

# 激光与光电子学进展

## 基于硫系光纤的中红外超连续谱及其相干性研究进展

吴志建<sup>1,2</sup>, 彭雪峰<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211;

<sup>2</sup>宁波大学科学技术学院, 浙江 宁波 315211

**摘要** 硫系玻璃具有优良的中远红外透过性能和极高的非线性系数, 是目前实现中红外超连续谱的优秀候选材料。近年来, 国内外研究人员通过对光纤基质材料的调整、结构参数的优化、泵浦方式的改进等手段不断优化基于硫系玻璃光纤的超连续谱输出特性。本文回顾了硫系光纤生成超连续谱的研究历程, 从谱宽、功率和相干性等方面综述了阶跃型光纤、微结构光纤、拉锥光纤三种类型硫系光纤在国内外取得的最新进展, 并对研究中存在的问题及发展趋势进行了分析与展望。

**关键词** 材料; 硫系玻璃; 中红外; 相干; 超连续谱

中图分类号 TN213; TN913.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222260

### Research Progress of Mid-Infrared Supercontinuum and Its Coherence Based on Chalcogenide Fibers

Wu Zhijian<sup>1,2</sup>, Peng Xuefeng<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo, 315211 Zhejiang, China;

<sup>2</sup>College of Science & Technology, Ningbo University, Ningbo, 315211 Zhejiang, China

**Abstract** Chalcogenide glasses have excellent mid- and far-infrared transmittance and extremely high nonlinear coefficients, and were seen as excellent candidate materials for realizing the mid-infrared supercontinuum generation. Recently, researchers at domestic and abroad have explored continuous optimization of supercontinuum output characteristics by adjusting the matrix materials, optimizing the structural parameters, and improving the pumping source. In this article, the development course of supercontinuum generation in chalcogenide fibers was reviewed. Moreover, the most recent progresses about the spectral broadening, output power, and coherence of supercontinuum generated in three kinds of chalcogenide glass fibers, including step-index, microstructure, and tapered fibers, were reviewed. Finally, the problems existing in the researches and the development trends were analyzed and prospected.

**Key words** materials; chalcogenide glass; mid-infrared; coherence; supercontinuum

## 1 引言

超连续谱(SC)指超强短激光脉冲耦合到非线性介质中, 在色散和自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、受激拉曼散射(ISRS)、四波混频(FWM)、孤子动力学等非线性效应作用下的频谱展宽过程<sup>[1]</sup>。SC光源同时具有普通自发辐射光源的宽光谱特性和单色激光光源亮度高、方向性和相干性好等优点<sup>[2]</sup>, 在光相干断层扫描<sup>[3]</sup>、光学频率梳<sup>[4]</sup>、生物医疗<sup>[5]</sup>、国防安全<sup>[6]</sup>等方面得到广泛的应用。

中红外波段一般指 2.5~25  $\mu\text{m}$ , 在此区间内涵盖 3~5  $\mu\text{m}$  和 8~12  $\mu\text{m}$  这两个重要的大气窗口, 众多有机物或无机物分子不同振动模式导致的特定频率吸收会在中红外波段形成独特的“指纹”, 从而能够用于判定官能团来实现物质检测<sup>[7]</sup>。受材料本身的限制, 传统的石英光纤在 2.5  $\mu\text{m}$  波段以上光吸收急剧增加, SC 只能展宽到近红外波段。常见的中红外光纤基质材料有氟化物(ZBLAN)、重金属氧化物(亚碲酸盐)及硫系玻璃。氟化物和重金属氧化物非线性相对较低且受限于材料的本征多声子吸收, 很难将频谱展宽到

收稿日期: 2022-08-12; 修回日期: 2022-09-06; 录用日期: 2022-09-13; 网络首发日期: 2022-09-23

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY20F040003)、宁波市自然科学基金(202003N4158)、宁波大学王宽诚幸福基金

通信作者: \*pengxuefeng@nbu.edu.cn

8  $\mu\text{m}$  以上。硫系玻璃是以元素周期表 VI A 族中除氧 (O) 以外的硫 (S)、硒 (Se)、碲 (Te) 为主,并结合一些其他金属和非金属元素如砷 (As)、锗 (Ge)、铋 (Sb) 等形成的非晶态玻璃,具有优良的宽红外传输窗口、高折射率 (2~3)、低声子能量 ( $<350\text{ cm}^{-1}$ ) 和极高的非线性折射率  $n_2$  ( $2\times 10^{-18}\sim 20\times 10^{-18}\text{ m}^2/\text{W}$ ),是目前实现中红到远红外波段 SC 的首选光纤基质材料<sup>[8]</sup>。

近几年基于硫系光纤的中红外 SC 研究一直是国内外众多机构的研究热点,英国南安普敦大学、美国密歇根大学、日本丰田技术研究所、法国勃艮第大学以及国内的宁波大学、国防科技大学、江苏师范大学等都有突破性的成果问世。传统硫系光纤的中红外 SC 研究主要集中于谱宽和功率这两大方面。目前基于硫系光纤的中红外 SC 最大展宽已达  $1.7\sim 18\ \mu\text{m}$ <sup>[9]</sup>,通过级联泵浦方式获得的最高输出功率已达  $1.39\text{ W}$ <sup>[10]</sup>。近年来随着中红外 SC 逐步扩展到医疗检测、激光同步、计量学等领域,对高相干性中红外 SC 的研究逐渐成为新的热点,目前在  $1.8\sim 14\ \mu\text{m}$  范围内,硫系光纤已实现了相干系数约等于 1 的高相干 SC 输出<sup>[11]</sup>。

本文着眼于中红外 SC 输出的谱宽、功率及相干性等性能,综述了近年来国内外阶跃型、微结构和拉锥三种类型硫系光纤的 SC 研究进展。

## 2 硫系光纤中红外 SC 的谱宽

### 2.1 硫系阶跃型光纤的 SC 谱宽

对硫系光纤 SC 的研究可追溯到 2005 年,加拿大拉瓦尔大学 Wei 等<sup>[12]</sup>采用波长为  $1.55\ \mu\text{m}$ ,平均功率为  $26\text{ mW}$ ,脉宽为  $20\text{ fs}$  的激光泵浦长度为  $1.5\text{ m}$  的单模  $\text{As}_2\text{S}_3$  光纤,首次获得了  $1.40\sim 1.71\ \mu\text{m}$  的 SC 输出。虽然其 SC 在平坦度为  $15\text{ dB}$  下带宽仅为  $0.31\ \mu\text{m}$ ,展宽还比较窄,但也标志着对硫系光纤 SC 研究的开始。同年 12 月,美国海军实验室 Shaw 等<sup>[13]</sup>利用波长为  $2.5\ \mu\text{m}$ ,脉宽为  $100\text{ fs}$  的激光泵浦  $1\text{ m}$  长的  $\text{As}_2\text{Se}_3$  微结构光纤,产生了  $2.1\sim 3.2\ \mu\text{m}$  的 SC,谱宽首次从近红外跨越到中红外波段,从此真正开启了硫系光纤中红外 SC 的新篇章。

早期的中红外 SC 研究,主要基于  $\text{As}_2\text{S}_3$  和  $\text{As}_2\text{Se}_3$  阶跃型光纤。 $\text{As}_2\text{S}_3$  和  $\text{As}_2\text{Se}_3$  的化学与物理稳定性好、在中红外范围的损耗低,而阶跃型光纤结构简单,制备方便<sup>[14]</sup>,因此  $\text{As}_2\text{S}_3$  和  $\text{As}_2\text{Se}_3$  阶跃型光纤成为硫系光纤材料最早的研究热点,目前已基本实现商用化<sup>[15]</sup>。2014 年,丹麦科技大学 Petersen 等<sup>[16]</sup>在芯径为  $16\ \mu\text{m}$  的  $\text{As}_2\text{S}_3$  光纤中获得  $1.4\sim 13.3\ \mu\text{m}$  的 SC。2016 年,日本丰田技术研究所 Cheng 等<sup>[17]</sup>通过波长为  $9.8\ \mu\text{m}$ ,重复频率为  $1\text{ kHz}$ ,脉宽为  $170\text{ fs}$  的锁模激光器,在  $3\text{ cm}$  长的  $\text{As}_2\text{Se}_3/\text{AsSe}_2$  阶跃光纤中首次将 SC 的长波长突破到  $15\ \mu\text{m}$ 。但需要注意的是,As 是一种有毒元素, $\text{As}_2\text{S}_3$  和  $\text{As}_2\text{Se}_3$  光纤在制备过程中容易造成环境污染,而且它们的激光损伤阈值较低<sup>[18]</sup>,一旦泵浦光源功

率过高会发生蒸发和燃烧现象,产生对人体有害的气体。因此,环保型硫系光纤成为当今的研究热点,对其的研究主要有两个方向:1)提高含 As 玻璃基质的损伤阈值;2)不含 As 的环保硫系玻璃基质。

据报道,硫系玻璃光纤基质中加入 Ge 元素可使玻璃形成稳定的 3D 网络结构进而提高光纤的热损伤阈值<sup>[19]</sup>,宁波大学 Liang 等<sup>[20]</sup>以此为基础制备了具有超高 Ge 含量的芯/包结构  $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12.5}\text{Se}_{54.5}/\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$  光纤,实验结果表明玻璃的析晶温度  $T_x$  和玻璃转变温度  $T_g$  分别  $522\text{ }^\circ\text{C}$  和  $379\text{ }^\circ\text{C}$ ,因此具有良好的稳定性和损伤阈值。利用波长为  $5\ \mu\text{m}$ ,平均功率为  $25\text{ mW}$ ,重复频率为  $1\text{ kHz}$  的激光泵浦,在  $13\text{ cm}$  长的光纤中获得  $1.6\sim 11.4\ \mu\text{m}$  的 SC 输出,如图 1 所示。2022 年,周伟杰等<sup>[21]</sup>通过对照实验在  $\text{Ge}_x\text{As}_{40-x}\text{Se}_{20}\text{Te}_{40}$  光纤中验证了 Ge 能提高光纤热损伤阈值的可行性。实验中分别对  $x$  取  $0$ 、 $10$ 、 $20$ 、 $30$ ,在中心波长  $800\text{ nm}$ ,重复频率  $1\text{ kHz}$  的飞秒激光照射下,通过超景深显微镜显示计算得出玻璃的损伤阈值分别为  $24.1$ 、 $29.9$ 、 $41.9$ 、 $48.3\text{ mJ}/\text{cm}^2$ ,证明随着 Ge 含量的提升,光纤的损伤阈值有所增加。2015 年,江苏师范大学 Yu 等<sup>[22]</sup>用波长  $4\ \mu\text{m}$ ,脉宽  $330\text{ fs}$  激光泵浦  $11\text{ cm}$  长的  $\text{Ge}_{12}\text{As}_{24}\text{Se}_{64}/\text{Ge}_{10}\text{As}_{20}\text{Se}_{66}$  阶跃光纤,在  $\pm 15\text{ dB}$  的平坦度下产生  $1.8\sim 10\ \mu\text{m}$  的 SC,这是当时已知硫系光纤下得到的最宽光谱。2021 年该研究组的田康振等<sup>[23]</sup>通过对比实验,在  $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{S}_{65}$  光纤中获得  $638\text{ GW}/\text{cm}^2$  的最高激光损伤阈值。他们通过管棒法制备了纤芯和包层分别为  $\text{Ge}_{25}\text{As}_{10}\text{S}_{65}$  和  $\text{Ge}_{26}\text{As}_8\text{S}_{66}$  的阶跃型光纤,芯径  $15\ \mu\text{m}$ ,数值孔径  $\text{NA}=0.24$ ,零色散波长 (ZDW)  $4.5\ \mu\text{m}$ 。采用波长为  $4.8\ \mu\text{m}$ 、脉宽为  $170\text{ fs}$ 、重复频率为  $100\text{ kHz}$  的激光泵浦  $15\text{ cm}$  长的光纤,获得覆盖  $2.5\sim 7.5\ \mu\text{m}$  的 SC 输出。

