

3~5 μm 稀土离子掺杂中红外光纤激光器的研究进展 (特邀)

王森宇, 陈俊生, 赵鑫生, 雷 浩, 罗鸿禹, 李剑峰*

(电子科技大学 光电科学与工程学院, 四川 成都 610054)

摘要: 3~5 μm 中红外波段是一个极特殊的电磁波谱区间,它不仅覆盖着众多分子与原子的本征吸收峰,同时还是大气透明窗口之一。此波段的激光器在气体探测、生物医疗、国防等众多领域都具有很大的应用前景。文中围绕常用于 3~5 μm 光纤激光产生的三种稀土离子(即 Er^{3+} 、 Ho^{3+} 和 Dy^{3+}),对基于这些离子掺杂的连续和脉冲中红外光纤激光器的发展现状进行了梳理,最后对 3~5 μm 掺稀土离子光纤激光器的发展进行了展望。

关键词: 中红外激光; 氟化物光纤; 稀土离子; 连续激光器; 脉冲激光器

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230215

0 引言

中红外波段中,3~5 μm 是一个极特殊的窗口,它不仅覆盖着众多分子与原子的本征吸收峰,同时还是大气透明窗口之一^[1-2]。因此,工作在此波段的激光器在气体探测、材料加工、生物医疗、军事对抗以及遥感等各个领域都具有广阔的应用前景^[3-4]。相较于功率较低且工艺要求高的量子级联激光器^[5]、体积大且光束质量差的固体激光器以及设计复杂且需要昂贵非线性晶体的光参量激光器等^[6],光纤激光器^[7]具有光束质量好、易于小型化集成、散热性好、转化效率高、鲁棒性好等优点,在中红外激光领域脱颖而出,成为激光领域的前沿研究热点,并在近些年取得了一系列的突破^[8-10]。

目前,在光纤激光器中,产生 3~5 μm 激光的方法主要有以下四种:(1) 基于掺稀土离子光纤的直接激射法^[11],即利用掺杂离子在特定能级间的跃迁,辐射 3~5 μm 激光。(2) 基于气体填充光纤的直接激射法^[12],即通过 N_2O 、 HBr 、 CO_2 等气体填充空心石英光纤,利用气体的能级跃迁实现 3~5 μm 的激光输出。(3) 拉曼孤子自频移^[13],利用光纤中的拉曼效应实现脉冲内拉曼

散射和波长连续红移,进而实现该波段内的波长调谐输出。(4) 超连续谱^[14],基于光纤中的色散和自相位调制、交叉相位调制等各种非线性效应的共同作用产生超连续谱以实现覆盖 3~5 μm 波段的激光输出。对于气体填充的中红外光纤激光器,相关成果在近两年才有所报道,相关的研究还不够深入。对于基于超连续谱和孤子自频移效应的光纤激光器,它们通常由不同输出波长的稀土离子掺杂光纤激光器抽运。因此,直接激射稀土离子掺杂光纤是获得 3~5 μm 波段光纤激光的基本途径。

由于氟化物光纤和中红外器件制备工艺的不完善,相较于发展成熟的近红外波段,3~5 μm 波段的稀土离子掺杂光纤激光器整体发展较为滞后。针对此现状,文中将从掺稀土离子氟化物光纤出发,对该方向的研究进展进行系统梳理和分析,分别讨论在连续波(CW)和脉冲状态下工作的中红外光纤激光器发展历程,最后对掺稀土离子中红外光纤激光器的发展趋势进行了展望。

1 3~5 μm 光纤激光器的增益介质

由于石英材料具有较高的声子能量(1100 cm^{-1}),

收稿日期:2023-04-11; 修订日期:2023-05-05

基金项目:国家自然科学基金(U20A20210, 62005040, 61421002);中央高校科研基本业务费(ZYGX2021YGCX014, ZYGX2019Z012, ZYGX2020KYQD003);四川省自然科学基金((2023NSFSC1964, 2023NSFSC033))

作者简介:王森宇,男,博士生,主要从事中红外光纤激光等方面的研究。

导师(通讯作者)简介:李剑峰,男,教授,博士,主要从事中红外光纤激光等方面的研究。

石英光纤无法实现波长大于 2.2 μm 激光的低损耗传输。另一方面,较高的声子能量还会加速长波跃迁猝灭,抑制激光激射,因此,石英光纤不适用于制作波长超过 2.2 μm 的光纤激光器。为了获得更长波长的中红外光纤激光,采用声子能量较低的碲酸盐(典型组分: 75 mol.% TeO₂, 20 mol.% ZnO, 5 mol.% Na₂O)(800 cm⁻¹)、氟化物(ZBLAN, 典型组分: 53 mol.% ZrF₄, 20 mol.% BaF₂, 4 mol.% LaF₃, 4 mol.% AlF₃, 20 mol.% NaF)(580 cm⁻¹)和硫化物(典型组分为 As-S、As-Se 等)(~300 cm⁻¹)作为光纤基质材料具备更大的潜力。其中,硫化物玻璃成纤后难以同时兼顾高掺杂浓度和低传输损耗,而碲化物光纤中氢氧根含量有待进一步降低。因此,目前基于这两种基质的稀土掺杂光纤激光器尚处于理论探索阶段,还鲜有实验报道。而以氟化物玻璃作为基质的 ZBLAN 光纤(580 cm⁻¹)以及 InF₃ 光纤(510 cm⁻¹)具有较低的声子能量,在 2.5~5 μm 波段仍保持着较低的损耗。与此同时,氟化物材料具有优良的稀土溶解度,可以实现更高浓度的稀土离子掺杂,现已成为 3~5 μm 光纤激光器的最佳稀土掺杂基质。因此,开发高质量掺杂氟化物玻璃是实现 3~5 μm

波段光纤激光器的关键一步。

在 3~5 μm 波段,常用于激光产生的增益稀土离子主要有 Dy³⁺、Er³⁺和 Ho³⁺,它们的不同能级跃迁过程分别对应不同波长的辐射带,其受激发射截面和能级跃迁过程见图 1。由图可见,这三种离子的辐射带几乎可以覆盖整个 3~4.5 μm 的波长区间^[15-20],虽然也存在稀土离子的辐射带处于 4.5~5 μm 波段,如铽离子(Tb³⁺)的⁷F₅→⁷F₆跃迁过程(对应辐射波长:~4.7 μm),但这种元素还未能实现在控制光纤中的掺杂^[21],因此,在文中不做探讨。

如图 1 所示,掺 Er³⁺氟化物光纤中,更高能级的⁴F_{9/2}→⁴I_{9/2}跃迁在~3.5 μm 具有强辐射带^[22]。在掺 Ho³⁺氟化物光纤中,⁵I₅→⁵I₆是已知对应输出波长最长的跃迁过程,其辐射波长为 3.9 μm^[23]。此外,掺 Ho³⁺氟化物光纤中的⁵S₂→⁵F₅跃迁可以实现 3.22 μm 的激光激射^[24]。掺 Dy³⁺氟化物玻璃中,⁶H_{13/2}→⁶H_{15/2}这一跃迁过程所对应的辐射带几乎可以覆盖 2.5~3.4 μm^[25-28]。对于掺 Dy³⁺氟化物玻璃中⁶H_{11/2}→⁶H_{13/2}的跃迁过程,理论上可以实现 4.3 μm 的激光辐射,但目前国际上还未能实现在光纤中实现激光输出。

