

2~5 μm 全固态中红外高功率光纤激光源研究进展(特邀)

李剑峰*, 雷浩, 王森宇, 王壮, 钟文博, 谢昆林, 赵鑫生, 罗鸿禹

电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都 610097

摘要 2~5 μm 中红外波段激光在科学研究、生物医疗、通信等众多领域中都有重要的应用价值, 一直以来都是激光领域的研究热点。主要对目前国内外高功率 2~5 μm 全固态中红外光纤激光源的发展现状进行了梳理, 包括稀土离子掺杂的中红外光纤激光器、波长灵活可设计的拉曼光纤激光器和宽带超连续谱激光器, 并对 2~5 μm 全固态中红外光纤激光源的发展进行了展望。

关键词 激光器; 中红外激光; 稀土离子; 拉曼激光器; 超连续谱; 氟化物光纤

中图分类号 O436 **文献标志码** A

DOI: 10.3788/CJL231267

1 引言

2~5 μm 这一中红外波段是极重要的电磁波谱区间, 工作在这一波段的激光器可以在多个领域中发挥重要作用。在相关领域, 2~5 μm 波段存在大气透明窗口, 因此可以应用于激光雷达和红外对抗^[1]。在医疗领域, 这一波段的激光器可以应用于组织热疗、病变检测和光学相干断层扫描(OCT)等^[2-4]。在生物化学领域, 2~5 μm 波段激光可以用于分析和检测生物分子, 有助于解决生命科学中的一系列问题^[5]。在环境监测领域, 利用气体对特定波段的红外吸收谱线, 可以对大气成分进行准确监测和分析^[6]。在材料加工领域, 2~5 μm 波段光纤激光器可以用于微细加工、纳米制造和激光切割等, 它们在微观结构制造和光子器件加工中具有巨大的潜力^[7]。目前, 可用于 2~5 μm 激光产生的激光器主要包括固体激光器、量子级联激光器、带间级联激光器、光参量振荡器以及光纤激光器^[8-10]。其中, 光纤激光器具有光束质量好、热管理能力好、鲁棒性好等独特优势, 因此, 在各类中红外激光器中占有不可替代的地位, 现已成为激光的一个前沿热点研究领域, 并在近些年取得了一系列的进展^[11]。

目前, 产生 2~5 μm 光纤激光的方式主要有: 1) 基于稀土离子掺杂的中红外光纤激光器。这类激光器通过半导体激光器或者光纤激光器直接泵浦稀土离子掺杂光纤, 进而实现中红外激光的输出。基于稀土离子掺杂光纤的直接激射法是最简单亦是最基础的 2~5 μm 光纤激光产生方案^[12-13]。2) 基于非线性效应的中红外光纤激光器, 利用光纤中的非线性效应, 如拉曼

效应、自相位调制、交叉相位调制等效应, 实现波长的拓展以及频移。这类激光器包括拉曼光纤激光器、超连续谱光纤激光器以及基于拉曼孤子自频移效应的光纤激光器等。基于非线性效应的中红外光纤激光器是实现激光波长向长波方向拓展的一种有效途径, 有效地填补了稀土离子掺杂光纤激光器受跃迁能级限制的部分波段空白^[14-16]。3) 基于气体填充光纤的中红外光纤激光器, 利用气体分子(N_2O 、 HBr 、 CO_2)中的能级跃迁实现中红外激光的输出^[17-20]。这种新型的激光产生方式兼具光纤以及气体激光器的诸多优点, 但本文重点介绍全固态光纤激光器的研究进展, 对于此类激光器, 不作详细论述。

本文全面综述了基于全固态光纤的中红外激光器的研究进展和功率提升历程。其中涵盖了三类主要的中红外光纤激光器, 包括基于稀土离子掺杂的光纤激光器、拉曼光纤激光器以及中红外超连续谱光纤激光器, 并指出了其发展过程中的限制功率拓展的瓶颈问题以及解决方法。最后, 对全固态 2~5 μm 中红外光纤激光器的发展趋势进行了展望。

2 稀土离子掺杂的中红外光纤激光器

高功率 2~5 μm 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)中具有重要的应用潜力。对于该波段稀土离子掺杂光纤激光器而言, 掺杂稀土离子和基质光纤是激光系统最核心的组成部分并将直接决定激光的输出特性。这类光纤激光器通常采用短波长的半导体或光纤激光器直接激励稀土离子掺杂光纤,

收稿日期: 2023-10-10; 修回日期: 2023-12-13; 录用日期: 2023-12-20; 网络首发日期: 2023-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(U20A20210, 62005040)、四川省科技支撑计划(2023NSFSC0033, 2023NSFSC1964)、中央高校基本科研业务费(ZYGX2021YGXC014)

通信作者: *lijianfeng@uestc.edu.cn

相应的能级发生受激辐射跃迁,通过构建谐振腔实现中红外激光输出。图 1(a)所示是一个典型的中红外稀土离子掺杂光纤激光器的结构图。系统中,通过直接泵浦稀土离子掺杂中红外光纤来激发掺杂离子的受激跃迁辐射,其中,谐振腔由一对刻写在光纤布拉格光栅(FBG)构成。在 2~5 μm 波段,目前较为常用的稀土离子主要有铥离子(Tm³⁺)、铒离子(Er³⁺)、镱离子(Dy³⁺)和钬离子(Ho³⁺)这四种^[21-25]。它们的能级跃迁过程对应不同的波长辐射带,如图 1 所示。可见,这四种离子不同能级跃迁的辐射带几乎覆盖了整个 2~4 μm 波长区间,实验上已经基本实现了该

波长范围内的激光激励^[8,11]。对于基质光纤的选取:在 2 μm 附近波段,采用机械强度高、稳定性强的石英光纤。当波长超过 2.2 μm 时,受限于石英光纤高声子能量导致的指数式增长的传输损耗,须采用声子能量更低的氟化物光纤(包括 ZBLAN 氟化物光纤和 InF₃ 光纤)、硫化物光纤以及碲化物光纤等。然而,由于硫化物和碲化物光纤目前难以有效兼顾高浓度掺杂和低损传输,故该波段较为常用的仍然还是氟化物光纤。表 1 列出了 2~5 μm 波段稀土离子掺杂光纤激光器的代表性成果,其中 λ_{pump} 为泵浦波长,λ_{output} 为输出波长, P_{output} 为输出功率,η 为转换效率。可以看到,在这一波段,经过科研人员几十年的

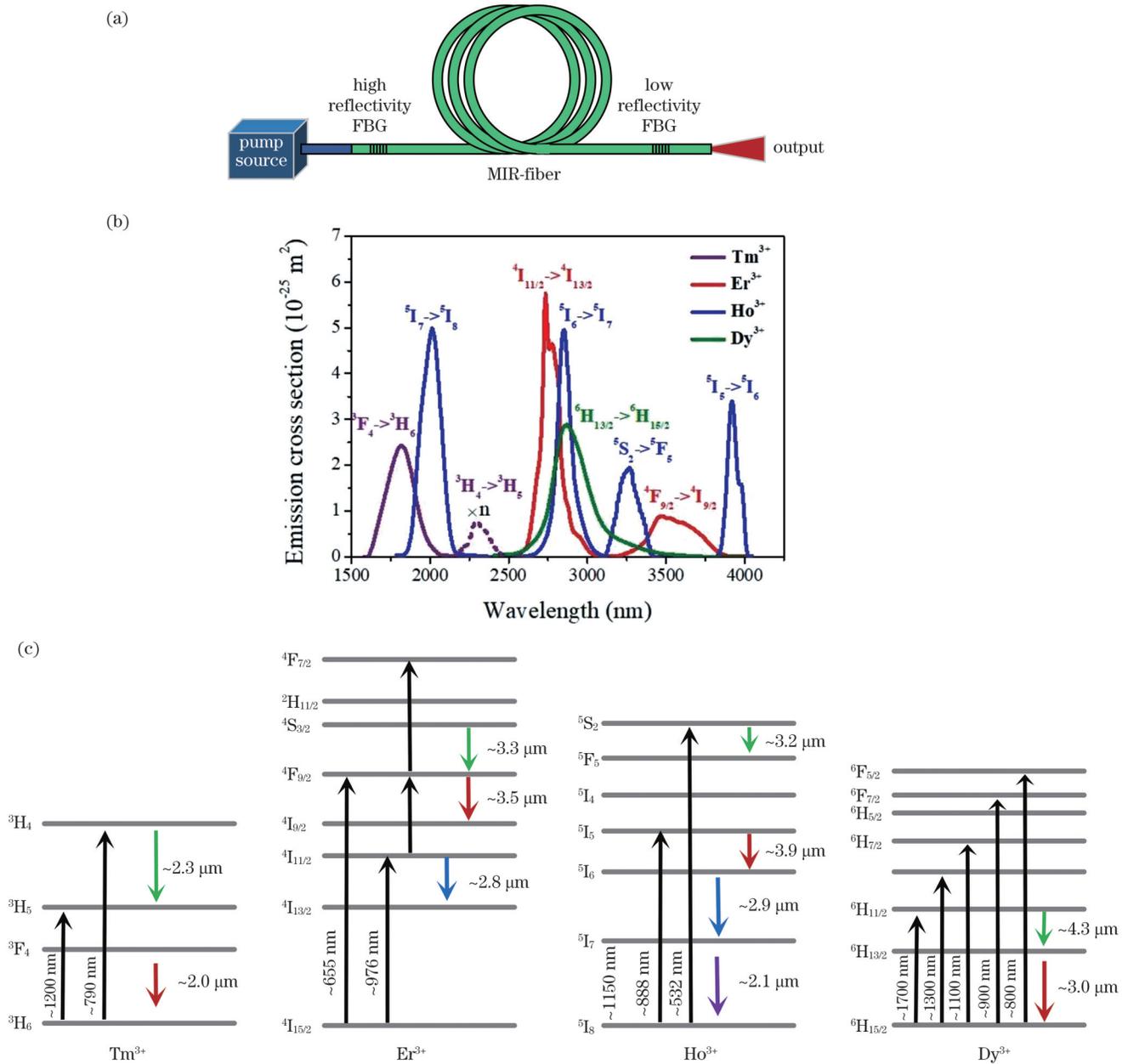


图 1 2~4 μm 中红外稀土离子掺杂光纤激光器。(a)中红外稀土离子掺杂光纤激光器的典型结构;(b)掺 Tm³⁺/Ho³⁺/Er³⁺/Dy³⁺ 石英/氟化物玻璃中不同跃迁过程对应的 2~4 μm 波段发射谱^[12];(c)相应的能级跃迁过程
 Fig. 1 2~4 μm mid-infrared fiber lasers doped with rare-earth ions. (a) Typical structure of rare-earth doped mid-infrared fiber laser; (b) emission spectra at 2~4 μm band for different transition processes in $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}/\text{Er}^{3+}/\text{Dy}^{3+}$ -doped silica/fluoride glass^[12]; (c) corresponding energy level transition processes

努力,连续波激光器的输出功率已从最初的毫瓦级别发展到如今的瓦级/千瓦级,输出功率得到了极大的提升,基于 Tm^{3+} 、 Er^{3+} 、 Ho^{3+} 以及 Dy^{3+} 四种掺杂离子实现

的光纤激光功率最高可以分别达到 1100、41.6、7.2、10.1 W^[26-29]。下文将以输出功率的提升为主线对基于这四种离子掺杂的光纤激光器进行阐述。

表 1 稀土离子掺杂 2~5 μm 光纤激光器的研究进展
Table 1 Research progress of 2~5 μm fiber lasers doped with rare earth ions

Ion	$\lambda_{\text{pump}}/\text{nm}$	$\lambda_{\text{output}}/\text{nm}$	$P_{\text{output}}/\text{W}$	$\eta/\%$	Year	Ref.
Tm^{3+}	1064	2010	1.35	37	1990	[30]
Tm^{3+}	787	2000	12.2	38	2000	[31]
Tm^{3+}	793	2040	85	56	2005	[32]
Tm^{3+}	1567	1940	415	60	2007	[33]
Tm^{3+}	793	2045	1000	53.2	2010	[34]
Tm^{3+}	793	1981	530	50	2020	[35]
Tm^{3+}	793	1950	1101	50.7	2021	[26]
Er^{3+}	476.5	2702			1988	[36]
Er^{3+}	980	2700	0.012		1998	[37]
Er^{3+}	790	2710	1.7	17.3	1999	[38]
Er^{3+}	980	2938	30.5	16	2015	[39]
Er^{3+}	980	2824	41.6	22.9	2018	[27]
Er^{3+}	976	2800	5.7	32.4	2023	[40]
Ho^{3+}	640	2830-2950	0.0126	2.9-4.4	1990	[41]
$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	1100	2840	0.21	3.2	2003	[42]
$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	1150	2940	2.5	32	2007	[43]
$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	1150	2955-3021	0.77	12.4	2011	[44]
$\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$	1150	2825-2975	7.2	29	2015	[28]
Dy^{3+}	2800	3.04	0.08	51	2016	[45]
Dy^{3+}	2830	3.15	1.06	73	2018	[46]
Dy^{3+}	800	3.02	0.105	18.5	2020	[47]
Dy^{3+}	2800	3.24	10.1	58	2019	[29]
Dy^{3+}	2825	3.05	0.36	82	2023	[48]
Er^{3+}	980+1900	3.5	0.26	25.4	2014	[49]
Er^{3+}	974+1976	3.44	1.5	19	2016	[50]
Er^{3+}	980+1900	3.55	5.6	26.4	2017	[51]
Er^{3+}	980+1900	3.55	14.9	17.2	2022	[52]
Er^{3+}	655+1981	3.5	1.72	31.5	2021	[53]
$\text{Er}^{3+}/\text{Dy}^{3+}$	659	3.4	0.8	8.8	2022	[54]
Ho^{3+}	888	3.92	0.2	10	2018	[55]

2.1 ~2 μm 掺铽石英光纤激光器

铽离子的自发辐射谱覆盖 1.8~2.1 μm ^[56-57]。2 μm 波段掺铽光纤激光器在临床医疗、气体探测、激光测距、光通信和中红外激光器等领域中有广泛应用^[58]。掺铽光纤激光器的辐射波长处于人眼安全波段,因此,可以用于激光手术中的切割和凝固,以减小对周围组织的伤害,从而提高手术的精确性和安全性,并在很大程度上降低出血量^[59]。同时,该波段存在多种气体的吸收谱线,因此可以用于气体检测,如二氧化碳和甲烷^[60]。2 μm 波段还具有高透过率和低散射的特性,在激光探测领域中具有很大的应用前景。在光通信领域,可以用于光纤放大和信号传输,有助于提高通信网络的容量和效率。此外,~2 μm 掺铽光纤激光器还被

广泛用于中红外激光器的泵浦,进而可以实现更长波长的激光输出^[61-62]。

掺铽光纤激光系统一般为准三和三能级结构,利用 Tm^{3+} 的 $^3\text{F}_4 \rightarrow ^3\text{H}_6$ 能级跃迁,可以实现 2 μm 波段激光输出。在 20 世纪 80~90 年代,研究人员对掺铽光纤激光器进行了初步的研究与探索,利用单包层掺铽光纤作为增益介质,实现了~2 μm 激光的输出。但由于单模单包层光纤的局限性,输出功率仅为毫瓦级^[63]。1988 年,双包层光纤的出现打破了光纤技术的限制,使得泵浦光功率实现大幅提升,进一步推动了掺铽光纤激光器功率的提升^[64]。同年,英国南安普敦大学的 Hanna 等^[63]首次以 797 nm 染料激光器作为泵浦源,采用掺铽(摩尔分数为 8.3×10^{-4}) 光纤作为增益介质,实

现了 2.7 mW 的激光输出,激光效率为 13%。1990 年,该课题组利用 1064 nm 的 Nd:YAG 激光器作为泵浦源,以 70 cm 长的掺铥光纤作为增益介质,将激光器的输出功率提高到瓦级^[30]。然而,由于 1064 nm 激光器作为泵浦源时铥离子的吸收截面较小且存在严重的激发态吸收问题,故进一步提高功率具有一定的挑战性。

随着双包层光纤的进一步普及以及半导体激光技术的飞速进步,高功率掺铥光纤激光器的发展也迈入了全新的阶段。2005 年,悉尼大学光子技术中心采用 793 nm 半导体激光器作为泵浦源,以长度为 1.8 m 的掺铥(摩尔分数为 2.2%)光纤作为增益介质,实现了最高输出功率近百瓦的 2040 nm 激光输出,斜率效率为 56%^[32]。2010 年,Q-Peak 和 Nufern 公司报道了第一台千瓦级别的掺铥光纤激光器^[34]。该激光系统采用两级放大的全光纤主振荡功率放大结构,通过 12 个半导体激光器进行泵浦,首次将~2 μm 掺铥光纤激光器的输出功率提升至千瓦级别,斜率效率高达 53.2%。2021 年,美国空军实验室的 Anderson 等^[26]报道了一项新的技术突破。该研究利用全光纤主振荡功率放大器(MOPA)结构,如图 2 所示,通过合束高亮度二极管,在超过 2 kW 的泵浦光功率下,最终实现了 1.1 kW 的 1950 nm 激光输出,激光效率为 50.7%,光束质量因子(M^2)小于 1.1,这一技术突破再次刷新了国际上关于掺铥光纤激光器最高输出功率的纪录。

国内以国防科技大学、中国科学院上海光学精密机械研究所、华中科技大学等机构为代表的研究团队也在 2 μm 掺铥光纤激光器这一领域取得了一系列的突破。2010 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的

唐玉龙团队采用国产双包层掺铥光纤作为增益介质,实现了 150 W 的 2040 nm 激光输出,斜率效率达到了 56.3%^[65]。2013 年,国防科技大学的王雄团队报道了全光纤结构的高功率单频掺铥光纤激光器,实现了超百瓦的 1970 nm 激光输出,斜率效率为 50%^[66]。2014 年,清华大学的胡震岳团队进一步将输出功率提升到 227 W^[67]。2016 年,北京工业大学的刘江团队报道了全光纤 MOPA 结构的掺铥光纤激光器,将输出功率提升至 342 W^[68]。2017 年,复旦大学的 Yao 等^[69]基于包层泵浦,最终获得了 400 W 的 1941 nm 激光输出,效率为 53%。2020 年,华中科技大学的刘茵紫等^[35]改进了双包层大模场掺铥光纤并采用 793 nm 半导体激光器作为泵浦源,最终实现了 530 W 的 1980 nm 激光输出。这项结果也是目前国内 2 μm 波段全光纤掺铥激光器所实现的最高输出功率,并且成功验证了国产掺铥石英光纤在高功率系统中的可靠性。尽管国产掺铥光纤激光器受掺杂光纤拉制工艺、光纤器件成熟度及泵浦源性能等条件的限制起步较晚,但近些年已经取得了长足的进步,并实现了一系列的突破。未来,国产高功率 2 μm 掺铥光纤激光器将会在功率、斜率效率等指标上进一步提升,以满足不同领域对 2 μm 高功率激光器的需求。

近年来,掺铥光纤激光器的输出功率不断提高,最高已达到千瓦级别,但仍存在一些技术限制。例如,光纤损伤和光纤非线性效应可能会影响激光器的稳定性和输出质量;光纤耦合器等光纤器件的性能限制了功率的进一步提升。未来,可以通过探索新型泵浦结构、改进光纤设计和提高泵浦源的效率来进一步提升 2 μm 掺铥光纤激光器的输出特性。

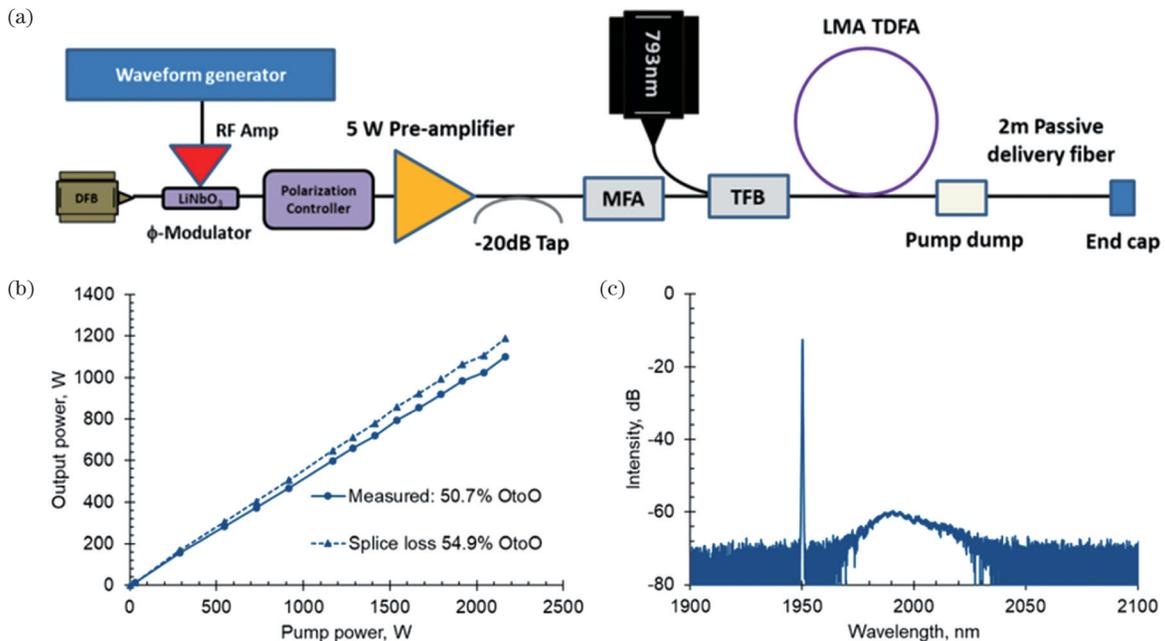


图 2 1100 W 包层泵浦掺铥全光纤放大器^[26]。(a)激光系统;(b)斜率效率;(c) 1.1 kW 输出功率下的光谱

Fig. 2 1100 W cladding-pumped thulium-doped all-fiber amplifier^[26]. (a) Laser system; (b) slope efficiency; (c) spectrum at 1.1 kW output power

