

文章编号: 1000-7032(2026)05-0821-07

在大芯径氟碲酸盐-硫系光纤级联系统中产生高功率 中长波超连续谱激光

杨雪莲¹, 刘亚敏¹, 杨林京¹, 姚传飞^{1*}, 王 萱¹, 任国川¹,
李平雪^{1*}, 王训四², 焦 凯³

(1. 北京工业大学 物理与光电工程学院, 北京 100124;

2. 宁波大学 高等技术研究院, 浙江 宁波 315211;

3. 宁波大学 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 报道了一种基于大芯径低损耗氟碲酸盐光纤级联泵浦大芯径硫系光纤的高功率平坦超连续谱激光系统。为了有效拓展中红外超连续谱覆盖范围, 提升超连续谱的平坦性, 泵浦源采用新型的高峰值功率拉曼孤子飞秒光源。通过级联泵浦大芯径 As_2S_3 光纤, 在最高输入功率下超连续谱输出功率可达 2 W, 光谱边缘达到 5.3 μm , 光谱 10 dB 带宽覆盖 2~4.6 μm 。采用氟碲酸盐光纤作为过渡光纤级联泵浦硫系光纤的超连续谱产生系统, 在中长波红外波段获得的超连续谱输出功率高于目前已报道的其他方案, 为未来获得高稳定的中长波超连续谱提供了更佳方案。

关 键 词: 超连续谱; 高功率; 硫系光纤; 级联系统

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250294

CSTR: 32170.14.CJL.20250294

Generation of High-power Mid and Long Wave Supercontinuum Laser in A Large-mode-area Fluorotellurite-chalcogenide Fiber Cascade System

YANG Xuelian¹, LIU Yamin¹, YANG Linjing¹, YAO Chuanfei^{1*}, WANG Xuan¹,
REN Guochuan¹, LI Pingxue^{1*}, WANG Xunsi², JIAO Kai³

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Research Institute of Advanced Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

3. School of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

* Corresponding Authors, E-mail: yaochuanfei@bjut.edu.cn; pxli@bjut.edu.cn

Abstract: This work reports a high-power flat mid-infrared supercontinuum laser system based on a large-mode-area low-loss fluorotellurite fiber cascades with a large-mode-area chalcogenide fiber. To effectively extend the spectral coverage of mid-infrared supercontinuum and improve its flatness, a novel high peak power Raman-soliton femtosecond laser source is used as the pump. Through cascading with the large-mode-area As_2S_3 fiber, the output power of the supercontinuum can reach 2 W at the maximum input power, with the spectral edge extending to 5.3 μm and the 10 dB spectral bandwidth covering the range of 2~4.6 μm . The proposed supercontinuum generation system, which utilizes fluorotellurite fiber as the transition fiber cascades with chalcogenide fiber, achieved higher supercontinuum output power in the mid and long wave infrared region compared to other previously reported schemes. This work provides a superior approach for realizing highly stable mid and long wave supercontinuum laser sources in the future.

Keywords: supercontinuum; high-power; chalcogenide fiber; cascade system

收稿日期: 2025-12-29; 修订日期: 2026-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(62005004, 61675009); 北京市自然科学基金(4204091, KZ201910005006, 4264138)

Supported by National Natural Science Foundation of China(62005004, 61675009); Beijing Natural Science Foundation(4204091, KZ201910005006, 4264138)