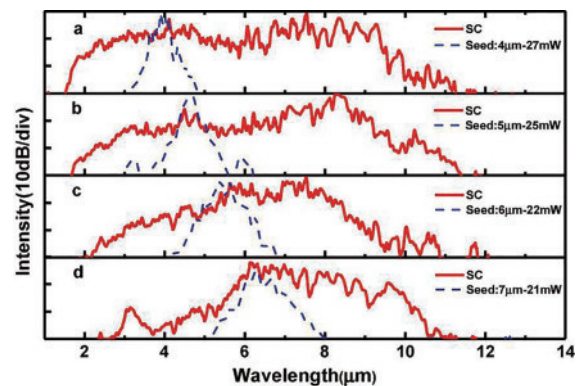


图 1 不同波长泵浦  $13\text{ cm}$  长 Ge-As-Se 光纤产生的 SC 输出<sup>[20]</sup>  
Fig. 1 SC generation in  $13\text{ cm}$ -long Ge-As-Se fiber pumped with different wavelength<sup>[20]</sup>

不含 As 环保型硫系光纤主要包括由 Ge-S、Ge-Se 和 Ge-Te 为基质材料并结合其他无毒元素制成的光纤。2021 年,宁波大学 Feng 等<sup>[24]</sup>通过一种新型挤压法制备了低损耗 S 系阶跃型光纤。该光纤的物理参数和损耗图如表 1 和图 2 所示,其中  $T_x$  表示玻璃析晶温度, $T_g$  表示

表 1 低损耗硫系光纤基质材料的物理参数。

Table 1 Physical parameters of low loss chalcogenide fiber matrix materials

Composition	$T_g / ^\circ\text{C}$	$T_x / ^\circ\text{C}$	$n_0 @ 4 \mu\text{m}$
$\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{18}\text{S}_{67}$	254	424	2.3237
$\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{20.5}\text{S}_{64.5}$	250	404	2.3399

玻璃转变温度,  $n_0$  表示玻璃的线性折射率。所制备的  $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{20.5}\text{S}_{64.5}$  光纤在 5~6  $\mu\text{m}$  范围内表现出低于 2 dB/m 的优异光损耗性能, 其中在 5.1  $\mu\text{m}$  处的损耗为 0.87 dB/m, 这是目前已知在 Ge-Sb-S 光纤中所得

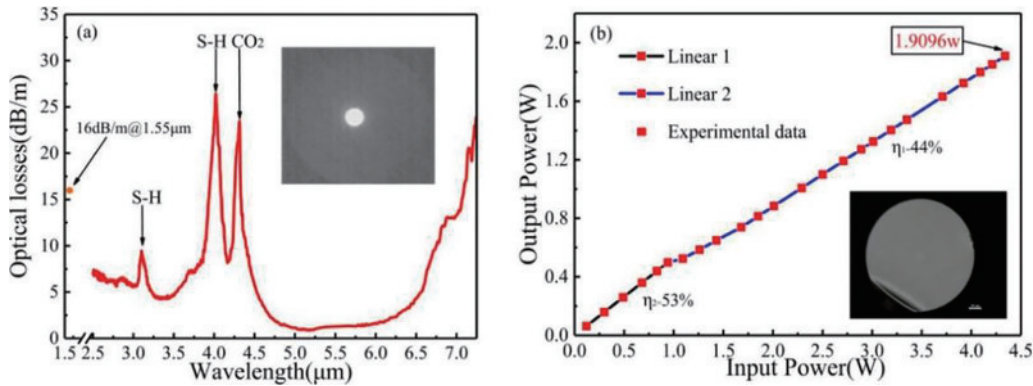


图 2 Ge-Sb-S 光纤的传输损耗特性<sup>[24]</sup>。(a) 测得光纤的损耗图(插图: 在 1.55  $\mu\text{m}$  处的输出光斑); (b) 光纤的传输效率(插图: 光纤的横截面)

Fig. 2 Transmission loss characteristic of Ge-Sb-S fiber<sup>[24]</sup>. (a) Loss diagram of Ge-Sb-S fiber (inset: output spot at 1.55  $\mu\text{m}$ ); (b) transmission efficiency of Ge-Sb-S fiber (inset: cross section of Ge-Sb-S fiber)

由于 Se 和 Te 比 S 有更宽的透过窗口, 与 S 基材料相比理论上能获得更宽的 SC。2016 年, 江苏师范大学 Zhang 等<sup>[26]</sup>报道了一种  $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{70}/\text{Ge}_{20}\text{Se}_{80}$  阶跃型光纤, 该光纤在 2~12  $\mu\text{m}$  波段具有良好的透过性, 在波长 4.485  $\mu\text{m}$ , 脉宽 330 fs 的光源泵浦下产生 2.2~12  $\mu\text{m}$  的光谱输出。2017 年, 宁波大学 Zhao 等<sup>[27]</sup>通过挤压法制备了一种低损耗  $(\text{Ge}_{10}\text{Te}_{43})_{90}\text{-AgI}_{10}$  双包层阶跃折射率光纤, 在波长为 7  $\mu\text{m}$ , 脉宽为 150 fs, 重复频率为 1 kHz 光源泵浦下, 获得了 2.0~16  $\mu\text{m}$  的 SC 输出, 长波长首次突破 16  $\mu\text{m}$ 。2021 勃艮第大学的 Lemièrre 等<sup>[9]</sup>制备了一种  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{60}\text{Te}_{20}/\text{Ge}_{20}\text{Se}_{70}\text{Te}_{10}$  芯/包结构阶跃型光纤, 纤芯和包层材料在形成玻璃预制棒之前经过多次提纯, 有效地减少氢键和氧键形成的非本征吸收带, 在 2~11  $\mu\text{m}$  波段的损耗仅为 0.06 dB/cm。当泵浦波长为 8.15  $\mu\text{m}$ , 峰值功率为 200 kW 时, 在 44 mm 长的光纤中得到 1.7~18  $\mu\text{m}$  的 SC 输出, 为目前已知硫系光纤中最宽的 SC 光谱, 如图 3 所示。

## 2.2 硫系微结构光纤的 SC 谱宽

一般而言, 光纤要获得高质量的 SC 谱通常要满足两个条件, 一是泵浦波长要与光纤的 ZDW 相近, 二是光纤要有非常高的非线性值  $\gamma$ 。非线性系数  $\gamma$  的定义为

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}}, \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为泵浦波长;  $n_2$  表示光纤的非线性折射率;  $A_{\text{eff}}$

是光纤的有效模场面积。与阶跃型光纤相比, 微结构光纤(MOF)和拉锥光纤不仅可以通过改变光纤结构来控制光纤的色散特性, 进而达到控制 ZDW 的目标, 还可控制有效模场面积, 增大光纤非线性系数。因此微结构光纤和拉锥光纤成为中红外 SC 研究中的不可忽视的两大类型。

微结构光纤也叫光子晶体光纤, 根据导光机理的不同可以分为全反射形 MOF 和光子带隙形 MOF, 前者的导光机理与阶跃折射率光纤相同, 后者纤芯的折射率比包层折射率低但依然能在芯内传播的原因是包层形成的光子带隙能够将光限制在里面<sup>[28]</sup>。MOF 的制作主要有堆叠法、浇铸法、挤压法、打孔法等工艺, 相较于阶跃型光纤来说制造工艺复杂且重复性相对较差, 但是 MOF 可以有效增加光纤的非线性, 而且可以通过对 MOF 的结构设计(如改变孔间距  $\Lambda$ 、孔径  $d$  以及纤芯直径等)实现对色散的精确调控, 受到研究者的普遍关注。2000 年英国南安普敦大学 Monro 等<sup>[29]</sup>报道了第一根基于 Ga-La-S 制成的硫系 MOF。其结构较为简单, 实芯的玻璃棒作为纤芯被 6 根空芯的玻璃管环绕, 受限于当时的制作水平, 拉制的光纤很不理想。在之后的几年内, 有关硫系 MOF 传输特性的研究鲜有报道, 直到 2008 年, 硫系 MOF 的结构才开始多样化起来。其中全固态型 PCF 和悬吊芯 PCF 由于具有独特光学性能逐渐成为研究的热点。

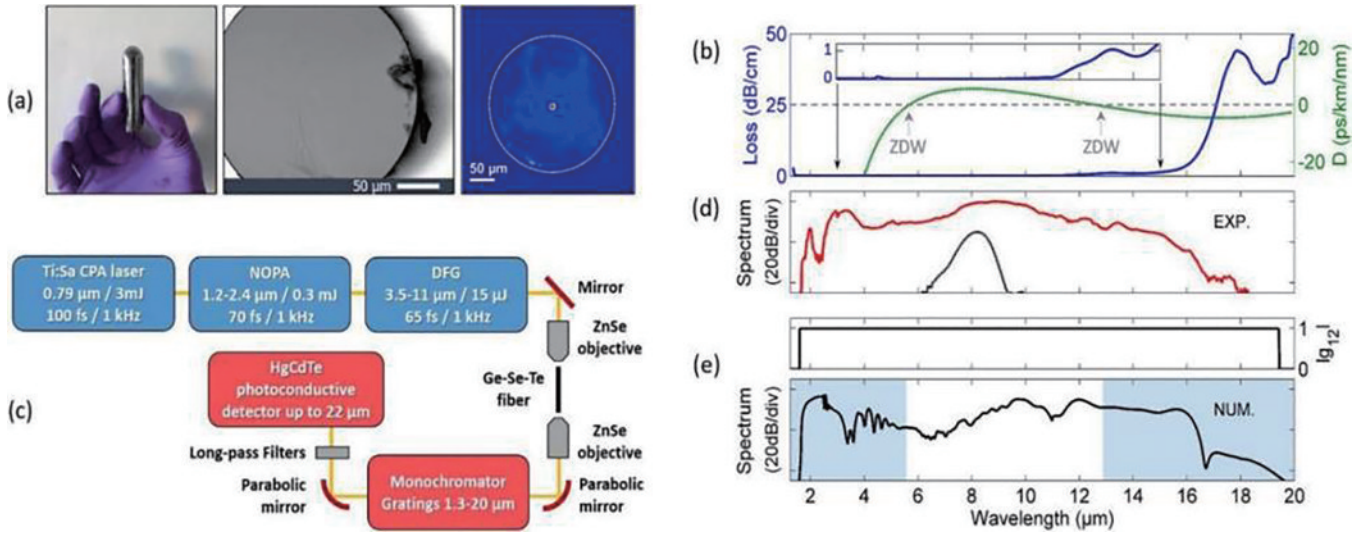


图 3 Ge-Se-Te 光纤产生的 SC<sup>[9]</sup>。(a) 光纤预制棒与光纤在电子显微镜下的横截面图；(b) 光纤的损耗和色散；(c) 生成 SC 的实验装置；(d) 实验下生成的 SC；(e) 模拟下生成的 SC

