

基于氟碲酸盐光纤的高功率中红外超连续光源(特邀)

贾志旭,姚传飞,李真睿,贾世杰,赵志鹏,秦伟平,秦冠仕

(吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点实验室,吉林 长春 130012)

摘要: 高功率全光纤中红外超连续光源在基础科学研究、环境、医疗以及国防安全等领域有着重要应用。目前用于研制上述光源所用的非线性介质为氟化物玻璃光纤。但是氟化物玻璃光纤的损伤阈值低、化学稳定性差,这在一定程度上影响了氟化物玻璃光纤在实用化高功率中红外光源研制中的应用。为了进一步提升中红外超连续光源的性能和研制实用化高功率中红外超连续光源,最近制备出了一种具有较好热稳定性和化学稳定性的氟碲酸盐玻璃($\text{TeO}_2\text{-BaF}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$, TBY),并利用其作为基质材料,设计制备出了一系列氟碲酸盐玻璃光纤。利用这些光纤作为非线性介质,研制出了光谱范围覆盖 1.4~4 μm 的高相干超连续光源,光谱范围覆盖 0.4~5.14 μm 的宽带超连续光源和平均功率大于 10 W、光谱范围覆盖 947~3 934 nm 的超连续光源。

关键词: 氟碲酸盐玻璃光纤; 超连续光源; 中红外; 高功率

中图分类号: TN212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0803004

High power mid-infrared supercontinuum light sources based on fluorotellurite glass fibers (invited)

Jia Zhixu, Yao Chuanfei, Li Zhenrui, Jia Shijie, Zhao Zhipeng, Qin Weiping, Qin Guanshi

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: High power all-fiber mid-infrared(MIR) supercontinuum(SC) light sources have attracted much attention for their wide applications in fundamental research, environments, medicine, and national defense security. Currently, such SC light sources are mainly based on fluoride glass fibers. While the relative low damage threshold and poor chemical durability of the fluoride glass fibers influenced their applications in practical high power MIR SC light sources. For further improving the performances of the MIR SC light sources and developing practical high power MIR SC light source, a fluorotellurite glass ($\text{TeO}_2\text{-BaF}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$, TBY) with good thermal and chemical stabilities was developed, and fluorotellurite glass fibers was fabricated based on it. By using the fluorotellurite glass fibers as the nonlinear media, coherent SC generation from 1.4~4 μm and broadband SC generation from 0.4~5.14 μm were obtained in our experiments. Moreover, SC light source with an average power of >10 W was also obtained, and the spectral range covered 947~3 934 nm.

Key words: fluorotellurite glass fiber; SC light source; MIR; high power

收稿日期:2018-04-05; 修订日期:2018-05-03

基金项目:国家自然科学基金(61527823,61378004,61605058,11474132);吉林省重点科技研发项目(20180201120GX);

吉林省重大科技招标专项(20170203012GX);装备预研教育部联合基金(6141A02022413);

吉林省优秀青年人才基金(20180520188JH)

作者简介:贾志旭(1985-),男,讲师,博士,主要从事特种玻璃光纤及器件方面的研究。Email:jiazx@jlu.edu.cn

通讯作者:秦冠仕(1976-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事特种玻璃光纤及器件方面的研究。Email:qings@jlu.edu.cn

0 引言

超连续(SC)光源是当一束高峰值功率脉冲激光在高非线性介质中传输时,在色散和多种非线性光学效应的共同作用下,光谱大大展宽而获得的一种宽带激光光源^[1-2]。这种光源不仅具有高的亮度和相干性,而且具有超宽的频谱,其光谱宽度可达数千纳米,这使得其在基础科学研究、医疗、环境以及国防安全等领域都有着重要的应用^[1-9]。与基于液体、气体和块状固体的 SC 光源相比,基于光纤的 SC 光源具有高效率、高光束质量、结构紧凑、可靠性好、稳定性高、寿命长、体积小、质量轻以及便于携带与集成等特性而成为近年来宽带光源研究的主要方向^[2]。由于中红外波段包含了大气中几个重要的光学透过窗口和许多重要分子的特征谱线,工作中红外波段的 SC 光源可广泛用于光谱学、生物医学、生物光子学、污染监测、化学气体及危险品监测、大气通信、红外制导、光电对抗等领域。为满足应用需求,全光纤高功率中红外 SC 光源成为近年来的研究热点之一。

作为全光纤 SC 光源的重要组成部分之一,非线性光纤的基质材料选择以及光纤设计与制备对光源的性能有着重要的影响。基于石英玻璃光纤的 0.3~2.5 μm 波段 SC 光源的平均输出功率已经接近百瓦量级^[10],但是石英光纤的红外透光窗口相对较窄(300~2 500 nm)、非线性系数较低且声子能量较高,这在一定程度上限制了其应用范围,尤其是其中红外波段光源方面的应用。目前,研制中红外 SC 光源所用的非线性介质主要包括硫/硒化物玻璃光纤、氟化物玻璃光纤以及碲酸盐玻璃光纤等。其中,硫/硒系玻璃具有最宽的红外透过窗口(长波截至带边>10 μm)和大的非线性折射率 n_2 (比石英玻璃的 n_2 高 200 倍),使得硫/硒化物玻璃光纤成为研制宽带中红外 SC 光源的一种理想介质材料^[11-14]。利用硫/硒/碲化物玻璃光纤作为非线性介质,搭建出 SC 光源的光谱覆盖范围已超过 10 μm ^[15-18]。2014 年,丹麦技术大学的 Petersen 等人用硒化物玻璃光纤作为非线性介质获得了覆盖 1.4~13.3 μm 的 SC 光源^[15];2015 年,日本丰田工业大学的 Cheng 等人通过优化光纤参数和泵浦激光参数,将该类 SC 光源的光谱带宽拓展到了 2.0~15.1 μm ^[16];2017 年,中国宁波大学的 Zhao 等人

报道了一种低损耗的碲化物玻璃光纤,并利用其作为非线性介质获得了光谱范围覆盖 2.0~16 μm 的超连续光源^[18]。但是这类光纤的热学和力学性能较差、激光损伤阈值偏低,这限制了该类光纤在高功率中红外超连续光源方面的应用。

现阶段在高功率中红外 SC 光源研究方面所用的非线性介质多为 ZrF_4 - BaF_2 - LaF_3 - AlF_3 - NaF (ZBLAN)光纤^[19-25]。ZBLAN 光纤是一种重金属氟化物玻璃光纤,其具有较宽的中红外透过窗口(0.3~7 μm),极低的理论损耗(比石英光纤低~2 个数量级),较小的声子能量(最大声子能量约 600 cm^{-1})以及较小的材料色散等特点^[26-27]。2009 年, Qin 等人利用 2 cm 长的 ZBLAN 光纤作为非线性介质获得了覆盖 0.35~6.28 μm 波段的 SC 光源^[19];同年,美国密歇根大学的 Xia 等人报道了平均输出功率为 10.5 W 的基于 ZBLAN 光纤的中红外 SC 光源,其光谱覆盖范围为 0.8~4.0 μm ^[20];2014 年,中国国防科学技术大学的 Yang 等人用~2 μm 掺铈脉冲光纤激光器作为泵浦源,将基于 ZBLAN 光纤的中红外 SC 光源的平均输出功率提升到了 13 W,光谱覆盖范围为 1.9~4.3 μm ,其中波长>2.5 μm 的部分 SC 光源的平均功率达到 6.85 W,占总功率的 52.69%^[21];同年,中国北京工业大学的 Liu 等人在实验上将基于 ZBLAN 光纤的中红外 SC 光源的平均输出功率提升到了 24.3 W,相应的光谱覆盖范围为 1.9~3.3 μm ^[23]。但由于 ZBLAN 玻璃易潮解,基于 ZBLAN 光纤的 SC 光源在长期运转,尤其是高功率运转过程中,光纤端面易损伤,这在一定程度上影响了 ZBLAN 光纤在实用化高功率中红外光源研制中的应用。