2.2 ~2.8 μm 的掺铒氟化物光纤激光器

稀土离子 Er^{3+} 具有较为丰富的能级结构,如图 1(c) 所示,基于 980 nm 泵浦,可以激发 ${}^4\text{I}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ 这一能级跃迁过程,对应 2.8 μm 激光的发射。然而对于这一过程,存在自终止效应,即 Er^{3+} 的上能级寿命 (${}^4\text{I}_{11/2}$, $\tau_2=6.8$ ms) 小于下能级寿命 (${}^4\text{I}_{13/2}$, $\tau_1=8.7$ ms),因此激光上能级粒子数会小于下能级粒子数,难以实现 Er^{3+} :ZBLAN 光纤激光器的高效稳定输出^[70]。为解决这一问题,主要思路是转移下能级 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 上的粒子,从而实现 2.8 μm 激光的粒子数反转。目前,常用的三种方法如下:1) $\text{Pr}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 共掺。通过 Er^{3+} 的 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 能级与 Pr^{3+} 的 ${}^3\text{F}_3$ 能级之间的能量转移(ET),减少 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 能级的粒子数,从而形成反转。由于光子之间的转换比例为 1:1,故斜率效率最高只能到斯托克斯极限^[71]。2) 重掺杂 Er^{3+} 。 Er^{3+} 之间的能量传递上转换(ETU)包括 ETU1 [$({}^4\text{I}_{13/2})({}^4\text{I}_{13/2}) \rightarrow ({}^4\text{I}_{9/2})({}^4\text{I}_{15/2})$] 和 ETU2 [$({}^4\text{I}_{11/2})({}^4\text{I}_{11/2}) \rightarrow ({}^4\text{F}_{7/2})({}^4\text{I}_{15/2})$] 两个过程,在重掺杂下,ETU1 发生的概率更大,故 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 能级的粒子数快速消耗形成粒子数反转。更为重要的是,在 ETU1 过程中, ${}^4\text{I}_{13/2}$ 能级的能量回收使得激光器的斜率效率最高可以达到两倍斯托克斯极限^[72]。3) 基于低浓度掺杂光纤中的级联 ${}^4\text{I}_{13/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ 跃迁,利用 ~1.6 μm 激光激励有效释放 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 能级离子。该方法理论上具有 100% 的光光转化效率,而为了削弱其他能量传递过程,需要在低掺杂浓度下运转,是实现低产热、高功率输出的一种有效方法。

1988 年,英国电信研究实验室的 Brierley 等^[36] 报道了第一台由 475.5 nm 激光泵浦的 2.7 μm 掺 Er^{3+} 光

纤激光器。1998 年,挪威科技大学的 Poppe 等^[37] 使用最大输出功率为 1 W 的 980 nm 激光进行泵浦,实现了输出功率为 12 mW 的 2.7 μm 连续激光输出。泵浦的纤芯耦合效率只有 50% 左右。 Er^{3+} :ZBLAN 光纤激光器的限制因素主要是泵浦源与光纤:对于泵浦源,激光二极管(LD)技术不够成熟,缺少大功率、高光束质量源;对于光纤, Er^{3+} :ZBLAN 工艺不够成熟,稳定性差,掺杂浓度很低,只有 1% (摩尔分数)。得益于半导体激光器的发展与 ZBLAN 光纤制备技术的进步,1999 年,英国曼切斯特大学的 Jackson 等^[38] 利用 $\text{Pr}^{3+}/\text{Er}^{3+}$ 共同掺杂的方法实现了 1.7 W 的激光输出,这是首次实现输出功率从毫瓦到瓦量级的转变。以上激光器结构均采用空间耦合方式对增益光纤进行泵浦,这种方式存在耦合效率低下、光纤端面易损等缺点,限制了高功率激光的输出。2007 年,加拿大拉瓦尔大学成功在 ZBLAN 光纤上利用 800 nm 飞秒激光器刻写布拉格光栅^[73],实现了激光器结构的全光纤化。2015 年,他们基于 980 nm 的单端泵浦,用高反(99%)光栅、低反(15%)光栅和 Er^{3+} :ZBLAN 光纤构成谐振腔,利用 AlF_3 光纤端帽减少 OH^- 侵蚀^[39],实现了 30.5 W 的激光输出。2017 年,该课题组又利用 980 nm 的 LD 泵浦低浓度的 Er^{3+} :ZBLAN 光纤,通过级联 ~1.6 μm 激光跃迁,再借助腔内 ~1.6 μm 激发态吸收过程,实现了离子的循环利用,获得了效率高达 49.5% 的 ~2.8 μm 激光输出,大幅突破了 Stokes 效率转换极限^[74]。2018 年,该团队进一步实现了 41.6 W 的 2824 nm 激光输出^[27],实验装置结构如图 3 所示。利用 800 nm 的飞秒脉冲

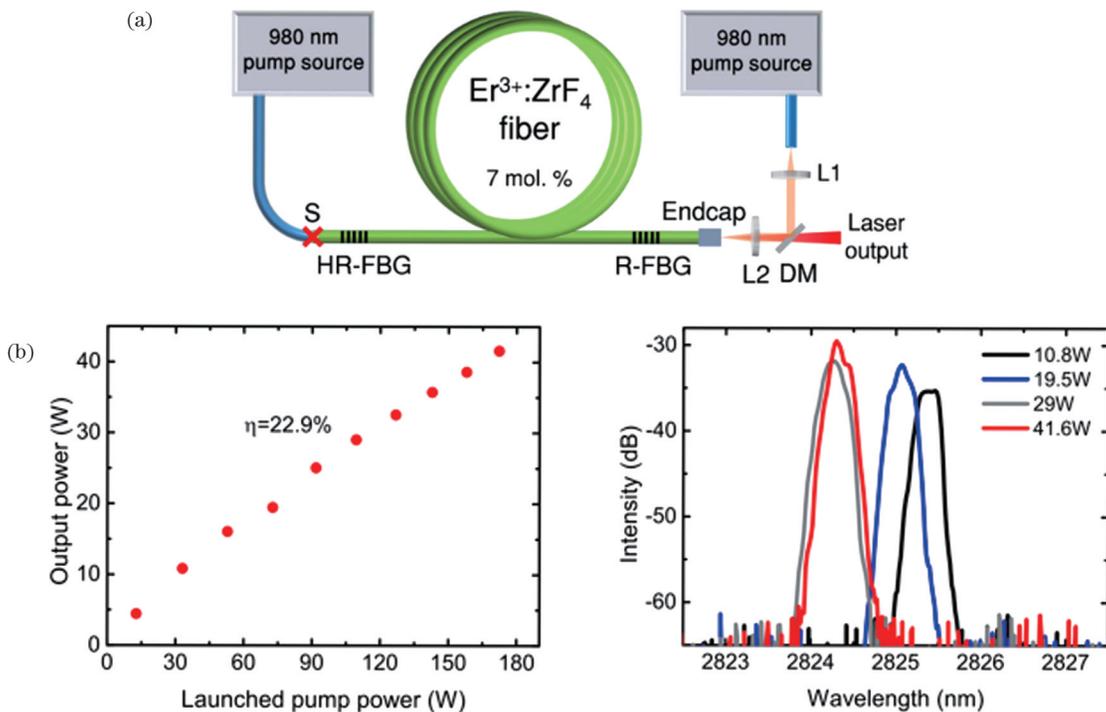


图 3 高功率双端泵浦 Er^{3+} :ZBLAN 全光纤激光器^[27]。(a) 激光系统; (b) 斜率效率; (c) 输出光谱

Fig. 3 High-power dual-end pumped Er^{3+} :ZBLAN all-fiber laser^[27]. (a) Laser system; (b) slope efficiency; (c) output spectra

和扫描相位掩模技术将高反光栅与低反光栅写入 $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤纤芯,避免了腔内拼接。通过双端泵浦,降低有源光纤前端的最高温度,所实现的超 40 W 的功率输出是目前 $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤激光器在中红外波段所实现的最高功率。最近,本课题组利用 $1.69\ \mu\text{m}$ 的随机光纤激光器泵浦低掺杂浓度的 $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤,通过共振的基态吸收和激发态吸收过程,实现了 6.03 W 的 $\sim 2.8\ \mu\text{m}$ 激光输出,斜率效率高达 58.4%^[75],同时通过考虑热损伤和光损伤,在理论上预测了该方法实现百瓦级激光输出的可能性。 $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤激光器经过数十年的发展,在输出功率等指标上已经实现了巨大的提升,但相对于 $2\ \mu\text{m}$ $\text{Tm}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤激光器千瓦级别的输出功率, $\text{Er}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤激光器的功率水平仍有较大的提升空间。对于该类激光器的研究,进一步稳定提升光纤激光器的输出功率是未来的主要研究方向。

2.3 $\sim 2.9\ \mu\text{m}$ 掺钬氟化物光纤激光器

掺 Ho^{3+} 与掺 Er^{3+} 氟化物光纤具有相似的能级结构,如图 1(c) 所示,利用 $\sim 1150\ \text{nm}$ 泵浦激发 $^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7$ 这一跃迁过程,可以实现 $\sim 2.9\ \mu\text{m}$ 激光输出。1990 年,德国不伦瑞克理工大学的 Wetenkamp^[41] 利用 $640\ \text{nm}$ 泵浦源泵浦掺杂 $\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤,实现了 $2.83\sim 2.95\ \mu\text{m}$ 激光输出,但最大输出功率仅为 $12.6\ \text{mW}$,斜率效率仅为 $2.9\%\sim 4.4\%$ 。输出功率与斜率效率低下的原因主要是 Ho^{3+} 的 $^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7$ 跃迁过程同样存在自终止效应,因此可以考虑采用与 Er^{3+} 类似的能量传递上

转换、级联跃迁以及离子共掺方式,但考虑到能量传递速率的相对差异,目前较为常用的还是利用 Pr^{3+} 离子的共掺和级联跃迁。2003 年,澳大利亚悉尼大学的 Jackson^[42] 利用 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺 ZBLAN 光纤实现了 $210\ \text{mW}$ 的 $2.84\ \mu\text{m}$ 激光输出,但效率较低,仅为 3.2% 。2009 年,该课题组利用 $1150\ \text{nm}$ 的 LD 泵浦双包层 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺 ZBLAN 光纤 (Ho^{3+} 的摩尔分数为 3% , Pr^{3+} 的摩尔分数为 0.25%),实现了 $2.5\ \text{W}$ 的 $2.94\ \mu\text{m}$ 激光输出,斜率效率高达 32% ^[43],大幅提升了激光器的性能。2011 年,本课题组采用级联泵浦的方式泵浦 $10\ \text{m}$ 低掺杂 $\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤,实现了 $2.955\sim 3.021\ \mu\text{m}$ 范围内波长可调谐的激光输出,这是首次在室温条件下实现的 $>3\ \mu\text{m}$ 瓦级激光输出^[44,13]。2015 年,澳大利亚悉尼大学的 Crawford 等^[28] 利用 $1150\ \text{nm}$ 拉曼激光器泵浦可调谐 $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ 共掺 ZBLAN 光纤激光器,功率高达 $7.2\ \text{W}$,这也是该波段目前的最高功率水平,波长可调谐范围覆盖 $2825\sim 2975\ \text{nm}$ 。其中实验结构如图 4 所示,这是目前 Ho^{3+} 作为增益介质在 $\sim 2.9\ \mu\text{m}$ 中红外光纤激光器中的最高输出功率。 $\sim 2.9\ \mu\text{m}$ $\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤激光器的研究相对较少,同时,该类激光器的功率输出水平相对较低,难以满足实际应用的需求,这主要受限于较低的商用 $1150\ \text{nm}$ LD 功率水平。可以预见,随着 $1150\ \text{nm}$ 波段掺 Yb^{3+} 光纤激光器及拉曼光纤激光器的日益成熟, $\sim 2.9\ \mu\text{m}$ $\text{Ho}^{3+}:\text{ZBLAN}$ 光纤激光器的功率水平将会进一步提高。

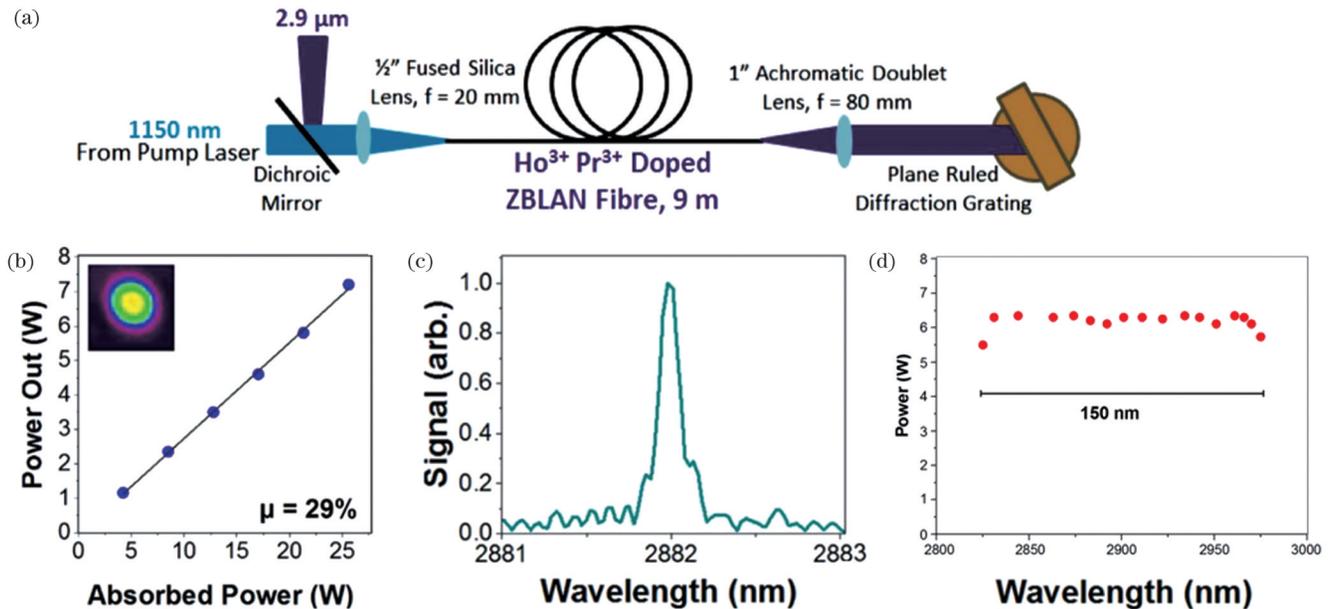


图 4 高功率 $2.9\ \mu\text{m}$ 掺钬光纤激光器^[28]。(a) 激光系统; (b) 斜率效率; (c) 输出光谱; (d) 波长可调谐性

Fig. 4 High-power $2.9\ \mu\text{m}$ holmium-doped fiber laser^[28]. (a) Laser system; (b) slope efficiency; (c) output spectrum; (d) wavelength tunability

2.4 $\sim 3\ \mu\text{m}$ 掺镱氟化物光纤激光器

在氟化物玻璃中, $\text{Dy}^{3+} (^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2})$ 与 $\text{Er}^{3+} (^4\text{I}_{11/2} \rightarrow ^4\text{I}_{13/2})$ 和 $\text{Ho}^{3+} (^5\text{I}_6 \rightarrow ^5\text{I}_7)$ 的辐射带有很大的交叠区,但相

比之下,镱离子的辐射带具有更宽的带宽,尤其是 $^6\text{H}_{13/2} \rightarrow ^6\text{H}_{15/2}$ 这一跃迁过程,所对应的辐射带为 $2.5\sim 3.5\ \mu\text{m}$ 。2003 年,澳大利亚悉尼大学的 Jackson^[76] 率先

利用 $\sim 1.1 \mu\text{m}$ 掺 Yb^{3+} 石英光纤激光器泵浦掺 Dy^{3+} 的 ZBLAN 光纤, 实现了功率约为 230 mW 的 $2.9 \mu\text{m}$ 光纤激光输出。2006 年, 英国曼彻斯特大学 Tsang 等^[77] 利用 $\sim 1.3 \mu\text{m}$ 的 Nd:YAG 激光器泵浦 60 cm 长的 Dy^{3+} :ZBLAN 光纤, 同样获得了近 W 级的 $2.96 \mu\text{m}$ 激光输出, 效率接近 20%, 但激光波长并未实现 $3 \mu\text{m}$ 的突破。2016 年, 澳大利亚麦考瑞大学的 Jackson 团队利用 $\sim 2.8 \mu\text{m}$ 光纤激光器直接泵浦 Dy^{3+} :ZBLAN 光纤, 通过激发 Dy^{3+} 离子的 ${}^6\text{H}_{13/2} \rightarrow {}^6\text{H}_{15/2}$ 跃迁过程, 实现了 $3.04 \mu\text{m}$ 的激光输出, 并获得了 51% 的斜率效率^[45]。2018 年, 该团队利用带内泵浦构建了稳定的光栅线性腔, 进一步实现了瓦级的 $3.15 \mu\text{m}$ 激光输出, 斜率效率达到了 73%^[46]。随后, 加拿大拉瓦尔大学的 Fortin 等^[29] 采用同样的 $2.83 \mu\text{m}$ 掺铒光纤激光器带内泵浦方式, 建立了图 5 所示的全光纤系统, 最终实现了 10.1 W 的 $3.24 \mu\text{m}$ 激光输出, 这是迄今为止 Dy^{3+} 离子掺杂的光纤激光器在 $3.0\sim 3.4 \mu\text{m}$ 波段所实现的最高功率水

平。2018 年, 澳大利亚麦考瑞大学的 Majewski 等^[78] 利用 $1.7 \mu\text{m}$ 的拉曼光纤激光器作为泵浦源, 在 Dy^{3+} :ZBLAN 光纤激光器中实现了 $2.807\sim 3.380 \mu\text{m}$ 范围的波长连续调谐。最近本课题组在此基础上通过理论建模, 对系统进行了精确数值优化, 通过平衡长短波边界增益, 在实验上将调谐范围拓展至 $2.710\sim 3.415 \mu\text{m}$ ^[79]。2023 年, 麦考瑞大学的 Jackson 团队利用 2825 nm Er^{3+} :ZBLAN 激光器泵浦 0.76 m 长的掺 Dy^{3+} 的 InF_3 光纤, 实现了高效的 $3.05 \mu\text{m}$ 激光输出, 输出功率为 0.36 W , 效率高达 82%^[48]。 $3 \mu\text{m}$ 波段 Dy^{3+} :ZBLAN 光纤激光器的输出功率已达到 10 W , 最大波长调谐范围超过 700 nm 。未来, 可以通过优化光纤控制技术, 制备超低损耗、更高稳定性的 Dy^{3+} :ZBLAN 光纤, 同时, 研究影响 Dy^{3+} :ZBLAN 激光器斜率效率的内在机制, 及泵浦方式、 Dy^{3+} 的掺杂浓度、增益光纤长度等因素对激光器斜率效率的影响, 提升斜率效率, 并进一步提高 Dy^{3+} :ZBLAN 光纤激光器的输出性能。

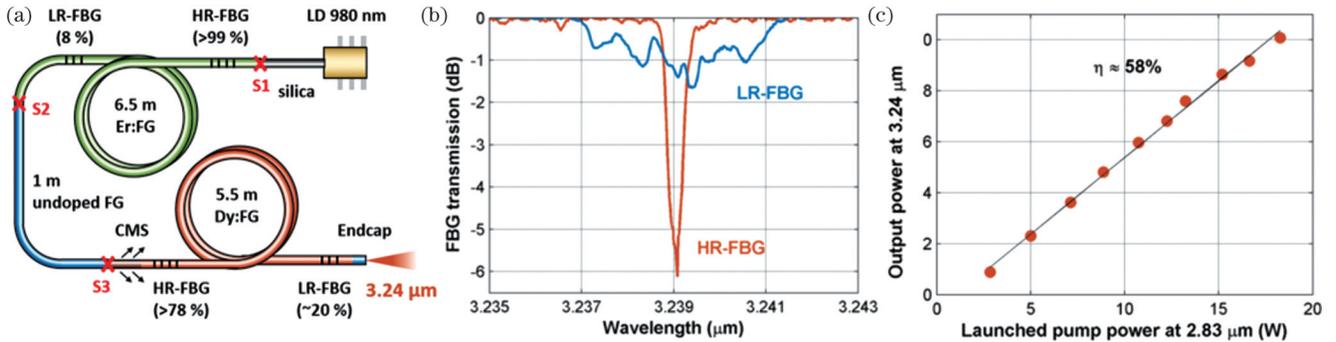


图 5 高功率全光纤 $3.24 \mu\text{m}$ 掺铒光纤激光器^[29]。(a) 激光系统; (b) 高/低反 FBG 光谱; (c) 斜率效率

Fig. 5 High-power all-fiber $3.24 \mu\text{m}$ dysprosium-doped fiber laser^[29]. (a) Laser system; (b) spectra of high/low reflectivity FBGs; (c) slope efficiency

