

光学学报

中红外光纤激光技术研究进展与展望

崔宇龙^{1,2}, 周智越^{1,2}, 黄威^{1,2}, 李智贤^{1,2}, 李昊^{1,2}, 王蒙^{1,2,3}, 王泽峰^{1,2,3*}

¹ 国防科技大学前沿交叉学科学院, 湖南 长沙 410073;

² 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;

³ 高能激光技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410073

摘要 中红外激光在通信、遥感、安检和光电对抗等许多领域中都有重要的应用价值, 一直以来都是激光领域研究的热点。中红外激光的产生方法有很多, 其中光纤中红外激光器具有结构紧凑、光束质量好和转换效率高等特点, 故被认为最有希望实现便携、稳定、高效和高功率的中红外激光输出。随着软玻璃光纤制备工艺水平的提升, 中红外光纤激光技术获得了快速发展, 输出功率水平也得到了很大提升。然而, 受限于稀土离子种类、软玻璃光纤制备工艺和软玻璃光纤化学稳定性, 基于软玻璃光纤的中红外激光器在功率进一步提升和波长拓展方面存在技术瓶颈, 近年出现的中红外光纤气体激光器为此提供了有效的解决方案。详细综述了中红外光纤激光技术的研究现状, 包括基于气体填充空芯光纤的新型中红外光纤激光器, 并简要展望了中红外光纤激光技术的发展趋势。

关键词 激光光学; 中红外激光; 光纤激光; 固体激光; 气体激光; 空芯光纤; 拉曼激光

中图分类号 TN24

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.0900001

Progress and Prospect of Mid-Infrared Fiber Laser Technology

Cui Yulong^{1,2}, Zhou Zhiyue^{1,2}, Huang Wei^{1,2}, Li Zhixian^{1,2}, Li Hao^{1,2},
Wang Meng^{1,2,3}, Wang Zefeng^{1,2,3*}

¹ College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

² State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha 410073, Hunan, China;

³ Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha 410073, Hunan, China

Abstract Mid-infrared laser has important application value in many fields, such as communication, remote sensing, security inspection, optoelectronic countermeasures, and so on, and has always attracted enormous attention. There are many methods for generation of mid-infrared laser, among which mid-infrared fiber lasers have the characteristics of compact structure, good beam quality, and high conversion efficiency, and so on, so they are considered as the most promising way to achieve portable, stable, efficient, and high-power mid-infrared laser emission. With the improvement of manufacturing technology of soft glass fibers, mid-infrared fiber laser technologies have achieved rapid development, and the output power level has also been greatly enhanced. However, limited by the types of rare earth ions, the fabrication process and chemical stability of soft glass fibers, the mid-infrared lasers based on soft glass fibers have technical difficulties in further improving the power and expanding the wavelength. The mid-infrared fiber gas lasers appeared in recent years provide an effective solution to these problems. The research status of mid-infrared fiber laser technologies are reviewed in detail, including the new mid-infrared fiber lasers based on gas-filled hollow-core fibers, and the development trend of mid-infrared fiber laser technologies is briefly prospected.

Key words laser optics; mid-infrared laser; fiber laser; solid-state laser; gas laser; hollow-core fibers; Raman laser

收稿日期: 2021-10-13; 修回日期: 2021-11-06; 录用日期: 2021-11-17

基金项目: 湖南省自然科学基金杰出青年科学基金项目(2019JJ20023)、国家自然科学基金面上项目(11974427, 12004431)、脉冲功率激光国家重点实验室主任基金项目(SKL-2020-ZR05, SKL-2021-ZR01)、湖南省科技创新人才计划科技创新领军人才项目(2021RC4027)

通信作者: *zefengwang_nudt@163.com

1 引言

中红外波段($3\sim 5 \mu\text{m}$)包含了重要的大气传输窗口,在此波段内可以进行远距离激光传输,在激光通信、遥感等方面具有广泛的应用^[1]。中红外波段还包含了许多气体、固体和液体分子(温室气体、地面上的污染物、水中的污染物、空气中的污染物、有毒物质、石油和生物组织等)的吸收峰,因此可以作为这些分子的分子指纹,在污染物和环境检测等方面具有重要的应用前景^[2]。 $3 \mu\text{m}$ 附近存在较强的水分子吸收峰,利用该波段的激光切割生物组织时可以有效减小组织损伤和热扩散,在生物医疗上具有重要的应用价值^[3]。基于红外制导的导弹探测器的响应波段一般包括 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 波段,因此中红外激光在军事上可用于对导弹尾焰进行探测^[4-5]。同时,利用可调谐的中红外激光光源可以实现多光谱激光雷达^[6]。由于中红外激光在军事与民用领域上均有重要的应用价值,因此一直以来都是激光领域研究的热点。

产生中红外激光的方法有很多,根据增益介质可分为气体激光器^[7]、固体激光器^[8]、量子级联激光器^[9]和光纤激光器。气体激光器具有输出激光功率高、散热性能好等特点,但体积一般较大、系统较为复杂,在实际应用中受到很大限制。固体激光器结构相对紧凑,体积较小,但受限于掺杂离子与掺杂技术等因素,输出波长拓展较困难,此外还存在高功率下散热困难、效率普遍不高等缺点。量子级联激光器可以实现小型化,且输出波长范围很宽,但制备工艺水平要求很高,很多情况下需要低温运行,光束质量较差。光纤激光器具有作用距离长、光束质量好、稳定性好和转化效率高等特点。2012年,澳大利亚悉尼大学 Jackson^[10]指出光纤结构的中红外激光器最有希望实现便携、稳定和高效的中红外激光输出。目前光纤使用的材料主要有硅酸盐玻璃、氟化物玻璃和硫系玻璃。硅酸盐玻璃因其传输损耗较低、强度大和损伤阈值高的特性而得到了广泛的应用,但是其在 $2.2 \mu\text{m}$ 以上波段中损耗会急剧增大^[11],故不适合用于产生中红外激光。氟化物玻璃材料的传输带较宽,在中红外波段有较低的传输损耗,受到了广泛关注。其中,氟锆酸盐玻璃(ZBLAN)是最常使用的重金属掺杂光纤材料^[12],它由摩尔分数为53%的 ZrF_4 、摩尔分数为20%的 BaF_2 、摩尔分数为4%的 LaF_3 、摩尔分数为3%的 AlF_3 和摩尔分数为20%的NaF构成,其传输波长可达 $4 \mu\text{m}$ 以上。近年来报道了大量基于ZBLAN

光纤的中红外激光器,但ZBLAN通常需要在低温下工作,损伤阈值相对硅酸盐玻璃低得多,且化学稳定性比较差,遇水很容易潮解,进而实现高功率输出存在较大困难。硫系玻璃是另一种用于产生中红外激光输出的重要光纤材料^[13],与氟化物玻璃一样,在中红外波段具有较低的传输损耗和较宽的传输带,但高纯度的稀土掺杂硫系玻璃光纤很难制备,且存在折射率较大导致端面反射较强的问题。

目前,基于光纤结构的中红外激光器主要包括基于掺杂稀土离子的中红外光纤激光器、基于软玻璃光纤的中红外拉曼激光器、中红外超连续谱光纤光源和基于空芯光纤的新型中红外光纤气体激光器等。基于掺杂稀土离子的中红外光纤激光器近年来得到了快速发展,输出功率水平得到了明显提升,数十瓦连续波和千瓦级峰值功率脉冲的中红外光纤激光器相继被报道,但是输出波长主要集中在 $3 \mu\text{m}$ 附近,受限于光纤材料,进一步提升功率存在较大难度。此外,受掺杂稀土离子种类的限制,目前主要的掺杂稀土离子包括 Er^{3+} 、 Ho^{3+} 和 Dy^{3+} 等,进而激光输出波长难以突破 $4 \mu\text{m}$ 。基于软玻璃光纤的中红外拉曼激光器是实现激光波长向长波方向拓展的一种有效手段,但受限于当前软玻璃光纤的拉曼增益系数和损伤阈值等问题,研究进展缓慢,相关报道相对较少。中红外超连续谱光纤光源是产生宽谱中红外激光的一种重要手段,目前基于非掺杂软玻璃光纤的超连续谱光源输出功率已达几十瓦,但这种激光光源的光谱很宽,故谱密度较小,进而应用受到一定的限制。以上中红外光纤激光器的发展都有一个共同的受限因素,即氟化物和硫系玻璃光纤的制备工艺成熟度不高,远远低于硅酸盐玻璃光纤,且存在化学稳定性差的缺点。空芯光纤的出现^[14]使得基于硅酸盐玻璃的光纤在中红外波段的应用成为可能。相较软玻璃光纤,硅酸盐玻璃光纤制备工艺较为成熟,且稳定性更好。在中红外波段最常用的空芯光纤主要包括Kagome型空芯光纤^[15]和反共振空芯光纤^[16-19]。通过在空芯光纤中填充气体,诞生了光纤气体激光器^[20]。这种新型的激光器结合了光纤激光器与气体激光器的许多优点,为突破基于软玻璃光纤的中红外激光器在功率提升和波长拓展方面的技术瓶颈提供了新的方案。近年来,随着在中红外波段具有较低传输损耗的反共振空芯光纤制备工艺水平的不断提升,中红外光纤气体激光器获得了快速发展,已经实现了瓦级输出,激光波长已突破 $4 \mu\text{m}$,是实现高功率中红外光纤激光输出的一种

非常有潜力的技术途径。

本文详细综述了基于光纤结构的中红外激光技术的发展历史与研究进展,主要包括基于稀土离子掺杂的中红外光纤激光器、基于非线性效应的中红外光纤激光器、基于软玻璃光纤的中红外超连续谱激光器和基于空芯光纤的中红外光纤气体激光器等。最后,对中红外光纤激光器的发展趋势进行了展望。

2 基于稀土离子掺杂的中红外光纤激光技术

基于稀土离子掺杂的中红外光纤激光器是利用掺杂在纤芯中的稀土离子的受激辐射跃迁产生激光

的,在 $2.8\text{ }\mu\text{m}$ 以上的波段范围内常用的掺杂离子主要有 Er^{3+} 、 Dy^{3+} 和 Ho^{3+} ,其中 Er^{3+} 的发射带范围为 $2.6\sim3.0\text{ }\mu\text{m}$ 和 $3.3\sim3.8\text{ }\mu\text{m}$, Ho^{3+} 的发射带范围为 $2.7\sim3.05\text{ }\mu\text{m}$, Dy^{3+} 的发射带范围为 $2.6\sim3.3\text{ }\mu\text{m}$ ^[21]。三种掺杂离子的能级跃迁示意图如图1所示。由于自终止效应(上能级寿命小于下能级寿命)的存在,正常情况下无法形成有效的激光辐射,因此通常采取重掺杂 Er^{3+} 实现能量传递上转换^[22]、双波长泵浦^[23]、共掺 Pr^{3+} ^[24]和激光下能级激发态吸收^[25]等方式实现有效的中红外激光输出。下面分别介绍基于稀土离子掺杂的连续和脉冲中红外光纤激光器的发展历史与研究现状。

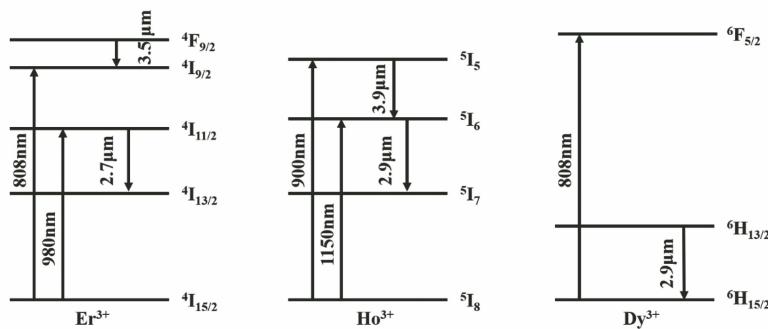


图1 中红外稀土掺杂离子能级跃迁示意图^[26]

Fig. 1 Schematic diagrams of energy level transition of mid-infrared rare-earth-doped ions^[26]

2.1 基于稀土离子掺杂的连续波中红外光纤激光器

氟化物玻璃在中红外波段具有良好的传输特性,是作为中红外激光器的良好材料,基于氟化物玻璃光纤掺杂不同稀土离子的连续波中红外光纤激光器相继得到了报道。20世纪90年代,科学家们对连续波中红外光纤激光器进行了研究^[27-33],但受限于当时中红外光纤的拉制水平,激光器的输出功率普遍不高,只有几毫瓦,且实验条件要求较为苛刻。

进入21世纪,科学家们致力于将中红外光纤激光器的输出功率进一步提升。澳大利亚悉尼大学Jackson^[24,34-35]研究了利用近红外波段的光纤激光器作为泵浦源以串联泵浦的形式实现中红外的光纤激光输出,在 $2.9\text{ }\mu\text{m}$ 波长附近的输出功率突破瓦级。2006年,英国曼彻斯特大学Tsang等^[36]和Talavera等^[37]先后用 $1.3\text{ }\mu\text{m}$ 的Nd:YAG激光器与 1175 nm 光纤拉曼激光器作为泵浦源实现了 $2.95\text{ }\mu\text{m}$ 波长附近的中红外激光。

2009年,日本京都大学Tokita等^[38]利用纤芯多模的掺 Er^{3+} :ZBLAN光纤,实现了 24 W 液态制冷的连续 $3\text{ }\mu\text{m}$ 波段光纤激光输出。在 975 nm 二极管泵浦下,其相对总输入泵浦功率的光光转化效

率为 14.5% 。

2009年,加拿大拉瓦尔大学Bernier等^[39]报道了一台全光纤结构的中红外掺 Er^{3+} 光纤激光器。在 976 nm 泵浦下,得到了 5 W 激光功率输出,效率为 32% 。全光纤结构的出现使得中红外光纤激光器更加稳定和高效。同年,该团队还报道了 $2.94\text{ }\mu\text{m}$ 掺 Er^{3+} 全光纤激光器。相比此前的结构,此系统在光纤上同时刻写了高反和低反的光纤布拉格光栅,得到了 5.2 W 的激光功率输出,效率为 26.6% ^[40]。2011年,该团队报道了输出功率为 20 W 的基于被动冷却单模全光纤结构的光纤激光器^[41]。

2011年,电子科技大学Li等^[42]报道了第一台输出波长大于 $3\text{ }\mu\text{m}$ 的瓦级光纤激光器。2014年,澳大利亚阿德莱德大学Henderson-Sapir等^[23]首次实现了具有明显功率输出的波长大于 $3.5\text{ }\mu\text{m}$ 的中红外光纤激光器,其输出功率为 260 mW 。该实验中,应用多波长泵浦的方式提高了中红外光纤激光器的转化效率。2015年,加拿大拉瓦尔大学Fortin等^[43]报道了输出功率为 30.5 W 、输出波长为 2938 nm 的掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器。该系统采用了基于纤芯内刻写光纤布拉格光栅的被动冷却全

光纤激光腔,如图 2 所示,在 980 nm 泵浦下总激光效率为 16%。

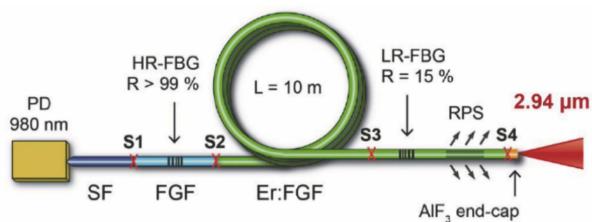


图 2 基于纤芯内刻写光纤布拉格光栅的被动冷却全光纤激光腔结构图^[43]

Fig. 2 Structural diagram of passively cooled all-fiber laser cavity based on fiber Bragg gratings etched in core^[43]

2016 年,澳大利亚阿德莱德大学 Henderson-Sapir 等^[44]报道了大范围调谐的 Er³⁺:ZBLAN 光纤激光器。该激光器的波长调谐范围可达 450 nm, 波长最长可达 3.78 μm, 在 3.47 μm 处可以得到 1.45 W(近衍射极限)激光输出。

2017 年,加拿大拉瓦尔大学 Maes 等^[45]报道了第一台单片多波长泵浦掺 Er³⁺氟化物光纤激光器。实验系统结构如图 3 所示,该实验系统与此前的全光纤结构的不同之处在于谐振腔的两端被同一根光纤上的一对光纤布拉格光栅取代,这种设计既增加了系统的稳定性,也提高了系统承受功率的水平。该系统在波长 3.55 μm 处实现了 5.6 W 的激光功率输出和 26.4% 的总光光转化效率,均为该波长附近此前能得到的最高值。

2018 年,加拿大拉瓦尔大学 Aydin 等^[22]将连续光纤激光器在 2.8 μm 处的输出功率提升至 41.6 W, 结构如图 4 所示,这是目前中红外光纤激光器输出的最高功率,且文中指出目前光纤尖端的

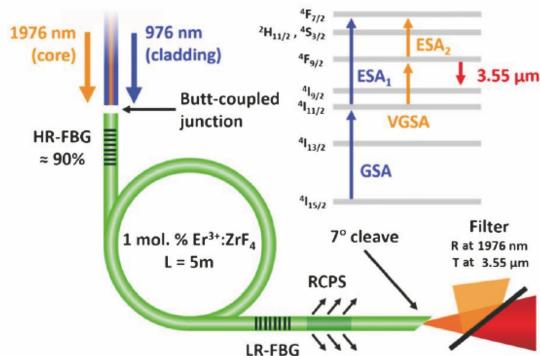


图 3 双波长泵浦单片 Er³⁺:ZrF₄光纤激光器实验结构图^[45]

Fig. 3 Experimental setup of monolithic dual-wavelength pumped Er³⁺:ZrF₄ fiber laser^[45]

退化是影响功率进一步提升的主要限制因素。同年,澳大利亚麦考瑞大学 Majewski 等^[46]报道了调谐范围可达 573 nm 的 Dy³⁺:ZBLAN 光纤激光器,覆盖的波长范围为 2.8~3.4 μm,其输出功率为 170 mW。加拿大拉瓦尔大学 Maes 等^[25]采用 23 cm 长的掺 Ho³⁺的 InF₃光纤,在 3.92 μm 处获得了约 200 mW 的激光输出,这也是室温下基于稀土离子掺杂的氟化物光纤激光器输出的最长波长。2019 年,该团队在掺杂 Er³⁺氟化物光纤中获得了 3.4 W 的激光输出(3.42 μm 波长处),效率达到了 38.6%^[47]。

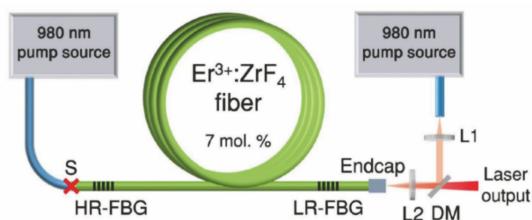


图 4 41.6 W 氟化物光纤激光器结构示意图^[22]