1 引 言

近年来,中红外超连续谱光源因其兼具激光的高相干性、高亮度特性和传统宽带辐射光源的宽谱特性发展迅速,在大气环境检测^[1]、医学生物成像^[2]、遥感和军事应用等领域^[3-4]引起了广泛的关注与应用。目前,能够产生大于 5 μm 超连续谱的方法主要为级联泵浦中长波非线性光纤,其中过渡光纤普遍使用商业化程度较高的氟化物光纤(ZBLAN 光纤以及氟钢光纤)。2017 年,Yin 等采用在氟化物光纤中产生的工作波长范围覆盖 2~4.2 μm 波段的 SC 激光器作为泵浦源,通过非球面透镜将激光耦合进 As_2S_3 光纤中,获得了光谱范围覆盖 2.05~5.05 μm 、平均功率达 57.6 mW 的超连续谱,10 dB 带宽覆盖 3 μm ;采用全光纤结构熔接 As_2S_3 光纤时可将功率提升至约 97.1 mW^[5]。2018 年,Ramon 等通过使用具有三级放大器的 MOPA 系统泵浦 ZBLAN 和 As_2S_3 光纤的级联结构,获得了覆盖 1.4~6.4 μm 、输出功率为 1.39 W 的超连续谱^[6]。2021 年,Yan 等采用多脉冲泵浦的方式在 ZBLAN 级联 As_2S_3 光纤结构中获得了光谱范围覆盖 2~6.5 μm 的中红外超连续谱光源系统^[7],通过增加对接耦合距离降低对 As_2S_3 光纤端面的损伤,输出功率可达 1.13 W。2023 年,Qiu 等采用类似的多脉冲泵浦方式,结合软玻璃光纤低损耗熔接技术,用 InF_3 光纤代替 ZBLAN 光纤来作为过渡光纤,最后可以在 As_2S_3 光纤中获得光谱覆盖 1.9~6.45 μm 、输出功率为 1.06 W 的中红外超连续谱输出^[8]。在此基础上,Huang 等借助超低损耗熔接技术、高效光纤对接耦合技术和精确热管理技术等多种手段进行了更大光谱覆盖范围的中红外超连续光源研究,最终在 ZBLAN 级联 As_2S_3 光纤结构中获得了光谱覆盖范围 2~8 μm 的超连续激光输出,遗憾的是输出功率仅有 730 mW^[9]。由这些工作可知,虽然采用氟化物光纤级联 As_2S_3 光纤输出的超连续谱光谱范围已得到大幅度拓展,但输出功率仅限制在 1.4 W 以下,难以满足高功率应用(如高光谱成像和遥感)的需求^[10]。其主要原因有两个,一方面,所使用的氟化物过渡光纤相比石英光纤(SiO_2)具有较差的化学稳定性和热稳定性,且端面抗潮解性能较差,在较低的功率密度下容易发生光学损伤(如端面烧蚀、光纤熔融),这限制了可输出的中红外超连续谱激光功率^[11-12];另一方面,为了获得光谱范围的极大拓展,已有研究基本

都使用小芯径的硫系光纤进行长波光谱拓展,由于硫系光纤本身的损伤阈值很低,即使是目前在 $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{S}_{65}$ 光纤中测得的最高激光损伤阈值也仅有 0.063 8 $\text{GW}\cdot\text{m}^{-2}$ (3.6 μm 处)^[13],远低于氟化物的 1.7 $\text{GW}\cdot\text{m}^{-2}$ (2.94 μm 处)^[14],高功率激光注入时大功率密度将导致硫系光纤端面损伤,进一步限制了长波谱段可输出的功率^[15]。因此,亟需探索新型的高稳定性高损伤阈值的过渡光纤以及采用大芯径硫系光纤来组建级联泵浦 SC 产生系统,由此获得更高功率的中长波红外超连续谱输出。

近年来,氟碲酸盐光纤($\text{TeO}_2:\text{BaF}_2:\text{Y}_2\text{O}_3$)因其卓越的光学特性以及化学稳定性和热稳定性,在超连续谱(SC)光源领域展现出巨大潜力^[16-17]。氟碲酸盐光纤的非线性折射率高出氟化物光纤两个数量级,因此其长度仅需使用数十厘米便可得到光谱的快速展宽,从而方便进行热管理^[18]。Yao 等在进行超连续光谱展宽研究时,利用芯径为 6.8 μm 的细芯氟碲酸盐光纤作为非线性展宽介质获得了光谱范围覆盖 0.95~3.93 μm 的超连续谱,输出功率达 10.4 W,验证了氟碲酸盐光纤优越的长期稳定性^[19]。2023 年,Jiao 等使用 TBY 作为非线性光纤实现了输出功率>50 W、光谱覆盖 1.2~3.7 μm 的中红外超连续谱^[20]。2025 年,本课题组采用新型高峰值功率双拉曼孤子飞秒激光器作为泵浦源,在芯径为 34 μm 的氟碲酸盐光纤中获得了光谱范围为 1.8~4.2 μm 的 10.4 W SC 激光源,5 dB 带宽完全覆盖 1.9~4.05 μm ^[21]。为了获得更远的覆盖范围,本课题组进一步对氟碲酸盐光纤进行了拉锥,将氟碲酸盐光纤的极限覆盖波长拓展至 5.1 μm ,功率依旧保持在 10 W 量级,经过长达 2 h 的监测依旧维持着良好的功率稳定性^[22]。这一结果表明了氟碲酸盐光纤在高功率条件下的光谱拓展能力及稳定性,表现出比 ZBLAN 光纤更好的性能。因此,在使用光纤级联泵浦技术产生中长波超连续谱的系统中,用氟碲酸盐光纤代替氟化物光纤是解决中红外过渡光纤在高功率 SC 输出时易损伤问题的有效方法。