2.5 $\sim 3.5 \mu\text{m}$ 掺铒氟化物光纤激光器

如图 1(c) 所示, 利用 $\sim 655 \text{ nm}$ 泵浦激光可以激发掺 Er^{3+} 氟化物光纤中的粒子发生 ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ 的能级跃迁, 进而实现 $3.5 \mu\text{m}$ 激光输出。1991 年, 德国不伦瑞克工业大学的 Többen^[80] 率先实现了数毫瓦的 $3.5 \mu\text{m}$ 激光输出。然而激光亚稳态能级 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 和 ${}^4\text{I}_{13/2}$ 具有长寿命, 大部分被激发的离子释放光子后长时间停留在上述两个能级上, 无法快速回到基态, 因此, 当时所采用的 655 nm 泵浦光无法维持高效的粒子循环。在随后的 20 年中, 虽然 Er^{3+} :ZBLAN 光纤的制备技术和掺杂水平有了显著提高, 但仍未解决限制 $3.5 \mu\text{m}$ 激光高效发射的主要问题——离子数瓶颈问题^[81]。直到 2014 年, 澳大利亚阿德莱德大学的 Henderson-Sapir 团队提出了双波长级联泵浦的方法, 有效地解决了这个问题^[49]。他们采用 985 nm 和 1973 nm 两种波长的激光器进行泵浦, 成功在室温下实现了 260 mW 的 $3.5 \mu\text{m}$ 激光输出。在该系统中, 985 nm 泵浦光使粒子跃迁到 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 能级, 而 1973 nm 的泵浦光则进一步将粒子抽运到上能级, 有效地促进了两个能级之间的高效循环,

将转化效率提升到了 16%。这项研究对稀土离子掺杂光纤激光器向 $3 \mu\text{m}$ 以上波段的扩展起到了极大的推动作用。随后, 在 2017 年, 加拿大拉瓦尔大学的 Maes 等^[51] 使用 976 nm 和 1976 nm 激光器泵浦 5 m 长的掺 Er^{3+} (摩尔分数为 1.0%) 的 ZBLAN 光纤, 并利用光纤布拉格光栅减轻光纤端面累积的热负荷, 实现了输出功率为 5.6 W 的 $3.55 \mu\text{m}$ 的全光纤激光器, 斜率效率为 36.9%。2022 年, 加拿大拉瓦尔大学的 Lemieux-Tanguay 等^[52] 发现了另一个与 $3.5 \mu\text{m}$ 激光输出相关的跃迁过程, 即虚拟激发态吸收 (VESA): ${}^4\text{F}_{9/2} + 1976 \text{ nm} \rightarrow {}^4\text{F}_{7/2}$ 。基于这一跃迁过程, 该团队搭建了双波长泵浦的 $3.55 \mu\text{m}$ 连续激光器, 该激光系统如图 6 所示, 其输出功率达到了 14.9 W , 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^[52]。最近, 本课题组提出利用 659 nm 的红外半导体激光器直接泵浦 $\text{Er}^{3+}/\text{Dy}^{3+}$ 共掺氟化物光纤, 借助 Er^{3+} 与 Dy^{3+} 间的相互作用过程, 率先在 $3.5 \mu\text{m}$ 波段通过半导体激光器直接泵浦实现了瓦级光纤激光输出, 同时借助 Dy^{3+} 跃迁拓宽

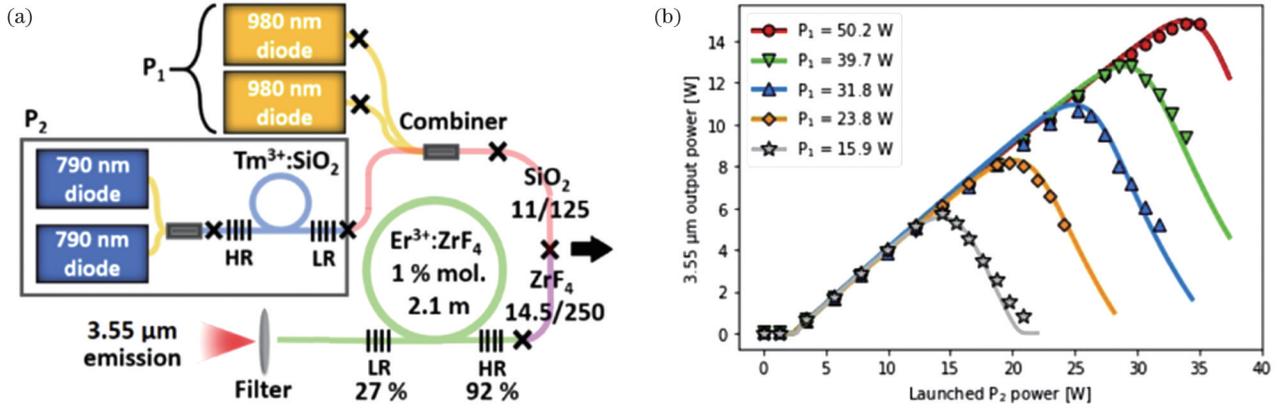


图 6 高功率全光纤 3.55 μm 掺铒光纤激光器^[52]。(a)激光系统；(b)斜率效率以及输出功率

Fig. 6 High-power all-fiber 3.55 μm erbium-doped fiber laser^[52]. (a) Laser system; (b) slope efficiency and output power

辐射带，实现了 3.05~3.70 μm 波长宽带调谐^[54]。3.5 μm 波段 Er³⁺:ZBLAN 光纤激光器的输出功率已超过 15 W，最大波长调谐范围超过 600 nm，然而，3.5 μm Er³⁺:ZBLAN 光纤激光器的输出功率仍存在诸多限制，进一步的功率放大是研究人员面临的一大挑战，并且在很大程度上受限于泵浦源功率和光纤器件的特性，探索提高 3.5 μm Er³⁺:ZBLAN 激光器系统效率的新方法仍然是未来的一项艰巨任务。

2.6 ~3.9 μm 掺钬氟化物光纤激光器

Ho³⁺ 掺杂氟化物光纤的 ⁵I₅→⁵I₆ 跃迁过程对应的输

出波长最长，采用 888 nm 激光泵浦，可以实现这一跃迁过程。然而，由于 ZBLAN 光纤在 3.9 μm 以上波段的损耗明显提升以及量子亏损和产热较大的问题，室温下的激光产生一直未能实现。直到 2018 年，加拿大拉瓦尔大学的 Maes 等^[55]利用 Ho³⁺:InF₃ 光纤作为增益介质，采用 888 nm LD 泵浦，借助 InF₃ 光纤的低损耗和低声子能量，成功搭建了图 7 所示的掺 Ho³⁺:InF₃ 光纤激光器，实现了室温下 200 mW 的 3.9 μm 激光输出，该系统的激光效率约为 10%，该结果为 3.9 μm 掺钬光纤激光器所实现的最高功率。

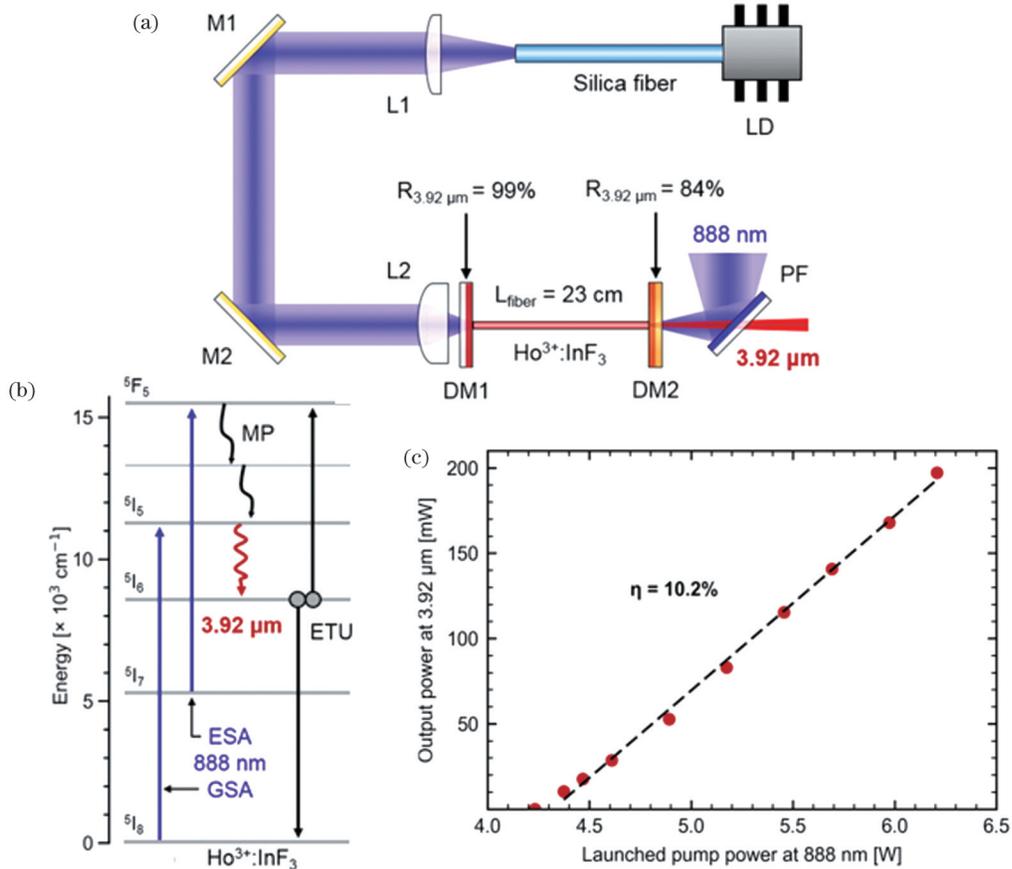


图 7 3.92 μm 掺钬光纤激光器^[55]。(a)激光系统；(b)能级示意图；(c)斜率效率以及输出功率

Fig. 7 3.92 μm Ho³⁺-doped fiber laser^[55]. (a) Laser system; (b) energy level diagram; (c) slope efficiency and output power

稀土离子掺杂光纤激光器是中红外光纤激光的基础以及核心,随着泵浦技术以及光纤拉制技术的成熟与飞速进步,这类激光器的性能也取得了重大突破。目前,最高输出功率已超过千瓦,最长输出波长达到 3.9 μm 。尽管如此,仍存在一系列的问题:1) 尽管基于石英光纤的掺铈光纤激光器已经实现了千瓦级功率的突破,但对于基于软玻璃氟化物光纤的激光器的功率提升仍受到很大的限制,并未实现百瓦级的突破;2) 受限于这四种掺杂离子的辐射带宽,目前,激光输出波长未能实现 2~5 μm 波段的全覆盖,在 4~5 μm 波段仍然是空白的;3) 基于氟化物光纤的相关器件的发展尚不成熟,商业化程度也不够高,因此,激光系统的全光纤化程度较低。但不可否认的是,在未来,2~5 μm 波段稀土离子掺杂光纤激光器具有广阔的发展前景。随着泵浦技术、光纤拉制技术以及光纤材料的不断发展,可以期待激光器的功率输出、激光质量和可调谐范围等方面的提高。稀土离子掺杂光纤激光器将继续在医疗、生物化学、环境监测、材料加工和通信等领域中发挥重要作用。

3 中红外拉曼光纤激光器

拉曼效应是实现中红外波长拓展的一种重要技术手段。目前,基于拉曼效应的中红外光纤激光器分为两类:其一是利用光纤中的受激拉曼散射(SRS)过程,实现与光纤拉曼增益谱峰相对应的定量波长位移,具有增益谱带宽大、可实现级联运转等特点,原则上可在中红外玻璃光纤材料透过窗口范围内实现任意波长的激光输出。此外,当输入脉冲以高阶孤子的形式在负

色散光纤中传输时,在其脉冲宽度达到最窄的位置处,由于峰值功率的增加,脉冲频谱迅速展宽并与拉曼增益谱重叠,会引起脉冲内拉曼散射(IRS)效应的发生。展宽光谱的短波成分可以作为泵浦光,通过有效拉曼增益对长波成分进行放大,在这个过程中,脉冲光谱不断向长波方向移动,从而获得宽波长调谐范围的中红外拉曼孤子激光输出。IRS 最终导致了脉冲自身中心频率(波长)的连续变化,人们又常常称之为孤子自频移(SSFS)效应,频移后得到的超短脉冲则称为拉曼孤子。与实现定量波长位移的拉曼光纤激光器相比,波长可调谐的拉曼孤子光纤激光器的频移介质为负色散介质,泵浦脉冲宽度更窄(一般在 fs 量级),且输出脉冲中心波长可连续调谐。下面将介绍这两类拉曼光纤激光器的研究进展。

3.1 波长灵活可设计的拉曼光纤激光器

当某一光场入射到介质中时,入射光子与介质粒子的非弹性散射,会将其一部分的功率转移至频率更小的另一个光场中,这一现象在 1928 年由印度物理学家 Raman^[82]发现,此过程即为如今所熟知的拉曼效应,其中频率更低的光称为斯托克斯光(Stokes wave)或拉曼光。当注入激光的强度达到某一阈值时,该转换过程更加迅速,泵浦光转换为功率快速增长的斯托克斯光^[83]。自从 1972 年第一台拉曼激光器被报道以来,不同波段的拉曼激光器得到了快速发展。在中红外波段,全固态光纤拉曼激光器通常选用的拉曼增益光纤是掺锗石英基光纤、氟化物玻璃光纤、硫系玻璃光纤以及碲酸盐光纤。其典型的研究进展如表 2 所示。

表 2 中红外拉曼光纤激光器的典型研究进展

Table 2 Typical research progress of mid-infrared Raman fiber lasers

Fiber	Pump wavelength / μm	Raman order	Raman wavelength / μm	Output power / W	Year	Ref.
GeO ₂ -doped silica fiber	2.008, 2.040	2	2.20, 2.43 2.24, 2.48	0.350, 0.30 0.384, 0.150	2015	[84]
	2.008	1	2.2	3	2016	[85]
	1.98	1	2.166	0.0526	2019	[86]
	1.987	1	2.177	0.893	2023	[87]
Fluoride fiber	1.94	1	2.185	0.58	2011	[88]
	1.98	1	2.231	3.66	2012	[89]
	1.55	3	1.765, 2.049, 2.438	0.0141, 0.0674, 0.0316	2022	[90]
Chalcogenide fiber	2.05	2	2.10, 2.17	0.200, 0.016	2006	[91]
	3.01	1	3.34	0.6	2013	[92]
	3.01	2	3.34, 3.77	0.112@3.77 μm	2014	[93]
	2	6	2.149–3.425		2021	[94]
Tellurite fiber	2.8	2	3–5	10	2015	[95]
	2	3	2–5	45.2@3.64 μm	2017	[96]

3.1.1 基于掺锗石英光纤的拉曼光纤激光器

传统的石英光纤因其良好的抗机械损伤、激光损伤性能和系统兼容性,而被广泛用于近红外波段的拉

曼激光器研究,是实现高功率全光纤拉曼激光器的首选拉曼增益介质。然而,石英光纤在中红外波段的损耗显著增加,导致中红外波段的拉曼光纤激光器设计

变得更具挑战性。幸运的是,当石英基光纤中的 GeO_2 含量(摩尔分数通常大于 50%)较高时,不仅能提高光纤拉曼增益,还能使光纤透射波长向中红外方向拓宽。掺锗石英光纤的拉曼频移量约为 440 cm^{-1} , $2 \mu\text{m}$ 处的拉曼增益系数约为 $5 \times 10^{-14} \text{ m} \cdot \text{W}^{-1}$, 当波长小于 $2.5 \mu\text{m}$ 时,石英光纤可作为拉曼增益介质实现拉曼激光输出。2015 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的 Jiang 等^[84] 搭建了图 8(a) 所示的全光纤拉曼激光器。通过主

动调制的方式,获得了中心波长分别位于 $2.008 \mu\text{m}$ 和 $2.04 \mu\text{m}$ 、重复频率为 8 kHz 、脉冲宽度为 100 ns 的主动调 Q 脉冲,利用自制的掺铈光纤放大器将其峰值功率提升至 2 kW 量级。利用放大后的 $2.008 \mu\text{m}$ 和 $2.04 \mu\text{m}$ 脉冲泵浦商用的掺锗石英光纤(UHNA7),分别获得了波长为 $2.43 \mu\text{m}$ 和 $2.48 \mu\text{m}$ 的二阶拉曼脉冲,如图 8(b) 所示。当光纤长度为 6 m 时, $2.43 \mu\text{m}$ 和 $2.48 \mu\text{m}$ 拉曼脉冲的最大平均功率分别为 0.30 W 和 0.15 W 。

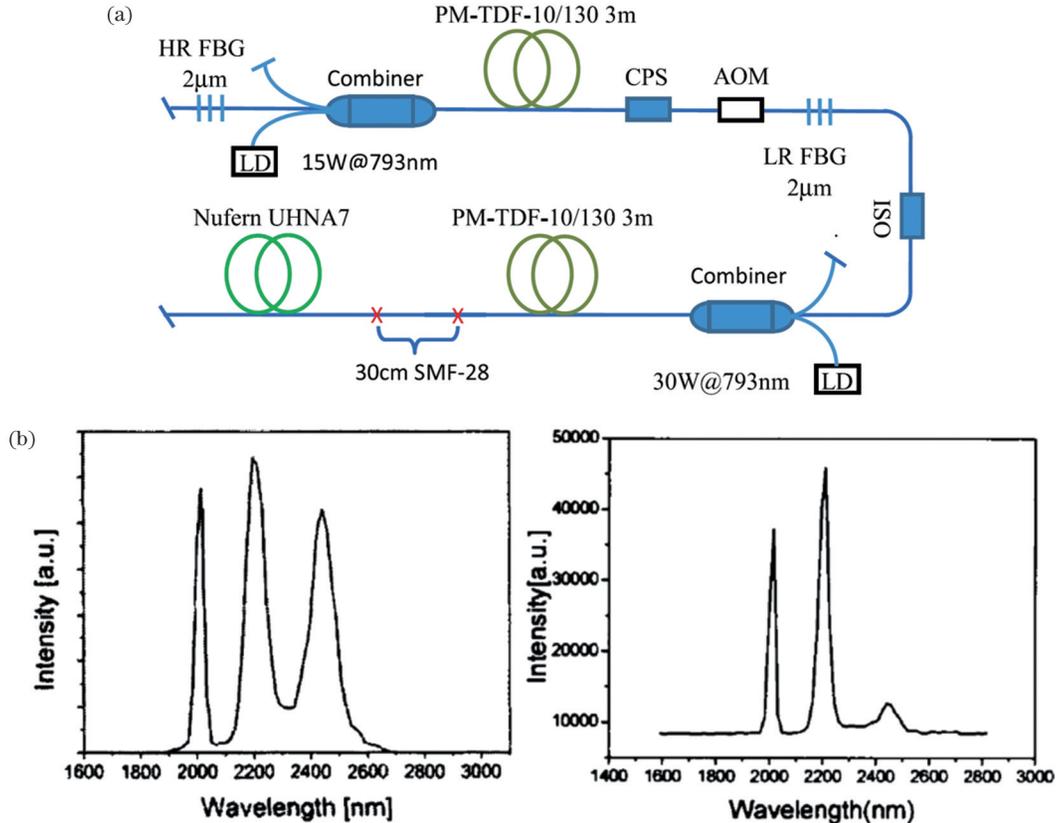


图 8 基于主动调 Q 脉冲泵浦的级联拉曼脉冲光纤激光器^[84]。(a) 激光系统; (b) 泵浦波长分别为 $2.008 \mu\text{m}$ 和 $2.04 \mu\text{m}$ 时,最大泵浦功率下的激光输出光谱

Fig. 8 Cascaded Raman pulsed fiber laser pumped by actively modulated Q-switched pulses^[84]. (a) Laser system; (b) laser output spectra at maximum pumping power when pump wavelengths are $2.008 \mu\text{m}$ and $2.04 \mu\text{m}$, respectively

随后, Jiang 等^[85] 又通过进一步优化拉曼增益光纤长度和 $2.008 \mu\text{m}$ 种子脉冲参数,抑制了级联拉曼频移产生,将 $2.2 \mu\text{m}$ 处的拉曼脉冲功率提升至 3 W 。在总输出中, $2.2 \mu\text{m}$ 拉曼信号的功率占比达到了 64.2% , 对应的拉曼转换效率为 35.9% 、峰值功率为 400 W 。这是首个获得瓦级平均功率的全光纤中红外纳秒脉冲激光器报道。