Fig. 3 The SC of Ge-Se-Te fiber<sup>[9]</sup>. (a) Optical fiber preform and cross section of fiber under electron microscope; (b) loss and dispersion of fiber; (c) experimental setup for generating SC; (d) SC generated under experiment; (e) SC generated under simulation

2020 年, 日本丰田技术研究所 Nguyen 等<sup>[30]</sup>报道一种硫系全固态混合物 MOF, 纤芯和包层材料分别

为 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 和 AsSe<sub>2</sub>, 纤芯被 6 根 As<sub>2</sub>S<sub>5</sub> 玻璃纤维棒环绕, 光纤的结构及光学性能如图 4 所示。实验结果表

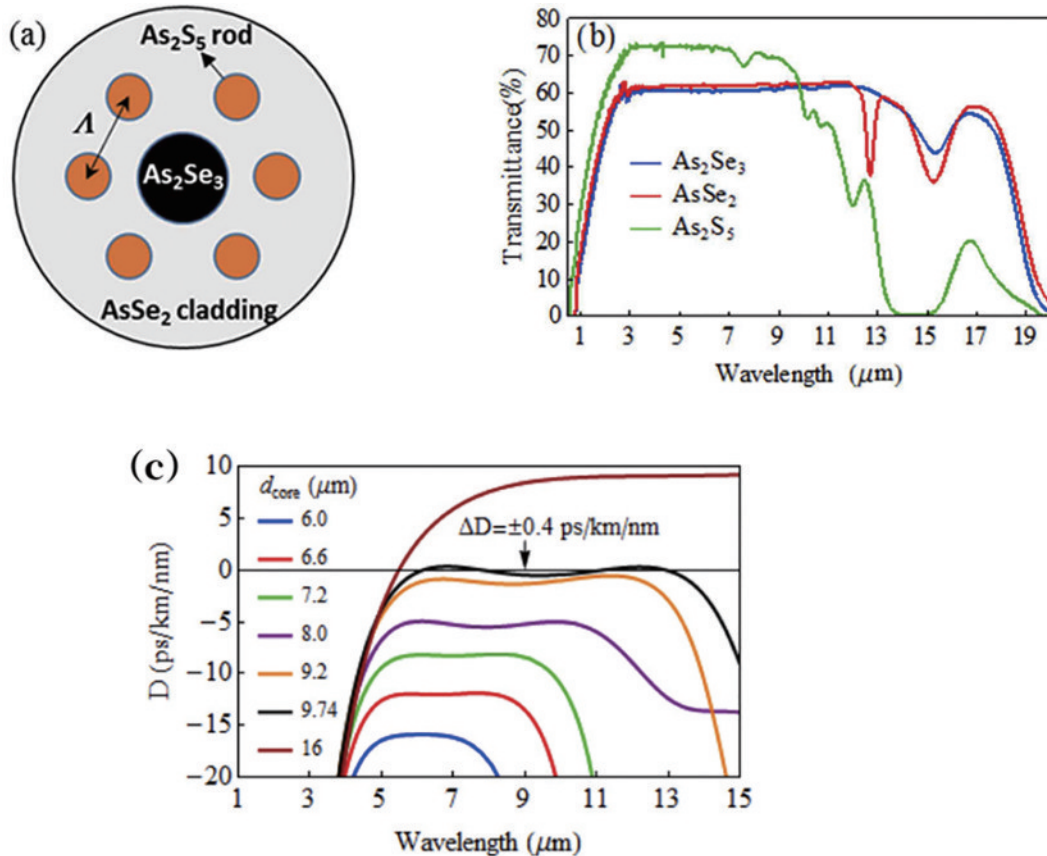


图 4 全固态混合物微结构光纤结构与光学性能<sup>[30]</sup>。(a) As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>-AsSe<sub>2</sub>-As<sub>2</sub>S<sub>5</sub> 光纤结构；(b) 三种玻璃的透射率；(c) 不同芯径 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>-AsSe<sub>2</sub>-As<sub>2</sub>S<sub>5</sub> 光纤的色散特性

Fig. 4 Structure and optical properties of all-solid hybrid MOF<sup>[30]</sup>. (a) Structure of As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>-AsSe<sub>2</sub>-As<sub>2</sub>S<sub>5</sub> fiber; (b) transmittance for three glasses; (c) dispersion curves of As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>-AsSe<sub>2</sub>-As<sub>2</sub>S<sub>5</sub> fiber with different core diameters

明,当芯径小于  $10\ \mu\text{m}$  时光纤具有全正色散,通过调整芯径为  $9.74\ \mu\text{m}$ ,棒距  $\Lambda$  与棒径  $d$  比值为 3.3 且棒距  $\Lambda = 13.2\ \mu\text{m}$ ,光纤在  $6\sim 13.2\ \mu\text{m}$  波段获得  $\pm 0.4\ \text{ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$  的超平坦色散分布,这是目前已知的硫系光纤中,在如此宽的范围内获得的最平坦色散。

2021 年,阿尔及利亚埃尔韦德大学的 Medjouri 等<sup>[31]</sup>报道了一种五环六方晶格的 MOF。该光纤以  $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{70}$  为背景材料,  $\text{Ge}_{20}\text{Se}_{80}$  玻璃棒填充气孔形成全固态光纤,光纤剖面图和 SC 输出如图 5 所示。当  $\Lambda = 3\ \mu\text{m}$ ,  $d = 1.4\ \mu\text{m}$  时在整个波段具有全正色散,这是首次报道由无毒环保型硫系玻璃制成的全固态 MOF。当工作波长为  $3\ \mu\text{m}$ 、脉宽为  $50\ \text{fs}$ 、峰值能量为  $900\ \text{pJ}$  的光源泵浦到  $10\ \text{mm}$  长的光纤时,获得  $1.5\sim 9.2\ \mu\text{m}$  的超平坦 SC 输出,  $-5\ \text{dB}$  平坦度下的 SC 谱宽达  $5.4\ \mu\text{m}$  ( $1.6\sim 7\ \mu\text{m}$ )。

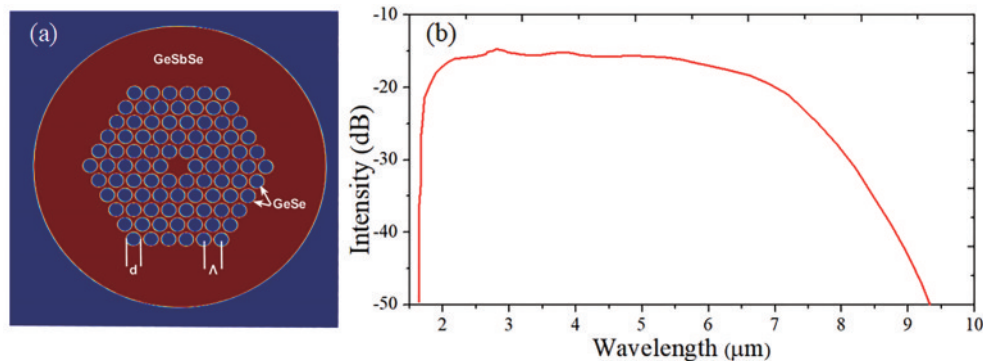


图 5 Ge-Sb-Se MOF 的结构与 SC 输出<sup>[31]</sup>。(a) 光纤的横截面图;(b) SC 光谱

Fig. 5 Optical properties and structure of Ge-Sb-Se MOF<sup>[31]</sup>. (a) Cross-section of fiber; (b) output of SC

近年来,由于硫系悬芯 MOF 的 ZDW 较短,有效模场面积小,光纤非线性参数极大,SC 光谱非常容易产生且所需泵浦激光功率不高,引起研究人员的关注<sup>[32]</sup>。2020 年,越南荣市大学 Lê Cảnh 等<sup>[33]</sup>报道了一种用水孔代替空气孔来改善色散的  $\text{As}_2\text{S}_3$  悬芯光纤,模拟结果表明仅需  $0.01\ \text{nJ}$  的脉冲能量就能在  $10\ \text{cm}$  光纤产生  $1.1\sim 2.6\ \mu\text{m}$  的 SC。同年,孟加拉国陆军科技大学 Islam 等<sup>[34]</sup>首次以  $\text{AsSe}_2$  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)填充,所得光纤在  $2.55\ \mu\text{m}$  处获得 ZDW。实验结果表明,在波长  $2.56\ \mu\text{m}$ 、峰值功率  $10\ \text{kW}$ 、脉宽  $50\ \text{fs}$  的激光泵浦下,产生了  $1\sim 14\ \mu\text{m}$  的 SC,这是目前已知在硫系悬芯光纤中获得的最宽光谱。2021 年,宁波大学 Jiao 等<sup>[35]</sup>报道了一种纤芯和背景材料分别为  $(\text{Ge}_{10}\text{As}_{22}\text{Se}_{68})_{90}\text{I}_{10}$  与  $\text{As}_2\text{S}_3$  的四孔硫系悬芯光纤,如图 6 所示。该硫系光纤具有  $34\ \mu\text{m}$  的大芯径,ZDW 为  $2.6\ \mu\text{m}$ ,在  $5.5\sim 9.5\ \mu\text{m}$  波段有很好的透光率。实验结果表明,在波长大于  $4.6\ \mu\text{m}$  时光纤满足单模工作条件,在波长为  $5\ \mu\text{m}$ 、脉宽为  $150\ \text{fs}$  的激光泵浦下,获得  $1.6\sim 12\ \mu\text{m}$  的 SC 输出。

### 2.3 硫系拉锥光纤的 SC 谱宽

MOF 的结构较为复杂,其端面结构的差异导致模场匹配困难,使其在光纤通信中很难实现光纤与光纤之间的低损耗拼接,而且 MOF 内部通常带有气孔结构,长时间与空气接触水分子会侵蚀内壁,引起  $3\ \mu\text{m}$  波段 OH 吸收损耗的增加<sup>[36]</sup>。光纤拉锥是一种简易的后处理技术,也是一种实现光纤色散以及非线性调控的重要方法。

2019 年,日本丰田技术研究所 Saini 等<sup>[37]</sup>将  $\text{AsSe}_2/\text{As}_2\text{S}_5$  阶跃型光纤从纤芯直径  $15\ \mu\text{m}$  拉锥到  $3\ \mu\text{m}$ ,ZDW 从  $5.19\ \mu\text{m}$  蓝移到  $3.02\ \mu\text{m}$ 。通过波长  $3.5\ \mu\text{m}$ 、脉宽  $200\ \text{fs}$ 、重复频率  $76\ \text{MHz}$  的飞秒激光泵浦,在  $4\ \text{cm}$  长的锥形光纤中获得  $1.5\sim 14.5\ \mu\text{m}$  的 SC 输出。同年,宁波大学 Zhang 等<sup>[38]</sup>首次报道纤芯和包层基质材料分别为  $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{15}\text{Te}_{45}/\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{20}\text{Te}_{40}$  的阶跃折

