第 49 卷第 8 期
2021 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 8
August，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200025

综 合 评 述

基于硫系光纤的中红外超连续谱研究进展

赵浙明[1,2]，沈静飞[3]，王训四[2]

(1. 嘉兴南湖学院数理系，浙江 嘉兴 314001；2. 宁波大学高等技术研究院红外材料及器件实验室，浙江 宁波 315211；
3. 嘉兴学院生物与化学工程学院，浙江 嘉兴 314001)

摘 要：硫系光纤具有优良的宽红外波段透过性能和高非线性特性，是目前唯一能产生覆盖中、远红外波段超连续谱的非线性光纤，近 5 年来国际上在 2～16 μm 中红外超连续谱的产生取得了重要进展。从硫系阶跃型光纤、微结构光纤和多包层光纤中的超连续谱实验输出及全光纤化等几个方面综述了 8 μm 以外中红外超连续谱的最新研究进展。

关键词：硫系；玻璃光纤；中红外超连续谱；非线性光学；全光纤化
中图分类号：TN213　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)08–1600–09
网络出版时间：2021–06–17

Progress in Mid-infrared Supercontinuum Generation in Chalcogenide Fibers

ZHAO Zheming[1,2], *SHEN Jingfei*[3], *WANG Xunsi*[2]

(1. Mathematics & Physics Department, Jiaxing Nanhu University, Jiaxing 314001, Zhejiang, China; 2. Laboratory of Infrared Materials & Devices, The Research Institute of Advanced Technologies, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 3. College of biological and chemical engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314001, Zhejiang, China)

Abstract: Chalcogenide (ChG) fibers become the only nonlinear fibers for midwave- and longwave-infrared supercontinuum (SC) generation due to the high transmittance in infrared region and high nonlinearity. The results of work on mid-infrared SC in the last five years were reported. This review represented recent development on ChG fibers, including experimental SC generation of step-index, micro-structured & multi-clad chalcogenide fibers and all-fiberized SC sources.

Keywords: chalcogenide; glass fiber; mid-infrared supercontinuum generation; nonlinear optics; all-fiberized

中红外波段(2～16 μm)覆盖了绝大部分有机物和无机物的分子特征吸收“指纹”区，为了解分子结构及其相关学科提供了一个强大的光学分析工具[1]。此外，该波段又覆盖了 3～5 μm 和 8～14 μm 这两个最重要的大气窗口，进一步拓展了其在大气监测、生物医疗及军事遥感等诸多领域的广泛应用。该领域的开发需要发展一种宽光谱激光光源——中红外超连续谱光源。近年来，利用光纤高非线性产生高相干性、高亮度和极宽谱的超连续谱光源(SC)，日益成为红外波段最具吸引力的光源研究热点[2]。常用的非线性光纤介质包括石英、重金属氧化物、氟化物和硫系玻璃等。受限于材料的本征吸收限制，石英光纤常用于 2 μm 以内的近红外波段，重金属氧化物玻璃(碲酸盐玻璃为代表)和氟化物玻璃(ZBLAN 为代表)光纤常用于产生 5 μm 以内的中红外 SC。硫系玻璃[3]是 VIA 主族元素(S、Se、Te)和一些其它元素组合而成的非氧化物玻璃，具有高线性折射率(>2)、低声子能量(<350 cm^{-1})和组分可调等特点，可覆盖近、中、远红外波段(其红外透过长波带边可达 20 μm 以上[4])，且具有极高的非线性折射

收稿日期：2021–01–03。　修订日期：2021–02–17。
基金项目：国家自然科学基金(61705091，61875097)；浙江省自然科学基金(LY20F050010，LR18F050002)；浙江省高校领军人才计划，嘉兴市杰出人才计划。
通信作者：赵浙明(1982—)，男，博士，副教授。

Received date: 2021–01–03.　**Revised date:** 2021–02–17.
Correspondent author: ZHAO Zheming (1982–), male, Ph. D., Associate Professor.
E-mail: zhaozheming_27@sina.com

率(比石英高 2～3 个数量级)。因此，硫系光纤是实现覆盖 2～16 μm 中红外波段 SC 谱产生的唯一候选介质。

本文回顾了国内外近 5 年基于硫系光纤产生的 8 μm 以外中红外 SC 谱输出，按光纤结构分别对阶跃型和微结构硫系光纤中的 SC 谱产生进行了综述和展望。

1　阶跃型硫系光纤中的中红外 SC 谱输出

按玻璃组分元素 As，硫系光纤可分为含 As 元素和不含 As 元素这两类基质，Se 基硫系光纤的典型代表为 AsSe、GeAsSe 和 GeSbSe 光纤，Te 基硫系光纤的典型代表为 GeAsSeTe 和 GeTe-AgI。为了获得 SC 谱的高效展宽，通常采取泵浦激光波长与光纤的零色散点波长(ZDW)相匹配[5]。由于硫系光纤底层的材料色散零点波长较大(以 As_2Se_3 为例：>7 μm)，普通阶跃型硫系光纤具有很宽的正常色散区分布。正常色散区的非线性作用机制以自相位调制(SPM)为主，频谱展宽需要极高的峰值功率需求，因此采用短波长激光泵浦硫系光纤所获得的 SC 谱展宽效果并不明显。故为了探索硫系光纤的 SC 谱产生极限，绝大部分超宽 SC 谱实验采用了高峰值功率的飞秒脉冲+光参量放大器(OPA)/光参量振荡器(OPO)泵浦方案。