Fig. 4 Structural diagram of 41.6 W fluoride fiber laser^[22]

2019 年,澳大利亚麦考瑞大学 Majewski 等^[48]采用带内泵浦的方式显著降低了泵浦光的量子亏损,提高了激光器的转化效率。由 800 nm 泵浦 Dy³⁺,Tm³⁺共掺的氟化物光纤得到了 91% 的斜率效率。同年,加拿大拉瓦尔大学 Fortin 等^[49]首次在掺 Dy³⁺的氟化物光纤内实现了光纤激光器的一体化设计,将一对光纤布拉格光栅直接刻写在掺 Dy³⁺的氟化物光纤上实现了谐振腔结构。同时,采用全光纤的掺 Er³⁺光纤激光器作为泵浦源,实现了全光纤结构 3.24 μm 激光输出,输出功率为 10 W,相对 2.83 μm 泵浦光的斜率效率为 58%,10 W 输出功率也是输出波长 3 μm 以上的光纤激光器的最高输出功率。2021 年,深圳大学郭春雨等^[50]在国内首次报道了功率为 20 W 的全光纤结构 2.8 μm 激光输出。

氟铝酸盐玻璃与 ZBLAN 玻璃相比具有稳定的化学性质和热稳定性^[51],特别是氟铝酸盐玻璃具有良好的耐水性,进而在实际应用中更加适用^[52]。除此之外,氟铝酸盐玻璃的转变温度为 380 °C,高于 ZBLAN 玻璃,表明氟铝酸盐玻璃更适合被用于高功率中红外光纤激光器中^[53]。2020 年,哈尔滨工程大学 Wang 等^[54]将 19 cm 长的 Ho³⁺/Pr³⁺共掺 AlF₃光纤作为增益介质,在 1150 nm 拉曼激光器泵浦下,实现了 2.9 μm 的中红外激光输出,最大输出功率为 173 mW。虽然目前关于 AlF₃光纤激光器

的报道相对较少,但是对于这种能产生稳定 $3\text{ }\mu\text{m}$ 激光输出的光纤材料的研究是必要的。

将中红外晶体材料与光纤相结合的光纤激光器是发展中红外光纤激光器的一种新的尝试。2020年,美国宾夕法尼亚州立大学Coco等^[55]利用高压化学气相沉积法在石英模板上沉积 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$,以此光纤作为增益介质的光纤激光器具有阈值特性,且在 $4\text{ }\mu\text{m}$ 以上的波段中可检测出激光输出。虽然输出功率水平和光谱结果不尽人意,但是这为光纤激光器进一步向长波长拓展提供了思路。

目前基于氟化物光纤输出的最长连续光纤激光器的波长为 $3.92\text{ }\mu\text{m}$ 。氟化物玻璃材料的最大声子能量在 500 cm^{-1} 左右,而硫系玻璃材料的最大声子能量为 200 cm^{-1} ,理论上硫系玻璃在中红外波段可以得到更低的传输损耗。相比氟化物光纤,硫系光纤在液态水和水蒸气中具有更好的稳定性,且不容易被氧化^[56]。2021年,英国诺丁汉大学Nunes等^[57]

表1 连续波稀土离子掺杂中红外光纤激光器研究进展
Table 1 Progress of continuous wave rare-earth-doped mid-infrared fiber lasers

Fiber	Pump wavelength / nm	Output wavelength / μm	Output power / W	Laser slope efficiency / %	Year	Ref.
$\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLAN}$	640	2.83–2.95	0.0126	2.9%–4.4%	1990	[27]
$\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ (77 K)	653	3.41–3.48	0.0085	3%	1991	[28]
$\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$	655	3.48	0.0085	2.8%	1992	[29]
$\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLA}$	640	3.9	0.001	1.5%	1995	[30]
$\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLAN}$ (77 K)	890	3.9	0.011		1997	[31]
$\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLAN}$	532	3.22	0.011	2.8%	1998	[32]
$\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLAN}$	890	2.93	0.09	52%	1998	[33]
$\text{Dy}^{3+}:\text{ZBLAN}$	1100	2.9	0.275	4.5%	2003	[34]
$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}:\text{ZBLAN}$	1100	2.86	2.5	29%	2004	[24]
$\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLAN}$	1300	2.96	0.18	20%	2006	[36]
$\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLAN}$	1175	2.95	0.65	43% (optical to optical)	2006	[37]
$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}:\text{ZBLAN}$	1150	2.94	2.5	32%	2009	[35]
$\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$	975	2.8	24	14.5% (optical to optical)	2009	[38]
$\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$	976	2.824	5	32% (optical to optical)	2009	[39]
$\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$	976	2.94	5.2	26.6%	2009	[40]
$\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$	975	2.77–2.88	8–11	12.2%	2010	[58]
$\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$	976	2.824	20.6	35.4%	2011	[41]
$\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLAN}$	1150	3.002	0.77	12.4%	2011	[42]
$\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$	985, 1973	3.5	0.26	16% (optical to optical)	2014	[23]
$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}:\text{ZBLAN}$	1150	2.825–2.975	7	29%	2015	[59]
$\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$	980	2.938	30.5	16% (optical to optical)	2015	[43]

报道了基于硫系玻璃材料的中红外光纤激光器,如图5所示。基于 Ce^{3+} 掺杂的氟化物光纤在4.15 μm 量子级联激光器同带泵浦下产生了波长为5.14, 5.17, 5.28 μm 的激光输出,刷新了室温下连续光纤激光器输出波长的记录。表1直观展示了连续波稀土离子掺杂中红外光纤激光器的研究进展。

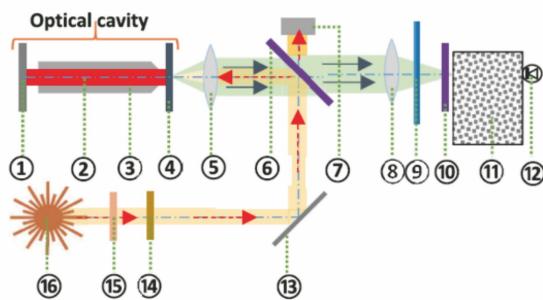


图5 基于 Ce^{3+} 掺杂硫化物中红外光纤激光器结构示意图^[57]

Fig. 5 Structural diagram of Ce^{3+} -doped chalcogenide based mid-infrared fiber laser^[57]

续表

Fiber	Pump wavelength / nm	Output wavelength / μm	Output power / W	Laser slope efficiency / %	Year	Ref.
Er ³⁺ : ZBLAN	974, 1976	3.44	1.5	19%	2016	[60]
Er ³⁺ : ZBLAN	980, 1973	3.33~3.78	1.45@3.47 μm	27%	2016	[44]
Dy ³⁺ : ZBLAN	2800	3.04	0.08	51%	2016	[61]
Er ³⁺ : ZBLAN	976, 1976	3.55	5.6	26.4% (optical to optical)	2017	[45]
Er ³⁺ : ZBLAN	970, 1973	3.52~3.68	0.62@3.68 μm	25.14%	2017	[62]
Er ³⁺ : ZBLAN	980	2.824	41.6	22.9% (optical to optical)	2018	[22]
Dy ³⁺ : ZBLAN	2830	3.15	1.06	73%	2018	[21]
Dy ³⁺ : ZBLAN	1700	2.8~3.4	0.17	21%	2018	[46]
Ho ³⁺ : InF ₃	888	3.92	0.2	10.2%	2018	[25]
Er ³⁺ : ZBLAN	976, 1976	3.42	3.4	38.6%	2019	[47]
Dy ³⁺ / Tm ³⁺ : ZBLAN	800	3.23	0.2	91%	2019	[48]
Dy ³⁺ : ZBLAN	2830	3.24	10.1	58%	2019	[49]
Er ³⁺ : ZrF ₄	655, 1981	3.46	1.72	31.5%	2021	[63]
Ho ³⁺ : AlF ₃	1120	2.868	0.056	5.1%	2018	[64]
Ho ³⁺ / Pr ³⁺ : AlF ₃	1150	2.866	0.173	10.4%	2020	[54]
Fe ²⁺ : ZnSe in silica	2940	4.12	0.0004	0.1%	2020	[55]
Ce ³⁺ : chalcogenide	4150	5.14, 5.17, 5.28			2021	[57]

2.2 基于稀土离子掺杂的脉冲中红外光纤激光器

与连续波激光不同,脉冲中红外光纤激光具有高峰值功率(脉冲能量),在一些领域有特殊的应用,如中红外非线性波长转换、医疗手术等^[65]。目前,实现脉冲激光输出的方法主要包括调 Q 和锁模。受中红外光纤和调制器件的限制,脉冲中红外光纤激光发展相对滞后,20 世纪末研究人员进行了一些研究^[66~67],但输出功率和脉冲能量都很低。近年来,随着 ZBLAN 光纤和调制器件制备工艺的成熟,中红外脉冲光纤激光器有了很大的进展。下面分别介绍调 Q 和锁模中红外脉冲光纤激光器的研究进展。

2.2.1 调 Q 中红外光纤激光器

调 Q 激光器可以产生微秒或者纳秒脉冲,在需求高脉冲能量的领域中有着的重要应用。主动调 Q 技术通常是利用电光和声光调制器调节 Q 开关时间,以形成长脉冲。1994 年,德国布伦瑞克工业大学 Frerichs 等^[66]首次实现了中红外主动调 Q 掺 Er³⁺光纤激光器,得到了 100 ns 脉宽,2.2 W 峰值功率的 2.7 μm 激光输出。1996 年,该课题组又利用 InAs 作为可饱和吸收体首次实现了中红外被动调 Q 掺 Er³⁺光纤激光器^[67]。被动调 Q 技术则是利用各种不同材料制成的可饱和吸收体被动地调节系统内的损耗,相比主动调 Q 的庞大且复杂的系统而言,被动调 Q 的系统更加简单和紧凑。近年来,掺

Er³⁺ 与 Ho³⁺ 的调 Q 光纤激光器获得了很大的进展。表 2 直观展示了掺 Er³⁺ 的中红外调 Q 脉冲光纤激光器的研究进展,其中 AOM 为声光调制器,SESAM 为半导体饱和吸收镜。

2011 年,斯洛文尼亚卢布尔雅那大学 Gorjan 等^[68]报道了脉冲泵浦的掺 Er³⁺ 光纤激光器。在 100 kHz 重复频率下,输出激光的脉宽为 300 ns,平均功率为 2 W,峰值功率为 68 W。同年,日本京都大学 Tokita 等^[69]实现了输出平均功率为 12 W 的 2.8 μm 主动调 Q 掺 Er³⁺ 光纤激光器,这也是首个 10 W 级中红外脉冲光纤激光器,峰值功率约为 0.9 kW。此后几年间,一系列利用不同材料的被动调 Q 光纤激光器相继得到了报道^[70~76]。

2017 年,中国科学院西安光学精密机械研究所 Shen 等^[77]报道了 2.8 μm 处的主动调 Q 掺 Er³⁺氟化物光纤激光器。在该工作中,首先使用金镜的反馈实现机械调 Q,在 2.78 μm 处得到了脉宽为 127.3 ns,脉冲能量为 0.13 mJ 的脉冲输出。然后,采用 Littrow 结构闪耀光栅来代替金镜,得到了波长范围为 2.71~2.82 μm 的可调谐激光输出,峰值功率达到了 1.6 kW。同年,电子科技大学 Wei 等^[78]报道了波长范围为 2762.5~2852.5 nm 的掺 Er³⁺ 调 Q 光纤激光器,该系统以 Fe²⁺ : ZnSe 晶体作为可饱和吸收体,在波长 2811.7 nm 处得到最大的

平均功率为 5.16 W, 在 2834.6 nm 处得到最大的脉冲能量为 27.7 μJ。该激光器在 76.1 nm 的波长调节范围内的输出功率可达到 4 W 以上。2018 年, 四川大学 Ning 等^[79]利用生成的 Fe²⁺:ZnSe 纳米晶体作为可饱和吸收体, 将其应用在被动调 Q 捻 Er³⁺光纤激光器系统中, 得到了输出波长为 2.78 μm, 峰

值功率为 7.3 W 的激光输出。2018 年, 深圳大学 Wu 等^[80]将宽带半导体饱和吸收镜用于被动调 Q 捻 Er³⁺氟化物光纤激光器中, 斜率效率达到 22.5%, 该斜率效率也是此前被动调 Q 捻 Er³⁺氟化物光纤激光器中效率最高的。

表 2 捻 Er³⁺调 Q 中红外脉冲光纤激光器研究进展Table 2 Progress of Er³⁺-doped Q-switched mid-infrared pulsed fiber lasers

Wavelength / μm	Modulation system	Pulse width / μs	Pulse energy / μJ	Repetition frequency / kHz	Average power / W	Peak power / W	Year	Ref.
2.8	Active: pulsed pump	0.3	20	100	2	68	2011	[68]
2.8	Active:AOM	90	100	120	12	900	2011	[69]
2.8	Passive: Fe ²⁺ :ZnSe	0.37	2	161	0.3	5	2012	[70]
2.78	Passive: graphene	2.9	1.67	37	0.062	5.8	2013	[71]
2.8	Passive: graphene	0.4	6.4	59	0.38	16	2013	[72]
2.79	Passive: graphene	2.1	24	41.2	1	11.4	2014	[73]
2.8	Passive: black phosphorus	1.18	7.7	63	0.485	6.5	2015	[74]
2.78	Passive: Fe ²⁺ :ZnSe film	0.742	7.98	102.94	0.822	11	2016	[75]
2.786	Passive: SESAM	2.29	58.87	71.73	4.2	25.7	2016	[76]
2.78	Active: gold mirror	0.127	130	10	1.3	1020	2017	[77]
2.82	Active: blazed grating	0.092	150	10	1.5	1600	2017	[77]
2.76–2.85	Passive: Fe ²⁺ :ZnSe	1.89–0.4	27.7	43.8–243.2	5.16		2017	[78]
2.78	Passive: Fe ²⁺ :ZnSe	0.52	3.81	127.46	0.486	7.3	2018	[79]
2.8	Passive: SESAM	1.3	8.19	88.6	0.73	0.63	2018	[80]
2.8	Active:AOM	0.056	46	10		821	2020	[81]
2.8	Passive: layered Ta ₂ NiS ₅	1.2	1.64	102	0.168		2021	[82]
3.46	Passive: black phosphorus	2.05	1.83	66.33	0.12	0.9	2018	[83]
3.4–3.7	Gain-switched	1.02	5.29	50	0.265		2020	[84]
3.46	Passive: SESAM	2.47	1.4	58.71	0.063		2021	[85]

由于在 3.5 μm 波段缺少合适的可饱和吸收晶体, 因此脉冲光纤激光器在 3.5 μm 波段的发展受到了限制。2018 年, 上海交通大学 Qin 等^[83]利用黑磷作为可饱和吸收体首次实现了输出波长

3.5 μm 附近的被动调 Q 捻 Er³⁺氟化物光纤激光器, 结构如图 6 所示。该系统在波长 3462 nm 处实现了平均功率为 120 mW, 脉冲能量为 1.83 μJ 的激光输出。2020 年, 电子科技大学 Yang 等^[84]

利用调节增益的方式在掺 Er^{3+} 的 ZrF_4 光纤中实现了 $3.4\sim3.7\mu\text{m}$ 的脉冲中红外输出。2021年,深圳大学Fang等^[85]研究了基于掺InAs可饱和吸

收镜的 $3.46\mu\text{m}$ 掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器,最大平均功率和单脉冲能量分别为 63mW 和 $1.4\mu\text{J}$ 。

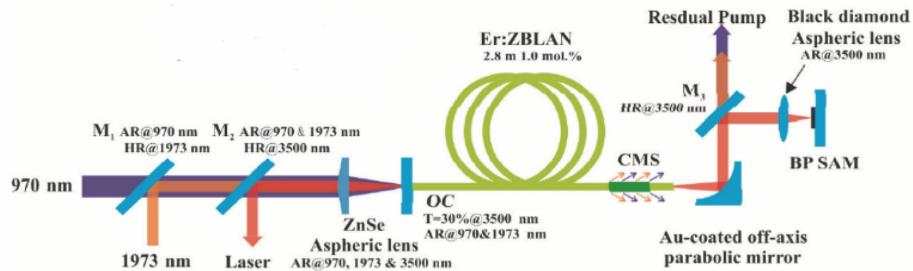


图6 黑磷调Q和锁模 Er^{3+} :ZBLAN光纤激光器结构示意图^[83]

Fig. 6 Structural diagram of black phosphorus Q-switched and mode-locked Er^{3+} :ZBLAN fiber laser^[83]

除 Er^{3+} 外, Ho^{3+} 也是产生中红外的重要离子。掺 Ho^{3+} 光纤激光器利用 Ho^{3+} 能级 $^4\text{I}_6$ 至 $^4\text{I}_7$ 的跃迁,产生波长为 $2.9\mu\text{m}$ 的激光,相比 Er^{3+} 能级 $^4\text{I}_{11/2}$ 至 $^4\text{I}_{13/2}$ 跃迁产生的 $2.8\mu\text{m}$ 激光,更接近水分子的吸收峰,进而受到了广泛的关注。

2012年,澳大利亚悉尼大学Hu等^[86]报道了输出波长在 $2.867\mu\text{m}$ 的主动调Q $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺光纤激光器。重复频率在 $40\sim300\text{kHz}$ 范围内可调,

最短的脉宽为 78ns ,峰值功率为 77W 。同年,电子科技大学Li等^[87]报道了多波长输出的调Q掺 Ho^{3+} 光纤激光器,这是第一台输出波长在 $3\mu\text{m}$ 之上的调Q光纤激光器。2013年,该团队报道了可调谐主动调Q掺 Ho^{3+} 氟化物光纤激光器,通过在Littrow结构中使用平面衍射光栅进行波长调节,调节范围为 $2.95\sim3.031\mu\text{m}$ ^[88]。表3直观展示了掺 Ho^{3+} 调Q中红外脉冲光纤激光器的研究进展。