与上述两类光纤相比,碲酸盐玻璃光纤具有较好的化学和热稳定性,宽的透过窗口(0.38~6 μm)和高的非线性系数^[28-29],这使得其有潜力用于研制实用化器件。2008 年,美国塔夫斯大学的 Domachuk 等人利用 0.8 cm 长碲酸盐玻璃微结构光纤作为非线性介质获得了光谱带宽~4 080 nm,光谱范围覆盖 789~4 870 nm 的 SC 光源^[30];2013 年,美国 NP Photonics 公司的 Thapa 等人用工作波长为 1 922 nm 的掺铈光纤激光器泵浦一段色散平坦的 W-型碲酸盐光纤获得了输出功率为~1.2 W、光谱范围覆盖 1~5 μm 的中红外 SC 光源^[31];2016 年,中国北京工业大学的 Shi 等人利用一段数值孔径为 0.21 的阶跃型大芯径碲

酸盐玻璃光纤作为非线性介质, 获得了输出功率为 2.1 W、光谱范围覆盖 1.92~3.08 μm 的中红外 SC 光源^[32]。最近, 中国国防科学技术大学的 Yin 等人利用高功率 1960 nm 皮秒光纤激光器泵浦一段以纯氧化锆为纤芯、石英玻璃为包层的高数值孔径光纤, 获得了输出功率为 30.1 W, 光谱范围覆盖 1.95~3.0 μm 的超连续光源^[33-35]。但这种光纤的长波(>3.0 μm)损耗较大, 较难进一步拓展基于该光纤的 SC 光源的长波带边。

与上述几种光纤材料相比, 氟硼酸盐玻璃具有较好的化学和热稳定性、较宽的红外透过窗口以及较低的声子能量^[36-38]。通过向硼酸盐玻璃组分中引入一定量的氟化物成分, 可有效降低玻璃样品中残余的羟基(OH⁻)含量, 大大提升了氟硼酸盐玻璃光纤在研制高功率中红外 SC 光源方面的应用潜力。但是由于氟化物组分的加入, 在一定程度上降低了玻璃的热稳定性, 使得该类光纤的制备比较困难。最近经过大量实验, 探索出了一种热稳定性和化学稳定性较好的氟硼酸盐玻璃, 并利用其作为基质材料, 设计制备了一系列氟硼酸盐玻璃光纤。文中介绍了笔者所在团队在氟硼酸盐玻璃光纤与器件方面的最新研究进展, 主要包括: 氟硼酸盐玻璃的探索与制备、氟硼酸盐玻璃光纤的设计与制备以及基于该氟硼酸盐玻璃光纤的中红外 SC 光源研究进展。文中对光纤参数和泵浦激光参数对 SC 光源性能, 包括输出功率、光谱带宽和转换效率等参数进行了分析和讨论。

1 基于氟硼酸盐光纤的中红外 SC 光源

1.1 氟硼酸盐玻璃的探索与制备

在先期实验中, 通过高压高纯氧气气氛除水熔融法, 制备出了一种组分为 $\text{TeO}_2\text{-BaF}_2\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-Er}_2\text{O}_3$ (TBNE)的氟硼酸盐玻璃, 其 Er^{3+} 掺杂浓度可达 19 mol%^[39]。高的 Er^{3+} 掺杂浓度有利于获得高效的交叉弛豫($^4\text{I}_{13/2}\rightarrow^4\text{I}_{15/2}(\text{Er}^{3+}); ^4\text{I}_{13/2}\rightarrow^4\text{I}_{9/2}(\text{Er}^{3+})$)过程^[40], 该交叉弛豫过程有利于消布居 Er^{3+} 的 $^4\text{I}_{13/2}$ 能级, 进而增强~2.7 μm 的发光(发该光来自 Er^{3+} 的 $^4\text{I}_{11/2}\rightarrow^4\text{I}_{13/2}$ 跃迁)。图 1 为 BaF_2 含量分别为 19.0、28.6、38.1 mol% 的 TBNE 玻璃的透过光谱(样品厚度约为 1.5 mm)。在相同实验条件下制得 TBNE 玻璃中残余的 OH⁻ 含量随着 BaF_2 含量的增加而降低。通过其透过光谱, 计

算得到 BaF_2 含量为 38.1 mol% 的玻璃样品中残余 OH⁻ 在 2.7 μm 处的吸收系数为~0.0702 cm^{-1} 。在 980 nm 激光激发下, 观察到了较强的~2.7 μm 发光。在随后的实验中, 通过进一步优化玻璃组分和玻璃制备工艺条件, 制备出了一系列具有较好的化学和热稳定性、组分为 $\text{TeO}_2\text{-BaF}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ (TBY)的氟硼酸盐玻璃^[41-42]。为了降低玻璃中的 OH⁻ 含量, 整个玻璃制备过程均在氮气保护的手套箱内完成。图 2 中蓝线给出了组分为 70 $\text{TeO}_2\text{-20BaF}_2\text{-10Y}_2\text{O}_3$ 的 TBY 玻璃的透过光谱, 其玻璃透过窗口覆盖 0.42~5.81 μm (透过率>50%, 样品厚度约为 2.5 mm)。在~3 μm 波长附近未观察到明显的 OH⁻ 吸收。

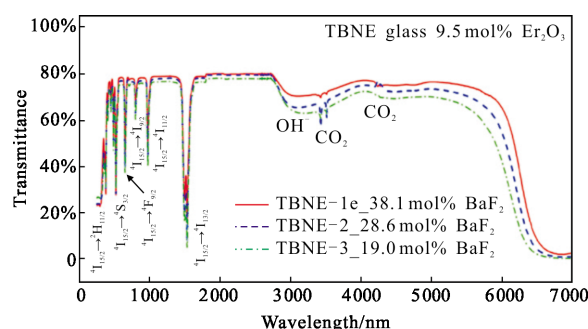


图 1 不同 BaF_2 含量 TBNE 玻璃的透过光谱

Fig.1 Transmittance spectra of TBNE glasses with different BaF_2 contents

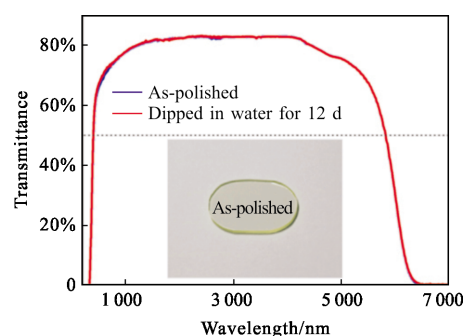


图 2 浸水处理前后 TBY 玻璃的透过光谱。插图: TBY 玻璃照片
Fig.2 Transmittance spectrum of TBY glass before and after water treatment. Insert: Photograph of polished TBY glass