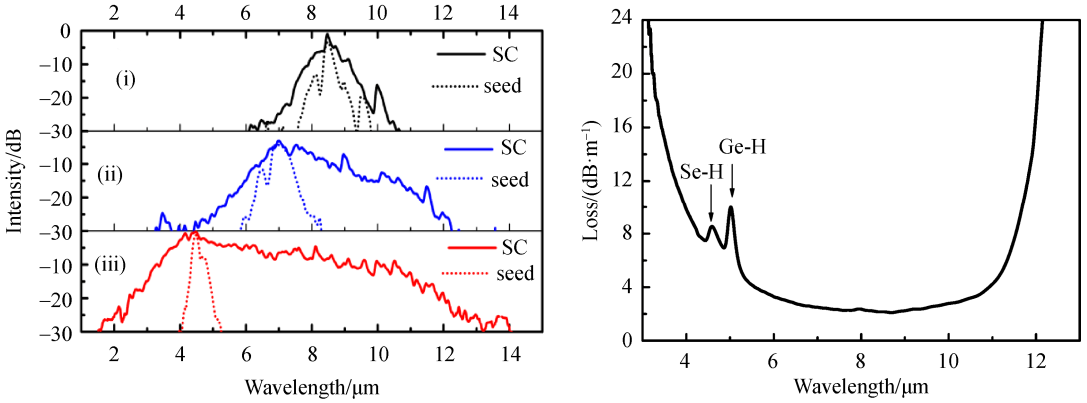
2014 年，丹麦科技大学 Bang 课题组率先获得了首个 10 μm 以外覆盖中红外分子频谱指纹区的 SC 谱[6]，采用诺丁汉大学 Seddon 课题组所制备的小芯径 $As_{40}Se_{60}$ 芯/$Ge_{10}As_{23.4}Se_{66.6}$ 包层硫系光纤(数值孔径 N_A 约为 1)，以 OPA 激光(波长为 4.5 或 6.3 μm，重频 1 kHz，脉宽约为 100 fs)泵浦在 85 mm 长的光纤中获得了谱宽为 1.5～11.7 μm 或 1.4～13.3 μm 的超宽红外 SC 谱实验结果。该结果首次展现了 Se 基硫系光纤在整个红外波段 SC 谱产生的强悍性能。

2015 年，澳洲国立大学 Yu 等[7]利用 OPA 激光对 $Ge_{12}As_{24}Se_{64}$ 芯/ $Ge_{10}As_{24}S_{66}$ 阶跃型光纤泵浦获得了谱宽为 1.8～10 μm 的 SC 谱输出(波长为 4 μm，脉宽 330 fs)；其所用光纤参数如下：长度 11 cm，纤芯约为 4 μm (数值孔径 N_A 约为 1.3)。该光纤由江苏师范大学杨志勇课题组提供。

2016 年丰田工业大学 Cheng 等[8]在自制 As_2Se_3 芯/As_2Se_5 包层光纤中泵浦获得了 2～15.1μm 的超宽 SC 谱输出，该实验采用了远离 ZDW 的反常色散区泵浦：泵浦波长 9.8 μm (脉宽约 170 fs、重频 1 kHz)，借助于极短光纤长度(仅为 3 cm)，该 SC 谱展宽波长几乎达到了 AsSe 玻璃基质的红外透过长波截止边带。类似的，基于 OPA 泵浦方案，2016 年宁波大学 Ou 等[9]在 $Ge_{15}Sb_{25}Se_{60}$ 光纤(长度 20 cm)中观察到了覆盖 1.8～14 μm 波段的 SC 谱实验输出，同年江苏师范大学杨志勇教授课题组[10]也在 GeSbSe 光纤中获得了谱宽覆盖 2.2～12 μm 的 SC 谱输出。相比于传统的 As_2Se_3，GeSbSe 玻璃基质具有较好的环保性和更高的非线性折射率，缺点是 GeSbSe 光纤的传输损耗较高，不利于商业化。

由于受 Se–Se 声子振动吸收限制，Se 基硫系光纤产生的 SC 谱展宽无法越过 15 μm，因此人们将目光转向了长波红外性能更好的 Te 基硫系光纤，以期获得更宽的 SC 谱输出。Te 元素的金属性强、电导率高使得 Te 基硫系光纤的传输损耗一直居高不下，一直未见 SC 谱实验。2016 年，宁波大学 Zhao 等利用改进的隔离式挤压法制备了芯包比为 1:5 的阶跃型低损耗 $Ge_{20}As_{20}Se_{15}Te_{45}$ 芯/$Ge_{20}As_{20}Se_{17}Te_{43}$ 包层光纤，光纤的背景损耗约 2 dB/m，如图 1 所示。由于该光纤具有极宽的正常色散区分布(ZDW 大于 10 μm)，故采取了在光纤中强杂质吸收峰波长附近的正常色散区泵浦。泵浦参数为：波长 4.5 μm，脉宽 150 fs/重频 1 kHz，在长度 22 cm 的光纤中获得了覆盖 1.5～14 μm 波段的超宽 SC 谱输出[11]。该实验结果表明，借助于超短脉冲的高峰值功率优势，在硫系光纤中的强杂质吸收峰附近泵浦也可获得脉冲的极大展宽。

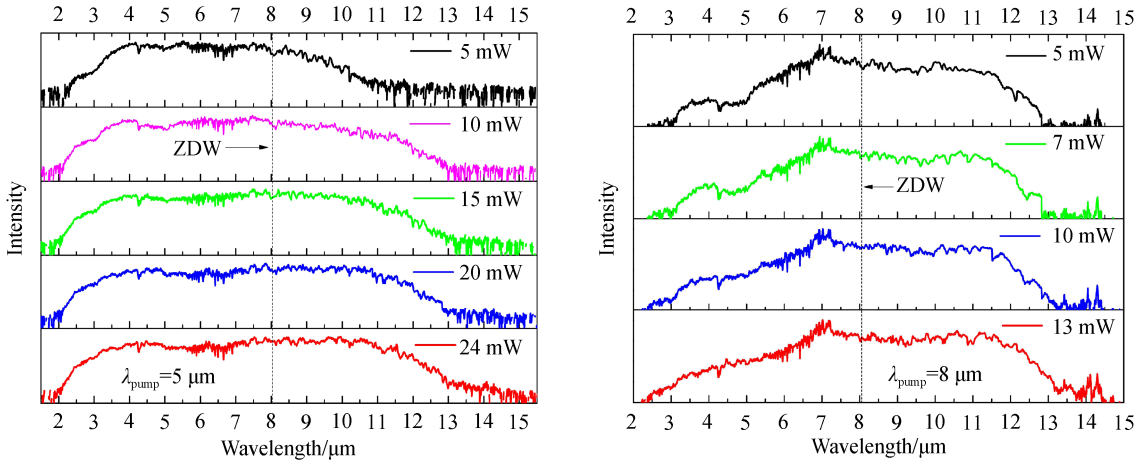
随后，该研究小组采用了 2 次挤压法制备了芯包比为 1:25 的小芯径准单模 $Ge_{20}As_{20}Se_{15}Te_{45}$ 光纤，并对比了正色散区中的杂质吸收峰附近泵浦和近 ZDW 泵浦的 SC 谱实验结果[12]。结果表明：两种泵浦方式均可获得脉冲的极大展宽，杂质吸收峰会明显影响 SC 谱输出的平坦性—即对于具有较强–H 键杂质吸收的硫系光纤而言，选择–H 键杂质吸收峰附近泵浦可获得平坦性更好的 SC 谱输出，如图 2 所示。受限于 Se–Se 多声子振动吸收，尽管采用了短纤泵浦(约 20 cm)，依然未能在 GeAsSeTe 光纤实现覆盖 16 μm 的 SC 谱输出。类似的，2019 年法国勃艮第大学在自制 $Ge_{20}Se_{60}Te_{20}$/ $Ge_{20}Se_{70}Te_{10}$ 阶跃型光纤中也观察到了覆盖 2～14 μm 波段的 SC 谱输出[13]，泵浦参数为：波长 7.7 μm，脉宽 65 fs/重频 1 kHz，纤芯 10 μm，光纤长度 4 cm。