表3 掺 Ho^{3+} 调Q中红外脉冲光纤激光器研究进展

Table 3 Progress of Ho^{3+} -doped Q-switched mid-infrared pulsed fiber lasers

Wavelength / μm	Modulation system	Pulse width / μs	Pulse energy / μJ	Repetition frequency / kHz	Average power / W	Peak power / W	Year	Ref.
2.867	Active: AOM	0.078	6.06	40~300	0.72	77	2012	[86]
3.005	Active: AOM	0.38	29	25	0.725	79	2012	[87]
3.002	Active: gain-switched	0.35	21.7	30	0.65	62	2012	[89]
2.95~3.031	Active: planar diffraction grating	0.3~0.41	15	40	0.6	43	2013	[88]
2.93	Passive: $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$	0.82	0.45	104	0.047	0.55	2013	[90]
2.93	Passive: graphene	1.18	1.1	92	0.1	0.9	2013	[90]
2.97	Passive: SESAM	1.68	6.65	47.6	0.317	3.96	2014	[91]
2.919~3.004	Passive: $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$	1.23~2.35	5.64	96.1~43.6	0.337	4.59	2015	[92]
2.979	Passive: topological insulator Bi_2Te_3	1.37	3.99	81.96	0.33	2.91	2015	[93]
2.97	Passive: black phosphorus	2.41	4.93	62.5	0.309	2.05	2016	[94]
2865.7	Passive: WS_2	0.0017	0.37	131.6	0.0484	210	2016	[95]
2865	Passive: antimonene	1.74	0.72	156.2	0.112	0.41	2018	[96]
2.92~2.96	Self Q-switched	1.54	0.0047	67.8	0.0032	0.003	2018	[97]
2.866	Passive: Carbon nanotube	1.21	0.36	178.6	63.4	0.296	2019	[98]
2.8	Passive: $\text{MXene}(\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x)$	1.04	13.93	78.12	1.09	13.4	2020	[99]
2.92	Gain-switched	0.28	0.22	10	0.054	0.2	2020	[100]

此后几年间,电子科技大学 Li 等^[91-96]用不同的材料作为可饱和吸收体报道了一系列掺 Ho^{3+} 中红外光纤激光器。2018年,厦门大学 Li 等^[97]报道了波长在 2923~2965 nm 范围内可调的自调 Q 掺 Ho^{3+} 全光纤激光器,该系统采用一对 3 μm 高反光纤端面镜作为全光纤结构腔的两端。在重复频率调节范围为 25.4~67.8 kHz 内得到脉宽为 3.03~1.44 μs 的激光脉冲。2019年,电子科技大学 Wei 等^[98]报道了利用单壁碳纳米管作为可饱和吸收体的调 Q Ho^{3+} /Pr³⁺ 共掺的光纤激光器。在波长 2865.6 nm 处获得了平均功率为 63.4 mW,脉冲能量为 0.36 μJ 的激光输出。2020 年,该课题组又报道了以 MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) 作为可饱和吸收体的瓦级被动调 Q 2.8 μm 中红外多模光纤激光器,平均功率为 1.09 W^[99]。同年,厦门大学 Zhang 等^[100]首次报道了全光纤结构的增益转换 Ho^{3+} :ZBLAN 中红外光纤激光器。

表 4 掺 Dy^{3+} 调 Q 光纤激光器研究进展
Table 4 Progress of Dy^{3+} -doped Q-switched fiber lasers

Wavelength / μm	Modulation system	Pulse width / μs	Pulse energy / μJ	Repetition frequency / kHz	Average power / W	Peak power / W	Year	Ref.
2.71~3.08	Passive: PbS nanoparticles	0.795	1.51	166.8	0.253	1.9	2019	[101]
2.800~3.095	Active: gain-switched	0.53	2.73	80	0.219	5.15	2019	[102]
2.97~3.23	Active: AOM	0.27	12	20~100	0.125	39	2019	[103]
2.812~3.031	Passive: Fe_3O_4 nanoparticles	1.25	0.9	123	0.111	0.72	2019	[104]

随着关于硫系玻璃光纤研究的增多,科学家们开始了基于硫系玻璃光纤的激光实验。2021年,俄罗斯科学院 Shiryaev 等^[105]制备了掺 Tb^{3+} 的硫系玻璃光纤,并进行了激光实验测试,在 1.98 μm 机械调制脉冲泵浦下,从光谱上观测到了 5.38 μm 的激光光谱,然而由于激光功率低于功率计的最低响应功率(10 μW),故没有观测到明显的功率输出。

2.2.2 锁模中红外光纤激光器

调 Q 激光器输出的脉冲脉宽通常在微秒和纳秒量级,故在需要高峰值功率的超短脉冲的特殊应用中,调 Q 激光器不太适用,而锁模激光器可以产生脉宽在皮秒和飞秒量级的高峰值功率超短脉冲。下面将分别介绍基于 Er^{3+} 、 Ho^{3+} 和 Dy^{3+} 的锁模光纤激光器的研究进展。

2012 年,电子科技大学 Wei 等^[106]报道了基于 Fe^{2+} :ZnSe 晶体的被动锁模掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器。在波长 2.78 μm 处实现了脉宽为 19 ps、平均功率为 51 mW 的激光输出。2014 年,加拿大拉

与 Er^{3+} 和 Ho^{3+} 相比, Dy^{3+} 具有更宽的发射带,通常可用作可调谐光源的增益离子。近年来,基于 Dy^{3+} 的脉冲光纤激光器也得到了关注。2019 年,电子科技大学 Luo 等^[101]报道了大范围调谐被动调 Q 掺 Dy^{3+} 氟化物光纤激光器,利用 PbS 纳米粒子作为可饱和吸收体,在 1.1 μm 泵浦下输出波长范围为 2.71~3.08 μm 的激光输出,最大平均功率为 252.7 mW。同年,澳大利亚麦考瑞大学 Woodward 等^[103]利用声光调制器实现了主动调 Q 掺 Dy^{3+} 氟化物光纤激光器,在重复频率为 20~100 kHz 的范围内实现了波长范围为 2.97~3.23 μm 的可调谐激光输出。2019 年,电子科技大学 Yang 等^[104]利用 Fe_3O_4 纳米颗粒作为可饱和吸收体,实现了 3 μm 附近可调谐 Dy^{3+} :ZBLAN 调 Q 光纤激光器,其波长可调谐范围为 2812.4~3031.6 nm。表 4 直观展示了掺 Dy^{3+} 调 Q 光纤激光器的研究进展。

瓦尔大学 Haboucha 等^[107]报道了以半导体饱和镜作为可饱和吸收体的被动调 Q 锁模掺 Er^{3+} 线性腔光纤激光器,其线性腔结构由可饱和吸收镜和光纤布拉格光栅组成,可提供一个受控的波长选择性反馈,其结构如图 7 所示。该系统在波长 2797 nm 处得到了平均功率为 440 mW,脉宽为 60 ps 的激光输出。

2015 年,湖南大学 Tang 等^[108]首次报道了平均功率在瓦级以上被动锁模掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器,该系统采用半导体饱和吸收镜作为可饱和吸收体,在波长 2.8 μm 处实现了平均功率为 1.05 W,脉宽为 25 ps 的激光输出。同年,加拿大拉瓦尔大学 Duval 等^[109]报道了首个 3 μm 波长附近的飞秒光纤激光器,采用了在掺 Er^{3+} 氟化物光纤中的基于非线性偏振演化的被动锁模环形腔结构,如图 8 所示。在波长 2.8 μm 处,该激光器可输出脉宽为 207 fs,峰值功率为 3.5 kW 的激光。澳大利亚悉尼大学 Hu 等^[110]也报道了相似结构的飞秒锁

模掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器, 平均功率为 206 mW, 脉宽为 497 fs。然而, 通常需采取基于非线性偏振

演化的锁模技术对谐振腔进行严格调节, 且谐振腔的最佳偏振位置会随着温度的改变而产生漂移^[65]。

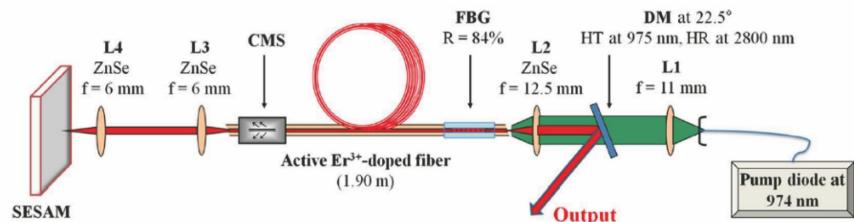


图 7 锁模掺 Er^{3+} 线性腔光纤激光器实验结构图^[107]

Fig. 7 Experimental setup of mode-locked Er^{3+} -doped linear cavity fiber laser^[107]

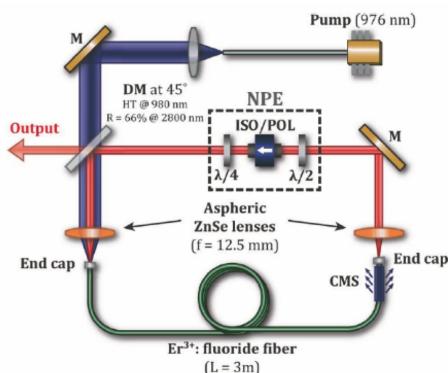


图 8 $3 \mu\text{m}$ 飞秒光纤激光器结构图^[109]

Fig. 8 Structural diagram of $3 \mu\text{m}$ femtosecond fiber laser^[109]

2016 年, 上海交通大学 Qin 等^[111] 报道了以多层黑磷作为可饱和吸收体的 $2.8 \mu\text{m}$ 被动锁模掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器。该课题组还报道了基于非线性偏振演化的锁模超短脉冲光纤激光器, 在 $2.8 \mu\text{m}$ 处的最高峰值功率为 43.3 kW, 脉宽为 215 fs^[112]。2020 年, 深圳大学 Guo 等^[113] 将 WSe₂ 转移至镀金镜上作为可饱和吸收体实现了中红外锁模光纤激光器。德国马克斯-普朗克研究所 Huang

等^[114] 报道了三级光纤激光系统, 产生了 126 fs 的超短脉冲激光, 结构如图 9 所示。然后, 将该超短脉冲激光在 ZBLAN 光纤中进一步压缩至 16 fs, 形成了 $1.8 \sim 3.8 \mu\text{m}$ 的宽谱激光。澳大利亚阿德莱德大学 Henderson-Sapir 等^[115] 在掺 Er^{3+} 锁模光纤激光器系统中利用声光可调滤光片实现了频率频移反馈脉冲输出, 输出波长在 $3400 \sim 3612 \text{ nm}$ 范围内可调谐, 其最大输出平均功率为 208 mW, 此时脉宽为 53 ps。

基于 Ho^{3+} 和 Dy^{3+} 的锁模光纤激光器的报道相对较少。2012 年, 电子科技大学 Li 等^[116] 报道了输出波长在 $2.87 \mu\text{m}$ 处的锁模 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺的氟化物光纤激光器, 可输出平均功率为 132 mW, 脉宽为 24 ps 的激光, 单脉冲能量为 4.9 nJ。2014 年, 澳大利亚悉尼大学 Hu 等^[117] 报道了被动锁模 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺氟化物光纤激光器, 采用环形腔结构实现了稳定和自启动的锁模脉冲。2015 年, 国防科技大学 Yin 等^[118] 报道了将拓扑绝缘体 Bi_2Te_3 纳米片作为可饱和吸收体的锁模 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺氟化物光纤激光器。2016 年, 澳大利亚麦考瑞大学 Antipov

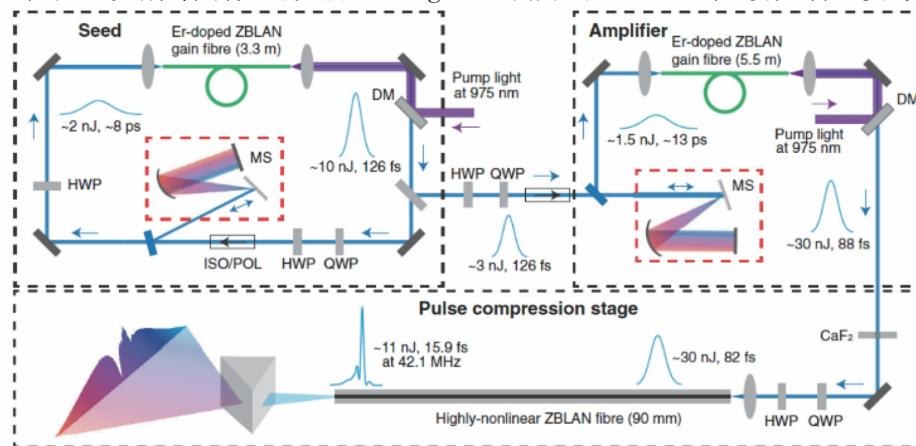


图 9 三级激光系统结构示意图^[114]

Fig. 9 Structural diagram of three-stage fiber laser system^[114]

等^[119]报道了基于掺 Ho³⁺:ZBLAN 的超快飞秒光纤激光器,其输出波长在 2876 nm 处,该波长位于水蒸气的传输窗口处,可以减少水蒸气对激光输出功率的影响。该系统在 980 nm 泵浦下,可实现脉宽为 180 fs 的脉冲输出,单脉冲能量为 7.6 nJ,最高峰值功率为 37 kW。2018 年,澳大利亚麦考瑞大学 Woodward 等^[120]报道了利用频率频移反馈的方式实现锁模掺 Dy³⁺光纤激光器,其输出波长调节范围为 2.97~3.30 μm。系统采用具有声光可调谐滤波

器的线性腔结构,输出脉冲的脉宽为 33 ps,单脉冲能量为 2.7 nJ。2019 年,意大利米兰理工大学 Wang 等^[121]报道了基于非线性偏振演化的飞秒脉冲锁模掺 Dy³⁺光纤激光器,在 2.8 μm 同带泵浦下实现了中心波长为 3.1 μm 的激光输出。该激光器在 60 MHz 重复频率下,可输出脉宽为 828 fs,单脉冲能量为 4.8 nJ 的超短脉冲,最大输出平均功率为 204 mW,峰值功率为 4.2 kW。表 5 直观展示了锁模中红外光纤激光器的研究进展。

表 5 锁模中红外光纤激光器研究进展

Table 5 Progress of mode-locked mid-infrared fiber lasers

Kind of doped ion	Wavelength / μm	Modulation system	Pulse width / ps	Pulse energy / nJ	Repetition frequency / MHz	Average power / mW	Peak power / kW	Year	Ref.
Er ³⁺	2.8	Fe ²⁺ :ZnSe	19	0.93	50	0.051	0.049	2012	[106]
	2.797	SESAM	60	8.5	51.75	0.44	0.14	2014	[107]
	2.8	SESAM	25	44.3	22.56	1.05	1.86	2015	[108]
	2.8	Nonlinear polarization evolution	0.207	0.8	55.2	0.044	3.5	2015	[109]
	2.8	Nonlinear polarization evolution	0.497	3.62	56.7	0.206	6.4	2015	[110]
	2.8	Black phosphorus	42	25.5	24	0.613	0.608	2016	[111]
	2.784	Graphene	42	0.7	25.4	0.018	0.017	2016	[122]
	3.489	Black phosphorus	34600	1.3	28.91	0.04		2018	[83]
	2.8	Nonlinear polarization evolution	0.215	9.3	75.5		43.3	2019	[112]
	2.8	WSe ₂	21	8.4	42.43	360	0.4	2020	[113]
Ho ³⁺	2.8	Nonlinear polarization evolution	0.131	3	107	317	27	2020	[123]
	2.8	Nonlinear polarization evolution	0.126 to 0.016	10	42.1		80	2020	[114]
	3.400~3.612	Acousto-optic tunable filter	53	1.38	36.23	0.208	0.026	2019	[115]
	2.87	GaAs	24	4.9	27.1	132	0.2	2012	[116]
	2.86	InAs	6	2.79	24.8	69	0.465	2014	[117]
Dy ³⁺	2.83	Bi ₂ Te ₃	6	8.6	10.4	90	1.43	2015	[118]
	2.876	Nonlinear polarization evolution	0.18	7.6	43.1	327	37	2016	[119]
	2.97~3.30	Frequency shifted feedback	33	2.7	89	120	0.082	2018	[120]
	3.1	Nonlinear polarization evolution	0.828	4.8	60	204	4.2	2019	[121]

2.3 小结

掺杂稀土离子的光纤激光器作为输出中红外激光的重要手段之一,近年来在输出功率、效率等方面有重大突破:最高输出功率已经达到 41.6 W,3 μm 以上的最高功率也有 10 W,千瓦级脉冲和超短脉冲

的中红外光纤激光器均被报道;在波长输出方面,基于氟化物光纤的输出波长在 3.9 μm,基于硫化物光纤的输出波长也已突破 5.0 μm。然而,不可否认掺稀土离子的中红外光纤激光器仍有很多技术难题需要解决:1)中红外光纤的制备工艺问题。氟化物光

纤是目前使用最多的中红外软玻璃光纤,但其稳定性较差,端面易潮解,虽然通过熔接端帽的形式将输出功率提高到了 41.6 W,但是在输出功率进一步提高方面存在困难。硫化物光纤虽然具有更好的稳定性,但是目前在硫化物光纤中实现高浓度的稀土离子掺杂极其困难,通过重掺杂 Er^{3+} 实现能量上转换的技术方案难以实施,只能通过其他技术方案抑制自终止效应;2)实现中红外输出的掺杂离子有限。目前在中红外波段所使用的稀土离子主要还是 Er^{3+} 、 Ho^{3+} 和 Dy^{3+} ,但这几种离子的输出波长本身有限,而目前已在 5 μm 以上实现激光输出的 Ce^{3+} 和 Tb^{3+} 的技术方案还不成熟,功率水平相对较低;3)基于中红外软玻璃光纤的关键器件发展尚不成熟,如保护软玻璃光纤端面的光纤端帽、中红外光纤光栅和脉冲激光器中最关键的器件——中红外可饱和吸收体等。相信随着以上问题的解决,掺杂稀土离子的光纤激光器会得到进一步发展。

3 基于非线性效应的中红外光纤激光技术

非线性效应是实现波长由近红外向远红外转换的一种有效途径。光纤光源通常具有较长的作用距离,因此在光纤中实现非线性效应较为容易。其中,受激拉曼散射是最容易实现由近红外波段向中红外(尤其是 4 μm 以上)拓展的有效手段。基于孤子自频移效应的光纤激光器是实现中红外超短脉冲的一种有效途径。

3.1 基于拉曼效应的中红外光纤激光器

拉曼效应最早由 1928 年印度物理学家拉曼在实验中发现,并以其名字命名,原理如图 10 所示。当入射光作用于分子时,分子吸收入射光子的能量 $h\nu_p$,首先从振动(转动)基态跃迁至虚能级,再迅速跃迁至能量为 $h\nu_R$ 的振动(转动)激发态能级,并释放出能量为 $h\nu_s$ 的光子,其频率满足关系 $\nu_s = \nu_p - \nu_R$,其中 ν_R 为分子振动(转动)能级改变所对应的声