射率锥形光纤 SC 实验,如图 7 所示。光纤具有非常宽的传输窗口和较低的损耗,通过改变锥腰芯径的大小可有效调整光纤色散。当锥腰芯径小于  $14\ \mu\text{m}$  时光纤在  $1.5\sim 14\ \mu\text{m}$  波长范围内表现出全正色散特性。以波长  $5.5\ \mu\text{m}$ 、平均功率  $19\ \text{mW}$ 、重复频率  $1\ \text{kHz}$  的激光作为泵浦源,在锥腰直径为  $13.4\ \mu\text{m}$ 、长为  $7\ \text{cm}$  的 Ge-As-Se-Te 拉锥光纤上获得  $2\sim 12.7\ \mu\text{m}$  的 SC 输出。2020 年,莫斯科国立科技大学 Leonov 等<sup>[39]</sup>通过波长为  $2.4\ \mu\text{m}$ 、重复频率为  $170\ \text{MHz}$ 、平均功率为  $90\ \text{mW}$  的飞秒锁模 Cr:ZnSe 激光器泵浦,在  $10\ \text{mm}$  长的三孔  $\text{As}_{39}\text{Se}_{61}$  悬芯拉锥光纤中获得了波长  $1.4\sim 4.2\ \mu\text{m}$ 、功率为  $35\ \text{mW}$  的 SC 输出。2022 年,加拿大麦吉尔大学 Shamim 等<sup>[40]</sup>报道了一种基于  $\text{SiO}_2$ -ZBLAN-锥形  $\text{As}_2\text{S}_3$  悬芯 MOF 的孤子自频移级联结构系统。以中心波长  $1.94\ \mu\text{m}$ 、重复频率  $30\ \text{MHz}$ 、平均功率  $6\ \text{mW}$  的掺铈光纤激光器作为泵浦源,光源在级联结构中经过三次孤子自频移,最终在锥形 MOF 中输出的 SC 长波长红移到  $3.12\ \mu\text{m}$ 。光纤拉锥技术操作简易,由于其可以有效地增加光纤的非线性和调控光纤的色散,已经被运用在了非线性光学、光纤传感等研究领域。但光纤拉锥通常是通过高温使光纤变软来

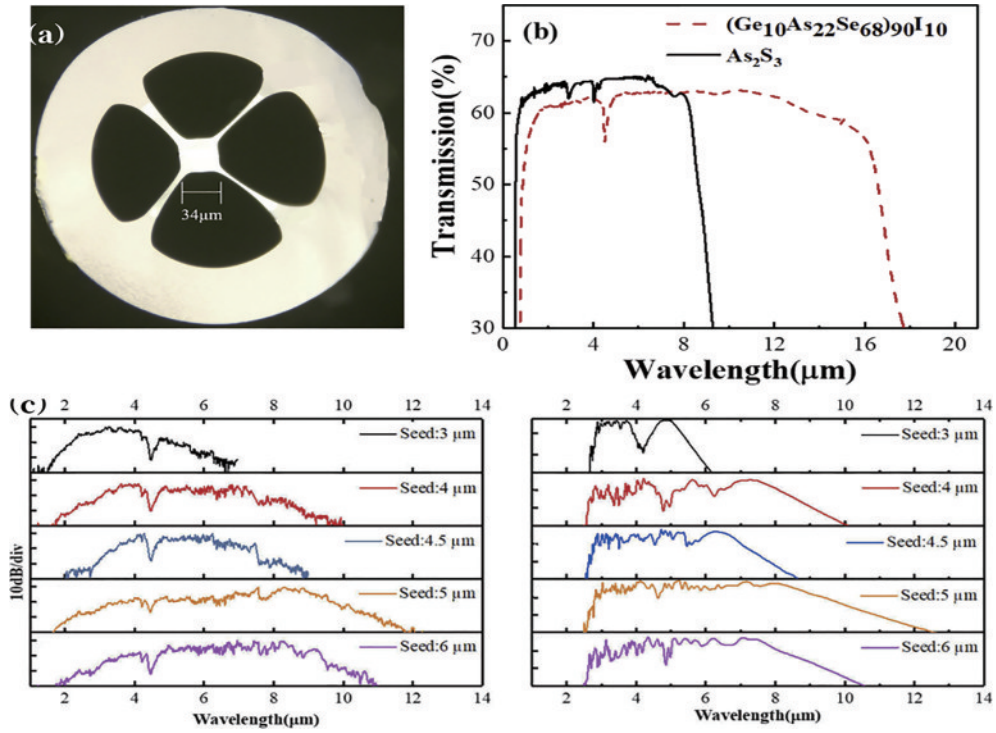


图 6 四孔硫系悬芯光纤结构与光学性能<sup>[35]</sup>。(a) 四孔硫系悬芯光纤横截面图；(b) 两种玻璃的透射率；(c) 实验和模拟不同波长下四孔硫系悬芯光纤产生的 SC

Fig. 6 Structure and optical properties of four-hole chalcogenide suspended core fiber<sup>[35]</sup>. (a) Cross section of four hole chalcogenide suspended core fiber; (b) transmittance for two glasses; (c) represents the SC produced by the experiment and simulation of four hole chalcogenide suspended core fiber at different wavelengths

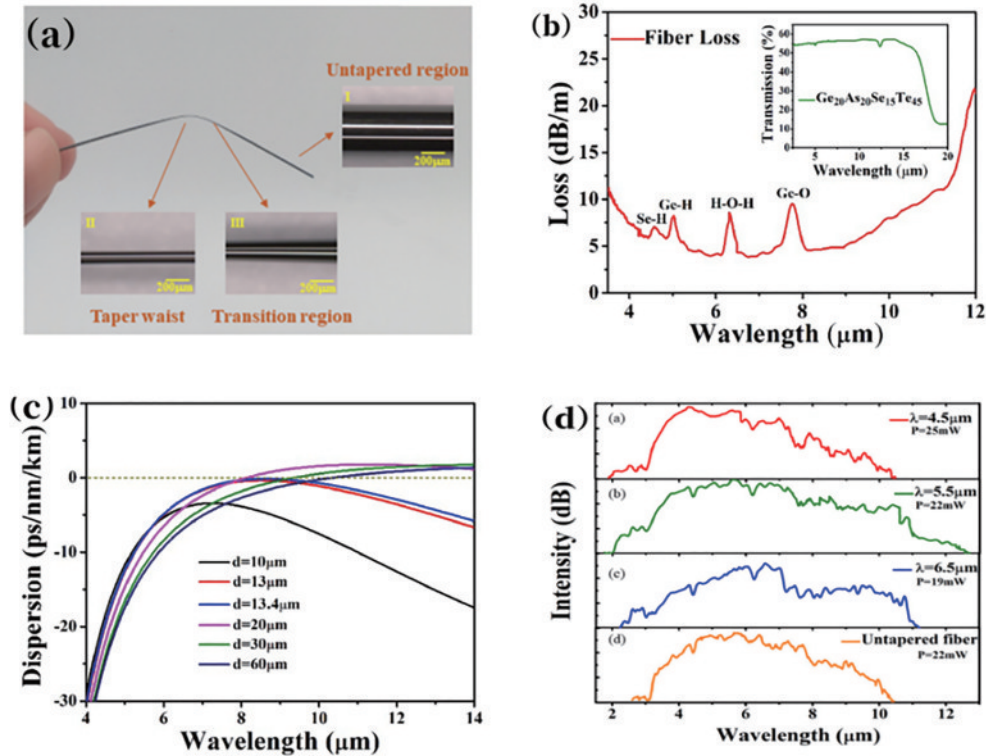


图 7 Ge-As-Se-Te 拉锥光纤的光学性能<sup>[38]</sup>。(a) 拉锥光纤结构图 (插图: 未拉锥、锥腰、过渡区的放大图); (b) 测得光纤的光损耗 (插图: 纤芯的透光率); (c) 不同芯径下 Te 基光纤的基膜色散曲线; (d) SC 输出图

Fig. 7 Optical properties of Ge-As-Se-Te tapered fiber<sup>[38]</sup>. (a) Structure diagram of tapered fiber (inset: represent untapered, taper waist, and transition region respectively); (b) loss diagram of fiber (inset: transmittance of core glass); (c) dispersion curves of Ge-As-Se-Te fiber with different fiber core diameters; (d) output of SC

产生锥形光纤,这个过程光纤极易造成损伤,即使拉制成功后光纤锥腰部分的机械强度也会降低,这是实验过程中需要注意的问题。

表 2 汇总了近年来三种不同类型硫系光纤在飞秒激光泵浦下 SC 输出的主要成果。从材料的组分来看,可以发现,与传统对 As-S 或 As-Se 的研究不同,含 Ge

硫系玻璃光纤是近年来的研究热点,主要受益于 Ge 与其他元素结合形成较强的化学键进而提升玻璃的稳定性。此外,三种类型光纤的 SC 输出频谱都可以扩展到 10  $\mu\text{m}$  以上,在文献[9]中更是获得 1.7~18  $\mu\text{m}$  的 SC,但微结构和锥形光纤相较于阶跃型光纤能灵活地调颜色散和改变 ZDW,因此所需泵浦波长普遍更短。

表 2 近年来三种不同类型硫系光纤 SC 的主要成果

Table 2 Main research results of SC spectrum generation with three different types in recent year

Fiber type	Glass composition	Fiber length /cm	Pump condition	Spectral coverage / $\mu\text{m}$	Ref.
Step-index fiber	Ge-Se-Te	4.4	8.15 $\mu\text{m}$ /200 kW	1.7-18	[9]
	Ge-As-Se	13	5 $\mu\text{m}$ /25 mW	1.6-11.4	[20]
	Ge-As-S	15	4.8 $\mu\text{m}$ /170 fs/100 kHz	2.5-7.5	[23]
	Ge-Sb-S	22	4 $\mu\text{m}$ /150 fs/1 kHz	1.56-7.59	[24]
Microstructurd fiber	Ge-Sb-Se/Ge-Se	1	3 $\mu\text{m}$ /50 fs/90 pJ	1.6-7	[31]
	As-Se	0.5	2.56 $\mu\text{m}$ /50fs/10 kW	1-14	[34]
Tapered fiber	Ge-As-Se-I/As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	-	5 $\mu\text{m}$ /150 fs	1.6-12	[35]
	Ge-As-Se-Te	7	5.5 $\mu\text{m}$ /19 mW	2-12.7	[38]
	As-Se	1	2.4 $\mu\text{m}$ /90 mW/170 MHz	1.4-4.2	[39]

### 3 硫系光纤中红外 SC 的功率

#### 3.1 硫系阶跃型光纤的 SC 功率

SC 在实际应用过程中,除了光谱宽度外,功率也十分重要。相较于 MOF 和拉锥光纤,对硫系阶跃型光纤 SC 输出功率的研究更为广泛。受硫系玻璃本身材料的影响,硫系阶跃型光纤的 ZDW 往往在 5  $\mu\text{m}$  以上,而要获得宽光谱一般要使工作波长在近零色散点的反常色散区,这是一般商用激光器很难满足的。因此大多数硫系光纤不得不以自由空间复杂的光学参量振荡器(OPO)和光学参量放大器(OPA)作为泵浦源。OPO 和 OPA 虽然能产生从近红外到中红外波长可调的高功率短脉冲激光,但是它们的重复频率和脉宽等参数,在很大程度上会影响 SC 的功率输出<sup>[16]</sup>。一般来说,泵浦光提供的能量越大,输出 SC 的功率就应该越高,因此在保证脉宽和峰值功率不变的情况下提高重复频率,或者重复频率和峰值功率不变的情况下扩大脉宽,都可以有效提升 SC 的输出功率。2016 年国防科技大学的 Yao 等<sup>[41]</sup>利用波长 2.19  $\mu\text{m}$ 、脉宽 1 ns、