(a) SC results (b) Fiber loss

图 1 $Ge_{20}As_{20}Se_{15}Te_{45}$ 光纤的超连续谱实验结果(a)及光纤损耗(b)

Fig. 1 Experimental SC results (a) and fiber loss (b) of $Ge_{20}As_{20}Se_{15}Te_{45}$ fiber



(a) Fiber pumped at absorption peak wavelength (b) Fiber pumped at ZDW

图 2 单模 GeAsSeTe 光纤的超连续(SC)谱实验结果

Fig. 2 Experimental SC results of sing-mode GeAsSeTe fiber

2017 年，Zhao 等[14]在自制 GeTe-AgI 光纤中成功获得了覆盖 2～16 μm 红外波段的极宽 SC 谱输出。迄今为止，该结果依然是光纤中产生 SC 谱的最宽记录。泵浦参数为：波长 7 μm，脉宽 150 fs/重频 1 kHz，光纤长度为 14 cm，光纤在 8～14μm 波段的传输损耗小于 10 dB/m。该光纤采用了巧妙的双包层结构以实现小芯径目标设计，同时也实现了基质材料中的金属卤化物防护：首先采用一次挤压法获得芯包比为 1:2 的阶跃型$(GeTe_{4.3})_{90}(AgI)_{10}$/$(GeTe_4)_{90}(AgI)_{10}$ 光纤预制棒，然后通过再次挤压制备了稳定型 GeSbSe 玻璃层包覆的 GeTe-AgI 光纤预制棒，光纤端面如图 3 所示。

为了改善传统 Se 基玻璃基质在近红外波段的透过性，实现覆盖可见光至中红外波段的全波谱 SC 输出，研究人员尝试了对硫系玻璃进行改性。2019 年，宁波大学 Zhao 等[15]通过引入金属卤化物增大了硫系玻璃的带隙并降低了材料色散零点，纤芯玻璃的材料 ZDW 仅为 3.5 μm；采用稳定型硫系玻璃的外包层保护制备了双包层硫卤光纤，采用 2.9 μm/6.3 μm OPA 激光泵浦获得了覆盖(1～10 μm)/(1～13 μm)的 SC 谱输出(如图 4a 和 4b 所示)，所用光纤长度为 13 cm。但该材料基质的传输损耗偏大，输出 SC 谱的覆盖范围不如 AsSe 光纤。同年，Jiao 等[16]尝试了在 GeAsSe 玻璃基质中引入 I 元素以改善玻璃的光学带隙和材料色散，并制备了较低损耗的 GeAsSe-I 光纤，光纤的 ZDW 约为 4 μm，以 OPA 泵浦源在光纤的反常色散区泵浦获得了覆盖 1.2～15.2 μm 波段的 SC 谱输出，如图 4 c 所示，再次显示了含卤硫系光纤在全波红外 SC 谱产生的良好潜力。若通过进一步组分优化和制备工艺的改进，未来在硫卤光纤中输出覆盖可见光至中红外的全波 SC 谱将成为可能。

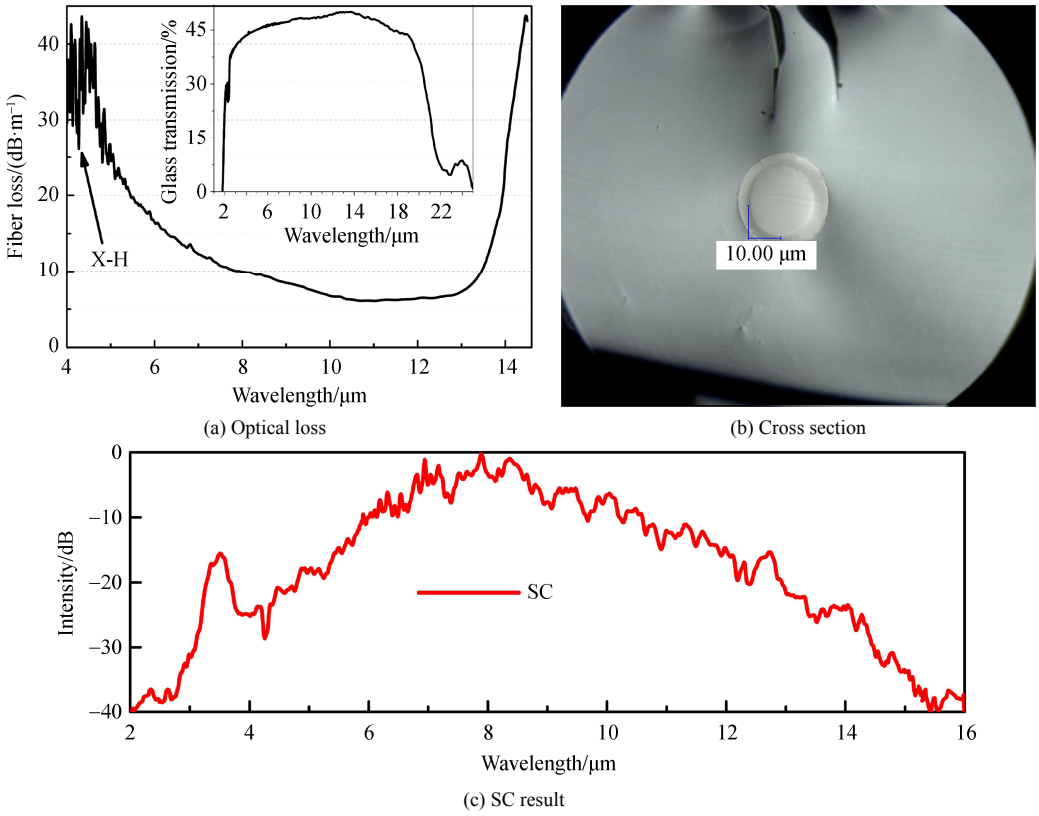


图 3　GeTe-AgI 光纤的损耗(a)、端面(b)及超连续谱实验结果(c)