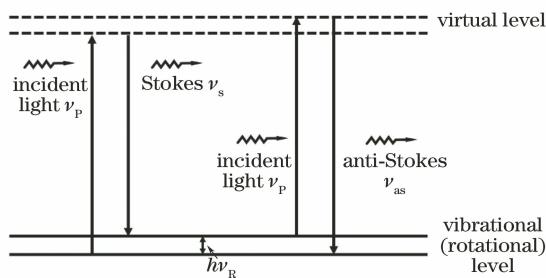


图 10 拉曼效应原理示意图

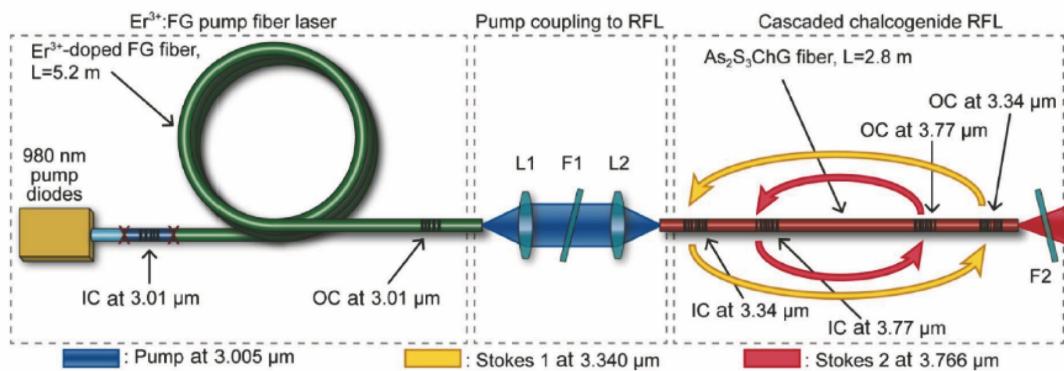
Fig. 10 Schematic diagram of Raman effect

子频率, ν_p 为入射光频率, ν_s 为斯托克斯光频率, h 为普朗克常数, 此时发生的过程为斯托克斯拉曼散射, 进而称散射光为斯托克斯光。当入射光作用于已处于振动(转动)激发态的分子时, 会使得分子跃迁至虚能级后又回到基态, 同时释放出一个频率为 $\nu_{as} = \nu_p + \nu_R$ 的散射光子, 该过程被称为反斯托克斯拉曼散射, 此时的散射光被称为反斯托克斯光, 其中 ν_{as} 为反斯托克斯光频率。在低损耗光纤中, 在合适的泵浦波长下达到一定的泵浦功率, 即可实现受激拉曼散射, 故光纤拉曼激光器是填补稀土离子发射带空白的一种重要手段^[124]。

1972 年, 第一台可见光波段连续拉曼激光器得到了报道^[125], 此后拉曼激光器在可见光和近红外波段得到了快速发展。拉曼光纤激光器在中红外波段产生高功率激光具有优势, 在中红外波段的光纤拉曼激光器中通常选用的是氟化物光纤和硫系玻璃光纤。基于氟化物光纤的拉曼激光器在 2011 年和 2012 年先后由加拿大拉瓦尔大学 Fortin 团队报道^[126-127], 已在波长 2.23 μm 处获得了 3.7 W 的功率输出。氟化物光纤的拉曼增益系数相对较小, 且拉曼增益系数与波长成反比, 进而限制了其在长波中红外中的应用^[128]。然而, 硫系玻璃光纤的拉曼增益系数比氟化物光纤大一个数量级以上, 进而在中红外拉曼激光器中得到了应用广泛。

2006 年, 澳大利亚悉尼大学 Jackson 和 Anzueto-Sánchez^[124] 报道了基于 As_2Se_3 光纤的拉曼激光器, 其输出波长在 2.1 μm 附近。2013 年, Bernier 等^[129] 首次报道了输出波长在 3 μm 以上的拉曼光纤激光器。用输出波长在 3.005 μm 的准连续掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器作为泵浦源, 泵浦 3 m 长的 As_2S_3 单模光纤, 得到了 3.34 μm 的激光输出。使用一对光纤布拉格光栅组成一个高精度法布里-珀罗(F-P)腔, 让掺 Er^{3+} 光纤激光器的中心波长位于 3.005 μm 处, 远离 Er^{3+} 的 2.8 μm 发射峰。该系统的最大输出功率为 0.6 W, 激光效率为 39%。

2014 年, 加拿大拉瓦尔大学 Bernier 等^[130] 报道了级联结构的拉曼光纤激光器, 该激光器可实现输出波长为 3.766 μm 的中红外激光输出, 该系统结构如图 11 所示。将输出波长在 3.005 μm 处的准连续掺 Er^{3+} 氟化物光纤激光器作为泵浦源, 泵浦刻写在 2.8 m 长 As_2S_3 光纤上的两对光纤布拉格光栅组成的嵌套型 F-P 腔, 得到了一阶斯托克斯光(3.340 μm)和级联斯托克斯光(3.766 μm)。该激光器的最大输出功率为 112 mW, 激光效率为 8.3%。

图 11 3.77 μm As_2S_3 级联拉曼光纤激光器实验结构图^[130]Fig. 11 Experimental setup of As_2S_3 -based 3.77 μm cascaded Raman fiber laser^[130]

硫系玻璃光纤的损伤阈值较低,限制了其输出功率水平,且通常需要脉冲泵浦结构来降低热效应^[131]。此外,硫系玻璃的拉曼增益带宽较窄,拉曼频移系数(约 350 cm^{-1})较小^[132]。因此,要想实现波长更长的拉曼激光器二阶拉曼输出远远不够,可能需要四阶以上的拉曼激光输出,但这会大大增加拉曼激光器结构的复杂性,且系统效率会大大降低^[131]。碲酸盐光纤相比硫系玻璃光纤具有更好的热稳定性、较强的耐腐蚀性、更宽的增益带宽(约 300 cm^{-1})和更大的拉曼频移系数(约 750 cm^{-1})^[133-134]。2003 年和 2008 年相继报道了近红外波段的碲酸盐光纤拉曼激光器^[135-136],但一直没有关于碲酸盐光纤拉曼激光器在 $3 \mu\text{m}$ 以上波段的报道。

2015 年,美国亚利桑那大学 Zhu 等^[131]用数值仿真的方法实现了基于碲酸盐光纤的 10 W 级 3~

5 μm 的拉曼激光器,既证明了在 2.8 μm 光源泵浦下利用碲酸盐光纤产生的一阶和二阶拉曼激光可以实现 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 波段的激光输出,又证明了碲酸盐光纤拉曼激光器在中红外波段输出的可能性,为今后的实验打下了基础。2017 年,合肥工业大学 Ni 等^[137]用数值仿真的方法实现了基于碲酸盐光纤的三阶级联拉曼光纤激光器,实现了 $2\sim 5 \mu\text{m}$ 波段的激光输出。在 100 W 泵浦功率下实现了最大平均功率为 45.2 W 的 3.64 μm 激光输出,最大光光转化效率为 45.2%。

目前还没有更长波长和更高激光功率的拉曼激光器得到报道,主要是受限于硫属化物光纤和碲酸盐光纤的制备工艺水平。随着光纤工艺水平的提高,相信拉曼激光器会得到进一步的发展。表 6 直观展示了中红外拉曼光纤激光器的研究进展。

表 6 中红外拉曼光纤激光器研究进展

Table 6 Progress of mid-infrared Raman fiber lasers

Fiber	Pump wavelength / μm	Output wavelength / μm	Output power / W	Conversion efficiency / %	Year	Ref.
As_2S_3	3.005	3.34	0.6	39	2013	[129]
As_2S_3	3.005	3.340 and 3.766	0.112	8.3	2014	[130]
Tellurite fiber	2.8	3~5	10	35(2nd)	2015	[131]
Tellurite fiber	2	2~5	45.2@3.64 μm	45.2	2017	[137]

3.2 基于孤子效应的中红外光纤激光器

孤子自频移(SSFS)效应涉及拉曼频移过程,脉冲中的高频成分拉曼频移至低频会使得脉冲在沿光纤传播的过程中转移至更长的波长^[138],进而可以提供高质量的飞秒脉冲和较宽的调谐范围。2016 年,美国康奈尔大学 Tang 等^[139]报道了基于氟化物光纤的孤子自频移连续波长可调谐中红外光纤激光器,其波长调谐范围为 $2.0\sim 4.3 \mu\text{m}$,输出脉宽为 100 fs,峰值功率为 50 kW。同年,加拿大拉瓦尔大

学 Duval 等^[140]基于 2.8 μm 的超快光纤振荡器连接一个光纤放大器的结构,利用掺 Er^{3+} 氟化物光纤实现了波长 $2.8\sim 3.6 \mu\text{m}$ 可调谐的 Raman 孤子,在波长 3.4 μm 处孤子的脉宽约为 160 μs ,单脉冲能量为 37 nJ,平均功率大于 2 W,峰值功率大于 200 kW。

3.3 小结

利用拉曼效应实现波长转换可以有效填补目前光纤激光器输出波长的空白,同时可以进一步拓宽

输出波长。然而,光纤拉曼激光器对光纤长度和光纤材料有着较高的要求,受到光纤制备工艺的限制,目前可选择的光纤材料种类有限。基于氟化物光纤的拉曼激光器主要受限于长波处的拉曼增益,进而很难实现 $3 \mu\text{m}$ 以上的激光输出。硫系玻璃光纤虽然具有较高的拉曼增益,但是其拉曼频移系数较小,需要通过多级级联的方式实现更长波长的激光输出,这会对泵浦源和级间耦合提出较高的要求。碲酸盐光纤具有较高的拉曼增益和较大的频移系数,是光纤拉曼激光器较好的选择,且在理论上已经证明其具有产生高功率长波长中红外光纤激光的能力。此外,由于拉曼效应过程中会产生一些实验中并不需要拉曼线,因此结构设计中通常使用光纤光栅进行波长滤除,而多级级联结构意味着需要在光纤中刻写几对不同波长的光纤光栅,也对中红外光纤刻写技术提出了较高的要求。相信随着光纤技术的进步,中红外光纤拉曼激光器会得到快速发展。

4 中红外超连续谱光纤激光技术

与传统单一波长的激光光源相比,超连续谱光源具有输出光谱范围宽、空间相干性大的优点,在基础科学研究、光学检测和光纤通信等方面得到了广泛的应用^[141]。中红外超连续谱光源是利用介质的非线性效应和色散效应共同对激光光谱进行展宽,进而实现宽谱中红外激光输出。目前产生高功率中红外超连续谱的技术方案主要有:1)利用高峰值功率的脉冲泵浦源泵浦非掺杂的软玻璃光纤;2)利用脉冲激光器泵浦掺杂稀土离子的软玻璃光纤。下面主要介绍中红外光纤超连续谱光源的代表性报道。

4.1 基于非掺杂软玻璃光纤的中红外超连续谱光源

利用高峰值功率的脉冲泵浦源泵浦非掺杂软玻璃光纤是目前产生中红外超连续谱的主要方案,通过高峰值功率的激光直接激发软玻璃光纤的非线性效应。目前大多采用 $2 \mu\text{m}$ 的光纤泵浦源,更有利于与软玻璃光纤进行耦合。

2006 年首次报道了基于非掺杂氟化物光纤的超连续谱光源^[142]。至今为止,基于非掺杂氟化物光纤的中红外超连续谱光源得到了快速发展,输出功率在不断提高。2009 年,美国密歇根大学 Xia 等^[143]在 ZBLAN 光纤中首次实现了输出平均功率大于 10 W 的中红外超连续谱光源。2019 年,国防科技大学 Yang 等^[144]首次报道了平均功率为 30 W 的全光纤结构超连续谱输出,光谱范围为 $1.90 \sim 3.35 \mu\text{m}$,这是目前为止报道的 ZBLAN 光纤中输

出超连续谱激光的最高平均功率。2020 年,该课题组又首次实现了波长超过 $4 \mu\text{m}$,平均功率在 20 W 以上的 ZBLAN 超连续谱光源^[145]。

除 ZBLAN 光纤外,氟碲酸盐玻璃光纤也在中红外光纤超连续谱光源中得到了应用。2020 年,吉林大学 Li 等^[146]报道了利用基于 $\text{TeO}_2\text{-BaF}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ 和 TeO_2 掺杂的氟碲酸盐光纤,在 39.7 W 的 $1.9 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 超连续光纤激光泵浦下得到了 22.7 W 的超连续激光输出,波长范围为 $0.93 \sim 3.95 \mu\text{m}$, 10 dB 光谱范围为 $1.89 \sim 3.52 \mu\text{m}$ 。

ZBLAN 与氟碲酸盐光纤在 $4.2 \mu\text{m}$ 波长以上损耗较大,因而在这两种光纤中输出的超连续谱的波长很难超过 $4.5 \mu\text{m}$ 。 InF_3 光纤与 ZBLAN 光纤具有相似的特性且在 $4 \sim 5 \mu\text{m}$ 波长范围内的传输损耗更低,进而可以将基于非掺杂氟化物光纤的波长拓展至 $5 \mu\text{m}$ 。

2016 年,加拿大拉瓦尔大学 Gauthier 等^[147]利用 $\text{Er}^{3+}\text{:ZBLAN}$ 光纤输出的 $2.6 \sim 3.1 \mu\text{m}$ 的超连续谱光源泵浦一段 InF_3 光纤,实现了波长范围为 $2.4 \sim 5.4 \mu\text{m}$,平均功率为 8 mW 的超连续谱输出。2020 年,国防科技大学 Yang 等^[148]利用不同的泵浦结构也实现了波长 $3.8 \mu\text{m}$ 以上,平均功率为 2.18 W 的超连续谱输出。

单种光纤材料存在一定的波长限制,在软玻璃光纤后级联其他种类的软玻璃光纤可以进一步拓宽超连续谱的输出波长。2021 年,丹麦科技大学 Woyessa 等^[149]利用 ZBLAN、 As_2S_3 光纤和 As_2Se_3 光纤三级级联的结构,在无掺铥光纤放大器的情况下得到了波长范围为 $1.5 \sim 10.5 \mu\text{m}$ 的超连续谱输出,平均功率达到了 86.6 mW 。宁波大学 Yan 等^[150]利用 ZBLAN 与 As_2S_3 光纤级联得到了全光纤结构 $2.0 \sim 6.5 \mu\text{m}$ 的超连续谱,平均功率为 1.13 W 。波兰军事科技大学 Swiderski 等^[151]报道了基于 InF_3 和 As_2S_3 级联的超连续谱输出,结构如图 12 所示。在 $1.9 \sim 2.7 \mu\text{m}$ 的宽带泵浦下,仅用 InF_3 光纤得到了 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 的激光输出,与 As_2S_3 光纤级联后,输出波长可拓宽至 $5.58 \mu\text{m}$ 。

对于更长波长的中红外超连续谱输出,通常需要高峰值功率脉冲泵浦,通常为脉宽为飞秒级的光学参量放大器(OPA)。目前很多研究均已报道了基于阶跃折射率硫化物光纤的波长 $10 \mu\text{m}$ 以上的超连续谱激光输出^[152-155],但是此种超连续谱的光源平均功率相对较低,只有 1 mW 左右。2017 年,加拿大麦吉尔大学 Hudson 等^[156]利用 $2.9 \mu\text{m}$ 的飞

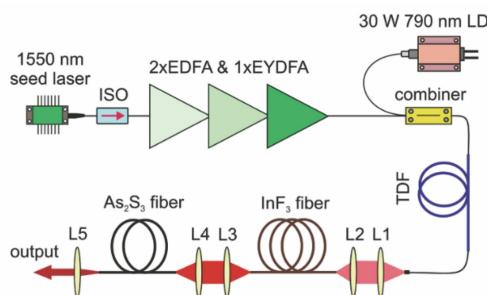


图 12 InF_3 和 As_2S_3 光纤级联的超连续谱
激光器结构示意图^[151]

Fig. 12 Structural diagram for InF_3 and As_2S_3
fiber cascaded supercontinuum laser^[151]

秒光纤激光器泵浦基于 As_2S_3 的锥形光纤, 实现了波长范围为 $2\sim 12\ \mu\text{m}$ 的中红外超连续谱, 平均功率在 30 mW 以上。表 7 直观展示了基于非掺杂光纤的中红外超连续谱光源的研究进展。

4.2 基于掺杂软玻璃光纤的中红外超连续谱光源

产生中红外超连续谱的另一种方案是利用脉冲激光器泵浦掺杂软玻璃光纤, 该方案将功率提升与非线性转化的过程均集中于掺杂软玻璃光纤中, 使得光源结构更加紧凑, 转化效率更高。目前大多采用波长为 $3\ \mu\text{m}$ 的脉冲光源进行泵浦。

2015 年, 加拿大拉瓦尔大学 Gauthier 等^[168] 将波长为 $2.75\ \mu\text{m}$, 脉宽为 400 ps, 重复频率为 2 kHz, 平均功率为 2 mW 的激光脉冲在掺 Er^{3+} ZBLAN 光纤中进行前向放大, 得到了波长范围为 $2.6\sim 4.1\ \mu\text{m}$ 的超连续谱输出, 平均功率为 154 mW。2020 年, 国防科技大学 Deng 等^[169] 在全光纤化掺 Er^{3+} 的 ZBLAN 光纤放大器中实现了 4.96 W 高功率超连续谱, 波长范围覆盖 $2.7\sim 4.2\ \mu\text{m}$, 其结构如图 13 所示。表 8 直观展示了基于掺杂离子的软玻璃光纤中红外超连续谱光源的研究进展。

表 7 基于非掺杂光纤的中红外超连续谱光源研究进展

Table 7 Progress of mid-infrared supercontinuum laser source based on non-doped fiber

Fiber material	Pump wavelength / μm	Output wavelength / μm	Average power / W	Conversion efficiency %	Year	Ref.
ZBLAN	1.55	0.8~4.0	10.5	50	2009	[143]
	1.96	1.9~4.3	13	20	2014	[157]
	1.96	1.9~3.8	21.8	17	2014	[158]
	1.95	1.9~4.1	10.7		2016	[159]
	2.0~2.7	1.90~4.25	15.2	50.5	2017	[160]
	1.9~2.6	1.90~3.35	30	69	2019	[144]
	1.9~2.6	1.92~4.29	20.6	54.3	2020	[145]
Fluorotellurite	1.98	0.95~3.93	10.4	65	2018	[161]
	1.98	1.0~3.8	19.6	60	2019	[162]
	1.93~2.50	0.93~3.95	22.7	57.2	2020	[146]
	2.6~3.1	2.4~5.4	0.008		2016	[147]
InF_3	2.02	1.90~5.25			2016	[163]
	1.95	0.75~5.10	1.76		2018	[164]
	1.96	1.90~4.65	3	60	2019	[165]
	2	2.0~4.7	7		2020	[166]
	1.96	0.8~4.7	11.3	66.5	2019	[167]
	1.9~2.6	1.9~4.9	11.8	64.4	2020	[148]
	1.56	1.5~10.5	0.086		2021	[149]
ZBLAN, As_2S_3 , As_2Se_3	1.55	2.0~6.5	1.13		2021	[150]
InF_3 , As_2S_3	1.9~2.7	2.00~5.58	0.067	19.1	2021	[151]

表 8 基于掺杂离子的 ZBLAN 光纤中红外超连续谱光源研究进展

Table 8 Progress of mid-infrared supercontinuum laser source based on ion-doped ZBLAN fiber