2019 年,厦门大学的 Du 等^[86] 利用脉冲宽度在 $1.10 \sim 4.94 \text{ ns}$ 范围内可调的类噪声脉冲作为泵浦源,在长度为 22 m 的高掺锗(摩尔分数为 97%)石英光纤中实现了脉冲宽度可调谐的 2166 nm 纳秒拉曼脉冲输出。该脉冲最大输出功率和脉冲能量分别为 52.65 mW 和 12.15 nJ , 最小脉冲宽度为 0.9 ns 。相较于单通拉曼结构,泵浦和拉曼光信号之间不必要的分量得到了较好

的抑制。

2023 年,电子科技大学的 Liu 等^[87] 报道了基于耗散孤子共振(DSR)方波脉冲泵浦的全光纤中红外拉曼激光器。利用 DSR 脉冲的方波特性提供恒定的拉曼增益,实现了效率达 67.4% 的泵浦-拉曼转换。在近兆赫兹量级重复频率下,获得了光谱纯度为 96.8% 、能量达 $1.03 \mu\text{J}$ 的 $2.18 \mu\text{m}$ 高能纳秒拉曼脉冲,其最大输出平均功率为 0.893 W 。总体而言,基于掺锗石英光纤的拉曼激光器因石英光纤具有优异的抗机械损伤、激光损伤性能,在输出功率的拓展方面具有优势,但是掺锗石英光纤在波长大于 $2.5 \mu\text{m}$ 的区域内,损耗会急剧增加,限制了激光器输出功率的提升以及波长的进一步拓展。

3.1.2 基于氟化物玻璃光纤的拉曼光纤激光器

氟化物玻璃光纤的拉曼频移量约为 572 cm^{-1} , 其

在 2 μm 处的拉曼增益系数较小,因此,对于氟化物光纤来说通常需要较大长度才能积累足够的增益以促进拉曼转换。此外,氟化物光纤具有较高的激光损伤阈值,是目前研制高功率中红外光纤激光光源的常用增益介质之一。2011 年,加拿大拉瓦尔大学的 Fortin 等^[88]首次报道了基于氟化物玻璃光纤的拉曼激光器,其谐振腔由一对直接刻写在氟化物玻璃光纤两端的光纤布拉格光栅构成。当氟化物光纤长度为 29 m 且 1940 nm 的泵浦光功率为 7 W 时,获得了中心波长为

2185 nm、平均功率为 0.58 W 的拉曼激光输出,初步验证了氟化物光纤在长波长拉曼激光产生方面的应用潜力。

次年, Fortin 等^[89]进一步优化了激光器结构,如图 9(a)所示,有效降低了激光的产生阈值,结合氟化物光纤的高抗损伤性能,最终实现了平均功率高达 3.66 W 的 2.231 μm 连续拉曼激光输出。2.231 μm 拉曼激光的输出功率随泵浦功率的变化如图 9(b)所示,其斜率效率为 15%。

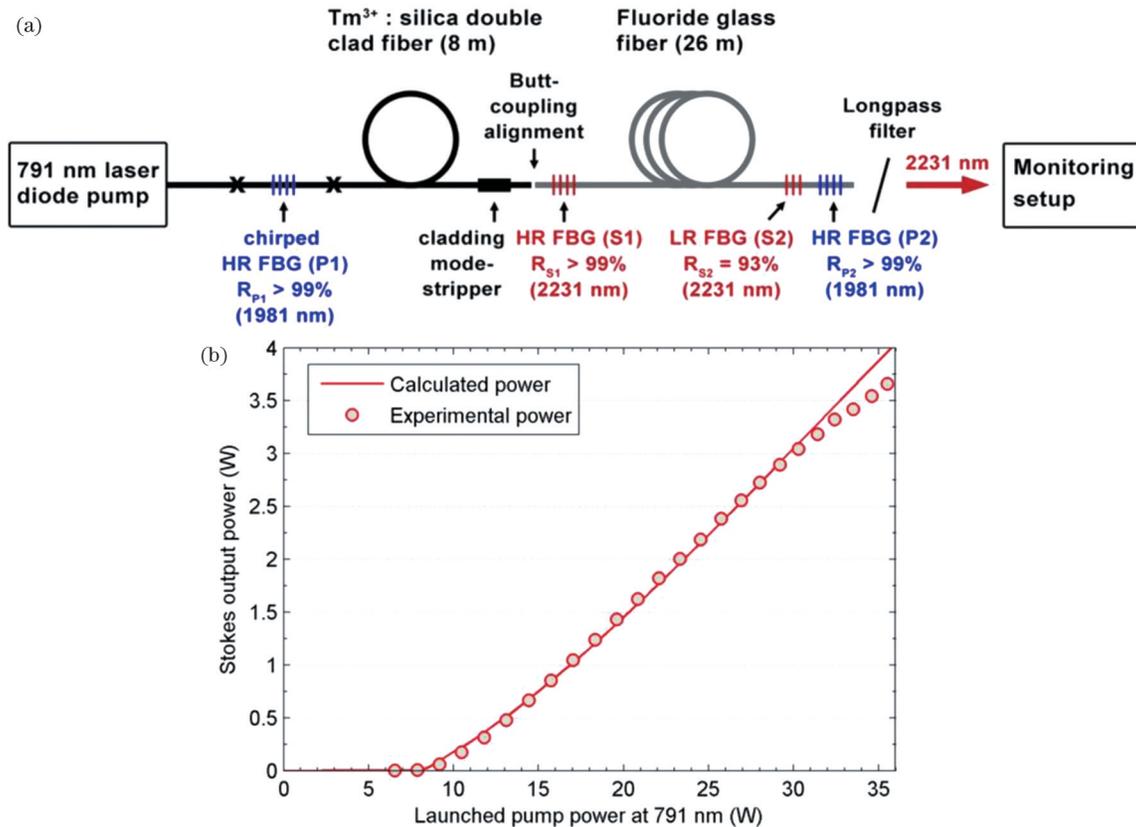


图 9 基于氟化物玻璃光纤的 2231 nm 嵌套腔结构拉曼光纤激光器^[89]。(a) 实验装置; (b) 2231 nm 拉曼激光输出功率随泵浦光功率的变化

Fig. 9 2231 nm Raman fiber laser with nested cavity structure based on fluoride glass fiber^[89]. (a) Experimental setup; (b) output power of 2231 nm Raman laser versus pump power

2022 年,吉林大学的 Jiao 等^[90]选择了一种自主研发的新型玻璃光纤即氟碲酸盐 ($\text{TeO}_2\text{-BaF}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$, TBY) 光纤作为拉曼增益介质,利用重复频率为 80 kHz 的 1.55 μm 纳秒脉冲源进行泵浦,在单通结构下观察到了三阶级联拉曼频移。实验结果如图 10 所示,在 491.5 mW 入射泵浦功率下,三阶拉曼信号的输出波长、平均功率及转换效率分别为 2.438 μm、31.6 mW 和 6.43%。TBY 光纤具有高的抗激光损伤阈值、大拉曼频移量以及高的拉曼增益系数,因此未来在高功率中红外拉曼激光产生方面的具有极大的应用潜力。

3.1.3 基于硫系玻璃光纤的拉曼光纤激光器

在常用的几种中红外光纤材料中,硫系玻璃光纤具有最宽的红外透过窗口和大的拉曼增益系数,其拉

曼增益系数比石英玻璃高 2~3 个数量级,但是其拉曼频移量较小(如 As_2S_3 的拉曼频移量为 345 cm^{-1}),需要通过多级级联的方式实现更长波长的激光输出。2006 年,澳大利亚悉尼大学的 Jackson 等^[91]利用波长为 2.05 μm 的连续激光作为泵浦源,首次在硫系玻璃光纤中实现了波长为 2.10 μm 和 2.17 μm 的级联拉曼激光输出,对应的输出功率分别为 0.200 W 和 0.016 W。

2013 年,加拿大拉瓦尔大学的 Bernier 等^[92]首次报道了基于硫系玻璃光纤的输出波长大于 3 μm 的拉曼光纤激光器。采用中心波长为 3.01 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。该系统的最大输出功率为 0.6 W,斜率效率为 39%。

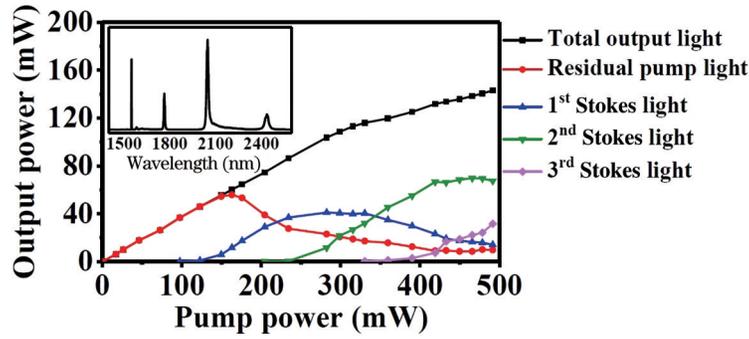


图 10 输出功率与泵浦功率的关系, 插图为泵浦功率为 491.5 mW 时的输出光谱^[90]

Fig. 10 Output power versus pump power with output spectrum at pump power of 491.5 mW shown in inset^[90]

2014年, Bernier等^[93]在前期工作的基础上, 实现了输出波长为 3.77 μm 的二级级联拉曼激光输出, 该系统结构如图 11 所示。泵浦源的中心波长为 3.01 μm , As_2S_3 拉曼光纤的长度为 2.8 m, 拉曼谐振腔由 As_2S_3 光纤上的两对光纤布拉格光栅构成。通过过热退火的方式优化输出耦合比, 在 3.9 W 的泵浦功率下, 获得了

3.77 μm 的二阶拉曼输出, 输出功率为 112 mW, 斜率效率为 8.3%。实验中获得的光效率和输出功率偏低, 这可能是一阶斯托克斯光的光谱在腔内展宽导致的。

2021年, 东北大学的 Wang等^[94]基于单通拉曼结构, 将平均功率为 0.1 W、重复频率为 10 kHz 的 2 μm 纳秒脉冲源作为泵浦源, 利用 As_2S_3 玻璃光纤的高拉曼

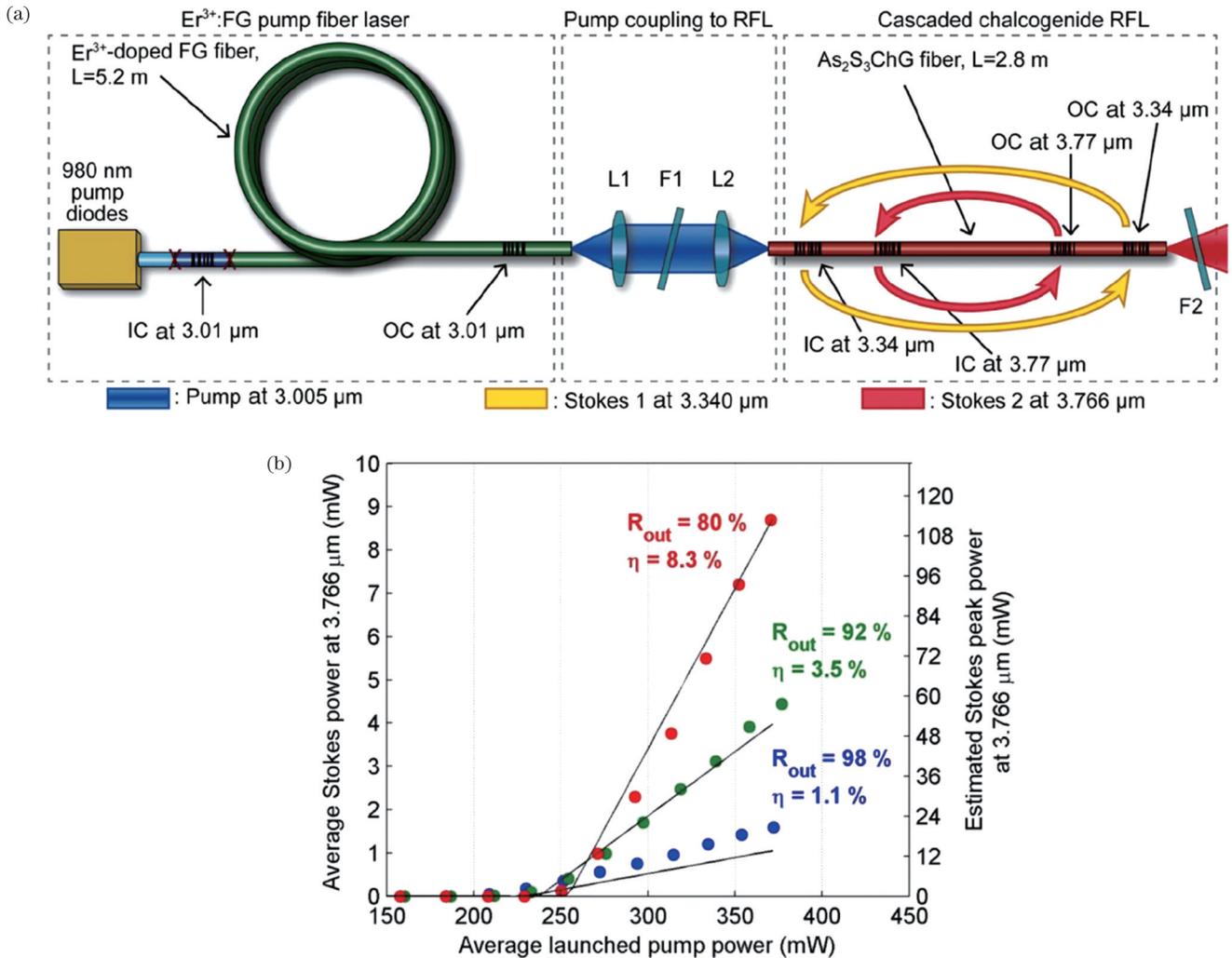


图 11 基于 As_2S_3 光纤的 3.77 μm 级联拉曼光纤激光器^[93]。(a) 实验装置; (b) 当输出耦合器的反射率分别为 98%、92% 和 80% 时, 3.77 μm 斯托克斯光的平均输出功率和峰值功率随泵浦光功率的变化

Fig. 11 3.77 μm cascaded Raman fiber laser based on As_2S_3 fiber^[93]. (a) Experimental setup; (b) average output power and peak power of 3.77 μm Stokes light versus pump power when reflectivity values of output coupler are 98%, 92%, and 80%, respectively

增益特性,在实验中观察到了 2.149~3.425 μm 的 6 阶级联拉曼频移。基于硫系玻璃光纤的拉曼光纤激光器在输出功率提升方面的研究进展缓慢,这主要是由于硫系玻璃光纤的抗损伤阈值低,以及多级级联频移导致功率消耗过大,相信随着材料制备工艺的进步及光纤设计与控制技术的发展和,硫系光纤拉曼激光器的性能会得到提升。

3.1.4 基于碲酸盐玻璃光纤的拉曼光纤激光器

碲酸盐玻璃光纤的特点是稳定性好,相比于氟化物玻璃和硫系玻璃光纤具有更大的拉曼频移量($\sim 750 \text{ cm}^{-1}$),其拉曼增益系数比氟化物玻璃光纤高一个数量级,有望用于实现高功率拉曼光纤激光器。2015年,亚利桑那大学的 Zhu 等^[95]用数值仿真的方法研究了基于碲酸盐光纤的中红外拉曼激光器,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 10 W 级的 3~5 μm 波段的激光输出,对于后续的实验具有重要的指导意义。

2017年,合肥工业大学的 Ni 等^[96]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 2~5 μm 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%。在实验上,要实现高功率中红外波段的拉曼光纤激光器,关键在于开发具有大拉曼频移量、高抗激光损伤阈值、低损耗的中红外拉曼增益光纤材料,以及研制相应的中红外光纤光栅等器件。上述关于碲酸盐玻璃光纤的数值仿真结果证明了其在高功率拉曼激光产生方面的应用潜力,相信在不久的将来,通过提升碲酸盐玻璃光纤的质量,可以实现数十瓦量级的高功率中红外碲酸盐拉曼光纤激光器。

3.2 波长连续可调谐的拉曼孤子光纤激光器

当泵浦脉冲的脉宽为飞秒量级时,基于 SSFS 效应,脉冲中的高频成分会频移至低频,使得脉冲在沿光纤传播的过程中发生波长红移,进而可以实现灵活的脉冲波长调谐。科研工作者利用各类反常色散光纤和系统结构设计,获得了中红外波段可调谐的飞秒脉冲。由表 3 可以看到,基于 SSFS 技术,中红外飞秒超短脉冲激光器在功率提升、波长拓展等方面得到了较好的发展。其中,TDF 为掺铊石英光纤,GDF 为掺锗石英光纤,HNLF 为高非线性石英光纤,(Er:)FGF 为(掺铒)氟化物玻璃光纤,InF₃ 为氟化铟玻璃光纤,AsSe₂-As₂S₅ 为硫族化物微结构光纤,TBY 为氟碲酸盐光纤,ZBLAN 为大模场氟化锆玻璃光纤。

表 3 中红外波长连续可调谐拉曼孤子光纤激光器的典型研究进展

Table 3 Typical research progress of mid-infrared tunable Raman soliton fiber lasers

Year	Pump laser wavelength / μm	Fiber	Tuning range / μm	Output power /mW	Energy /nJ	Peak power /kW	Ref.
2013	1.98	TDF	2.0-2.2	2950	38	191.6	[97]
2014	1.96	GDF	2-3				[98]
2014	2.8	AsSe ₂ -As ₂ S ₅	2.986-3.419				[99]
2015	1.96	HNLF	1.96-2.13	570	11.4	116.9	[100]
2016	1.975	TDF	1.98-2.22	762	36	180	[101]
2016	2.8	Er: FGF	2.8-3.6	2100	37	200	[102]
2016	2	InF ₃	2-4.3	9.6	6.4	45.7	[103]
2017	1.92	TDF	1.92-2.36	1160	34	~ 340	[104]
2018	1.96	TBY	1.96-2.82				[105]
2019	1.96	TDF+GDF	2.036-2.690	~ 6	~ 0.18	1.23	[106]
2019	2.3	ZBLAN	2.30-3.85		2.4	34	[107]
2021	1.965	ZBLAN	2.39-3.17		45	273	[108]
2022	4.1/5.2	TBY	4.10-7.55/ 5.20-8.09				[109]
2022	1.9	TDF	1.90-2.35	1200	~ 23	59	[110]
2022	2.8	InF ₃	2.8-4.8	56.25			[111]
2022	2.8	TBY	2.80-3.17	38.9	0.744	7	[112]

3.2.1 基于掺铊光纤单级频移结构的中红外拉曼孤子光纤激光器

2013年,挪威科技大学的 Dvoyrin 等^[97]采用单级频移结构,基于 1.98 μm 的传统孤子源,在掺铊光纤放大器中将拉曼孤子的最大波长拓展到 2.22 μm ,其中 2.15 μm 处的拉曼孤子功率被提升至 2.95 W,对应脉冲能量和峰值功率分别达到 38 nJ 和 191.6 kW。然

而,在整个调谐范围内,输出端仍有 40% 以上的能量并未转移到拉曼孤子中。

2017年,北京工业大学的 Wang 等^[104]采用波长为 1.92 μm 、脉宽为 ~ 200 fs 的耗散孤子种子源,将掺铊光纤放大器中拉曼孤子的最大调谐波长拓展到 2.36 μm 。其中 2.29 μm 拉曼孤子的功率水平达到了 1.16 W,对应脉冲能量和占比分别为 34 nJ 和 83.6%。在 1.90~

2.23 μm 范围内拉曼孤子的能量占比均大于 90%，孤子最大能量占比为 97%。该报道刷新了石英基光纤放大器中的拉曼孤子最长波纪录。

2022 年, 宁波大学的 Ge 等^[110] 在实验上探索了种子激光波长和啁啾对 SSFS 效应的影响。通过优化孤子初始波长及啁啾参数, 最终利用波长为 1.9 μm 的锁模脉冲种子, 在掺铥光纤放大器中实现了 1.90~2.35 μm 的孤子调谐输出。其中, 拉曼孤子的最高能量占比可达 99%, 2.3 μm 孤子的平均功率达到 1.2 W。Tm³⁺ 掺杂的有源光纤兼具增益放大和非线性频移作用, 能在孤子频移过程中补偿能量损耗, 因此基于掺铥光纤单级频移结构的中红外拉曼孤子光纤激光器在输出功率方面具有优势, 但是由于掺铥石英光纤在长波区的损耗急剧增加, 最大频移波长通常小于 2.4 μm 。