重复频率 100 kHz 的 OPA 泵浦 3 m 长的 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 光纤,获得 2~4  $\mu\text{m}$  的 SC,输出功率为 143 mW。Gattass 等<sup>[42]</sup>在几乎相同的光纤中,利用波长 2.45  $\mu\text{m}$ 、脉宽 40 ps、重复频率 10 MHz 的激光泵浦,获得 1.9~4.8  $\mu\text{m}$  的 SC,输出功率达 565 mW。而 Yu 等<sup>[22]</sup>在重复频率差不多(21 MHz)的情况下,泵浦光脉宽减为 330 fs,峰值功率却只有 1.26 mW。

OPO 和 OPA 其结构复杂、成本高昂、便携性差,一定程度上限制了中红外 SC 的实际应用。为此,研究人员将目光转向级联泵浦,希望通过此泵浦方式获得基于硫系光纤的全光纤中红外 SC 输出。2014 年丹麦科技大学 Kubat 等<sup>[43]</sup>首次提出级联泵浦方案,该方案的整体思路是先用 1.55  $\mu\text{m}$  短波长脉冲经多级放大后泵浦 ZBLAN 光纤,再将所得的 SC 作为泵浦源继续耦合到硫系光纤中,如图 8 所示。氟化物具有较高损伤阈值,能输出 W 级光功率,具有较短的零色散波长,通常被选作级联结构的前端光纤,当种子光耦合进来时 ZBLAN 光纤工作在反常色散区,在孤子动力学的作用下脉冲得到展宽,来自 ZBLAN 光纤长波长处的

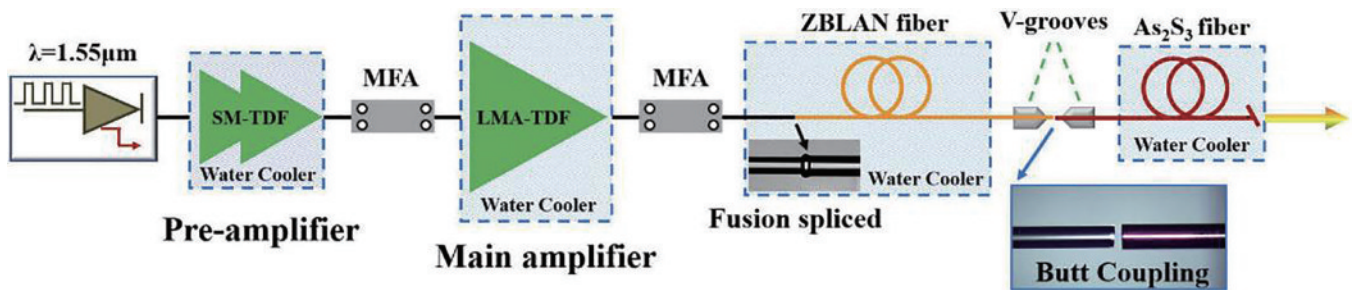


图 8 级联泵浦方案结构图<sup>[43]</sup>

Fig. 8 Structure diagram of cascade pump<sup>[43]</sup>

孤子可以在硫系光纤中继续红移,使输出的 SC 得到极大的展宽。

2018 年,美国密歇根大学 Martinez 等<sup>[10]</sup>将脉宽为 1.1 ns,波长为 1.55 μm 的种子光经多级放大后耦合到 ZBLAN-As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 的级联结构中,在 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 末端得到 2~6.5 μm,功率为 1.39 W 的 SC 输出,这是目前已知在硫系光纤中获得的最高输出功率。2020 年,加拿大拉瓦尔大学的 Robichaud 等<sup>[44]</sup>用掺铒 ZBLAN 光纤放大器泵浦几十厘米长的 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 光纤,获得了 2~5 μm 的 SC,输出功率达 825 mW。2020 年国防科技大学姚金妹等<sup>[45]</sup>用 2~2.5 μm 的掺铊光纤大器作为泵浦源,在 InF<sub>3</sub> 和 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 的级联结构中获得输出功率大于 6 mW,覆盖 2.3~9.5 μm 的 SC。2021 年,波兰军事技术学院 Swiderski 等<sup>[46]</sup>使用自制 1.9~2.7 μm,平均输出功率为 6.15 W 的宽光谱光源经多级放大后泵浦 InF<sub>3</sub>-As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 结构,在平坦度为 -10 dB 情况下获得 1.97~5.1 μm 的 SC,平均输出功率达 440 mW。同年,宁波大学 Yan 等<sup>[47]</sup>在 ZBLAN-As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 全光纤级联结构中获得谱宽 2~6.5 μm,功率达 1.13 W 的 SC 输出。2022 年,该实验小组 Yang 等<sup>[48]</sup>通过一种非对称熔接技术,在 (TeO<sub>2</sub>-

BaF<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)-As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 全光纤结构中首次实现了不同类型软玻璃之间的熔接,并且获得 0.91 W 的 SC 输出。

### 3.2 硫系微结构和拉锥光纤的 SC 功率

MOF 和拉锥光纤与 ZBLAN 等光纤连接时要比阶跃型光纤难度更大,因此,这两种类型硫系光纤级联泵浦获得 SC 的研究相对不多。2016 年,丹麦科技大学 Petersen 等<sup>[49]</sup>用波长 1.55 μm、脉宽 3 ns、重复频率 30 kHz 的激光器泵浦单模石英光纤-ZBLAN-As<sub>38</sub>Se<sub>62</sub> 悬芯光纤组成的级联结构,在结构末端得到 2~7 μm,总输出功率达 6.5 mW 的 SC。2019 年,该实验小组 Petersen 等<sup>[50]</sup>通过涂反射膜和拉锥等技术处理手段来增加传输效率,最终在 ZBLAN-Ge<sub>10</sub>As<sub>22</sub>Se<sub>68</sub> MOF 级联结构中得到 1.07~7.94 μm,输出功率为 90 mW 的 SC。2020 年,勃艮第大学的 Venck 等<sup>[51]</sup>用商用掺铒光纤泵浦二氧化硅光纤-ZBLAN 光纤-As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> MOF 组成的级联结构,该方案泵浦源不需要经过放大可直接泵浦,如图 9 所示。实验结果显示,光波在石英光纤中脉冲形状几乎保持不变,在 ZBLAN 光纤中可以获得超过 4 μm 的频带,在光纤整个结构尾端得到输出功率为 16 mW,覆盖 2~10 μm 相对平坦的 SC。

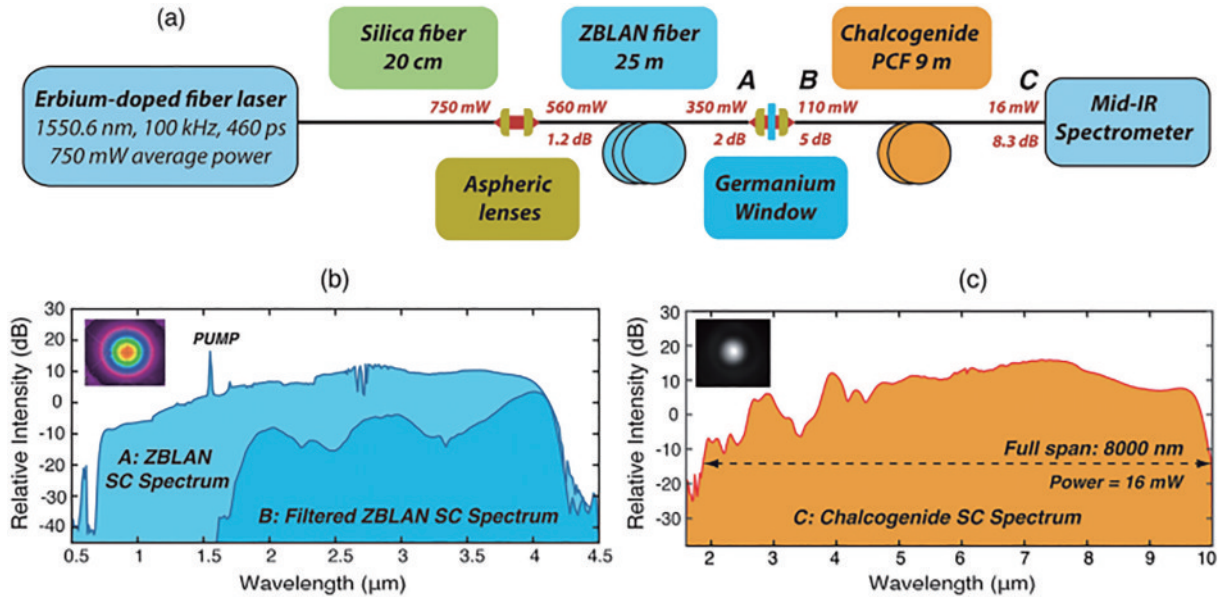


图 9 SiO<sub>2</sub>-ZBLAN 光纤-As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> PCF 的 SC 输出<sup>[51]</sup> (a) 生成 SC 的级联系统结构; (b) 在 ZBLAN 光纤中生成的 SC; (c) 在 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 光纤中生成的 SC

Fig. 9 Output SC of SiO<sub>2</sub>-ZBLAN-As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> PCF<sup>[51]</sup>. (a) Cascade system structure for generating SC; (b) SC generated in ZBLAN fiber; (c) SC generated in As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> fiber

表 3 汇总了近年来基于硫系光纤 SC 的输出功率。可以看到,与传统的 OPA 或 OPO 泵浦方式相比,级联

泵浦的中红外 SC 功率更高,这样不仅能降低实验的成本,而且整体的系统结构体积很小,便携性将大幅提高。

表 3 近年来硫系光纤输出功率的主要成果

Table 3 Main achievements of output power of chalcogenide fibers in recent years

Fiber system	Pump	SC bandwidth	Power	Ref.
As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	2.19 μm/1 ns/100 kHz	2~4 μm	143 mW	[41]
As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	2.45 μm/40 ps/10 MHz	1.9~4.8 μm	565 mW	[42]
Ge <sub>12</sub> As <sub>24</sub> Se <sub>64</sub>	4.0 μm/330 fs/21 MHz	1.8~10 μm	1.26 mW	[22]



表 3 (续)

Fiber system	Pump	SC bandwidth	Power	Ref.
ZBLAN-As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> -As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	Tm-doped fiber amplifier	2–6.5 μm	1.39 W	[10]
As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	Er-doped ZBLAN fiber amplifier	2–5 μm	825 mW	[44]
InF <sub>3</sub> -As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Er-doped fiber amplifier	1.97–5.1 μm	440 mW	[46]
ZBLAN-As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	Tm-doped fiber amplifier	2–6.5 μm	1.13 W	[47]
SiO <sub>2</sub> -ZBLAN-As <sub>38</sub> Se <sub>62</sub>	1.55 μm/3 ns/30 kHz	2–7 μm	6.5 mW	[49]
SiO <sub>2</sub> -ZBLAN-As <sub>2</sub> Se <sub>3</sub>	Er-doped fiber amplifier	2–10 μm	16 mW	[51]