Fig. 3　Optical loss (a), cross section (b) of GeTe-AgI fiber and its SC results (c)

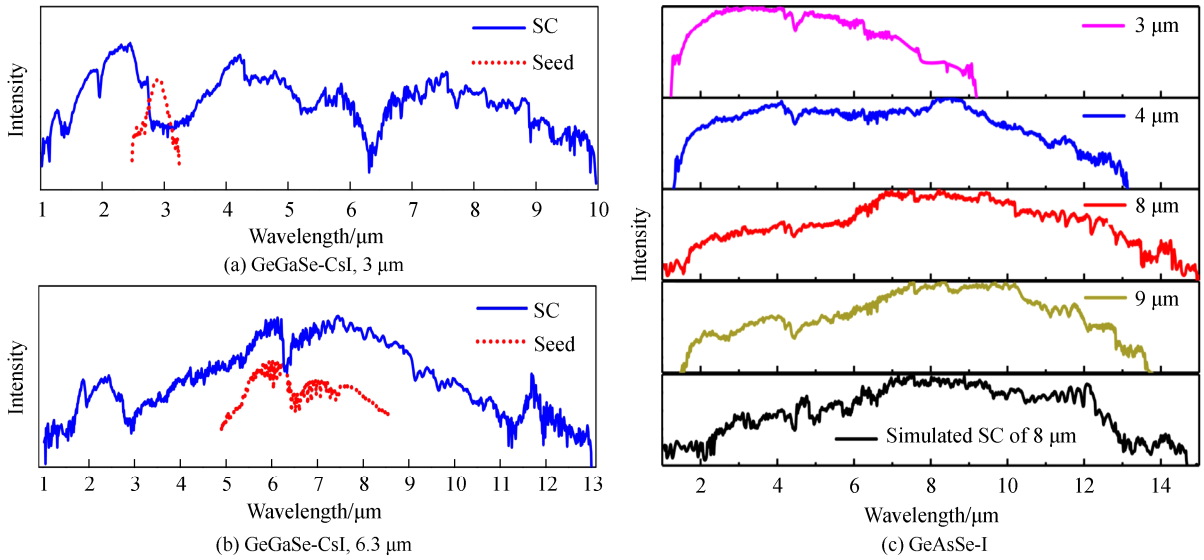


图 4　硫卤光纤的 SC 谱输出

Fig. 4　Experimental SC results of chalco-halide fiber

2　微结构硫系光纤中的中红外 SC 谱输出

尽管利用 OPA 方案可输出极宽谱的中红外 SC，但是 OPA 系统体积庞大且输出平均功率低。为了提高硫系光纤 SC 谱的实用性，必须得实现小型化和便携性。采用微结构设计是调节色散和降低光纤 ZDW 的有效方法，但微结构硫系光纤的制备难度较大，常用的制备方法包括钻孔法、堆积法、筑模法和挤压法等。

2017 年，丹麦科技大学 Peterson 等[17]对低损耗 $Ge_{10}As_{22}Se_{68}$ 光子晶体光纤(PCF)进行拉锥，将 ZDW 从 4.8 μm 蓝移至 3.6 μm，并通过优化拉锥长度和非

拉锥长度，最终获得了覆盖 1～8 μm (输出功率 57.3 mW)或 1～11.5μm 波段(输出功率 35.4 mW)的 SC 谱。泵浦方案采用了 1.04 μm 固体激光器+OPG 方式产生 4 μm 泵浦激光，脉宽 252 fs/重频 21 MHz，该光纤来自于法国 SelenOptics，采用筑模法[18]制得。

2018 年，宁波大学 Wu 等[19]采用挤压法自制四孔悬吊芯 $Ge_{20}As_{20}Se_{15}Te_{45}$ 光纤研究了中红外 SC 谱的产生，通过拉锥方式可将 ZDW 从 10 μm 蓝移至 5 μm 附近，采用 5 μm OPA 激光泵浦获得了覆盖 1.7～11.3 μm 波段的 SC 谱，所用光纤长度为 20 cm。2019 年，法国勃艮第大学[13]以自制 3 孔悬吊芯 $Ge_{20}Se_{60}Te_{20}$ 光纤研究了 ZDW 蓝移情况，当纤芯直径分别为 12.7 μm 和 6 μm 时，对应的 ZDW 分别约为 5 μm 和 3.7 μm，采用 5.5 μm OPA 激光泵浦该悬吊芯光纤(纤芯直径为 12.7 μm)获得了覆盖 2～11.5 μm 波段的 SC 谱。2019 年宁波大学 Yuan 等[20]采用钻孔法制备了 $Ge_{15}Sb_{15}Se_{70}$ 四孔悬吊芯光纤，光纤的 ZDW 约为 3.3 μm，采用 3.5 μm OPA 激光泵浦该光纤(长度 14 cm)获得了覆盖 1.5～12 μm 波段的 SC 谱。

空气孔微结构光纤的不利因素是易被环境所污染，且空气孔中的水分子会极大影响中红外波段的传输损耗，因此科研人员开始转向全固态微结构硫系光纤研究。2020 年，宁波大学 Yuan 等[21]以 $Ge_{20}As_{20}Se_{20}Te_{40}$ 和 As_2S_3 玻璃基质设计并制备了 1 种四芯全固态微结构光纤(套管法)，模拟结果表明该光纤在 2～13.5 μm 波段区间具备全正色散区分布特点；采用 5 μm OPA 激光泵浦 16 cm 长光纤(纤芯直径 9.8 μm)获得了覆盖 2～13.2 μm 波段的高相干 SC 谱输出。同年，日本丰田工业大学 Hoa 等[22]以 As_2Se_3/$AsSe_2$/As_2S_5 玻璃基质设计并制备了一种 7 芯全固态微结构硫系光纤(套管法)；通过结构优化获得了色散超平坦的全正色散分布，利用 5 μm OPA 激光泵浦可获得覆盖 2.2～10 μm 波段的平坦 SC 谱输出。