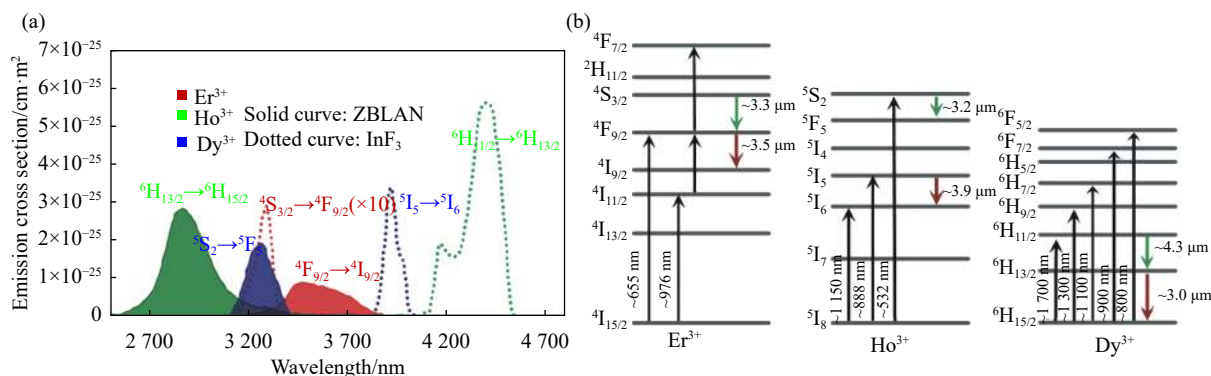


图 1 3~5 μm 波段 Er³⁺、Ho³⁺和 Dy³⁺的能级与发射谱^[15-20]。(a) 中红外发射谱;(b) 对应的能级跃迁过程以及泵浦激发方式

Fig.1 Energy levels and emission spectra of Er³⁺, Ho³⁺ and Dy³⁺ at 3-5 μm band ^[15-20]. (a) Mid-infrared emission spectra; (b) Corresponding energy level transition process and pumping excitation mode

2 稀土离子掺杂 3~5 μm 连续光纤激光器

高功率连续中红外光纤激光器在工业制造领域如高分子材料加工、激光焊接、钻孔和清洗以及生物医学领域,如组织汽化和消融等方面具有重要的应用潜力^[29]。自掺 Er³⁺氟化物光纤实现 3.5 μm 连续激光输出以来^[22], 3 μm 以上波段的中红外光纤激光器经历

了 30 余年的发展,开发的基于稀土离子掺杂氟化物光纤的连续中红外光纤激光器取得了一系列的重大突破,表 1 列举了近些年报道的 3~5 μm 连续稀土离子掺杂光纤激光器的相关结果,可见,掺 Dy³⁺的 ZrF₄、掺 Er³⁺的 ZrF₄ 和掺 Ho³⁺的 InF₃ 光纤都表现出了优异的激光发射潜力。分别在~3.2 μm、~3.5 μm 和~3.9 μm 波段实现了 10.1 W^[28]、15 W^[33] 和 200 mW^[37] 的输出功率。

表 1 不同稀土离子掺杂 3~5 μm 连续光纤激光器

Tab.1 3-5 μm continuous wave fiber laser doped with different rare earth ions

Ion	$\lambda_{\text{pump}}/\mu\text{m}$	$\lambda_{\text{output}}/\mu\text{m}$	$P_{\text{output}}/\text{W}$	η	Year	Reference
Dy ³⁺	0.8	3.02	0.105	18.5%	2020	[26]
Dy ³⁺ /Tm ³⁺	0.8	3.23	0.012	0.3%	2019	[27]
Dy ³⁺	2.8	3.24	10.1	58%	2019	[28]
Er ³⁺	0.98+1.9	3.5	0.26	25.4%	2014	[30]
Er ³⁺	0.98+1.9	3.55	5.6	26.4%	2017	[31]
Er ³⁺	0.655+1.981	3.5	1.72	31.5%	2021	[32]
Er ³⁺	0.98+1.9	3.55	14.9	17.2%	2022	[33]
Er ³⁺ /Dy ³⁺	0.976	3.27	0.26	5.73%	2021	[25]
Er ³⁺ /Dy ³⁺	0.659	3.4	0.8	8.8%	2022	[34]
Ho ³⁺	1.15	3.002	0.77	12.4%	2011	[35]
Ho ³⁺	1.15	2.955-3.021	0.52	-	2012	[36]
Ho ³⁺	0.888	3.92	0.200	10%	2018	[37]

2.1 掺 Dy³⁺离子 3~3.4 μm 光纤激光器

如图 1 所示, 掺 Dy³⁺氟化物玻璃中, ⁶H_{13/2}→⁶H_{15/2} 这一跃迁过程所对应的辐射带具有较大的带宽, 几乎可以覆盖 3~3.4 μm 的波长区间。2016 年, 澳大利亚麦考瑞大学的 S. D. Jackson 团队利用~2.8 μm 光纤激光器直接泵浦掺 Dy³⁺: ZBLAN 光纤, 激发 Dy³⁺离子 ⁶H_{13/2}→⁶H_{15/2} 的跃迁过程, 产生 3.04 μm 的激光输出, 斜率效率高达 51%, 通过增加掺 Dy³⁺: ZBLAN 的光纤长度, 最终率先实现 3.26 μm 的激光输出^[38]; 同年, 该团队利用该方案进一步实现了 2.95~3.35 μm 波长连续调谐^[39]。2018 年, 该团队又获得了瓦级的 3.15 μm 激光输出, 实现了目前中红外波段最高的斜率效率 (73%)^[40]; 随后, 加拿大拉瓦尔大学 V. Fortin 等人采用同样的泵浦方式, 搭建了全光纤系统, 最终实现了 10.1 W 的 3.24 μm 激光输出, 这是 Dy³⁺离子掺杂 3~3.4 μm 光纤激光器所实现的最高功率水平^[28]。然而, 这种带内泵浦方式具有固有的缺陷, 无法实现整个辐射带内的激光输出。2018 年, S. D. Jackson 团队又利用~1.7 μm 激光泵浦掺 Dy³⁺: ZBLAN 光纤, 在 3.1 μm 波长附近, 实现了 600 nm 宽带调谐的激光输出^[41]。2022 年, 笔者课题组使用自制的 1.69 μm 高功率随机拉曼光纤激光器作为泵浦, 采用刻线式衍射光栅作为波长选择和输出耦合器, 最终实现了 2.710~3.415 μm 范围内的波长调谐输出^[42], 其实验装置如图 2 所示。这是迄今为止稀土掺杂光纤激光器实现的最宽的波长调谐范围。

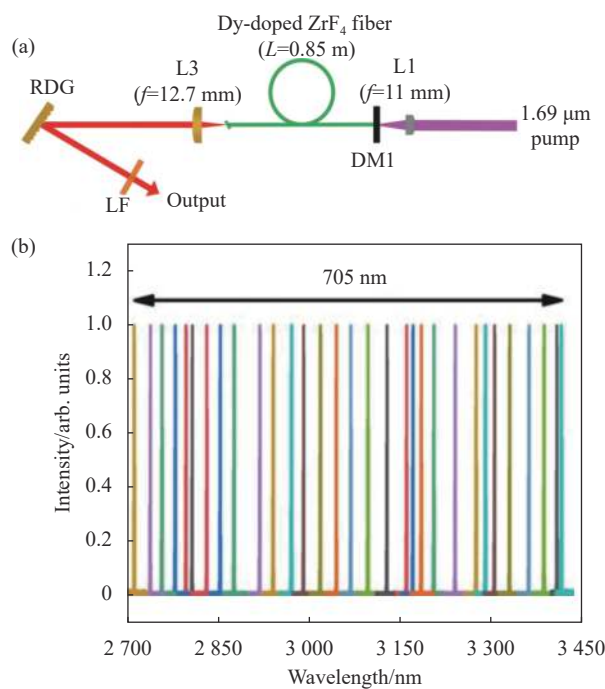


图 2 (a) 1.69 μm 泵浦掺 Dy³⁺: ZrF₄ 光纤激光器的实验装置; (b) 可调谐激光输出光谱^[42]

Fig.2 (a) Experimental setup of the Dy-doped ZrF₄ fiber laser pumped at 1.69 μm; (b) Tunable laser output spectrum^[42]