### 4 硫系光纤中红外 SC 相干性

中红外 SC 光源在应用于医疗检测、激光同步、计量学等领域时,其相干性较之谱宽特性显得更为重要。因此,对硫系光纤 SC 相干性的研究具有十分重要的意义。衡量 SC 相干性的一种常用方法是引入相干度这个物理量,其中相干度<sup>[52]</sup>的定义为

$$|g_{12}(\lambda, t_1 - t_2)| = \frac{\left| \langle E_1^*(\lambda, t_1) E_2(\lambda, t_2) \rangle \right|}{\sqrt{\langle |E_1(\lambda, t_1)|^2 \rangle \langle |E_2(\lambda, t_2)|^2 \rangle}}, \quad (2)$$

式中:  $t_1$  和  $t_2$  代表时刻;  $E_1$  和  $E_2$  为该时刻的电场强度;  $E^*$  表示  $E$  的共轭; 角括号表示对全部脉冲取平均。SC 相干性的研究主要是针对每个波长的探讨, 所以取  $t_1 = t_2$ 。相干度  $g_{12}$  的取值范围从 0 到 1, 越接近 1 说明相干性越好, 反之相干性越差。

#### 4.1 硫系阶跃型光纤的 SC 相干性

为了获得宽带的 SC, 泵浦光一般在 ZDW 附近的反常色散区, 这时的频谱展宽机制主要受孤子分裂的影响, 高阶孤子分裂成许多的基态孤子。由于孤子分裂过程带有噪声是其本身固有的, 调制不稳定与噪声的影响会导致 SC 相干性的退化<sup>[53]</sup>。获得高相干 SC 的一种方法是使光纤工作在正常色散区, 此时频谱展宽机制主要是自相位调制与光波破碎, 这两种非线性效应可以有效避免对噪声敏感的动态孤子过程, 从而获得高相干的 SC。2020 年, 加拿大拉瓦尔大学

Robichaud 等<sup>[44]</sup>通过将 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 减反射涂层溅射在 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 阶跃型光纤尖端来减弱菲涅耳反射, 由 3.6 μm 高峰值功率飞秒脉冲 Er<sup>3+</sup>: ZrF<sub>4</sub> 激光泵浦, 获得 2.5~5 μm 的 SC, 输出功率达 825 mW, 为基于 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 光纤中红外 SC 的最高输出功率。由于所设计的 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 阶跃型光纤在 3~5 μm 波段具有全正色散, 因此所得的高功率 SC 还具有很好的相干性。与单包层光纤相比, 双包层结构可以更为灵活地控制光纤性能, 不仅可以使色散更为平坦, 而且在纤芯较大时能确保单模传输。因此, 采用双包层结构是实现阶跃型光纤产生高相干 SC 的一种有效方法。2018 年, 巴古拜技术学院 Khamis 等<sup>[54]</sup>报道一种以 Ge<sub>15</sub>Sb<sub>15</sub>Se<sub>70</sub> 为纤芯材料, Ge<sub>20</sub>Se<sub>80</sub> 和 Ge<sub>20</sub>Sb<sub>5</sub>Se<sub>75</sub> 材料为内外包层的 W 型双包层光纤。制备的光纤不仅表现出平坦的色散, 还具有 0.12 W<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup> 的高非线性值, 在 1 kW 的低峰值泵浦功率就能产生 3.7~12 μm 高度相干的 SC。2020 年, 宁波大学 Xiao 等<sup>[55]</sup>用两步隔离挤压法制备出 W 型双包层 Ge-As-Se-Te 光纤, 其中具有最高折射率的 Ge<sub>15</sub>As<sub>25</sub>Se<sub>15</sub>Te<sub>45</sub> 作为纤芯材料, Ge<sub>20</sub>As<sub>20</sub>Se<sub>17</sub>Te<sub>43</sub>/Ge<sub>20</sub>As<sub>20</sub>Se<sub>15</sub>Te<sub>45</sub> 为内外包层。采用工作波长为 5 μm, 脉宽为 150 fs, 重复频率为 1 kHz 的激光泵浦, 在 19 cm 长芯径为 10 μm 的光纤中产生 1.5~11 μm 的 SC。这是首次有关 Te 基双包层光纤中红外 SC 的研究报道, 该双包层光纤可实现全正色散分布, 其输出 SC 在 3.5~10.5 μm 波段表现出高相干性, 结果如图 10 所示。

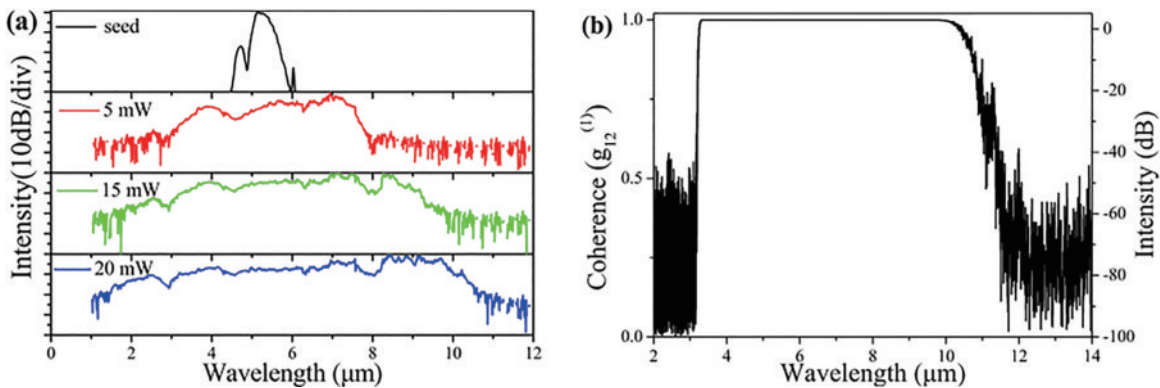


图 10 双包层 Ge-As-Se-Te 光纤<sup>[55]</sup>。(a) 不同泵浦条件下的 SC 输出; (b) 一阶相干度

Fig. 10 Double-cladding Ge-As-Se-Te fiber<sup>[55]</sup>. (a) SC output under different pump conditions; (b) first-order coherence

#### 4.2 硫系微结构型光纤的 SC 相干性

通过调控微结构光纤的波导色散也能达到全正色

散的目的, 从而获得高相干的 SC。2020 年, Medjouri 等<sup>[56]</sup>报道了一种十环六方晶格结构的 GeS<sub>2</sub>-GaS<sub>3</sub>-CsI

硫系 MOF, 如图 11 所示。通过改变 MOF 的内环孔径可实现对色散性能的调控, 当孔径为  $0.6 \mu\text{m}$  时, 可实现全正色散。采用波长为  $3 \mu\text{m}$ 、脉宽为  $50 \text{ fs}$ 、能量为  $3 \text{ nJ}$  的脉冲激光泵浦  $15 \text{ mm}$  长的光纤时, 在  $20 \text{ dB}$  平坦度下获得  $1.45 \sim 5.95 \mu\text{m}$  的高相干 SC 输出。2020 年, 宁波大学 Yuan 等<sup>[57]</sup> 采用数控机床钻孔法, 制造出高度对称的  $\text{Ge}_{20}\text{As}_{20}\text{Se}_{20}\text{Te}_{40}$  四孔 MOF 预制棒, 用四根  $\text{As}_2\text{S}_3$  玻璃棒填充气孔, 拉制全固态 MOF。当芯径小于  $10 \mu\text{m}$  时, 波导色散弥补负的材料色散, 光纤在  $2 \sim 13.5 \mu\text{m}$  表现全正色散, 用波长  $5 \mu\text{m}$  的飞秒激光泵浦芯径为  $9.8 \mu\text{m}$ 、 $16 \text{ cm}$  长的光纤产生  $2 \sim 13.2 \mu\text{m}$  的高相干 SC。2022 年, 北京师范大学 Xiao 等<sup>[58]</sup> 报道一种三环六方晶格结构的全固态硫系 MOF,  $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{Se}_{64.5}$

作为背景材料, 空气孔由  $\text{Ge}_{11.5}\text{As}_{24}\text{S}_{64.5}$  玻璃棒填充, 设计内环棒径为  $0.3 \mu\text{m}$ , 两外环的棒径为  $1 \mu\text{m}$ , 孔间距固定在  $1.7 \mu\text{m}$ 。模拟结果表明在  $14 \mu\text{m}$  波段前呈全正色散, 当采用脉宽  $50 \text{ fs}$ 、波长  $7 \mu\text{m}$ 、峰值功率为  $6 \text{ kW}$  的激光泵浦  $1 \text{ cm}$  长的光纤时, 产生了  $2 \sim 14 \mu\text{m}$  的 SC, 其中在  $3.8 \sim 14 \mu\text{m}$  的 SC 相干系数接近于 1。2022 年, 日本丰田技术研究所 Tong 等<sup>[59]</sup> 报道了一种新型具有保偏特性的全固态硫系微结构光纤, 纤芯和包层的基质材料分别为  $\text{As}_2\text{Se}_3/\text{AsSe}_2$ , 纤芯同一水平方向的左右两侧各有一根  $\text{As}_2\text{S}_5$  玻璃纤维棒。所制备的光纤在  $5 \sim 10 \mu\text{m}$  的波长范围内具有超平坦的全正色散分布, 在波长  $5.3 \mu\text{m}$ 、脉宽  $200 \text{ fs}$  的泵浦条件下, 产生  $2 \sim 10 \mu\text{m}$  宽带高相干的 SC 输出。