Pump wavelength / μm	Output wavelength / μm	Average power / W	Slope efficiency	Year	Ref.
2.75	2.6~4.1	0.15	4.5% (conversion efficiency)	2015	[168]
2.8	2.7~4.2	0.49	28.7%	2018	[170]
2.2~3.1	2.70~4.25	1.75	20.5%	2018	[171]
3.0~4.2	3~8	0.002		2016	[172]
2.4~3.2	2.8~3.9	0.41	7.1%	2018	[173]
2.0~3.5	2.7~4.2	4.96	17.2%	2020	[169]

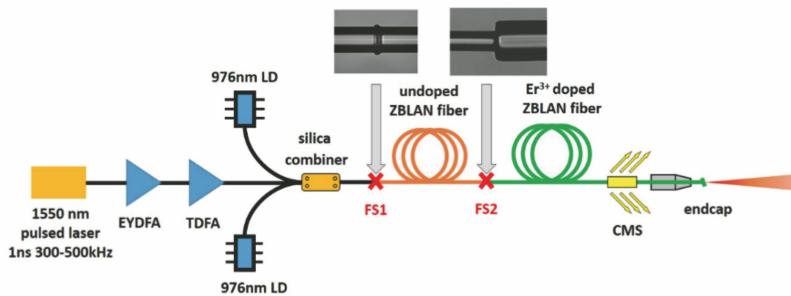


图 13 全光纤化掺 Er^{3+} ZBLAN 光纤放大器中产生中红外超连续谱结构示意图^[169]

Fig. 13 Structural diagram of mid-infrared supercontinuum generation in all-fiber Er^{3+} -doped ZBLAN fiber amplifier^[169]

4.3 小结

基于非掺杂软玻璃光纤的方案作为目前产生中红外超连续谱的主要方式,发展相对较为成熟,目前已实现了 20 W 以上的功率输出。然而,由于泵浦波长在 $2 \mu\text{m}$,故在波长转化时 $3 \mu\text{m}$ 以上的光谱成分通常占比较低。基于掺杂软玻璃光纤的方案由于采用 $3 \mu\text{m}$ 的光源进行泵浦,故输出的超连续谱在 $3 \mu\text{m}$ 以上的光谱成分占比更高,但 $3 \mu\text{m}$ 脉冲光纤激光器技术还不成熟,实现难度更大,输出功率水平较前种方案还有提升空间。两种方式在输出功率进一步提升方面有着共同的限制因素——高功率泵浦源缺乏和软玻璃光纤端面易损伤。此外,波长拓展方面主要受限于使用的软玻璃光纤材料的传输窗口。

5 基于充气空芯光纤的中红外激光技术

目前光纤气体激光器主要基于两种方式:1) 拉曼效应;2) 气体分子的能级吸收跃迁。2002 年,英国巴斯大学 Benabid 等^[174]首次报道了空芯光子晶体光纤中氢气振动受激拉曼散射实验。通过氢气一阶振动拉曼散射,532 nm 的泵浦光实现了向 683 nm 一阶斯托克斯光和 435.2 nm 反斯托克斯光的有效转换,光光转换效率为 $(30 \pm 3)\%$,受激拉曼散射阈值泵浦能量低于 $1 \mu\text{J}$ 。这一实验开启了光纤气体激光器研究的新纪元。然而,受限于空芯光纤传输损耗,直至 2011 年在中红外波段有较低传输损耗的反共振空芯光纤才被拉制成功^[175],这才有了第一篇关于中红外空芯光纤气体激光器的报道^[176]。此后,随着反共振空芯光纤制备工艺的进步,中红外光纤气体激光器得到了快速发展。

5.1 基于拉曼效应的中红外光纤气体激光器

3.1 节中介绍了光纤拉曼激光器,其主要原理是基于实芯光纤材料本身的拉曼效应实现波长转化。基于拉曼效应的空芯光纤气体激光器原理与光

纤拉曼激光器类似,不同的是其是通过填充在空芯光纤内气体的拉曼效应来实现波长转化的。气体的振动拉曼频移系数通常远大于光纤材料的拉曼频移系数,通过更少的级联结构甚至一级的方式就可以实现由近红外波段向中红外波段的波长转化。同时,由于反共振空芯光纤可以通过特殊的传输带设计来抑制其余拉曼线的产生,故可以不需要借助光纤光栅来进行波长滤除。然而,由于目前光纤气体拉曼激光器的结构通常为单程,且受限于光纤损耗,故光纤长度通常较短,进而使得拉曼效应阈值较高(通常在千瓦量级),这对脉冲泵浦源提出了较高的要求。此外,泵浦波长与输出波长跨度相对较大,需要同时在近红外与中红外波段中具有较低的传输损耗,这对空芯光纤的制备提出了较高的要求。直至 2017 年才出现了中红外波段输出的基于拉曼效应的光纤气体激光器。

2017 年,俄罗斯科学院 Gladyshev 等^[177]首次报道了波长超过 $4 \mu\text{m}$ 的拉曼激光器。用波长 $1.56 \mu\text{m}$ 的掺 Er^{3+} 光纤激光器泵浦一段 15 m 长,压强为 3039.75 kPa 的反共振空芯光纤,产生了 $4.4 \mu\text{m}$ 的斯托克斯激光输出,最高峰值功率为 0.6 kW ,量子转化效率为 15% 。2018 年,北京工业大学 Cao 等^[178]利用充有 CH_4 气体的反共振空芯光纤,实现了泵浦光的二阶拉曼转化,输出了波长为 1544 nm 的一阶振动斯托克斯光和波长为 2812 nm 的二阶振动斯托克斯光。二阶斯托克斯光的平均功率为 113 mW ,量子转化效率达到 40% 。

2018 年,Li 等^[179]基于空芯光纤的级联系统,利用两段不同型号充有 CH_4 气体的反共振空芯光纤实现了波长从 $1 \mu\text{m}$ 至 $2.8 \mu\text{m}$ 的 Raman 转化,总量子效率约为 65% 。第一级空芯光纤的长度为 2 m,充有 200 kPa 的 CH_4 气体。第二级空芯光纤的长度为 2.2 m,充有 1100 kPa 的 CH_4 气体。将第一级产生的 1540 nm 激光作为泵浦光,转化为波

长为 $2.8 \mu\text{m}$ 的斯托克斯光, 最大输出平均功率为 13.8 mW 。同年, 俄罗斯科学院 Gladyshev 等^[180]也报道了基于反共振空芯光纤的 H_2 和 D_2 混充的受激拉曼散射实验, 得到了 $2.9, 3.3, 3.5 \mu\text{m}$ 的中红外斯托克斯光输出, 总转化效率约为 10%。2019 年, 俄罗斯科学院 Astapovich 等^[181]对脉冲泵浦进行了改进, 使得的泵浦光的平均功率达到了 10.7 W , 得到了输出功率为 1.4 W 的 $4.42 \mu\text{m}$ 一阶斯托克斯激光输出。Huang 等^[182]也报道了利用 1064 nm 激光器泵浦的 D_2 级联 Raman 激光器, 实

验中利用两段不同型号的充有 D_2 的空芯光纤实现由 1064 nm 至 2865 nm 的波长转化, 最终输出功率为 8.5 mW 的激光。2020 年, 丹麦科技大学 Wang 等^[183]报道了基于充 H_2 的反共振空芯光纤的光纤气体激光器, 在 11.6 kW 峰值功率, 6.9 ns 脉宽的 1532.8 nm 光纤光源泵浦下得到了波长为 $4.22 \mu\text{m}$, 脉冲能量为 $17.6 \mu\text{J}$ 的激光输出, 其输出波长对应 CO_2 在相应波段的吸收峰, 可被用于气体监测等应用中。表 9 直观展示了基于本征吸收跃迁的中红外光纤气体激光器的研究进展。

表 9 基于本征吸收跃迁的中红外光纤气体激光器研究进展

Table 9 Progress of mid-infrared fiber gas laser based on intrinsic absorption transition

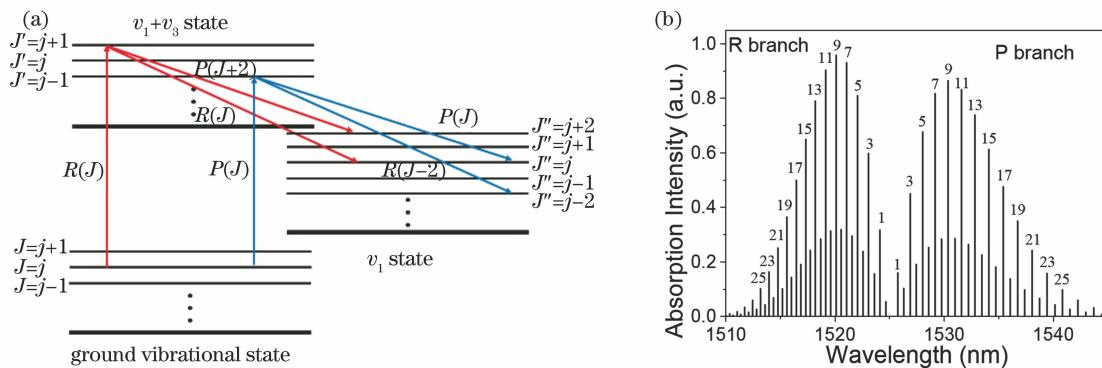
Gase	Pump wavelength / μm	Output Wavelength / μm	Output power	Quantum efficiency / %	Year	Ref.
H_2	1.56	4.4	0.6 kW (peak)	15%	2017	[177]
CH_4	1.064	2.8	9.5 MW (peak)	40%	2018	[178]
CH_4 -cascade	1.064	2.8	51.2 mW (average)	65%	2018	[179]
H_2, D_2	1.56	2.9, 3.3, 3.5	0.25 kW (peak)	10% (total)	2018	[180]
H_2	1.56	4.42	1.4 W (average)	53%	2019	[181]
D_2 -cascade	1.56	2.86	8.5 mW (average)	42% (2nd)	2019	[182]
H_2	1.53	4.22	131 mW (average)	74%	2020	[183]

5.2 基于本征吸收跃迁的中红外光纤气体激光器

基于气体分子能级吸收跃迁的空芯光纤气体激光器的原理与气体激光器基本相同。乙炔气体由 $1.5 \mu\text{m}$ 激光泵浦产生 $3.1 \mu\text{m}$ 波段激光的能级跃迁示意图如图 14(a) 所示, 其中 J 为基态转动量子数, J' 为激光上能级转动量子数, J'' 为激光下能级转动量子数, j 为泵浦光转动量子数。乙炔分子具有 5 种简正振动模式 $v_1 \sim v_5$, 每种振动能级下又有分立的转动能级。乙炔分子在 $1.5 \mu\text{m}$ 泵浦光的作用下由基态能级跃迁至振动模式 $v_1 + v_3$ 的激光上能级, 此时立刻发生粒子数反转跃迁至振动模式为

v_1 的激光下能级。转动能级跃迁遵循选择定则 $\Delta J = \pm 1, \Delta J = +1$ 对应 R 支, $\Delta J = -1$ 对应 P 支, 即 $R(J)$ 泵浦的情况下, 可以产生 $R(J)$ 和 $P(J+2)$ 两个波长的激光。图 14(b) 为由 Hitran 数据库^[184]计算得到的乙炔气体分子在 $1.5 \mu\text{m}$ 波段的吸收谱线, 数字代表相应的转动量子数 J 。 P 支对应较长的吸收波长, R 支对应较短的吸收波长, 各吸收线相对独立。由于核自旋与乙炔本身的线性对称性, 故乙炔基数吸收线的吸收强度大于偶数吸收线。

与传统气体激光器不同的是, 此结构用空芯光纤代替了气体腔结构。由于纤芯区域的减小, 故作

图 14 基于乙炔本征吸收跃迁的光纤气体激光器原理。(a)能级跃迁示意图;(b)吸收光谱^[184]Fig. 14 Principle of fiber gas laser based on intrinsic absorption transition of acetylene. (a) Schematic diagram of energy level transition; (b) absorption spectrum^[184]

用强度大大增加,通常单程结构就可以实现激光输出。因此,系统的实现更加容易,且仅仅几百帕的气压就可以实现出光,虽然这对泵浦线宽提出了较高的要求,但是可得到较窄的激光线宽(兆赫兹量级)。随着反共振空芯光纤的出现,空芯光纤在中红外波段的传输损耗在大幅度降低,2011 年首次报道了这种类型的空芯光纤气体激光器^[176]。

2011 年,美国堪萨斯州立大学 Jones 等^[176]报道了基于空芯光纤的乙炔光纤气体激光器。如图 15 所示,实验中利用中心波长为 $1.52 \mu\text{m}$,脉宽为 10 ns 的脉冲泵浦源泵浦,得到了波长为 $3.12 \mu\text{m}$ 和 $3.16 \mu\text{m}$ 的中红外激光,受限于空芯光纤在辐射波长处的传输损耗,系统的斜率效率不足 1%。25% 的斜率效率和几毫焦的激光功率是这台激光器的理论极限。

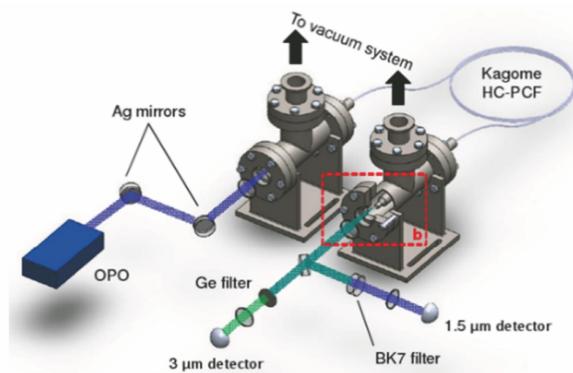


图 15 基于空芯光纤的乙炔光纤气体激光器实验结构图^[176]

Fig. 15 Experimental setup of acetylene-filled fiber gas laser based on hollow-core fiber^[176]

2012 年,美国堪萨斯州立大学的 Jones 等^[185]通过在空芯光纤内充 C_2H_2 和 HCN 的粒子数反转实验证明了空芯光纤气体激光器实现的可能性。实验表明,在空芯光纤内,激光与气体强烈相互作用所产生的高增益使这种光纤气体激光器不需要谐振腔,单程结构就能实现激光输出。同时,通过优化空芯光纤在中红外的传输损耗,在充 C_2H_2 和 HCN 的情况下得到了 20% 效率的 $3 \mu\text{m}$ 波段激光输出。同年,该课题组发表了综述性文章,详细介绍了空芯光纤气体激光器的特点和发展潜力^[20]。2014 年,本课题组与英国巴斯大学合作,利用一个放大调制的窄线宽可调谐 $1.5 \mu\text{m}$ 半导体激光器泵浦 10.5 m 长的低损耗反共振空芯光纤,当乙炔气压为 70 kPa 时,得到最大的光光转化率为 20%,需要的最小泵浦能量小于 50 nJ ,与之前用光学参量放大器作为泵浦源的实验相比,功率与效率都有所提高^[186]。

2016 年,英国巴斯大学 Hassan 等^[187]首次报道了基于空芯光纤的环形腔乙炔光纤气体激光器。该实验中用到了两种空芯光纤,将无节点型空芯光纤作为增益光纤,将冰淇淋型空芯光纤作为反馈光纤,反馈光纤可将输出的部分激光重新耦合进输入端,系统结构如图 16 所示。该系统可以同时实现连续和脉冲激光输出,最高斜率效率为 8.8%。2017 年,Xu 等^[188]首次报道了瓦级连续乙炔空芯光纤气体激光器。实验中使用了低损耗(在 $1.53 \mu\text{m}$ 处损耗小于 0.05 dB/m ,在 $3.12 \mu\text{m}$ 处传输损耗小于 0.10 dB/m)的传输光纤,气压为 600 kPa ,当光纤长度为 15 m 时,可得到 1.12 W 的输出功率和 33% 的斜率效率。2018 年,Zhou 等^[189]在可调谐掺铒光纤放大器的泵浦下,分别在脉冲和连续条件下实现了调谐范围为 $3.09 \sim 3.21 \text{ nm}$ 的激光输出。在脉冲泵浦下,该激光器的最大平均功率为 0.3 W (脉冲能量为 $0.6 \mu\text{J}$),斜率效率为 16%。在连续泵浦下,该激光器的最大输出功率为 0.77 W ,斜率效率为 13%。2019 年,美国新墨西哥大学 Aghbolagh 等^[190]报道了 $4.6 \mu\text{m}$ 脉冲输出的空芯光纤气体激光器,该实验中利用波长为 $1.517 \mu\text{m}$,脉宽为 8 ns 的脉冲泵浦光源泵浦一段长约 45 cm 充有 $1.066576 \times 10^4 \text{ Pa}$ 气压的 N_2O 的空芯光纤,实现了 $4.6 \mu\text{m}$ 脉冲激光输出,斜率效率为 3%。同年,本课题组利用自制的 $2 \mu\text{m}$ 可调谐窄线宽激光光源泵浦 5 m 长且充有 500 Pa 气压的二氧化碳气体的反共振空芯光纤,实现了波长为 $4.3 \mu\text{m}$ 的光纤激光输出,输出功率达到 82 mW ,如图 17 所示。该波长也是室温下连续光纤气体激光输出的最长波长^[191]。2020 年,周智越等^[192]利用小范围可调谐 $2 \mu\text{m}$ 窄线宽激光光源泵浦 4.4 m 长且充有 620 Pa 气压的 HBr 气体的反共振空芯光纤,获得了最大功率为 125 mW 的连续光纤激光输出,输出波长为

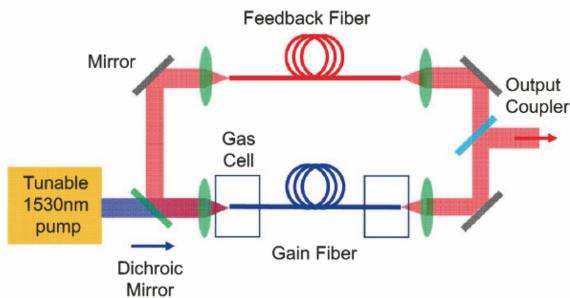


图 16 环形腔结构乙炔光纤气体激光器实验结构图^[187]

Fig. 16 Experimental setup of ring cavity-based acetylene-filled fiber gas laser^[187]

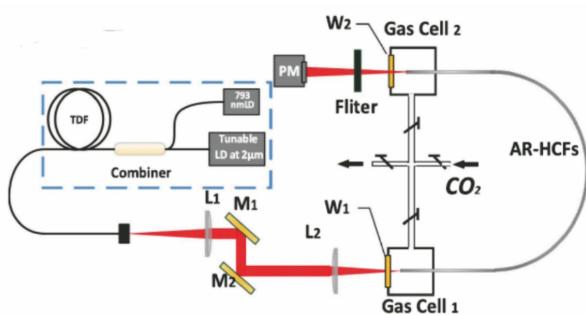
图 17 4.3 μm 二氧化碳光纤气体激光器示意图^[191]

