

文章编号: 1000-7032(2022)11-1705-16

中红外稀土掺杂碲酸盐玻璃和光纤

尹朋伟^{1,2,3}, 李彦潮³, 赵文凯³, 赵国营^{2*}, 张 龙³, 姜益光^{3*}

(1. 浮法玻璃新技术国家重点实验室, 安徽蚌埠 233000;

2. 上海应用技术大学 材料科学与工程学院, 上海 201418;

3. 中国科学院上海光学精密机械研究所 中国科学院强激光材料重点实验室, 上海 201800)

摘要: 中红外稀土掺杂连续光纤激光在光声技术、红外制导、医疗手术、塑料加工以及5G通信等领域有着十分广阔的应用前景。然而,制备中红外稀土掺杂连续光纤激光器的光纤基质材料单一,再加上高增益光纤和器件的缺乏,大大限制了大功率单频连续光纤激光器的发展。本文对比了传统的石英光纤、氟化物光纤、硫系光纤和重金属氧化物光纤,最终将碲酸盐光纤作为阐述对象。重点阐述了国内外中红外稀土掺杂碲酸盐连续光纤激光的研究进展,目前2.0 μm 波段的最高输出功率为8.08 W、最高斜率效率为77%;3.0 μm 波段的理论模拟结果显示最高输出功率高达5.219 W、最高斜率效率可达40%。

关键词: 中红外激光; 稀土掺杂连续光纤激光器; 碲酸盐光纤

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20220263

Mid-IR Rare Earth Doped Tellurite Glass and Optical Fiber

YIN Peng-wei^{1,2,3}, LI Yan-chao³, ZHAO Wen-kai³, ZHAO Guo-ying^{2*}, ZHANG Long³, JIANG Yi-guang^{3*}

(1. State Key Laboratory of New Technology of Floating Glass, Bengbu 233000, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China;

3. Key Laboratory of Materials for High Power Lasers, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

* Corresponding Authors, E-mail: zhaogy135@126.com; jiangyiguang@siom.ac.cn

Abstract: Mid-infrared rare-earth doped continuous fiber laser has a wide application in the fields of photoacoustic technology, infrared countermeasures, medical surgery, plastic processing, 5G communication, etc. However, the development of high-power single-frequency CW fiber lasers is greatly limited by the single fiber matrix material used to prepare mid-infrared rare earth doped CW fiber lasers and the lack of high-gain fibers and devices. In this paper, the traditional silica fiber, fluoride fiber, chalcogenide fiber and heavy metal oxide fiber are compared, and finally tellurite fiber is taken as the elaboration object. At present, the highest output power of 2.0 μm band is 8.08 W, and the highest slope efficiency is 77%. Theoretical simulation results of 3.0 μm band show that the highest output power is up to 5.219 W and the highest slope efficiency is up to 40%.

Key words: mid-infrared laser; rare earth doped continuous fiber laser; tellurite fiber

收稿日期: 2022-06-30; 修订日期: 2022-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(52002385); 国家重点研发计划(2021YFB3500901); 中国科学院重点部署科研专项(ZDBS-ZRKJZ-TLC015)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(52002385); National Key R & D Program(2021YFB3500901); The Key Research Program of Chinese Academy of Sciences(ZDBS-ZRKJZ-TLC015)

1 引 言

由于中红外波段具有极其重要的大气传输窗口,存在密集的热辐射能量,涵盖了水分子的强吸收峰,使 2~5 μm 波段的中红外激光在光通信、环境监测、生物医疗、军事安全、基础科学研究及材料加工等领域有着非常重要的应用前景^[1-11]。

目前产生中红外激光的方法有气体激光器、化学激光器、量子级联激光器(Quantum cascade laser)、光参量技术(Optical parametric oscillator)激光器以及光纤激光器等。气体激光器具有良好的散热性能,输出功率可达瓦量级,但复杂的系统和庞大的体积使其在实际应用中受到限制^[12-13]。化学激光器的光束质量高,输出功率可以达到兆瓦量级,但存在废弃物含剧毒、体积庞大、输出光谱较宽以及成本高等显著缺点,主要用于研制大功率的激光武器^[10]。QCL提高了量子效率,有着较宽的波长输出范围且不受材料带隙的影响,但存在工艺条件较高、输出功率小、光束质量差、低温环境等问题,目前在一些新兴产业具有实用价值^[12,14]。OPO产生宽激光输出的同时可使传统激光器接收到新波段的激光波长,但需要较高的光路调节精度要求和复杂的转换系统,主要应用在光电对抗等领域^[13,15]。对比以上几种激光器,光纤激光器不但具有稳定性好、体积小、寿命长、高效率 and 结构紧凑等显著优点^[16-18];而且它们的纤芯极细、波导结构特殊,加上合适的正反馈回路,易得到高功率、高质量光束的激光。虽然光纤激光器最初应用在近红外波段,但随着近些年光纤制备工艺的不断成熟以及器件制备技术的不断迭代,光纤激光器大幅度向中红外波段发展。

目前,在中红外波段产生激光的增益介质材料有传统的石英玻璃光纤、硫系玻璃光纤、氟化物玻璃光纤以及重金属氧化物玻璃光纤。传统的石英玻璃具有高最大声子能量($\sim 1\ 100\ \text{cm}^{-1}$)和低稀土离子溶解度,但在波长超过 2.2 μm 时,玻璃的通透性会大幅度降低,甚至不透,已不再适用于中红外波段激光的研究^[19]。硫系玻璃虽具有较大的折射率(大于 2.3)、较大的受激辐射截面、较低的声子能量($\sim 300\ \text{cm}^{-1}$)、较宽的红外透过范围;但传统硫系玻璃的稀土离子溶解度很低且含 H 杂质难以除去,即使是新型 Ga 基硫系玻璃,虽能够改良玻璃网络并提高其稀土的溶解度,但其 OH 杂质

却无法得到有效改善,从而限制了其中红外光纤激光器中的大范围使用^[20-22]。氟化物玻璃虽有较高的稀土离子溶解度和较宽的红外透过范围;但存在易潮解、物化性能差、损伤阈值较低、制备工艺复杂、原材料昂贵且有剧毒等问题,阻碍了氟化物玻璃光纤在中红外光纤激光器的应用^[23-25]。中红外波段的重金属氧化物玻璃光纤主要包括锆酸盐玻璃光纤、铋酸盐玻璃光纤和碲酸盐玻璃光纤。其中铋酸盐玻璃的声子能量最低,但其成玻璃范围小且铋离子的价态易发生变化。锆酸盐玻璃的声子能量最大。相比较而言,碲酸盐玻璃在中红外光纤激光器方面有着巨大应用前景。此外,与连续光纤激光相比,脉冲光纤激光虽有较高的峰值功率,但极易产生非线性效应且平均输出功率较低,而碲酸盐具有强的非线性^[26-27]。因此,本文详细介绍了国内外中红外稀土掺杂碲酸盐连续光纤激光的研究进展。

2 中红外稀土掺杂碲酸盐连续光纤激光研究进展

2.1 碲酸盐玻璃光纤

碲酸盐玻璃光纤作为产生中红外光纤激光的一种重要增益介质材料,有着以下的优点^[7,28-30]: (1)与氟化物玻璃相比,制备工艺简单,具有良好的稳定性和抗潮解能力;(2)与氟化物玻璃及传统的石英玻璃相比,有着更高的折射率(约为 2.0),高折射率有利于增加自发辐射跃迁几率和受激发射截面;(3)与传统的石英玻璃相比,有较高的稀土离子溶解度,高稀土离子溶解度有助于实现光纤的较高单位长度增益,对器件小型化的实现非常有利;(4)具有较低的熔融温度($\sim 800\ ^\circ\text{C}$)和优秀的成光纤能力;(5)在众多玻璃基质材料中,碲酸盐玻璃的声子能量低至 $\sim 700\ \text{cm}^{-1}$,且有着较宽的红外透过范围(0.38~6 μm),如图 1 所示。基于以上优势,碲酸盐玻璃光纤在研制中红外光纤激光器方面极具潜力。

以碲酸盐玻璃光纤作为增益介质材料,在中红外波段能产生激光的稀土离子有 Er^{3+} 、 Tm^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Dy^{3+} 等,图 2 为这些离子的简化版能级跃迁图^[7]。 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 掺杂的 2.0 μm 波段连续光纤激光在医疗与生物研究、环境监测、材料加工等领域有着重要应用, $\text{Er}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Dy}^{3+}$ 掺杂的 3.0 μm 波段连续光纤激光在民用和军事上具有广泛的应用^[31-32]。

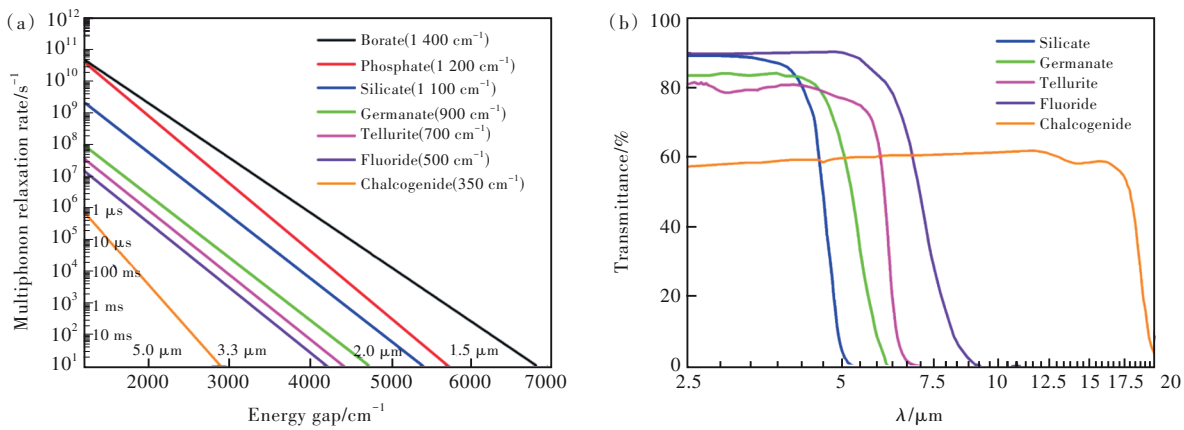


图 1 不同玻璃基质材料的多声子弛豫速率与能级间的能隙和透过光谱^[7]

Fig.1 Multiphonon relaxation rate and energy gap and transmission spectra of different glass matrix materials^[7]

由于硝酸盐玻璃在中红外波段极具优势,使 2.0 μm、3.0 μm 的稀土掺杂硝酸盐连续光纤激光成为研究的热点。

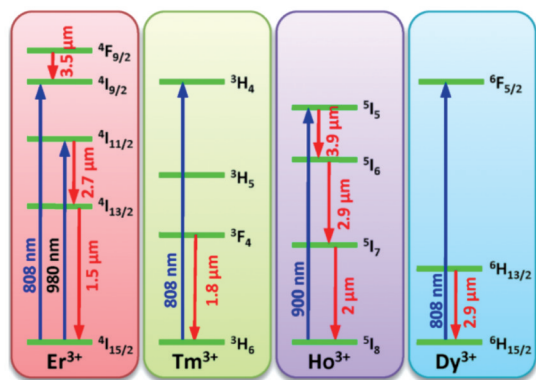


图 2 Er³⁺、Tm³⁺、Ho³⁺和 Dy³⁺的能级跃迁简化图^[7]