3 硫系光纤 SC 谱的相干性

SC 谱的另一个评价指标是相干性，相干性的评价可用如下的相干度公式[5]来表征：

$$\left|g_{12}^{(1)}(\lambda,t_1-t_2)\right|=\left|\frac{\left\langle E_1^*(\lambda,t_1)E_2(\lambda,t_2)\right\rangle}{\sqrt{\left\langle\left|E_1(\lambda,t_1)\right|^2\right\rangle\left\langle\left|E_2(\lambda,t_2)\right|^2\right\rangle}}\right| \quad (1)$$

其中：λ 为波长；E 为 t 时刻对应的电场强度；角括号表示整体平均值。SC 谱的相干性研究主要讨论与波长有关的相干性，因此取 t_1–t_2=0。此处的比例系数 $\left|g_{12}^{(1)}\right|$ 也称相干因子，其取值范围为 0～1，比例系数越大，表示 SC 谱的相干性越好，反之则表示相干性越差。

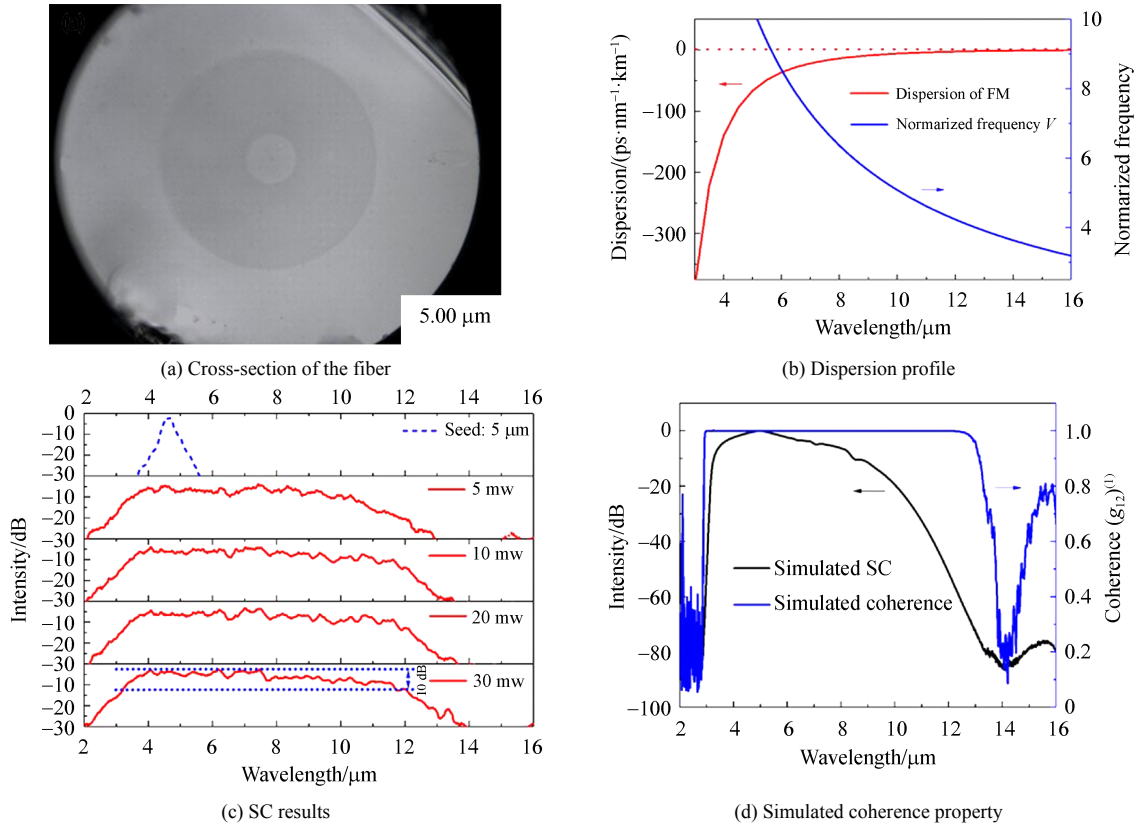
从 SC 谱产生的非线性作用机制来看，正常色散区以自相位调制(SPM)为主，反常色散区以孤子效应为主。硫系光纤的材料 ZDW 均位于长波红外区域，普遍具有很宽的正常色散区分布，因此通过波导色散调控较易于获得全正常色散区分布。因此，通常采用超短脉冲泵浦全正色散光纤以获得高相干 SC 谱输出。

2017 年日本丰田工业大学 Nagasaka 等[23]以 As_2Se_3/$AsSe_2$/As_2S_5 玻璃基质设计并制备了一种折射率以高中低分布的双包层硫系光纤，通过优化纤芯尺寸和第一包层尺寸来调节光纤色散，模拟结果显示该光纤具有色散平坦型的全正色散区特性(3.8～12.6 μm 区间的色散波动仅为[(–10±10) ps/(nm·km)]，采用 10 μm OPA 激光(脉宽 200 fs)泵浦 2.8 cm 长光纤获得了覆盖 2～14 μm 波段的高相干 SC 谱。2019 年宁波大学 Zhan 等[24]对 $Ge_{20}As_{20}Se_{15}Te_{45}$/ $Ge_{20}As_{20}Se_{20}Te_{40}$ 阶跃型光纤进行拉锥获得了全正色散光纤，采用 5.5 μm OPA 激光泵浦该拉锥光纤(长度 7 cm)获得了覆盖 1.7～14 μm 波段的高相干 SC 谱。2019 年宁波大学 Jiao 等[25]利用 GeAsSeTe 玻璃极大的材料 ZDW 优势，采用 W 型折射率分布的双包层结构设计并制备了低损耗 GeAsSeTe 双包层光纤(传输损耗低于 1 dB/m)，采用 5 μm OPA 激光泵浦该光纤(长度 22 cm)获得了覆盖 2～14 μm 波段的超平坦高相干 SC 谱输出，如图 5 所示。2020 年宁波大学 Xiao 等[26]对 W 型折射率分布的双包层 GeAsSeTe 光纤进行了详细的结构优化，研究了纤芯直径、第 1 包层/第 2 包层之比对光纤色散的影响，采用 5 μm OPA 激光泵浦该光纤获得了覆盖 1.5～ 11 μm 波段的高相干 SC 谱输出。

