

新型中红外玻璃光纤及相应激光器研究进展

贾志旭, 姚传飞, 贾世杰, 王顺宾, 李真睿, 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 中红外波段光纤激光光源在基础科学研究、光通信、生物医疗、环境监测以及国防安全领域有着重要应用。超连续谱(SC)激光光源和稀土离子掺杂光纤激光器是目前研究得较多的两类中红外波段激光光源。面向该类光源的应用需求,笔者研究组经过大量实验探索,筛选出一种具有较高稳定性和较高损伤阈值的氟碲酸盐玻璃光纤,并利用其作为非线性介质研制出了光谱范围覆盖 0.6~5.4 μm 宽带的 SC 激光光源和平均功率约为 20 W、光谱范围覆盖 1~4 μm 的 SC 激光光源;制备出具有较强抗潮解能力的 Ho^{3+} 离子掺杂 AlF_3 基玻璃光纤,并利用其作为增益介质,获得了波长约为 2868 nm 的激光输出;研制出具有较低声子能量的 Ho^{3+} 离子掺杂 InF_3 基玻璃光纤,并利用其作为增益介质,获得了波长约为 2875 nm 的激光输出。总结了氟碲酸盐玻璃光纤、 AlF_3 基玻璃光纤和 InF_3 基玻璃光纤的特点及相应激光器的研究进展。

关键词 光纤光学; 激光材料; 中红外激光; 超连续谱产生; 稀土掺杂材料

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170604

Progress on Novel Mid-Infrared Glass Fibers and Relative Lasers

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

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

Abstract Mid-infrared fiber lasers have important applications in fundamental researches, optical communications, biomedicine, environmental monitoring, and national defense security. Currently, researchers are mainly focused on two main mid-infrared fiber lasers, including supercontinuum (SC) lasers and rare-earth-ions-doped fiber lasers. For the application requirements, the authors developed a fluorotellurite glass fiber with relatively good stability and high damage threshold. By using the fluorotellurite glass fibers as the nonlinear media, broadband SC laser source from 0.6 to 5.4 μm was obtained in the experiments. Moreover, SC light source with an average power of about 20 W was also obtained, and the spectral range covered 1-4 μm wavelength. The authors fabricated Ho^{3+} -doped AlF_3 based glass fibers with relatively good water resistance. By using the Ho^{3+} -doped AlF_3 based glass fibers as gain media, the authors obtained about 2868 nm lasers. The authors also fabricated Ho^{3+} -doped InF_3 based glass fibers with relatively low phonon energies. By using the Ho^{3+} -doped InF_3 based glass fibers as gain media, the authors obtained about 2875 nm lasers. This paper mainly focuses on introducing the current progress on mid-infrared glass fibers, including the material characteristics of fluorotellurite glass fibers, AlF_3 based glass fibers, InF_3 based glass fibers, and relative lasers.

Key words fiber optics; laser materials; mid-infrared laser; supercontinuum spectrum generation; rare-earth-doped materials

OCIS codes 060.2310; 060.2290; 140.3380; 140.3070; 320.6629; 160.5690

收稿日期: 2019-05-28; 修回日期: 2019-07-05; 录用日期: 2019-07-09

基金项目: 国家自然科学基金(61527823, 61378004, 61605058, 61827821, 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)、激光与物质相互作用国家重点实验室开放课题(SKLLIM1612)

* E-mail: qings@jlu.edu.cn

1 引言

中红外波段激光光源在基础科学研究、光通信、生物医疗、环境污染监测以及国防安全等领域都有着非常重要的应用^[1-11]。目前可实现中红外波段激光输出的光源主要有固体光参量振荡激光器、化学激光器、拉曼激光器、量子级联激光器、宽带超连续谱(SC)激光光源以及稀土离子掺杂激光器等^[12-16]。与其他激光器相比,光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、结构紧凑、可靠性好、稳定性高、寿命长、质量轻以及便于携带与集成等特性,使得其成为近年来研究中红外波段激光器的主要方向之一。

全光纤 SC 激光光源和稀土离子掺杂光纤激光器是当前两类主要中红外波段光纤激光光源^[16-41]。增益光纤作为中红外波段光纤激光光源的重要组成部分,其基质材料的选择以及光纤的设计与制备对激光的性能有着重要的影响。传统石英光纤的红外透光窗口相对较窄(300~2500 nm)、非线性系数较低且声子能量较高,限制了其在中红外波段激光器方面的应用。目前,研制中红外波段光纤激光光源所用的增益介质主要包括在中红外波段具有较低损耗的硝酸盐玻璃光纤、氟化物玻璃光纤以及硫系玻璃光纤等。其中,硫系玻璃光纤具有宽的红外透过窗口、高的非线性系数以及低的声子能量(250~450 cm^{-1}),是研制中红外波段激光光源的理想介质材料之一^[42-45],基于硫系玻璃光纤的中红外 SC 激光光源的光谱覆盖范围已经超过 13 μm ^[17-19]。但是,硫系玻璃光纤的损伤阈值较低,难以用于研制高功率 SC 激光光源,并且尚未有相关基于稀土离子掺杂硫系玻璃光纤的中红外波段激光器的实验报道。在高功率中红外激光光源研究方面,目前所选用的增益光纤主要为一种组分为 $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$ (ZBLAN) 的氟化物玻璃光纤。基于 ZBLAN 玻璃光纤的 SC 激光光源和稀土离子掺杂激光器的输出功率已分别超过 20 W 和 40 W^[20,28]。但由于 ZBLAN 玻璃易潮解,基于 ZBLAN 光纤的中红外激光光源在长期运转,尤其是高功率运转过程中,光纤端面易损伤,从而在一定程度上限制了基于 ZBLAN 玻璃光纤的中红外激光器的实用化进程及输出功率的进一步提升。而硝酸盐玻璃光纤具有较好的化学稳定性和热稳定性、较宽的透过窗口(0.38~6 μm)及较高的非线性系数^[46-47],这使得其在研制实用化激光器上具有潜力。利用硝酸盐玻璃光纤作为非线性介质,已研制出输出功率瓦量级、光

谱范围覆盖 1~5 μm 的 SC 激光光源^[32-33]。此外,理论研究表明稀土掺杂硝酸盐玻璃光纤有望用于研制出约 3 μm 波段的激光器^[48],但是目前尚未有相关实验报道。

面向中红外激光光源的应用需求,笔者研究组近年来一直从事中红外特种玻璃光纤及相关激光器方面的研究工作,并取得了一些成果:研制出具有较高热稳定性和化学稳定性的氟硝酸盐玻璃光纤,并进一步利用其作为非线性介质,研制出光谱范围覆盖 0.6~5.4 μm 的宽带 SC 激光光源和平均功率约 20 W、光谱范围覆盖 1~4 μm 的 SC 激光光源;研制出具有较高热稳定性的 Ho^{3+} 离子掺杂氟化铝(AlF_3)基玻璃光纤和具有较低声子能量的 Ho^{3+} 离子掺杂氟化铟(InF_3)基玻璃光纤,并利用其作为增益介质,实现了约 2.9 μm 的激光输出。本文主要介绍氟硝酸盐玻璃光纤、 AlF_3 基玻璃光纤和 InF_3 基玻璃光纤的特点及相应中红外激光光源的研究进展。

2 中红外光纤激光光源研究进展

光谱带宽和输出功率是 SC 激光光源的两个重要参数。图 1 为目前中红外全光纤 SC 激光光源的研究进展情况。2008 年,美国塔夫斯大学的 Domachuk 等^[30]利用 0.8 cm 长硝酸盐玻璃微结构光纤作为非线性介质获得了光谱带宽约 4080 nm、光谱范围覆盖 789~4870 nm 的 SC 激光光源;2013 年,美国 NP Photonics 公司的 Thapa 等^[32]用工作波长为 1922 nm 的掺铥光纤激光器泵浦一段色散平坦的 W-型硝酸盐光纤获得了输出功率约为 1.2 W、光谱范围覆盖 1~5 μm 的中红外 SC 激光光源;2018 年,笔者研究组^[29]利用氟硝酸盐玻璃光纤作为非线性介质,研制出光谱范围覆盖 0.6~5.4 μm 的宽带 SC 激光光源,这是目前利用氟硝酸盐玻璃光纤作为非线性介质获得的光谱范围最宽的 SC 激光光源。2009 年,日本丰田工业大学的 Qin 等^[22]利用 ZBLAN 玻璃光纤作为增益介质,获得了覆盖 0.35~6.28 μm 波段的 SC 激光光源,此结果也是目前利用氟化物玻璃光纤作为非线性介质获得的光谱范围最宽的 SC 激光光源。2017 年,中国宁波大学的 Wang 等^[21]利用 3.25 μm 的飞秒激光泵浦一段 12 cm 长的硫化物玻璃光纤获得了光谱范围覆盖 1.4~7.2 μm 的 SC 激光光源。2014 年,丹麦技术大学的 Petersen 等^[17]用硒化物玻璃光纤作为非线性介质获得了光谱范围覆盖 1.4~13.3 μm 的 SC 激光光源。2016 年,日本丰田工业大学的 Cheng 等^[18]

通过优化光纤参数和泵浦激光参数,将该类 SC 激光光源的光谱带宽拓展到 $2.0\sim 15.1\ \mu\text{m}$ 。2017 年,中国宁波大学的 Zhao 等^[19]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 $2.0\sim 16\ \mu\text{m}$ 的 SC 激光光源,这是目前获得光谱带宽最宽的 SC 激光光源。图 1(b)为目前中红外 SC 激光光源输出功率水平的研究进展情况。ZBLAN 玻璃光纤的研究较为成熟,目前市场上已有商用 ZBLAN 玻璃光纤。2009 年,美国密歇根大学的 Xia 等^[25]报道了平均输出功率为 10.5 W 的基于 ZBLAN 光纤的中红外 SC 激光光源,其光谱覆盖范围为 $0.8\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 。2014 年,中国国防科学技术大学的 Yang 等^[26]利用约 $2\ \mu\text{m}$ 掺铥脉冲光纤