Fig.2 Simplified diagram of energy level transitions^[7]

2.2 2.0 μm 稀土掺杂硝酸盐连续光纤激光

由于人眼的角膜组织对 2.0 μm 附近的光能够有效吸收,起到了保护视网膜的作用,因此 2.0 μm 波段激光被称为“人眼安全激光”,其在医疗与生物研究、激光雷达、材料加工等多个领域有着广泛的应用^[33-35]。由于水分子在 2.0 μm 附近有较强的吸收峰,可以对生物组织进行精准切割和凝结止血,因此可作为具有良好性能的微创激光手术刀使用。2.0 μm 波段激光是相干多普勒测风雷达和差分吸收雷达测定风速、水蒸气浓度和 CO₂ 浓度的理想光源^[36]。有机塑料可以强烈地吸收 2.0 μm 激光的辐射能,高功率 2.0 μm 波段光纤激光器在对塑料进行高效焊接时无需添加任何吸收剂^[37]。除此之外,2.0 μm 激光还可以作为更长波段中红外激光的泵浦源。2.0 μm 波段中红外激光的重要应用使得 2.0 μm 稀土掺杂硝酸盐

连续光纤激光成为研究的热点。

早在 1988 年,英国南安普敦大学 Hanna 等^[38]就在单模光纤中观察到了 2.0 μm 激光;再加上 1997 年日本 NTT 的 Mori 等^[39]首次制备了硝酸盐光纤,使 2.0 μm 硝酸盐光纤激光器的研究受到了广泛关注。在研究 2.0 μm 稀土掺杂硝酸盐光纤激光器之前,2005 年美国亚利桑那大学 Wu 等^[40]就制备了高浓度 Tm³⁺ 掺杂的硝酸盐玻璃微球,实现了 2.0 μm 单模微球激光的同时对激光波长的红移进行了研究,为后来研究 ~2.0 μm 硝酸盐光纤提供了思路。同一年,英国利兹大学 Richards 等^[41]制备了 Tm³⁺ 掺杂和 Tm³⁺/Ho³⁺ 共掺的硝酸盐玻璃,对光谱进行了测试,并分析了 Ho³⁺ (⁵I₇→⁵I₈) 和 Tm³⁺ (³F₄→³H₆) 的能量转移机制,同时为以后 ~2.0 μm 波段稀土掺杂硝酸盐光纤激光器的研究做了充足的准备。对于 2.0 μm 稀土掺杂硝酸盐连续光纤激光,最先开始研究的是英国利兹大学,后来英国斯特拉思克莱德大学、俄罗斯科学院普通物理研究所等也投入到该领域的研究。国内最早开始该领域研究的是上海光机所,西安光机所、吉林大学、华南理工大学、长春理工大学也相继开展了相关研究。

2007 年,英国利兹大学 Richards 等^[42]首次用 1 088 nm 掺 Yb³⁺ 石英光纤激光器泵浦 Tm³⁺/Yb³⁺ 共掺的硝酸盐光纤,在 23 cm 长的光纤中观察到最长波长为 1 994 nm 的激光输出,但斜率效率仅为 10%,最大输出功率仅为 67 mW。这要归因于硝酸盐光纤的强激发态吸收(ESA)和热损伤,强热损伤导致了低斜率效率。几个月后,该课题组^[43]用 1 610 nm Er³⁺/Yb³⁺ 共掺的石英光纤激光器泵浦 Tm³⁺ 掺杂的硝酸盐光纤,在 32 cm 长的光纤中实现

了斜率效率为 76%、输出功率为 280 mW 的激光输出,是当时 2.0 μm 碲酸盐连续光纤激光的最高输出功率,斜率效率已经接近 Stokes 极限的 80%。2008 年,英国曼彻斯特大学 Tsang 等^[44]采用 1.6 μm 的 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺石英光纤激光器泵浦 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 共掺的碲酸盐光纤,在连续波模式下,获得了斜率效率为 62%、最大输出功率为 0.16 W 的高效 2.1 μm 激光发射;另外,阈值为 0.1 W,与石英光纤相比不仅小一个数量级,而且斜率效率也要高于石英光纤。同一年,该课题组^[45]采用 1.1 μm 掺 Yb^{3+} 的双包层石英光纤激光器来泵浦 $\text{Yb}^{3+}/\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 三掺的碲酸盐光纤,在长度仅为 17 cm 的光纤中获得了最大斜率效率为 25% 和输出功率为 60 mW 的 2.1 μm 激光输出,当时该结果已比相同条件下 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 共掺的石英光纤激光器的阈值低 40 倍以上。他们认为,碲酸盐光纤可以替代硅酸盐、氟化物和锆酸盐用于制造中红外中功率光纤激光器,这归因于碲酸盐玻璃既弥补了硅酸盐玻璃高声子能量的缺点,又弥补了具有低声子能量的氟化物玻璃稳定性差的劣势。此外,上述制备的碲酸盐玻璃光纤大都使用经典的 $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Na}_2\text{O}$ 组分,该组分的 T_g 值一般在 300 $^\circ\text{C}$ 左右,并且还具有高 OH^- 含量,不利于制备高功率连续光纤激光器。

2009 年,英国斯特拉思克莱德大学 Vetter 等^[46]第一次用 $\sim 1\ 213\ \text{nm}$ 半导体圆盘激光器 (SDL) 作为泵浦源来泵浦 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 掺杂的碲酸盐光纤,获得了斜率效率约 7%、最大输出功率为 12 mW 的 $\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 激光输出。虽然与在同等条件下泵浦的商用 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 共掺的石英光纤激光器 ($P_{\text{max}}=36\ \text{mW}$, $\text{slope}=19.3\%$) 相比还有差距,但这是第一次使用新的泵浦源,也不失为一种新的研究方法。2010 年,英国圣安德鲁斯大学 Fusari 等^[47]用 1 211 nm 半导体盘激光器泵浦 Tm^{3+} 掺杂的碲酸盐光纤,在 1 946 nm 处获得性能高达 22.4% 的斜率效率和 60 mW 的最大输出功率,最大输出功率受到了泵浦功率的限制,但该结果已经颇具竞争力。对于碲酸盐玻璃中的高 OH^- 含量,2017 年,俄罗斯科学院普通物理研究所 Denker 等^[48]制备了可以发射 2.3 μm 波长激光的、 Tm^{3+} 掺杂的脱水碲酸盐玻璃光纤。2018 年,俄罗斯应用物理研究所 Muravyev 等^[49]用一种特殊的技术制备了组分为 $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Na}_2\text{O-La}_2\text{O}_3$ 、低 OH^- 含量、高质量、低损耗的 Tm^{3+} 掺杂碲酸盐玻璃光纤,使用图 3(a) 所示的装置在

792 nm 泵浦源泵浦下,首次在 Tm^{3+} 掺杂碲酸盐光纤中观察到 1.9 μm 和 2.3 μm 级联激光,最大功率分别为 2.7 mW 和 1.7 mW,其光谱如图 3(b) 所示;并结合理论验证了制造双色超连续激光器的可能性,如图 3(c)、(d)、(e)、(f) 所示。2020 年,俄罗斯科学院普通物理研究所 Denker 等^[50]首次报道了 2.3 μm 掺铋碲酸盐光纤激光器,在用 794 nm 商用激光二极管泵浦 30 cm 长的碲酸盐光纤时,在 2.3 μm 处获得了 200 mW 的平均功率和 400 mW 的峰值输出功率。

近些年,该领域在国内也得到了飞速发展。2010 年,上海光机所 Li 等^[51]首次使用商用 800 nm LD 泵浦高浓度 Tm^{3+} 掺杂的双包层碲钨光纤,在 40 cm 长的光纤中获得了斜率效率为 20%、最高输出功率为 1.12 W 的激光输出,这也是当时 2.0 μm 稀土掺杂碲酸盐连续光纤激光的最高记录。一年后,该课题组^[52]使用棒管法制备了高浓度 Tm^{3+} 掺杂的碲钨双包层玻璃光纤,在 793 nm 波长激发下,在 8.9 cm 长的光纤中实现了输出功率为 306 mW 的 $\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 激光输出。2012 年,该课题组^[53]使用 800 nm 激光二极管泵浦 20 cm 长的 Tm^{3+} 掺杂碲钨光纤,实现了输出功率为 494 mW、斜率效率为 26% 的 1.9 μm 激光输出。另外,如图 4 所示,他们又在 7 cm 长的 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 共掺的碲钨光纤中获得了功率为 35 mW 的 2.1 μm 激光输出,插图中横截面的纤芯直径约为 9 μm 。与传统的 $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Na}_2\text{O}$ 玻璃体系相比,碲钨玻璃体系的 T_g 值高出约 50%,热膨胀系数低了约 36%,高的 T_g 值可以使光纤具有高激光损伤阈值、低热膨胀系数,从而有效降低光纤激光器的热损伤问题,但碲酸盐玻璃中高 OH^- 没有有效降低。2013 年,西安光机所 He 等^[54]用特殊的物理化学除水工艺制备了 Ho^{3+} 掺杂的组分为 $60\text{TeO}_2\text{-}30\text{ZnF}_2\text{-}10\text{NaF}$ 的无水氟碲酸盐玻璃,并观察到 2.04 μm 的荧光,同时具有 149 nm 的带宽和 $7.2\times 10^{-21}\ \text{cm}^2$ 的受激发射截面,更重要的是还有着目前报道的所有 Ho^{3+} 掺杂的氧化物玻璃中最大的荧光寿命 ($\sim 10\ \text{ms}$)。因此,氟碲酸盐玻璃是用来制造 2.0 μm 稀土掺杂光纤激光器的优质候选材料,这主要归因于加入氟化物的碲酸盐玻璃具有低 OH^- 含量和低声子能量。此外,微结构光纤在作为增益介质方面与普通光纤相比有着独特的优势,引起了研究者的广泛关注。2014 年,吉林大学 Yao 等^[55]用 1 560 nm Er^{3+} 掺杂的