在玻璃稳定性研究方面, 将上述玻璃浸于水中处理 12 d 后对其进行测试, 将其透过光谱与处理前相比未观察到明显变化, 如图 2 所示。图 3 给出了 TBY 玻璃浸水处理前后玻璃表面的扫描电镜(SEM)照片。结果表明浸水处理后, 该 TBY 玻璃表面未观察到明显损伤。这说明实验中制得 TBY 玻璃样品的

化学稳定性要优于 ZBLAN 玻璃^[43]。另外,玻璃的差热特性研究表明,该 TBY 玻璃的转变温度为~425 °C,高于之前报道的硫化物、氟化物和硝酸盐玻璃的转变温度。这说明 TBY 玻璃是研制高功率中红外 SC 光源的一种潜在非线性介质材料。

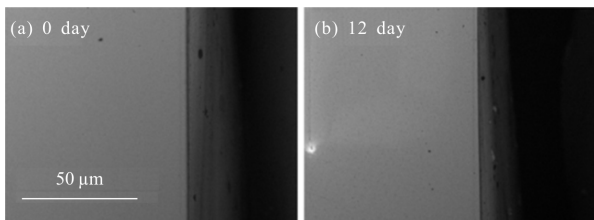


图 3 浸水处理前后 TBY 玻璃表面的 SEM 照片

Fig.3 SEM images of the TBY glass surface before and after water treatment

1.2 氟碲酸盐光纤的设计与制备

对于包层中含有空气孔的微结构光纤,通过调整空气孔的尺寸和分布,可以调控光纤的色散特性,这使得该类光纤在 SC 光源研制方面具有重要应用^[44-45]。在实验中,选用具有较好热稳定性和化学稳定性的 TBY 玻璃作为基质材料,通过棒管法制备出了一系列不同结构的氟碲酸盐微结构光纤,部分光纤的截面 SEM 照片如图 4 所示。采用回切法测得光纤在 1560 nm 波长处的损耗约为 3 dB/m。

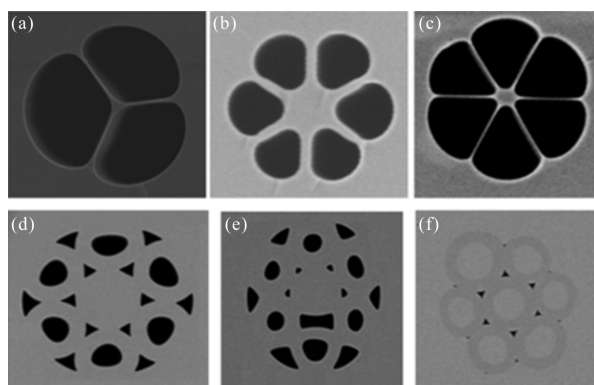


图 4 部分氟碲酸盐微结构光纤的截面 SEM 照片

Fig.4 SEM images of the cross-section of the fabricated fluorotellurite microstructured fibers (FTMFs)

根据之前文献报道,利用空气包层的碲酸盐微结构光纤作为非线性介质,研制出的 SC 光源在长期使用过程中,其长波带边被限制在 3 μm 左右^[46]。这是因为随着时间的延长,空气中的灰尘或水分子会进入空气孔进而粘附在纤芯表面,导致光纤损耗(尤其是波长>3 μm 区域)的增加,相关器件性能下降。针对这一问题,实验中选用 TBY 玻璃作为纤芯材料、一种与 TBY 玻璃具有较大折射率差、而热性质相近的 ACBSMYT(AIF₃-CaF₂-BaF₂-SrF₂-MgF₂-YF₃-TeO₂)玻璃作为包层材料,探索制备出了一种具有较大数值孔径(NA)的全固态氟碲酸盐光纤^[47]。图 5(a)-(c)

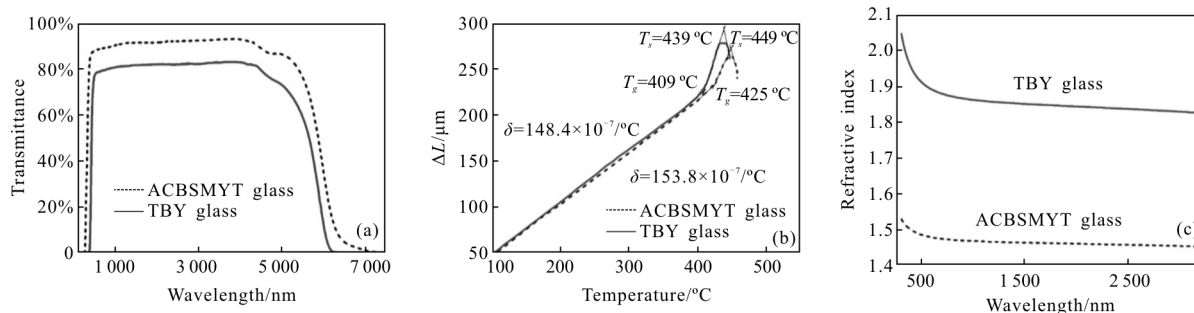


图 5 (a)样品厚度为~4.5 mm 的 TBY 和 ACBSMYT 玻璃的透过光谱,(b)样品长度为~4 cm 的 TBY 和 ACBSMYT 玻璃棒的伸长量(ΔL)和温度的变化关系,(c) TBY 和 ACBSMYT 玻璃在 300~3200 nm 范围的折射率曲线

Fig.5 (a) Transmission spectra of TBY and ACBSMYT glasses with a thickness of ~4.5 mm, (b) Dependence of elongation (ΔL) of TBY and ACBSMYT glass rods with a length of ~4 cm on temperature (c) Measured refractive indices of TBY and ACBSMYT glasses in the region 300~3200 nm

分别给出了两种玻璃的透过光谱曲线、热膨胀曲线以及折射率曲线。利用这两种玻璃材料的折射率算得光纤在 3200 nm 处的 NA 值约为 1.1,与空气包层氟碲酸盐微结构光纤的 NA 值接近^[42]。这可以通过改变光纤纤芯尺寸,实现在光纤零色散波长(ZDW)

的大范围调控^[48]。

图 6(a)给出了不同纤芯尺寸的高 NA 氟碲酸盐光纤的色散特性曲线,当光纤纤芯直径由 50 μm 缩小到 3 μm 时,光纤中 LP01 模式的 ZDW 由 2145 nm 蓝移至 1507 nm(TBY 玻璃材料的 ZDW 为 2151 nm)。

图 6(b)为制备出的高 NA 氟碲酸盐光纤截面的 SEM 照片。光纤纤芯直径为 $\sim 7\ \mu\text{m}$,其 ZDW 为 $\sim 1\ 938\ \text{nm}$ 。最近,通过优化光纤制备工艺参数,将该类光纤损耗降至 $0.3\ \text{dB/m}$ 。