激光泵浦 ZBLAN 光纤的中红外 SC 激光光源,使平均输出功率提升到 13 W。同年,中国北京工业大学的 Liu 等^[28]将基于 ZBLAN 光纤的中红外 SC 激光光源的平均输出功率提升到 24.3 W,相应的光谱覆盖范围为 $1.9\sim 3.3\ \mu\text{m}$ 。在基于氟磷酸盐玻璃光纤的 SC 激光光源研究方面,2016 年,中国北京工业大学的 Shi 等^[33]利用一段数值孔径为 0.21 的阶跃型大芯径磷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 $1.92\sim 3.08\ \mu\text{m}$ 的中红外 SC 激光光源。最近,笔者研究组利用自制的氟磷酸盐玻璃光纤作为非线性介质,将相关 SC 激光光源的输出功率逐渐提升至约 20 W^[29,34-35],该光源具有较好的长期稳定性。

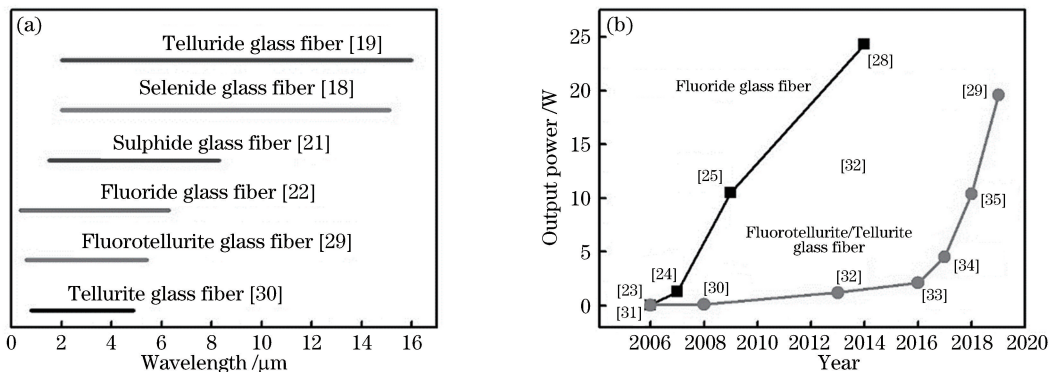


图 1 中红外波段 SC 光纤激光光源主要性能参数进展。(a)光谱带宽;(b)输出功率水平

Fig. 1 Progress on the main parameters of mid-infrared SC fiber laser sources.

(a) Spectral bandwidth; (b) output power scale

在稀土离子掺杂中红外光纤激光器研究方面,英国南安普顿大学、美国海军研究实验室、法国雷恩第一大学,以及国内的中国科学院西安光学精密机械研究所、宁波大学、江苏师范大学等科研单位的研究人员开展了稀土离子掺杂硫系玻璃及光纤的相关研究工作,并观察到中红外波段的发光现象^[49-53]。但是,受硫系玻璃基质材料中稀土离子溶解度、损耗和热机械性质等因素的限制^[52],目前尚未有相关稀土离子掺杂硫系玻璃光纤的中红外波段激光器的实验报道。目前中红外波段稀土离子掺杂光纤激光器主要以 ZBLAN 玻璃光纤为增益介质,相关研究进展情况如图 2 所示。2017 年,加拿大拉瓦尔大学的 Maes 等^[38]利用 Er^{3+} 离子掺杂 ZrF_4 基玻璃光纤作为增益介质研制出平均功率约为 5.6 W、波长约为 $3.55\ \mu\text{m}$ 的激光器。2018 年,加拿大拉瓦尔大学的 Aydin 等^[20]利用 Er^{3+} 离子掺杂 ZrF_4 基玻璃光纤作为增益介质,将约 $2.8\ \mu\text{m}$ 激光器的平均功率提升至约

41.6 W。笔者研究组在稳定性更好、声子能量更低的氟化物玻璃光纤材料方面开展了相关研究工作,研制出具有较高热稳定性的 Ho^{3+} 离子掺杂 AlF_3 基玻璃光纤和具有较低声子能量的 Ho^{3+} 离子掺杂 InF_3 基玻璃光纤,并进一步将其作为增益介质,实现了约 $2.9\ \mu\text{m}$ 的激光输出^[54-55]。最近,加拿大拉瓦尔大学的 Maes 等^[39]利用 Ho^{3+} 离子掺杂 InF_3 基玻璃光纤作为增益介质实现了在室温条件下的 $3.92\ \mu\text{m}$ 的激光输出。在稀土离子掺杂碲酸盐玻璃光纤研究方面,2017 年,俄罗斯科学院应用物理研究所的 Anashkina 等^[48]的理论研究结果表明,利用 Er^{3+} 离子掺杂碲酸盐玻璃光纤作为增益介质有望实现约 $2.7\ \mu\text{m}$ 的激光输出;随后,其利用 Tm^{3+} 离子掺杂碲酸盐玻璃光纤作为增益介质,获得约 $2.3\ \mu\text{m}$ 的激光输出^[56]。

笔者所查资料显示目前尚未有利用稀土离子掺杂碲酸盐玻璃光纤作为增益介质,实现更长波长(大于 $2.3\ \mu\text{m}$)激光器的相关实验报道。

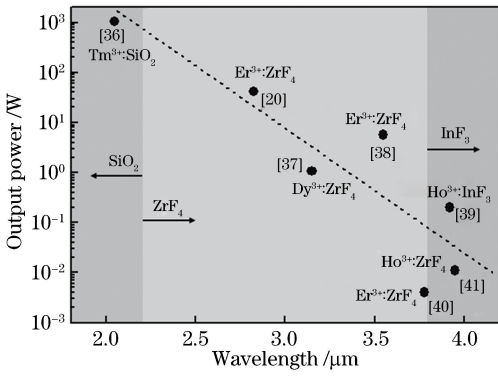


图 2 中红外波段稀土离子掺杂光纤激光器的工作波长与对应输出功率的研究进展

Fig. 2 Progress on the operational wavelength and output power scale of mid-infrared rare-earth-ions-doped fiber lasers

3 氟碲酸盐玻璃光纤特点及相应 SC 激光光源研究进展

3.1 氟碲酸盐玻璃光纤特点

针对 ZBLAN 玻璃易潮解这一问题,笔者研究组经过几年的实验探索,筛选出组分分别为 $\text{TeO}_2\text{-BaF}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ (TBY) 和 $\text{AlF}_3\text{-BaF}_2\text{-CaF}_2\text{-YF}_3\text{-SrF}_2\text{-MgF}_2\text{-TeO}_2$ (ABCYSMT) 的氟碲酸盐玻璃^[57]。两玻璃样品在 $0.4\sim 5\ \mu\text{m}$ 光谱范围内具有较高的透过率。由于玻璃样品均是在干燥氮气保护的手套箱内熔制的,其透射光谱中未观察到明显的羟基吸收(约 $3\ \mu\text{m}$ 波长附近)。为了验证 TBY 玻璃和 ABCYSMT 玻璃的抗潮解能力,笔者研究组将抛光后的两种玻璃样品浸于水中处理 12 d,其透射光谱与浸水处理前相比没有明显变化^[35]。另外,浸水处理前后,玻璃样品质量未发生明显变化,样品表面未形成含水层。该实验结果表明 TBY 玻璃和

ABCYSMT 玻璃具有良好的抗潮解能力。

玻璃材料的转变温度 (T_g) 和析晶起始温度 (T_x) 之间差值 (ΔT) 的大小,是衡量该玻璃材料是否可用于光纤拉制的主要参数。 ΔT 值越大说明该玻璃材料的热稳定性越好,越有利于光纤拉制。图 3 为 TBY 玻璃样品和 ABCYSMT 玻璃样品的差热分析(DTA)曲线^[35]。图 3 中插图列出了两种玻璃样品的 T_g 和 T_x 值,其相应的 ΔT 值分别为 $103\ ^\circ\text{C}$ 和 $120\ ^\circ\text{C}$ 。该结果表明 TBY 玻璃和 ABCYSMT 玻璃可用于光纤设计与制备。

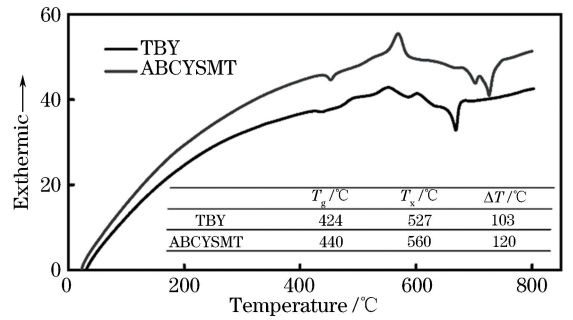


图 3 TBY 玻璃和 ABCYSMT 玻璃的 DTA 曲线
Fig. 3 DTA curves of TBY and ABCYSMT glasses

包层中含有空气孔结构的微结构光纤具有灵活可控的色散特性,是研制宽带 SC 激光光源的理想非线性介质之一^[58]。但是在长期使用过程中,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(尤其是波长大于 $3\ \mu\text{m}$ 区域)增加,相关光源性能下降^[59]。考虑到 TBY 玻璃和 ABCYSMT 玻璃具有较大的折射率差,如图 4(a)所示,利用其分别作为纤芯和包层材料,可研制出一种全固态高数值孔径 (NA) 的氟碲酸盐玻璃光纤^[34,57],其在 $0.4\sim 5\ \mu\text{m}$ 范围内的 NA 值大于 1.1,如图 4(b)所示^[35]。通过调整纤芯尺寸可实现光纤