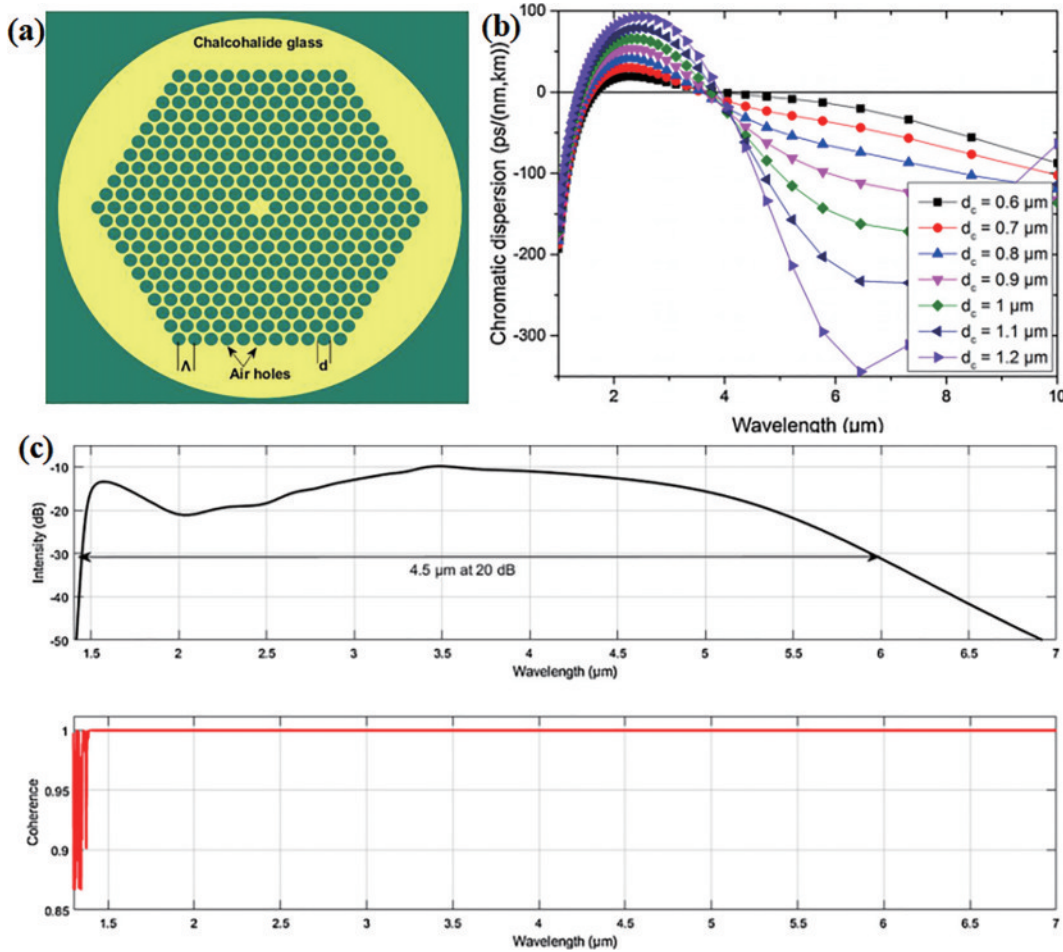


图 11  $\text{GeS}_2\text{-GaS}_3\text{-CsI}$  硫系微结构光纤<sup>[56]</sup>。(a) 光纤的截面图; (b) 在不同孔径下的色散图; (c) SC 输出以及相干曲线  
Fig. 11  $\text{GeS}_2\text{-GaS}_3\text{-CsI}$  chalcogenide microstructure fiber<sup>[56]</sup>. (a) Cross section of optical fiber; (b) dispersion curves at different apertures; (c) SC output and coherence curve

### 4.3 硫系拉锥光纤的 SC 相干性

通过光纤拉锥也能获得高相干的 SC 谱。2019 年, 宁波大学 Li 等<sup>[60]</sup> 报道在  $\text{As}_2\text{S}_3/\text{As}_{38}\text{S}_{62}$  阶跃型光纤中, 通过自制拉锥机精确控制光纤锥腰的结构参数实现全正色散, 同时选择合适大小的芯径确保光纤具有较高的色散平坦度, 最终在  $15 \text{ cm}$  长的  $\text{As}_2\text{S}_3/\text{As}_{38}\text{S}_{62}$  锥形光纤中获得  $1.5 \sim 8.3 \mu\text{m}$  完美相干的 SC 输出。

2020 年, 日本丰田技术研究所 Saini 等<sup>[61]</sup> 将用管棒法制备的纤芯直径为  $15 \mu\text{m}$  的  $\text{AsSe}_2/\text{As}_2\text{S}_5$  阶跃型光纤拉制成锥腰直径为  $7 \mu\text{m}$ , 锥区长度为  $3 \text{ mm}$  的锥形光纤, 在  $2 \sim 3.9 \mu\text{m}$  波段具有正色散。利用波长为  $2.6 \mu\text{m}$ 、峰值功率为  $10.12 \text{ kW}$ 、重复频率为  $1 \text{ kHz}$  泵浦  $3 \text{ cm}$  长的锥形光纤, 获得具有良好相干性的  $1.6 \sim 3.7 \mu\text{m}$  的 SC 输出。2021 年, 宁波大学王莹莹等<sup>[11]</sup> 制备一种双

包层  $\text{Ge}_{15}\text{As}_{25}\text{Se}_{40}\text{Te}_{20}$ / $\text{Ge}_{15}\text{As}_{25}\text{Se}_{45}\text{Te}_{15}$ / $\text{Ge}_{15}\text{As}_{25}\text{Se}_{50}\text{Te}_{10}$  拉锥光纤, 纤芯包层和预制棒分别通过熔融淬冷法和两步挤压法获得, 其中纤芯和内外包层的直径比例固定为 1:3:9。仿真结果表明, 当锥腰直径不高于  $12\ \mu\text{m}$  时光纤具有全正色散特性。拉锥成型后的光纤锥腰直径为  $12\ \mu\text{m}$ 、外包层为  $108\ \mu\text{m}$ 、锥区长度为  $9.8\ \text{mm}$ , 如图 12 所示。以脉宽为  $150\ \text{fs}$ 、重复频率为  $1\ \text{kHz}$ 、平均功率为  $25\ \text{mW}$  的  $6\ \mu\text{m}$  泵浦源进行泵浦, 在  $10\ \text{cm}$  的光纤中获得  $1.5\sim 14.3\ \mu\text{m}$  的宽带 SC, 其中在  $1.8\sim 14\ \mu\text{m}$  波段相干度的值大致为 1, 且相干曲线没有明显

凹陷。

表 4 汇总了近年来三种不同类型硫系光纤 SC 相干性的主要成果。从研究结果看, 研究者为了获得高相干的 SC, 对三种硫系光纤结构本身都进行了一些处理。如采用双包层结构使阶跃型光纤具有更平坦的色散, 微结构光纤和拉锥光纤分别通过调整孔径大小和优化锥腰部分的结构参数来确保光纤具有全正色散特性, 这也再次说明工作在反常色散区的孤子效应和调制不稳定带来的噪声放大是光纤 SC 相干性退化的主要原因。

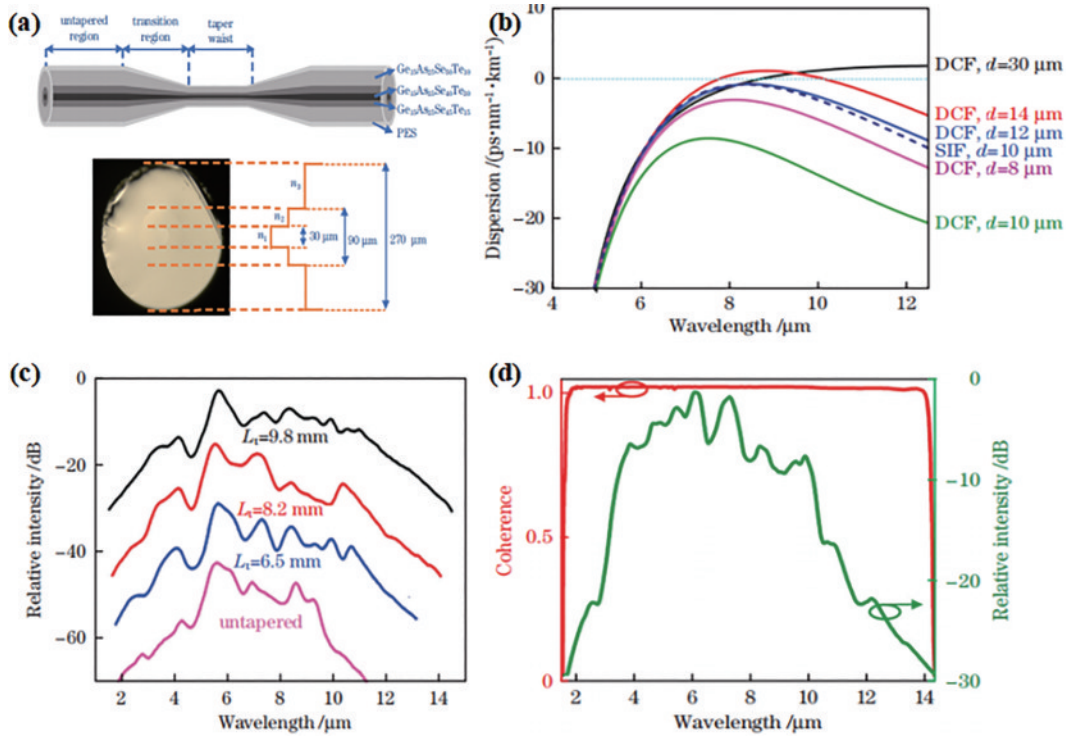


图 12 双包层 Ge-As-Se-Te 拉锥光纤<sup>[11]</sup>。(a) 结构与折射率分布; (b) 色散曲线; (c) SC 输出; (d) 相干曲线

Fig. 12 Double-cladding Ge-As-Se-Te tapered fiber<sup>[11]</sup>. (a) Structure and refractive index profile; (b) dispersion curve; (c) SC output; (d) coherence curve

表 4 近年来三种不同类型硫系光纤 SC 相干性的主要成果

Table 4 Main achievements of SC coherence of chalcogenide fibers with different types in recent years

Fiber type	Glass composition	Fiber length /cm	Pump condition	Coherent spectrum / $\mu\text{m}$	Ref.
Step-index fiber	$\text{As}_2\text{S}_3$	35	$3.6\ \mu\text{m}/1.15\ \text{W}$	2.5–5	[44]
	Ge-As-Se-Te	19	$5\ \mu\text{m}/150\ \text{fs}/1\ \text{kHz}$	3.5–10.5	[55]
	$\text{GeS}_2\text{-GaS}_3\text{-CsI}$	1.5	$3\ \mu\text{m}/50\ \text{fs}/3\ \text{nJ}$	1.45–5.95	[56]
Microstructured fiber	Ge-As-Se-Te/ $\text{As}_2\text{S}_3$	16	$5\ \mu\text{m}/24\ \text{mW}$	2–13.2	[57]
	Ge-As-Se/Ge-As-S	1	$7\ \mu\text{m}/50\ \text{fs}/6\ \text{kW}$	3.8–14	[58]
Tapered fiber	$\text{AsSe}_2/\text{As}_2\text{S}_5$	3	$2.6\ \mu\text{m}/10.12\ \text{kW}/1\ \text{kHz}$	1.6–3.7	[61]
	Ge-As-Se-Te	10	$6\ \mu\text{m}/150\ \text{fs}/1\ \text{kHz}$	1.8–14	[11]

## 5 结束语

近年来, 硫系光纤中红外 SC 研究在国内外取得了巨大进展, 最大展宽已达  $1.7\sim 18\ \mu\text{m}$ , 通过级联泵

浦方式获得的最高输出功率已达  $1.39\ \text{W}$ , 在  $2\sim 14\ \mu\text{m}$  范围获得了相干系数近似为 1 的高相干 SC, 最低光纤损耗已低至  $0.87\ \text{dB/m}$ , 在不同软玻璃之间甚至是硫系阶跃光纤与微结构光纤之间已可以实现熔接。这些

最新研究成果将会对中红外 SC 的广泛应用起到积极的推动作用。但需要注意的是,当前硫系光纤 SC 的泵浦源大多还是 OPA 或 OPO,级联泵浦输出的 SC 功率现在只能达到 W 级,距离小型化、集成化、低价格、高功率的全光纤中红外 SC 光源还有一段距离。相信随着材料的制备与提纯,光纤的设计与拉制、传输理论的发展与完善,硫系光纤中红外 SC 性能会越来越好,在未来获得更广泛的应用。