Fig. 17 Schematic diagram of carbon dioxide-filled fiber gas laser at wavelength of 4.3 μm ^[191]

4.17 μm 。HBr 在 2 μm 附近具有大范围的吸收带, 具有实现大范围可调谐中红外光纤激光光源的潜力。表 10 直观展示了基于本征吸收跃迁的中红外光纤气体激光器的研究进展。

5.3 小结

虽然中红外光纤气体激光器起步较晚, 但是随着中红外波段低损耗空芯光纤的发展, 光纤气体激光器目前已取得了不错的成果, 输出波长最长可达

4.6 μm , 最大输出功率达到 1 W 以上, 4 μm 以上的输出功率也突破了百毫瓦量级。然而, 中红外光纤气体激光器仍有很多难题需要解决。首先, 合适的泵浦源很难获得。两种类型的光纤气体激光器均对泵浦源提出了很高的要求: 基于拉曼的光纤气体激光器需求高峰值功率的泵浦源; 基于气体分子本征吸收的光纤气体激光器需要高功率窄线宽(百兆赫兹量级)的激光光源。较为常用的光学参量振荡器(OPO)或者 OPA 光源虽然能满足实验需求, 但是会使系统变得更加复杂。其次, 系统的结构需要进一步优化。目前中红外波段所使用的几乎都为空间结构, 一方面增加了系统的复杂程度, 另一方面稳定性不足, 全光纤化是中红外光纤气体激光器的必然趋势。最后, 中红外空芯光纤的损耗还需要进一步优化。目前中红外波段的光纤气体激光器的泵浦波长与输出波长相差较大, 空芯光纤难以满足泵浦光与输出光同时实现较低损耗的需求, 且目前在中红外波段激光的损耗仍然较高, 存在可以进一步优化的空间。

表 10 基于本征吸收跃迁的中红外光纤气体激光器进展

Table 10 Progress of mid-infrared fiber gas laser based on intrinsic absorption transition

Gase	Pump wavelength / μm	Output wavelength / μm	Pulse energy / nJ	Average power / mW	Slope efficiency	Year	Ref.
C ₂ H ₂	1.52	3.12, 3.16	6		<1%	2011	[176]
C ₂ H ₂	1.53	3.12, 3.16	760		30%	2014	[186]
C ₂ H ₂	1.53	3.12, 3.16		1120	33%	2017	[188]
C ₂ H ₂	1.530–1.535	3.09–3.21	600	770	16% (pulsed) 13% (continuous wave)	2018	[189]
N ₂ O	1.517	4.6	76		3%	2019	[190]
CO ₂	2	4.30, 4.39		82	19.3%	2019	[191]
HBr	1.97	3.98, 4.17		125	10%	2020	[192]

6 总结与展望

6.1 基于软玻璃光纤的中红外激光光源

基于软玻璃光纤的中红外激光光源作为产生中红外光纤激光的传统手段, 在近年来得到了快速发展。在输出功率水平和波长拓展方面均得到了有效提高。目前, 基于掺杂离子的连续波中红外光纤激光器, 在 2.8 μm 处最大输出功率超过了 40 W^[22], 在 3 μm 以上也具有 10 W 以上的激光功率输出^[49]。中红外脉冲光纤激光器在超短脉冲和长脉冲方面都在快速发展。近年来, 基于硫化物光纤产生了脉冲和连续的 5 μm 中红外激光^[57, 105], 虽然受限于各种因素并未观测到明显的输出功率, 但是为光纤激光向更长波长的发展提供了新的技术途径。

基于光纤结构的拉曼激光器和超连续谱激光器是利用非线性效应输出中红外激光的重要手段。其中, 拉曼激光器作为填补掺杂离子光纤激光器输出波长空白的重要手段, 基于氟化物光纤的拉曼激光器的输出波长已经达到了 3.77 μm ^[130]。超连续谱光源在中红外波段也有了很大的进展, 基于非掺杂软玻璃光纤的超连续谱光源已经达到了几十瓦的输出功率水平^[144], 虽然基于掺杂稀土离子软玻璃光纤的超连续谱光源起步较晚, 但是其输出功率也达到了瓦级水平^[169]。目前基于软玻璃光纤的中红外激光技术还需解决系列关键技术问题, 主要包括:

- 提升软玻璃光纤的制备工艺。光纤制备工艺最成熟的当属石英玻璃光纤, 但受限于最大声子能量, 进而在中红外波段只能使用最大声子能量更

低的软玻璃光纤。随着近几年光纤技术的发展,基于氟化物玻璃的光纤已相对成熟,但在功率水平不断提升和波长拓展需求的推动下,氟化物光纤渐渐不能满足中红外光纤激光器的需求。受材料自身损伤阈值的限制和其易潮解特性的影响,基于氟化物光纤的中红外激光器很难在更高功率水平下稳定工作。在波长需求方面,目前基于氟化物掺杂的连续波光纤输出不过 $3.92 \mu\text{m}$,超过 $5 \mu\text{m}$ 以上的光纤激光器目前均使用的是硫化物光纤。对于光纤拉曼激光器,氟化物光纤的拉曼增益系数过小,不适用于向更长波长方向拓展。基于氟化物光纤的超连续谱光源的波长难以超过 $5.5 \mu\text{m}$ 。硫化物光纤不论是稳定性方面还是传输窗口方面相较氟化物光纤都更具优势,但在硫化物光纤中很难实现高浓度的稀土离子掺杂。也可以尝试其他类型的光纤材料,如碲酸盐玻璃等。基于软玻璃光纤的中红外光纤激光器首先需要解决的就是光纤的问题。一方面,解决氟化物光纤制备工艺问题,降低制作成本,提高损伤阈值和稳定性。另一方面,解决硫化物光纤和碲酸盐光纤等的制备问题,使其具备更低的光纤损耗和更高的掺杂浓度等;

2) 软玻璃光纤无源器件的制备与熔接技术。光纤无源器件是实现高效紧凑中红外光纤激光器的关键技术,是光纤激光器发挥其便携、稳定特点的重要组成部分,基于软玻璃光纤的光纤器件与技术是中红外光纤激光器向高功率、全光纤化发展的重点,主要包括高质量的软玻璃光纤熔接技术、基于软玻璃光纤的光纤端帽和基于软玻璃光纤的光纤布拉格光栅。基于软玻璃光纤的光纤熔接技术是实现全光纤化的关键技术之一,有利于提高系统的便携性和稳定性。此外,熔接可以在不同的光纤材料之间进行,例如基于石英光纤与 ZBLAN 光纤的熔接已经有了较多的报道^[193-195],且可以获得较低的熔接损耗(0.2 dB 左右)。基于石英光纤与硫化物光纤的熔接也有相应的报道^[196],但不如 ZBLAN 光纤那样普遍。随着中红外光纤激光器对光纤材料的需求的不断增加,基于不同软玻璃光纤的低损耗熔接技术需要进一步发展。在中红外光纤激光器向高功率发展的过程中,光纤端面的损伤问题和氟化物光纤端面材料易受潮解的特性会限制功率的进一步提升,目前通过将掺杂氟化物光纤与 AlF_3 ^[41] 或 CaF_2 ^[197] 材料端帽熔接的技术,已经将输出功率水平提升至 40 W 。基于软玻璃光纤的端帽一方面要适应不同的光纤材料,另一方面要尽量降低损耗并提高光纤

的损伤阈值。功率的进一步提升需要完善和优化软玻璃光纤端帽的熔接技术。基于软玻璃光纤的光纤布拉格光栅的作用相当于光纤内的反射镜,在特定的波长和脉宽下,光纤布拉格光栅也可以作为超窄带滤波器和反射镜,或者宽带的反射镜。在过去的 20 年中,基于软玻璃光纤的光纤布拉格光栅取得了一些进展,包括对材料改性以增加中红外软玻璃材料的光敏性、开发新的光子刻写技术(通过高强度的超短脉冲激光实现永久的折射率调制)。目前已在软玻璃光纤上刻写了腔内高反光栅和输出耦合器^[198-201]。基于软玻璃光纤光栅的一体化中红外光纤激光器也有相关报道^[22,45,49]。中红外光纤布拉格光栅作为中红外全光纤激光器的关键器件,一方面要提高刻写技术和刻写质量,另一方面要适应不同光纤材料的需求;

3) 发展新的掺杂稀土离子。对于稀土离子掺杂的中红外光纤激光器,稀土离子的选择也至关重要,目前常用的中红外稀土离子有 Er^{3+} , Ho^{3+} 和 Dy^{3+} 等,而目前这些离子中输出波长最长的 Ho^{3+} 也只有 $3.92 \mu\text{m}$ 。目前超过 $5 \mu\text{m}$ 的稀土掺杂离子是 Ce^{3+} ,然而其对泵浦波长的要求相对较高(泵浦波长在 $4 \mu\text{m}$ 以上),故进一步探索合适的稀土掺杂离子也是中红外光纤激光器进一步发展的重点。其他可供参考的稀土离子主要有 Tb^{3+} 等,但由于自终止效应的存在,故合适的泵浦方式仍需要进一步探索。

6.2 基于空芯光纤的中红外光纤气体激光器

光纤气体激光器相比传统中红外光纤激光器在中红外波段输出具有明显的优势。首先,空芯光纤使用的光纤材料为全石英材料,且纤芯为空芯结构,相比软玻璃光纤具有更高的损伤阈值。空芯光纤的传输带位置和传输损耗由自身的结构决定,目前空芯光纤在中红外波段具有相对较低的传输损耗。空芯光纤可以通过不同气体的填充选择不同的输出波长,气体选择较为灵活,输出波长较为丰富。自 2011 年中红外反共振空芯光纤拉制成功开始,至今 10 年期间已经得到了较快发展。无论是基于拉曼效应还是基于气体分子本征吸收跃迁的光纤气体激光器,均在中红外波段达到了瓦级功率水平,输出波长也在 $4 \mu\text{m}$ 以上。未来中红外光纤气体激光技术发展的主要方向:

1) 进一步优化系统结构。目前报道的中红外光纤气体激光器大多使用基于气体腔结构的空间耦合方式,此种方式的好处是利用气体腔可以更加方便地实现系统的抽真空和充气等操作,但此种方式

仍然存在很多问题:气体腔体积相对较大,增加了系统结构的复杂性;基于空间耦合的方式并不是一种保持激光器长期稳定运行的耦合方式;在高功率注入的过程中用于密封气体腔的橡胶塞会产生受热形变,导致耦合效率发生变化,进而难以注入更高功率的泵浦光。新的高效稳定的耦合方式是必然的发展趋势。近来,科学家在实芯光纤与空芯光纤的耦合方面进行了较多的尝试,主要包括实芯光纤与空芯光纤的直接熔接^[202-204]、拉锥实芯光纤与空芯光纤的对接耦合^[205-207],以及空芯光纤端帽^[208]。基于直接熔接技术和空芯光纤端帽目前都可以实现高效率的实芯光纤与空芯光纤耦合,但由于空芯光纤特殊的纤芯结构,故不论是和实芯光纤还是端帽进行熔接的过程中都会出现菲涅耳反射,这对泵浦源的抗回光能力提出了较高的要求。基于拉锥实芯光纤的方式可以有效地降低菲涅耳反射,但由于存在模场失配的问题,故难以得到较高的耦合效率,且拉锥后纤芯会进一步缩小,故并不适用于高功率泵浦的情况。通过系统结构的优化实现全光纤中红外光纤气体激光器是未来的重要发展方向之一。在实现全光纤结构的基础上,可以通过刻写光纤光栅实现具有振荡器结构的光纤气体激光器,进一步缩短光纤长度,提高系统效率和便携性;

2) 选择合适的泵浦源。基于拉曼效应的光纤气体激光器和基于气体分子本征吸收跃迁的光纤气体激光器,对泵浦源都有着较高的要求。基于拉曼效应的光纤气体激光器由于拉曼效应本身具有较高的阈值,故通常需要具有较高峰值功率的泵浦源,而连续的拉曼阈值甚至需要千瓦以上的泵浦功率。因此,目前报道的光纤气体拉曼激光器通常都是脉冲泵浦。OPO 等作为泵浦虽然是较好的选择,但其结构较为复杂,不利于系统的便携性,进而高峰值功率的脉冲泵浦源也较难实现。目前泵浦源多采用的是脉冲调制后再放大的方式,峰值功率也仅仅只满足阈值的水平。基于气体分子吸收跃迁的光纤气体激光器对泵浦的波长和线宽提出了较高的要求,其波长必须与气体分子吸收所在的波长相一致,且泵浦线宽通常要求较窄(在兆赫兹量级)。同时,对波长的稳定性要求较高,皮米量级的波长漂移也会导致功率快速下降。该激光器的优点是阈值相对较低,通常几十毫瓦的泵浦功率就可以实现出光,因此目前报道的拉曼光纤气体激光器也仅仅达到连续功率为 1 W 的水平^[188]。目前本课题组所用泵浦源采用的是半导体窄线宽可调谐种子光源加激光放大器的

方式,既可以满足波长的可调谐性和稳定性,又可以保证激光放大后输出激光的线宽仍然较窄,满足气体吸收的要求。为满足光纤气体激光器的需求,高峰值功率或特定波长可调谐的窄线宽光纤激光光源的研制至关重要。

3) 提升空芯光纤的制备工艺。空芯光纤的损耗决定了实验中使用光纤的长度,从目前的实验情况来看,较长的光纤长度通常具有较好的出光特性,前提是使用损耗较低的空芯光纤。目前产生中红外波长的激光输出通常采用的是在近红外波段进行泵浦的方式,泵浦光与输出光的波长通常相差 1~2 μm,如此宽的传输带对空芯光纤的设计提出了较高的要求。此外,虽然空芯光纤主要通过纤芯的空气孔结构导光,但是仍然存在一定的材料吸收损耗,这会导致空芯光纤在中红外波段的传输损耗较高。通过其他的玻璃材料拉制空芯光纤是一种很好的解决方法^[209]。其他结构的空芯光纤也可以进一步降低光纤损耗,如连体型空芯光纤^[210]和嵌套型空芯光纤^[211-212]已经将空芯光纤与实芯光纤的光纤损耗的差距进一步缩小。相信在不远的将来会有低损耗的中红外空芯光纤出现。

4) 进一步拓展激光输出波长。为满足中红外激光输出波长的需求,光纤气体激光器的输出波长进一步向长波中红外拓展是光纤气体激光器的重要发展方向之一。基于拉曼效应的光纤气体激光器目前最长的输出波长是 4.4 μm,该波长是由 H₂ 在 1.5 μm 波段的一阶振动拉曼产生的。根据气体拉曼的频移系数,目前较常使用的气体主要为 H₂ 和 CH₄,在光纤光源较为成熟的 1 μm 和 1.5 μm 波段,通过一阶振动拉曼产生的波长也只在 4.4 μm 左右^[177,181],想进一步提高波长,可以通过多级级联的方式来实现。然而,级联的方式对每一级的效率都提出了较高的要求,故不仅需要高效的耦合方式,还需要具有更低损耗的空芯光纤。基于气体分子本征的光纤气体激光器目前使用的主要气体有 C₂H₂、CO₂、HBr 和 N₂O 等,其中 C₂H₂ 的波长在 3.1 μm 附近,CO₂ 的波长在 4.3 μm 附近,HBr 具备 3.8~4.3 μm 大范围可调谐的能力,N₂O 的波长在 4.6 μm 附近。若想进一步拓展输出波长,则需要合理地选择气体。在更长波长处,可以选择 CO、HI 和 CO₂ 等气体作为增益气体^[20],但这种方式需要考虑到相应的泵浦波长,如 CO 在 4.6 μm 的发射需要 2.33 μm 的激光作为泵浦源,而这对光纤激光器来说是较难实现的。

6.3 结束语

中红外光纤激光器作为最有希望实现便携、稳定和高效的高功率中红外激光产生手段,近年来在输出功率提升、激光波长拓展和系统便携性等方面都取得了重要的进展。相比其他的中红外激光产生方式,其优势在不断凸显。随着民用和军事领域对中红外光纤光源需要的增加,更高效率、更高功率、更长波长和更加便携必然是其发展的主要方向。基于空芯光纤的中红外光纤气体激光器作为一种新型的中红外激光产生手段,与传统的中红外光纤激光技术形成了很好的竞争与互补。相信在未来几年内,中红外光纤光源会得到飞速发展,在实际中得到更广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Seddon A B, Tang Z Q, Furniss D, et al. Progress in rare-earth-doped mid-infrared fiber lasers [J]. Optics Express, 2010, 18(25): 26704-26719.
- [3] 郭启霞. 激光在生物医学中的应用研究[J]. 光电子技术与信息, 1999(4): 31-34.
Guo Q X. The Application Study of laser in biomedicine [J]. Optoelectronic Technology & Information, 1999(4): 31-34.
- [4] Lippert E, Nicolas S, Arisholm G, et al. Midinfrared laser source with high power and beam quality[J]. Applied Optics, 2006, 45(16): 3839-3845.
- [5] Kieleck C, Eichhorn M, Hirth A, et al. High-efficiency 20–50 kHz mid-infrared orientation-patterned GaAs optical parametric oscillator pumped by a 2 μm holmium laser[J]. Optics Letters, 2009, 34(3): 262-264.
- [6] 姚宝权, 王月珠, 王骥. 中红外光参量振荡器发展状况分析[J]. 激光技术, 2002, 26(3): 217-220.
Yao B Q, Wang Y Z, Wang Q. Development of mid infrared optical parametric oscillator [J]. Laser Technology, 2002, 26(3): 217-220.
- [7] Chang T, Wood O. An optically pumped CO₂ laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1972, 8(6): 598.
- [8] 张利明, 周寿桓, 赵鸿, 等. Fe²⁺掺杂中红外固体激光器技术综述[J]. 激光与红外, 2012, 42(4): 360-364.
Zhang L M, Zhou S H, Zhao H, et al. Introduction of Fe²⁺ doped mid-infrared solid state laser [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(4): 360-364.
- [9] Vurgaftman I, Meyer J R. Analysis of limitations to wallplug efficiency and output power for quantum cascade lasers [J]. Journal of Applied Physics, 2006, 99(12): 123108.
- [10] Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser [J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 423-431.
- [11] Jackson S D, King T A. CW operation of a 1.064-μm pumped Tm-Ho-doped silica fiber laser [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(9): 1578-1587.
- [12] Davey S T, France P W. Rare earth doped fluorozirconate glasses for fibre devices [J]. British Telecom Technology Journal, 1989, 7(1): 58-68.
- [13] Kumta P N, Risbud S H. Rare-earth chalcogenides: an emerging class of optical materials [J]. Journal of Materials Science, 1994, 29(5): 1135-1158.
- [14] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, et al. Single-mode photonic band gap guidance of light in air [J]. Science, 1999, 285(5433): 1537-1539.
- [15] Couey F, Benabid F, Light P S. Large-pitch kagome-structured hollow-core photonic crystal fiber [J]. Optics Letters, 2006, 31(24): 3574-3576.
- [16] Belardi W, Knight J C. Hollow antiresonant fibers with low bending loss [J]. Optics Express, 2014, 22(8): 10091-10096.
- [17] Yu F, Wadsworth W J, Knight J C. Low loss silica hollow core fibers for 3–4 μm spectral region [J]. Optics Express, 2012, 20(10): 11153-11158.
- [18] Litchinitser N M, Abeeluck A K, Headley C, et al. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides [J]. Optics Letters, 2002, 27(18): 1592-1594.
- [19] Duguay M A, Kokubun Y, Koch T L, et al. Antiresonant reflecting optical waveguides in SiO₂-Si multilayer structures [J]. Applied Physics Letters, 1986, 49(1): 13-15.
- [20] Nampoothiri A V V, Jones A M, Fourcade-Dutin C, et al. Hollow-core optical fiber gas lasers (HOFGLAS): a review [invited] [J]. Optical Materials Express, 2012, 2(7): 948-961.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Henderson-Sapir O, Munch J, Ottaway D J. Mid-