2.2 掺 Er³⁺离子 ~3.5 μm 光纤激光器

1991 年, 德国不伦瑞克工业大学 H. Tobben 等人采用 655 nm 激光泵浦掺 Er³⁺: ZBLAN 光纤, 首次实现了数毫瓦级 3.5 μm 的激光输出。受激光亚稳态能级 ⁴I_{11/2} 和 ⁴I_{13/2} 较长寿命的影响, 655 nm 泵浦光难以保持高效的离子循环。在之后将近 20 年的时间里, 掺 Er³⁺: ZBLAN 光纤的拉制技术和掺杂水平已经有了质

的提升,但限制~3.5 μm 激光高效激射的主要原因——离子数瓶颈问题仍未被有效地解决。直到 2014 年,阿德莱德大学 O. Henderson-Sapir 团队提出采用 985 nm 和 1 973 nm 双波长级联的方式泵浦,在室温下实现了 260 mW 的~3.5 μm 激光输出。该团队搭建了如图 3(a) 所示的双波长级联泵浦掺 Er³⁺: ZBLAN 光纤激光器,有效地解决了离子数的瓶颈问题^[30]。该系统中,985 nm 的泵浦光为⁴I_{11/2} 能级提供离子,1 973 nm 泵浦光用于将离子进一步抽运到上能级,从而实现离子在⁴F_{9/2} 与⁴I_{11/2} 能级间的高效循环,该方案的转化效率达到了 16%^[30]。这项极具里程碑意义的研究推动了稀土离子掺杂光纤激光器向 3 μm 以上波段的拓展进程。在此基础上,上海交通大学、加拿大拉瓦尔大学等单位开展了大量的研究^[31-32,43-47]。在该波段能级动力学探索方面,O. Henderson-Sapir 团队进一步发现了能量转移上转换 (ETU)(⁴I_{11/2}+⁴F_{9/2}→⁴I_{13/2}+⁴S_{3/2}) 这一新跃迁过程^[44]。随后,拉瓦尔大学 F. Maes 等人发现了另一个

与 3.5 μm 激光输出紧密关联的跃迁过程: 虚拟激发态吸收 (VESA)(⁴F_{9/2}+1 976 nm→⁴F_{7/2})^[45]。2022 年,该团队报道了一种双波长泵浦的 3.55 μm 连续激光器,输出功率达到了 14.9 W,其整体光学效率为 17.2%,斜率效率为 51.3%,这项工作进一步刷新了该波段光纤激光器的输出功率纪录^[33]。同年,笔者课题组采用 659 nm 红光二极管包层泵浦 Er³⁺/Dy³⁺共掺 ZrF₄ 光纤^[34],其系统如图 4 所示。在该体系中,长寿命的⁴I_{11/2} 和⁴I_{13/2} 态由于能量转移到共掺杂的 Dy³⁺ 离子和 Er³⁺ 离子之间的能量转移上转换而迅速减少,从而加速了离子的循环。最终,在室温下实现 0.8 W 的 3.4 μm 激光输出,斜率效率达到 8.8%。此外,还观察到在 3.3 μm 和 3.5 μm 处自由运转的双波长工作状态,产生的总最大功率为 0.95 W,斜率效率为 10.7%,通过调谐衍射光栅,在 3 053.9~3 695.9 nm 范围内实现了连续光谱调谐。这项方案实现了第一个远超 3 μm 的二极管泵浦掺稀土光纤激光器瓦级输出,为 3~5 μm 区域中红外激光的产生提供了一个有潜力的新平台。

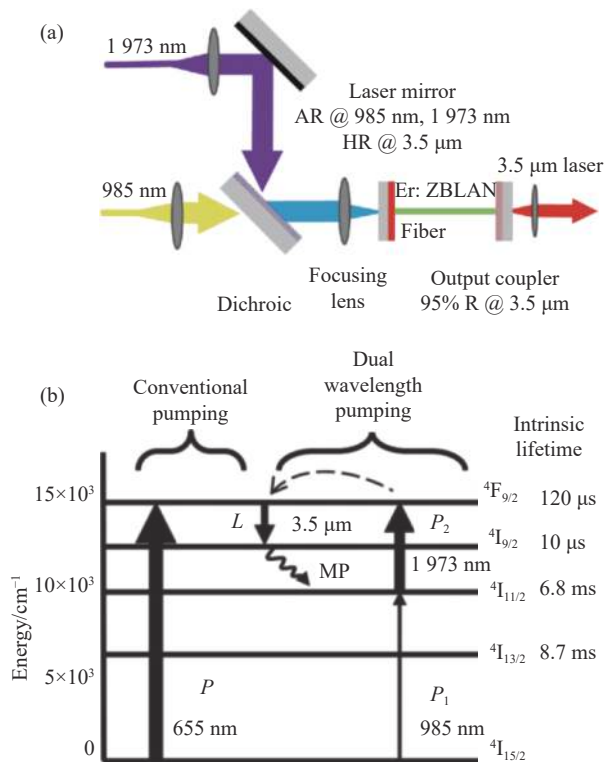


图 3 (a) 985 nm 和 1 973 nm 双波长级联泵浦的 3.5 μm 掺 Er³⁺: ZBLAN 氟化物光纤激光器结构图; (b) 双波长泵浦能级跃迁过程^[30]

Fig.3 Schematic diagram of the 985 nm and 1 973 nm dual-wavelength cascaded pumped Er³⁺ fluoride doped 3.5 μm fiber laser; (b) Transition process of dual wavelength pumping^[30]

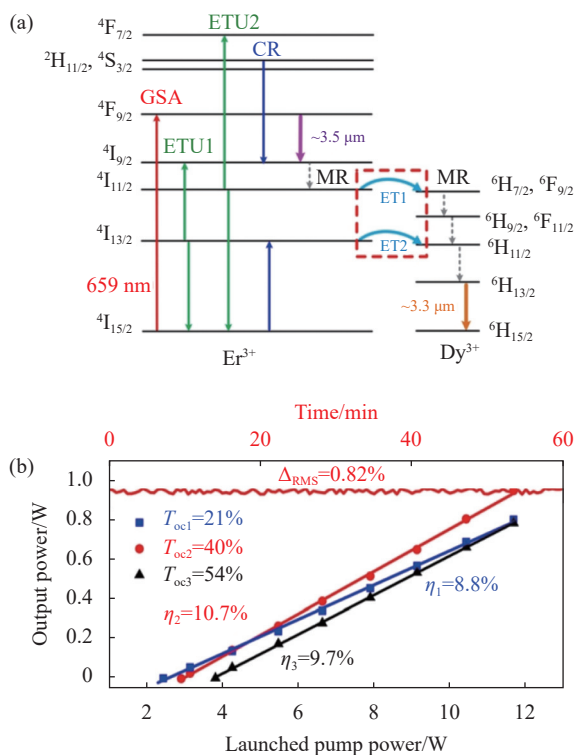


图 4 (a) 红光 LD 泵浦掺 Er³⁺/Dy³⁺: ZBLAN 光纤系统的能级图; (b) 输出功率演化^[34]

Fig.4 (a) Energy level diagram of red light LD pumping doped Er³⁺/Dy³⁺: ZBLAN fiber; (b) Output power evolutions^[34]

2.3 掺 Ho³⁺离子 ~3.9 μm 光纤激光器

2011 年, 笔者课题组与麦考瑞大学 S. D. Jackson 团队合作, 使用长达 10 m 的低浓度掺 Ho³⁺: ZBLAN 光纤作为增益介质, 构建了级联跃迁系统, 首次在室温条件下实现了 >3 μm 的瓦级光纤激光输出^[35]。随后, 该团队通过引入单面刻线式光栅, 实现了 2.955~3.021 μm 波长调谐激光输出^[36]。基于 Ho³⁺掺杂氟化物光纤 ⁵I₅→⁵I₆ 是掺 Ho³⁺氟化物玻璃中已知对应输出波长最长的跃迁过程, 但受限于 ZBLAN 光纤在 3.9 μm 以上波段明显提升的损耗以及较大的量子亏损和产热, 对于该跃迁过程, 一直未能实现室温下的激光产生。直到 2018 年, 拉瓦尔大学 F. Maes 等人将 Ho³⁺: InF₃ 光纤作为增益介质, 搭建了如图 5 所示的掺 Ho³⁺: InF₃ 光