3.2.2 基于高浓度掺铥光纤的中红外拉曼孤子激光器

相比掺铥石英光纤, 高浓度掺铥石英光纤具有更长的长波透射边界(最长可至 3 μm), 且通过光纤结构设计, 在 2 μm 以上波段也能表现为反常色散, 因而适用于全光纤结构下的中红外拉曼孤子波长拓展。2014 年, 俄罗斯科学院应用物理研究所的 Anashkina 等^[98] 设计并搭建了基于掺铥光纤的级联频移系统。在 1.5 m 长的高掺铥(摩尔分数为 97%) 光纤中率先实现了波长在 2~3 μm 范围内连续可调谐的飞秒脉冲输出。其中, 2.66 μm 处拉曼孤子的脉冲宽度为 160 fs。然而,

在该级联频移系统中, 受前端系统的强非线性影响, 整体输出的激光光谱质量较差。

2019 年, 厦门大学的 Li 等^[106] 将波长为 1.96 μm 的飞秒传统孤子作为种子信号, 构建了掺铥光纤放大器, 再利用摩尔分数为 97% 的掺铥光纤作为非线性光纤, 构建了级联频移系统。首先通过掺铥光纤放大器获得了 2.036~2.153 μm 范围内的可调谐拉曼孤子, 进而基于掺铥光纤中的级联 SSFS 效应, 将拉曼孤子最大波长调谐到 2.69 μm 。经拟合得到, 二级频移光纤中输出拉曼孤子的转换效率约为 21.1%。该工作直接使用了 2 μm 波段的飞秒信号源, 大大简化了系统结构, 同时减少了前端部分的非线性积累。将高浓度掺铥石英光纤级联于掺铥光纤放大器可以进一步实现频移波长的拓展, 该结构主要用于实现 2~3 μm 范围内的拉曼孤子输出。然而, 由于高浓度掺铥石英光纤引入的损耗以及拉曼孤子转化效率不高, 总体输出功率有待进一步提升。

3.2.3 基于软玻璃光纤的中红外拉曼孤子激光器

氟化物玻璃光纤作为一种较为成熟的低声子能量光纤, 因其长波透射边界可达 5 μm , 已经成为实现 2~5 μm 范围内 SSFS 效应的理想介质。2016 年, 美国康奈尔大学的 Tang 等^[103] 报道了基于氟化物光纤的中红外可调谐拉曼孤子光纤激光器(图 12), 通过使用 1.9 μm 的飞秒脉冲泵浦 2 m 长的 InF₃ 光纤, 输出了波长调谐范围为 2.0~4.3 μm 的拉曼孤子, 实验中 1.9 μm 泵浦脉

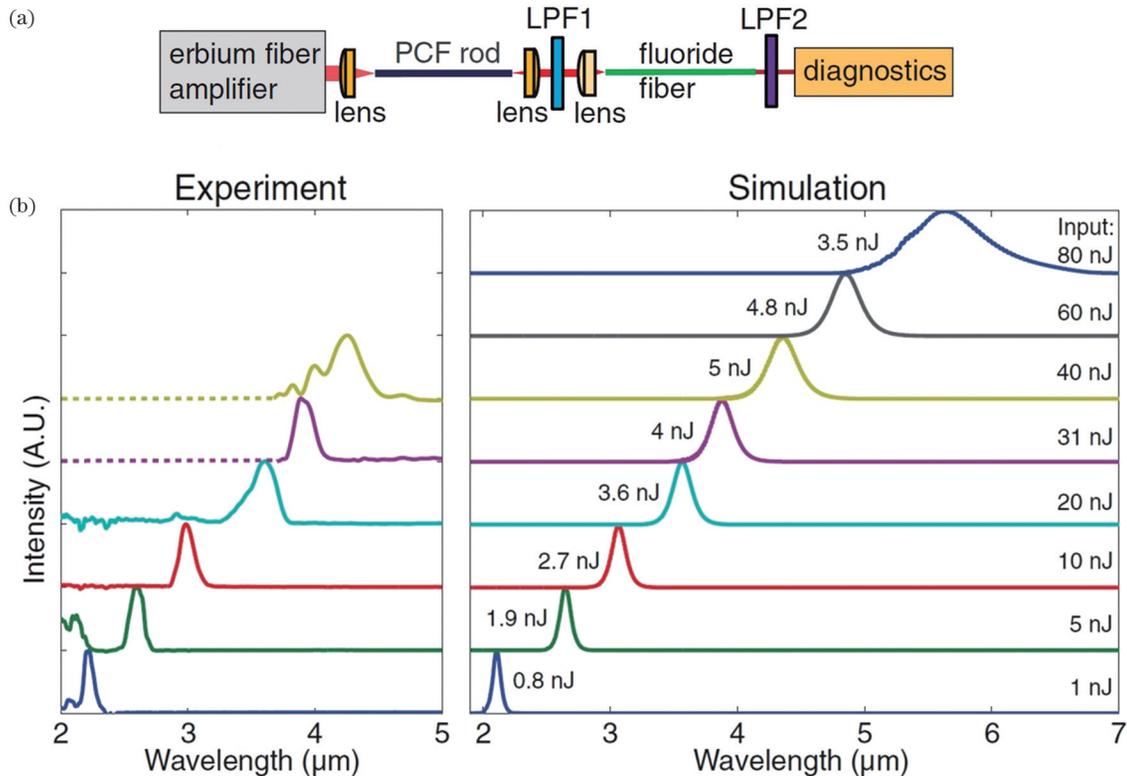


图 12 基于 InF₃ 玻璃光纤的中红外可调谐拉曼孤子光纤激光器^[103]。(a) 实验装置; (b) 2 m 长 InF₃ 玻璃光纤中不同波长处的红移孤子光谱

Fig. 12 Tunable mid-infrared Raman soliton fiber laser based on InF₃ glass fiber^[103]. (a) Experimental setup; (b) spectra of redshifted soliton at different wavelengths in 2 m long InF₃ glass fiber

冲的单脉冲能量为 120 nJ, 脉宽为 70 fs, 获得的拉曼孤子的脉宽为 60~140 fs, 峰值功率为 20~75 kW。

同年, 加拿大拉瓦尔大学的 Duval 等^[102]使用 2.8 μm 的飞秒激光泵浦掺铒氟化锆光纤, 实现了波长在 2.8~

3.6 μm 范围内可调谐的拉曼孤子输出, 实验装置和结果分别如图 13(a)、(b) 所示。3.4 μm 孤子的脉宽约为 160 fs, 平均功率达 2.1 W, 这是目前基于氟化物光纤, SSFS 技术获得的最高飞秒脉冲功率水平。

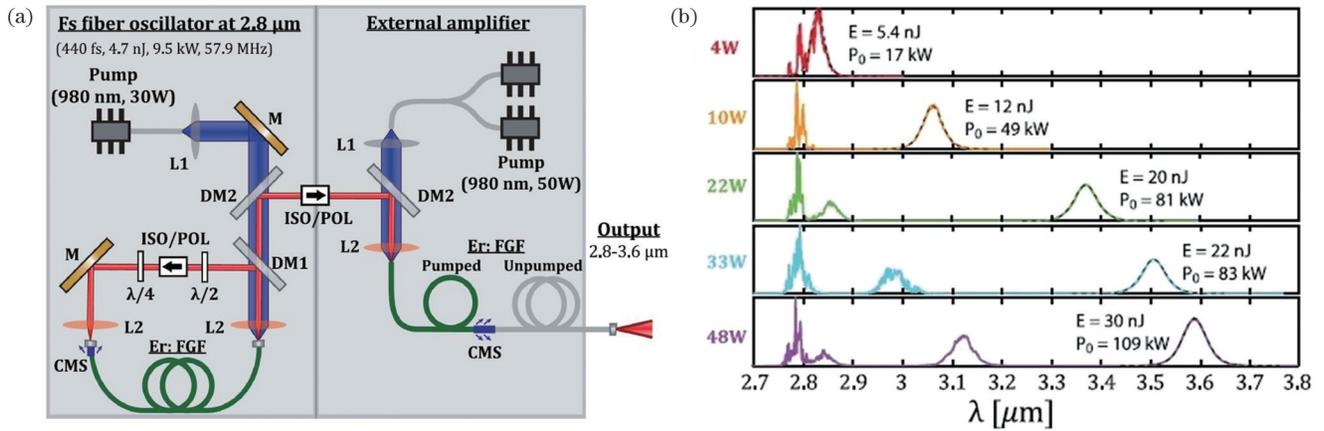


图 13 基于掺铒氟化锆光纤的中红外可调谐拉曼孤子光纤激光系统^[102]。(a) 实验装置; (b) 22 m 长掺铒氟化锆光纤中的 SSFS 光谱
Fig. 13 Tunable mid-infrared Raman soliton fiber laser based on Er-doped zirconium fluoride fiber^[102]. (a) Experimental setup; (b) SSFS spectra in 22 m long Er-doped zirconium fluoride fiber

2019 年, 德国慕尼黑大学的 Nagl 等^[107]利用光参量振荡器产生的 2.3 μm 飞秒激光作为种子源, 泵浦纤芯直径为 6.8 μm 的 ZBLAN 氟化物拉曼增益光纤, 实现了调谐波长范围为 2.3~3.85 μm 的中红外拉曼孤子输出, 其中 3.85 μm 孤子激光的最大单脉冲能量为 2.4 nJ, 脉冲宽度为 70 fs, 峰值功率大于 34 kW。

2021 年, 法国利摩日大学的 Tiliouine 等^[108]采用级联结构实现了调谐波长范围覆盖 2.39~3.17 μm 的中红外拉曼孤子输出。实验采用脉宽为 765 fs、单脉冲能量为 1 μJ 、中心波长位于 1965 nm 的脉冲泵浦一段 40 cm 长的大模场石英光纤和一段 3.5 m 长的 ZBLAN 光纤。拉曼孤子最终频移至 3170 nm, 其脉宽为 165 fs, 单脉冲能量为 45 nJ, 峰值功率达 273 kW。

2022 年, 加拿大拉瓦尔大学的 Gauthier 等^[111]首先基于非线性偏振旋转效应搭建了 2.8 μm 锁模脉冲种子源, 如图 14(a) 所示, 输出脉冲宽度为 440 fs, 单脉冲能量为 4 nJ, 重复频率为 57.9 MHz。然后, 利用长度为 4 m、纤芯直径为 15 μm 的掺铒氟化锆有源光纤对种子光进行放大, 同时完成第一阶段的 SSFS。当泵浦功率增加到 27.8 W 时, 拉曼孤子最远频移到 3.2 μm 处。受限于光纤长度, 随着泵浦功率的继续增大, 频移量达到饱和。最后, 将滤除残余泵浦成分后的信号光耦合进长度为 20 m、纤芯直径为 7.5 μm 氟化钡光纤。纤芯直径的减小使得氟化钡光纤的非线性系数急剧增大, 孤子阶数也随之增加。当泵浦功率提升到 70 W 时, 氟化钡光纤输出的拉曼孤子光谱最远频移到 4.8 μm 处, 如图 14(b) 所示, 拉曼转换效率为 7.5%, 脉冲宽度为 ~485 fs, 脉冲能量为 ~4 nJ。这是目前氟化物光纤 SSFS 频移最远的报道。

由于传统的阶跃型硫系玻璃光纤的零色散波长一

般大于 2 μm , 为了获得基于硫系玻璃光纤的中红外拉曼孤子激光光源, 研究者通常采用零色散波长在 2 μm 附近的硫系微结构光纤作为增益介质。2014 年, 日本丰田工业大学的 Cheng 等^[99]利用 AsSe₂-As₂S₅ 微结构光纤作为增益介质, 利用脉冲宽度为 ~200 fs、重复频率为 80 MHz 的 2.8 μm 激光作为泵浦光源, 获得了调谐波长范围覆盖 2.986~3.419 μm 的中红外拉曼孤子激光光源, 最终获得的中红外拉曼孤子激光光源的功率较低, 仅为毫瓦量级。

2022 年, 电子科技大学的 Hou 等^[109]分别对 4.1 μm 和 5.2 μm 激光泵浦条件下 AsSe₂-As₂S₅ 光纤产生的宽调谐拉曼孤子激光进行了数值模拟。仿真结果显示, 利用硫系玻璃光纤作为非线性介质, 有望获得工作波长 > 8 μm 的拉曼孤子激光光源。

除了上述软玻璃光纤外, 2018 年, 吉林大学的 Li 等^[105]利用 SSFS 技术, 将芯径为 2.7 μm 、长度为 0.2 m 的全固态 TBY 光纤作为频移介质, 结合 1.96 μm 飞秒激光泵浦, 实现了波长调谐范围覆盖 1.96~2.82 μm 的飞秒拉曼孤子输出, 2.82 μm 处的孤子脉冲宽度为 93 fs。2022 年, 电子科技大学的 Chang 等^[112]直接采用 2.8 μm 锁模脉冲进行泵浦, 在芯径为 5 μm 的全固态 TBY 光纤中, 通过频移效应, 将波长拓展至 3.17 μm , 该波长处的脉冲宽度、输出功率及能量分别为 106.2 fs, 38.9 mW 和 0.744 nJ。TBY 光纤为吉林大学科研团队自主研发, 目前主要是应用在中红外宽带、高功率超连续谱激光器中, 在激光非线性波长拓展方面的应用潜力尚在探索阶段。

整体来看, 中红外拉曼孤子光纤激光器在近几年的发展十分迅速, 特别是基于氟化物光纤 SSFS 效应的中红外拉曼孤子激光光源, 其输出波长最远可调谐至

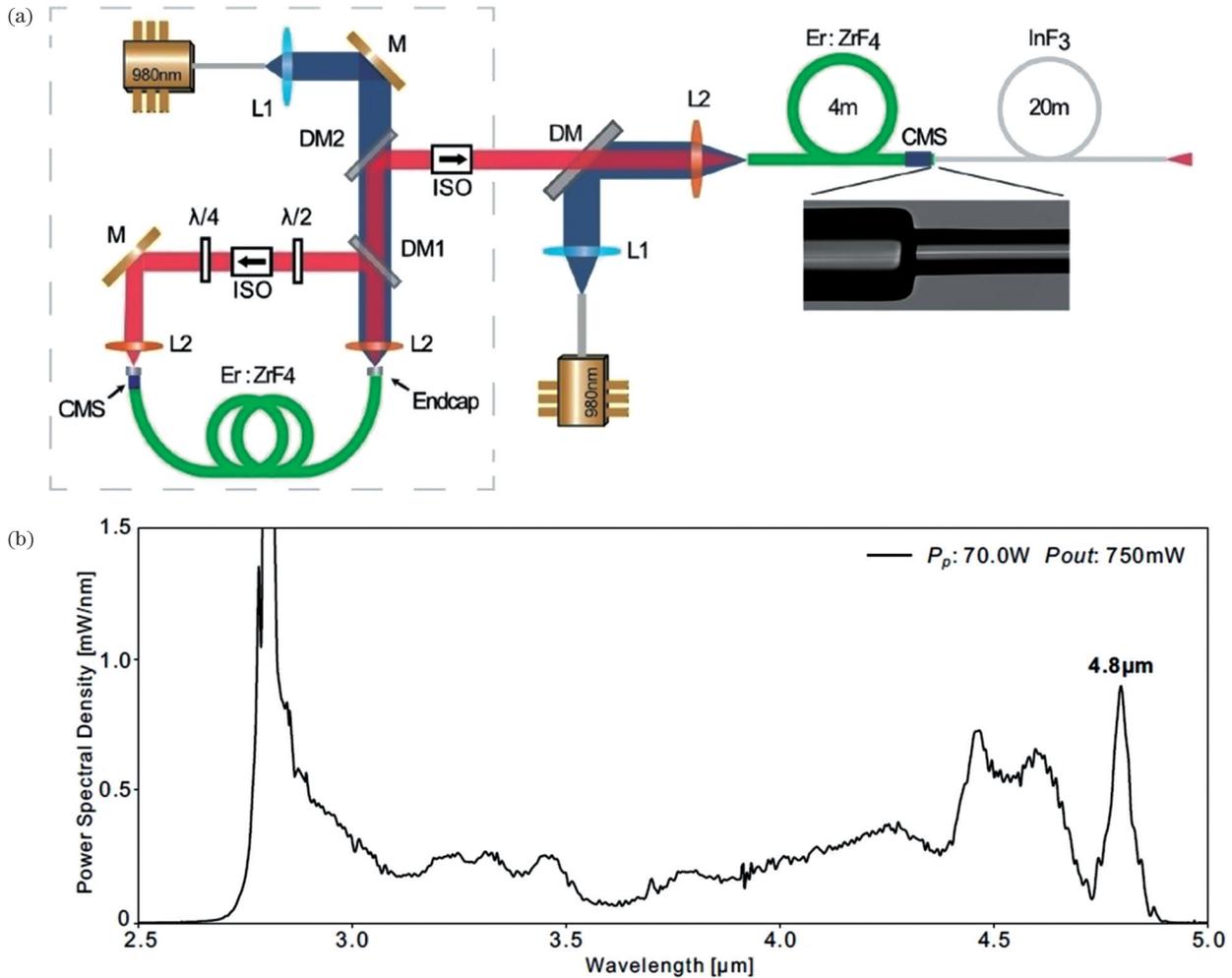


图 14 基于 InF_3 光纤的中红外可调谐拉曼孤子光纤激光器^[111]。(a) 实验装置；(b) 泵浦功率 70 W 时 InF_3 光纤输出光谱
Fig. 14 Tunable mid-infrared Raman soliton fiber laser based on InF_3 fiber^[111]. (a) Experimental setup; (b) output spectrum of InF_3 fiber at 70 W pump power

4.8 μm , 最大输出功率可达 2.1 W。不过, 随着激光应用需求的不断增加, 中红外拉曼孤子激光器在波长调谐范围、输出功率和转化效率等方面仍有待提高。主要受限于以下因素: 1) 商用氟化物光纤的色散参数无法在大范围内进行灵活设计, 这限制了拉曼孤子自频移系统的设计与优化空间, 同时现有氟化物光纤在大于 4 μm 的长波长区仍然存在较大的传输损耗, 难以实现高功率激光输出; 2) 目前采用的频移方案架构单一, 难以实现波长的大幅拓展, 有待采用多级级联频移系统实现更长的波长拓展; 3) 频移过程中长波长转化效率低, 目前 2.0~4.8 μm 的孤子自频移转化效率仅为 7.5%。

4 宽带高功率超连续谱激光器

超连续谱的产生是指利用高强度激光泵浦非线性介质, 在色散和非线性效应的共同作用下, 光谱获得极大展宽的现象。全光纤结构的超连续谱激光具有空间相干性高、稳定性好、结构便携等优点, 是国际上超连续谱光源研究的热点之一。中红外波段超连续谱覆盖

众多分子的特征吸收谱线, 在生物医学、光谱学、光学相干层析和环境科学等领域中有着广泛的应用。当具有高峰值功率的脉冲激光在中红外非线性介质中传输时, 介质中的束缚电子将在入射电场的感应下发生非线性极化, 即介质对入射激光产生非线性响应, 新的频率成分由此产生。主导这个过程的效应被称为非线性效应, 主要包括调制不稳定性、自相位调制、交叉相位调制、受激拉曼散射、四波混频、拉曼孤子自频移等。石英光纤具有易制备、工艺成熟、成本低和高损伤阈值等优点, 是理想的中红外介质。然而石英光纤的声子能量高, 故红外透光窗口相对较窄, 基于纯石英光纤的超连续谱激光器的长波截止边缘往往被限制在 2700 nm 处。研究者探索出在中红外波段具有低传输损耗的铈酸盐光纤、氟磷酸盐玻璃光纤、氟化物玻璃光纤和硫化物光纤等用于中红外波段超连续谱激光光源的研制。

4.1 基于铈酸盐光纤的超连续谱激光器

纤芯主要成分为二氧化锗 (GeO_2) 的铈酸盐光纤是机械性能、热稳定性和材料色散等性质最接近于石

英光纤的一种非线性介质,具有比石英光纤更高的非线性系数、更低的声子能量和更宽的透过窗口。因此,基于锗酸盐玻璃光纤的中红外超连续谱光源在输

出功率和光谱拓展方面发展迅速,在全光纤结构下展现出优异的环境稳定性,典型的研究结果如表 4 所示。

表 4 基于锗酸盐光纤的超连续谱激光器的研究进展
Table 4 Research progress of supercontinuum lasers based on germanate fibers

Fiber	Pump laser wavelength / μm	Supercontinuum spectrum range / μm	Output power /W	Year	Ref.
NL1550	1.55	1.1-2.2		2016	[113]
NL1550	1.55	1.1-2.3		2019	[114]
UHNA-7	2.0	1.92-3.05	11.62	2019	[115]
NL1550	1.9-2.6	1.5-3.2	4.12	2022	[116]
NL1550	1.5-2.4	0.92-2.92	5.09	2023	[117]
Germania-core fiber with mole fraction of 100%	1.9-2.7	1.9-3.6	6.12	2016	[118]
Germania-core fiber with mole fraction of 74%	1.55	0.7-3.2	1.44	2016	[119]
Germania-core fiber with mole fraction of 100%	2	1.95-3.0	30.1	2018	[120]
Germania-core fiber with mole fraction of 94%	2	1.7-3.5	21.34	2021	[121]
Germania-core fiber	1.9-2.6	1.9-3.5	41.9	2022	[122]