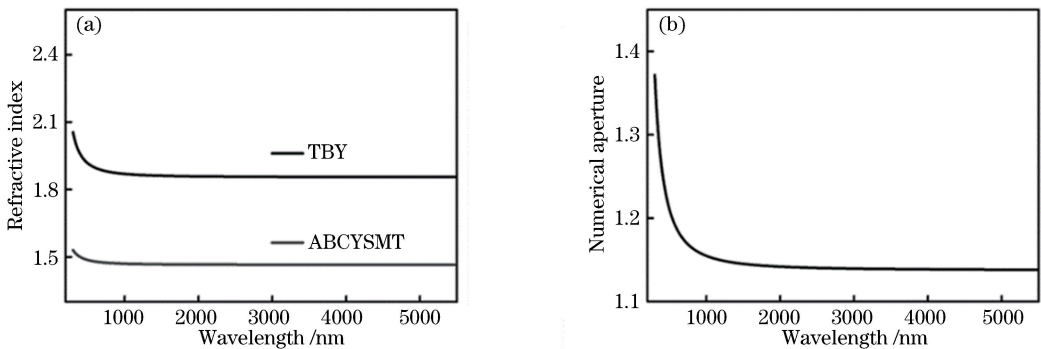
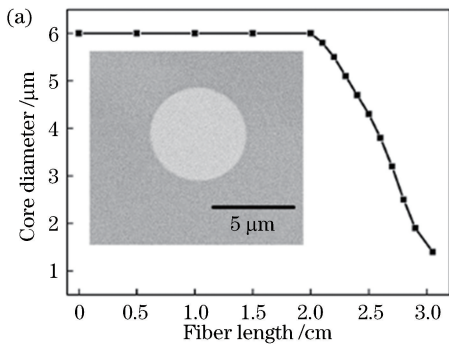


图 4 玻璃材料的折射率曲线及相应光纤的 NA。(a) TBY 玻璃和 ABCYSMT 玻璃的折射率曲线;
(b) 全固态氟碲酸盐玻璃光纤的 NA 值随波长变化关系

Fig. 4 Refractive indices of the glasses and NA of the relative fiber. (a) Refractive indices of TBY and ABCYSMT glasses; (b) dependence of NA of all-solid fluorotellurite fibers on the wavelength

色散的大范围调控,如将纤芯直径由 $50\ \mu\text{m}$ 缩小到 $3\ \mu\text{m}$,相应光纤中 LP₀₁ 模式的零色散波长(ZDW)可由约 $2145\ \text{nm}$ 逐渐蓝移至 $1507\ \text{nm}$ ^[34]。

抗热冲击能力是判断光纤基质玻璃材料在高功率激光器件中应用潜力的重要依据之一。笔者研究组的研究结果显示,TBY玻璃和 ABCYSMT玻璃的相关热机械品质因子^[60-61]分别约为 ZBLAN玻璃的 1.56 倍和 1.91 倍^[35]。这表明与 ZBLAN玻璃相比,TBY玻璃和 ABCYSMT玻璃在高功率激光应用中可承受更强的热冲击。基于 TBY玻璃和 ABCYSMT玻璃的全固态高 NA 氟碲酸盐玻璃光纤可用于研制高功率的中红外激光光源。



3.2 基于氟碲酸盐玻璃光纤的中红外 SC 激光光源

在宽带 SC 激光光源研究方面,一般将拉锥光纤作为非线性介质,这样有利于获得宽带的 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,使得光纤在宽光谱范围内能够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光纤芯径的减小而增大。为了获得宽带的 SC 激光光源,笔者研究组制备出拉锥的全固态高 NA 氟碲酸盐玻璃光纤,在光纤拉锥区,随着光纤芯径从 $6\ \mu\text{m}$ 逐渐减小至 $1.4\ \mu\text{m}$,光纤中基模的 ZDW 从约 $1700\ \text{nm}$ 逐渐移动至约 $1180\ \text{nm}$,如图 5 所示,相应 $2\ \mu\text{m}$ 波长处的非线性系数从约 $69\ \text{km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ 逐渐增大至约 $632\ \text{km}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ ^[29]。

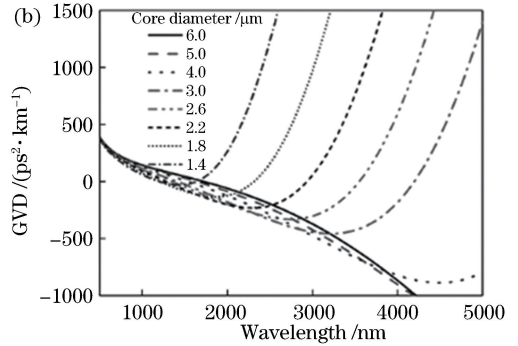


图 5 拉锥氟碲酸盐玻璃光纤参数。(a)拉锥氟碲酸盐玻璃光纤的纤芯直径和光纤位置的关系,插图为未拉锥氟碲酸盐玻璃光纤的截面扫描电镜照片;(b)不同芯径氟碲酸盐玻璃光纤的群速度色散(GVD)曲线

Fig. 5 Parameters of the tapered fluorotellurite fiber. (a) Dependence of the core diameter of the tapered fluorotellurite fiber on the position of the fiber, inset is that scanning electron micrograph of the untapered fluorotellurite fiber; (b) GVD curves for fluorotellurite fibers with different core diameters

利用拉锥全固态高 NA 氟碲酸盐玻璃光纤作为非线性介质,以制约 $2\ \mu\text{m}$ 飞秒光纤激光器作为泵浦源,笔者研究组搭建了 SC 激光实验系统。随着泵浦激光平均功率的逐渐增大,在自相位调制、高阶孤子产生、孤子自频移以及蓝移和红移色散波的产生等多种非线性效应的共同作用下,从拉锥光纤中输出的光谱得到极大的展宽。当泵浦激光的平均功率增大至约 $1.57\ \text{W}$ 时,笔者研究组获得了光谱范围为 $600\sim 5400\ \text{nm}$ 的宽带 SC 激光光源,如图 6 所示,其输出功率约为 $0.85\ \text{W}$,相应的光光转换效率约为 54.1% ^[29]。光谱中,在约 $4270\ \text{nm}$ 波长处的凹陷为空气中 CO_2 的吸收所致。该结果表明氟碲酸盐玻璃光纤可用于研制光谱覆盖范围从可见光到 $5400\ \text{nm}$ 的超宽带 SC 激光光源。

在高功率 SC 激光光源研究方面,笔者研究组选用最大输出功率约为 $40\ \text{W}$ 、波长约 $2\ \mu\text{m}$ 的飞秒光纤激光器作为泵浦源,以芯径约为 $11\ \mu\text{m}$ (ZDW

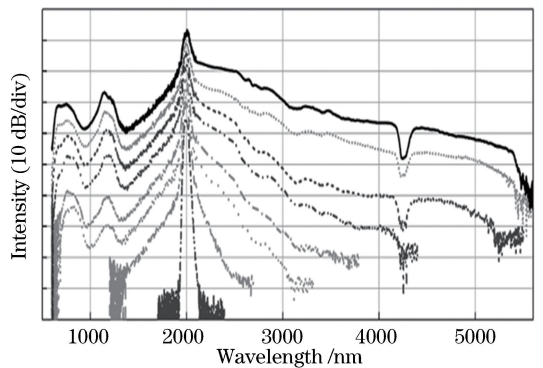


图 6 拉锥氟碲酸盐光纤中产生的 SC 光谱随泵浦激光平均功率的变化关系。从下至上,泵浦激光平均功率依次为 $0.26, 0.42, 0.6, 0.79, 0.99, 1.2, 1.38, 1.57\ \text{W}$

Fig. 6 Dependence of SC spectra from the tapered fluorotellurite fiber on the average pump power. From bottom to top, the average pump powers are $0.26, 0.42, 0.6, 0.79, 0.99, 1.2, 1.38$ and $1.57\ \text{W}$, respectively

约为 1954 nm)的全固态高 NA 氟碲酸盐玻璃光纤作为非线性介质,搭建了高功率中红外 SC 激光测试系统。当泵浦激光平均功率约为 32.8 W 时,获得的平均输出功率为 19.6 W,SC 激光光源的光谱覆盖范围为 1~4 μm 波段,如图 7 所示,相应的光光转换效率约为 60%^[29]。实验过程中未观察到光纤端面有明显损伤。该结果表明,氟碲酸盐玻璃光纤有望用于研制数十瓦甚至百瓦量级、可长时间稳定运转的中红外 SC 激光光源。

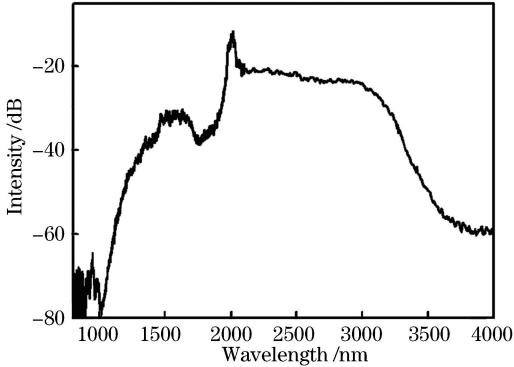


图 7 约 2 μm 泵浦激光平均功率为约 32.8 W 时,全固态高 NA 氟碲酸盐光纤中输出的 SC 光谱
Fig. 7 SC spectrum from the all solid high-NA fluorotellurite fiber with an average pump power of about 32.8 W at about 2 μm wavelength