综上所述,本文使用棒管法自制的低损耗氟碲酸盐光纤作为中红外波段的过渡展宽光纤,通过优化泵浦源参数,提升峰值功率,使用大芯径氟碲酸盐光纤突破了长波处的损耗限制,获得了光谱覆盖 1.8~4.2 μm 的高功率平坦超连续光谱,5 dB 带宽约为 2.05 μm 。随后,级联大芯径硫系光纤进行二次展宽,大芯径(30 μm)硫系光纤的使用

进一步提升了长波光纤的损伤阈值,在最高泵浦功率下,芯径 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的硫系光纤输出功率可达 2 W ,光谱边缘延伸至 $5.3\text{ }\mu\text{m}$,光谱 10 dB 带宽覆盖 $2\sim 4.6\text{ }\mu\text{m}$ 。据我们所知,这比目前报道的基于 As_2S_3 光纤产生超连续谱的输出功率高出 0.5 W 以上。

2 实 验

图1所示为级联泵浦硫系光纤产生 $1\sim 5.3\text{ }\mu\text{m}$ 高功率超连续谱光源示意图。该系统主要由 $1.96\text{ }\mu\text{m}$ 飞秒泵浦源、透镜耦合模块、级联超连续谱产生系统及相关测试设备组成。其中, $1.96\text{ }\mu\text{m}$ 飞秒泵浦源为尾部采用光栅对进行压缩的 $2\text{ }\mu\text{m}$ 啁啾脉冲放大系统,其整体实验配置与文献[21]所用系统保持一致。透镜耦合模块用于将光栅对压缩后的高功率百飞秒脉冲有效耦合进入后续光

纤中,实现脉冲宽度的进一步压缩与光谱的显著展宽。级联超连续谱产生系统依次由 0.32 m 大芯径石英光纤($\text{NA}=0.075$)、 0.4 m 大芯径氟碲酸盐(TBY)光纤($\text{NA}=0.3$)以及 0.6 m 大芯径硫化砷光纤($\text{NA}=0.3$)构成,三段光纤的芯径分别为 $32\text{ }\mu\text{m}$ 、 $34\text{ }\mu\text{m}$ 和 $30\text{ }\mu\text{m}$ 。三者较大的芯径有利于提高光纤的损伤阈值,获得更高输出功率的宽光谱激光输出。其中,石英光纤与TBY光纤之间采用了直接熔接的方式,硫化砷光纤与TBY光纤采用高精度三维调整架进行对接固定。TBY光纤作为中红外波段的过渡光纤用于将光谱展宽至 $4\text{ }\mu\text{m}$ 以后,进一步泵浦高非线性的硫系光纤可使光谱拓展至长波红外波段。为防止较强的菲涅尔反射,两根中红外光纤输入与输出端均切八度角。最后,使用单色仪连接氮冷碲镉汞探测器测量输出光谱。

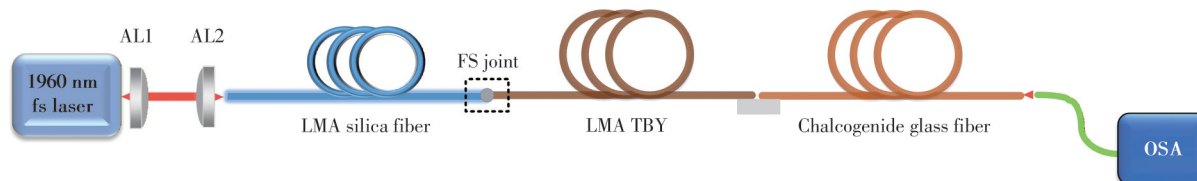


图1 高功率 $1\sim 5.3\text{ }\mu\text{m}$ 超连续谱产生实验装置, AL1, AL2: 非球面镜; OSA: optical spectral analyzer