随着红外激光技术的发展，高功率中红外锁模光纤激光器的出现给硫系光纤的直接泵浦输出超宽 SC 谱带来了新的希望。2015 年，Duval 等[27]报道了首个输出波长为 2.8 μm 的光纤激光器，其通过 Er^{3+} 掺杂氟化物光纤获得了脉宽 207 fs/峰值功率为 3.5 kW 的 2.8 μm 飞秒激光输出。2016 年，澳洲麦考瑞大学 Antipov 等[28]通过 Ho 掺杂氟化物光纤实现了输出波长为 2.9 μm 的锁模光纤激光器，脉宽为 180 fs，峰值功率高达 37 kW。利用该泵浦源，2017 年麦考瑞大学 Hudson 等[29]在 As_2Se_3/As_2S_3 拉锥光纤中获得了谱宽覆盖 1.8～9.5 μm/功率 30 mW 的 SC 谱输出，如图 6 所示。但受拉锥光纤的亚波长尺寸

(纤芯仅为 3 μm)影响，该光纤的激光传输功率受到了限制(输出仅为 30 mW)，此外 10 μm 以外的 SC 谱成分光以倏逝波为主(包层能量占比达 72%)，输出光束质量差。

2018 年，美国密西根大学 Martinez 等[30]采用 ZBLAN 光纤(长 6.5 m)-As_2S_3 光纤(长 4 m)-As_2Se_3 光纤(长 4 m)级联方案实现了谱宽输出 1.6～11 μm 的全光纤化中红外 SC 谱光源，泵浦源采用了 1.553 μm

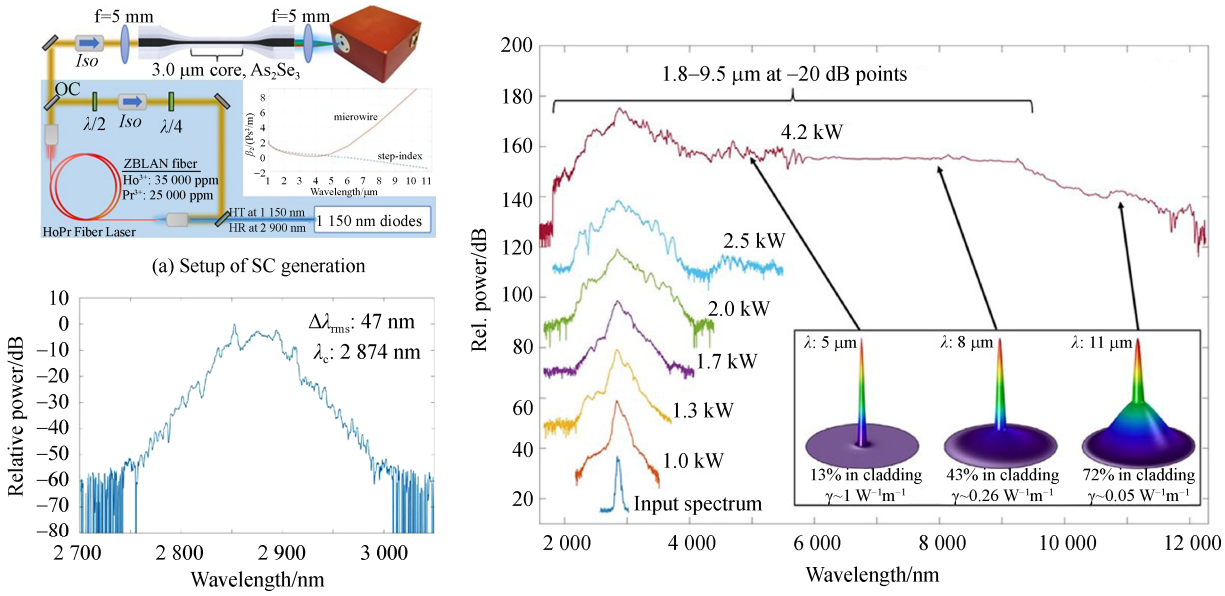


(a) Cross-section of the fiber　(b) Dispersion profile

(c) SC results　(d) Simulated coherence property

图 5　全正色散 Te 基硫系光纤及其超平坦、高相干 SC 谱

Fig. 5　All-normal dispersion fiber based on GeAsSeTe glass and its ultra-flat & high coherent SC



(a) Setup of SC generation

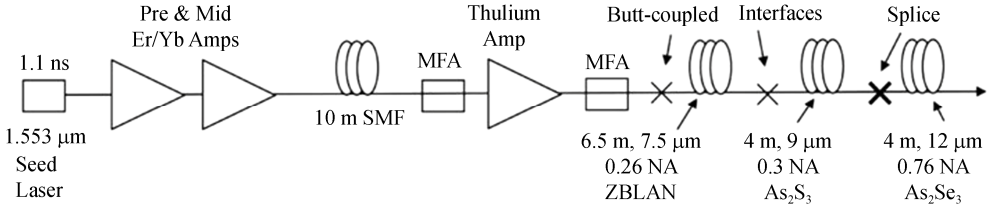
(b) Spectrum of 2.9 μm laser　(c) SC results

图 6　2.9 μm 激光泵浦拉锥 As_2Se_3 光纤所得 SC 谱[29]果

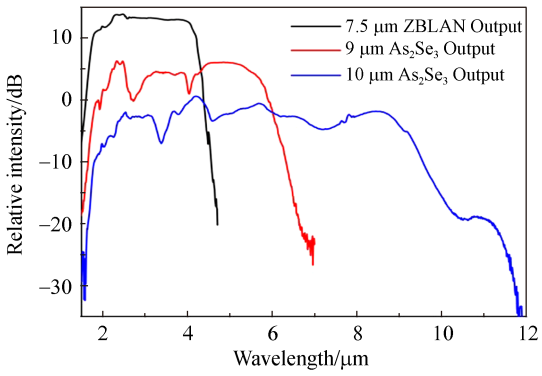
Fig. 6　SC results generated in tapered As_2Se_3 fiber pumped by 2.9 μm fiber laser [29]