- infrared fiber lasers at and beyond $3.5 \mu\text{m}$ using dual-wavelength pumping [J]. Optics Letters, 2014, 39(3): 493-496.
- [24] Jackson S D. Single-transverse-mode 2.5-W holmium-doped fluoride fiber laser operating at $2.86 \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2004, 29 (4): 334-336.
- [25] Maes F, Fortin V, Poulain S, et al. Room-temperature fiber laser at $3.92 \mu\text{m}$ [J]. Optica, 2018, 5(7): 761-764.
- [26] Jackson S D, Jain R K. Fiber-based sources of coherent MIR radiation: key advances and future prospects (invited) [J]. Optics Express, 2020, 28 (21): 30964-31019.
- [27] Wetenkamp L. Efficient CW operation of a $2.9 \mu\text{m}$ Ho³⁺-doped fluorozirconate fibre laser pumped at 640 nm [J]. Electronics Letters, 1990, 26 (13): 883-884.
- [28] Többen H. CW lasing at $3.45 \mu\text{m}$ in erbium-doped fluorozirconate fibres [J]. Frequenz, 1991, 45 (9/10): 250-252.
- [29] Többen H. Room temperature CW fibre laser at $3.5 \mu\text{m}$ in Er³⁺-doped ZBLAN glass [J]. Electronics Letters, 1992, 28(14): 1361-1362.
- [30] Schneider J. Fluoride fibre laser operating at $3.9 \mu\text{m}$ [J]. Electronics Letters, 1995, 31 (15): 1250-1251.
- [31] Schneider J, Carbonnier C, Unrau U B. Characterization of a Ho³⁺-doped fluoride fiber laser with a 3.9-mum emission wavelength [J]. Applied Optics, 1997, 36(33): 8595-8600.
- [32] Carbonnier C, Többen H, Unrau U B. Room temperature CW fibre laser at $3.22 \mu\text{m}$ [J]. Electronics Letters, 1998, 34(9): 893-894.
- [33] Sumiyoshi T, Sekita H. Dual-wavelength continuous-wave cascade oscillation at 3 and $2 \mu\text{m}$ with a holmium-doped fluoride-glass fiber laser [J]. Optics Letters, 1998, 23(23): 1837-1839.
- [34] Jackson S D. Continuous wave $2.9 \mu\text{m}$ dysprosium-doped fluoride fiber laser [J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(7): 1316-1318.
- [35] Jackson S D. High-power and highly efficient diode-cladding-pumped holmium-doped fluoride fiber laser operating at $2.94 \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2009, 34 (15): 2327-2329.
- [36] Tsang Y H, El-Taher A E, King T A, et al. Efficient $2.96 \mu\text{m}$ dysprosium-doped fluoride fibre laser pumped with a Nd: YAG laser operating at $1.3 \mu\text{m}$ [J]. Optics Express, 2006, 14 (2): 678-685.
- [37] Talavera D V, Mejia E B. Holmium-doped fluoride fiber laser at 2950 nm pumped at 1175 nm [J]. Laser Physics, 2006, 16(3): 436-440.
- [38] Tokita S, Murakami M, Shimizu S, et al. Liquid-cooled 24 W mid-infrared Er: ZBLAN fiber laser [J]. Optics Letters, 2009, 34(20): 3062-3064.
- [39] Bernier M, Faucher D, Caron N, et al. Highly stable and efficient erbium-doped $2.8 \mu\text{m}$ all fiber laser [J]. Optics Express, 2009, 17 (19): 16941-16946.
- [40] Faucher D, Bernier M, Caron N, et al. Erbium-doped all-fiber laser at $2.94 \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2009, 34(21): 3313-3315.
- [41] Faucher D, Bernier M, Androz G, et al. 20 W passively cooled single-mode all-fiber laser at $2.8 \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2011, 36 (7): 1104-1106.
- [42] Li J F, Hudson D D, Jackson S D. High-power diode-pumped fiber laser operating at $3 \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2011, 36(18): 3642-3644.
- [43] Fortin V, Bernier M, Bah S T, et al. 30 W fluoride glass all-fiber laser at $2.94 \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2015, 40(12): 2882-2885.
- [44] 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.
- [45] Maes F, Fortin V, Bernier M, et al. 5. 6 W monolithic fiber laser at $3.55 \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2017, 42(11): 2054-2057.
- [46] Majewski M R, Woodward R I, Jackson S D. Dysprosium-doped ZBLAN fiber laser tunable from $2.8 \mu\text{m}$ to $3.4 \mu\text{m}$, pumped at $1.7 \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2018, 43(5): 971-974.
- [47] Maes F, Stihler C, Pleau L P, et al. $3.42 \mu\text{m}$ lasing in heavily-erbium-doped fluoride fibers [J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2170-2183.
- [48] Majewski M R, Amin M Z, Berthelot T, et al. Directly diode-pumped mid-infrared dysprosium fiber laser [J]. Optics Letters, 2019, 44(22): 5549-5552.
- [49] Fortin V, Jobin F, Larose M, et al. 10-W-level monolithic dysprosium-doped fiber laser at $3.24 \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2019, 44(3): 491-494.
- [50] 郭春雨, 董繁龙, 沈鹏生, 等. 20 W 中红外 $2.8 \mu\text{m}$ 全光纤激光器研究 [J]. 中国激光, 2021, 48(14): 1416001.
- Guo C Y, Dong F L, Shen P S, et al. 20 W mid infrared $2.8 \mu\text{m}$ research on the all fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(14): 1416001.
- [51] Iqbal T, Shahriari M R, Foy P, et al. Preliminary study of fiber drawing of AlF₃-based glasses [J].

- Materials Science and Engineering, 1992, 12(3): 299-303.
- [52] Huang F, Ma Y, Li W, et al. 2.7 μm emission of high thermally and chemically durable glasses based on AlF₃ [J]. Scientific Reports, 2014, 4: 3607.
- [53] Lebullenger R, Benjaballah S, le Deit C, et al. Systematic substitutions in ZBLA and ZBLAN glasses [J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1993, 161: 217-221.
- [54] Wang S B, Zhang J Q, Xu N N, et al. 2.9 μm lasing from a Ho³⁺/Pr³⁺ co-doped AlF₃-based glass fiber pumped by a 1150 nm laser [J]. Optics Letters, 2020, 45(5): 1216-1219.
- [55] Coco M G, Aro S C, McDaniel S A, et al. Continuous wave Fe²⁺:ZnSe mid-IR optical fiber lasers [J]. Optics Express, 2020, 28(20): 30263-30274.
- [56] Lucas P, Wilhelm A A, Videau M, et al. Chemical stability of chalcogenide infrared glass fibers [J]. Corrosion Science, 2008, 50(7): 2047-2052.
- [57] Nunes J J, Sojka A, Crane R W, et al. Room temperature mid-infrared fiber lasing beyond 5 μm in chalcogenide glass small-core step index fiber [J]. Optics Letters, 2021, 46(15): 3504-3507.
- [58] Tokita S, Hirokane M, Murakami M, et al. Stable 10 W Er:ZBLAN fiber laser operating at 2.71-2.88 μm [J]. Optics Letters, 2010, 35(23): 3943-3945.
- [59] Crawford S, Hudson D D, Jackson S D. High-power broadly tunable 3- μm fiber laser for the measurement of optical fiber loss [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(3): 1502309.
- [60] Fortin V, Maes F, Bernier M, et al. Watt-level erbium-doped all-fiber laser at 3.44 μm [J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 559-562.
- [61] Majewski M R, Jackson S D. Highly efficient mid-infrared dysprosium fiber laser [J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2173-2176.
- [62] Qin Z P, Xie G Q, Ma J G, et al. Mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser reaching 3.68 μm wavelength [J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15 (11): 111402.
- [63] Wang C C, Luo H Y, Yang J, et al. Watt-level ~3.5 μm Er³⁺-doped ZrF₄ fiber laser using dual-wavelength pumping at 655 and 1981 nm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(15): 784-787.
- [64] 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.
- [65] Zhu X S, Zhu G W, Wei C, et al. Pulsed fluoride fiber lasers at 3 μm [Invited] [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(3): A15-A28.
- [66] Frerichs C, Tauermann T. Q-switched operation of laser diode pumped erbium-doped fluorozirconate fibre laser operating at 2.7 μm [J]. Electronics Letters, 1994, 30(9): 706-707.
- [67] Frerichs C, Unrau U B. Passive Q-switching and mode-locking of erbium-doped fluoride fiber lasers at 2.7 μm [J]. Optical Fiber Technology, 1996, 2(4): 358-366.
- [68] Gorjan M, Petkovsek R, Marinček M, et al. High-power pulsed diode-pumped Er:ZBLAN fiber laser [J]. Optics Letters, 2011, 36(10): 1923-1925.
- [69] Tokita S, Murakami M, Shimizu S, et al. 12 W Q-switched Er:ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. Optics Letters, 2011, 36(15): 2812-2814.
- [70] Wei C, Zhu X S, Norwood R A, et al. Passively Q-switched 2.8- μm nanosecond fiber laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(19): 1741-1744.
- [71] Wei C, Zhu X S, Wang F, et al. Graphene Q-switched 2.78 μm Er³⁺-doped fluoride fiber laser [J]. Optics Letters, 2013, 38(17): 3233-3236.
- [72] Tokita S, Murakami M, Shimizu S, et al. Graphene Q-switching of a 3 μm Er:ZBLAN fiber laser [C] // Advanced Solid-State Lasers Congress, October 27-November 1, 2013, Paris, France. Washington, D.C.: OSA, 2013: AF2A.9.
- [73] Zhu G W, Zhu X S, Norwood R A, et al. Experimental and numerical investigations on Q-switched laser-seeded fiber MOPA at 2.8 μm [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(23): 4553-4557.
- [74] Qin Z P, Xie G Q, Zhang H, et al. Black phosphorus as saturable absorber for the Q-switched Er:ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. Optics Express, 2015, 23(19): 24713-24718.
- [75] Zhang T, Feng G Y, Zhang H, et al. 2.78 μm passively Q-switched Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser based on PLD-Fe²⁺:ZnSe film [J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(7): 075102.
- [76] Luo H Y, Li J F, Xie J T, et al. High average power and energy microsecond pulse generation from an erbium-doped fluoride fiber MOPA system [J]. Optics Express, 2016, 24(25): 29022-29032.
- [77] Shen Y L, Wang Y S, Luan K P, et al. High peak power actively Q-switched mid-infrared fiber lasers at 3 μm [J]. Applied Physics B, 2017, 123 (4): 105.
- [78] Wei C, Zhang H, Shi H, et al. Over 5-W passively

- Q-switched mid-infrared fiber laser with a wide continuous wavelength tuning range [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(11): 881-884.
- [79] Ning S G, Feng G Y, Zhang H, et al. Fabrication of Fe^{2+} : ZnSe nanocrystals and application for a passively Q-switched fiber laser [J]. Optical Materials Express, 2018, 8(4): 865-874.
- [80] Wu M, Liu J, Li Y, et al. Stable and efficient pulsed mid-infrared laser generation from an Er^{3+} -doped ZBLAN fiber laser [J]. Journal of Russian Laser Research, 2018, 39(2): 177-181.
- [81] Sojka L, Pajewski L, Lamrini S, et al. Experimental investigation of actively Q-switched Er^{3+} : ZBLAN fiber laser operating at around $2.8 \mu\text{m}$ [J]. Sensors, 2020, 20(16): 4642.
- [82] Duan Q W, Yang L L, He Y, et al. Layered Ta_2NiS_5 Q-switcher for mid-infrared fluoride fiber laser [J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(4): 1500404.
- [83] Qin Z P, Hai T, Xie G Q, et al. Black phosphorus Q-switched and mode-locked mid-infrared Er : ZBLAN fiber laser at $3.5 \mu\text{m}$ wavelength [J]. Optics Express, 2018, 26(7): 8224-8231.
- [84] Yang J, Luo H Y, Liu F, et al. Widely tunable gain-switched Er^{3+} -doped ZrF_4 fiber laser from 3.4 to $3.7 \mu\text{m}$ [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(20): 1335-1338.
- [85] Fang Z Q, Zhang C X, Liu J, et al. $3.46 \mu\text{m}$ Q-switched Er^{3+} : ZBLAN fiber laser based on a semiconductor saturable absorber mirror [J]. Optics & Laser Technology, 2021, 141: 107131.
- [86] Hu T, Hudson D D, Jackson S D. Actively Q-switched $2.9 \mu\text{m}$ $\text{Ho}^{3+}\text{Pr}^{3+}$ -doped fluoride fiber laser [J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 2145-2147.
- [87] Li J F, Hu T, Jackson S D. Dual wavelength Q-switched cascade laser [J]. Optics Letters, 2012, 37(12): 2208-2210.
- [88] Li J F, Yang Y, Hudson D D, et al. A tunable Q-switched Ho^{3+} -doped fluoride fiber laser [J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(4): 045107.
- [89] Li J F, Hu T, Jackson S D. Q-switched induced gain switching of a two-transition cascade laser [J]. Optics Express, 2012, 20(12): 13123-13128.
- [90] Zhu G W, Zhu X S, Balakrishnan K, et al. Fe^{2+} : ZnSe and graphene Q-switched singly Ho^{3+} -doped ZBLAN fiber lasers at $3 \mu\text{m}$ [J]. Optical Materials Express, 2013, 3(9): 1365-1377.
- [91] Li J F, Luo H Y, He Y L, et al. Semiconductor saturable absorber mirror passively Q-switched $2.97 \mu\text{m}$ fluoride fiber laser [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9135: 913504.
- [92] Li J F, Luo H Y, Wang L L, et al. Tunable Fe^{2+} : ZnSe passively Q-switched Ho^{3+} -doped ZBLAN fiber laser around $3 \mu\text{m}$ [J]. Optics Express, 2015, 23(17): 22362-22370.
- [93] Li J F, Luo H Y, Wang L L, et al. $3-\mu\text{m}$ mid-infrared pulse generation using topological insulator as the saturable absorber [J]. Optics Letters, 2015, 40(15): 3659-3662.
- [94] Li J F, Luo H Y, Zhai B, et al. Black phosphorus: a two-dimension saturable absorption material for mid-infrared Q-switched and mode-locked fiber lasers [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 30361.
- [95] Wei C, Luo H Y, Zhang H, et al. Passively Q-switched mid-infrared fluoride fiber laser around $3 \mu\text{m}$ using a tungsten disulfide (WS_2) saturable absorber [J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(10): 105108.
- [96] Luo H Y, Tian X L, Gao Y, et al. Antimonene: a long-term stable two-dimensional saturable absorption material under ambient conditions for the mid-infrared spectral region [J]. Photonics Research, 2018, 6(9): 900-907.
- [97] Li W W, Wang H J, Du T J, et al. Compact self-Q-switched, tunable mid-infrared all-fiber pulsed laser [J]. Optics Express, 2018, 26(26): 34497-34502.
- [98] Wei C, Lyu Y J, Shi H X, et al. Mid-infrared Q-switched and mode-locked fiber lasers at $2.87 \mu\text{m}$ based on carbon nanotube [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(4): 1100206.
- [99] Wei C, Zhou L Q, Wang D S, et al. MXene- $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ for watt-level high-efficiency pulse generation in a $2.8 \mu\text{m}$ mid-infrared fiber laser [J]. Photonics Research, 2020, 8(6): 972-977.
- [100] Zhang X J, Li W W, Li J, et al. Mid-infrared all-fiber gain-switched pulsed laser at $3 \mu\text{m}$ [J]. Opto-Electronic Advances, 2020, 3(5): 190032.
- [101] Luo H Y, Li J F, Gao Y, et al. Fiber laser from 2.71 to $3.08 \mu\text{m}$ using PbS nanoparticles [J]. Optics Letters, 2019, 44(9): 2322-2325.
- [102] Luo H Y, Xu Y, Li J F, et al. Gain-switched dysprosium fiber laser tunable from 2.8 to $3.1 \mu\text{m}$ [J]. Optics Express, 2019, 27(19): 27151-27158.
- [103] Woodward R I, Majewski M R, MacAdam N, et al. Q-switched Dy : ZBLAN fiber lasers beyond $3 \mu\text{m}$: comparison of pulse generation using acousto-optic modulation and inkjet-printed black phosphorus [J]. Optics Express, 2019, 27(10):