4 氟化物玻璃光纤特点及相应激光光源研究进展

4.1 AlF₃基玻璃光纤的特点

与 ZBLAN 玻璃光纤相比,AlF₃基玻璃光纤具有较高的抗激光损伤能力和抗潮解能力,是用于研制中红外波段高功率稀土离子掺杂光纤激光器的潜在增益介质之一。经过大量实验探索,笔者研究组制备出具有良好化学稳定性的 AlF₃-BaF₂-YF₃-PbF₂-MgF₂(ABYPM)玻璃,其透射光谱如图 8 所示,样品厚度约为 14.5 mm。玻璃的化学稳定性是指玻璃抵抗化学试剂或大气中各种气体侵蚀能力的总称。根据文献报道,ZBLAN 玻璃在热水中的失重(488.6 mg/cm³)大约是 AlF₃基玻璃(12.6 mg/cm³)的 40 倍^[62]。为了研究 ABYPM 玻璃的化学稳定性,笔者研究组进行了相应的浸水处理实验。具体实验过程为:将抛光好的 ABYPM 玻璃放入室温下的去离子水中浸泡 8 h,浸泡结束后在 100 °C 的干燥箱中烘干 4 h,再比较泡水前后玻璃的质量和透射光谱。图 9 为 ABYPM 玻璃浸水处理前后的红外透射光谱与玻璃照片,样品厚度约为 1 mm^[54]。

浸水前 ABYPM 玻璃的最大透过率为 92.7%,在室温下的去离子水中浸泡 8 h 后,ABYPM 玻璃的最大透过率高达 90.2%,其中 2.9 μm 处透过率的轻微下降主要是由 OH⁻的吸收引起的,肉眼看上去浸水前后玻璃样品的透明度未发生明显变化。

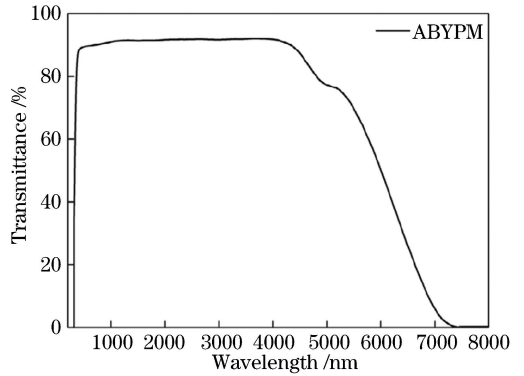


图 8 ABYPM 玻璃样品的透射光谱

Fig. 8 Transmission spectrum of ABYPM glass

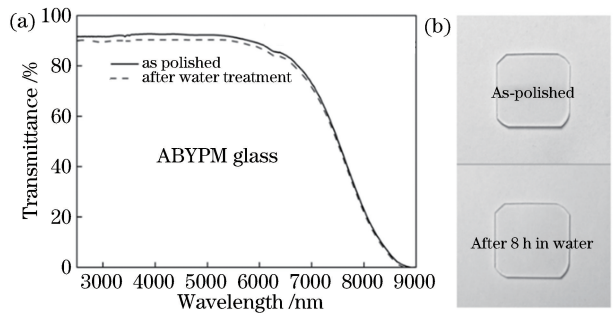


图 9 泡水前后 ABYPM 玻璃实验结果。(a)红外透射光谱; (b)玻璃照片

Fig. 9 Experimental results of ABYPM glass before and after dipping in water. (a) Infrared transmission spectra; (b) glass photos

为制备低损耗的 AlF₃基玻璃光纤,笔者研究组经过实验探索,制备出另外一种组分为 AlF₃-BaF₂-YF₃-PbF₂-MgF₂-CaF₂(ABYPMC)的 AlF₃基玻璃。图 10 为 ABYPM 玻璃和 ABYPMC 玻璃的 DTA 曲线^[54]。从图中可以看出:ABYPM 玻璃的 T_g 为 380 °C, T_x 为 456 °C, ΔT 约为 76 °C;而 ABYPMC 玻璃的 T_g 为 377 °C, T_x 为 458 °C, ΔT 约为 81 °C。ABYPM 玻璃和 ABYPMC 玻璃具有相近的转变温度和较大的 ΔT 值,说明可以利用这两种玻璃进行光纤拉制。此外,两种 AlF₃基玻璃的 T_g 比 ZBLAN 玻璃(约 278 °C)高 100 °C 左右,这表明 AlF₃基玻璃光纤有望用于研制高功率中红外光纤激光器。

对于稀土离子掺杂光纤激光器而言,其基质玻璃材料的声子能量对激光器性能有着重要的影响,通常情况下,玻璃材料的声子能量可由拉曼光谱中

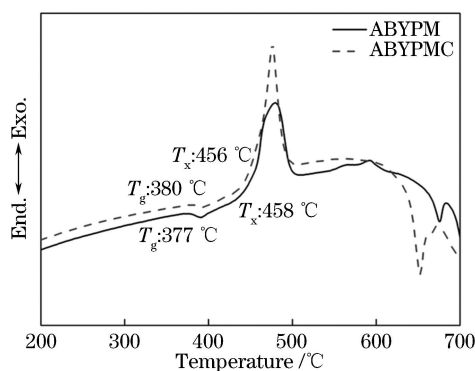


图 10 ABYPM 玻璃和 ABYPMC 玻璃的 DTA 曲线

Fig. 10 DTA curves of ABYPM and ABYPMC glasses

最大的振动频率确定。笔者研究组曾使用工作波长为 633 nm 的激光作为激发光源对 ABYPM 玻璃和 ABYPMC 玻璃的拉曼光谱进行测试,测试结果如图 11 所示。从图中可以看出 ABYPM 玻璃的声子能量约为 610 cm^{-1} 。拉曼光谱中主要有两个明显的振动带,其中:约 400 cm^{-1} 的振动带对应 Y—F 键的振动,包括 Y—F 的伸缩振动和弯曲振动以及 $[\text{YF}_8]$ 多面体等的振动;而约 610 cm^{-1} 的振动带主要由 Al—F 键的振动引起,主要包括 $[\text{AlF}_4]^-$ (622 cm^{-1}) 和 $[\text{AlF}_6]^{3-}$ (550 cm^{-1}) 多面体的振动^[63]。与 ABYPM 玻璃相比,ABYPMC 玻璃的 Al—F 键振动带有所增强,而且拉曼峰向长波数移动,这主要是由玻璃中的 Y 与 Al 含量之比变小引起的。以上结果也说明在 AlF_3 基玻璃体系中降低 AlF_3 的含量可以使玻璃的最大拉曼峰的振动减弱,从而有利于拓宽玻璃的红外透射窗口。

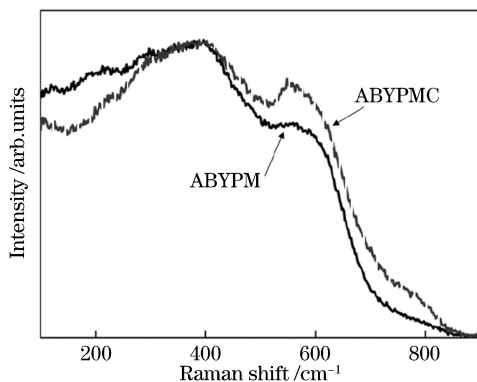


图 11 ABYPM 和 ABYPMC 玻璃的拉曼光谱

Fig. 11 Raman spectra of ABYPM and ABYPMC glasses

图 12 为 ABYPM 玻璃和 ABYPMC 玻璃的折射率曲线。ABYPM 玻璃和 ABYPMC 玻璃在 2868 nm 处的折射率分别为 1.480 和 1.506。如果使用 ABYPM 玻璃作为纤芯材料,ABYPMC 玻璃作为包层材料,则根据 $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ (n_1 和 n_2 分别

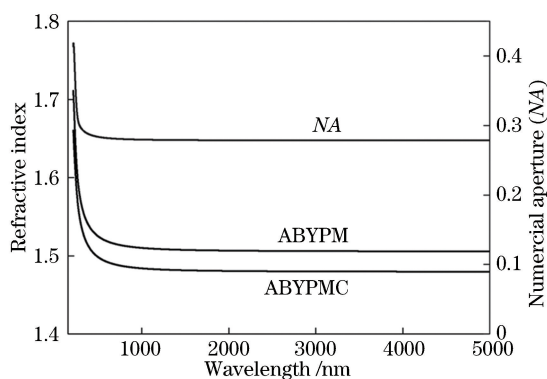


图 12 ABYPM 玻璃和 ABYPMC 玻璃的折射率曲线及 AlF_3 基玻璃光纤的 NA 值随波长变化关系

Fig. 12 Refractive indices of ABYPM and ABYPMC glasses, and the dependence of NA of AlF_3 based glass fibers on the wavelength

为纤芯和包层玻璃材料的折射率)可以计算出 AlF_3 基玻璃光纤在波长 2868 nm 处的 NA 值约为 0.35。

4.2 稀土离子掺杂 AlF_3 基玻璃光纤的中红外激光器

利用 ABYPM 玻璃和 ABYPMC 玻璃分别作为纤芯和包层材料,笔者研究组制备出 Ho^{3+} 离子掺杂浓度为 1.5% (物质的量分数) 的 AlF_3 基玻璃光纤,其光纤截面如图 13 所示^[54]。该 AlF_3 基玻璃光纤的结构为阶跃型,光纤外径约 $240\text{ }\mu\text{m}$,芯径约 $8\text{ }\mu\text{m}$ 。使用回切法测得光纤在 1560 nm 处的传输损耗约为 2 dB/m。

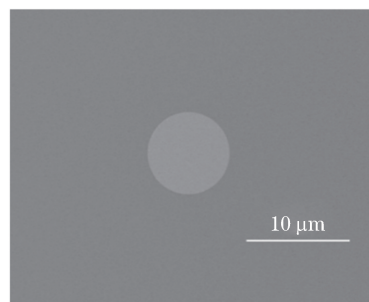


图 13 Ho^{3+} 离子掺杂 AlF_3 基玻璃光纤端面的扫描电镜照片

Fig. 13 Scanning electron micrograph of Ho^{3+} -doped AlF_3 based glass fiber end