纤激光器, 利用 InF₃ 光纤更低的声子能量 (典型值: 509 cm⁻¹), 率先实现了室温下的 200 mW、3.9 μm 激光输出, 该系统激光效率约为 10%^[37]。受泵浦波长和转化效率制约, 掺 Ho³⁺光纤激光器的输出功率相对较低, 但基于 Ho³⁺掺杂的氟化物光纤所实现的 3.9 μm 激光输出是目前直接激射稀土离子掺杂光纤实现的最长波长^[37]。为了优化 3.9 μm 掺 Ho³⁺的光纤激光系统, 近些年相关研究团队相继提出了一些理论模型^[48-49]。2021 年, 笔者课题组提出一种 888 nm 与 962 nm 双波长泵浦掺 Ho³⁺: InF₃ 光纤的 3.92 μm 激光产生方案, 理论仿真结果表明, 与单波长泵浦方案相比, 962 nm 泵源的存在可以有效地降低系统的阈值, 提高激光输出, 为今后实验系统的设计和优化提供了一种可行的方案^[48]。

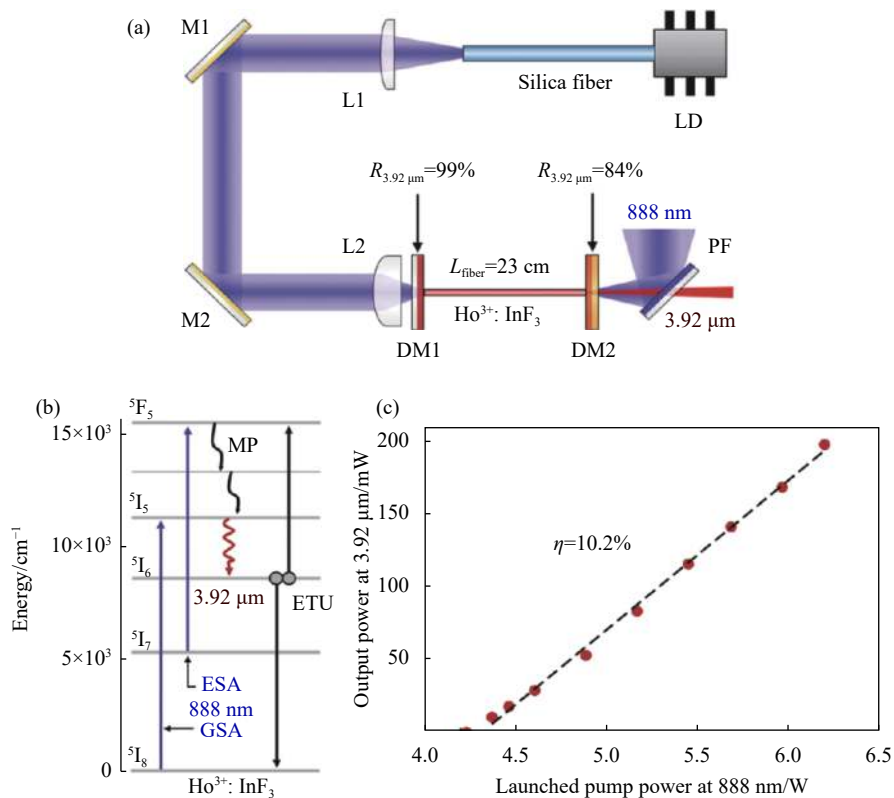


图 5 室温下 3.92 μm 光纤激光系统示意图^[37]。(a) 实验装置; (b) 能级示意图; (c) 输出功率

Fig. 5 Schematic diagram of 3.92 μm fiber laser system at room temperature^[37]. (a) Experimental setup; (b) Energy level diagram; (c) Output power

近些年, 3~5 μm 连续光纤激光器的性能取得了很大的提升, 其波长覆盖^[37]和输出功率^[28,33]已经大幅提高。但相对于~2.8 μm 连续光纤激光, 3~5 μm 波段激光器在功率方面仍有很大的提升空间, 其中, 3.9 μm 掺 Ho³⁺光纤激光进一步的功率放大是研究人员面临

的一大挑战, 探索提高连续波激光器系统效率的新方法仍然是未来的一项艰巨任务。在波长覆盖方面, 4~5 μm 掺稀土离子光纤激光器的研究仍然是一片空白, 因此, 进一步优化基于 Ho³⁺光纤的 3.92 μm 激光输出特性以及探究掺 Dy³⁺光纤的 4.3 μm 的激光动力

学特性对实现 4 μm 波段直接激射光纤激光具有重要意义。

3 稀土离子掺杂 3~5 μm 脉冲光纤激光器

根据脉冲持续时间的不同,脉冲激光器被分为短脉冲激光器和超短脉冲激光器两大类。3~5 μm 波段短脉冲是指时域持续时间在 ns~μs 量级的脉冲,在国防领域、医学领域如高效组织消融/切割以及工业领域如特殊材料加工等方面具有重要作用。目前,实现短脉冲输出的主要途径有调 Q 和增益调制两大类。超短脉冲是指时域持续时间在 fs~ps 量级的脉冲,中红外超短脉冲激光是当前国际前沿研究热点,在遥

感、高次谐波产生以及超快分子成像等领域具有重要的应用前景^[29],产生超短脉冲的主要技术手段是锁模。下面将分别对 3~5 μm 波段短脉冲和超短脉冲的稀土离子掺杂氟化物光纤激光器的发展情况进行介绍。

3.1 短脉冲 3~5 μm 光纤激光器

3~5 μm 波段脉冲激光是激光领域的一项前沿技术,2.8 μm 波段脉冲光纤激光器的飞速发展^[8-9],为 3~5 μm 波段短脉冲光纤激光器的产生创造了契机,这一领域也取得了一系列的技术突破。表 2 列举了近年 3~5 μm 稀土离子掺杂短脉冲光纤激光器的相关成果。

表 2 不同稀土离子掺杂 3~5 μm 脉冲光纤激光器

Tab.2 3-5 μm pulsed fiber lasers doped with different rare earth ions

Ion	$\lambda_{\text{output}}/\mu\text{m}$	Mechanism	Pulse duration	Repetitionrate	Pulse energy	Year	Ref.
Dy ³⁺	2.81-3.03	Q-switching	1.25 μs	50-123 kHz	0.9 μJ	2020	[50]
Dy ³⁺	3.76-3.34		0.46 μs	125 kHz	0.85 μJ	2022	[51]
Er ³⁺	3.47		0.5-1.1 μs	5-100 kHz	7.8 μJ	2018	[52]
Er ³⁺	3.4-3.7		1.18 μs	71.43 kHz	7.54 μJ	2019	[53]
Dy ³⁺	3.24	Gain-switching	300-800 ns	20-120 kHz	19.3 μJ	2020	[54]
Er ³⁺	3.55		30-50 ns	12-20 kHz	6.5 μJ	2018	[55]
Er ³⁺	3.46		1.6-3.2 μs	100 kHz	10.4 μJ	2019	[56]
Er ³⁺	3.4-3.7		1.02 μs	50 kHz	5.29 μJ	2020	[57]
Dy ³⁺	3.1	Mode-locking	0.83 ps	60 MHz	4.8 nJ	2018	[58]
Dy ³⁺	2.97-3.3		33 ps	44.5 MHz	2.7 nJ	2018	[59]
Er ³⁺	3.49		-	28.91 MHz	1.38 nJ	2018	[60]
Er ³⁺	3.47		53 ps	36.23 MHz	1.38 nJ	2020	[61]
Er ³⁺	3.54		0.58 ps	68 MHz	3.2 nJ	2021	[62]