Fig.1 Experimental setup for high-power $1\sim 5.3\text{ }\mu\text{m}$ supercontinuum generation. AL1, AL2: aspherical mirror. OSA: optical spectral analyzer

在进行实验前,我们首先表征了所使用的自制氟碲酸盐光纤及硫系光纤的色散及模场参数。如图2(a)所示,氟碲酸盐光纤的第一个零色散波长约为 $2.1\text{ }\mu\text{m}$,表明其在 $2.1\text{ }\mu\text{m}$ 之后为负色散区,因此 $2.1\text{ }\mu\text{m}$ 后的超短脉冲能够在氟碲酸盐光纤内激发丰富的非线性效应,如自相位调制、拉曼孤子频移等,非常有利于光谱的拓展。但是,氟碲酸盐光纤在大于 $4\text{ }\mu\text{m}$ 后材料吸收损耗以及受限损耗快速上升,未拉锥氟碲酸盐光纤的截止波长

仅能到达 $4.2\text{ }\mu\text{m}$ 。为了实现光谱向长波的高效拓展,需要级联一段硫系光纤。如图2(b),硫系光纤的零色散波长约为 $4.97\text{ }\mu\text{m}$,在 $4.9\text{ }\mu\text{m}$ 之前处于光纤的正色散区,光谱的展宽主要依赖于自相位调制效应。图2分别给出了TBY光纤与 As_2S_3 光纤在 $1\sim 5.5\text{ }\mu\text{m}$ 波段有效模场面积随波长的变化关系,用以比较两者在光纤耦合方面的特性。可以看到,TBY光纤在整个波段内的模场面积相比于 As_2S_3 光纤略大,这也是导致后面对接硫系光

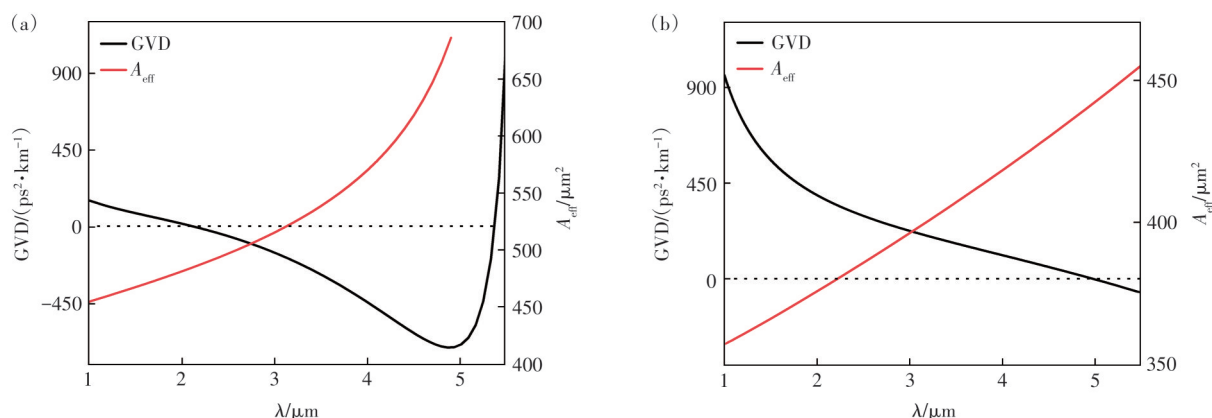


图2 (a)氟碲酸盐光纤和(b)硫系光纤的群速度色散值及模场面积值

Fig.2 The group velocity dispersion values and mode field area values of (a) fluorotellurite fibers and (b) chalcogenide fibers