根据 Fuchtbauer-Ladenburg 公式和 McCumber 理论可以计算得到 Ho^{3+} 离子激发态能级 $^5\text{I}_6$ 和 $^5\text{I}_7$ 之间辐射跃迁的受激发射截面和吸收截面,如图 14 所示^[54]。从图中可以看出 Ho^{3+} 离子掺杂 ABYPM 玻璃在 2868 nm 的发射截面为 $7.3 \times 10^{-21}\text{ cm}^2$,这一数值要大于 Ho^{3+} 离子掺杂的 ZBLAN 玻璃 ($5.3 \times 10^{-21}\text{ cm}^2$)^[64]。此外,其在 1120 nm 处的吸收截面为 $0.15 \times 10^{-21}\text{ cm}^2$ 。以上结果说明利用 1120 nm 的光纤激光器作为泵浦源有

可能在 Ho^{3+} 离子掺杂的 AlF_3 基玻璃光纤中实现波长约为 2868 nm 的中红外激光输出。

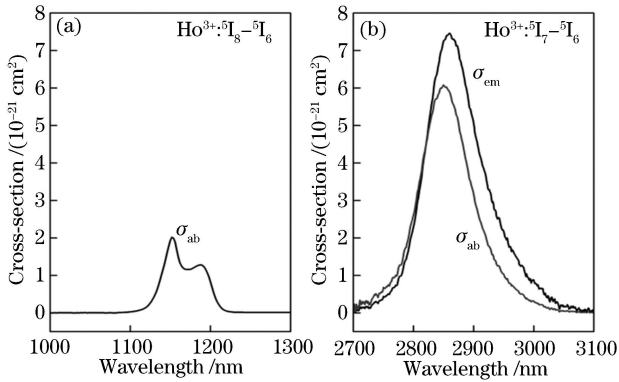


图 14 ABYPM 玻璃中 Ho^{3+} 离子能级跃迁的吸收发射截面。(a) ${}^5\text{I}_6-{}^5\text{I}_8$ 跃迁的吸收截面；(b) ${}^5\text{I}_6-{}^5\text{I}_7$ 跃迁的吸收截面和发射截面

Fig. 14 Absorption and emission cross-sections of the transitions of Ho^{3+} in the ABYPM glass. (a) Absorption cross-section of the transition ${}^5\text{I}_8-{}^5\text{I}_6$; (b) absorption and emission cross-sections of the transition ${}^5\text{I}_7-{}^5\text{I}_6$

利用 Ho^{3+} 离子掺杂 AlF_3 基玻璃光纤作为增益介质,笔者研究组搭建了激光测试系统,如图 15 所示^[54]。泵浦源是输出波长为 1120 nm 的连续(CW)激光器,泵浦光通过一对非球面透镜耦合到 Ho^{3+} 离子掺杂 AlF_3 基玻璃光纤的纤芯中。光纤输出端的光信号通过一段大模场 InF_3 基玻璃光纤(0.3 ~ 5.5 μm , Thorlabs)进行收集,然后接入到光谱仪上。光谱仪(Thorlabs OSA 205C)测试范围为 1 ~ 5.6 μm 。测试过程中使用截止波长为 2400 nm 的长通滤光片来滤除波长小于 2400 nm 的光信号。

实验中光纤激光器的谐振腔由 AlF_3 基玻璃光纤的端面反射构成。由菲涅耳反射公式可计算出该 AlF_3 基玻璃光纤在 2868 nm 处的反射率约为 4.2%。在激光实验中,笔者研究组利用长度为 84 cm 的 Ho^{3+} 离子掺杂 AlF_3 基玻璃光纤作为增益光纤,当 1120 nm 激光的泵浦功率为 140 mW 时,得到了波长为 2868 nm 的激光输出。图 16 为泵浦功率为 1224 mW 时测得的输出激光光谱以及相应的 2868 nm 激光输出功率与入射泵浦功率的变化关

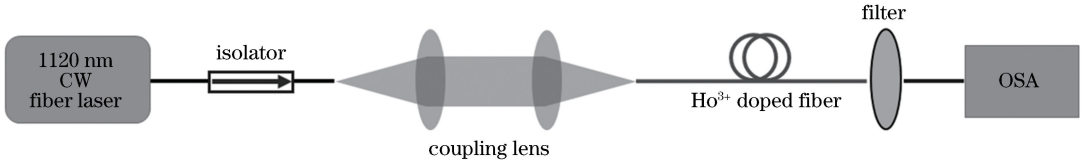


图 15 2868 nm 光纤激光器实验装置示意图

Fig. 15 Diagram of the experimental setup for 2868 nm fiber laser

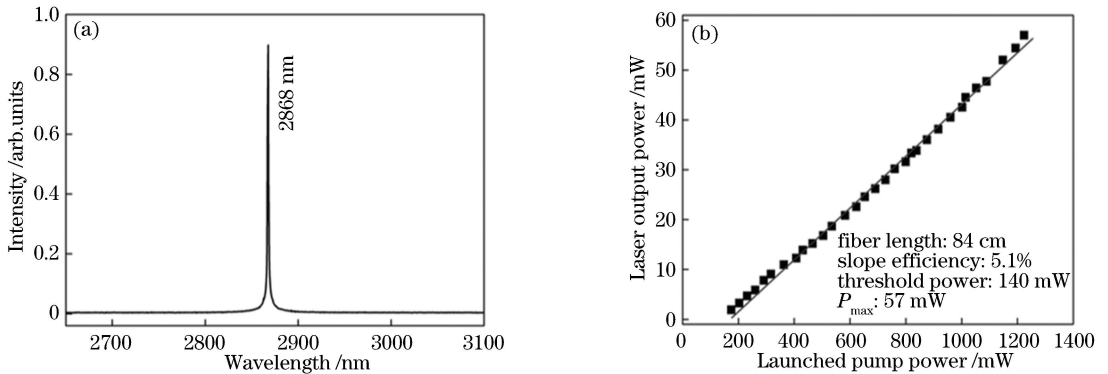


图 16 基于 Ho^{3+} 离子掺杂 AlF_3 基玻璃光纤的 2868 nm 光纤激光器性能。(a) 1120 nm 激光泵浦功率为 1224 mW 时,获得的 2868 nm 激光光谱;(b) 2868 nm 光纤激光器的输出功率与泵浦功率的变化关系

Fig. 16 Performances of 2868 nm laser based on the $\text{Ho}^{3+}:\text{AlF}_3$ fiber. (a) Spectrum of the 2868 nm laser with the launched pump power of 1224 mW; (b) output power of 2868 nm laser as a function of the launched pump power

系。2868 nm 激光的斜率效率约为 5.1%,实验中获得的未饱和输出功率约为 57 mW^[54]。该结果与文献中报道的利用光纤两端端面反射作为谐振腔的 $\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤激光器的效率相当^[65]。这是首次在掺 Ho^{3+} 的 AlF_3 基玻璃光纤中实现 2868 nm

的激光输出。

与此同时,笔者研究组研究了激光的斜率效率和阈值泵浦功率与光纤长度变化的依赖关系,结果如图 17 所示。随着光纤长度由 18 cm 增加到 84 cm,激光斜率效率由 1.1% 提高到 5.1%,阈值泵

浦功率从 180 mW 单调下降至 140 mW; 当光纤长度由 84 cm 增加到 150 cm 时, 激光的斜率效率由 5.1% 降低到 3.3%, 阈值泵浦功率从 140 mW 增加到 165 mW。由实验结果可以看出, 对于获得阈值泵浦功率低、输出激光效率高的 2868 nm 激光来说, 最佳的 AlF₃ 基玻璃光纤的长度是 84 cm。未来可以通过优化激光腔参数来进一步提高 2868 nm 光纤激光器的性能。

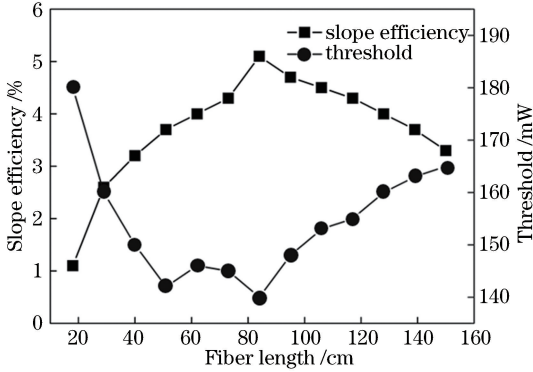


图 17 2868 nm 光纤激光器的斜率效率和阈值泵浦功率随光纤长度的依赖关系

Fig. 17 Dependence of slope efficiency and threshold pump power of 2868 nm fiber laser on the fiber length

4.3 InF₃ 基玻璃光纤的特点

与 ZBLAN 玻璃(约 580 cm⁻¹)相比, InF₃ 基玻璃具有更低的声子能量(约 510 cm⁻¹)和更宽的红外透射窗口^[66], 有望进一步提高中红外波段稀土离子掺杂光纤激光器的效率和输出功率, 以及实现更长波长(如 4 μm)的激光输出。笔者研究组经过实验探索, 制备出组分为 InF₃-ZnF₂-GaF₃-BaF₂-SrF₂-YF₃-LiF-PbF₂ (IZGP) 和 InF₃-ZnF₂-GaF₃-BaF₂-SrF₂-YF₃-LiF-NaF (IZGN) 的 InF₃ 基玻璃。图 18 为 IZGP 玻璃和 IZGN 玻璃的透射光谱^[55]。玻璃样品厚度约为 3 mm。从图中可以看出 IZGP 玻璃和 IZGN 玻璃在 0.3~6.3 μm 范围内的透过率均大于 90%。玻璃样品的制备在干燥氮气保护的手套箱内完成, 目的是保证玻璃样品中的 OH⁻ 含量较低, 其在 2.94 μm 处的吸收系数为 0.0009 cm⁻¹。此外, 利用 IZGP 玻璃的透射谱计算玻璃的透射损耗, 结果如图 18 中插图所示。从图中可以看出 IZGP 玻璃在 0.4~5.7 μm 范围内的透射损耗小于 1 dB/m, 其中由残余 OH⁻ 引起的 2.94 μm 处的损耗为 0.94 dB/m, 较低的 3 μm 波段的损耗有利于在掺 Ho³⁺ 的 InF₃ 基光纤中实现约 2.9 μm 的激光。