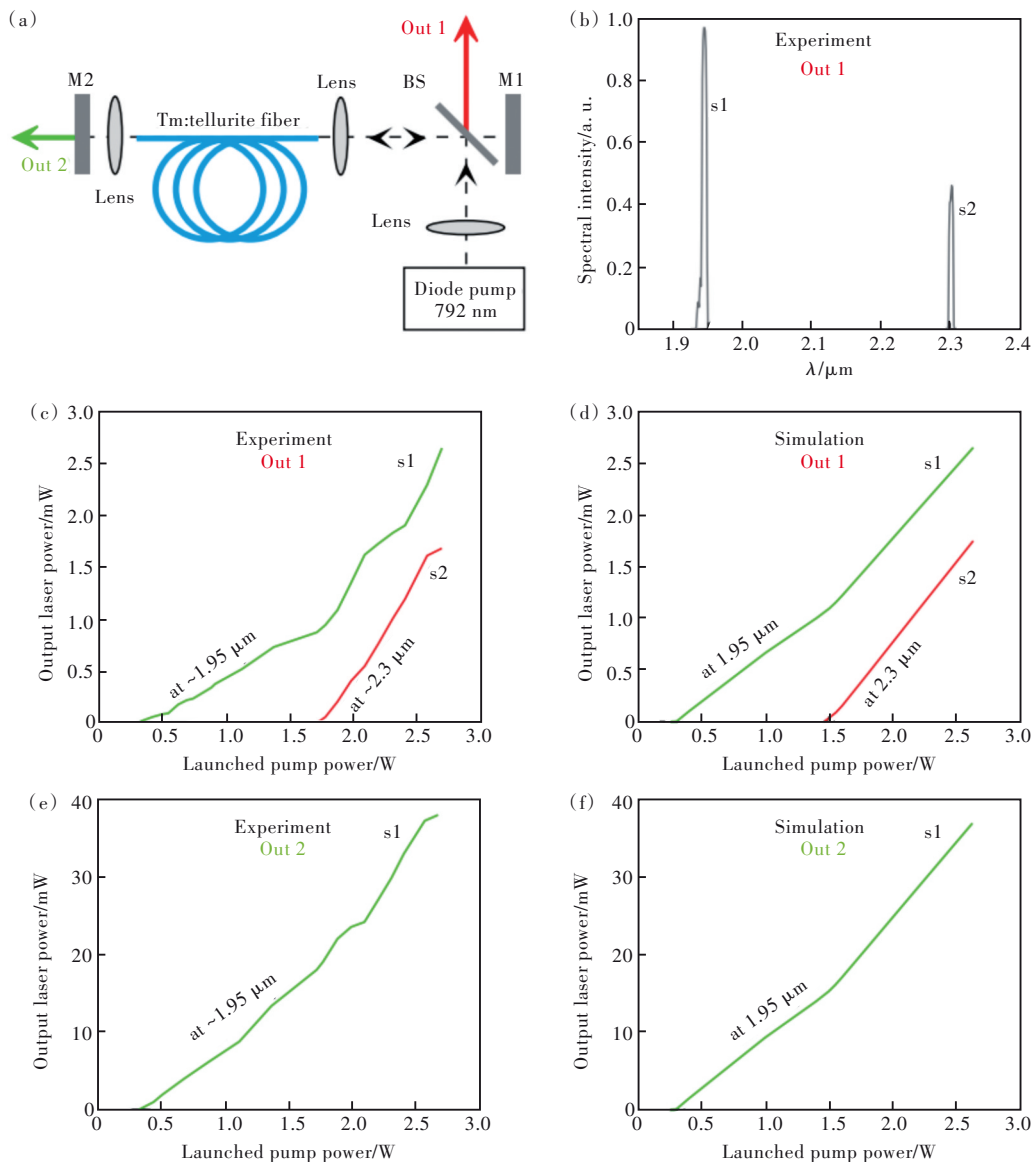


图 3 (a)双色超连续激光装置;(b)双色超连续激光光谱;(c)、(e)输出功率与泵浦功率关系测量结果;(d)、(f)输出功率与泵浦功率关系模拟结果。(c)、(d)在输出 1 处;(e)、(f)在输出 2 处^[50]。

Fig. 3 (a)Two-color supercontinuum laser device. (b)Two-color supercontinuum laser spectrum. (c), (e) Measurement results of relationship between output power and pump power. (d), (f) Simulation results of relationship between output power and pump power. (c), (d)At output 1. (e), (f)At output 2^[50].

石英光纤激光器来泵浦 2.8 cm 长 Tm^{3+} 掺杂的硝酸盐微结构光纤, 获得了功率为 9 mW、斜率效率为 6.53%、激光阈值为 200 mW、波长为 1 872 nm 的激光输出。一年后, 该课题组^[56]采用上述泵浦源来泵浦 $\text{Ho}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 共掺的硝酸盐微结构光纤, 在 22 cm 长的微结构光纤中, 实现了最大功率为 8.34 mW、斜率效率为 2.97%、波长为 2 065 nm 的连续激光输出。2016 年, 吉林大学 Wang 等^[57]使用 1 570 nm 掺钕光纤激光器泵浦通过棒管法制备的 Tm^{3+} 掺杂、组分为 $\text{TeO}_2\text{-BaF}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ 的氟硝酸盐微结构光纤, 在 42.5 cm 长的掺钕光纤中实现了斜率

效率为 58.1% 的 1 887 nm 激光输出, 阈值泵浦功率为 94 mW; 并且当泵浦功率增加到 780 mW 时, 最大不饱和功率达到 408 mW。我们发现, 加入氟化物的硝酸盐微结构光纤在制造 2.0 μm 紧凑型高效光纤激光器方面极具潜力。2016 年, 上海光机所 Li 等^[58]发现, Ho^{3+} 掺杂的碲钨玻璃体系中, Ho^{3+} 掺杂量为 0.5% 时有着最强的荧光发射; 同时首次使用 1.94 μm Tm^{3+} 掺杂的光纤激光器共振泵浦 Ho^{3+} 掺杂的硝酸盐光纤, 在 9 cm 长的光纤中, 实现了最大输出功率为 34 mW 的 2 040 nm 激光输出, 遗憾的是在激光效率方面需要进一步改善。

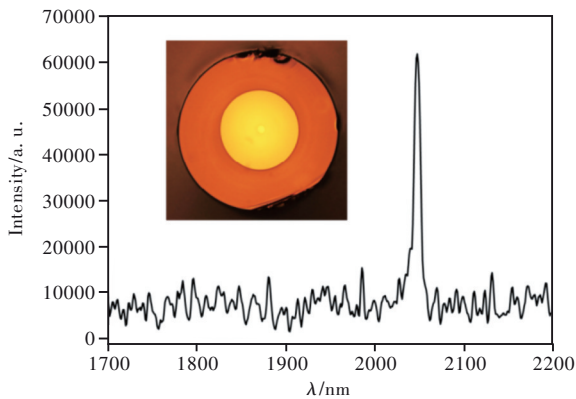


图 4 $\text{Ho}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ 共掺碲钨玻璃光纤激光器光谱, 插图为其光纤截面^[54]。

Fig. 4 Spectra of $\text{Ho}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ co-doped tungsten tellurium glass fiber laser, the fiber section is illustrated^[54].

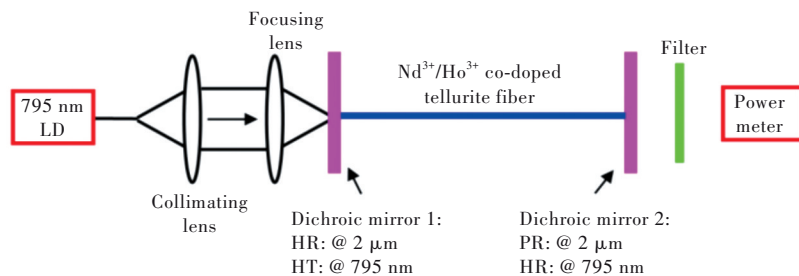


图 5 $\text{Nd}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 共掺碲钨光纤激光器实验配置示意图^[60]

Fig. 5 Schematic diagram of $\text{Nd}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ co-doped tellurite tungstate fiber laser experimental configuration^[60]

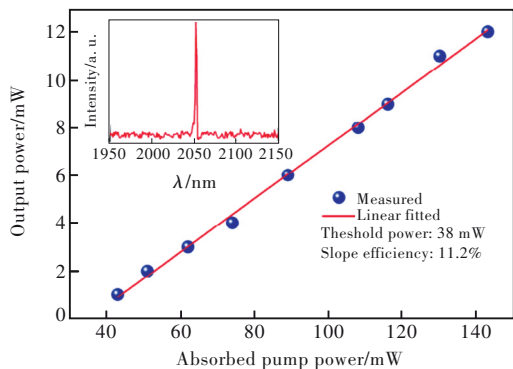


图 6 激光输出功率与吸收泵浦功率的关系 (插图为 5 cm 长的光纤激光光谱)^[60]

Fig. 6 Relationship between laser output power and absorption pump power (inset is laser spectrum of 5 cm fiber)^[60]

拉丝法制备该体系的玻璃光纤, 用自制的 1 560 nm 泵浦源泵浦上述光纤时, 在 0.5 m 长的光纤中, 实现了最大输出功率为 0.993 W、斜率效率为 31.9% 的 2 051 nm 波长连续激光输出, 同时说明在碲钨玻璃中加入锆可以进一步提高玻璃的热稳定性和光学性能。2019 年, 吉林大学 Zhao 等^[61]制备了组分为 $\text{TeO}_2\text{-BaF}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ 、 Ho^{3+} 掺杂的

2016 年, 华南理工大学 Li 等^[59]在图 5 装置中用单端 795 nm LD 泵浦新型 5 cm 长 $\text{Nd}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 共掺多模碲钨玻璃光纤, 获得了如图 6 所示的最大输出功率为 12 mW、斜率效率为 11.2%、波长为 2 052 nm 的激光输出, 并未发现输出功率有饱和的现象; 此外, 激光阈值低至 38 mW, 比具有相似泵浦方案和光纤几何形状的 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺碲酸盐光纤激光器大约低一个数量级。该基质材料可以用来发展超紧凑、高效的 2.0 μm 光纤激光器, 同时发现 Nd^{3+} 可以作为敏化剂, 使得 Ho^{3+} 在 2.0 μm 实现激光发射。2017 年, 长春理工大学 Zhou 等^[60]制备了 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 共掺的碲钨钨玻璃, 当 Tm^{3+} 与 Ho^{3+} 的敏化比例为 7:3 时, 玻璃的荧光最强; 之后采用棒管

氟碲酸盐微结构光纤。在图 7 所示的装置中, 用 1 980 nm 掺 Tm^{3+} 石英光纤激光器泵浦 30 cm 长的上述光纤时, 获得了如图 8 所示的非饱和最大输出功率为 8.08 W、斜率效率为 77.21% 的 2.1 μm 激光输出, 这是目前 2.0 μm 稀土掺杂碲酸盐连续光纤激光的最高记录; 同时在光纤端面未观察到明显的损伤, 可见该氟碲酸盐光纤可用于制造高功率光纤激光器。2021 年, 佛山大学 Yuan 等^[62]制备了 $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 掺杂的组分为 $\text{TeO}_2\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-BaF}_2$ 的碲钨玻璃, 在 808 nm 激光二极管激发下, 观察到了 2.0 μm 超宽带发射; 同时发现 Tm^{3+} 到 Ho^{3+} 之间的正向能量传递系数高达 $6.22 \times 10^{39} \text{ cm}^6/\text{s}$, 这非常有利于 Ho^{3+} 的 2.0 μm 发射。因此, 新型的碲钨酸盐玻璃基质材料在制造 2.0 μm 稀土掺杂碲酸盐光纤激光器方面具有很大应用前景。2022 年, 长春理工大学 Song 等^[63]使用传统的熔融冷却法制备了 $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 双掺、组分为 $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-BaF}_2$ 的碲碲酸盐玻璃, 该玻璃的 T_g 高达 423 $^\circ\text{C}$, ΔT 约为 143 $^\circ\text{C}$; 另外, 在 $\sim 2.0 \mu\text{m}$ 处的最大发射截面为