3.1.1 调 Q 光纤激光器

调 Q(损耗)技术是通过在谐振腔内加入调 Q 器件,周期性地调节腔内的 Q 值,在短时间内实现能量的释放,从而产生调 Q 脉冲。

在掺 Dy³⁺氟化物光纤中,2020 年,笔者所在的团队将 Fe₃O₄ 纳米颗粒沉积在金镜上作为被动调 Q 器件^[50],将该器件插入可调谐的掺 Dy³⁺:ZBLAN 光纤激光器中,在 2812.4~3031.6 nm 的可调谐范围内获得了稳定的调 Q 脉冲,最大输出功率达到了 111.0 mW。2022 年,采用自制的 1.69 μm 高功率随机拉曼光纤激光泵浦包含 InAs 可饱和吸收体和刻线式衍射光栅的掺 Dy³⁺:ZBLAN 谐振腔,可以在 2.775~3.320 μm/2.765~

3.338 μm 实现稳定的调 Q 输出,这是迄今为止稀土掺杂光纤脉冲激光器实现的最大波长调谐范围^[51]。

在掺 Er³⁺氟化物光纤中,2018 年,澳大利亚阿德莱德大学 N. Bawden 等使用声光调制器作为调 Q 器件,采用级联双波长泵浦方案,在掺 Er³⁺:ZBLAN 光纤中实现了平均功率高达 350 mW 的 3.47 μm 调 Q 脉冲输出^[52,63]。在被动调 Q 方面,2018 年,上海交通大学 Z. P. Qin 等人利用黑磷和 ZnO 颗粒这两种可饱和吸收体,结合双波长级联泵浦方案(970 nm+1 973 nm),在掺 Er³⁺:ZBLAN 光纤激光器中实现了平均功率 120 mW 的 3.462 μm 的被动调 Q 脉冲^[60,64]。同年,笔者课题组使用 976 nm 和 1 981 nm 激光器作为泵浦^[53],

基于 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体作为被动调 Q 器件, 采用平面光栅作为调谐器件, 搭建了如图 6 所示的激光系统。在 3478.0 nm 的调谐波长处, 实现了平均功率为 583.7 mW 的调 Q 脉冲输出, 脉冲能量为 7.54 μJ , 斜率效率为 15.2%, 脉宽和重复频率分别为 1.18 μs 和 71.43 kHz。通过转动光栅, 实现了 3407.2~3701.1 nm 的连续调谐, 这项工作实现是第一个在 3.4 μm 以上波段可调谐的稀土掺杂脉冲光纤激光器。

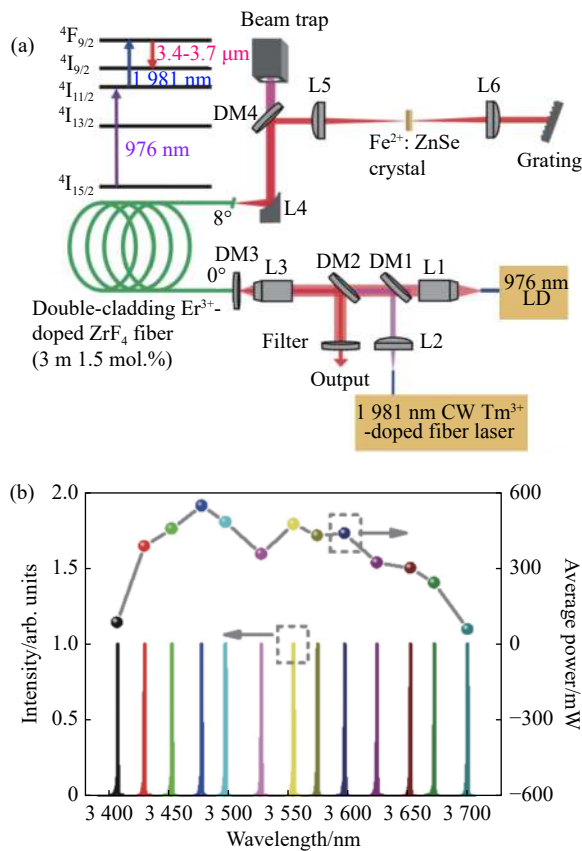


图 6 (a) 基于 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 晶体调 Q $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤激光器的实验装置; (b) 平均输出功率与波长调谐^[53]

Fig.6 (a) Experimental setup of the $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ crystal-based Q-switched $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ fiber laser; (b) Average output power and wavelength tunability^[53]

在 Ho^{3+} 掺杂调 Q 光纤激光器方面, 笔者课题组做了大量的工作, 2013 年, 课题组在掺 Ho^{3+} 光纤激光器中获得了覆盖 2.95~3.031 μm 的主动调 Q 脉冲^[65]。2015 年, 报道了波长可调谐的被动调 Q 掺 Ho^{3+} 光纤激光器, 激光器的波长调谐范围为 2.919~3.004 μm ^[66]。但这些工作都是基于掺 Ho^{3+} 氟化物光纤中 ($^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7$) 的跃迁 (对应辐射中心波长: 2.940 μm)。对于长波区

间~3.2 μm 和~3.9 μm 对应的两个跃迁过程 ($^5\text{S}_2 \rightarrow ^5\text{F}_3$) 和 ($^5\text{I}_5 \rightarrow ^5\text{I}_6$), 由于近些年一直无法实现激光的高效激励, 还难以用于调 Q 脉冲的产生。

3.1.2 增益调制光纤激光器

增益调制技术通过主动地调节激光器的增益, 实现微秒量级脉冲的输出, 在稀土离子掺杂光纤激光器中, 通常采用脉冲泵浦方式对激光器增益进行调制。

2018 年, 加拿大拉瓦尔大学 F. Jobin 等人报告了第一台基于双波长泵浦的 3.5 μm 增益调制光纤激光器, 通过脉冲宽度为几十纳秒的 1976 nm 主动调 Q 激光器和 976 nm 激光二极管泵浦 5 m 的掺杂浓度为 1.0 mol.% 的 $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤, 获得了峰值功率高达 204 W、脉宽为 30 ns、重复频率为 15 kHz 的 3.552 μm 脉冲输出^[55]。次年, 笔者所在团队选择具有微秒级宽度的 1950 nm 被动调 Q 光纤激光器系统和 976 nm 连续波激光二极管, 泵浦 3.2 m 的掺杂浓度为 1.5 mol.% 的 $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤, 在 3.46 μm 处实现最大平均功率为 1.04 W 的脉冲激光输出, 斜率效率为 24.6%, 相应的重复频率、脉冲能量、峰值功率和脉冲持续时间分别为 100 kHz、10.4 μJ 、6.46 W 和 1.61 μs , 并且通过控制 1950 nm 的脉冲激光器, 获得了 55~120 kHz 的同步增益调制脉冲^[56]。2020 年, 笔者课题组利用 976 nm 和 1981 nm 连续波激光器作为泵浦, 并采用 1981 nm 脉冲激光器对输出进行调制, 泵浦 3.2 m 的掺杂浓度为 1.5 mol.% 的 $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤, 并采用划线式衍射光栅, 获得了 3397.1~3690.2 nm (~293 nm) 的调谐脉冲输出, 在 3450.5 nm 处的最大平均功率为 264.5 mW^[57]。2020 年, 拉瓦尔大学 F. Jobin 等人报道了一种掺 Dy^{3+} 增益调制的光纤激光器。其系统见图 7, 采用 99.5% 高反和 65% 低反 FBG 构造谐振腔, 并由 2.8 μm $\text{Er}^{3+}:\text{ZrF}_4$ 脉冲振荡器作为泵浦, 产生了平均功率高达 1.4 W、脉冲能量达到 19 μJ 的 3.24 μm 激光输出, 这项工作刷新了该波段脉冲激光器的输出功率记录^[54]。

综上所述, 随着中红外增益调制、调 Q 技术以及相关器件的快速发展, 3~5 μm 短脉冲光纤激光器已经取得了很大的技术突破, 然而, 在稳定性、峰值功率和脉冲能量等指标的进一步提升上还有很长的路要走。在波长覆盖方面, 3.2 μm 掺 $\text{Ho}^{3+} (^5\text{S}_2 \rightarrow ^5\text{F}_3)$ 和~3.9 μm 掺 $\text{Ho}^{3+} (^5\text{I}_5 \rightarrow ^5\text{I}_6)$ 氟化物光纤激光器目前仍处于连续