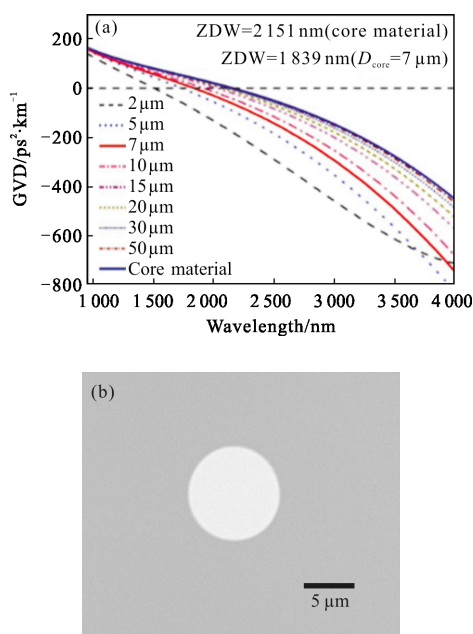


图 6 (a)纤芯材料(TBY 玻璃)和不同芯径全固态氟碲酸盐玻璃光纤中 LP01 模的色散曲线, (b)全固态氟碲酸盐光纤的截面 SEM 照片

Fig.6 (a) Calculated GVD curves of the core material (TBY glass) and the fundamental propagation mode for all-solid fluorotellurite fibers with different core diameters, (b) SEM image of the cross-section of the fluorotellurite fiber

1.3 基于氟碲酸盐光纤的中红外 SC 光源

1.3.1 基于拉锥氟碲酸盐微结构光纤的高相干中红外 SC 光源

高相干性中红外 SC 光谱的获得与泵浦激光的参数、光谱的展宽机制以及非线性光纤的色散特性有着密切的关系^[44-45,49-50]。对于泵浦激光而言,选用具有窄脉冲宽度、高峰值功率和高稳定性的泵浦激光有利于获得高相干 SC 光源^[44-45]。对于光谱展宽机制而言,噪声会被受激拉曼散射和调制不稳定性效应放大,进而导致 SC 光源的相干性劣化^[45,49-50]。光谱展宽机制与非线性光纤的色散特性相关^[45,51]。包层中带有不同空气孔分布的微结构光纤具有灵活可调的色散特性,是研制高相干 SC 光源的理想介质之一。实验中,利用 TBY 玻璃作为基质材料,采用棒管法

制备出了氟碲酸盐微结构光纤,光纤截面如图 7 中插图所示^[52]。其纤芯直径为 $3.6\ \mu\text{m}$,纤芯周围有 6 个空气孔。使用回切法测得该光纤在 $1\ 980\ \text{nm}$ 波长处的损耗为 $\sim 3.2\ \text{dB/m}$ 。为获得纵向色散调控的非线性光纤,使用自制的拉伸装置制备了拉锥氟碲酸盐微结构光纤,其锥区长度为 $1.4\ \text{cm}$ 。图 7(a)为测得的在拉锥光纤不同位置处纤芯直径的变化。在 $0\sim 2.6\ \text{cm}$ 范围内,光纤的纤芯直径为 $\sim 3.6\ \mu\text{m}$;在 $2.6\sim 4\ \text{cm}$ 的范围内,光纤纤芯直径逐渐由 $3.6\ \mu\text{m}$ 减小至 $0.8\ \mu\text{m}$ 。利用商用 Mode Solutions 软件计算了不同纤芯直径光纤中基模的群速度色散曲线,结果如图 7(b)所示。

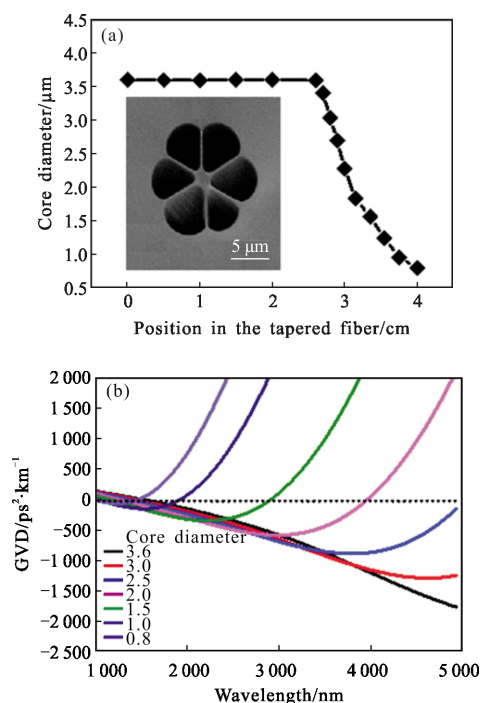


图 7 (a)拉锥氟碲酸盐微结构光纤中光纤纤芯直径与位置变化关系,插图:氟碲酸盐微结构光纤截面的 SEM 照片, (b)具有不同纤芯直径氟碲酸盐微结构光纤中基模的群速度色散曲线

Fig.7 (a) Dependence of the core diameter of the tapered FTMF on the position of the fiber. Insert: SEM image of the cross-section of the fabricated FTMF, (b) Calculated GVD curves of the fundamental propagation mode for fiber segments with different core diameters

当纤芯直径为 $3.6, 3, 2.5, 2, 1.5, 1, 0.8\ \mu\text{m}$ 时,其对应的第一个 ZDW 分别为 $1\ 514, 1\ 427, 1\ 344, 1\ 247, 1\ 142, 1\ 030, 1\ 000\ \text{nm}$ 。当纤芯直径为 $2, 1.5, 1, 0.8\ \mu\text{m}$ 时,光纤中基模的色散曲线出现了第二个 ZDW,其

值分别为 3 950、2 905、1 920、1 463 nm。利用氟磷酸盐玻璃的非线性折射率($1.4 \times 10^{-18} \text{ m}^2 \text{ W}^{-1}$)^[53], 计算得到的在 1 980 nm 波长处不同芯径光纤的非线性系数分别为 735、984、1 312、1 823、2 654、4 000、4 432 $\text{km}^{-1} \text{ W}^{-1}$ 。

在 SC 光源实验中, 利用上述拉锥氟磷酸盐微结构光纤作为非线性介质, 自制 1 980 nm 飞秒光纤激光器作为泵浦源, 搭建了如图 8 所示测试装置。由于

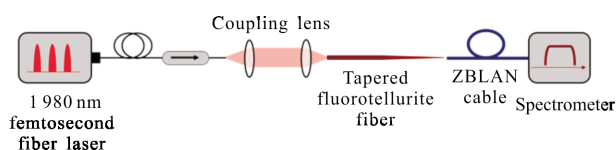


图 8 实验装置示意图
Fig.8 Experimental setup

泵浦激光位于光纤 (0~3.8 cm 部分) 的反常色散区, 当 1 980 nm 飞秒激光在该拉锥氟磷酸盐微结构光纤中传输时, 在自相位调制与色散的共同作用下, 劈裂出光孤子, 产生的光孤子在脉冲内拉曼散射的作用下向长波移动。当红移拉曼孤子“遇到”第二个 ZDW 的时候, 发生孤子自频移抵消效应, 孤子停止向长波移动, 同时在第二个 ZDW 的长波边产生对应的红移色散波。由于该拉锥光纤的第二 ZDW 随着光纤芯径的减小从 >3 950 nm 连续减小至 1 463 nm。随着第