纤耦合效率较低的原因之一。

3 结果与讨论

3.1 大芯径石英光纤中超连续谱产生

在实验中,1.96 μm 飞秒泵浦源输出脉冲的重复频率约为 16.64 MHz,其输出光谱如图 3(a),光谱 3 dB 带宽约为 25 nm。通过仔细调整光栅对间距来补偿系统中存在的二阶色散,在最大泵浦功率下可将放大器输出脉冲的脉宽压缩至 434 fs。如图 3(b)为压缩脉冲的自相关曲线,主峰的两边存在少量基座,是由于系统中仍含有少量未补偿的三阶色散以及放大过程中引入的非线性啁啾。随后,我们将压缩后的飞秒脉冲经过精确基模匹配技术^[23]耦合进入大芯径无源光纤中,为了避免

在大芯径无源光纤中劈裂出的拉曼孤子经历长波处较大的损耗,我们选择了较短长度的无源光纤(32 cm)进行自压缩以及拉曼孤子频移,以进一步提升光栅对压缩后脉冲的峰值功率。如 3(a)为主放大器泵浦功率加到 70 W 时大芯径石英光纤后的输出光谱,此时光谱长波长边缘已经展宽至 2.6 μm ,输出功率为 8.63 W,空间耦合效率为 51.8%。在输出功率增加的初始阶段,脉冲孤子阶数提升进行高阶孤子自压缩过程,光谱带宽得到大幅拓展。随后,在脉冲内拉曼散射效应的影响下开始劈裂出拉曼孤子,随着输出功率的提升,可以观察到有一个明显的拉曼孤子在持续向长波长移动,在输出功率 8.63 W 时,拉曼孤子可频移至 2.3 μm 处。

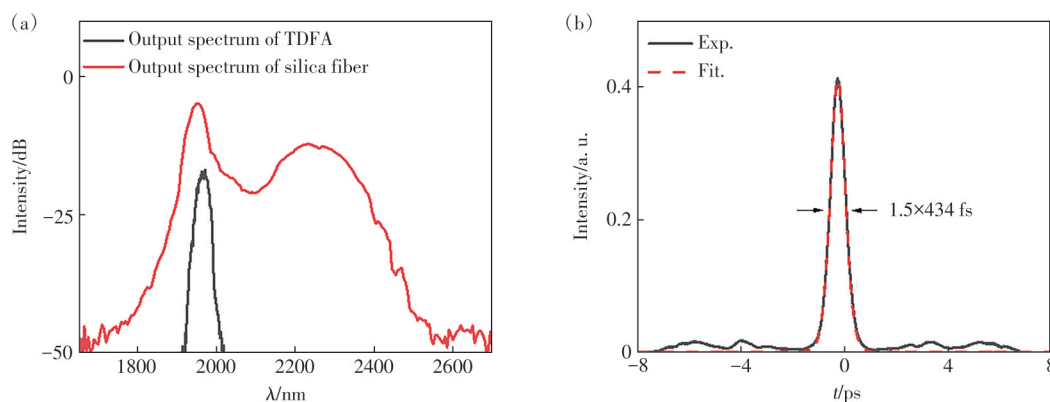


图 3 (a) 飞秒光源及大芯径石英光纤输出光谱; (b) 飞秒光源自相关曲线

Fig.3 (a) Output spectra of femtosecond laser source and LAM silica fiber. (b) Autocorrelation curve of femtosecond laser source

3.2 TBY 光纤中超连续谱产生

为了提高整个系统的稳定性,我们对这段石英光纤与自制的大芯径氟碲酸盐光纤进行了熔接。由于氟碲酸盐光纤具有相当高的非线性折射率($3.5 \times 10^{-18} \text{ m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$),相较于石英光纤及传统的氟化物光纤提升 2 个数量级。因此,进入到氟碲

酸盐光纤的石英拉曼孤子脉冲成长为更高阶数的孤子脉冲,并劈裂出大量基阶拉曼孤子快速向长波移动,超连续谱的光谱范围得到了极大拓展。如图 4(a)所示,在最高泵浦功率 70 W 的情况下,光谱平坦区域已经拓展至 3.9 μm ,边缘部分已经到达 4.2 μm 。超连续光谱的 10 dB 带宽范围由