## 参 考 文 献

- [1] Nguyen D M, Le S D, Lengle K, et al. Demonstration of nonlinear effects in an ultra-highly nonlinear AsSe suspended-core chalcogenide fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(24): 1844-1846.
- [2] 黄值河, 侯静, 彭杨, 等. 基于超连续谱的光子晶体光纤表面等离子体效应[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(1): 11-15.  
Huang Z H, Hou J, Peng Y, et al. Photonic crystal fiber surface plasmon resonance effect based on supercontinuum source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(1): 11-15.
- [3] Medjouri A, Abed D, Becer Z. Numerical investigation of a broadband coherent supercontinuum generation in  $\text{Ga}_8\text{Sb}_{32}\text{S}_{60}$  chalcogenide photonic crystal fiber with all-normal dispersion[J]. Opto-Electronics Review, 2019, 27(1): 1-9.
- [4] Tremblay J É, Malinowski M, Richardson K A, et al. Picojoule-level octave-spanning supercontinuum generation in chalcogenide waveguides[J]. Optics Express, 2018, 26(16): 21358-21363.
- [5] Diouf M, Wague A, Zghal M. Numerical investigation of an ultra-broadband coherent mid-infrared supercontinuum in a chalcogenide  $\text{AsSe}_2\text{-As}_2\text{S}_5$  multimaterial photonic crystal fiber[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2019, 36(2): A8-A14.
- [6] Li J L, Zhao F, Hui Z Q. Mid-infrared supercontinuum generation in dispersion-engineered highly nonlinear chalcogenide photonic crystal fiber[J]. Modern Physics Letters B, 2019, 33(19): 1950211.
- [7] 赵浙明, 沈静飞, 王训四. 基于硫系光纤的中红外超连续谱研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(8): 1600-1608.  
Zhao Z M, Shen J F, Wang X S. Progress in mid-infrared supercontinuum generation in chalcogenide fibers[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(8): 1600-1608.
- [8] 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]. 激光与光电子学进展, 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.
- [9] Lemièrre A, Bizot R, Désévéday 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.
- [10] 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.
- [11] 王莹莹, 张楠, 张培晴, 等. 全正色散双包层拉锥 Ge-As-Se-Te 光纤中的宽带相干超连续谱产生[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101010.  
Wang Y Y, Zhang N, Zhang P Q, et al. Broadband and coherent supercontinuum generation in all-normal-dispersion double-clad Ge-As-Se-Te fiber taper[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101010.
- [12] Wei D P, Galstian T V, Smolnikov I V, et al. Spectral broadening of femtosecond pulses in a single-mode As-S glass fiber[J]. Optics Express, 2005, 13(7): 2439-2443.
- [13] Shaw L B, Thielen P A, Kung F H, et al. IR supercontinuum generation in As-Se photonic crystal fiber [C]//Advanced Solid-State Photonics 2005, February 6-9, 2005, Vienna, Austria. Washington, D. C.: Optica Publishing Group, 2005: TuC5.
- [14] Wu Z H, Xu Y S, Qi D F, et al. Progress in preparation and applications of Te-As-Se chalcogenide glasses and fibers[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 102: 102981.
- [15] Tang J Z, Liu S, Zhu Q D, et al.  $\text{As}_{40}\text{S}_{39}\text{Se}_1/\text{As}_2\text{S}_3$  step index fiber for 1-5  $\mu\text{m}$  supercontinuum generation[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2016, 450: 61-65.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] You C Y, Dai S X, Zhang P Q, et al. Mid-infrared femtosecond laser-induced damages in  $\text{As}_2\text{S}_3$  and  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide glasses[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 6497.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Yu Y, Zhang B, Gai X, et al. 1.8-10  $\mu\text{m}$  mid-infrared supercontinuum generated in a step-index chalcogenide fiber using low peak pump power[J]. Optics Letters, 2015, 40(6): 1081-1084.

- [23] 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..
- [24] Feng Z, Wang J, Wu G L, et al. Arsenic-free low-loss sulfide glass fiber for mid-infrared supercontinuum generation[J]. Infrared Physics & Technology, 2021, 113: 103618.
- [25] Hu Y S, Tian K Z, Li T T, et al. Mid-infrared nonlinear optical performances of Ge-Sb-S chalcogenide glasses[J]. Optical Materials Express, 2021, 11(3): 695-706.
- [26] Zhang B, Yu Y, Zhai C C, et al. High brightness 2.2-12  $\mu\text{m}$  mid-infrared supercontinuum generation in a nontoxic chalcogenide step-index fiber[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2016, 99(8): 2565-2568.
- [27] Zhao Z M, Wu B, Wang X S, et al. Mid-infrared supercontinuum covering 2.0-16  $\mu\text{m}$  in a low-loss telluride single-mode fiber[J]. Laser & Photonics Reviews, 2017, 11(2): 1700005.
- [28] Hossain S, Shah S, Faisal M. Ultra-high birefringent, highly nonlinear  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$  chalcogenide glass photonic crystal fiber with zero dispersion wavelength for mid-infrared applications[J]. Optik, 2021, 225: 165753.
- [29] Monro T M, West Y D, Hewak D W, et al. Chalcogenide holey fibres[J]. Electronics Letters, 2000, 36(24): 1998-2000.
- [30] Nguyen H P T, Tuan T H, Xing L, et al. Supercontinuum generation in a chalcogenide all-solid hybrid microstructured optical fiber[J]. Optics Express, 2020, 28(12): 17539-17555.
- [31] Medjouri A, Abed D. Modelling of all-chalcogenide all-normal dispersion photonic crystal fiber for ultraflat mid-infrared supercontinuum generation[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53(7): 399.
- [32] Møller U, Yu Y, Kubat I, et al. Multi-milliwatt mid-infrared supercontinuum generation in a suspended core chalcogenide fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(3): 3282-3291.
- [33] Lê Cảnh T, Hoang V T, Le H, et al. Supercontinuum generation in all-normal dispersion suspended core fiber infiltrated with water[J]. Optical Materials Express, 2020, 10(7): 1733-1748.
- [34] Islam A S M T U, Ahmad R, Hossen I, et al. Wideband mid-infrared supercontinuum generation in chloroform filled suspended core fiber[C]//2020 2nd International Conference on Sustainable Technologies for Industry 4.0 (STI), December 19-20, 2020, Dhaka, Bangladesh. New York: IEEE Press, 2020.
- [35] Jiao K, Wang X G, Liang X L, et al. Single-mode suspended large-core chalcogenide fiber with a low zero-dispersion wavelength for supercontinuum generation[J]. Optics Express, 2021, 30(1): 641-649.
- [36] Mouawad O, Kedenburg S, Steinle T, et al. Experimental long-term survey of mid-infrared supercontinuum source based on  $\text{As}_2\text{S}_3$  suspended-core fibers[J]. Applied Physics B, 2016, 122(6): 177.
- [37] 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.
- [38] Zhang N, Peng X F, Wang Y Y, et al. Ultrabroadband and coherent mid-infrared supercontinuum generation in Te-based chalcogenide tapered fiber with all-normal dispersion[J]. Optics Express, 2019, 27(7): 10311-10319.
- [39] Leonov S O, Wang Y C, Shiryayev V S, et al. Coherent mid-infrared supercontinuum generation in tapered suspended-core  $\text{As}_{39}\text{Se}_{61}$  fibers pumped by a few-optical-cycle Cr: ZnSe laser[J]. Optics Letters, 2020, 45(6): 1346-1349.
- [40] Shamim M H M, Alamgir I, Correr W, et al. Mid-infrared soliton self-frequency shift in a cascade of silica, fluoride, and chalcogenide fibers[C]//Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics. Optica Publishing Group, 2022: ITh2B. 8.
- [41] Yao J M, Zhang B, Yin K, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in step-index  $\text{As}_2\text{S}_3$  fibers pumped by a nanosecond shortwave-infrared supercontinuum pump source[J]. Optics Express, 2016, 24(13): 15093-15100.
- [42] Gattass R R, Shaw L B, Nguyen V Q, et al. All-fiber chalcogenide-based mid-infrared supercontinuum source [J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18(5): 345-348.
- [43] Kubat I, Petersen C R, Møller U V, et al. Thulium pumped mid-infrared 0.9-9  $\mu\text{m}$  supercontinuum generation in concatenated fluoride and chalcogenide glass fibers[J]. Optics Express, 2014, 22(4): 3959-3967.
- [44] 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.
- [45] 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 source[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(12): 1216002.
- [46] Swiderski J, Grzes P. High-power mid-IR supercontinuum generation in fluorindate and arsenic sulfide fibers pumped by a broadband 1.9-2.7  $\mu\text{m}$  all-fiber laser source[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 141: 107178.
- [47] Yan B, Huang T, Zhang 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.
- [48] Yang L L, Wang Y Y, Jiao K, et al. High-coupling efficiency and robust fusion splicing between fluorotellurite and chalcogenide fibers[J]. Infrared Physics & Technology, 2022, 122: 104075.
- [49] Petersen C R, Moselund P M, Petersen C, et al. Spectral-temporal composition matters when cascading supercontinua into the mid-infrared[J]. Optics Express,

- 2016, 24(2): 749-758.
- [50] 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.
- [51] Venck S, St-Hilaire F, Brilland L, et al. 2-10  $\mu\text{m}$  mid-infrared fiber-based supercontinuum laser source: experiment and simulation[J]. Laser & Photonics Reviews, 2020, 14(6): 2000011.
- [52] Medjouri A, Abed D. Design and modelling of all-normal dispersion  $\text{As}_{39}\text{Se}_{61}$  chalcogenide photonic crystal fiber for flat-top coherent mid-infrared supercontinuum generation [J]. Optical Fiber Technology, 2019, 50: 154-164.
- [53] Godin T, Combes Y, Ahmad R, et al. Far-detuned mid-infrared frequency conversion via normal dispersion modulation instability in chalcogenide microwires[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 1885-1888.
- [54] Khamis M A, Sevilla R, Ennser K. Design of W-type index chalcogenide fiber for highly coherent mid-IR supercontinuum generation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(23): 5388-5394.
- [55] Xiao J, Tian Y M, Zhao Z M, et al. Investigation of tellurium-based chalcogenide double-clad fiber for coherent mid-infrared supercontinuum generation[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 55: 102144.
- [56] Medjouri A, Abed D. Theoretical study of coherent supercontinuum generation in chalcogenide glass photonic crystal fiber[J]. Optik, 2020, 219: 165178.
- [57] Yuan Y, Yang P L, Peng X F, et al. Ultrabroadband and coherent mid-infrared supercontinuum generation in all-normal dispersion Te-based chalcogenide all-solid microstructured fiber[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2020, 37(2): 227-232.
- [58] Xiao K, Ye Y, Min R. Broadband coherent mid-infrared supercontinuum generation in all-chalcogenide microstructured fiber with all-normal dispersion[J]. Frontiers in Physics, 2022: 577.
- [59] Tong H T, Koumura A, Nakatani A, et al. Chalcogenide all-solid hybrid microstructured optical fiber with polarization maintaining properties and its mid-infrared supercontinuum generation[J]. Optics Express, 2022, 30(14): 25433-25449.
- [60] Li G T, Peng X F, Dai S X, et al. Highly coherent 1.5 - 8.3  $\mu\text{m}$  broadband supercontinuum generation in tapered As-S chalcogenide fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(9): 1847-1852.
- [61] Saini T S, Tuan T H, Suzuki T, et al. Coherent mid-IR supercontinuum generation using tapered chalcogenide step-index optical fiber: experiment and modelling[J]. Scientific Reports, 2020, 10: 2236.