种子光经多级放大构成的 MOPA，如图 7 所示。该方案的巧妙之处在于采用商用高功率光纤激光器泵浦 ZBLAN 光纤产生 4.5 μm 以外的 SC 谱(功率约 4.88 W)，该 SC 谱可跨越 As_2S_3 光纤中的 S—H 强吸收峰困扰(4 μm)，随后由 As_2S_3 光纤接力进一步将 SC 谱展宽至 As_2Se_3 光纤的 ZDW 附近(6.5 μm)，同时 SC 谱的平均功率得以降低(1.39 W)，最后由较低激光抗损伤性能但高非线性的 As_2Se_3 光纤将频谱进行终极展宽至 11.4 μm，最后输出的 SC 谱功率高达 417 mW，整个 SC 谱输出光斑依旧保持着良好的 Gauss 特性。

2020 年，法国 SelenOptics 联合勃艮第大学[31]采用了 ZBLAN 光纤(长 25 m)和 As_2Se_3 PCF(长 9 m)级联泵浦获得了谱宽覆盖 2～10 μm、功率为 16 mW 的中红外 SC 谱输出，该泵浦方案并未采用常见的掺铥光纤放大器形式，而是以掺铒光纤激光器(平均功率为 750 mW，重频 100 kHz，脉宽 460ps)输出的 1550 nm 激光直接泵浦 ZBLAN 光纤将频谱展宽至 4 μm 以外，然后由 As_2Se_3 PCF 光纤接力展宽获得 2～10 μm 的 SC 谱，如图 8 所示。该方案的关键是



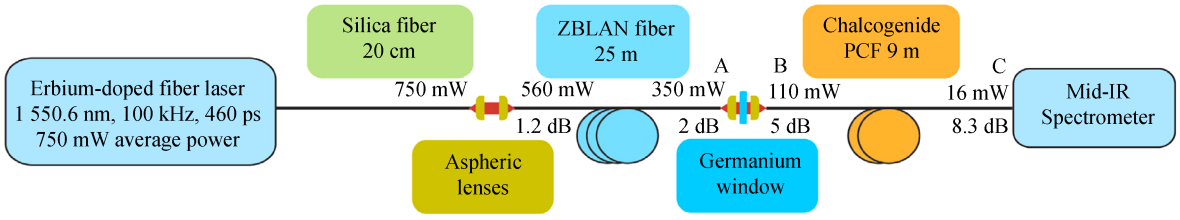
(a) Concatenated SC setup



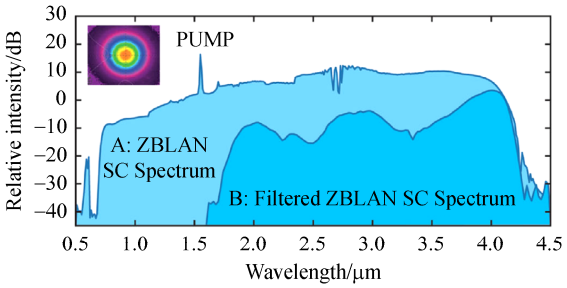
(b) Output spectra

图 7 美国密西根大学的级联泵浦方案及其 SC 谱结果[30]

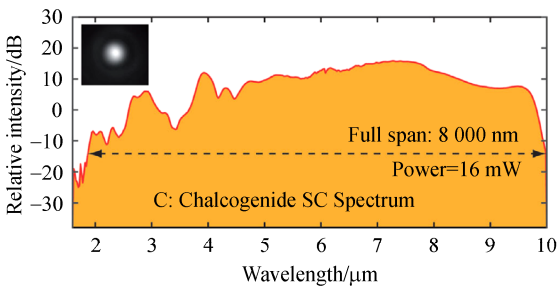
Fig. 7 Concatenated SC system (a) and its output spectra (b) from Michigan University of USA[30]



(a) Setup of SC generation



(b) SC spectrum at ZBLAN fiber output



(c) SC spectrum at chalcogenide fiber output

图 8 法国级联泵浦方案及其 SC 谱结果[31]

Fig. 8 Cascaded SC system and its output result from France[31]

采用了长通滤波器(锗窗)将 1.9 μm 以下的短波部分滤除以避免双光子吸收和光学损伤对硫系光纤的影响，从而提高了该 SC 方案的长期运行稳定性。

硫系光纤的超宽中红外 SC 谱即将迎来全光纤化时代，尽管当前的最高输出功率尚未达到瓦级，但随着硫系光纤制备技术和熔接技术的不断发展和进步，如硫系光纤的传输损耗进一步降低、玻璃组分优化以提高激光抗损伤性能，全光纤化的超宽中红外 SC 光源性能会不断提升从而得以实用化。

4　总结

近 5 年，硫系光纤泵浦产生的超宽中红外 SC 谱已达到了带宽极限，但这些基于 OPA 泵浦输出的 SC 谱方案平均功率低且稳定性差，不具有实用性，还需进一步研究如何提高硫系光纤超宽 SC 谱的功率输出、平坦性和稳定性以增进实用性。此外，现有硫系光纤的传输损耗还有待进一步降低，同时激光抗损伤性能也还有待提高，这些都依赖于玻璃制备工艺的颠覆。硫系光纤的色散调控工作依然值得继续投入研究以更好地适用于高功率光纤激光器泵浦；从泵浦源来看，中红外光纤激光器的输出功率还有待进一步提升，输出波长也有待进一步提高。

采用全光纤化方案的 SC 谱输出已经延伸至 10 μm 以外、功率达百毫瓦。科技人员正通过开发新型硫系玻璃基质材料、降低光纤传输损耗和优化光纤色散设计不断获得超宽谱、高相干性和高功率的中红外 SC 谱。随着高功率中红外锁模光纤激光器的不断成熟，硫系光纤熔接技术的不断改进，全光纤化瓦级超宽中红外 SC 谱光源即将步入新时代。

参考文献:

[1] SCHLIESSER A, PICQUE N, HAENSCH T W. Mid-infrared frequency combs[J]. Nat Photon, 2012, 6(7): 440–449.

[2] MOSELUND P M, PETERSEN C, DUPONT S, et al. Supercontinuum: broad as a lamp, bright as a laser, now in the mid-infrared[C]// Laser Technology for Defense and Security VIII, Maryland, USA, 2012: 83811A.

[3] EGGLETON B J, LUTHER-DAVIES B, RICHARDSON K. Chalcogenide photonics[J]. Nat Photon, 2011, 5(3): 141–148.