使用工作波长为 633 nm 的激光器作为激发光

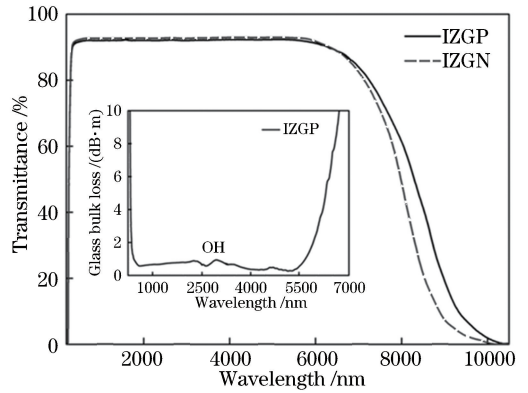


图 18 IZGP 玻璃和 IZGN 玻璃的透过光谱。

插图为 IZGP 玻璃的损耗曲线

Fig. 18 Transmission spectra of IZGP and IZGN glasses.

Inset is that loss spectrum of the bulk IZGP glass

源测试了 IZGP 玻璃和 IZGN 玻璃的拉曼光谱, 结果如图 19 所示, 可以看出 IZGN 玻璃的拉曼光谱中主要有两个明显的拉曼峰, 其中约 230 cm⁻¹ 的拉曼峰对应非桥氟原子的非对称伸缩振动, 而约 510 cm⁻¹ 的拉曼峰对应 In—F—In 键的振动^[67]。IZGP 玻璃的特征拉曼峰与 IZGN 玻璃相似, 但是其拉曼峰的峰值为 504 cm⁻¹, 这主要是由于 IZGP 玻璃组分中含有 12% (物质的量分数) 的 PbF₂。相对分子质量较大的 PbF₂ 取代相对分子质量较小的一价碱金属氟化物 (NaF、LiF), 会导致玻璃的多声子吸收带边红移, 在拉曼光谱上表现为最大拉曼峰蓝移, 从而使得玻璃的声子能量降低^[68]。IZGP 更低的声子能量有利于降低 Ho³⁺ 离子激发态能级的多声子无辐射弛豫速率, 进而提升 Ho³⁺ 离子的 2.9 μm 发光效率。

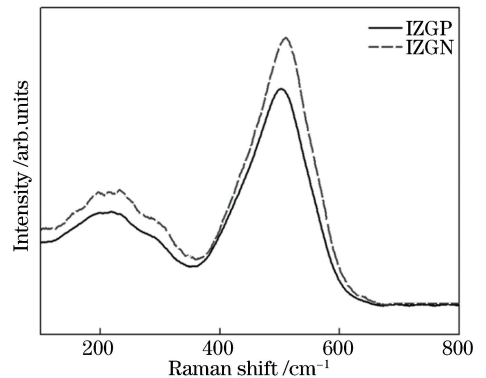


图 19 IZGP 玻璃和 IZGN 玻璃的拉曼光谱

Fig. 19 Raman spectra of IZGP and IZGN glasses

图 20 为 IZGP 玻璃和 IZGN 玻璃的 DTA 曲线^[55]。从图中可以看出: IZGP 玻璃的 T_g 为 262 °C, T_x 为 346 °C, ΔT 为 84 °C; 而 IZGN 玻璃的 T_g 为 259 °C, T_x 为 355 °C, ΔT 为 96 °C。IZGP 玻

璃和 IZGN 玻璃具有相近的 T_g 和较大的 ΔT 值,说明这两种玻璃具有较好的成玻璃能力和抗析晶性能,可用于光纤拉制。

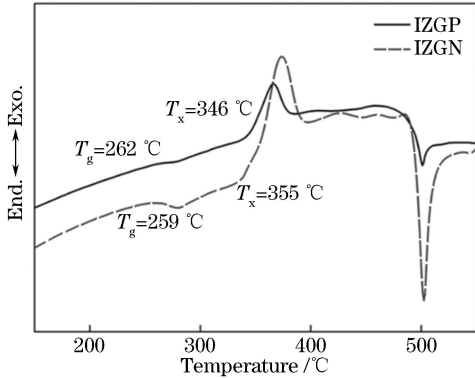


图 20 IZGP 玻璃和 IZGN 玻璃的 DTA 曲线
Fig. 20 DTA curves of IZGP and IZGN glasses

4.4 稀土离子掺杂 InF_3 基玻璃光纤的中红外激光器

利用 IZGP 玻璃(在 2875 nm 波长下折射率为 1.512)和 IZGN 玻璃(在 2875 nm 波长下折射率为 1.470)分别作为纤芯和包层材料,笔者研究组制备出 Ho^{3+} 离子掺杂浓度为 1.5% (物质的量分数)的 InF_3 基玻璃光纤,其光纤截面如图 21 所示^[55]。光纤外径约为 225 μm ,芯径约为 8 μm 。使用回切法测试了光纤在 1560 nm 处的传输损耗为 3 dB/m。与玻璃的透射损耗相比,光纤的损耗有所变大,这主要是拉制光纤时残余应力会引入散射损耗。此外,光纤拉制过程中如果玻璃发生轻微析晶也会引入一定的损耗,可以通过优化光纤拉制工艺来降低光纤的损耗。

利用 Fuchtbauer-Ladenburg 公式和 McCumber 理论,笔者研究组计算出 Ho^{3+} 离子激发态能级 $^5\text{I}_6$ 和 $^5\text{I}_7$ 之间辐射跃迁的受激发射截面和吸收截面,如图 22 所示。从图中可以看出 Ho^{3+} 离子掺杂 IZGP 玻璃在 2875 nm 的发射截面为 $8.34 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$,这一数值要大于 Ho^{3+} 离子掺杂的 ZBLAN 玻璃 ($5.3 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$)^[64]。此外,其在 1120 nm 处的吸收截面为 $0.11 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$ 。以上结果说明利用工作波长为 1120 nm 的光纤激光器作为泵浦源有可能在 Ho^{3+} 离子掺杂的 InF_3 基玻璃光纤中实现波长约为 2875 nm 的中红外激光输出。

利用 Ho^{3+} 离子掺杂 InF_3 基玻璃光纤作为增益介质,笔者研究组搭建了激光测试系统,如图 15 所示。在激光实验中,笔者研究组利用长度为 92 cm 的 InF_3 基玻璃光纤作为增益光纤,当 1120 nm 激光的泵浦功率为 278 mW 时,得到了 2875 nm 的激光

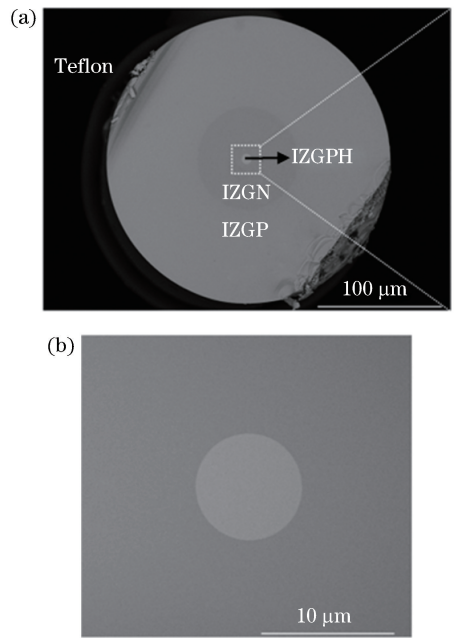


图 21 扫描电镜照片。(a) Ho^{3+} 离子掺杂 InF_3 基玻璃光纤端面的扫描电镜照片;(b) 光纤端面局部放大图
Fig. 21 Scanning electron micrograph. (a) Scanning electron micrograph of Ho^{3+} -doped InF_3 based glass fiber end; (b) enlarged cross-section in the dashed line area of fiber end

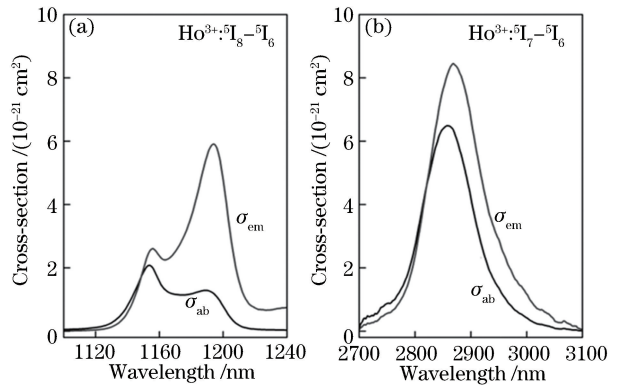


图 22 IZGP 玻璃中掺杂的 Ho^{3+} 离子的吸收截面和发射截面。(a) $^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_8$ 跃迁;(b) $^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7$ 跃迁
Fig. 22 Absorption and emission cross-sections of Ho^{3+} -doped in the IZGP glass. (a) Transition $^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_8$; (b) transition $^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7$