4.1.1 基于低浓度 GeO_2 掺杂的锗酸盐光纤

GeO_2 掺杂浓度(摩尔分数)小于 50% 的锗酸盐光纤具有易获得、成本低和物化性质稳定等特点,是低成本、高稳定性超连续谱激光器的理想非线性介质。2016 年,西班牙萨拉戈萨大学的 Saldana-Díaz 等^[113]报道了一种简单的生成超连续谱的方法,他们采用飞秒掺铒锁模光纤激光器作为种子源,放大后泵浦一段 60 m 长的高度非线性光纤[NL1550, GeO_2 掺杂浓度(摩尔分数) $<30\%$],该光纤的零色散点在 1550 nm 处,在较低的泵浦功率抽运下获得了光谱覆盖范围为 1.1~2.2 μm 的超连续谱激光,但是此光谱覆盖范围不佳且输出功率较低。

2019 年,他们采用类似的结构,将泵浦波长移到与高非线性光纤的零色散波长相匹配的位置,获得了更好的光谱发射性能。获得的光谱分布在 1.1~2.3 μm 区间,改善了光谱的平坦度以及覆盖范围^[114]。虽然该激光器的转换效率在 80% 以上,但受限于泵浦激光的功率,其最终输出功率仍然只有几十毫瓦。

同年,深圳大学的 Zheng 等^[115]采用 35.28 MHz 皮秒脉冲 MOPA 作为泵浦光源,在 2 m 长、掺杂浓度(摩尔分数)为 30% 的锗酸盐光纤(UHNA-7)中实现了平均功率为 11.62 W 的超连续谱激光输出,光谱范围为 1.92~3.05 μm 。

2022 年,本课题组采用 1.55 μm 纳秒脉冲激光器作为种子源,通过多级掺铒放大器掺铒放大器和掺铒放大器,结合自相位调制、孤子分裂和拉曼孤子自频移等效应,实现了 1.9~2.7 μm 超连续谱激光输出。将该输出作为泵浦源抽运一段长度仅为 9 cm 的 NL1550 光纤,获得了覆盖范围为 1.5~3.2 μm 的超平坦超连续谱激光,得益于种子源较低的重复频率(400 kHz)和较窄的脉冲宽度(1 ns),该光谱的 1 dB 和 3 dB 带宽分别为 880 nm

和 1020 nm,输出功率为 4.12 W,其装置和光谱特性图 15 所示^[116]。虽然该光谱的平坦度有所提升,但由于泵浦光远离光纤的零色散点,故光谱的短波方向不能扩展到近红外波段,限制了激光器的覆盖范围。

随后,我们采用波长为 1.5~2.4 μm 的超连续谱激光抽运一根长度仅为 12 cm 的 NL1550 光纤,泵浦激光完全覆盖了 NL1550 光纤的零色散点,可以引发强烈的色散波、自相位调制和拉曼孤子自频移等非线性效应,实现了覆盖范围为 0.92~2.92 μm 的超连续谱激光输出,其最大平均功率为 5.09 W^[117]。

4.1.2 基于高浓度 GeO_2 掺杂的锗酸盐光纤

高浓度 GeO_2 掺杂的锗酸盐光纤具有更宽的红外透过窗口,可以进一步扩展基于锗酸盐光纤的超连续谱激光器的长波截止边缘。2016 年,国防科技大学的 Yin 等^[118]采用光谱范围为 1.9~2.7 μm 的宽带掺铒光纤放大器泵浦 12 cm 长的锗酸盐光纤,实现了最大光谱覆盖范围为 1.9~3.6 μm 、输出功率为 6.12 W 的超连续谱激光输出,这是当时在锗酸盐光纤中获得的最远长波边缘的超连续谱光谱。

同年,丹麦科技大学的 Jain 等^[119]采用铒镱共掺光纤放大器分别泵浦掺杂浓度(摩尔分数)为 74% 和 56% 的锗酸盐光纤,在前者中获得了输出功率为 1.44 W、光谱范围为 0.7~3.2 μm 的超连续谱激光,在后者中获得了输出功率为 6.4 W、光谱范围为 0.8~2.7 μm 的超连续谱激光。

2018 年,国防科技大学的 Yin 等^[120]采用重复频率为 115.4 MHz 的 2 μm 波段亚皮秒脉冲激光器作为泵浦光源,在 1 m 长的锗酸盐光纤中实现了 30.1 W 的高功率超连续谱激光输出,利用孤子自频移效应实现的 10 dB 光谱带宽为 1.95~3.00 μm 。

2021 年,北京工业大学的 Wang 等^[121]采用多级掺

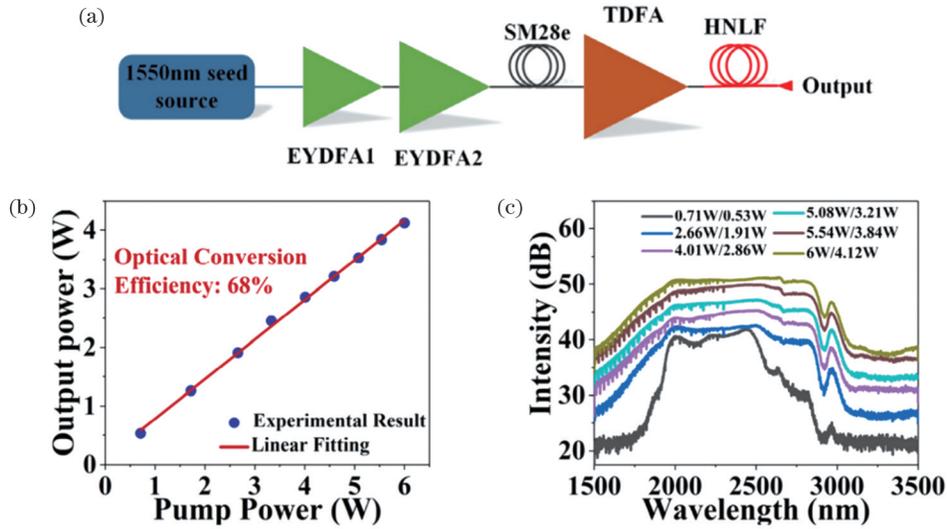


图 15 基于 NL1550 光纤的平坦型超连续谱激光产生示意图及各项指标^[116]。(a)实验装置图;(b)输出功率随泵浦功率的变化;

(c)NL1550 光纤在不同泵浦功率下的输出光谱

Fig. 15 Schematic of flat supercontinuum laser generation based on NL1550 fiber and indicators^[116]. (a) Experimental setup; (b) output power versus pump power; (c) output spectra of NL1550 fiber at different pump powers

铥光纤放大器对重复频率为 44.3 MHz、脉冲宽度为 30.2 ps 的 2 μm 锁模激光器进行放大,得到光谱覆盖范围为 1.9~2.2 μm 的超连续谱激光,随后继续泵浦一根长度为 9 cm 的掺杂浓度(摩尔分数)为 94% 的锗酸盐光纤,获得了输出功率为 21.34 W、光谱范围为 1.7~3.5 μm 的超连续谱激光。

2022 年,国防科技大学的 Yang 等^[122]采用 1.5~

2.2 μm 超连续谱激光作为种子源,通过掺铥光纤放大器,结合拉曼孤子自频移等非线性效应,得到输出功率为 58.7 W 的 1.9~2.6 μm 的超连续谱激光,继续抽运一段长度仅为 20 cm 的高浓度二氧化锗掺杂光纤,获得了波长范围为 1.9~3.5 μm 的超连续谱,其实验装置和光谱如图 16 所示。由于锗酸盐光纤的长度仅为 20 cm,该激光器的光光转化效率为 71.4%,输出功率高达

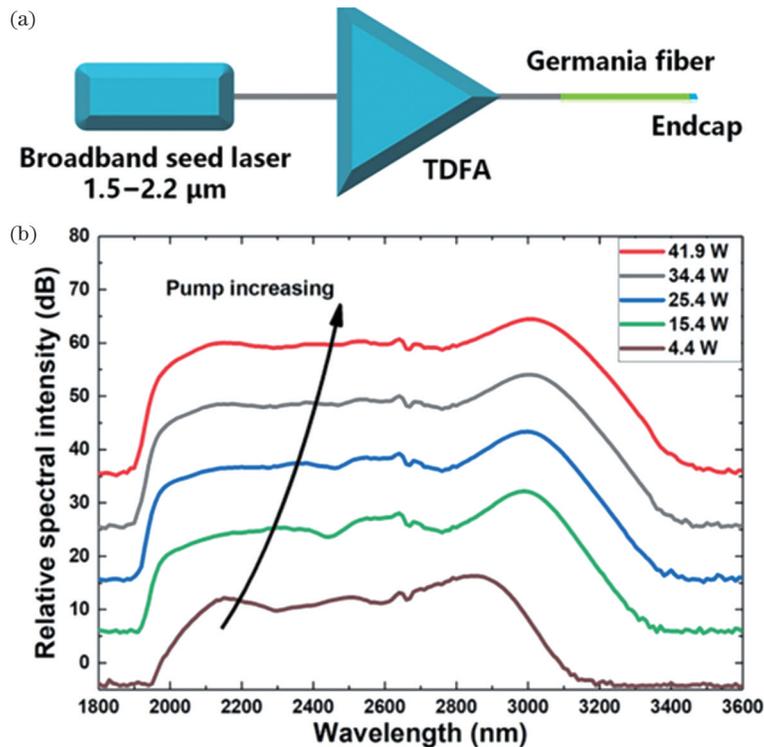


图 16 基于锗酸盐光纤的超连续谱激光产生示意图及光谱结果^[122]。(a)实验装置图;(b) 20 cm 锗酸盐光纤在不同泵浦功率下的输出光谱

Fig. 16 Supercontinuum laser generation diagram and spectral results based on germanate fiber^[122]. (a) Experimental setup; (b) output spectra of 20 cm germania fiber at different pump powers

41.9 W, 这是在锆酸盐光纤中获得的超连续激光的最高功率水平。最近, 本课题组采用 1.9~2.7 μm 超连续谱激光泵浦一段 90 cm 长的掺杂浓度(摩尔分数)为 94% 的锆酸盐光纤, 获得了波长覆盖范围为 1.85~3.57 μm 的超连续谱激光, 并通过调整种子源的重复频率和脉宽改善了光谱的平坦度, 其 3 dB 和 10 dB 带宽分别为 1240 nm 和 1410 nm^[123], 这是目前基于锆酸盐光纤的超连续谱激光器获得的最平坦的光谱。基于锆酸盐光纤的超连续谱激光器在高功率、稳定性以及成本上有着较大的优势, 但受限于锆酸盐光纤的红外透过窗口, 这类超连续谱激光器的光谱长波截至边缘被

限制在 3.6 μm 附近, 在长波拓展上很难有进一步的突破。

4.2 基于氟化物软玻璃光纤的超连续谱激光器

以上的研究工作均为基于锆酸盐光纤的超连续谱激光器, 虽然可以实现高功率、平坦型谱中红外激光输出, 但锆酸盐光纤的传输损耗在 3 μm 波段后急剧增大, 导致获得的超连续光谱的长波边缘最远展宽到 3.6 μm 处, 限制了超连续光谱的进一步展宽。因此, 要想获得更宽范围的超连续谱激光输出, 需要采用其他红外透过窗口更宽、非线性系数更高的中红外软玻璃光纤, 如氟化物光纤, 典型的结果如表 5 所示。

表 5 基于氟化物光纤的超连续谱激光器的研究进展

Table 5 Research progress of supercontinuum lasers based on fluoride fibers

Fiber	Pump laser wavelength / μm	Supercontinuum spectrum range / μm	Output power / W	Year	Ref.
ZBLAN	1.54	0.8-4.0	10.5	2009	[124]
	1.9-2.6	1.90-3.35	30	2019	[125]
	1.9-2.6	2.0-4.1	20.6	2020	[126]
	1.9-2.4	1.9-4.0	5.4	2020	[127]
	2	1.90-3.68	33.1	2023	[128]
TBY	2	1.0-3.4	4.5	2017	[129]
	1.98	0.95-3.93	10.4	2018	[130]
	1.93-2.50	0.90-3.95	22.7	2020	[131]
	1.93-2.50	0.93-3.99	25.8	2022	[132]
	1.9-2.5	1.22-3.74	50.22	2023	[133]
InF ₃	2.75	2.4-5.4		2016	[134]
	1.8-2.6	1-5	1	2018	[135]
	1.9-2.6	1.9-4.9	11.8	2020	[136]

4.2.1 基于 ZBLAN 光纤的超连续谱激光器

ZBLAN (ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF) 光纤在中红外非线性软玻璃光纤中的发展是最为成熟的, 具有较好的长波透光性能(最远可达 4.5 μm) 和较高的损伤阈值, 与石英光纤的折射率很接近, 利于与石英光纤的低损耗熔接, 可产生高功率的中红外超连续谱。但其非线性系数 ($3.3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$) 较低, 需要较长的光纤以积累非线性, 从而获得宽带超连续谱。同时, 由于 ZBLAN 对水分的高敏感性, 其在使用和存储时需要特别注意环境条件。

2009 年, 美国密歇根大学的 Xia 等^[124] 基于中心波长为 1542 nm 的分布反馈式激光器, 利用三级钕镜共掺放大器进行功率放大, 利用 2 m 长的单模石英光纤进行预展, 通过泵浦一段 7 m 长的 ZBLAN 光纤, 获得了功率为 10.5 W、光谱范围覆盖近红外到中红外 2.5 个倍频 (0.8~4.0 μm) 的超连续谱激光源, 且在整个光谱范围内保持着接近衍射极限的光束质量。文中通过理论模拟计算得出 ZBLAN 光纤的长波截至边缘接近 4.5 μm , 最大可承受输出功率接近 40 W, 指出超连续谱光源的长波成分占比取决于入射种子源峰值功率和非线性效应光谱展宽的平衡情况。

2019 年, 国防科技大学的 Yang 等^[125] 利用掺铯放大器, 将 1.9~2.6 μm 高功率宽带超连续源作为泵浦源, 在 ZBLAN 光纤中实现了 30 W 量级的光谱范围覆盖 1.90~3.35 μm 的超连续谱输出, 其 20 dB 带宽为 1.92~3.20 μm , 功率转换效率高达 69%。但光谱的长波占比低, 平坦度也不高。文中还提出, 高功率和宽带超连续谱的产生依赖于种子源的高峰值功率和长 ZBLAN 光纤的非线性积累。

2020 年, 该团队利用同样的 1.9~2.6 μm 超连续谱源作为泵浦源, 凭借超低的熔接损耗 (2 μm 处的熔接损耗仅为 0.26 dB) 技术, 通过对种子脉宽和重复频率进行优化, 进一步提升了超连续谱的平坦度, 在更长 (20 m) 的 ZBLAN 光纤中首次实现了 20 W 量级且 10 dB 光谱范围越过 4 μm 的中红外超连续谱激光输出, 激光的最大平均功率为 20.6 W, 10 dB 带宽为 1.9~4.2 μm 。同时, 在光纤精确对准前提下, 多模中红外光纤也能实现高质量基模超连续谱激光输出^[126]。

同年, 宁波大学的 Xia 等^[127] 利用掺铯光纤激光器 (TDFL) 和宽带滤波技术, 通过对 1.5~2.3 μm 的超连续谱种子源进行光谱整形, 提高了两级掺铯放大器的放大效率, 再通过泵浦一段 6 m 长的 ZBLAN 光纤, 获得了最

大平均功率为 5.4 W、光谱范围覆盖 1.9~4.0 μm 的中红外超连续激光。该超连续谱源的平均功率均方根为 0.03% (2 h), 且光谱在 2.1~3.5 μm 范围内的平均波动小于 0.1 dB, 展现了极高的功率稳定性和光谱平坦度。

2023 年, 国防科技大学的 Zhu 等^[128] 利用一个由“8”字腔锁模类噪声脉冲种子源和两级掺铥放大器组成的 2 μm MOPA 系统, 泵浦一段芯径为 13.5 μm 、长度为 13 m 的 ZBLAN 光纤, 实现了最大平均功率为 33.1 W、功率转换效率为 75.06%、光谱范围覆盖 1.90~3.68 μm 的超连续激光输出。放大后的高功率 2 μm 激光处于非线性 ZBLAN 光纤的反常色散区, 具有高的非线性, 经历孤子分裂、拉曼孤子自频移以及其

他孤子相关的非线性效应后, 光谱迅速展宽。该方案利用类噪声脉冲特性, 消除了 1.9 μm 单波长泵浦中红外非线性光纤时泵浦波长附近的残余尖峰, 提升了超连续光谱的整体平坦度。另外, 通过调控腔内色散, 改变了输出种子脉冲的状态, 实现了对种子脉冲的包络脉宽调节, 并分析了不同类噪声脉冲种类对输出超连续谱的谱宽和功率的影响。其实验结构和结果如图 17 所示。近年来, 基于 ZBLAN 光纤的超连续谱激光器在功率提升、平坦度等方面取得了较大的进展, 但 ZBLAN 光纤的热稳定性和抗潮解性能较差, 因此基于 ZBLAN 玻璃光纤的超连续谱激光器在高功率运行状态下的长期稳定性仍然有待提升。

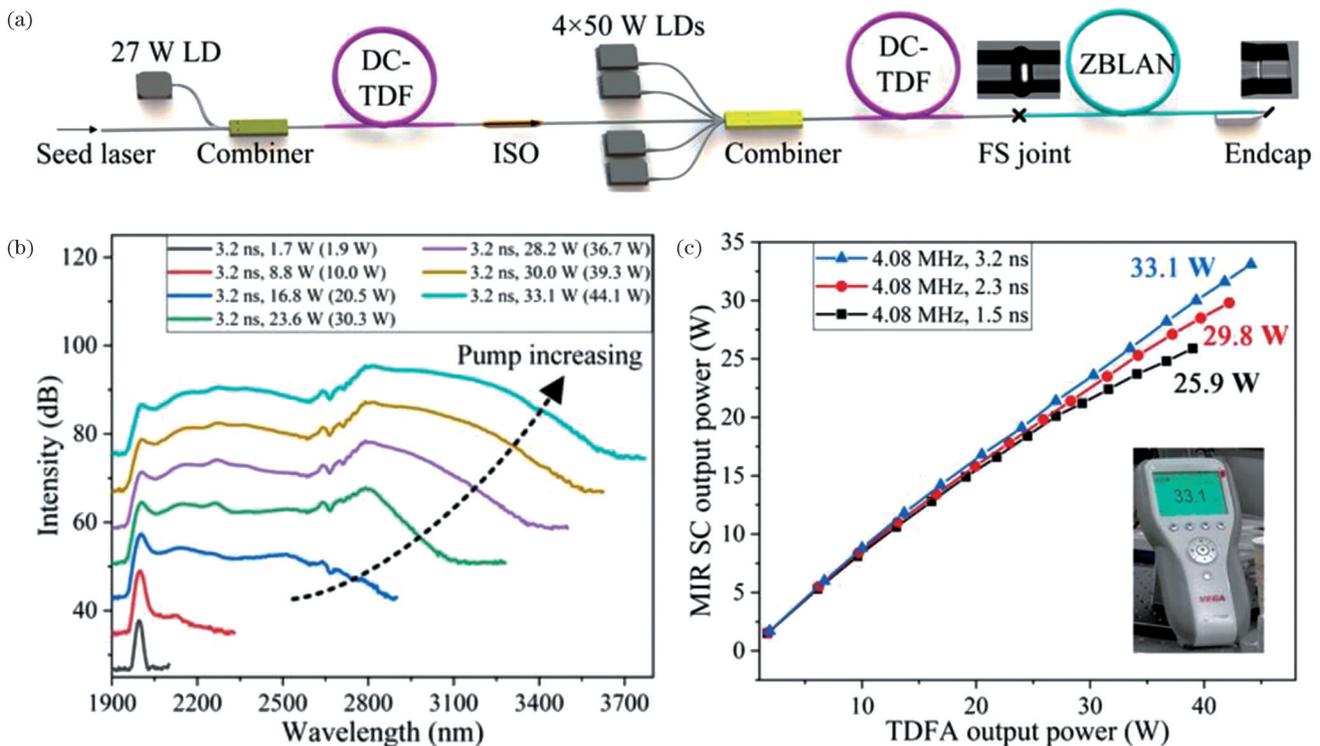


图 17 类噪声脉冲泵浦的超连续谱系统^[128]。(a) 实验装置图; (b) 输出光谱随泵浦功率的演化图; (c) 不同脉宽下输出功率随泵浦功率的变化

Fig. 17 Supercontinuum laser system pumped by noise-like pulses^[128]. (a) Experimental setup; (b) output spectrum evolution with pump power; (c) output power versus pump power at different pulse widths