二个 ZDW 的蓝移, 产生的光孤子会被其“推”向短波移动并将能量传递给色散波直到其能量全部转换为色散波^[54]。脉冲光继续在光纤中传输, 进入光纤的全正色散区, 产生的色散波形成带有啁啾特性的 SC 光谱。因此, 通过控制孤子的阶数可以获得高相干中红外 SC 光源。

图 9(a)给出了实验中获得的 SC 光谱^[52]。1 980 nm 泵浦激光的脉冲宽度为 ~170 fs。随着泵浦激光峰值功率的增加, SC 谱不断展宽。当泵浦激光峰值功率约为 3.6 kW 时, 在拉锥氟磷酸盐微结构光纤中得到了波长范围覆盖 1.4~4 μm 的 SC 谱, 相应的光-光转换效率约为 15%。进一步, 我们在理论上通过求解非线性薛定谔方程对 SC 谱的相干性进行了分析。图 9(b)给出了相同泵浦条件(泵浦激光的脉冲宽度为 170 fs, 峰值功率为 3.6 kW)下, 通过模拟计算得到的在该拉锥氟磷酸盐微结构光纤中产生的 SC 谱(红色曲线)与实际测得的 SC 谱(黑色曲线)。从图中可以看出, 二者吻合度较好, 这说明在数值模拟计算时所选用参数的合理性。在上述数值模拟的基础上, 进一步计算了该 SC 光谱的相干特性, 结果如图 9(c)所示。计算结果表明, 用所研制的中心波长为 1 980 nm 的超短脉冲激光作为泵浦源, 利用拉锥氟磷酸盐微结构光纤作为非线性介质, 获得的波长范围

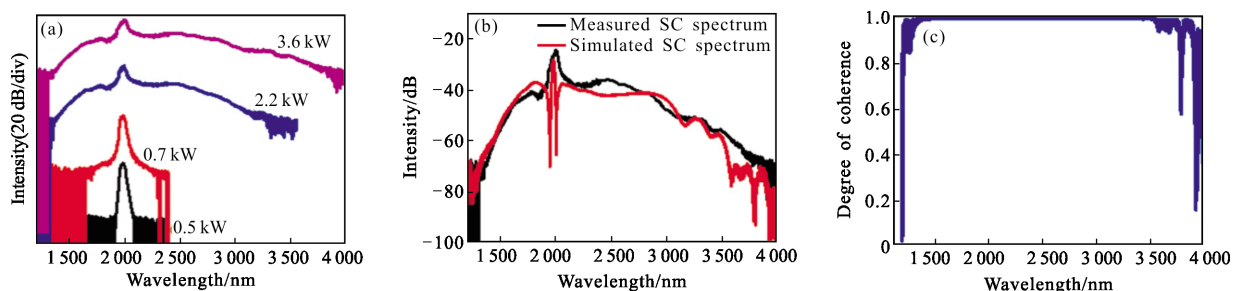


图 9 (a) 拉锥氟磷酸盐微结构光纤中产生的 SC 光谱随 1 980 nm 飞秒激光泵浦峰值功率变化情况; (b) 相同泵浦峰值功率下, 理论计算(红线)与实验中测得(黑线)的 SC 光谱; (c) 理论计算得到的 SC 谱的相干度系数

Fig.9 (a) Dependence of the measured SC spectra output from the tapered FTMF on the launched pumping peak power of the 1 980 nm femtosecond fiber laser; (b) Comparison of the simulated (the red curve) and measured (the black curve) SC spectra output from the tapered FTMF for a same pumping peak power; (c) Simulated modulus of the complex degree of coherence of the SC spectrum

覆盖 1.4~4 μm 的超连续谱在其波长范围内的相干度接近于 1。

1.3.2 基于拉锥全固态高 NA 氟磷酸盐光纤的宽带 SC 光源

为了进一步向短波和长波方向拓宽 SC 光源的

光谱覆盖范围, 需要协同控制氟磷酸盐光纤的色散、非线性系数和受限损耗。一般情况下, 利用拉锥光纤作为非线性介质, 有利于获得宽带的 SC 光源。这是因为在光纤拉锥区, 光纤的 ZDW 沿光纤长度连续变化, 这使得在宽光谱范围内满足四波混频或色散波

产生的相位匹配条件。并且,光纤的非线性系数会随着光纤芯径的减小而增大。但是,随着光纤芯径的减小,光纤在长波区的受限损耗会增加,这限制了 SC 光谱的长波带边。利用具有大 NA 的光纤,可有效降低其长波区的受限损耗。以往,研究者多采用向光纤包层中引入空气孔来增大光纤的 NA。通过改变空气孔的尺寸和分布还可进一步调控光纤的色散特性。利用包层中带有空气孔的软玻璃微结构光纤作为非线性介质,可获得宽带的 SC 光源。但根据之前文献报道,基于空气包层碲酸盐微结构光纤的 SC 光源在长期使用过程中,其长波带边被限制在 $3\ \mu\text{m}$ 左右^[46]。为解决这一问题,制备了具有较大 NA 的全固体氟碲酸盐光纤^[47]。图 10(a)中的插图给出了利用棒管法制备出的全固态高 NA 氟碲酸盐光纤的截面 SEM 照片,其纤芯直径约为 $7\ \mu\text{m}$ 。为了进一步调控光纤的色散特性和非线性系数,笔者的课题组制备了拉锥的全固态高 NA 氟碲酸盐光纤。图 10(a)为测得的在拉锥光纤不同位置处纤芯直径的变化。在 $0\sim 1.6\ \text{cm}$ 范围内,光纤的芯径为 $\sim 7\ \mu\text{m}$;在 $1.6\sim 3.4\ \text{cm}$ 的范围内,光纤芯径逐渐由 $7\ \mu\text{m}$ 减小至 $1.4\ \mu\text{m}$ 。利用商用 Mode Solutions 软件计算了不同芯径光纤中基模的群速度色散曲线,结果如图 10(b)所示。当纤芯直径为 $7, 6, 5, 4, 3, 2, 1.4\ \mu\text{m}$ 时,其对应的第一个 ZDW 分别为 $1\ 839, 1\ 808, 1\ 735, 1\ 637, 1\ 507, 1\ 306, 1\ 193\ \text{nm}$ 。当纤芯直径为 $2\ \mu\text{m}$ 与 $1.4\ \mu\text{m}$ 时,光纤中基模的色散曲线出现了第二个 ZDW,其值分别为 $3\ 095\ \text{nm}$ 与 $1\ 957\ \text{nm}$ 。利用氟碲酸盐玻璃的非线性折射率($1.4\times 10^{-18}\ \text{m}^2\text{W}^{-1}$)^[53],算得在 $1\ 560\ \text{nm}$ 波长处不同纤芯直径光纤的非线性系数分别为 $108, 147, 204, 308, 514, 1\ 016, 1\ 730\ \text{km}^{-1}\text{W}^{-1}$ 。当芯径为 $1.4\ \mu\text{m}$ 时,光纤中基模受限损耗在 $0.4\sim 4.16\ \mu\text{m}$ 范围内 $< 0.3\ \text{dB/cm}$ 。