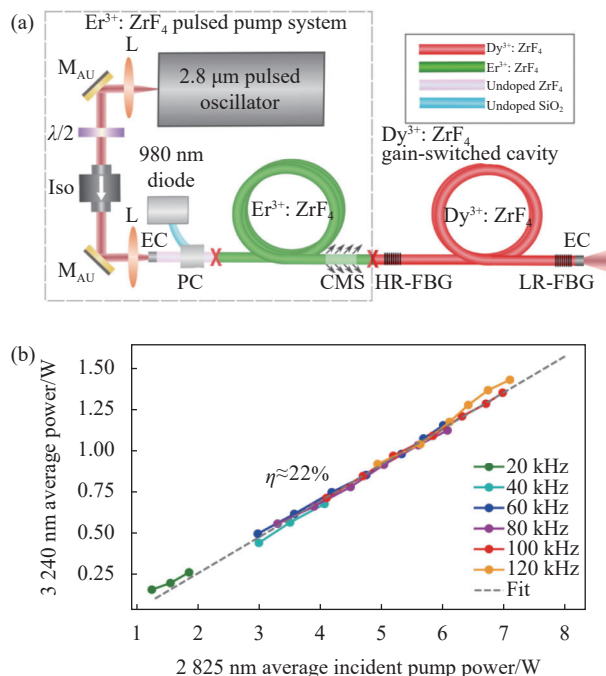


图 7 (a) 3.24 μm 掺 Dy³⁺ 光纤激光器的实验装置; (b) 输出功率特性^[54]
Fig.7 (a) Experimental setup of the gain-switched Dy³⁺-doped fiber laser at 3.24 μm; (b) Output power^[54]

激光性能的探索与提升阶段, 还无法用于有效的短脉冲激光产生。

3.2 超短脉冲 3~5 μm 光纤激光器

随着中红外锁模相关器件以及技术的日渐成熟以及超快分子成像、强场光物理等相关技术领域对中红外超短脉冲需求的不断扩大, 中红外波段锁模光纤激光器在近些年经历了快速发展, 2022 年, 笔者课题组对此进行了详细的综述报道^[20]。对于 3~5 μm 波段, 现行的锁模方法包括如下三种:

- (1) 基于材料可饱和吸收体锁模 (MSA);
- (2) 基于非线性偏振旋转锁模 (NPR);
- (3) 基于频移反馈锁模 (FSF)。

但如表 2 中所示, 3~5 μm 波段锁模激光器相关报道较少。这里针对基于上述三种方法锁模的代表性结果进行展示。

2018 年, 上海交通大学 Z. P. Qin 等人基于 MSA 锁模技术, 利用黑磷作为可饱和吸收材料, 在掺 Er³⁺: ZBLAN 光纤激光器中, 率先实现了大于 3 μm 的锁模脉冲输出, 其工作波长和信噪比分别为 3.49 μm 和 54 dB^[60]。2019 年, 米兰理工大学 Y. C. Wang 等搭建了如图 8 所示的基于 NPR 锁模的掺 Dy³⁺: ZBLAN 环

形振荡器^[58], 最终在 3.05 μm、3.08 μm 以及 3.18 μm 均获得了孤子锁模脉冲。麦考瑞大学 S. D. Jackson 等人将 FSF 锁模技术用于 3~5 μm 波段中红外皮秒脉冲产生, 使用声光可调谐滤波器, 在 2.97~3.3 μm 可调谐的掺 Dy³⁺: ZBLAN 激光器中产生了能量高达 2.7 nJ 的 33 ps 脉冲^[59]。随后, 澳大利亚阿德莱德大学 O. Henderson-Sapir 等人利用 FSF 机制产生了 3.4~3.612 μm 的 53 ps 脉冲^[61], 这是目前实现的最长波长的稀土离子掺杂光纤锁模激光。

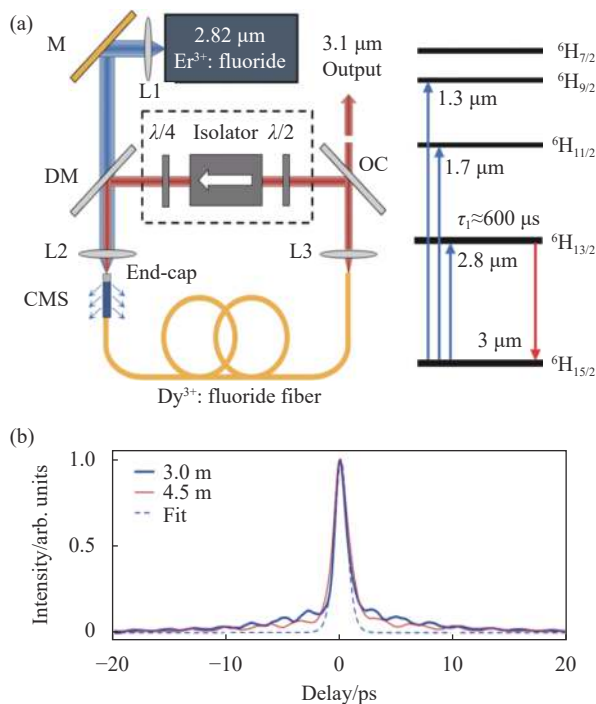


图 8 NPR 锁模的掺 Dy³⁺: ZBLAN 环形振荡器^[58]。(a) 环形光纤激光器腔和简化能级示意图; (b) 脉冲自相关轨迹

Fig.8 Dy³⁺: ZBLAN ring oscillator with NPR mode-locked^[58]. (a) Schematic diagram of the cavity and energy level of the ring fiber laser; (b) Pulse autocorrelation trace

近些年, 3~5 μm 波段超短脉冲光纤激光器实现了从无到有的突破, 但目前实现的锁模脉冲最长波长仅为 3.61 μm^[61]。此外, 锁模脉冲性能, 包括脉宽压缩、输出功率的提升、向长波长的拓展等方面仍然存在着诸多的问题需要解决和研究。

4 结论与展望

近年来, 随着氟化物光纤拉制和掺杂技术的逐步发展与成熟以及泵浦方式的优化与创新, 基于稀土离

子掺杂的中红外光纤激光器取得了长足的进步。文中分别从连续激光器和脉冲激光器两个方面回顾了近些年报道的工作在 3~5 μm 波段的稀土离子掺杂中红外光纤激光器。并总结出如下发展趋势:

(1) 输出功率进一步提升

近些年, 3 μm 以上连续光纤激光器已经实现了 15 W 的输出功率。但相对于~2.8 μm 光纤激光器, 该波段激光输出功率仍有很大的提升空间。在未来的研究中, 可以通过进一步优化泵浦结构、优化氟化物光纤的制备工艺, 优化光纤熔接技术和光纤无源器件如光纤光栅和光纤端帽的性能来进一步提升输出功率至数十瓦甚至上百瓦。

(2) 波长进一步向长波拓展

对于稀土掺杂连续激光器, 目前波长输出记录为 3.92 μm , 且自 2018 年来并未能实现进一步的突破, >4 μm 稀土离子掺杂光纤激光领域仍然是一片空白。在未来的研究中, 可以对 Dy^{3+} 中 ${}^6\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{13/2}$ 的 4.3 μm 跃迁过程进行进一步的发掘与研究。另一方面, 可以通过发展新的掺杂离子如 Tb^{3+} , 进一步拓展输出波长。

(3) 全光纤化

毫无疑问, 全光纤化结构是光纤激光系统的发展趋势, 在 3~5 μm 波段, 由于光纤功能器件的缺乏以及光纤处理技术的不完善, 当前, 3~5 μm 波段光纤激光器整体全光纤化水平较低。因此, 在未来的研究中, 应加速开发中红外激光产生所亟须的有源和无源光纤功能器件。