- 15032-15045.
- [104] Yang J, Hu J Y, Luo H Y, et al. Fe_3O_4 nanoparticles as a saturable absorber for a tunable Q-switched dysprosium laser around $3 \mu\text{m}$ [J]. *Photonics Research*, 2019, 8(1): 70-77.
- [105] Shiryaev V S, Sukhanov M V, Velmuzhov A P, et al. Core-clad terbium doped chalcogenide glass fiber with laser action at $5.38 \mu\text{m}$ [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2021, 567: 120939.
- [106] Wei C, Zhu X S, Norwood R A, et al. Passively continuous-wave mode-locked Er^{3+} -doped ZBLAN fiber laser at $2.8 \mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3849-3851.
- [107] Haboucha A, Fortin V, Bernier M, et al. Fiber Bragg grating stabilization of a passively mode-locked $2.8 \mu\text{m}$ Er^{3+} :fluoride glass fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3294-3297.
- [108] Tang P H, Qin Z P, Liu J, et al. Watt-level passively mode-locked Er^{3+} -doped ZBLAN fiber laser at $2.8 \mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4855-4858.
- [109] Duval S, Bernier M, Fortin V, et al. Femtosecond fiber lasers reach the mid-infrared [J]. *Optica*, 2015, 2(7): 623-626.
- [110] Hu T, Jackson S D, Hudson D D. Ultrafast pulses from a mid-infrared fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4226-4428.
- [111] Qin Z P, Xie G, Zhao C J, et al. Mid-infrared mode-locked pulse generation with multilayer black phosphorus as saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(1): 56-59.
- [112] Qin Z P, Xie G Q, Gu H G, et al. Mode-locked $2.8\text{-}\mu\text{m}$ fluoride fiber laser: from soliton to breathing pulse [J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(6): 065001.
- [113] Guo C Y, Wei J C, Yan P G, et al. Mode-locked fiber laser at $2.8 \mu\text{m}$ using a chemical-vapor-deposited WSe_2 saturable absorber mirror [J]. *Applied Physics Express*, 2020, 13(1): 012013.
- [114] Huang J, Pang M, Jiang X, et al. Sub-two-cycle octave-spanning mid-infrared fiber laser [J]. *Optica*, 2020, 7(6): 574-579.
- [115] Henderson-Sapir O, Bawden N, Majewski M R, et al. Mode-locked and tunable fiber laser at the $3.5 \mu\text{m}$ band using frequency-shifted feedback [J]. *Optics Letters*, 2019, 45(1): 224-227.
- [116] Li J F, Hudson D D, Liu Y, et al. Efficient $2.87 \mu\text{m}$ fiber laser passively switched using a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3747-3749.
- [117] Hu T, Hudson D D, Jackson S D. Stable, self-starting, passively mode-locked fiber ring laser of the $3 \mu\text{m}$ class [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 2133-2136.
- [118] Yin K, Jiang T, Zheng X, et al. Mid-infrared ultra-short mode-locked fiber laser utilizing topological insulator Bi_2Te_3 nano-sheets [EB/OL]. (2015-05-23) [2021-05-06]. <https://arxiv.org/abs/1505.06322>.
- [119] Antipov S, Hudson D D, Fuerbach A, et al. High-power mid-infrared femtosecond fiber laser in the water vapor transmission window [J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1373-1376.
- [120] Woodward R I, Majewski M R, Jackson S D. Mode-locked dysprosium fiber laser: picosecond pulse generation from 2.97 to $3.30 \mu\text{m}$ [J]. *APL Photonics*, 2018, 3(11): 116106.
- [121] Wang Y C, Jobin F, Duval S, et al. Ultrafast Dy^{3+} :fluoride fiber laser beyond $3 \mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(2): 395-398.
- [122] Zhu G W, Zhu X S, Wang F Q, et al. Graphene mode-locked fiber laser at $2.8 \mu\text{m}$ [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(1): 7-10.
- [123] Gu H G, Qin Z P, Xie G Q, et al. Generation of 131 fs mode-locked pulses from $2.8 \mu\text{m}$ Er :ZBLAN fiber laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(3): 031402.
- [124] Jackson S D, Anzueto-Sánchez G. Chalcogenide glass Raman fiber laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(22): 221106.
- [125] Stolen R H, Ippen E P, Tynes A R. Raman oscillation in glass optical waveguide [J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 20(2): 62-64.
- [126] Fortin V, Bernier M, Faucher D, et al. 3.7 W fluoride glass Raman fiber laser operating at 2231 nm [J]. *Optics Express*, 2012, 20(17): 19412-19419.
- [127] Fortin V, Bernier M, Carrier J, et al. Fluoride glass Raman fiber laser at 2185 nm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(21): 4152-4154.
- [128] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. Heidelberg: Springer, 2000.
- [129] Bernier M, Fortin V, Caron N, et al. Mid-infrared chalcogenide glass Raman fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 127-129.
- [130] Bernier M, Fortin V, El-Amraoui M, et al. $3.77 \mu\text{m}$ fiber laser based on cascaded Raman gain in a chalcogenide glass fiber [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 2052-2055.
- [131] Zhu G W, Geng L X, Zhu X S, et al. Towards ten-watt-level $3\text{--}5 \mu\text{m}$ Raman lasers using tellurite fiber [J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7559-7573.

- [132] Dong G P, Tao H Z, Chu S S, et al. Structural dependence of ultrafast third-order optical nonlinearity of Ge-Ga-Ag-S chalcogenide glasses[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2008, 354: 440-444.
- [133] Wang J S, Vogel E M, Snitzer E. Tellurite glass: a new candidate for fiber devices [J]. Optical Materials, 1994, 3(3): 187-203.
- [134] Qin G S, Jose R, Ohishi Y. Stimulated Raman scattering in tellurite glasses as a potential system for slow light generation [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(9): 093109.
- [135] Mori A, Masuda H, Shikano K, et al. Ultra-wide-band tellurite-based fiber Raman amplifier [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(5): 1300-1306.
- [136] Qin G S, Liao M S, Suzuki T, et al. Widely tunable ring-cavity tellurite fiber Raman laser [J]. Optics Letters, 2008, 33(17): 2014-2016.
- [137] Ni C Q, Gao W Q, Chen X C, et al. Theoretical investigation on mid-infrared cascaded Raman fiber laser based on tellurite fiber [J]. Applied Optics, 2017, 56(33): 9171-9178.
- [138] Mitschke F M, Mollenauer L F. Discovery of the soliton self-frequency shift [J]. Optics Letters, 1986, 11(10): 659-661.
- [139] Tang Y X, Wright L G, Charan K, et al. Generation of intense 100 fs solitons tunable from 2 to 4.3 μm in fluoride fiber[J]. Optica, 2016, 3(9): 948-951.
- [140] Duval S, Gauthier J C, Robichaud L R, et al. Watt-level fiber-based femtosecond laser source tunable from 2.8 to 3.6 μm [J]. Optics Letters, 2016, 41(22): 5294-5297.
- [141] Dudley J M, Taylor J R. Supercontinuum generation in optical fibers [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [142] Hagen C L, Walewski J W, Sanders S T. Generation of a continuum extending to the midinfrared by pumping ZBLAN fiber with an ultrafast 1550-nm source [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(1): 91-93.
- [143] 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.
- [144] Yang L Y, Li Y, Zhang B, et al. 30-W supercontinuum generation based on ZBLAN fiber in an all-fiber configuration [J]. Photonics Research, 2019, 7(9): 1061-1065.
- [145] Yang L Y, Zhang B, He X, et al. 20.6 W mid-infrared supercontinuum generation in ZBLAN fiber with spectrum of 1.9-4.3 μm [J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(18): 5122-5127.
- [146] Li Z R, Jia Z X, Yao C F, et al. 22.7 W mid-infrared supercontinuum generation in fluorotellurite fibers[J]. Optics Letters, 2020, 45(7): 1882-1885.
- [147] Gauthier J C, Fortin V, Carrée J Y, et al. Mid-IR supercontinuum from 2.4 to 5.4 μm in a low-loss fluoroindate fiber[J]. Optics Letters, 2016, 41(8): 1756-1759.
- [148] Yang L Y, Zhang B, He X, et al. High-power mid-infrared supercontinuum generation in a fluoroindate fiber with over 2 W power beyond 3.8 μm [J]. Optics Express, 2020, 28(10): 14973-14979.
- [149] Woyessa G, Kwarkye K, Dasa M K, et al. Power stable 1.5-10.5 μm cascaded mid-infrared supercontinuum laser without thulium amplifier[J]. Optics Letters, 2021, 46(5): 1129-1132.
- [150] Yan B, Huang T, Zhang W W, et al. Generation of Watt-level supercontinuum covering 2-6.5 μm in an all-fiber structured infrared nonlinear transmission system[J]. Optics Express, 2021, 29(3): 4048-4057.
- [151] Swiderski J, Grzes P. High-power mid-IR supercontinuum generation in fluoroindate and arsenic sulfide fibers pumped by a broadband 1.9-2.7 μm all-fiber laser source[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 141: 107178.
- [152] 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.
- [153] Cheng T, Nagasaka K, Tuan T H, et al. Mid-infrared supercontinuum generation spanning 2.0 to 15.1 μm in a chalcogenide step-index fiber[J]. Optics Letters, 2016, 41(9): 2117-2120.
- [154] Yu Y, Zhang B, Gai X, et al. 1.8-10 μm mid-infrared supercontinuum generated in a step-index chalcogenide fiber using low peak pump power[J]. Optics Letters, 2015, 40(6): 1081-1084.
- [155] 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.
- [156] Hudson D D, Antipov S, Li L Z, et al. Toward all-fiber supercontinuum spanning the mid-infrared[J]. Optica, 2017, 4(10): 1163-1166.
- [157] 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.
- [158] 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.
- [159] 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.
- [160] Yin K, Zhang B, Yang L, 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.
- [161] 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.
- [162] 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.
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.
- [163] Michalska M, Mikolajczyk J, Wojtas J, et al. Mid-infrared, super-flat, supercontinuum generation covering the 2–5 μm spectral band using a fluoroindate fibre pumped with picosecond pulses [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 39138.
- [164] Liang S J, Xu L, Fu Q, et al. 295-kW peak power picosecond pulses from a thulium-doped-fiber MOPA and the generation of watt-level >2.5 -octave supercontinuum extending up to 5 μm [J]. Optics Express, 2018, 26(6): 6490-6498.
- [165] Yehoussi J P, Vidal S, Carréeb J Y, et al. 3 W Mid-IR supercontinuum extended up to 4.6 μm based on an all-PM thulium doped fiber gain-switch laser seeding an InF₃ fiber[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10902: 1090207.
- [166] Scurria G, Manek-Hönninger I, Carré J Y, et al. 7 W mid-infrared supercontinuum generation up to 4.7 μm in an indium-fluoride optical fiber pumped by a high-peak power thulium-doped fiber single-oscillator[J]. Optics Express, 2020, 28(5): 7672-7677.
- [167] Wu T Y, Yang L Y, Dou Z Y, et al. Ultra-efficient, 10-watt-level mid-infrared supercontinuum generation in fluoroindate fiber[J]. Optics Letters, 2019, 44(9): 2378-2381.
- [168] Gauthier J C, Fortin V, Duval S, et al. In-amplifier mid-infrared supercontinuum generation[J]. Optics Letters, 2015, 40(22): 5247-5249.
- [169] Deng K X, Yang L Y, Zhang B, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in an all-fiberized Er-doped ZBLAN fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2020, 45(23): 6454-6457.
- [170] Gauthier J C, Robichaud L R, Fortin V, et al. Mid-infrared supercontinuum generation in fluoride fiber amplifiers: current status and future perspectives [J]. Applied Physics B, 2018, 124(6): 122.
- [171] Yang L Y, Zhang B, Wu T Y, et al. Watt-level mid-infrared supercontinuum generation from 2.7 to 4.25 μm in an erbium-doped ZBLAN fiber with high slope efficiency[J]. Optics Letters, 2018, 43(13): 3061-3064.
- [172] Robichaud L R, Fortin V, Gauthier J C, et al. Compact 3–8 μm supercontinuum generation in a low-loss As₂Se₃ step-index fiber[J]. Optics Letters, 2016, 41(20): 4605-4608.
- [173] Yang L Y, Zhang B, Yin K, et al. Spectrally flat supercontinuum generation in a holmium-doped ZBLAN fiber with record power ratio beyond 3 μm [J]. Photonics Research, 2018, 6(5): 417-421.
- [174] Benabid F, Knight J C, Antonopoulos G, et al. Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber [J]. Science, 2002, 298(5592): 399-402.
- [175] Pryamikov A D, Biriukov A S, Kosolapov A F, et al. Demonstration of a waveguide regime for a silica hollow: core microstructured optical fiber with a negative curvature of the core boundary in the spectral region $> 3.5 \mu\text{m}$ [J]. Optics Express, 2011, 19(2): 1441-1448.
- [176] Jones A M, Nampoothiri A V V, Ratanavis A, et al. Mid-infrared gas filled photonic crystal fiber laser based on population inversion [J]. Optics Express, 2011, 19(3): 2309-2316.
- [177] Gladyshev A V, Kosolapov A F, Khudyakov M M, et al. 4.4- μm Raman laser based on hollow-core silica fibre[J]. Quantum Electronics, 2017, 47(5): 491-494.
- [178] Cao L, Gao S F, Peng Z G, et al. High peak power 2.8 μm Raman laser in a methane-filled negative-curvature fiber[J]. Optics Express, 2018, 26(5): 5609-5615.
- [179] Li Z X, Huang W, Cui Y L, et al. Efficient mid-infrared cascade Raman source in methane-filled hollow-core fibers operating at 2.8 μm [J]. Optics

- Letters, 2018, 43(19): 4671-4674.
- [180] Gladyshev A V, Kosolapov A F, Khudyakov M M, et al. 2.9, 3.3, and 3.5 μm Raman lasers based on revolver hollow-core silica fiber filled by $^1\text{H}_2/\text{D}_2$ gas mixture [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(3): 0903008.
- [181] Astapovich M S, Gladyshev A V, Khudyakov M M, et al. Watt-level nanosecond 4.42- μm Raman laser based on silica fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(1): 78-81.
- [182] Huang W, Cui Y L, Li Z X, et al. 1.56 μm and 2.86 μm Raman lasers based on gas-filled anti-resonance hollow-core fiber [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(7): 071406.
- [183] Wang Y Z, Dasa M K, Adamu A I, et al. High pulse energy and quantum efficiency mid-infrared gas Raman fiber laser targeting CO_2 absorption at 4.2 μm [J]. Optics Letters, 2020, 45(7): 1938-1941.
- [184] HITRAN spectroscopic database [EB/OL]. [2021-05-06]. <https://hitran.iao.ru>.
- [185] Jones A M, Fourcade-Dutin C, Mao C, et al. Characterization of mid-infrared emissions from C_2H_2 , CO, CO_2 , and HCN^- filled hollow fiber lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8237: 82373Y.
- [186] Wang Z F, Belardi W, Yu F, et al. Efficient diode-pumped mid-infrared emission from acetylene-filled hollow-core fiber [J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21872-21878.
- [187] Hassan M R A, Yu F, Wadsworth W J, et al. Cavity-based mid-IR fiber gas laser pumped by a diode laser [J]. Optica, 2016, 3(3): 218-221.
- [188] Xu M R, Yu F, Knight J. Mid-infrared 1 W hollow-core fiber gas laser source [J]. Optics Letters, 2017, 42(20): 4055-4058.
- [189] Zhou Z Y, Tang N, Li Z X, et al. High-power tunable mid-infrared fiber gas laser source by acetylene-filled hollow-core fibers [J]. Optics Express, 2018, 26(15): 19144-19153.
- [190] Aghbolagh F B A, Nampoothiri V, Debord B, et al. Mid IR hollow core fiber gas laser emitting at 4.6 μm [J]. Optics Letters, 2019, 44(2): 383-386.
- [191] Cui Y L, Huang W, Wang Z F, et al. 4.3 μm fiber laser in CO_2 -filled hollow-core silica fibers [J]. Optica, 2019, 6(8): 951-954.
- [192] 周智越, 李昊, 崔宇龙, 等. 基于空芯光纤的光泵浦 4 μm 连续波 HBr 气体激光器 [J]. 光学学报, 2020, 40(16): 1614001.
- Zhou Z Y, Li H, Cui Y L, et al. Optically pumped 4 μm CW HBr gas laser based on hollow-core fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 1614001.
- [193] Huang T C, He Q, She X, et al. Study on thermal splicing of ZBLAN fiber to silica fiber [J]. Optical Engineering, 2016, 55(10): 106119.
- [194] Al-Mahrous R, Caspary R, Kowalsky W. A thermal splicing method to join silica and fluoride fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(2): 303-308.
- [195] Pei L, Dong X W, Zhao R F, et al. Low loss splicing method to join silica and fluoride fibers [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6781: 67814O.
- [196] Thapa R, Gattass R R, Nguyen V, et al. Low-loss, robust fusion splicing of silica to chalcogenide fiber for integrated mid-infrared laser technology development [J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 5074-5077.
- [197] Uehara H, Konishi D, Goya K, et al. Power scalable 30-W mid-infrared fluoride fiber amplifier [J]. Optics Letters, 2019, 44(19): 4777-4780.
- [198] Bernier M, Trépanier F, Carrier J, et al. High mechanical strength fiber Bragg gratings made with infrared femtosecond pulses and a phase mask [J]. Optics Letters, 2014, 39(12): 3646-3649.
- [199] Zou L E, Kabakova I V, Mägi E C, et al. Efficient inscription of Bragg gratings in As_2S_3 fibers using near bandgap light [J]. Optics Letters, 2013, 38(19): 3850-3853.
- [200] Suo R, Lousteau J, Li H X, et al. Fiber Bragg gratings inscribed using 800 nm femtosecond laser and a phase mask in single-and multi-core mid-IR glass fibers [J]. Optics Express, 2009, 17(9): 7540-7548.
- [201] Grobnić D, Mihailov S J, Smelser C W. Femtosecond IR laser inscription of Bragg gratings in single- and multimode fluoride fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(24): 2686-2688.
- [202] Yu R W, Wang C Y, Benabid F, et al. Robust mode matching between structurally dissimilar optical fiber waveguides [J]. ACS Photonics, 2021, 8(3): 857-863.
- [203] Wang C Y, Yu R W, Debord B, et al. Ultralow-loss fusion splicing between negative curvature hollow-core fibers and conventional SMFs with a reverse-tapering method [J]. Optics Express, 2021, 29(14): 22470-22478.
- [204] Goel C, Li H Z, Hassan M R A, et al. Anti-resonant hollow-core fiber fusion spliced to laser gain fiber for high-power beam delivery [J]. Optics Letters, 2021, 46(17): 4374-4377.
- [205] Huang W, Cui Y L, Zhou Z Y, et al. Towards all-

- fiber structure pulsed mid-infrared laser by gas-filled hollow-core fibers [J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(9): 091402.
- [206] Cui Y L, Zhou Z Y, Huang W, et al. Quasi-all-fiber structure CW mid-infrared laser emission from gas-filled hollow-core silica fibers [J]. Optics & Laser Technology, 2020, 121: 105794.
- [207] Huang W, Cui Y L, Li X Q, et al. Low-loss coupling from single-mode solid-core fibers to anti-resonant hollow-core fibers by fiber tapering technique [J]. Optics Express, 2019, 27 (26): 37111-37121.
- [208] Shi J, Ye X Y, Cui Y L, et al. All-fiber gas cavity based on anti-resonant hollow-core fibers fabricated by splicing with end caps [J]. Photonics, 2021, 8 (9): 371.
- [209] Carcreff J, Cheviré F, Galdo E, et al. Mid-infrared hollow core fiber drawn from a 3D printed chalcogenide glass preform [J]. Optical Materials Express, 2021, 11(1): 198-209.
- [210] Gao S F, Wang Y Y, Ding W, et al. Hollow-core conjoined-tube negative-curvature fibre with ultralow loss [J]. Nature Communications, 2018, 9 (1): 2828.
- [211] Jasion G T, Bradley T D, Harrington K, et al. Hollow core NANF with 0.28 dB/km attenuation in the C and L bands [C] // 2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 8-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 19629480.
- [212] Bradley T D, Jasion G T, Hayes J R, et al. Antiresonant hollow core fibre with 0.65 dB/km attenuation across the C and L telecommunication bands [C] // 45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019), September 22-26, 2019, Dublin, Ireland. Stevenage: IET, 2019.