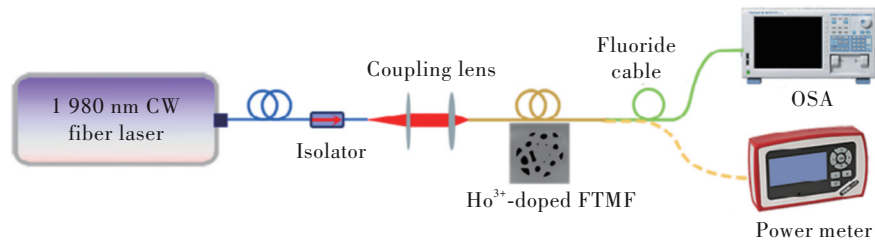


图 7 2.067 nm 光纤激光器实验装置示意图^[61]

Fig.7 Schematic diagram of 2.067 nm fiber laser experimental setup^[61]

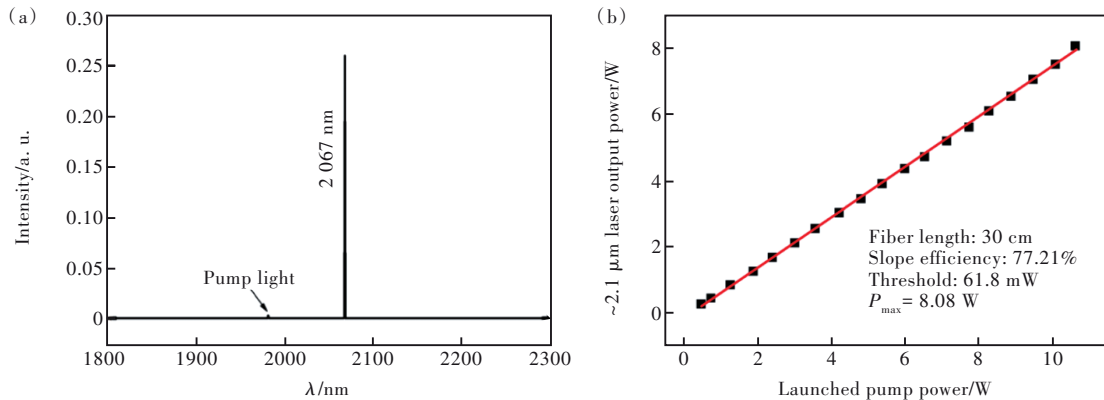


图 8 1.980 nm 泵浦下激光输出光谱(a)、激光输出功率与泵浦功率的关系(b)^[61]。

Fig.8 Laser output spectra at 1.980 nm pump(a), relationship between laser output power and pump power(b)^[61].

$9.79 \times 10^{-21} \text{ cm}^2$, 增益系数为 1.57 cm^{-1} , 满足拉丝和 $\sim 2.0 \text{ }\mu\text{m}$ 荧光发射的条件。该碲酸盐玻璃是良好的 $2.0 \text{ }\mu\text{m}$ 激光增益介质材料, 可用于 $2.0 \text{ }\mu\text{m}$ 碲酸盐连续光纤激光器的研制。

以上研究结果表明, 碲钨玻璃、碲锆钨玻璃、碲镱玻璃、氟碲酸盐玻璃、铋碲酸盐玻璃等是用于产生 $2.0 \text{ }\mu\text{m}$ 稀土掺杂碲酸盐连续光纤

激光的优质材料。目前, $2.0 \text{ }\mu\text{m}$ 稀土掺杂碲酸盐连续光纤激光器的研究已经成熟化、产品化, 但仍需进一步探索热稳定性更好的新碲酸盐玻璃组分、进一步优化备工艺, 向着更高功率、更高效的光纤激光器迈进。表 1 总结了国内外近些年 $2.0 \text{ }\mu\text{m}$ 稀土掺杂碲酸盐连续光纤激光的研究进展。

表 1 碲酸盐玻璃光纤在 $2.0 \text{ }\mu\text{m}$ 波段激光输出研究结果

Tab. 1 Research results of tellurite glass fiber laser output in $2.0 \text{ }\mu\text{m}$ band

掺杂离子	泵浦波长/nm	输出功率/mW	斜率效率/%	输出波长/nm	参考文献
$\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$	1 088	67	10	1 910~1 990	[42]
Tm^{3+}	1 610	280	76	1 880~1 990	[43]
$\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$	1 610	160	62	2 100	[44]
$\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$	1 100	60	25	2 100	[45]
Tm^{3+}	1 211	60	22.4	1 946	[47]
Tm^{3+}	794	400	—	2 300	[50]
Tm^{3+}	800	1 120	20	2 000	[51]
Tm^{3+}	800	494	26	1 900	[53]
Ho^{3+}	1 940	34	—	2 040	[58]
$\text{Nd}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$	795	12	11.2	2 052	[59]
$\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$	1 560	993	31.9	2 051	[60]
Ho^{3+}	1 980	8 080	77.21	2 100	[61]

2.3 3.0 μm 稀土掺杂硝酸盐连续光纤激光

3.0 μm 波段附近的中红外激光正好处于大气吸收窗口、水的最强吸收区域、热辐射能量集中区,使得其在环境监测、医疗以及军事安全等领域有着非常重要的应用前景^[64-65]。在环境监测方面,由于 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_6 在 3.0 μm 波段附近具有有效吸收的吸收光谱,能够显著提高测量灵敏度;水在人体生物组织中占比很大,并且在 3.0 μm 附近的吸收峰最为强烈,所以可将其应用到医学上激光微治疗、精准切割以及组织切除手术;在军事方面,可用于研制低功率定向干扰武器、高功率定向摧毁武器以及对远距离爆炸物进行探测^[66-67]。

虽然 3.0 μm 波段稀土掺杂硝酸盐连续光纤激光的报道很少见,但 3.0 μm 中红外激光的广泛应用使 3.0 μm 稀土掺杂硝酸盐连续光纤激光一直被持续研究,主要有国外的澳大利亚阿德莱德大学、英国利兹大学和国内的西安光机所、华南理工大学、上海光机所、武汉理工大学、佛山大学及中国计量大学等。

早在 2008 年,澳大利亚阿德莱德大学 Ebendorff-Heidepriem 等^[68]就提出了硝酸盐玻璃光纤可以作为中红外连续光纤激光器的候选材料。一年后,该课题组 Oermann 等^[69]在制备的碲镉玻璃体系中,发现并证实了 La_2O_3 的加入不会影响 Er^{3+} 的吸收强度和荧光寿命,反而观察到玻璃的热稳定性和结晶稳定性得到改善;同时在 1.5 μm 处观察到强荧光,并且首次在硝酸盐玻璃中 2.7 μm 处观察到强荧光,同时拉开了人们对硝酸盐玻璃光纤 3.0 μm 处发光研究的序幕。2013 年,英国利兹大学 Richards 等^[70]证实了 Dy^{3+} 掺杂的硝酸盐玻璃与氟化物玻璃相比,不仅在 ${}^6\text{H}_{13/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$ 能级跃迁时

有着更宽的荧光半高宽和红移,而且成玻璃性能更稳定、硬度更大;此外,发现了 Dy^{3+} 掺杂的硝酸盐玻璃光纤可以工作在更长波段下($\sim 3.3 \mu\text{m}$),同时指出硝酸盐玻璃光纤可作为中红外光源的潜力。2015 年,华南理工大学 Wang 等^[71]用吸注法制备了 Er^{3+} 掺杂的硝酸盐玻璃光纤,在 980 nm LD 激发下,在不同长度的光纤中实现了 2.7 μm 强荧光发射,这得益于在 2.7 μm 处有着高自发辐射几率 (50.84 s^{-1}) 和大的受激发射截面 ($0.79 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$);此外,该光纤还具有低 OH 吸收 (小于 1 cm^{-1})、低声子能量 (约 770 cm^{-1}) 和优异的热稳定性 ($\Delta T = 146 \text{ }^\circ\text{C}$)。因此,该光纤基质材料是 2.7 μm 光纤激光器的理想选择之一,但仍然处于光谱分析阶段。于是该课题组^[72]又利用速率方程和传播方程理论研究了 Er^{3+} 掺杂的硝酸盐光纤激光器在 2.7 μm 下的激光性能,如图 9 所示,与 ZBLAN 光纤相比,硝酸盐玻璃光纤在输出功率和斜率效率方面约是其 2 倍,但阈值功率却相近。此外,当泵浦功率为 20 W 时,在双向泵浦配置中,2.5 m 长光纤的最大输出功率为 5.219 W;在具有 5 m 长光纤的反向泵送配置中,最大斜率效率达到 27.62%,该模拟计算结果已经优于传统的氟化物玻璃光纤。该硝酸盐玻璃光纤在研制高效率中红外光纤激光器方面极具潜力,也进一步激发了人们对 Er^{3+} 掺杂硝酸盐连续光纤激光器研究的兴趣。2019 年,华南理工大学 Liu 等^[73]制备了 Er^{3+} 掺杂、组分为 $\text{TeO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5\text{-ZnO}$ 的碲钽玻璃,在 980 nm LD 激发下,观察到强烈的 2.7 μm 发光;此外,玻璃还具有较好的热稳定性 ($\Delta T_{\text{max}} = 203 \text{ }^\circ\text{C}$)、较低的最大声子能量 ($\sim 770 \text{ cm}^{-1}$) 等优异的性能,如此高的 ΔT 是制备高功率光纤激光器的不二选择,引起了人

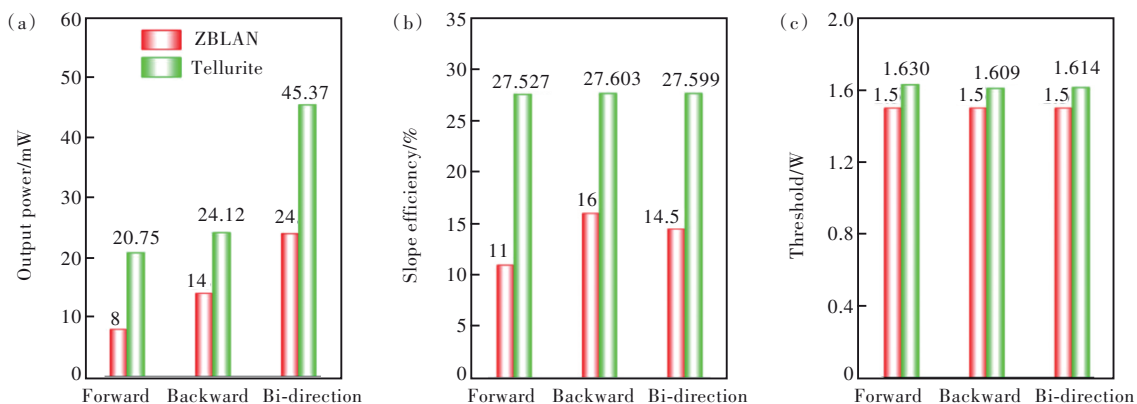


图 9 不同泵浦配置下掺 Er^{3+} 的 ZBLAN 和硝酸盐光纤激光器的输出功率(a)、斜率效率(b)和阈值(c)比较^[71]。

Fig. 9 Comparison of output power (a), slope efficiency (b) and threshold (c) of ZBLAN and tellurite fiber lasers doped with Er^{3+} in different pump configurations^[71].

