LIAO R Y, et al. Supercontinuum generation of 314.7 W ranging from 390 to 2400 nm by tapered photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(6): 1429–1432.
- [43] KRUPA K, TONELLO A, BARTHÉLÉMY A, et al. Observation of geometric parametric instability induced by the periodic spatial self-imaging of multimode waves[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(18): 183901.
- [44] KRUPA K, TONELLO A, SHALABY B M, et al. Spatial beam self-cleaning in multimode fibres [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(4): 237–241.

- [45] LOPEZ-GALMICHE G, SANJABI EZNAVEH Z, EFTEKHAR M A, et al. Visible supercontinuum generation in a graded index multimode fiber pumped at 1064 nm[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2553–2556.
- [46] KRUPA K, LOUOT C, COUDERC V, et al. Spatiotemporal characterization of supercontinuum extending from the visible to the mid-infrared in a multimode graded-index optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5785–5788.
- [47] ZHANG T, ZHANG W, HU X H, et al. All fiber structured supercontinuum source based on graded-index multimode fiber[J]. *Laser Physics Letters*, 2022, 19(3): 035101.
- [48] ZHANG H T, ZU J Q, LIU X Z, et al. High power all-fiber supercontinuum system based on graded-index multimode fibers[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(11): 5564.
- [49] ZHANG T, HU X H, PAN R, et al. 30 W all-fiber supercontinuum generation via graded-index multimode fiber pumped by picoseconds laser pulse [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 159: 108943.
- [50] JIANG L, SONG R, HOU J. Hundred-watt level all-fiber visible supercontinuum generation from a graded-index multimode fiber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2023, 21(5): 051403.
- [51] HUANG Z J, GE T W, ZHAO G R, et al. 100.4 W all-fiber visible supercontinuum source based on graded-index multimode fiber[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2025, 17(5): 1502605.
- [52] PIOGER P H, COUDERC V, LEPROUX P, et al. High spectral power density supercontinuum generation in a nonlinear fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2007, 15(18): 11358–11363.
- [53] SONG R, HOU J, CHEN S P, et al. High power supercontinuum generation in a nonlinear ytterbium-doped fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(9): 1529–1531.
- [54] DAI J N, HONG Z F, ZHU X R, et al. Hectowatt-level spatial beam self-cleaning and supercontinuum generation based on long multimode taper fiber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 192(Part E): 114002.
- [55] TURITSYN S K, BABIN S A, CHURKIN D V, et al. Random distributed feedback fibre lasers [J]. *Physics Reports*, 2014, 542(2): 133–193.
- [56] 肖起榕, 齐天澄, 李丹, 等. 光纤随机激光赋能功率提升和谱域拓展(特邀)[J]. *中国激光*, 2024, 51(19): 1901005.  
XIAO Q R, QI T C, LI D, et al. Power scaling and wavelength extension enabled by random fiber laser (invited)[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(19): 1901005. (in Chinese)
- [57] MA R, ZHANG W L, WANG S S, et al. Simultaneous generation of random lasing and supercontinuum in a completely-opened fiber structure[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(8): 085111.
- [58] ARUN S, CHOUDHURY V, BALASWAMY V, et al. Octave-spanning, continuous-wave supercontinuum generation with record power using standard telecom fibers pumped with power-combined fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(5): 1172–1175.
- [59] CHENG X, DONG J Y, ZENG X, et al. 130 W continuous-wave supercontinuum generation within a random Raman fiber laser[J]. *Optical Fiber Technology*, 2022, 68: 102825.
- [60] SWIDERSKI J. High-power mid-infrared supercontinuum sources: current status and future perspectives[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2014, 38(5): 189–235.
- [61] TAO G M, EBENDORFF-HEIDEPRIEM H, STOLYAROV A M, et al. Infrared fibers [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(2): 379–458.
- [62] MARTINEZ R A, PLANT G, GUO K W, et al. Mid-infrared supercontinuum generation from 1.6 to > 11  $\mu\text{m}$  using concatenated step-index fluoride and chalcogenide fibers[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(2): 296–299.
- [63] 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.
- [64] 刘昆, 师红星, 刘江, 等. 基于类噪声脉冲抽运的高功率全光纤中红外超连续谱光源[J]. *中国激光*, 2015, 42(9): 0902003.  
LIU K, SHI H X, LIU J, et al. High-power all-fiber mid-infrared supercontinuum generation pumped by noise-like pulses [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0902003. (in Chinese)
- [65] 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  $\mu\text{m}$ [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(18): 5122–5127.
- [66] 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.
- [67] 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  $\mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 14973–14979.
- [68] LUO X, TANG Y T, DONG F L, et al. All-fiber mid-infrared supercontinuum generation pumped by ultra-low repetition rate noise-like pulse mode-locked fiber laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(14): 4855–4862.
- [69] 戴世勋, 王敏, 王莹莹, 等. 基于硫系玻璃光纤的中红外超连续谱产生研究进展[J]. *激光与光电学进展*, 2020, 57(7): 071603.  
DAI S X, WANG M, WANG Y Y, et al. Review of mid-infrared supercontinuum spectrum generation based on chalcogenide glass fibers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 071603. (in Chinese)
- [70] PETERSEN C R, MØLLER U, KUBAT I, et al. Mid-infrared supercontinuum covering the 1.4–13.3  $\mu\text{m}$  molecular fingerprint region using ultra-high NA chalcogenide step-index fibre[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(11): 830–834.