输出。图 23 为泵浦功率为 1224 mW 时测得的输出激光光谱以及相应的 2875 nm 激光输出功率与入射泵浦光功率的变化关系,相应的激光斜率效率约为 6%^[55]。这是首次在 Ho^{3+} 离子掺杂的 InF_3 基玻璃光纤中实现工作波长约为 2875 nm 的激光输出。

与此同时,笔者研究组研究了激光的斜率效率和阈值泵浦功率随光纤长度变化的依赖关系,结果如图 24 所示^[55]。随着光纤长度从 12 cm 增加到

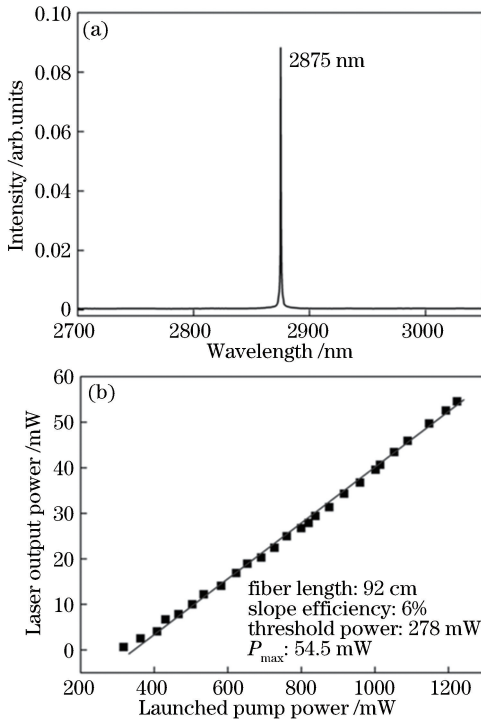


图 23 基于 Ho^{3+} 离子掺杂 InF_3 基玻璃光纤的 2875 nm 光纤激光器性能。(a) 1120 nm 激光泵浦功率为 1224 mW 时,获得的 2875 nm 激光光谱;(b) 2875 nm 光纤激光器的输出功率与泵浦光功率的变化关系

Fig. 23 Performances of 2875 nm laser based on the $\text{Ho}^{3+}:\text{InF}_3$ fiber. (a) Output spectrum of the 2875 nm laser for a launched pump power of 1224 mW at 1120 nm; (b) output power of the 2875 nm laser as a function of the launched pump power

92 cm, 激光斜率效率由 1.4% 提高到 6%, 阈值泵浦功率从 709 mW 单调下降至 278 mW; 当光纤长度从 92 cm 增加到 140 cm 时, 激光的斜率效率由 6% 降低到 3.2%, 阈值泵浦功率从 278 mW 增加到 422 mW。从结果可以看出, 对于获得阈值泵浦功率低、输出激光效率高的 2875 nm 激光来说, 最佳的 Ho^{3+} 离子掺杂 InF_3 基玻璃光纤的长度约为 84 cm。未来可以通过优化泵浦激光的参数、激光腔结构参数和增益光纤参数来进一步提高 2875 nm 光纤激光器的性能。

随后, 加拿大拉瓦尔大学的 Maes 等^[39] 利用 Ho^{3+} 离子掺杂的 InF_3 基玻璃光纤作为增益介质实现了室温条件下的 3.92 μm 激光输出, 其输出功率约为 200 mW, 相应的斜率效率约为 10.2%, 如图 25 所示。2018 年, 澳大利亚麦考瑞大学的 Majewski 等^[69] 利用 Dy^{3+} 离子掺杂的 InF_3 基玻璃光纤作为增

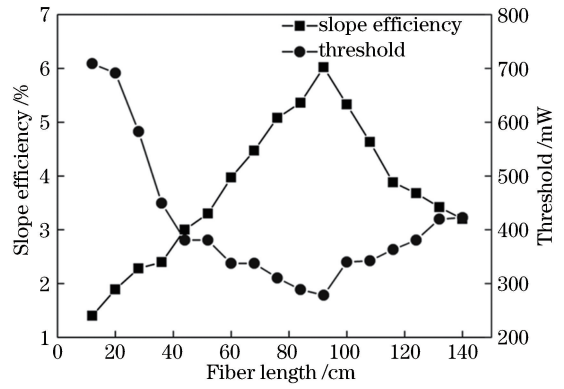


图 24 2875 nm 光纤激光器的斜率效率和阈值泵浦功率随光纤长度的依赖关系

Fig. 24 Dependence of slope efficiency and threshold pump power of 2875 nm fiber laser on the fiber length

益介质, 实现了约 2.94 μm 波长激光输出。实验中, 还观察到约 4.3 μm 波段的中红外发光现象。上述实验结果验证了 InF_3 基玻璃光纤用于研制约 4 μm 波段激光器的可行性。

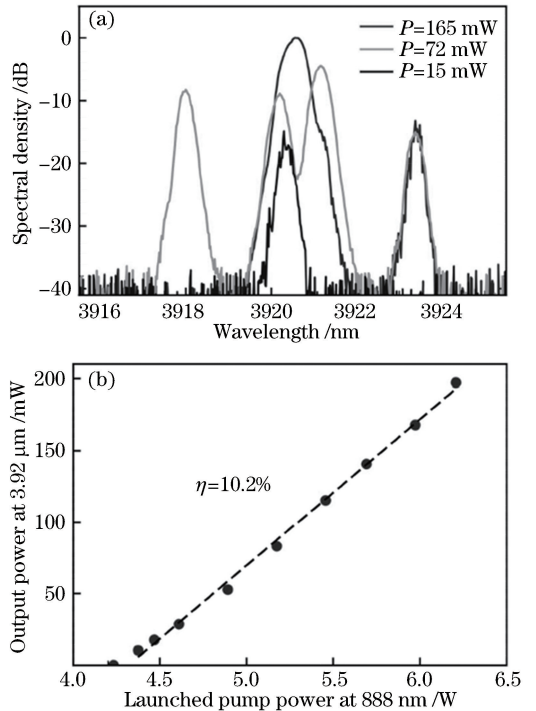


图 25 基于 Ho^{3+} 离子掺杂 InF_3 基玻璃光纤的 3.92 μm 光纤激光器性能。(a) 不同输出功率时, Ho^{3+} 离子掺杂 InF_3 基玻璃光纤激光光谱图;(b) 3.92 μm 光纤激光器的输出功率与泵浦光功率的变化关系

Fig. 25 Performances of 3.92 μm laser based on the $\text{Ho}^{3+}:\text{InF}_3$ fiber. (a) Spectra of the $\text{Ho}^{3+}:\text{InF}_3$ fiber laser for different output powers; (b) output power of the 3.92 μm fiber laser as a function of the launched pump power

5 结 论

中红外波段光纤激光光源在基础科学研究、环境监测、生物医疗和国防安全等领域具有广阔的应用前景,是近年来研究者关注的热点问题之一。面对应用需求,笔者研究组经过实验探索,制备出具有较高化学稳定性和热稳定的氟碲酸盐玻璃光纤,并利用其作为非线性介质研制出光谱范围覆盖为 $0.6\sim 5.4\ \mu\text{m}$ 、平均输出功率约为 $20\ \text{W}$ 的中红外 SC 激光光源;研制出具有较高抗潮解能力的 Ho^{3+} 离子掺杂 AlF_3 基玻璃光纤和具有较低声子能量的 Ho^{3+} 离子掺杂 InF_3 基玻璃光纤,并利用其作为增益介质,实现了约 $2.9\ \mu\text{m}$ 激光输出,该激光表现出了较好的长期稳定性。

在接下来的中红外玻璃光纤研制方面,需要通过优化光纤基质玻璃材料组分、光纤制备工艺、光纤的抗弯能力及抗拉强度等参数,探索开发出稳定性好、损耗低、可商业化推广的中红外玻璃光纤,以满足中红外激光光源发展的需求。在中红外 SC 激光光源研究方面,通过优化氟碲酸盐玻璃光纤的结构和色散等参数以及泵浦激光的参数,有望研制出平均输出功率为百瓦量级、光谱范围覆盖 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 的中红外 SC 激光光源。在稀土离子掺杂中红外光纤激光器研究方面,通过优化氟化物玻璃光纤的结构和稀土离子掺杂浓度等参数以及泵浦激光的参数,有望进一步提升 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 波段光纤激光器的光光转换效率及输出功率。

参 考 文 献

- [1] Diddams S A, Hollberg L, Mbele V. Molecular fingerprinting with the resolved modes of a femtosecond laser frequency comb[J]. *Nature*, 2007, 445(7128): 627-630.
 - [2] Mandon J, Guelachvili G, Picqué N. Fourier transform spectroscopy with a laser frequency comb [J]. *Nature Photonics*, 2009, 3(2): 99-102.
 - [3] Lin Z Y, Jia X Y, Wang C L, *et al.* Ionization suppression of diatomic molecules in an intense midinfrared laser field[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108(22): 223001.
 - [4] Xie K, Cao Y. Research on design and implementation of long distance infrared laser wireless communication system [J]. *Digital Technology and Application*, 2016(12): 41.
- 谢崑, 曹屹. 关于远距离红外激光无线通信系统设计