们对新硝酸盐玻璃体系的探索兴趣。2020年,华南理工大学 Wang 等^[74]制备了 Er^{3+} 掺杂的 $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Ga}_2\text{O}_3$ 三元硝酸盐玻璃,该系列玻璃具有高 Er^{3+} 掺杂浓度(3.5%)、低声子能量($\sim 760\text{ cm}^{-1}$)和高热稳定性($\Delta T > 100\text{ }^\circ\text{C}$)等诸多优点。另外,我们惊奇地发现,在 980 nm LD 泵浦下,高浓度 Er^{3+} 掺杂有效地增强了 2.7 μm 荧光发射,同时抑制了 1.5 μm 荧光和可见绿光的发射;而且 ${}^4\text{I}_{1/2}$ 能级和 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 能级之间的寿命差从 2.81 ms 大幅缩短到 0.59 ms,极大地克服了群体转换瓶颈。根据 J-O 理论计算出 Er^{3+} 在 2.7 μm 处的吸收截面和发射截面分别为 $0.34 \times 10^{-20}\text{ cm}^2$ 和 $0.72 \times 10^{-20}\text{ cm}^2$,可见该硝酸盐玻璃基质材料在 2.7 μm 光纤激光器中有很大的应用前景。2021年,武汉理工大学 Zhang 等^[75]用上述组分制备了 $\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺的硝酸盐玻璃,发现随着 Yb^{3+} 浓度的增加, Ho^{3+} 的发射增强;并且当玻璃体系中 Yb^{3+} 与 Ho^{3+} 的百分比为 3:1 时, Ho^{3+} 在 2.9 μm 具有最强的荧光发射,寿命为 548 μs ;此外,在 2.9 μm 处还具有较大的吸收截面、发射截面以及良好的增益系数,表明该硝酸盐玻璃可作为良好的 2.9 μm 光纤激光器候选材料。研究者们对 Er^{3+} 掺杂的硝酸盐玻璃光纤展开了持续研究。2022年,佛山大学 Yuan 等^[76]制备了 $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺 ZnO 改性的碲钨玻璃,其中 Yb^{3+} 充当敏化剂,在 980 nm LD 激发下,发现 Yb^{3+} 的量比为 1% 时,在 2.7 μm 处有强荧光发射;此外,该玻璃还具有大发射截面($8.27 \times 10^{-21}\text{ cm}^2$)、长荧光寿命(649.4 μs)、宽有效发射线宽(140.4 nm)和高自发辐射几率(65.1 s^{-1})。如此高的自发辐射几率、大发射截面以及长荧光寿命均显示该玻璃基质材料是制备中红外可调谐光纤激光器的不错选择,也启发研究者们对新的硝酸盐玻璃组分进行不断探索。

但是,硝酸盐玻璃中高 OH^- 含量和较差的热稳定性阻碍了其中红外光纤激光器中的快速发展与应用,所以研究者在硝酸盐玻璃中引入了氟化物来改善。于是,2014年,西安光机所 He 等^[77]采用物理化学脱水技术成功制备了 Ho^{3+} 掺杂的氟硝酸盐玻璃,使用 1 163 nm 激发时,在 2.85 μm 处观察到强烈的荧光,并且荧光寿命长、受激发射截面大、 OH^- 吸收低至 0.027 cm^{-1} 。所以氟硝酸盐玻璃被认为是最具潜力的 3.0 μm 光纤激光器基质材料,但是研究者也没有停止对 Er^{3+} 掺杂

的氟硝酸盐玻璃光纤的研究。同一年,该课题组 Zhan 等^[78]继续用上述方法制备了 $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺、组分为 $60\text{TeO}_2\text{-}30\text{ZnF}_2\text{-}10\text{NaF}$ 的氟硝酸盐玻璃,在 978 nm 激发下,发现 Pr^{3+} 的加入引起了 Er^{3+} 在 2.7 μm 处荧光增强以及发射截面增加,这要归因于玻璃中引入了大量氟化物;此外,该玻璃系统还具有较高的量子效率和较大的品质因数,是研制 2.7 μm 光纤激光器的潜在基质材料,同时也引发了研究者们采用引入氟化物和物理化学脱水技术相结合的方法对去除 OH^- 的密切关注。2014年,华南理工大学 Zhang 等^[79]在 O_2 和 Ar 的保护下制备了 Er^{3+} 掺杂的氟硝酸盐玻璃,在 980 nm LD 激发下,获得了高效的 2.7 μm 发射,同时伴随着 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 寿命的延长;虽然引入氟化物会导致折射率、密度和 J-O 强度参数略微降低,但这种氟硝酸盐玻璃也不失为理想的 2.7 μm 光纤激光器材料。上述研究虽有效地减小了玻璃中 OH^- 的含量,但对玻璃的 T_g 值没有太多的关注。因此,在 2017年,上海光机所 Xue 等^[80]制备了 GaF_3 改性的 Er^{3+} 掺杂氟硝酸盐玻璃,在 980 nm 的激发下,在 2.7 μm 附近发现了强烈的荧光发射;此外,该玻璃具有较大的 T_g 值($\sim 360\text{ }^\circ\text{C}$)、较大的受激发射截面, OH^- 吸收低至 0.03 cm^{-1} ,可见该新型玻璃基质材料可用于制备高功率中红外光纤激光器。由于低声子能量可以降低无辐射跃迁速率,而硝酸盐玻璃的最大声子能量 $\sim 750\text{ cm}^{-1}$ 。为了进一步降低硝酸盐玻璃的最大声子能量,2018年,中国计量大学 Qi 等^[81]制备了 ErF_3 掺杂的氟硝酸盐玻璃, Er^{3+} 的最高掺杂浓度可达 11%,在 980 nm LD 激发下,在 2.7 μm 处观察到强的荧光发射, $T_g=432\text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T=98\text{ }^\circ\text{C}$,寿命约为 1.72 ms, OH^- 吸收低至 0.03 cm^{-1} ,更值得注意的是声子能量低至 612 cm^{-1} 。由此可见,该基质材料是制备高功率、高效率 2.7 μm 光纤激光器的较理想选择。于是在 2021年,西安光机所 Wan 等^[82]也制备了 ErF_3 掺杂的组分为 $\text{TeO}_2\text{-Ga}_2\text{O}_3\text{-AlF}_3\text{-BaF}_2\text{-Yb}_2\text{O}_3$ 的氟硝酸盐玻璃,对其 2.7 μm 微型光纤激光器进行了速率和传播方程分析:在 980 nm 泵浦下,在 2.7 μm 处发现了强荧光发射;另外,与常规的硝酸盐玻璃、氟化物玻璃和氟磷酸盐玻璃相比,在 2.7 μm 处有着更高的自发辐射几率、更大的发射截面和更长的荧光寿命。基于这些显著优点对其输出功率和斜率效率进行了预测,如图 10 所示。图 10(a)中泵浦功

率从 5 W 增加到 20 W 对应的信号光的输出功率呈现增加态势;在功率为 20 W、光纤长度小于 0.85 m 时,理论输出功率增加显著;当光纤长度为 1.43 m 时,理论输出功率达到最大值 1.58 W;再进一步增加光纤长度时,理论输出功率逐渐降低。图 10(b)为在 2.7 μm 处模拟的激光器计算斜率效率,可达 11.39%;理论输出功率的降低和低斜率效率主要归因于硝酸盐玻璃中存在大量的 OH^- 。但模拟结果表明该玻璃基质材料在高效 3.0 μm 光纤激光器方面极具潜力。同一年,西安光机所 Liu 等^[83]制备了具有高玻璃转变温度(434 $^{\circ}\text{C}$)、低的 OH^- 吸收(0.026 cm^{-1})的 $\text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 共掺和 $\text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 三掺的氟硝酸盐玻璃。他们发现 $\text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 共掺的氟硝酸盐玻璃在 2.85 μm 处具有很强的荧光发射,这主要归因于

$\text{Yb}^{3+}\rightarrow\text{Ho}^{3+}$ 有着约 91.1% 的高效能量转移(ET)效率, Er^{3+} 的加入进一步增强了 2.85 μm 的荧光发射,ET 效率高达 96.2%,这得益于 Er^{3+} 在中间起到的桥梁作用。这表明 $\text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 三掺的氟硝酸盐玻璃基质材料可用于 3.0 μm 光纤激光器。2022 年,该课题组^[84]制备了组分为 $\text{TeO}_2\text{-BaF}_2\text{-La}_2\text{O}_3\text{-LaF}_3\text{Er}^{3+}$ 的掺杂氟硝酸盐玻璃,在 980 nm LD 激发下,在 2.71 μm 处观察到强烈的荧光发射;引人注目的是该玻璃的抗热损伤好($T_g > 437 ^{\circ}\text{C}$)、 OH^- 吸收低至 0.025 cm^{-1} ,如图 11 所示。另外,其还具有良好的抗潮解能力,在 2.7 μm 处的吸收和发射截面远超报道的其他硝酸盐玻璃,是制备高功率、高效率中红外光纤激光器的优质材料。表 2 给出了近些年~3.0 μm 波段硝酸盐玻璃的热特性和荧光特性。

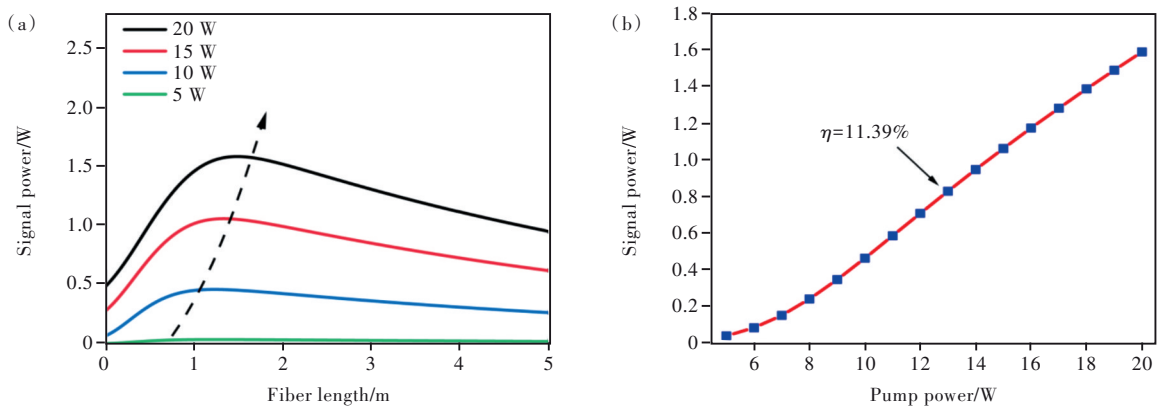


图 10 (a)不同泵浦功率下的信号功率与光纤长度关系预测;(b)980 nm 泵浦下的激光斜率效率计算^[82]。

Fig.10 (a) Prediction of the relationship between signal power and fiber length at different pumping powers. (b) Calculation of laser slope efficiency at 980 nm pump^[82].