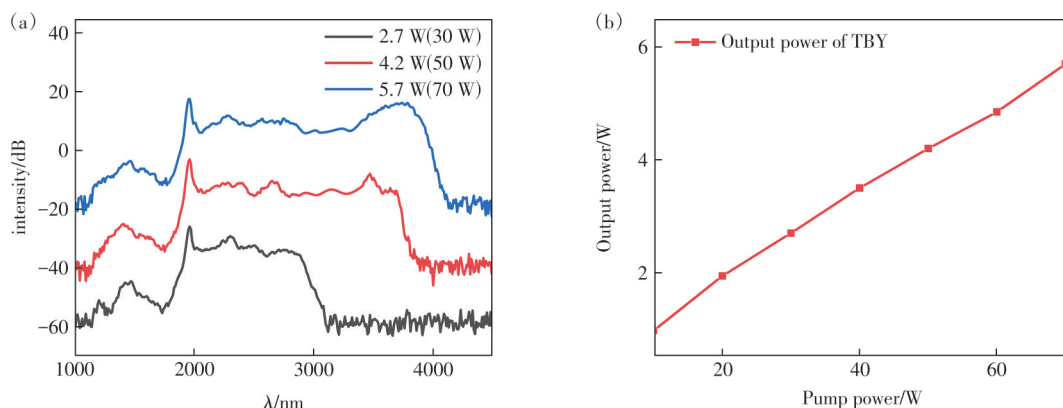


图 4 TBY 光纤后的 (a) 输出光谱及 (b) 输出功率随泵浦功率的变化

Fig.4 (a) Output spectra and (b) variation of output power with pump power after fluorotellurite fiber

1.9 μm 至4 μm ,完整覆盖2~4 μm 区域,达到了传统ZBLAN光纤输出的最优光谱范围。但与之不同的,氟碲酸盐光纤由于具有超高的非线性系数及高出ZBLAN光纤100 $^{\circ}\text{C}$ 多的玻璃转变温度(425 $^{\circ}\text{C}$),其仅用40 cm的长度即可媲美传统ZBLAN光纤数十米长度所带来的光谱展宽效果,并且不受潮湿环境(传统商用氟化物光纤普遍存在易潮解的缺陷)影响,具有非常好的长时间功率稳定性。如图4(b)所示,在整个过程中随着泵浦功率的提升,输出功率呈线性增长,最高可输出5.7 W,光纤熔接效率约为66%。

3.3 As_2S_3 光纤中超连续谱产生

接下来,我们将TBY光纤继续级联硫化砷光纤,以将光谱进一步拓展至长波红外波段(>5 μm)。硫系光纤本身具有较低的损伤阈值,传统级联泵浦硫系光纤的工作均是在小芯径光纤中进行,输出功率限制在1.4 W左右。在本工作中,为了进一步提升硫系光纤输出超连续谱激光的功率,我们使用了芯径为30 μm 左右的大芯径硫系光纤。如图5(a)所示,随着输出功率的增加,在0.6 m的 As_2S_3 光纤中可以观察到显著的光谱展宽。我们发现,即使在相对较低的泵浦功率30 W的情况下,长波边缘的光谱也能延伸至4.5 μm 以上,显

示了硫系光纤优异的光谱展宽性能。随着输出功率的进一步增加,光谱逐渐向长波区域展宽,在最高泵浦功率70 W时,光谱边缘部分已经到达5.3 μm ,超连续光谱的10 dB带宽范围覆盖2~4.6 μm 。从图中可以看出,输出超连续谱在约2.8 μm 和4.2 μm 处出现了局部凹陷,这主要源于吸收效应。其中,2.8 μm 附近的凹陷可归因于光纤材料中残余羟基(-OH)杂质在2.7~2.9 μm 波段的本征吸收,而4.2 μm 附近的凹陷则主要由光谱测量过程中空气中 CO_2 分子的特征吸收所引起。上述吸收特性不影响超连续谱整体的展宽行为及输出性能。如图5(b)所示,整个光谱展宽过程中,硫系光纤的耦合效率由最初的42.3%降至35%。在最高泵浦功率下,输出功率可达2 W。据我们所知,本方案在中长波红外波段获得的超连续谱输出功率高于目前已报道的其他方案。在本次实验中,为了保障系统能够长时间稳定运行,我们未继续提升泵浦功率。后续我们将进一步开展两种光纤的高效率熔接工作,并对熔点以及整根硫系光纤实施更完善的热管理,在此基础上继续提高泵浦功率,以探索大芯径硫系光纤在该级联系统中可实现的最大输出功率以及更宽光谱范围。