[4] SAVAGE J A, NIELSEN S. Chalcogenide glasses transmitting in the infrared between 1 and 20 μ — a state of the art review[J]. Infr Phys, 1965, 5(4): 195–204.

[5] DUDLEY J M, GENTY G, COEN S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. Rev Modern Phys, 2006, 78(4): 1135–1184.

[6] PETERSEN C R, MOLLER U, KUBAT I, et al. Mid-infrared supercontinuum covering the 1.4-13.3 μm molecular fingerprint region using ultra-high NA chalcogenide step-index fibre[J]. Nat Photon, 2014, 8(11): 830–834.

[7] YU Y, ZHANG B, GAI X, et al. 1.8–10 μm mid-infrared supercontinuum generated in a step-index chalcogenide fiber using low peak pump power[J]. Opt Lett, 2015, 40(6): 1081–1084.

[8] CHENG T, NAGASAKA K, TUAN T H, et al. Mid-infrared supercontinuum generation spanning 2.0 to 15.1 μm in a chalcogenide step-index fiber[J]. Opt Lett, 2016, 41(9): 2117–2120.

[9] OU H, DAI S, ZHANG P, et al. Ultrabroad supercontinuum generated from a highly nonlinear Ge–Sb–Se fiber[J]. Opt Lett, 2016, 41(14): 3201–3204.

[10] ZHANG B, YU Y, ZHAI C C, et al. High brightness 2.2–12 μm mid-infrared supercontinuum generation in a nontoxic chalcogenide step-index fiber[J]. J Am Ceram Soc, 2016, 99(8): 2565–2568.

[11] ZHAO Z, WANG X, DAI S, et al. 1.5-14 μm midinfrared supercontinuum generation in a low-loss Te-based chalcogenide step-index fiber[J]. Opt Lett, 2016, 41(22): 5222–5225.

[12] WANG X G, ZHAO Z M, WANG X S, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in low-loss single-mode Te-rich chalcogenide fiber[J]. Opt Mater Express, 2019, 9(8): 3487–3493.

[13] LEMIÈRE A, DÉSÉVÉDAVY F, MATHEY P, et al. Mid-infrared supercontinuum generation from 2 to 14 μm in arsenic- and antimony-free chalcogenide glass fibers[J]. J Opt Soc Am B, 2019, 36(2): A183–A192.

[14] ZHAO Z, WU B, WANG X, et al. Mid-infrared supercontinuum covering 2.0-16 μm in a low-loss telluride single-mode fiber[J]. Laser Photon Rev, 2017, 11(2): 1700005.

[15] ZHAO Z, CHEN P, WANG X, et al. A novel chalcohalide fiber with high nonlinearity and low material zero-dispersion via extrusion[J]. J Am Ceram Soc, 2019, 102(9): 5172–5179.

[16] JIAO K, YAO J M, WANG X G, et al. 1.2–15.2 μm supercontinuum generation in a low-loss chalcohalide fiber pumped at a deep anomalous-dispersion region[J]. Opt Lett, 2019, 44(22): 5545–5548.

[17] PETERSEN C R, ENGELSHOLM R D, MARKOS C, et al. Increased mid-infrared supercontinuum bandwidth and average power by tapering large-mode-area chalcogenide photonic crystal fibers[J]. Opt Express, 2017, 25(13): 15336–15348.

[18] TOUPIN P, BRILLAND L, TROLES J, et al. Small core Ge-As-Se microstructured optical fiber with single-mode propagation and low optical losses[J]. Opt Mater Express, 2012, 2(10): 1359–1366.

[19] WU B, ZHAO Z, WANG X, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in a suspended-core tellurium-based chalcogenide fiber[J]. Opt Mater Express, 2018, 8(5): 1341–1348.

[20] YUAN Y, XIA K, WANG Y, et al. Precision fabrication of a four-hole $Ge_{15}Sb_{15}Se_{70}$ chalcogenide suspended-core fiber for generation of a 1.5–12 μm ultrabroad mid-infrared supercontinuum[J]. Opt Mater Express, 2019, 9(5): 2196–2205.

[21] YUAN Y, YANG P, PENG X, et al. Ultrabroadband and coherent mid-infrared supercontinuum generation in all-normal dispersion Te-based chalcogenide all-solid microstructured fiber[J]. J Opt Soc Am B, 2020, 37(2): 227–232.

[22] HOA PHUOC TRUNG N, TONG HOANG T, XING L, et al. Supercontinuum generation in a chalcogenide all-solid hybrid microstructured optical fiber[J]. Opt Express, 2020, 28(12): 17539–17555.

[23] NAGASAKA K, TUAN T H, CHENG T, et al. Supercontinuum generation in the normal dispersion regime using chalcogenide double-clad fiber[J]. Appl Phys Express, 2017, 10(3): 032103.

[24] ZHANG N, PENG X, WANG Y, et al. Ultrabroadband and coherent mid-infrared supercontinuum generation in Te-based chalcogenide tapered fiber with all-normal dispersion[J]. Opt Express, 2019, 27(7): 10311–10319.

[25] JIAO K, YAO J, ZHAO Z, et al. Mid-infrared flattened supercontinuum generation in all-normal dispersion tellurium chalcogenide fiber[J]. Opt Express, 2019, 27(3): 2036–2043.

[26] 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]. Opt Fiber Technol, 2020, 55: 102144.

[27] DUVAL S, BERNIER M, FORTIN V, et al. Femtosecond fiber lasers reach the mid-infrared[J]. Optica, 2015, 2(7): 623–626.

[28] ANTIPOV S, HUDSON D D, FUERBACH A, et al. High-power mid-infrared femtosecond fiber laser in the water vapor transmission window[J]. Optica, 2016, 3(12): 1373–1376.

[29] HUDSON D D, ANTIPOV S, LI L, et al. Toward all-fiber supercontinuum spanning the mid-infrared[J]. Optica, 2017, 4(10): 1163–1166.

[30] MARTINEZ R A, PLANT G, GUO K, et al. Mid-infrared supercontinuum generation from 1.6 to >11 μm using concatenated step-index fluoride and chalcogenide fibers[J]. Opt Lett, 2018, 43(2): 296–299.

[31] VENCK S, ST-HILAIRE F, BRILLAND L, et al. 2–10 μm mid-infrared fiber-based supercontinuum laser source: Experiment and simulation[J]. Laser Photon Rev, 2020, 14(6): 2000011.