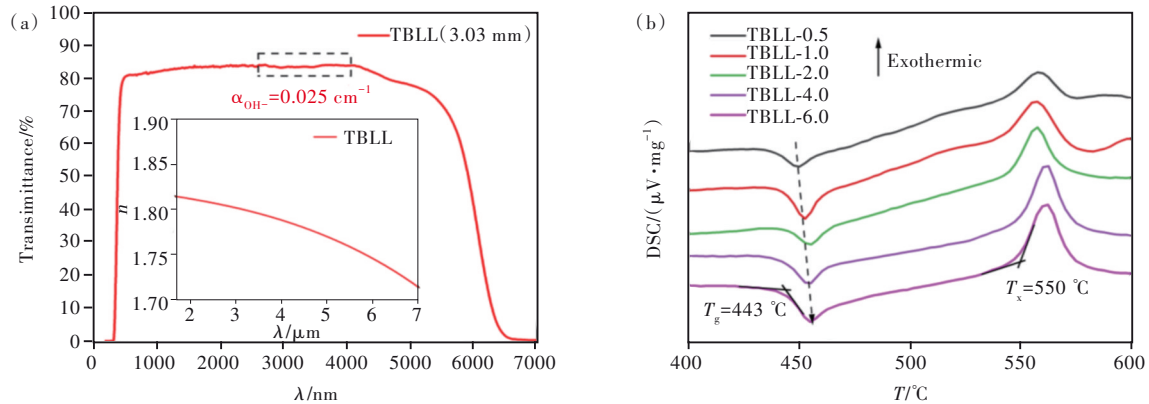


图 11 (a)厚度为 3.03 mm 玻璃样品的透过率(掺铈量为 0);(b)玻璃样品的 DSC 曲线^[84]。

Fig.11 (a) Transmittance of glass sample with thickness of 3.03 mm (Er content 0). (b) DSC curve of glass sample^[84].

以上研究结果表明,碲钡玻璃、碲钨玻璃、碲镱玻璃、碲钽玻璃以及氟硝酸盐玻璃基质材料在 3.0 μm 光纤激光器中有着广阔的应用前景。3.0 μm 波

段硝酸盐光纤激光目前还未见报道,但制备的硝酸盐玻璃光纤的 OH^- 吸收已可以低至 0.025 cm^{-1} ,玻璃转变温度超过 437 $^{\circ}\text{C}$,热稳定性 ΔT 高达 203 $^{\circ}\text{C}$,自发

辐射跃迁几率也高达 65.1 s^{-1} , 荧光寿命长达 $649.4 \mu\text{s}$, 有效发射线宽达到 140.4 nm 。对组分的进一步

探索以及工艺的进一步优化, 加快了对 $3.0 \mu\text{m}$ 稀土掺杂碲酸盐连续光纤激光的研究。

表 2 ~3.0 μm 波段碲酸盐玻璃研究状况Tab. 2 Research progress of tellurite glass in ~3.0 μm band in recent years

年份	研究单位	玻璃基质	掺杂离子	热特性、荧光特性
2013	西安光机所	$\text{TeO}_2\text{-ZnF}_2\text{-NaF}$	$\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	$\Delta T=149 \text{ }^\circ\text{C}$, $2.7 \mu\text{m}$ 寿命: $1.37\sim 1.55 \text{ ms}$, OH^- 吸收: 0.032 cm^{-1}
2013	西安光机所	$\text{TeO}_2\text{-ZnF}_2\text{-NaF}$	Ho^{3+}	$\Delta T=148 \text{ }^\circ\text{C}$, $2.85 \mu\text{m}$ 寿命: 0.81 ms , 发射截面: $1.51\times 10^{-20} \text{ cm}^2$, OH^- 吸收: 0.027 cm^{-1}
2014	华南理工大学	$\text{TeO}_2\text{-ZnO-ZnF}_2$	Er^{3+}	多声子弛豫速率: 207 s^{-1} , OH^- 吸收: 0.247 cm^{-1} , 吸收截面与发射截面: $0.44\times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $0.45\times 10^{-20} \text{ cm}^2$
2015	华南理工大学	$\text{TeO}_2\text{-BaF}_2\text{-BaO-La}_2\text{O}_3$	Er^{3+}	$T_g=(392\pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$, 自发跃迁速率: 50.84 s^{-1} , OH^- 吸收 $< 1 \text{ cm}^{-1}$, 发射截面: $0.79\times 10^{-20} \text{ cm}^2$
2017	上海光机所	$\text{TeO}_2\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-BaCO}_3\text{-CaF}_2$	Er^{3+}	$T_g=360 \text{ }^\circ\text{C}$, OH^- 吸收: 0.03 cm^{-1} , 发射截面: $1.617\times 10^{-20} \text{ cm}^2$
2019	华南理工大学	$\text{TeO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5\text{-ZnO}$	Er^{3+}	$\Delta T_{\text{max}}=203 \text{ }^\circ\text{C}$, 发射截面: $0.82\times 10^{-20} \text{ cm}^2$, 光谱品质因数: $3.22\times 10^{-24} \text{ cm}^2\cdot\text{s}$
2021	西安光机所	$\text{TeO}_2\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-La}_2\text{O}_3$	$\text{Er}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$	$T_g=434 \text{ }^\circ\text{C}$, OH^- 吸收: 0.026 cm^{-1}
2022	佛山大学	$\text{TeO}_2\text{-WO}_3\text{-ZnO-La}_2\text{O}_3$	$\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$	$2.7 \mu\text{m}$ 寿命: $649.4 \mu\text{s}$, 发射截面: $8.27\times 10^{-21} \text{ cm}^2$, 光谱品质因数: $5.37\times 10^{-24} \text{ cm}^2\cdot\text{s}$
2022	西安光机所	$\text{TeO}_2\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-La}_2\text{O}_3$	Er^{3+}	$T_g>437 \text{ }^\circ\text{C}$, OH^- 吸收约 0.025 cm^{-1} , 吸收截面与发射截面: $7.90\times 10^{-21} \text{ cm}^2$, $8.47\times 10^{-21} \text{ cm}^2$

3 总结与展望

中红外稀土掺杂连续光纤激光在医疗与生物研究、激光雷达、环境监测、材料加工等领域有着重要而广阔的应用前景。我们将碲酸盐玻璃光纤作为核心增益介质材料, 与氟化物玻璃光纤相比, 不仅有较宽的红外透过范围、较高的稀土离子溶解度, 还有着较高的折射率与非线性系数、较好的机械性能, 制备工艺简单、声子能量低等优点。因此, 对碲酸盐玻璃光纤的研究十分有意义。目前 $2.0 \mu\text{m}$ 波段稀土掺杂碲酸盐连续光纤激光器的研究已经趋于成熟化、产品化, 但传统的 $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Na}_2\text{O}$ 组分已经不能满足人们对光纤激光器的要求, 由于碲酸盐玻璃的高 OH^- 含量, 氟碲酸盐玻璃、碲钨玻璃、碲钼玻璃、碲钨玻璃、碲钨玻璃等将成为制备 $2.0 \mu\text{m}$ 光纤激光器的主要基质材料。 $3.0 \mu\text{m}$ 甚至更高波段的稀土掺杂碲酸盐连续光纤激光还未见报道。但现阶段碲酸盐玻璃光纤的羟基吸收已可以降低至 $\sim 0.01 \text{ cm}^{-1}$, 光纤损耗已降低至 $\sim 1 \text{ dB/m}$ @ $3 \mu\text{m}$, $\Delta T > 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。理论上, 光纤损耗小于 2 dB/m 便可实现 $3.0 \mu\text{m}$ 的激光输出, 但与氟化物玻璃光纤相比, 碲酸盐玻璃光纤的声子能量

$\sim 700 \text{ cm}^{-1}$, 会导致较高的无辐射跃迁速率, 从而降低其自发跃迁速率; 加之碲酸盐玻璃中的高 OH^- 含量, 对激光输出有很大的抑制作用。针对这两点, 在碲酸盐玻璃中引入氟化物和探索新的、热稳定性更好的玻璃组分显得尤为重要。因此, 氟碲酸盐玻璃、碲钨玻璃、碲钨玻璃等新的玻璃组分将成为研究 $3.0 \mu\text{m}$ 光纤激光器的优质候选材料。目前已经在 Er^{3+} 掺杂的氟化物光纤中实现了 41.6 W 的 $2.824 \mu\text{m}$ 激光输出。虽然碲酸盐光纤在 $3.0 \mu\text{m}$ 波段的理论最高输出功率仅为 5.219 W , 但碲酸盐光纤不仅抗热损伤能力强, 而且在斜率效率和与石英光纤熔接方面展现出极大的优势。因此, 对 $\sim 3.0 \mu\text{m}$ 碲酸盐玻璃光纤的持续研究意义重大。另外, 通过设计多芯光纤、进一步降低碲酸盐玻璃光纤与标准石英玻璃光纤熔接的界面损耗、优化激光腔设计以及探索更高效的泵浦方式成为制备高效率、高效率中红外稀土掺杂碲酸盐光纤激光器的不错选择。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220263>.