可以预见, 在不远的将来, 高性能、全光纤 3~5 μm 掺稀土离子中红外激光器将从实验室走向诸多实用领域, 推动工业、医疗、国防等相关领域的技术与进步。

参考文献:

- [1] Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 423-431.
- [2] Petersen C R, Moller U, Kubat I, et al. Mid-infrared supercontinuum covering the 1.4-13.3 μm molecular fingerprint region using ultra-high NA chalcogenide step-index fibre [J]. *Nature Photonics*, 2013, 8(11): 830-834.
- [3] Moller U, Yu Y, Kubat I, et al. Multi-milliwatt mid-infrared supercontinuum generation in a suspended core chalcogenide fiber [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3282-3291.
- [4] Werle P, Slemr F, Maurer K, et al. Near and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, 37(2): 101-114.
- [5] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser [J]. *Science*, 1994, 264(5158): 553-556.
- [6] Leindecke N, Marandi A, Byer R L, et al. Octave-spanning ultrafast OPO with 2.6-6.1 m instantaneous bandwidth pumped by femtosecond Tm-fiber laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(7): 7046-7053.
- [7] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 868-874.
- [8] Antipov S, Hudson 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.
- [9] Duval S, Bernier M, Fortin V. Femtosecond fiber laser reach the mid-infrared [J]. *Optica*, 2015, 2(7): 623-626.
- [10] Ma J, Qin Z, Xie G, et al. Review of mid-infrared mode-locked laser sources in the 2.0 μm -3.5 μm spectral region [J]. *Applied Physics Review*, 2019, 6(2): 021317.
- [11] Jackson S D. Continuous wave 2.9 μm dysprosium-doped fluoride fiber laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(7): 1316-1318.
- [12] Zhou Z Y, Wang Z F, Huang W, et al. Towards high-power mid-IR light source tunable from 3.8 to 4.5 μm by HBr-filled hollow-core silica fibres [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 15.
- [13] Chang P, Luo H, Wu Q, et al. Tunable mid-infrared Raman soliton generation from 2.80 to 3.17 μm based on fluorotellurite fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(21): 1183-1186.
- [14] Liu L, Cheng T, Nagasaka K, et al. Coherent mid-infrared supercontinuum generation in all-solid chalcogenide microstructured fibers with all-normal dispersion [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(2): 392-395.
- [15] He H, Jia Z, Wang T, et al. Intense emission at ~3.3 μm from Er^{3+} doped fluorindate glass fiber [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 1057-1060.
- [16] Henderson-sapir O, Malouf A, Bawden N, et al. Recent advances in 3.5 μm erbium-doped mid-infrared fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(3): 0900509.
- [17] Majewski M R, Woodward R I, Carreé J Y, et al. Emission beyond 4 μm and mid-infrared lasing in a dysprosium-doped indium fluoride (InF_3) fiber [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8):

- 1926-1929.
- [18] Tsang Y H, El-Taher A E, King T A, et al. Efficient 2.96 μm dysprosium-doped fluoride fibre laser pumped with a Nd: YAG laser operating at 1.3 m [J]. *Optics Express*, 2006, 14(2): 678-685.
- [19] Majewski M R, Woodward R I, Jackson S D. Dysprosium mid-infrared lasers: current status and future prospects [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(3): 1900195.
- [20] Luo H Y, Li J F. Progress on mid-infrared mode-locked fluoride fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 49(1): 0101003. (in Chinese)
- [21] Jackson S D, Jain R K. Fiber-based sources of coherent MIR radiation: key advances and future prospects [J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 30964-31019.
- [22] Többen H. CW lasing at 3.45 μm in erbium-doped fluorozirconate fibres [J]. *Frequenz*, 1991, 45(9-10): 250-252.
- [23] Schneider J. Fluoride fibre laser operating at 3.9 μm [J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(15): 1250-1251.
- [24] Carbonnier C, Tobben H, Unrau U B. Room temperature CW fibre laser at 3.22 μm [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(9): 893-894.
- [25] Wang J, Zhu X, Norwood R A, et al. Beyond 3 μm Dy³⁺/Er³⁺ co-doped ZBLAN fiber lasers pumped by 976 nm laser diode [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(15): 151101.
- [26] Amin M Z, Majewski M R, Woodward R I, et al. Novel near-infrared pump wavelengths for dysprosium fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(20): 5801-5808.
- [27] 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.
- [28] Fortin V, Jobin F, Larose M, et al. 10-W-level monolithic dysprosium-doped fiber laser at 3.24 μm [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(3): 491-494.
- [29] Jobin F, Paradis P, Aydin Y O, et al. Recent developments in lanthanide-doped mid-infrared fluoride fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2022, 30(6): 8615-8640.
- [30] Henderson-sapir O, Munch J, Ottaway D J. Mid-infrared fiber lasers at and beyond 3.5 μm using dual wavelength pumping [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 493-496.
- [31] Maes F, Fortin V, Bernier M, et al. 5.6 W monolithic fiber laser at 3.55 μm [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(11): 2054-2057.
- [32] Wang C C, Luo H, Yang J, et al. Watt-level $\sim 3.5 \mu\text{m}$ Er³⁺-doped ZrF₄ fiber laser using dual-wavelength pumping at 655 and 1 981 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(15): 784-787.
- [33] Lemieux-tanguay M, Fortin V, Boilard T, et al. 15 W monolithic fiber laser at 3.55 μm [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(2): 289-292.
- [34] Luo H, Wang Y, Chen J, et al. Red-diode-clad-pumped Er³⁺/Dy³⁺ codoped ZrF₄ fiber: A promising mid-infrared laser platform [J]. *Optics Letters*, 2022, 47(20): 5313-5316.
- [35] Li J, Hudson D D, Jackson S D. High-power diode-pumped fiber laser operating at 3 μm [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3642-3644.
- [36] Li J, Hudson D D, Jackson S D. Tuned cascade laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(14): 1215-1217.
- [37] Maes F, Fortin V, Poulain S, et al. Room-temperature fiber laser at 3.92 μm [J]. *Optica*, 2018, 5(7): 761-764.
- [38] Majewski M R, Jackson S D. Highly efficient mid-infrared dysprosium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2173-2176.
- [39] Majewski M R, Jackson S D. Tunable dysprosium laser [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(19): 4496-4498.
- [40] 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.
- [41] Majewski M R, Woodward R I, Jackson S D. Dysprosium-doped ZBLAN fiber laser tunable from 2.8 μm to 3.4 μm , pumped at 1.7 μm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(5): 971-974.
- [42] Wang Y, Luo H, Gong H, et al. Watt-level and tunable operations of 3 μm -class dysprosium ZrF₄ fiber laser pumped at 1.69 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(14): 737-740.
- [43] 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.
- [44] Henderson-sapir O, Munch J, Ottaway D J. New energy-transfer upconversion process in Er³⁺: ZBLAN mid-infrared fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 6869-6883.
- [45] Maes F, Fortin V, Bernier M, et al. Quenching of 3.4 μm dual-wavelength pumped erbium doped fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2017, 53(2): 1-8.
- [46] 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.
- [47] Qin Z, Xie G, Ma J, et al. Mid-infrared Er: ZBLAN fiber laser reaching 3.68 μm wavelength [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(11): 111402.
- [48] Zhou F, Li J, Luo H, et al. Numerical analysis of 3.92 μm dual-wavelength pumped heavily-holmium-doped fluorozirconate fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 39(2): 633-645.