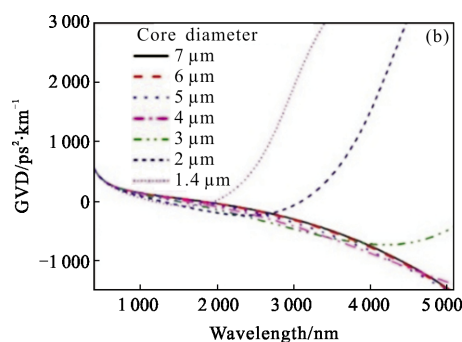
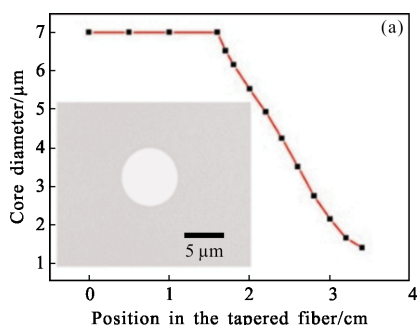


图 10 (a) 拉锥全固态高 NA 氟碲酸盐光纤中光纤纤芯直径与位置变化关系,插图:全固态高 NA 氟碲酸盐光纤截面的 SEM 照片;(b)具有不同纤芯直径氟碲酸盐光纤中基模的群速度色散曲线

Fig.10 (a) Dependence of the core diameter of the tapered all solid high-NA fluorotellurite fiber on the position of the fiber. Inset: SEM image of the cross section of the untapered fluorotellurite fiber; (b) Calculated GVD curves of the fundamental propagation mode for fiber segments with different core diameters

利用上述拉锥全固态高 NA 氟碲酸盐光纤作为非线性介质,自制 $1\ 560\ \text{nm}$ 飞秒光纤激光器(脉冲宽度为 $\sim 200\ \text{fs}$,重复频率为 $\sim 50\ \text{MHz}$)作为泵浦源,搭建出 SC 光源测试系统。当 $1\ 560\ \text{nm}$ 泵浦激光在拉锥光纤中传输时,会先后经历正常和反常色散,相应的光谱展宽机制主要包括自相位调制、孤子劈裂、孤子自频移以及蓝移和红移色散波的产生。图 11 给出了

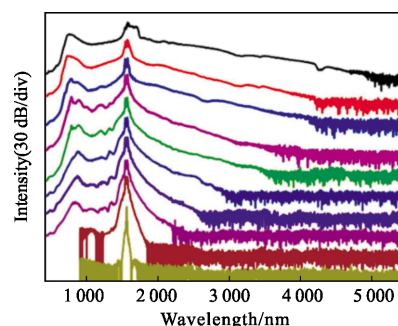


图 11 不同 $1\ 560\ \text{nm}$ 泵浦激光功率下,拉锥全固态高 NA 氟碲酸盐光纤中输出的 SC 光谱。从下至上,泵浦激光的峰值功率分别为 $0.2, 2.7, 3.1, 3.3, 3.7, 3.9, 4.1, 5.1, 6.1, 10.5\ \text{kW}$

Fig.11 Dependence of the measured SC spectra from the tapered all solid high-NA fluorotellurite fiber on the pumping peak power of a $1\ 560\ \text{nm}$ mode-locked fiber laser. From bottom to top, the pumping peak powers were $0.2, 2.7, 3.1, 3.3, 3.7, 3.9, 4.1, 5.1, 6.1$ and $10.5\ \text{kW}$, respectively

不同泵浦激光功率下,拉锥全固态高 NA 氟碲酸盐光纤中输出的 SC 光谱,其光谱带宽随着泵浦峰值功率的增大逐渐变宽。当泵浦峰值功率达到 10.5 kW 时,获得了光谱带宽覆盖 0.4~5.14 μm 的超宽带 SC 光源^[47]。据笔者所知,这是目前利用氟碲酸盐光纤作为非线性介质获得的光谱带宽最宽的 SC 光源。

1.3.3 基于全固态高 NA 氟碲酸盐光纤的高功率中红外 SC 光源

由于包层中有空气孔分布的软玻璃微结构光纤在长期使用过程中,空气中的灰尘或水分子会进入空气孔进而粘附在纤芯表面,导致光纤损耗(尤其是波长 >3 μm 区域)的增加^[46],相关器件性能下降。因此,在高功率 SC 光源实验中,采用纤芯直径为 ~7 μm 的全固态高 NA 氟碲酸盐光纤作为非线性介质,其在 1 980 nm 处的非线性系数为 $156.7 \text{ km}^{-1}\text{W}^{-1}$ 。为了验证全固态高 NA 氟碲酸盐光纤在高功率 SC 光源方面的应用潜力,基于啁啾放大技术,搭建了掺铋光纤放大(TDFA)系统,将 1 980 nm 泵浦激光的平均功率提升至 ~19.8 W,相应的光转换效率为 ~48%,结果如图 12(a)所示^[55]。图 12(b)给出了当 1 980 nm 激光

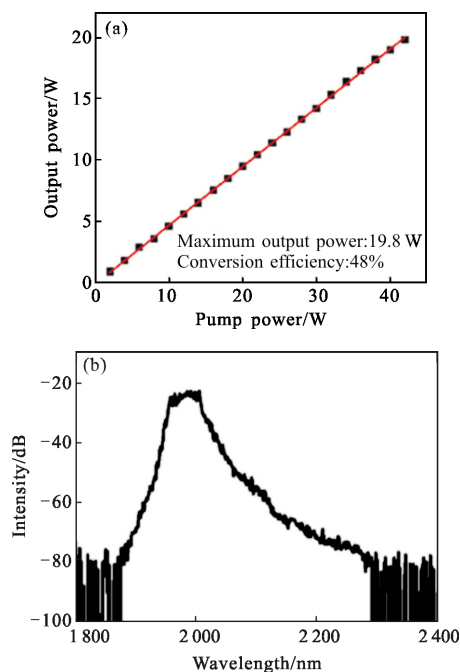


图 12 (a) 1 980 nm 激光输出功率随 TDFA 中泵浦功率的变化曲线,(b)1 980 nm 飞秒光纤激光器输出功率为 19.8 W 时的激光光谱图

Fig.12 (a) Dependence of the output power of the 1 980 nm laser on the pump power of the TDFA, (b) Spectrum of the 1 980 nm femtosecond fiber with an output power of 19.8 W

功率为 19.8 W 时的光谱图。由于激光峰值功率较高,在自相位调制等非线性效应的作用下,输出光谱变宽。

利用该高功率 1 980 nm 激光泵浦一段 60 cm 长的全固态高 NA 氟碲酸盐光纤,研究了 SC 光谱形状随泵浦激光功率的演化趋势,结果如图 13(a)所示。SC 光谱带宽随着泵浦功率的增大逐渐增加。光谱展宽的主要机制包括自相位调制、高阶孤子劈裂、孤子自频移效应、受激拉曼散射、四波混频等。当泵浦功率为 15.9 W(耦合效率约为 80%)时,获得的 SC 光源的平均输出功率为 ~10.4 W,相应的光光转换效率为 ~65%。这是目前利用氟碲酸盐光纤作为非线性介质获得输出功率最高的 SC 光源,其 10 dB 带宽覆盖 1 870~3 305 nm(除去泵浦光)。所获得 SC 光源大于 2 400 nm 部分的功率为 ~2.5 W。图 13(b)给出了实验中所获得 SC 光源的平均输出功率与泵浦激光功率之间的变化关系。随着泵浦激光功率由 0.728 W 增