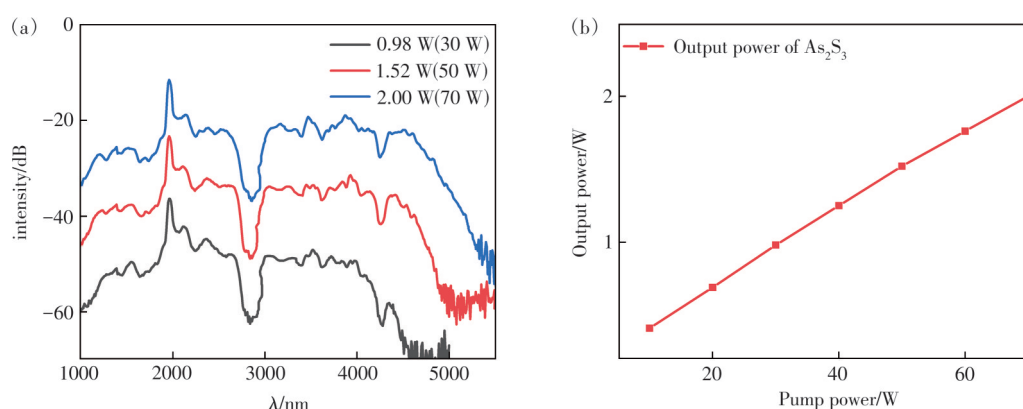


图5 硫系光纤后的(a)输出光谱及(b)输出功率随泵浦功率的变化

Fig.5 (a)Output spectra and (b)variation of output power with pump power after chalcogenide fiber

4 结 论

本文报道了一种级联TBY和 As_2S_3 光纤的超宽光谱激光产生系统,实现了覆盖1~5.3 μm 波段的2 W级超连续谱产生。该方案的创新之处在于采用高峰值功率光纤激光器泵浦课题组自制的TBY光纤产生4.2 μm 的SC谱(功率5.7 W),解决了级联泵浦系统中中红外过渡光纤易损伤的难题。随后,由高损伤阈值的大芯径 As_2S_3 光纤进一

步将SC谱展宽至5.3 μm ,并且其输出功率高于目前已报道的其他基于 As_2S_3 光纤产生中红外超连续谱的方案。我们相信,这种新型中红外光纤的级联泵浦系统将成为未来获得高稳定中长波超连续谱产生的更佳方案。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250294>

参 考 文 献:

- [1] 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]. *Opt. Express*, 2018, 26(9): 12169-12179.
- [2] ISRAELSEN N M, PETERSEN C R, BARH A, *et al.* Real-time high-resolution mid-infrared optical coherence tomography [J]. *Light Sci. Appl.*, 2019, 8(1): 11.
- [3] 殷亮, 邢志明, 朱科, 等. 基于中红外波段的烷烃浓度遥测光学系统 [J]. *光学精密工程*, 2024, 32(7): 966-975.
YIN L, XING Z M, ZHU K, *et al.* Remote optical system for measuring alkane concentration based on mid-infrared band [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(7): 966-975. (in Chinese)
- [4] ZHOU Y X, FENG H L, LI X, *et al.* Tunable mid-infrared selective emitter with thermal management for infrared camouflage [J]. *Plasmonics*, 2023, 18(6): 2465-2473.
- [5] YIN K, ZHANG B, YAO J M, *et al.* Toward high-power all-fiber 2–5 μm supercontinuum generation in chalcogenide step-index fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2017, 35(20): 4535-4539.
- [6] 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]. *Opt. Lett.*, 2018, 43(2): 296-299.
- [7] YAN B, HUANG T, ZHANG W W, *et al.* Generation of watt-level supercontinuum covering 2–6.5 μm in an all-fiber structured infrared nonlinear transmission system [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(3): 4048-4057.
- [8] QIU M, XIA K, ZHAO P P, *et al.* Experimental validation and mathematical simulation of multi-pulse evolution and mid-infrared supercontinuum generation in fibers cascaded system [J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2023, 131: 104638.
- [9] HUANG T, XIA K, WANG J, *et al.* 730 mW, 2–8 μm supercontinuum generation and the precise estimation of multi-pulse spectral evolution in the soft-glass fibers cascaded nonlinear system [J]. *Opt. Express*, 2021, 29(25): 40934-40946.
- [10] ISLAM M N, FREEMAN M J, PETERSON L M, *et al.* Field tests for round-trip imaging at a 1.4 km distance with change detection and ranging using a short-wave infrared super-continuum laser [J]. *Appl. Opt.*, 2016, 55(7): 1584-1602.
- [11] TAO G M, EBENDORFF-HEIDEPRIEM H, STOLYAROV A M, *et al.* Infrared fibers [J]. *Adv. Opt. Photonics*, 2015, 7(2): 379-458.
- [12] WANG S B, JIA S J, JIANG Y G, *et al.* Mid-IR fluoride fibers: materials, fabrication, and fiber laser applications [J]. *Photonics Insights*, 2025, 4(3): R07.
- [13] 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 Phys. Sinica*, 2021, 70(4): 047801. (in Chinese)
- [14] WÜTHRICH S, LÜTHY W, WEBER H P. Optical damage thresholds at 2.94 μm in fluoride glass fibers [J]. *Appl. Opt.*, 1992, 31(27): 5833-5837.
- [15] YOU C Y, DAI S X, ZHANG P Q, *et al.* Mid-infrared femtosecond laser-induced damages in As_2S_3 and As_2Se_3 chalcogenide glasses [J]. *Sci. Rep.*, 2017, 7(1): 6497.
- [16] LI N, WANG F, YAO C F, *et al.* Coherent supercontinuum generation from 1.4 to 4 μm in a tapered fluorotellurite microstructured fiber pumped by a 1980 nm femtosecond fiber laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, 110(6): 061102.
- [17] YAO C F, HE C F, JIA Z X, *et al.* Holmium-doped fluorotellurite microstructured fibers for 2.1 μm lasing [J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(20): 4695-4698.
- [18] GUO X H, JIA Z X, JIAO Y D, *et al.* 25.8 W All-fiber mid-infrared supercontinuum light sources based on fluorotellurite fibers [J]. *IEEE Photonic Technol. Lett.*, 2022, 34(7): 367-370.
- [19] 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.
- [20] JIAO Y D, JIA Z X, ZHANG C Y, *et al.* Over 50 W all-fiber mid-infrared supercontinuum laser [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(19): 31082-31091.
- [21] YANG L J, WANG X, YAO C F, *et al.* High-power ultraflat broadband supercontinuum generation in fluorotellurite fiber

pumped by a dual-wavelength femtosecond laser [J]. *Opt. Lett.*, 2025, 50(2): 618-621.

- [22] YANG L J, YAO C F, WANG X, *et al.* Precisely tapered fluorotellurite fiber-enabled Raman soliton relay fission for generating a 4–5 μm mid-infrared high-power laser [J]. *Photonics Res.*, 2025, 13(8): 2281-2290.
- [23] YANG L J, WANG X, YAO C F, *et al.* High-power tunable Raman soliton generation in large core diameter passive fibers *via* a precise fundamental-mode matching technique [J]. *Opt. Express*, 2024, 32(3): 4036-4049.



杨雪莲(2001–),女,河南驻马店人,硕士研究生,2023年于郑州轻工业大学获得学士学位,主要从事中红外超连续谱激光产生的研究。

E-mail: yangxuelian@emails.bjut.edu.cn



李平雪(1974–),女,河北石家庄人,博士,研究员,2004年于中国科学院物理研究所获得博士学位,主要从事先进激光技术的研究。

E-mail: pxli@bjut.edu.cn



姚传飞(1991–),男,山东聊城人,博士,研究员,2018年于吉林大学获得博士学位,主要从事中红外光纤激光技术的研究。

E-mail: yaochuanfei@bjut.edu.cn