- [49] Cao J, Wei C, Zhou H, et al. Modeling and optimization of cascaded lasing in a holmium doped fluoride fiber laser with efficient output at 3.92 μm [J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 31623-31633.
- [50] Yang J, Hu J, Luo H, et al. Fe_3O_4 nanoparticles as a saturable absorber for a tunable Q-switched dysprosium laser around 3 μm [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(1): 70-77.
- [51] Wang Y, Luo H, Wu H, et al. Tunable pulsed dysprosium laser within a continuous range of 545 nm around 3 μm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(14): 4841-4847.
- [52] Bawden N, Matsukuma H, Henderson-sapir O, et al. Actively Q-switched dual-wavelength pumped Er^{3+} : ZBLAN fiber laser at 3.47 μm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(11): 2724-2727.
- [53] Luo H, Yang J, Li J, et al. Widely tunable passively Q-switched Er^{3+} -doped ZrF_4 fiber laser in the range of 3.4-3.7 μm based on a Fe^{2+} : ZnSe crystal [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(9): 1106-1111.
- [54] Jobin F, Paradis P, Fortin V, et al. 1.4 W in-band pumped Dy^{3+} -doped gain-switched fiber laser at 3.24 μm [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(18): 5028-5031.
- [55] Jobin F, Fortin V, Maes F, et al. Gain-switched fiber laser at 3.55 μm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(8): 1770-1773.
- [56] Luo H, Yang J, Liu F, et al. Watt-level gain-switched fiber laser at 3.46 μm [J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 1367-1375.
- [57] Yang J, Luo H, Liu F, et al. Widely tunable gain-switched Er^{3+} -doped ZrF_4 fiber laser from 3.4 to 3.7 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(20): 1335-1338.
- [58] Wang Y, Jobin F, Duval S, et al. Ultrafast Dy^{3+} : fluoride fiber laser beyond 3 μm [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(2): 395-398.
- [59] Woodward R I, Majewski M R, Jackson S D. Mode-locked dysprosium fiber laser: Picosecond pulse generation from 2.97 to 3.30 μm [J]. *APL Photonics*, 2018, 3(11): 116106.
- [60] Qin Z, Hai T, Xie G, et al. Black phosphorus Q-switched and mode-locked mid-infrared Er: ZBLAN fiber laser at 3.5 μm wavelength [J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8224-8231.
- [61] Henderson-sapir O, Bawden N, Majewski M R, et al. Mode-locked and tunable fiber laser at the 3.5 μm band using frequency-shifted feedback [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(1): 224-227.
- [62] Bawden N, Henderson-sapir O, Jackson S D, et al. Ultrafast 3.5 μm fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(7): 1636-1639.
- [63] Bawden N, Matsukuma H, Henderson-Sapir O, et al. Q-switched dual-wavelength pumped 3.5- μm erbium-doped mid-infrared fiber laser [C]//Fiber Lasers XV: Technology and Systems. SPIE, 2018, 10512: 121-126.
- [64] Guo Q, Qin Z, Wang Z, et al. Broadly tunable plasmons in doped oxide nanoparticles for ultrafast and broadband mid-infrared all-optical switching [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(12): 12770-12777.
- [65] Li J, 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.
- [66] Li J, Luo H, Wang L, et al. Tunable Fe^{2+} : ZnSe passively Q-switched Ho^{3+} -doped ZBLAN fiber laser around 3 μm [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 22362-22370.

Research progress in 3-5 μm rare earth ion doped mid-infrared fiber lasers (*invited*)

Wang Senyu, Chen Junsheng, Zhao Xinsheng, Lei Hao, Luo Hongyu, Li Jianfeng*

(State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract:

Significance In the mid-infrared band, 3-5 μm is a very special window, and it covers many intrinsic absorption peaks of molecules and atoms. Moreover, it is one of the transparent windows of the atmosphere. Therefore, lasers working in this band have great application prospects in various fields such as gas detection, material processing, biomedicine, military confrontation and remote sensing. Compared with quantum cascade lasers, solid-state lasers, and optical parametric lasers, fiber lasers have advantages of excellent beam quality, good heat dissipation,

easy miniaturization and integration, high conversion efficiency, and good robustness. It stands out in the field of mid-infrared laser and has become a cutting-edge research hotspot in the field of laser.

At present, the methods of generating 3-5 μm mid-infrared fiber laser can be roughly divided into the following three categories: 1) Direct lasing method based on rare earth ion-doped fiber; 2) Nonlinear wavelength frequency shift; 3) Supercontinuum generation. However, the latter two schemes usually using rare earth doped fiber lasers as the pump sources. In addition, the rare earth ion doped fiber lasers have advantages of high gain, large bandwidth, high nonlinear, easy integration and so on, and have gradually become one of the ideal platforms for mid-infrared. Therefore, the rare earth ion doped fiber lasers are the foundation and core of the development of 3-5 μm band laser technology.

Progress Three kinds of gain ions, Er^{3+} , Ho^{3+} and Dy^{3+} , which are commonly used in 3-5 μm fiber lasers, are introduced in detail. The current development of continuous and pulsed fluoride fiber lasers based on these ions doping is reviewed, respectively. In recent years, the performance of 3-5 μm continuous wave fiber lasers has been greatly improved. The output power of 15 W, 10.1 W and 200 mW was achieved in the 3.5 μm (Er^{3+} : ZBLAN), 3.2 μm (Dy^{3+} : ZBLAN), and 3.9 μm (Ho^{3+} : InF_3), respectively. Moreover, broadly tuning of ~ 700 nm is realized in the spectral range of 2.710-3.415 μm for a Dy^{3+} : ZBLAN continuous wave laser. On the other hand, with the rapid development of mid-infrared gain-switching, Q-switching technology and related devices, 3-5 μm short-pulse lasers have made great technical breakthroughs. The largest output power of 1.4 W is achieved in a 3.22 μm Er^{3+} : ZBLAN fiber. However, there is still a long way to go for further improvement in stability, peak power and pulse energy. Ultra-short pulse fiber lasers with 3-5 μm band have achieved breakthroughs, the longest wavelength of 3.61 μm is achieved for mode-locked mid-infrared pulses. But the mode-locking pulse performance, including pulse width compression, power/energy improvement, wavelength expansion, noise suppression and stability improvement, still have many problems to be solved and studied.

Conclusions and Prospects: In recent years, with the development and maturity of fluoride fiber drawing and doping techniques and the optimization and innovation of pumping mode, significant progress has been made in the field of middle infrared fiber lasers based on rare earth ions doping. The reported rare earth doped mid-infrared fiber lasers in the 3-5 μm band are reviewed from the perspective of continuous lasers and pulse lasers, respectively. The following trends are summarized: (1) The output power will be further improved. In recent years, continuous fiber lasers over 3 μm have achieved output power of 15 W. However, compared with the ~ 2.8 μm fiber lasers, the output power of this band still has a large room for improvement. In future studies, the output power can be further increased to tens or even hundreds of watts by further optimizing the pump structure, optimizing the preparation process of fluoride fiber, optimizing the fiber welding technology and the performance of fiber passive devices such as fiber grating and fiber end caps. (2) The wavelength will be further extended to longer wavelengths. For rare-earth ions doped continuous laser, the current recorded wavelength output is 3.92 μm , and no further breakthrough has been achieved since 2018, and the field of rare-earth ion doped fiber laser >4 μm is still a blank. In future studies, it is worthwhile to further extend the output wavelength by developing new doping ions such as Tb^{3+} . (3) Toward all-fiber configuration. There is no doubt that the all-fiber system is in line with the development trend of fiber lasers. In the band of 3-5 μm , due to the lack of fiber functional devices and the imperfection of high quality fiber processing technology, the overall all-optical fiber level is low. In the future research, the development of active and passive fiber functional devices for mid-infrared

laser generation should be accelerated.

It can be predicted that in the near future, high performance, all-fiber 3-5 μm rare earth ion-doped mid-infrared laser will move from the laboratory to many practical fields, and promote the technical development and progress of industry, medical, national defense and other related fields.

Key words: mid-infrared laser; fluoroindate fiber; rare earth ion; continuous wave laser; pulsed laser

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (U20A20210, 62005040, 61421002); Fundamental Research Funds for the Central Universities (ZYGX2021YGCX014, ZYGX2019Z012, ZYGX2020KYQD003); Natural Science Foundation of Sichuan Province, China (2023NSFSC1964, 2023NSFSC033)