4.2.2 基于氟碲酸盐光纤的超连续谱激光器

基于 TBY ($\text{TeO}_2\text{-BaF}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$) 玻璃的氟碲酸盐光纤具有较宽的红外透过窗口 (0.4~6.0 μm)。其与氟化物和硫化物光纤相比, 具有良好的热稳定性和抗潮解性, 是一种可用于产生中红外超连续谱的理想基质材料。除此之外, TBY 玻璃的转变温度约为 424 $^\circ\text{C}$, 远高于碲酸盐玻璃、ZBLAN 氟化物玻璃以及硫系玻璃的转变温度, 表明基于 TBY 玻璃的氟碲酸盐光纤具有制备高功率中红外超连续激光源的潜力。近年来, 吉林大学基于碲酸盐玻璃, 探索出新型氟碲酸盐玻璃, 其芯层和包层材料分别为 TBY 和 $\text{AlF}_3\text{-MgF}_2\text{-CaF}_2\text{-SrF}_2\text{-BaF}_2\text{-YF}_3\text{-TeO}_2$ (AMCSBYT) 玻璃。他们先后在氟碲酸盐光纤中获得了突破 10 W 和 20 W 量级的高功

率中红外超连续谱激光输出。

2017 年, 吉林大学的 Jia 等^[129] 利用 2 μm 的飞秒激光器作为泵浦源, 通过透镜耦合的方式泵浦一段芯径为 7 μm 、长度为 0.6 m 的全固态氟碲酸盐光纤, 实现了 4.5 W 的光谱覆盖范围为 1017~3438 nm 的超连续谱输出, 相应的光-光转换效率约为 42.9%。

2018 年, Yao 等^[130] 利用重复频率为 50 MHz 的 1980 nm 飞秒激光器作为泵浦源, 同样采用透镜耦合的方式泵浦一段芯径为 6.8 μm 、长度为 0.6 m 的全固态氟碲酸盐光纤, 实现了平均功率为 10.4 W 的超连续谱输出, 光谱范围为 947~3934 nm, 相应的光-光转换效率约为 65%。

2020 年, Li 等^[131] 采用芯径为 11 μm 、长度为 60 cm 的

氟磷酸盐光纤作为非线性介质,以高功率 1.93~2.50 μm 超连续谱光纤激光器作为泵浦源,在泵浦功率为 39.7 W 的情况下,获得了输出功率为 22.7 W、光谱覆盖范围为 0.93~3.95 μm 的超连续谱输出。其中,氟磷酸盐光纤与泵浦源输出光纤采用机械对接的方式进行对接,这也造成了较大的功率损耗。输出光谱的 10 dB 带宽约为 1633 nm,对应的光谱范围为 1890~3523 nm,其光-光转换效率约为 57.2%。

2022 年,Guo 等^[132]采用芯径为 11 μm 、长度为 56 cm 的氟磷酸盐光纤作为非线性介质,采用高功率 1.93~2.50 μm 超连续谱光纤激光器作为泵浦源。其中,氟磷酸盐光纤通过直接熔接的方式与泵浦源输出光纤进行连接,这形成了更加紧凑的全光纤结构,超连续谱的输出功率也得到了进一步提升。当泵浦功率为 42.6 W 时,获得了光谱范围为 0.93~3.99 μm 的 25.8 W 超连续谱输出,其相应的光-光转换效率约为 60.6%。

2023 年,Jiao 等^[133]通过低损耗 (<0.1 dB/m) 氟磷酸盐光纤实现了超过 50 W 的全光纤中红外超连续谱

激光输出。实验装置如图 18(a)所示,其以 1560 nm 的飞秒激光器作为种子源,首先 HNLF 光纤对种子光进行预放大,接着利用色散补偿光纤(DCF)进行色散补偿,之后通过掺铊光纤放大器(TDFA)进行主放大,利用拉曼孤子自频移效应对光谱进行展宽,得到 1.9~2.5 μm 的超连续谱输出,最后利用该超连续谱激光泵浦一段 48 cm 长的氟磷酸盐光纤。其中,氟磷酸盐-硅光纤之间利用倾斜熔接方法进行熔接,该方法进一步提升了超连续谱激光的输出功率。当泵浦功率为 73.55 W 时,获得了光谱范围为 1220~3740 nm 的 50.22 W 超连续谱输出。这是目前利用氟磷酸盐光纤获得的超连续谱激光的最高输出功率。图 18(b)、(c)为不同输出功率下氟磷酸盐光纤的超连续光谱图以及氟磷酸盐光纤的输出功率随泵浦功率的变化图。总体看来,氟磷酸盐光纤具有抗损伤阈值高和非线性系数高等优点,可以在很短的光纤内实现高功率超连续谱激光的输出。但这类超连续谱激光器在光谱的平坦性和长波功率占比等方面仍然有较大的提升空间。

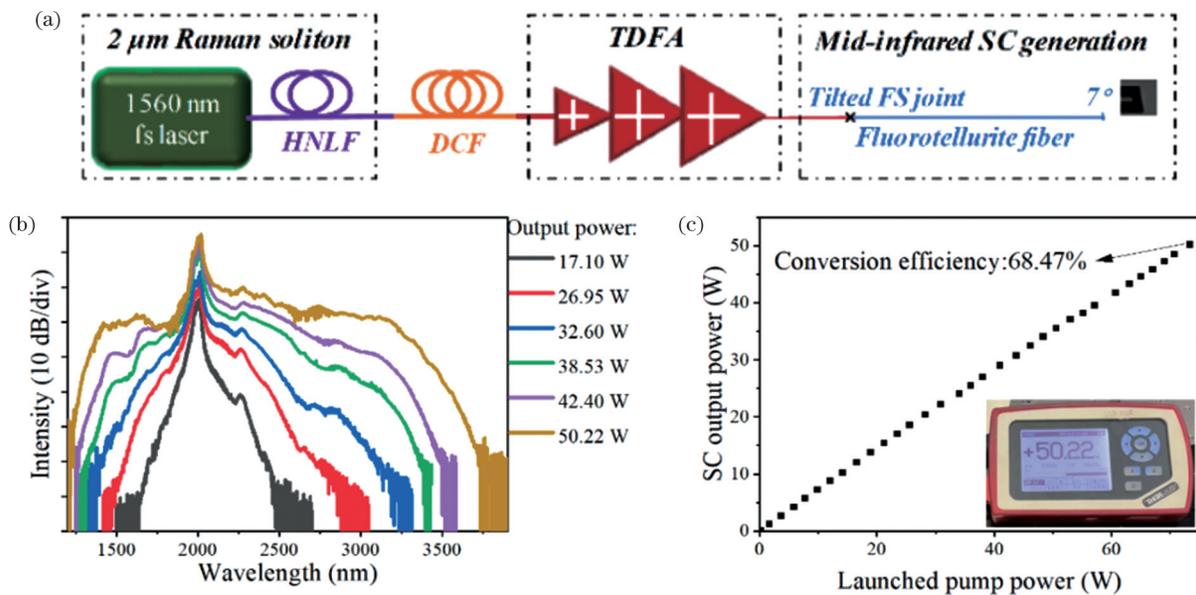


图 18 高功率氟磷酸盐光纤超连续谱激光器^[133]。(a)实验装置图;(b)不同输出功率下氟磷酸盐光纤的超连续光谱图;(c)输出功率随泵浦功率的变化

Fig. 18 High power fluorotellurite fiber supercontinuum laser^[133]. (a) Experimental setup; (b) spectra of fluorotellurite fiber at different output powers; (c) output power versus pump power

4.2.3 基于 InF_3 光纤的超连续谱激光器

虽然基于 ZBLAN 和氟磷酸盐光纤的超连续谱激光器的功率和光谱宽度在不断提升,但光谱扩展明显受限于 ZBLAN 和氟磷酸盐光纤的长波损耗谱。 InF_3 光纤具有更好的长波透过性能及较为稳定的理化性能,因此, InF_3 光纤也成为发展高功率中红外超连续谱激光的重要介质。

2016 年,加拿大拉瓦尔大学的 Gauthier 等^[134]利用光参量振荡发生器产生的波长为 2.75 μm 、脉宽为 400 ps、重复频率为 2 kHz 的种子光,经过空间耦合进入掺

Er^{3+} :ZBLAN 光纤进行放大,并采用熔接方式接入一段低损耗的非线性 InF_3 光纤,在 15 m 长的 InF_3 光纤中产生了光谱范围为 2.4~5.4 μm 的超连续激光。其中,光谱中超过 3 μm 的光谱功率占总功率的 82%,但是由于 CO_2 分子在 4.2 μm 处的吸收峰,光谱功率密度在 4.2 μm 后严重下降。

2018 年,加拿大国防研究中心的 Th  berge 等^[135]采用脉冲宽度为 50 ps 的 1.55 μm 激光器作为种子源,利用多级掺铊光纤放大器和掺铊光纤放大器进行功率放大和光谱预展,得到覆盖范围为 1.8~2.6 μm 的超

连续谱激光。并以其作为泵浦源,泵浦一段长度为 20 m、纤芯直径为 9.5 μm 的 InF_3 光纤,在调制不稳定性、自相位调制和拉曼孤子自频移作用下,获得覆盖范围为 1~5 μm 的超连续谱激光,输出功率为 1 W。

2020 年,国防科技大学的 Yang 等^[136]利用 InF_3 光纤在波长超过 3 μm 处实现了功率超过 2 W 的全光纤中红外超连续谱激光输出。实验装置如图 19(a) 所示,其采用 1550 nm 的纳秒激光器作为种子源,首先利用 EYDFA 对种子光进行预放大,接着利用一段单模光纤对光谱进行频移,之后利用 TDFA 的非线性效应对光谱进行展宽,得到高功率平坦的 1.9~2.6 μm 超连续谱激光,最后利用该超连续谱激光泵浦一段纤芯直径为 7.5 μm 、长度为 11 m 的 InF_3 光纤。其中石英光纤

和 InF_3 光纤采用非对称熔接法进行熔接,熔接损耗仅为 0.36 dB,该方法进一步提升了超连续谱激光的输出功率。最终实现了平均输出功率为 11.8 W、光谱覆盖范围为 1.9~4.9 μm 的超连续谱激光输出,其 10 dB 带宽为 2550 nm,光谱如图 19(b) 所示。综上,基于 InF_3 光纤的超连续谱激光器在产生 3~5 μm 超连续谱激光方面具有明显的优势,与 ZBLAN 光纤类似, InF_3 光纤也存在热稳定性和抗潮解性能较差等缺点,因此它的高功率输出稳定性仍然有待提高。此外,基于 InF_3 光纤产生的超连续谱激光功率,特别是 3 μm 后的功率占比仍然有待提高。相信在不久的将来,研究者们通过不同的泵浦结构和级联方式及改变光纤色散等方法,可以进一步提升 3~5 μm 激光的功率占比。

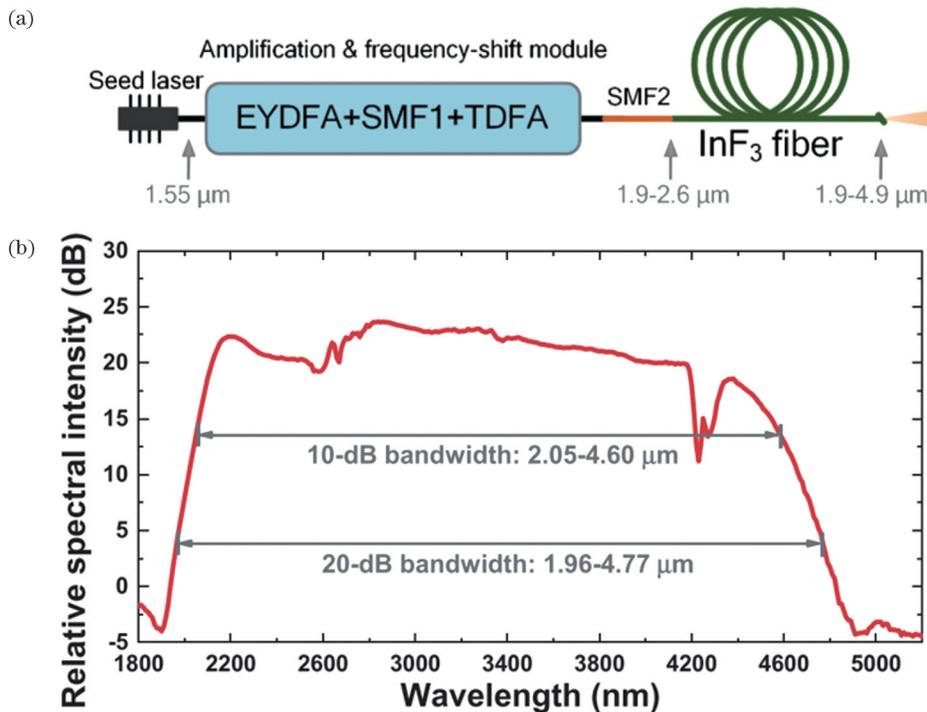


图 19 基于 1.9~4.9 μm InF_3 光纤的超连续谱激光器^[136]。(a) 实验装置图;(b) 基于 InF_3 光纤的超连续光谱图

Fig. 19 Supercontinuum laser based on 1.9-4.9 μm InF_3 fiber^[136]. (a) Experimental setup; (b) supercontinuum spectrum based on InF_3 fiber

5 结束语

随着半导体激光技术、红外玻璃光纤拉制工艺以及泵浦方案的不断完善与提升,中红外光纤激光源研究取得了突飞猛进的发展,并衍生出稀土离子掺杂光纤直接激射、光纤拉曼非线性波长频移、超连续谱展宽等多种技术途径。掌握实现高功率中红外光纤激光输出的关键方法具有极其重要的意义。在过去的十多年里,国内外研究小组在 2.5~5.0 μm 高功率中红外光纤激光的研究中获得了诸多结果。例如:在单波长激光产生方面,掺 Er^{3+} 氟锆基光纤直接激射的 2.8 μm 连续激光的最大平均功率已经达到 41.6 W,最高效率接近 60%;通过锁模,结合腔外放大自压缩的方式,该波段

超短脉冲的最大平均功率也达到了 8.12 W (脉宽为 148 fs),最高峰值功率突破 2 MW (脉宽为 49 fs);在更长波长的 3~4 μm 区间,掺 Dy^{3+} 、 Er^{3+} 和 Ho^{3+} 氟化物光纤已经分别实现了平均功率为 10.1、14.9、0.2 W 的 3.2、3.5、3.9 μm 连续激光输出。在可调谐激光产生方面,利用飞秒脉冲驱动的拉曼孤子自频移效应,已经实现了 2.8~4.8 μm 宽带覆盖,并在 3.0~3.8 μm 区间获得了瓦级平均功率输出,但在更长的 3.8~4.8 μm 区间,平均功率仅为数十 mW。在波长连续覆盖方面,基于氟硝酸盐光纤的超连续谱激光的平均功率最近已突破 50 W (50.22 W@1.22~3.74 μm),而采用透射窗口更宽的氟钢基光纤则可将长波边缘进一步拓展至 5 μm 。尽管如此,相比成熟的近红外波段,中红外光纤激光器

还存在着较大的差距,要想实现功率大幅提升,还需要在以下几个方面做出努力。

1) 高性能的红外玻璃光纤

高质量的红外玻璃光纤可以说是实现高功率中红外激光输出的先决条件,其传输损耗、损伤阈值、热传导、稳定性等参数与激光性能息息相关。对于目前最常用的中红外氟锆基光纤,其相对较低的损伤阈值和易潮解的特性是限制功率大幅提升的重要因素;氟铟基光纤可以在一定程度上缓解易潮解问题,且具有更长的透射边界,但其相对较低的损伤阈值仍然难以支持大幅功率提升;氟铝基和氟碲酸盐光纤可以有效缓解上述问题,但长波处的光纤损耗显著增加,难以支持大幅波长拓展;常规的硫系玻璃光纤具有较宽的红外透射窗口,但其损伤阈值较低,且损耗相对较大。因此,研制兼具高损伤阈值、宽传输窗口、低损耗、高离子掺杂能力的红外光纤是中红外光纤激光技术发展需要解决的首要问题。

2) 高性能的红外光纤器件

相比近红外光纤激光器,由于缺乏高质量的红外光纤功能器件(如光纤光栅、端帽、合束器、隔离器等),大部分中红外光纤激光器采用局部空间结构,这不仅增大了系统的损耗,降低了效率,阻碍了功率高效提升,同时也严重影响了系统的稳定性和鲁棒性,限制了激光器的实际应用。因此,研制具有高损伤阈值、宽工作带宽的中红外光纤功能器件是实现高功率中红外光纤激光输出需要解决的另一关键问题。

3) 新的激光架构

热载是限制激光功率提升的关键因素,大部分激光系统的损坏均与过高的热载相关。虽然合理设计冷却系统可以在一定程度上缓解系统热载,但如何从产热根源上对热载进行抑制和调控是更值得探索的问题。相比近红外波段,中红外波段因其更长的波长使得系统存在更大的量子亏损,这给激光热载的抑制带来了更大的挑战。为了解决上述问题,研究人员提出了一系列方法,如:借助离子间的能量传递过程实现粒子二次利用,从而突破斯托克斯转换极限,达到缓解热载的目的;通过多波长混合泵浦或跃迁的方式,构建新的粒子循环体系,缓解大量量子亏损带来的大热载问题;通过级联结构逐级转换波长,实现热载分摊,从而提升单个系统的热载上限。因此,探索新的产热抑制和热载调控方法,是实现中红外高功率光纤激光输出需要解决的又一关键问题。

参 考 文 献

- Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 423-431.
- Colley C S, Hebden J C, Delpy D T, et al. Mid-infrared optical coherence tomography[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(12): 123108.
- Neev J, Da Silva L B, Feit M D, et al. Ultrashort pulse lasers for hard tissue ablation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, 2(4): 790-800.
- Zorin I, Gattinger P, Prylepa A, et al. Time-encoded mid-infrared Fourier-domain optical coherence tomography[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(17): 4108-4111.
- Amrania H, McCrow A P, Matthews M R, et al. Ultrafast infrared chemical imaging of live cells[J]. *Chemical Science*, 2011, 2(1): 107-111.
- 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(2/3): 101-114.
- Nejadmalyeri A H, Herman P R, Burghoff J, et al. Inscription of optical waveguides in crystalline silicon by mid-infrared femtosecond laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(9): 964-966.
- Baranov A N, Teissier R. Quantum cascade lasers in the InAs/AlSb material system[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(6): 85-96.
- Vurgaftman I, Bewley W W, Canedy C L, et al. Interband cascade lasers with low threshold powers and high output powers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 1200210.
- Luo H Y, Li S Q, Wu X D, et al. Unlocking the ultrafast potential of gold nanowires for mode-locking in the mid-infrared region[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(7): 1562-1565.
- 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.
- 罗鸿禹. 2~4 微米中红外脉冲光纤激光器研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- Luo H Y. Research on pulsed mid-infrared fiber laser operating at 2~4 μm [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- Xu C J, Zhang J Q, Liu M, et al. Recent advances in luminescence and lasing research in ZBYA glass[J]. *Optical Materials Express*, 2022, 12(4): 1542-1554.
- Liu F, Li J F, Luo H Y, et al. Study on soliton self-frequency shift in a Tm-doped fiber amplifier seeded by a Kelly-sideband-suppressed conventional soliton[J]. *Optics Express*, 2021, 29(5): 6553-6562.
- Yu L P, Liang J H, Huang S T, et al. Generation of single solitons tunable from 3 to 3.8 μm in cascaded Er³⁺-doped and Dy³⁺-doped fluoride fiber amplifiers[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(9): 2140-2146.
- 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.
- Gierschke P, Grebing C, Abdelaal M, et al. Nonlinear pulse compression to 51-W average power GW-class 35-fs pulses at 2- μm wavelength in a gas-filled multi-pass cell[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(14): 3511-3514.
- Zhou Z Y, Huang W, Cui Y L, et al. 3.1 W mid-infrared fiber laser at 4.16 μm based on HBr-filled hollow-core silica fibers[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(22): 5785-5788.
- 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: 15.
- 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.
- 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): 6-14.
- 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.
- 罗鸿禹, 李剑峰. 中红外锁模氟化物光纤激光器研究进展[J]. *中国激光*, 2022, 49(1): 0101003.