参 考 文 献:

- [1] YANG W Q, ZHANG B, HOU J, *et al.* A novel 2- μm pulsed fiber laser based on a supercontinuum source and its application to mid-infrared supercontinuum generation [J]. *Chin. Phys. B*, 2014, 23(5): 054208-1-5.
- [2] 杨俊彦, 公发全, 刘锐, 等. 中红外激光在光电对抗领域的应用及进展 [J]. 飞控与探测, 2020, 3(6): 34-42.
YANG J Y, GONG F Q, LIU R, *et al.* Application and progress of mid-infrared laser in optoelectronic countermeasure field [J]. *Flight Control Detect.*, 2020, 3(6): 34-42. (in Chinese)
- [3] LI J F. Guest editorial special issue on mid-infrared lasers and applications [J]. *J. Electron. Sci. Technol.*, 2015, 13(4): 289-290.
- [4] YAO T F, HUANG L J, ZHOU P, *et al.* Power scaling on tellurite glass Raman fibre lasers for mid-infrared applications [J]. *High Power Laser Sci. Eng.*, 2018, 6: e24-1-9.
- [5] 贾志旭, 姚传飞, 贾世杰, 等. 新型中红外玻璃光纤及相应激光器研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170604-1-15.
JIA Z X, YAO C F, JIA S J, *et al.* Progress on novel mid-infrared glass fibers and relative lasers [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2019, 56(17): 170604-1-15. (in Chinese)
- [6] 陈昊, 李剑峰, 欧中华, 等. 中红外光纤激光器的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(11): 111402-1-10.
CHEN H, LI J F, OU Z H, *et al.* Progress of mid-infrared fiber lasers [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2011, 48(11): 111402-1-10. (in Chinese)
- [7] WANG W C, ZHOU B, XU S H, *et al.* Recent advances in soft optical glass fiber and fiber lasers [J]. *Prog. Mater. Sci.*, 2019, 101: 90-171.
- [8] HALE G M, QUERRY M R. Optical constants of water in the 200-nm to 200- μm wavelength region [J]. *Appl. Opt.*, 1973, 12(3): 555-563.
- [9] RICHARDS B D O, JHA A, JOSE G, *et al.* Oxide glasses for mid-infrared lasers [C]. *Proceedings of SPIE 8039, Laser Technology for Defense and Security VII, Orlando, Florida*, 2011: 125-130.
- [10] 卞进田, 聂劲松, 孙晓泉. 中红外激光技术及其进展 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S3): 188-193.
BIAN J T, NIE J S, SUN X Q. Mid-infrared laser technology and its progress [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2006, 35(S3): 188-193. (in Chinese)
- [11] 阮双琛, 侯静, 李剑峰, 等. “先进中红外激光技术及应用”专题前言 [J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101000-1-2.
RUAN S C, HOU J, LI J F, *et al.* Special issue on technology and application of advanced mid-infrared lasers introduction [J]. *Chin. J. Lasers*, 2022, 49(1): 0101000-1-2. (in Chinese)
- [12] 崔宇龙, 周智越, 黄威, 等. 中红外光纤激光技术研究进展与展望 [J]. 光学学报, 2022, 42(9): 0900001-1-30.
CUI Y L, ZHOU Z Y, HUANG W, *et al.* Progress and prospect of mid-infrared fiber laser technology [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2022, 42(9): 0900001-1-30. (in Chinese)
- [13] 徐瑶. 3 μm 掺镱中红外连续与脉冲光纤激光器 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
XU Y. 3 μm Dy^{3+} -doped Mid-Infrared Continuous and Pulsed Fiber Laser [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [14] 刘尊洋, 卞进田, 邵立, 等. 中红外激光技术研究进展 [J]. 激光与红外, 2013, 43(8): 853-858.
LIU Z Y, BIAN J T, SHAO L, *et al.* Progress of mid-infrared laser technology [J]. *Laser Infrared*, 2013, 43(8): 853-858. (in Chinese)
- [15] 包照日格图, 张大勇, 冯宇彤, 等. 可调谐中红外 OPO 激光器研究 [J]. 激光与红外, 2012, 42(9): 986-988.
BAO Z R G T, ZHANG D Y, FENG Y T, *et al.* Research on tunable mid-infrared OPO laser [J]. *Laser Infrared*, 2012, 42(9): 986-988. (in Chinese)
- [16] 楼祺洪, 周军, 朱健强, 等. 高功率光纤激光器研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2): 135-138.
LOU Q H, ZHOU J, ZHU J Q, *et al.* Recent progress of high-power fiber lasers [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2006, 35(2): 135-138. (in Chinese)
- [17] 申人升, 张玉书, 杜国同. 光纤激光器研究进展 [J]. 半导体光电, 2009, 30(1): 1-5.
SHEN R S, ZHANG Y S, DU G T. Laser development of fiber lasers [J]. *Semicond. Optoelectron.*, 2009, 30(1): 1-5.

(in Chinese)

- [18] WANG Z H, ZHANG B, LIU J, *et al.* Recent developments in mid-infrared fiber lasers: status and challenges [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2020, 132: 106497.
- [19] 张飞飞. 掺稀土 2~3 μm 中红外氧氟玻璃发光特性研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
ZHANG F F. *The Study on 2-3 μm Mid-infrared Luminescence Properties of Rare-earth Doped Oxyfluoride Glass* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [20] SEDDON A B, TANG Z Q, FURNISS D, *et al.* Progress in rare-earth-doped mid-infrared fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(25): 26704-26719.
- [21] 祁思胜, 李森森, 胡红斌, 等. 高功率中红外激光传输硫化物玻璃光纤 [J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(4): 950-956.
QI S S, LI S S, HU H B, *et al.* Sulfide glass fiber for high-power mid-infrared laser transmission [J]. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 2022, 50(4): 950-956. (in Chinese)
- [22] 刘自军, 卞俊轶, 黄炎, 等. 稀土掺杂硫系光纤中红外发光的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 020003-1-8.
LIU Z J, BIAN J Y, HUANG Y, *et al.* Research progress on rare earth ions doped chalcogenide fiber for mid-infrared luminescence [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2017, 54(2): 020003-1-8. (in Chinese)
- [23] 张龙, 张军杰, 祁长鸿, 等. 稀土离子掺杂的 AlF_3 基氟化物玻璃 [J]. 物理学报, 2000, 49(8): 1620-1626.
ZHANG L, ZHANG J J, QI C H, *et al.* Rare earth doped AlF_3 -based fluoride glass [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2000, 49(8): 1620-1626. (in Chinese)
- [24] QI F W, HUANG F F, ZHOU L F, *et al.* Low-hydroxy $\text{Dy}^{3+}/\text{Nd}^{3+}$ co-doped fluoride glass for broadband 2.9 μm luminescence properties [J]. *J. Lumin.*, 2017, 190: 392-396.
- [25] 刘瑞特, 姜益光, 张龙飞, 等. 中红外氟化物玻璃光纤研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(4): 1085-1099.
LIU R T, JIANG Y G, ZHANG L F, *et al.* Mid-infrared fluoride glass fibers—a short review [J]. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 2022, 50(4): 1085-1099. (in Chinese)
- [26] 周朴, 冷进勇, 肖虎, 等. 高平均功率光纤激光的研究进展与发展趋势 [J]. 中国激光, 2021, 48(20): 2000001-1-26.
ZHOU P, LENG J Y, XIAO H, *et al.* High average power fiber lasers: research progress and future prospect [J]. *Chin. J. Lasers*, 2021, 48(20): 2000001-1-26. (in Chinese)
- [27] 李政, 李晋忠, 张昆, 等. 平均功率 360 W 的光谱合成纳秒脉冲光纤激光 [J]. 激光与红外, 2021, 51(12): 1610-1613.
LI Z, LI J Z, ZHANG K, *et al.* Spectrally-combined nanosecond pulsed fiber laser with an average power of 360 W [J]. *Laser Infrared*, 2021, 51(12): 1610-1613. (in Chinese)
- [28] WANG J S, VOGEL E M, SNITZER E. Tellurite glass: a new candidate for fiber devices [J]. *Opt. Mater.*, 1994, 3(3): 187-203.
- [29] 周跃芬, 刘粤惠, 戴世勋, 等. 宽带放大器用碲酸盐玻璃研究进展 [J]. 无机材料学报, 2003(3): 513-519.
ZHOU Y F, LIU Y H, DAI S X, *et al.* Advances in tellurite glass for broadband amplifier [J]. *J. Inorg. Mater.*, 2003(3): 513-519. (in Chinese)
- [30] RICHARDS B, JHA A, TSANG Y, *et al.* Tellurite glass lasers operating close to 2 μm [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2010, 7(3): 177-193.
- [31] 王伟超, 袁健, 陈东丹, 等. 掺稀土光子玻璃近中红外发光与激光 [J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(8): 809-824.
WANG W C, YUAN J, CHEN D D, *et al.* Recent advances in rare-earth-doped photonic glasses for near-and mid-infrared lasers [J]. *Sci. Sinica Technol.*, 2015, 45(8): 809-824. (in Chinese)
- [32] 李维炜, 张小金, 王航, 等. 3 μm 中红外稀土掺杂光纤激光器研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170605-1-24.
LI W W, ZHANG X J, WANG H, *et al.* Research progress of mid-infrared rare earth ion-doped fiber lasers at 3 μm [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2019, 56(17): 170605-1-24. (in Chinese)
- [33] 刘沛沛, 白杨, 任兆玉, 等. 2 μm 光纤激光器的研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(1): 45-49.
LIU P P, BAI Y, REN Z Y, *et al.* Research and progress of 2 μm fiber lasers [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2009, 38(1):

- 45-49. (in Chinese)
- [34] GENG J H, WANG Q, JIANG S B. 2 μm fiber laser sources and their applications [C]. *Proceedings of SPIE 8164, Nanophotonics and Macrophotonics for Space Environments V*, San Diego, 2011: 79-88.
- [35] 李鑫, 杨超, 李永亮. 2 μm 高功率掺铥连续光纤激光器研究进展 [J/OL]. 激光杂志, [2022-10-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1085.TN.20220525.1913.002.html>.
- LI X, YANG C, LI Y L. Research progress of 2 μm high power thulium-doped CW fiber laser [J/OL]. *Laser J.*, [2022-10-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1085.TN.20220525.1913.002.html>. (in Chinese)
- [36] 袁健. 2.0 μm 波段稀土掺杂碲酸盐玻璃光纤及其光谱和激光实验研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- YUAN J. *Rare Earth Doped Tellurite Glass Fibers and Their Spectroscopic Properties for the Lasers Operating at 2.0 μm Region and the Laser Experimental Research* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [37] SCHOLLE K, LAMRINI S, KOOPMANN P, et al. 2 μm laser sources and their possible applications [M]. PAL B. *Frontiers in Guided Wave Optics & Optoelectronics*. Vukovar: Intech Open, 2010.
- [38] HANNA D C, JAUNCEY I M, PERCIVAL R M, et al. Continuous-wave oscillation of a monomode thulium-doped fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 1988, 24(19): 1222-1223.
- [39] MORI A, OHISHI Y, SUDO S. Erbium-doped tellurite glass fibre laser and amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 1997, 33(10): 863-864.
- [40] WU J F, JIANG S B, QIU T Q, et al. Tm³⁺ doped tellurite glass microsphere laser [C]. *Proceedings of SPIE 5723, Optical Components and Materials II*, San Jose, 2005: 21-26.
- [41] RICHARDS B D O, SHEN S X, JHA A. Spectroscopy of Tm-Ho co-doped tellurite glass for mid-IR fibre lasers in 1.8-2.2 μm [C]. *Proceedings of SPIE 5984, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing, Bruges*, 2005: 598407.
- [42] RICHARDS B, TSANG Y H, BINKS D J, et al. 1.91-1.99 μm Tm³⁺/Yb³⁺ co-doped tellurite fibre laser pumped using a 1088 nm Yb³⁺ fibre laser [C]. *Proceedings of the CLEO/Europe and IQEC 2007 Conference Digest, Munich*, 2007: CJ_27.
- [43] RICHARDS B, TSANG Y, BINKS D, et al. Efficient ~ 2 μm Tm³⁺-doped tellurite fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(4): 402-404.
- [44] TSANG Y, RICHARDS B, BINKS D, et al. Tm³⁺/Ho³⁺ codoped tellurite fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(11): 1282-1284.
- [45] TSANG Y, RICHARDS B, BINKS D, et al. A Yb³⁺/Tm³⁺/Ho³⁺ triply-doped tellurite fibre laser [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(14): 10690-10695.
- [46] VETTER S L, MCKNIGHT L J, CALVEZ S, et al. GaInNAs semiconductor disk lasers as pump sources for Tm³⁺ (, Ho³⁺)-doped glass, crystal and fibre lasers [C]. *Proceedings of SPIE 7193, Solid State Lasers XVIII: Technology and Devices, San Jose*, 2009: 719317.
- [47] FUSARI F, VETTER S, LAGATSKY A A, et al. Tunable laser operation of a Tm³⁺-doped tellurite glass laser near 2 μm pumped by a 1211 nm semiconductor disk laser [J]. *Opt. Mater.*, 2010, 32(9): 1007-1010.
- [48] DENKER B I, DOROFEEV V V, GALAGAN B I, et al. 2.3 μm laser potential of TeO₂ based glasses [J]. *Laser Phys.*, 2017, 27(9): 095801-1-5.
- [49] 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]. *Sci. Rep.*, 2018, 8(1): 16164-1-13.
- [50] DENKER B I, DOROFEEV V V, GALAGAN B I, et al. A 200 mW, 2.3 μm Tm³⁺-doped tellurite glass fiber laser [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2020, 17(9): 095101-1-4.
- [51] LI K F, ZHANG G, HU L L. Watt-level ~ 2 μm laser output in Tm³⁺-doped tungsten tellurite glass double-cladding fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(24): 4136-4138.
- [52] LI K F, HU L L, ZHANG G, et al. ~ 2 μm laser output in short length highly Tm³⁺-doped tungsten tellurite glass double cladding fiber [C]. *Proceedings of the Advances in Optical Materials 2011, Istanbul*, 2011: AIWB3.
- [53] LI K F, ZHANG G, WANG X, et al. Tm³⁺ and Tm³⁺-Ho³⁺ co-doped tungsten tellurite glass single mode fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(9): 10115-10121.
- [54] HE J L, ZHAN H, ZHOU Z G, et al. Study on 2.0 μm fluorescence of Ho-doped water-free fluorotellurite glasses [J].