- [71] CHENG T L, NAGASAKA K, TUAN T H, et al. Mid-infrared supercontinuum generation spanning 2.0 to 15.1  $\mu\text{m}$  in a chalcogenide step-index fiber[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 2117–2120.
- [72] ZHU L, YANG D D, WANG L L, et al. Optical and thermal stability of Ge-as-Se chalcogenide glasses for femtosecond laser writing[J]. *Optical Materials*, 2018, 85: 220–225.
- [73] LIANG X L, JIAO K, WANG X G, et al. Ultra-high germanium-contained Se-chalcogenide glass fiber for mid-infrared [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 104: 103112.

- [74] 周伟杰, 马文强, 李尧, 等. Ge-As-Se-Te 硫系玻璃的飞秒激光损伤特性 [J]. 红外与激光工程, 2022, 51(4): 20210222.  
ZHOU W J, MA W Q, LI R, et al. Femtosecond laser damage characteristics of Ge-As-Se-Te chalcogenide glass[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(4): 20210222. (in Chinese)
- [75] 田康振, 胡永胜, 任和, 等. 高激光损伤阈值 Ge-As-S 硫系玻璃光纤及中红外超连续谱产生 [J]. 物理学报, 2021, 70(4): 047801.  
TIAN K Z, HU Y S, REN H, et al. Ge-As-S chalcogenide glass fiber with high laser damage threshold and mid-infrared supercontinuum generation [J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(4): 047801. (in Chinese)
- [76] ZHONG M H, LIANG X L, JIAO K, et al. Low-loss chalcogenide fiber prepared by double peeled-off extrusion [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(16): 4533–4539.
- [77] WANG Y Z, JIAO K, LIANG X L, et al. Fabrication of mid-IR As-Se chalcogenide glass and fiber with low scattering loss [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(9): 3338–3345.
- [78] VELMUZHOV A P, TYURINA E A, SUKHANOV M V, et al. First < 1 dB/m optical loss fiber based on germanium telluride glasses [J]. Optics & Laser Technology, 2025, 192: 113727.
- [79] 姚金妹, 张斌, 侯静. 2.3~9.5  $\mu\text{m}$  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  $\mu\text{m}$  all-fiber mid-infrared supercontinuum light source [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1216002. (in Chinese)
- [80] YAN B, HUANG T, ZHANG W W, et al. Generation of watt-level supercontinuum covering 2–6.5  $\mu\text{m}$  in an all-fiber structured infrared nonlinear transmission system [J]. Optics Express, 2021, 29(3): 4048–4057.
- [81] WU B, ZHAO Z M, WANG X S, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in a suspended-core tellurium-based chalcogenide fiber [J]. Optical Materials Express, 2018, 8(5): 1341–1348.
- [82] ISLAM A S M T U, AHMAD R, HOSSSEN I, et al. Wideband mid-infrared supercontinuum generation in chloroform filled suspended core fiber [C]//Proceedings of 2020 2nd International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0(STI), 2020: 1–4.
- [83] SAINI T S, NGUYEN H P T, LUO X, et al. Broadband high-power mid-IR supercontinuum generation in tapered chalcogenide step-index optical fiber [J]. OSA Continuum, 2019, 2(5): 1652–1666.
- [84] HEIDT A M, ROTHHARDT J, HARTUNG A, et al. High quality sub-two cycle pulses from compression of supercontinuum generated in all-normal dispersion photonic crystal fiber [J]. Optics Express, 2011, 19(15): 13873–13879.
- [85] KIM J, SONG Y J. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: principles, status, and applications [J]. Advances in Optics and Photonics, 2016, 8(3): 465–540.
- [86] HEIDT A M, FEEHAN J S, PRICE J H V, et al. Limits of coherent supercontinuum generation in normal dispersion fibers [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(4): 764–775.
- [87] RAMPUR A, SPANGENBERG D M, SIERRO B, et al. Perspective on the next generation of ultra-low noise fiber supercontinuum sources and their emerging applications in spectroscopy, imaging, and ultrafast photonics [J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(24): 240504.
- [88] HEIDT A M, MODUPEH HODASI J, RAMPUR A, et al. Low noise all-fiber amplification of a coherent supercontinuum at 2  $\mu\text{m}$  and its limits imposed by polarization noise [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 16734.
- [89] SIERRO B, HÄNZI P, SPANGENBERG D, et al. Reducing the noise of fiber supercontinuum sources to its limits by exploiting cascaded soliton and wave breaking nonlinear dynamics [J]. Optica, 2022, 9(4): 352–359.
- [90] HANSEN R E, SMITH C R, MOLTKE A, et al. Mid-IR supercontinuum noise reduction using a short piece of normal dispersion fiber—a general mechanism [J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(6): 2200776.
- [91] LE CANH T, BUI DINH T, NGUYEN TIEN D, et al. Tapered suspended-core fibers for broadband supercontinuum generation and an f-2f interferometer [J]. Optics Letters, 2025, 50(8): 2494–2497.
- [92] JING M Q, NING T G. Supercontinuum generation in suspended core fibers based on intelligent algorithms [J]. Photonics, 2025, 12(5): 497.
- [93] ZHAO L, WANG S Y, LEI H, et al. Machine learning multitarget optimization for ultrashort pulse nonlinear dynamics in optical fibers [J]. Advanced Photonics Nexus, 2025, 4(5): 056011.