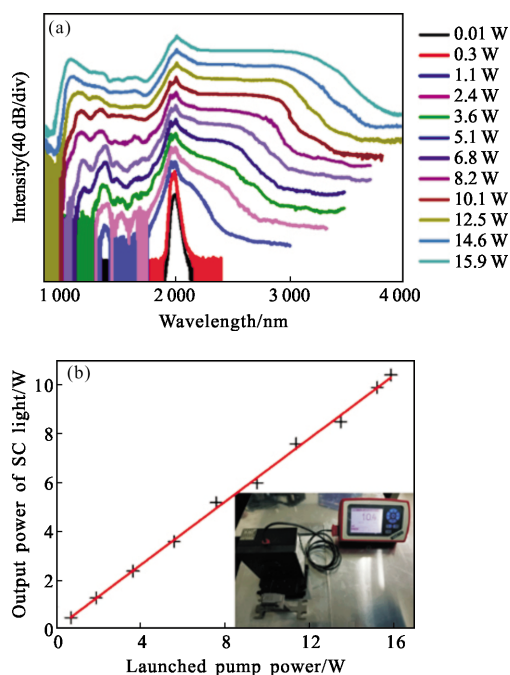


图 13 (a)不同 1 980 nm 泵浦激光功率下,全固态高 NA 氟碲酸盐光纤中输出的 SC 光谱,(b) SC 光源的输出功率随泵浦激光功率变化关系

Fig.13 (a) Dependence of the measured SC spectra from the all solid high-NA fluorotellurite fiber on the average pump power of a 1 980 nm fiber laser, (b) Dependence of the output power of the obtained SC light sources on the average pump power

加至 15.9 W, 产生的超连续光源的功率由 0.5 W 线性增加至 10.4 W^[55]。在实验中, 将该 SC 光源保持在输出功率为~10.4 W 连续运转 10 h, 未观察到氟碲酸盐光纤的端面或内部损伤。目前所获得 SC 光源的最大输出功率主要是受泵浦激光功率的限制。通过优化泵浦激光的参数和光纤参数, 可进一步提升基于高 NA 氟碲酸盐玻璃光纤的中红外 SC 光源的输出功率和光谱带宽。

值得一提的是, 最近利用自制的低损耗(0.3 dB/m) 氟碲酸盐光纤作为非线性介质, 使用高平均功率 2 μm 超短脉冲激光作为泵浦源, 获得了平均功率大于 20 W 的中红外超连续激光光源, 相关研究结果正在整理发表中。笔者的研究表明, 利用自制的氟碲酸盐玻璃光纤作为非线性介质有望获得平均功率数十瓦甚至百瓦量级的中红外超连续激光光源。

2 结 论

经过大量实验探索, 制备出具有较好化学稳定性和热稳定的氟碲酸盐玻璃, 并利用其作为基质材料, 设计制备出一系列包层中带有空气孔分布的氟碲酸盐微结构光纤以及全固态高 NA 氟碲酸盐光纤。进一步利用包层中带有空气孔的氟碲酸盐微结构光纤和全固态高 NA 氟碲酸盐光纤为非线性介质, 分别研制出了光谱覆盖 1.4~4 μm 的高相干高相干性中红外 SC 光源、光谱覆盖 0.4~5.14 μm 的超宽带 SC 光源和输出平均功率约为 10.4 W、光谱范围覆盖 947~3 934 nm 高功率中红外 SC 光源。在理论和实验上分析了光纤结构参数和泵浦激光参数对 SC 光源相干性、光谱带宽和输出功率的影响。实验结果验证了该氟碲酸盐光纤在高功率、高相干宽带 SC 光源应用方面的潜力。基于该氟碲酸盐光纤的 SC 光源有望应用于基础科学研究、环境、医疗以及国防安全等领域。

参考文献:

- [1] Alfano R. The Supercontinuum Laser Source [M]. New York: Springer, 2006.
- [2] Dudley J, Taylor R. Supercontinuum Generation in Optical Fibers [M]. New York: Cambridge University Press, 2010.
- [3] Wei Zhiyi. The 2005 Nobel prize in physics and optical frequency comb techniques [J]. Physics, 2006, 35(3): 213-217. (in Chinese)
- [4] Hartl I, Li X D, Chudoba C, et al. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber [J]. Optics Letters, 2001, 26(9): 608-610.
- [5] Wildanger D, Rittweger E, Kastrup L, et al. STED microscopy with a supercontinuum laser source[J]. Optics Express, 2008, 16(13): 9614-9621.
- [6] Brown D M, Shi K, Liu Z, et al. Long-path supercontinuum absorption spectroscopy for measurement of atmospheric constituents [J]. Optics Express, 2008, 16(12): 8457-8471.
- [7] Wallace J. IR supercontinuum laser helps defend helicopters [N]. Laser Focus World, 2010, Sept 3.
- [8] Qian Liejia. Development and integration of wide tunable mid infrared femtosecond and narrow band long pulse laser devices [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(z3): 43. (in Chinese)
- [9] Deng Ying, Zhu Qihua, Zeng Xiaoming, et al. The generation and recent progress of ultrashort mid-infrared pulse[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(8): 21-26. (in Chinese)
- [10] Chen K, Alam S U, Price J H V, et al. Picosecond fiber MOPA pumped supercontinuum source with 39 W output power [J]. Optics Express, 2010, 18(6): 5426-5432.
- [11] Sanghera J S, Aggarwal I D, Busse L E, et al. Chalcogenide optical fibers target mid-IR applications [J]. Laser Focus World, 2005, 41(4): 83-87.
- [12] Harbold J M, Ilday F O, Wise F W, et al. Highly nonlinear Ge-As-Se and Ge-As-S-Se glasses for all-optical switching [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2002, 14(6): 822-824.
- [13] Slusher R E, Lenz G, Hodelin J, et al. Large Raman gain and nonlinear phase shifts in high-purity As₂Se₃ chalcogenide fibers [J]. Journal of the Optical Society of America B - Optical Physics, 2004, 21(6): 1146-1155.
- [14] Feng X, Mairaj A K, Hewak D W, et al. Nonsilica glasses for holey fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(6): 2046-2054.
- [15] Petersen C R, Møller 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]. *Nature Photonics*, 2014, 8(11): 830-834.
- [16] Cheng T L, 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]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 2117-2120.
- [17] Zhao Z M, Wang X S, Dai S X, et al. 1.5 -14 μm midinfrared supercontinuum generation in a low-loss Te-based chalcogenide step-index fiber [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5222-5225.
- [18] Zhao Z M, Wu B, Wang X S, et al. Mid-infrared supercontinuum covering 2.0-16 μm in a low-loss telluride single-mode fiber [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(2): 1700005.
- [19] Qin G S, Yan X, Kito C, et al. Ultrabroadband supercontinuum generation from ultraviolet to 6.28 μm in a fluoride fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(16): 584.
- [20] Xia C N, Xu Z, Islam M N, et al. 10.5 W time-averaged power mid-IR supercontinuum generation extending beyond 4 μm with direct pulse pattern modulation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 422-434.
- [21] Yang W, Zhang B, Xue G, et al. Thirteen watt all-fiber mid-infrared supercontinuum generation in a single mode ZBLAN fiber pumped by a 2 μm MOPA system [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1849-1852.
- [22] 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.
- [23] Liu K, Liu J, Shi H X, et al. 24.3 W mid-infrared supercontinuum generation from a single-mode ZBLAN fiber pumped by thulium-doped fiber amplifier [C]//*Advanced Solid State Lasers*, 2014, AM3A.6.
- [24] Zheng Z J, Ouyang D Q, Zhao J Q, et al. Scaling all-fiber mid-infrared supercontinuum up to 10 W-level based on thermal-spliced silica fiber and ZBLAN fiber [J]. *Photonics Research*, 2016, 4(4): 135-139.
- [25] Yin K, Zhang B, Yang L Y, et al. 15.2 W spectrally flat all-fiber supercontinuum laser source with >1 W power beyond 3.8 μm [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(12): 2334-2337.
- [26] Poulain M, Poulain M, Lucas J. Verres fluores au tetrafluorure de zirconium proprietes optiques d'un verre dope au Nd^{3+} [J]. *Materials Research Bulletin*, 1975, 10(4): 243-246.
- [27] Zhu X, Peyghambarian N. High-power ZBLAN glass fiber lasers: review and prospect[J]. *Advances in OptoElectronics*, 2010(1687-563X): 149-154.
- [28] Wang J S, Vogel E M, Snitzer E. Tellurite glass: a new candidate for fiber devices[J]. *Optical Materials*, 1994, 3(3): 187-203.
- [29] Ghosh G. Sellmeier coefficients and chromatic dispersions for some tellurite glasses [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, 78(10): 2828-2830.
- [30] Domachuk P, Wolchover N A, Cronin-Golomb M, et al. Over 4 000 nm bandwidth of mid-IR supercontinuum generation in sub-centimeter segments of highly nonlinear tellurite PCFs [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7161-7168.
- [31] Thapa R, Rhonehouse D, Nguyen D, et al. Mid-IR supercontinuum generation in ultra-low loss, dispersion-zero shifted tellurite glass fiber with extended coverage beyond 4.5 μm [C]//*SPIE* 2013, 8898: 889808.
- [32] Shi H X, Feng X, Tan F Z, et al. Multi-watt mid-infrared supercontinuum generated from a dehydrated large-core tellurite glass fiber [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(12): 3967-3976.
- [33] Yang L, Zhang B, Yin K, et al. 0.6-3.2 μm supercontinuum generation in a stepindex germania-core fiber using a 4.4 kW peak power pump laser [J]. *Optics Express*, 2016, 13(24): 12600-12606.
- [34] Yin K, Zhang B, Yao J, et al. 1.9-3.6 μm supercontinuum generation in a very short highly nonlinear germania fiber with a high mid-infrared power ratio [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(21): 5067-5070.
- [35] Yin K, Zhang B, Yang L, et al. 30 W monolithic 2-3 μm supercontinuum laser [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(2): 123-126.
- [36] O'donnell M D, Miller C A, Furniss D, et al. Fluorotellurite glasses with improved mid-infrared transmission [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, 331(1-3): 48-57.
- [37] Liao G H, Chen Q P, Xing J J, et al. Preparation and characterization of new fluorotellurite glasses for photonics application [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2009, 355(7): 447-452.
- [38] O'donnell M D, Richardson K, Stolen R, et al. Tellurite and fluorotellurite glasses for fiberoptic Raman amplifiers: Glass characterization, optical properties, Raman gain, preliminary fiberization, and fiber characterization [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007, 90(5): 1448-1457.
- [39] Wang R, Meng X, Yin F, et al. Heavily erbium-doped low-hydroxyl fluorotellurite glasses for 2.7 μm laser applications

- [J]. *Optical Material Express*, 2013, 3(8): 1127-1136.
- [40] de Sousa D F, Zonetti L F C, Bell M J V, et al. On the observation of 2.8 μm emission from diode-pumped Er^{3+} - and Yb^{3+} -doped low silica calcium aluminate glasses [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(7): 908-910.
- [41] Yao C, He C, Jia Z, et al. Holmium-doped fluorotellurite microstructured fibers for 2.1 μm lasing [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(20): 4695-4698.
- [42] Wang F, Wang K, Yao C, et al. Tapered fluorotellurite microstructured fibers for broadband supercontinuum generation[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(3): 634-637.
- [43] Bei J F, Foo H T C, Qian G J, et al. Experimental study of chemical durability of fluorozirconate and fluoroindate glasses in deionized water [J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(6): 1213-1226.
- [44] Dudley J M, Coen S. Coherence properties of supercontinuum spectra generated in photonic crystal and tapered optical fibers[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(13): 1180-1182.
- [45] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1135-1184.
- [46] Savellii I, Desevedavy F, Jules J C, et al. Management of OH absorption in tellurite optical fibers and related supercontinuum generation [J]. *Optical Materials*, 2013, 35(8): 1595-1599.
- [47] Jia Z, Yao C, Jia S, et al. Supercontinuum generation covering the entire transmission window of 0.4-5 μm in a tapered ultra-high NA all-solid fluorotellurite fiber [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15: 025102.
- [48] Jia Z, Yao C, Jia S, et al. 4.5 W supercontinuum generation from 1 017 to 3 438 nm in an all-solid fluorotellurite fiber [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110: 261106.
- [49] Corwin K L, Newbury N R, Dudley J M, et al. Fundamental amplitude noise limitations to supercontinuum spectra generated in a microstructured fiber [J]. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2003, 77(2-3): 269-277.
- [50] Corwin K L, Newbury N R, Dudley J M, et al. Fundamental noise limitations to supercontinuum generation in microstructure fiber [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(11): 113904.
- [51] Klimczak M, Siwicki B, Skibinski P, et al. Coherent supercontinuum generation up to 2.3 μm in all-solid soft-glass photonic crystal fibers with flat all-normal dispersion [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18824-18832.
- [52] Li N, Wang F, Yao C, et al. Coherent supercontinuum generation from 1.4 to 4 μm in a tapered fluorotellurite microstructured fiber pumped by a 1 980 nm femtosecond fiber laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110: 061102.
- [53] Zhan H, Shi T F, Zhang A D, et al. Nonlinear characterization on mid-infrared fluorotellurite glass fiber[J]. *Materials Letters*, 2014, 120: 174-176.
- [54] Chen Z, Taylor A J, Efimov A. Coherent mid-infrared broadband continuum generation in non-uniform ZBLAN fiber taper [J]. *Optics Express*, 2009, 17(7): 5852-5860.
- [55] Yao C, Jia Z, Li Z, et al. 10 -W -level mid-infrared supercontinuum laser source using fluorotellurite fiber [J]. (Submitted).