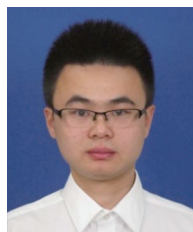
- Opt. Mater.*, 2013, 35(12): 2573-2576.
- [55] 姚传飞, 贾志旭, 王顺宾, 等. Tm^{3+} 掺杂碲酸盐微结构光纤激光器 [J]. 发光学报, 2014, 35(9): 1109-1113.
YAO C F, JIA Z X, WANG S B, *et al.* Tm^{3+} doped tellurite microstructure fiber laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(9): 1109-1113. (in Chinese)
- [56] 孟祥伟, 姚传飞, 王善德, 等. $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 共掺碲酸盐微结构光纤激光器 [J]. 发光学报, 2015, 36(1): 94-98.
MENG X W, YAO C F, WANG S D, *et al.* $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ co-doped tellurite microstructure fiber lasers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(1): 94-98. (in Chinese)
- [57] WANG S B, YAO C F, JIA Z X, *et al.* 1887 nm lasing in Tm^{3+} -doped $\text{TeO}_2\text{-BaF}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ glass microstructured fibers [J]. *Opt. Mater.*, 2017, 66: 640-643.
- [58] LI D H, XU W B, KUAN P W, *et al.* Spectroscopic and laser properties of Ho^{3+} doped lanthanum-tungsten-tellurite glass and fiber [J]. *Ceram. Int.*, 2016, 42(8): 10493-10497.
- [59] LI L X, WANG W C, ZHANG C F, *et al.* 2.0 μm $\text{Nd}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ -doped tungsten tellurite fiber laser [J]. *Opt. Mater. Express*, 2016, 6(9): 2904-2914.
- [60] ZHAO Z P, YAO C F, LI Z R, *et al.* 8.08 W holmium doped fluorotellurite fiber laser at 2.067 μm [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2019, 16(11): 115101-1-6.
- [61] ZHOU D C, BAI X M, ZHOU H. Preparation of $\text{Ho}^{3+}/\text{Tm}^{3+}$ co-doped lanthanum tungsten germanium tellurite glass fiber and its laser performance for 2.0 μm [J]. *Sci. Rep.*, 2017, 7: 44747-1-9.
- [62] YUAN J, WANG W C, YE Y C, *et al.* 2.0 μm ultra broadband emission from $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ co-doped gallium tellurite glasses for broadband light sources and tunable fiber lasers [J]. *Crystals*, 2021, 11(2): 190-1-11.
- [63] SONG C L, XU P F, ZHOU D C, *et al.* Structure, and luminescence properties in $\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ co-doped bismuth-tellurite glass for 2 μm fiber lasers [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2022, 593: 121784.
- [64] 樊浩泽, 梁金辉, 郑树锴, 等. 2.8 μm 中红外同步泵浦锁模光纤激光器 [J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101020-1-9.
FAN H Z, LIANG J H, ZHENG S K, *et al.* 2.8 μm mid-infrared synchronously pumped mode-locked fiber laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2022, 49(1): 0101020-1-9. (in Chinese)
- [65] 王鹏飞, 刘墨, 张集权, 等. 基于氟化铝基玻璃光纤的瓦级~3 μm 激光 [J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(11): 111001-1-4.
WANG P F, LIU M, ZHANG J Q, *et al.* Watt-level ~3 μm laser in AlF_3 -based glass fiber [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2021, 33(11): 111001-1-4. (in Chinese)
- [66] 罗鸿禹. 2~4微米中红外脉冲光纤激光器研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
LUO H Y. *Research on Pulsed Mid-Infrared Fiber Laser Operating at 2-4 μm* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019. (in Chinese)
- [67] 张新, 舒世立, 佟存柱. 3 μm 波长 Er:ZBLAN 光纤激光器研究进展 [J]. 光电工程, 2019, 46(8): 190070-1-9.
ZHANG X, SHU S L, TONG C Z. Research progress of Er:ZBLAN fiber lasers at the wavelength of 3 μm [J]. *Opto-Electron. Eng.*, 2019, 46(8): 190070-1-9. (in Chinese)
- [68] EBENDORFF-HEIDEPRIEM H, FOO T C, LI Y H, *et al.* New tellurite glasses for erbium fibre lasers [C]. *Proceedings of the Joint Conference of the Opto-Electronics and Communications Conference and the Australian Conference on Optical Fibre Technology, Sydney*, 2008: 1-2.
- [69] OERMANN M R, EBENDORFF-HEIDEPRIEM H, LI Y H, *et al.* Index matching between passive and active tellurite glasses for use in microstructured fiber lasers: erbium doped lanthanum-tellurite glass [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(18): 15578-15584.
- [70] RICHARDS B D O, TEDDY-FERNANDEZ T, JHA A, *et al.* Mid-infrared emission from Dy^{3+} doped tellurite bulk glass and waveguides [C]. *Proceedings of SPIE 8534, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XVIII; and Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VIII, Edinburgh*, 2012: 853411.
- [71] WANG W C, YUAN J, LI L X, *et al.* Broadband 2.7 μm amplified spontaneous emission of Er^{3+} doped tellurite fibers for mid-infrared laser applications [J]. *Opt. Mater. Express*, 2015, 5(12): 2964-2977.
- [72] WANG W C, LI L X, CHEN D D, *et al.* Numerical analysis of 2.7 μm lasing in Er^{3+} -doped tellurite fiber lasers [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6: 31761-1-10.

- [73] LIU J L, XIAO Y B, HUANG S J, *et al.* The glass-forming region and 2.7 μm emission of Er^{3+} -doped TeO_2 - Ta_2O_5 - ZnO tellurite glass [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2019, 522: 119564.
- [74] WANG W C, MAO L Y, LIU J L, *et al.* Glass-forming regions and enhanced 2.7 μm emission by Er^{3+} heavily doping in TeO_2 - Ga_2O_3 - R_2O (or MO) glasses [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2020, 103(9): 4999-5012.
- [75] ZHANG Y Q, LI X X, WANG W C, *et al.* Intense emission at 2.9 μm from $\text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ co-doped TeO_2 - Ga_2O_3 - ZnO tellurite glasses [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2021, 104(7): 2924-2931.
- [76] YUAN J, DENG T T, XIAO P, *et al.* Strong and broadband 2.7 μm fluorescence of $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ co-doped ZnO modified tungsten tellurite glasses for broadband mid-infrared optical amplifiers and tunable fiber lasers [J]. *J. Lumin.*, 2022, 246: 118840.
- [77] HE J L, ZHOU Z G, ZHAN H, *et al.* 2.85 μm fluorescence of Ho-doped water-free fluorotellurite glasses [J]. *J. Lumin.*, 2014, 145: 507-511.
- [78] ZHAN H, ZHANG A D, HE J L, *et al.* Enhanced 2.7 μm emission of Er/Pr-codoped water-free fluorotellurite glasses [J]. *J. Alloys Compd.*, 2014, 582: 742-746.
- [79] ZHANG F F, ZHANG W J, YUAN J, *et al.* Enhanced 2.7 μm emission from Er^{3+} doped oxyfluoride tellurite glasses for a diode-pump mid-infrared laser [J]. *AIP Adv.*, 2014, 4(4): 047101-1-11.
- [80] XUE T F, LI Y, LIU Y Y, *et al.* High thermal stability and intense 2.71 μm emission in Er^{3+} -doped fluorotellurite glass modified by GaF_3 [J]. *Opt. Mater.*, 2018, 75: 367-372.
- [81] QI F W, HUANG F F, WANG T, *et al.* Highly Er^{3+} doped fluorotellurite glass for 1.5 μm broadband amplification and 2.7 μm microchip laser applications [J]. *J. Lumin.*, 2018, 202: 132-135.
- [82] WAN R, WANG P F, LI S W, *et al.* Spectroscopic properties of ErF_3 doped tellurite-gallium oxyfluoride glass for ~ 3 μm laser materials [J]. *J. Appl. Phys.*, 2021, 129(15): 153105-1-11.
- [83] LIU C Z, FENG S H, XIAO X S, *et al.* Intense 2.85 μm mid-infrared emissions in $\text{Yb}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ codoped and $\text{Yb}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ tridoped TBLL fluorotellurite glasses and their energy transfer mechanism [J]. *Ceram. Int.*, 2022, 48(4): 5267-5273.
- [84] FENG S H, LIU C Z, CUI J, *et al.* Intense 2.71- μm fluorescence emission in low hydroxyl heavily Er^{3+} -doped fluorotellurite glass for mid-infrared fiber laser [J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2022, 586: 121569-1-9.



尹朋伟(1995-),男,安徽亳州人,硕士研究生,2019年于闽南师范大学获得学士学位,主要从事碲酸盐玻璃的制备及其性能的研究。

E-mail: 997877491@qq.com



姜益光(1991-),男,湖南长沙人,博士,青年特聘研究员,博士生导师,2018年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事低声子氟化物光功能材料的应用研究。

E-mail: jiangyiguang@siom.ac.cn



赵国营(1986-),男,山东东平人,博士,副教授,硕士生导师,2013年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事光学功能材料设计合成等相关的研究。

E-mail: zhaogy135@126.com