- 与实现的研究[J]. *数字技术与应用*, 2016(12): 41.
- [5] Taccheo S. Fiber lasers for medical diagnostics and treatments: state of the art, challenges and future perspectives[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10058: 1005808.
 - [6] Qian L J. Development and integration of widely tunable mid-infrared femtosecond and narrow-band long-pulse laser devices [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(s3): 43.
- 钱列加. 宽调谐中红外飞秒及窄带长脉冲激光器件的研制和集成[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(s3): 43.
- [7] Deng Y, Zhu Q H, Zeng X M, *et al.* The generation and recent progress of ultrashort mid-infrared pulse [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(8): 21-26.
- 邓颖, 朱启华, 曾小明, 等. 超短中红外激光脉冲的产生及其发展状况[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(8): 21-26.
- [8] Chen L Z, Wen S C. Recent advances and methods of optical parametric generation and amplification for tunable ultra-short mid-infrared pulse [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 081902.
- 陈列尊, 文双春. 可调谐超短中红外激光脉冲的参变产生与放大及其最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(8): 081902.
- [9] Yu Z J, Han H N, Wei Z Y. Progress in dual-comb spectroscopy[J]. *Physics*, 2014, 43(7): 460-467.
- 于子蛟, 韩海年, 魏志义. 双光梳光谱学研究进展[J]. *物理*, 2014, 43(7): 460-467.
- [10] Meng D D, Zhang H B, Li M S, *et al.* Laser technology for direct IR countermeasure system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1105009.
- 孟冬冬, 张鸿博, 李明山, 等. 定向红外对抗系统中的激光器技术[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1105009.
- [11] Li S S, Yan X S. Research on mid-infrared laser source in laser countermeasure system and key technology [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2018, 33(5): 19-23.
- 李森森, 闫秀生. 激光对抗系统中的中红外激光光源及其关键技术[J]. *光电技术应用*, 2018, 33(5): 19-23.
- [12] Budni P A, Pomeranz L A, Lemons M L, *et al.* Efficient mid-infrared laser using $1.9\text{-}\mu\text{m}$ -pumped $\text{Ho}:\text{YAG}$ and ZnGeP_2 optical parametric oscillators [J]. *Journal of the Optical Society of America B*,

- 2000, 17(5): 723-728.
- [13] Gmachl C, Capasso F, Sivco D L, *et al.* Recent progress in quantum cascade lasers and applications [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2001, 64(11): 1533-1601.
- [14] Perram G P, Marciniak M A, Goda M. High energy laser weapons: technology overview [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5414: 1-25.
- [15] Swiderski J. High-power mid-infrared supercontinuum sources: current status and future perspectives [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2014, 38(5): 189-235.
- [16] Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 423-431.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Aydin Y O, Fortin V, Vallée R, *et al.* Towards power scaling of 2.8 μm fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(18): 4542-4545.
- [21] Wang Y Y, Dai S X, Li G T, *et al.* 1.4-7.2 μm broadband supercontinuum generation in an As-S chalcogenide tapered fiber pumped in the normal dispersion regime [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(17): 3458-3461.
- [22] 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): 161103.
- [23] Xia C N, Kumar M, Kulkarni O P, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation to 4.5 μm in ZBLAN fluoride fibers by nanosecond diode pumping [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(17): 2553-2555.
- [24] Xia C N, Kumar M, Cheng M Y, *et al.* Power scalable mid-infrared supercontinuum generation in ZBLAN fluoride fibers with up to 1.3 watts time-averaged power [J]. *Optics Express*, 2007, 15(3): 865-871.
- [25] 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.
- [26] Yang W Q, Zhang B, Xue G H, *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.
- [27] 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.
- [28] 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, November 16-21, 2014, Shanghai, China. Washington, D.C.: OSA, 2014: AM3A.6.
- [29] Jia Z X, Yao C F, Li Z R, *et al.* Progress on novel high power mid-infrared fiber laser materials and supercontinuum laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508006.
贾志旭, 姚传飞, 李真睿, 等. 新型高功率中红外光纤激光材料与超连续谱激光研究进展 [J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508006.
- [30] Domachuk P, Wolchover N A, Cronin-Golomb M, *et al.* Over 4000 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] Delmonte T, Watson M A, O'Driscoll E J, *et al.* Generation of Mid-IR continuum using tellurite microstructured fiber [C]//2006 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference, May 21-26, 2006, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE, 2006: CTuA4.
- [32] 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 [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8898: 889808.
- [33] 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.
- [34] Jia Z X, Yao C F, Jia S J, *et al.* 4.5 W supercontinuum generation from 1017 to 3438 nm in an all-solid fluorotellurite fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(26): 261106.
- [35] Yao C F, Jia Z X, Li Z R, *et al.* High-power mid-infrared supercontinuum laser source using fluorotellurite fiber[J]. *Optica*, 2018, 5(10): 1264-1270.
- [36] Ehrenreich T, Leveille R, Majid I, *et al.* 1-kW, all-glass Tm: fiber laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7580: 758016.
- [37] Woodward R I, Majewski M R, Bharathan G, *et al.* Watt-level dysprosium fiber laser at 3.15 μm with 73% slope efficiency[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(7): 1471-1474.
- [38] Maes F, Fortin V, Bernier M, *et al.* 5.6 W monolithic fiber laser at 3.55 μm [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2054-2057.
- [39] Maes F, Fortin V, Poulain S, *et al.* Room-temperature fiber laser at 3.92 μm [J]. *Optica*, 2018, 5(7): 761-764.
- [40] Henderson-Sapir O, Jackson S D, Ottaway D J. Versatile and widely tunable mid-infrared erbium doped ZBLAN fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1676-1679.
- [41] Schneide J, Carbonnier C, Unrau U B. Characterization of a Ho³⁺-doped fluoride fiber laser with a 3.9- μm emission wavelength [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(33): 8595-8600.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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*, 2004, 21(6): 1146-1155.
- [45] 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.
- [46] Wang J S, Vogel E M, Snitzer E. Tellurite glass: a new candidate for fiber devices [J]. *Optical Materials*, 1994, 3(3): 187-203.
- [47] Ghosh G. Sellmeier coefficients and chromatic dispersions for some tellurite glasses[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1995, 78(10): 2828-2830.
- [48] Anashkina E A, Dorofeev V V, Koltashev V V, *et al.* Development of Er³⁺-doped high-purity tellurite glass fibers for gain-switched laser operation at 2.7 μm [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(12): 4337-4351.
- [49] Schweizer T, Samson B N, Hector J R, *et al.* Infrared emission from holmium doped gallium lanthanum sulphide glass [J]. *Infrared Physics & Technology*, 1999, 40(4): 329-335.
- [50] Moizan V, Nazabal V, Troles J, *et al.* Er³⁺-doped GeGaSbS glasses for mid-IR fibre laser application: synthesis and rare earth spectroscopy [J]. *Optical Materials*, 2008, 31(1): 39-46.
- [51] Yang A P, Qiu J H, Zhang M J, *et al.* Mid-infrared luminescence of Dy³⁺ ions in modified Ga-Sb-S chalcogenide glasses and fibers[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 1237-1242.
- [52] Cui J, Xiao X S, Xu Y T, *et al.* Mid-infrared emissions of Dy³⁺ doped Ga-As-S chalcogenide glasses and fibers and their potential for a 4.2 μm fiber laser[J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(8): 2089-2102.
- [53] Yu X Y, Dai S X, Zhou Y X, *et al.* Theoretical studies on mid-infrared gain characteristics of erbium-doped chalcogenide glass fibers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(1): 0105003.
於杏燕, 戴世勋, 周亚训, 等. 掺铒硫系玻璃光纤的中红外增益特性模拟研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0105003.
- [54] Jia S J, Jia Z X, Yao C F, *et al.* Ho³⁺ doped fluoroaluminate glass fibers for 2.9 μm lasing [J]. *Laser Physics*, 2018, 28(1): 015802.
- [55] Jia S J, Jia Z X, Yao C F, *et al.* 2875 nm lasing from Ho³⁺-doped fluoroindate glass fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(4): 323-326.
- [56] Muravyev S V, Anashkina E A, Andrianov A V, *et al.* Dual-band Tm³⁺-doped tellurite fiber amplifier and laser at 1.9 μm and 2.3 μm [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 16164.
- [57] Jia Z X, Yao C F, Jia S J, *et al.* Supercontinuum generation covering the entire 0.4-5 μm transmission window in a tapered ultra-high numerical aperture all-solid fluorotellurite fiber[J]. *Laser Physics Letters*,

- 2018, 15(2): 025102.
- [58] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1135-1184.
- [59] 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.
- [60] Penilla E H, Devia-Cruz L F, Duarte M A, *et al.* Gain in polycrystalline Nd-doped alumina: leveraging length scales to create a new class of high-energy, short pulse, tunable laser materials [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7: 33.
- [61] Campbell J H, Suratwala T I. Nd-doped phosphate glasses for high-energy/high-peak-power lasers [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2000, 263/264: 318-341.
- [62] Huang F F, Ma Y Y, Li W W, *et al.* 2.7 μm emission of high thermally and chemically durable glasses based on AlF_3 [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 3607.
- [63] Chen H Y, Gan F X. Vibrational spectra and structure of AlF_3 - YF_3 fluoride glasses [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1989, 112(1/2/3): 272-276.
- [64] Li J F, Luo H Y, Liu Y, *et al.* Modeling and optimization of cascaded erbium and holmium doped fluoride fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 0900414.
- [65] Li J F, Hudson D D, Jackson S D. High-power diode-pumped fiber laser operating at 3 μm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3642-3644.
- [66] Saad M, Pafchek R, Foy P, *et al.* Indium fluoride glass fibers for mid-infrared applications [C]// *Workshop on Specialty Optical Fibers and Their Applications*, November 4-6, 2015, Hong Kong, China. Washington, D.C.: OSA, 2015: WW4A.3.
- [67] Almeida R M, Pereira J C, Messaddeq Y, *et al.* Vibrational spectra and structure of fluorindate glasses [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1993, 161: 105-108.
- [68] Michalska M, Mikolajczyk J, Wojtas J, *et al.* Mid-infrared, super-flat, supercontinuum generation covering the 2-5 μm spectral band using a fluorindate fibre pumped with picosecond pulses [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 39138.
- [69] Majewski M R, Woodward R I, Carreé J Y, *et al.* Emission beyond 4 μm and mid-infrared lasing in a dysprosium-doped indium fluoride (InF_3) fiber [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1926-1929.