- Luo H Y, Li J F. Progress on mid-infrared mode-locked fluoride fiber lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101003.
- [24] Jackson S D, King T A. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(5): 948-956.
- [25] Eichhorn M. Quasi-three-level solid-state lasers in the near and mid infrared based on trivalent rare earth ions[J]. Applied Physics B, 2008, 93(2): 269-316.
- [26] Anderson B M, Solomon J, Flores A. 1.1 kW, beam-combinable thulium doped all-fiber amplifier[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11665: 116650B.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Hanna D C, Perry I R, Lincoln J R, et al. A 1-Watt thulium-doped cw fiber laser operating at 2 μm [J]. Optics Communications, 1990, 80(1): 52-56.
- [31] Jackson S D, King T A. High-power diode-cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser[J]. Optics Letters, 1998, 23(18): 1462-1464.
- [32] Frith G P, Lancaster D G, Jackson S D. 85 W Tm³⁺-doped 2 μm fibre laser pumped at 793 nm[C]//2005 IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings, October 22-28, 2005, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2005: 762-763.
- [33] Meleshkevich M, Platonov N, Gapontsev D, et al. 415 W single-mode CW thulium fiber laser in all-fiber format[C]//2007 European Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference, June 17-22, 2007, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2007.
- [34] Ehrenreich T, Leveille R, Majid I, et al. 1-kW, all-glass Tm: fiber laser[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7580: 758016.
- [35] 刘茵紫, 邢颖滨, 廖雷, 等. 530 W 全光纤结构连续掺铥光纤激光器[J]. 物理学报, 2020, 69(18): 184209.
- Liu Y Z, Xing Y B, Liao L, et al. 530 W all-fiber continuous-wave Tm-doped fiber laser[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(18): 184209.
- [36] Brierley M C, France P W. Continuous wave lasing at 2.7 μm in an erbium-doped fluorozirconate fibre[J]. Electronics Letters, 1988, 24(15): 935-937.
- [37] Poppe E, Srinivasan B, Jain R K. 980 nm diode-pumped continuous wave mid-IR (2.7 μm) fibre laser[J]. Electronics Letters, 1998, 34(24): 2331-2333.
- [38] Jackson S D, King T A, Pollnau M. Diode-pumped 1.7-W erbium 3- μm fiber laser[J]. Optics Letters, 1999, 24(16): 1133-1135.
- [39] Fortin V, Bernier M, Bah S T, et al. 30 W fluoride glass all-fiber laser at 2.94 μm [J]. Optics Letters, 2015, 40(12): 2882-2885.
- [40] Chen T T, Li J, Yuan J L, et al. 3 μm watt-level all-fiber lasers based on mid-IR dielectric-coated fiber mirrors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(1): 249-254.
- [41] Wetenkamp L. Efficient CW operation of a 2.9 μm Ho³⁺-doped fluorozirconate fibre laser pumped at 640 nm[J]. Electronics Letters, 1990, 26(13): 883-884.
- [42] Jackson S D. 210 mW 2.84 μm Ho³⁺, Pr³⁺-doped fluoride fibre laser[J]. Electronics Letters, 2003, 39(10): 772-773.
- [43] Jackson S D. High-power and highly efficient diode-cladding-pumped holmium-doped fluoride fiber laser operating at 2.94 μm [J]. Optics Letters, 2009, 34(15): 2327-2329.
- [44] Li J F, Hudson D D, Jackson S D. High-power diode-pumped fiber laser operating at 3 μm [J]. Optics Letters, 2011, 36(18): 3642-3644.
- [45] Majewski M R, Jackson S D. Highly efficient mid-infrared dysprosium fiber laser[J]. Optics Letters, 2016, 41(10): 2173-2176.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] Ososkov Y, Lee J, Fernandez T T, et al. High-efficiency fluorindate glass fiber laser[J]. Optics Letters, 2023, 48(10): 2664-2667.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] Wang C C, Luo H Y, Yang J, et al. Watt-level $\sim 3.5 \mu\text{m}$ Er³⁺-doped ZrF₄ fiber laser using dual-wavelength pumping at 655 and 1981 nm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(15): 784-787.
- [54] Luo H Y, Wang Y Z, Chen J S, 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.
- [55] Maes F, Fortin V, Poulain S, et al. Room-temperature fiber laser at 3.92 μm [J]. Optica, 2018, 5(7): 761-764.
- [56] 陶蒙蒙, 叶锡生, 叶景峰, 等. 同带泵浦千瓦级掺铥光纤激光器输出特性理论模拟[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 0101019.
- Tao M M, Ye X S, Ye J F, et al. Modeling In-band pumped kW level high-power Tm-doped fiber lasers via simulations[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 0101019.
- [57] Yin K, Zhang B, Xue G H, et al. High-power all-fiber wavelength-tunable thulium doped fiber laser at 2 μm [J]. Optics Express, 2014, 22(17): 19947-19952.
- [58] 张伟, 张嘉阳, 吴闻迪, 等. 高功率连续波掺铥光纤激光器研究进展[J]. 红外, 2017, 38(5): 1-7.
- Zhang W, Zhang J Y, Wu W D, et al. Research progress of high power continuous-wave Tm-doped fiber laser[J]. Infrared, 2017, 38(5): 1-7.
- [59] Szlauer R, Götschl R, Razmaria A, et al. Endoscopic vaporesection of the prostate using the continuous-wave 2- μm thulium laser: outcome and demonstration of the surgical technique [J]. European Urology, 2009, 55(2): 368-375.
- [60] Pal A, Chen S Y, Sen R, et al. A high-Q low threshold thulium-doped silica microsphere laser in the 2 μm wavelength region designed for gas sensing applications[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(8): 085101.
- [61] Phillips C R, Langrock C, Pelc J S, et al. Supercontinuum generation in quasi-phase-matched LiNbO₃ waveguide pumped by a Tm-doped fiber laser system[J]. Optics Letters, 2011, 36(19): 3912-3914.
- [62] Kulkarni O P, Alexander V V, Kumar M, et al. Supercontinuum generation from ~ 1.9 to 4.5 μm in ZBLAN fiber with high average power generation beyond 3.8 μm using a thulium-doped fiber amplifier[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2011, 28(10): 2486-2498.
- [63] Hanna D C, Jauncey I M, Percival R M, et al. Continuous-wave oscillation of a monomode thulium-doped fibre laser[J]. Electronics Letters, 1988, 24(19): 1222-1223.
- [64] Snitzer E, Po H, Hakimi F, et al. Double clad, offset core Nd fiber laser[C]//Optical Fiber Sensors, New Orleans, LA, Washington, DC: OSA, 1988: PD5.
- [65] Tang Y L, Xu J Q, Chen W, et al. 150-W Tm³⁺-doped fiber lasers with different cooling techniques and output couplings[J]. Chinese Physics Letters, 2010, 27(10): 104207.
- [66] Wang X, Zhou P, Wang X L, et al. 102 W monolithic single frequency Tm-doped fiber MOPA[J]. Optics Express, 2013, 21

- (26): 32386-32392.
- [67] Hu Z Y, Yan P, Xiao Q R, et al. 227-W output all-fiberized Tm-doped fiber laser at 1908 nm[J]. Chinese Physics B, 2014, 23(10): 104206.
- [68] 刘江, 刘晨, 师红星, 等. 342 W 全光纤结构窄线宽连续掺铥光纤激光器[J]. 物理学报, 2016, 65(19): 194209.
- Liu J, Liu C, Shi H X, et al. 342 W narrow-linewidth continuous-wave thulium-doped all-fiber laser[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(19): 194209.
- [69] Yao W C, Shao Z H, Shen C F, et al. 400 W all-fiberized Tm-doped MOPA at 1941 nm with narrow spectral linewidth[C]// Laser Congress 2017 (ASSL, LAC), October 1 - 5, 2017, Nagoya, Aichi. Washington, DC: OSA, 2017: JTU2A.33.
- [70] Zhu X S, Jain R. Demonstration of >8 Watt output from laser diode pumped mid-infrared fiber lasers[C]//2006 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference, May 21-26, 2006, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008.
- [71] Pollnau M, Jackson S D. Energy recycling versus lifetime quenching in erbium-doped 3- μm fiber lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(2): 162-169.
- [72] Golding P S, Jackson S D, King T A, et al. Energy transfer processes in Er^{3+} -doped and Er^{3+} , Pr^{3+} -codoped ZBLAN glasses [J]. Physical Review B, 2000, 62(2): 856.
- [73] Bernier M, Faucher D, Vallée R, et al. Bragg gratings photoinduced in ZBLAN fibers by femtosecond pulses at 800 nm [J]. Optics Letters, 2007, 32(5): 454-456.
- [74] Aydın Y O, Fortin V, Maes F, et al. Diode-pumped mid-infrared fiber laser with 50% slope efficiency[J]. Optica, 2017, 4(2): 235-238.
- [75] Luo H Y, Shi J C, Chen J S, et al. Towards high-power and-efficiency $\sim 2.8 \mu\text{m}$ lasing: lightly-erbium-doped ZrF_4 fiber laser pumped at $\sim 1.7 \mu\text{m}$ [J]. Journal of Lightwave Technology: 1-10 [2023-11-05]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10221680>.
- [76] Jackson S D. Continuous wave 2.9 μm dysprosium-doped fluoride fiber laser[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(7): 1316-1318.
- [77] 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 μm [J]. Optics Express, 2006, 14(2): 678-685.
- [78] 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.
- [79] Wang Y Z, Luo H Y, Gong H T, et al. Watt-level and tunable operations of 3 μm -class dysprosium ZrF_4 fiber laser pumped at 1.69 μm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(14): 737-740.
- [80] Többen H. CW lasing at 3.45 μm in erbium-doped fluorozirconate fibres[J]. Frequenz, 1991, 45(9/10): 250-252.
- [81] 王森宇, 陈俊生, 赵鑫生, 等. 3~5 μm 稀土离子掺杂中红外光纤激光器的研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(5): 20230215.
- Wang S Y, Chen J S, Zhao X S, et al. Research progress in 3-5 μm rare earth ion doped mid-infrared fiber lasers(invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(5): 20230215.
- [82] Raman C V. A change of wave-length in light scattering[J]. Nature, 1928, 121(3051): 619.
- [83] Woodbury E J, Ng W K. Ruby laser operation in the near IR[J]. Proceedings of IRE, 1962, 50(11): 2365-2383.
- [84] Jiang H W, Zhang L, Feng Y. Silica-based fiber Raman laser at >2.4 μm [J]. Optics Letters, 2015, 40(14): 3249-3252.
- [85] Jiang H W, Zhang L, Yang X Z, et al. Pulsed amplified spontaneous Raman emission at 2.2 μm in silica-based fiber[J]. Applied Physics B, 2016, 122(4): 1-4.
- [86] Du T J, Li Y H, Wang H J, et al. 2166 nm all-fiber short-pulsed Raman laser based on germania-core fiber[J]. Optics Express, 2019, 27(24): 34552-34558.
- [87] Liu F, Li J F, Luo H Y, et al. Efficient Raman pulse fiber laser pumped by a dissipative soliton resonance pulse near 2 μm [J]. Optics Express, 2023, 31(4): 6741-6749.
- [88] Fortin V, Bernier M, Carrier J, et al. Fluoride glass Raman fiber laser at 2185 nm[J]. Optics Letters, 2011, 36(21): 4152-4154.
- [89] 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.
- [90] Jiao Y D, Jia Z X, Guo X H, et al. Third-order cascaded Raman shift in all-solid fluorotellurite fiber pumped at 1550 nm[J]. Optics Letters, 2022, 47(3): 690-693.
- [91] Jackson S D, Anzueto-Sánchez G. Chalcogenide glass Raman fiber laser[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(22): 221106.
- [92] Bernier M, Fortin V, Caron N, et al. Mid-infrared chalcogenide glass Raman fiber laser[J]. Optics Letters, 2013, 38(2): 127-129.
- [93] Bernier M, Fortin V, El-Amraoui M, et al. 3.77 μm fiber laser based on cascaded Raman gain in a chalcogenide glass fiber[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2052-2055.
- [94] Wang F, Zhou X, Zhang X N, et al. Mid-infrared cascaded stimulated Raman scattering and flat supercontinuum generation in an As-S optical fiber pump at 2 μm [J]. Applied Optics, 2021, 60(22): 6351-6356.
- [95] Zhu G W, Geng L X, Zhu X S, et al. Towards ten-watt-level 3-5 μm Raman lasers using tellurite fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7559-7573.
- [96] 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.
- [97] Dvoyrin V V, Klimentov D, Sorokina I T. 3 W Raman soliton tunable between 2 - 2.2 μm in Tm-doped fiber MOPA[C] // Advanced Solid-State Lasers Congress, October 27-November 1, 2013, Paris. Washington, DC: OSA, 2013: MTh1C.2.
- [98] Anashkina E A, Andrianov A V, Koptev M Y, et al. Generating femtosecond optical pulses tunable from 2 to 3 μm with a silica-based all-fiber laser system[J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 2963-2966.
- [99] Cheng T L, Kanou Y, Asano K, et al. Soliton self-frequency shift and dispersive wave in a hybrid four-hole $\text{AsSe}_2\text{-As}_2\text{S}_3$ microstructured optical fiber[J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(12): 121911.
- [100] Salem R, Jiang Z, Liu D F, et al. Mid-infrared supercontinuum generation spanning 1.8 octaves using step-index indium fluoride fiber pumped by a femtosecond fiber laser near 2 μm [J]. Optics Express, 2015, 23(24): 30592-30602.
- [101] Klimentov D, Dvoyrin V V, Tolstik N, et al. Raman soliton fiber lasers tunable between 1.98-2.22 μm [C]//High-Brightness Sources and Light-Driven Interactions, March 20-22, 2016, Long Beach, California. Washington, DC: OSA, 2016: MM6C.2.
- [102] 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.
- [103] 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.
- [104] Wang P, Shi H X, Tan F Z, et al. Enhanced tunable Raman soliton source between 1.9 and 2.36 μm in a Tm-doped fiber amplifier[J]. Optics Express, 2017, 25(14): 16643-16651.
- [105] Li Z R, Li N, Yao C F, et al. Tunable mid-infrared Raman soliton generation from 1.96 to 2.82 μm in an all-solid fluorotellurite fiber [J]. AIP Advances, 2018, 8(11): 115001.
- [106] Li Y H, Du T J, Xu B, et al. Compact all-fiber 2.1-2.7 μm tunable Raman soliton source based on germania-core fiber[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 28544-28550.
- [107] Nagl N, Mak K F, Wang Q, et al. Efficient femtosecond mid-infrared generation based on a Cr: ZnS oscillator and step-index fluoride fibers[J]. Optics Letters, 2019, 44(10): 2390-2393.
- [108] Tiliouine I, Delahaye H, Granger G, et al. Fiber-based source of 500 kW mid-infrared solitons[J]. Optics Letters, 2021, 46(23): 5890-5893.

- [109] Hou Y W, Wu Q, Liu F, et al. Numerical demonstration of the soliton self-frequency shift process beyond 8 μm in a tellurite-chalcogenide fiber cascaded structure[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(4): 1540412.
- [110] Ge S Y, Wang J, Ren H F, et al. High-efficiency tunable femtosecond solitons generation from 1.9 to 2.35 μm in a thulium-doped fiber amplifier via precise seed-pulse management[J]. Optics Express, 2022, 30(2): 3089-3100.
- [111] Gauthier J C, Olivier M, Paradis P, et al. Femtosecond tunable solitons up to 4.8 μm using soliton self-frequency shift in an InF₃ fiber[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 15898.
- [112] Chang P F, Luo H Y, 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.
- [113] Saldana-Diaz J E, Jarabo S, Salgado-Remacha F J. Octave-spanning supercontinuum generation in highly nonlinear silica fibres based on cost-effective fibre amplifiers[J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(9): 095102.
- [114] Saldana-Diaz J E, Jarabo S, Salgado-Remacha F J. Supercontinuum source based on all-silica fibers with optimized spectral power from 1100 up to 2300 nm[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 117: 73-78.
- [115] Zheng Z J, Ouyang D Q, Wang J Z, et al. Supercontinuum generation by using a highly germania-doped fiber with a high-power proportion beyond 2400 nm[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(6): 3200508.
- [116] Wang X H, Lei H, Xie K L, et al. All-silica fiber ultra-flat 2-3 μm supercontinuum source based on highly nonlinear silica fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(7): 381-384.
- [117] Lei H, Xie K L, Wang X H, et al. NIR to MIR ultra-broadband supercontinuum laser source based on all-silica fibers[J]. Optics Express, 2023, 31(18): 29403-29410.
- [118] Yin K, Zhang B, Yao J M, et al. 1.9-3.6 μm supercontinuum generation in a very short highly nonlinear germania fiber with a high mid-infrared power ratio[J]. Optics Letters, 2016, 41(21): 5067-5070.
- [119] Jain D, Sidharthan R, Moselund P M, et al. Record power, ultra-broadband supercontinuum source based on highly GeO₂ doped silica fiber[J]. Optics Express, 2016, 24(23): 26667-26677.
- [120] Yin K, Zhang B, Yang L Y, et al. 30 W monolithic 2-3 μm supercontinuum laser[J]. Photonics Research, 2018, 6(2): 123-126.
- [121] Wang X, Yao C F, Li P X, et al. All-fiber high-power supercontinuum laser source over 3.5 μm based on a germania-core fiber[J]. Optics Letters, 2021, 46(13): 3103-3106.
- [122] Yang L Y, Yang Y K, Zhang B, et al. Record power and efficient mid-infrared supercontinuum generation in germania fiber with high stability[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2022, 10: e36.
- [123] Lei H, Wang X H, Li Z H, et al. All-fiber ultra-flat supercontinuum source covering 1.85-3.57 μm based on germania-core fiber[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 164: 109478.
- [124] 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.
- [125] 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.
- [126] 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.
- [127] Xia K, Yang L L, Yan B, et al. Watt-level ultra-flattened mid-infrared supercontinuum with high power stability generation in an all-fiber structured Tm-doped fiber amplifier pumped ZBLAN single-mode fiber[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 127: 106204.
- [128] Zhu X R, Zhao D S, Zhang B, et al. Spectrally flat mid-infrared supercontinuum pumped by a high power 2 μm noise-like pulse[J]. Optics Express, 2023, 31(8): 13182-13194.
- [129] Jia Z X, Yao C F, Jia S J, et al. 4.5 W supercontinuum generation from 1017 to 3438 nm in an all-solid fluorotellurite fiber[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(26): 231106.
- [130] 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.
- [131] 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.
- [132] Guo X H, Jia Z X, Jiao Y D, et al. 25.8 W all-fiber mid-infrared supercontinuum light sources based on fluorotellurite fibers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(7): 367-370.
- [133] Jiao Y D, Jia Z X, Zhang C Y, et al. Over 50 W all-fiber mid-infrared supercontinuum laser[J]. Optics Express, 2023, 31(19): 31082-31091.
- [134] 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.
- [135] Th  berge F, B  rub   N, Poulain S, et al. Watt-level and spectrally flat mid-infrared supercontinuum in fluoroindate fibers[J]. Photonics Research, 2018, 6(6): 609-613.
- [136] 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.

Research Progress in 2-5 μm All-Solid-State Mid-Infrared High-Power Fiber Laser Sources (Invited)

Li Jianfeng*, Lei Hao, Wang Senyu, Wang Zhuang, Zhong Wenbo, Xie Kunlin,
Zhao Xinsheng, Luo Hongyu

*School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China,
Chengdu 610097, Sichuan, China*

Abstract

Significance The 2-5 μm mid-infrared wavelength range is a crucial region in an electromagnetic spectrum. Lasers that operate within this range play a critical role in various fields, such as defense, medical, environmental monitoring, and materials science. The generation of 2-5 μm lasers mainly includes solid-state lasers, quantum cascade lasers (QCL), inter-band cascade lasers, optical

parametric oscillators (OPO), and fiber lasers. Fiber lasers have unique advantages, such as good beam quality, excellent thermal management capabilities, and robustness, which make them irreplaceable for various mid-infrared laser applications. Three methods are mainly used to generate 2–5 μm fiber lasers: 1) rare-earth-doped fiber lasers, which are the simplest and fundamental; 2) nonlinear fiber lasers based on nonlinear effects, which are effective for extending the laser wavelength, filling the spectral gaps not covered by rare-earth-doped fiber lasers owing to transition-level limitations; 3) gas-filled fiber lasers, which utilize energy-level transitions in gas molecules (N_2O , HBr , and CO_2) to achieve mid-infrared laser outputs.

Progress This study comprehensively reviews the research and power-scaling progress in mid-infrared fiber lasers based on all-solid-state fibers. It covers three main types of mid-infrared fiber lasers: rare-earth-doped, Raman, and mid-infrared super-continuum fiber lasers. Table 1 in the main text presents representative achievements of rare-earth-doped fiber lasers in the 2–5 μm wavelength range. The continuous-wave laser output power within this range has been significantly improved, from milliwatt to watt/kilowatt levels. The highest output power values obtained using fiber lasers doped with Tm^{3+} , Er^{3+} , Ho^{3+} , and Dy^{3+} ions are 1100, 41.6, 7.2, and 10.1 W, respectively. In particular, the longest wavelength tunability of the rare-earth-doped fiber lasers is 700 nm. Tables 2 and 3 present representative results for mid-infrared Raman fiber lasers and tunable mid-infrared Raman soliton lasers, respectively. Currently, by using tellurite, fluoride, or chalcogenide glass fibers as the Raman gain media, a second-order-cascaded Raman fiber laser operating at 3.77 μm and a tunable Raman soliton fiber laser covering the range of 2.8–4.8 μm , with an average watt-level power output in the 3–3.8 μm region, have been developed. Tables 4 and 5 list the representative research progress on germania fiber- and soft glass fiber-based supercontinuum lasers, respectively. The output power of the supercontinuum laser using germania fiber as a nonlinear medium exceeds 41.9 W, and the spectral width is 1.9–3.5 μm . The maximum output power values of the fluorotellurite fiber- and fluoride fiber-based supercontinuum laser are 50.2 W and 11.8 W, respectively, and the spectral widths are 1.22–3.74 μm and 1.9–4.9 μm , respectively.

Conclusions and Prospects Since the beginning of 21 century, continuous improvements in semiconductor laser technology, mid-infrared glass-fiber drawing techniques, and pumping schemes have propelled the rapid development of mid-infrared fiber laser sources. In the field of high-power mid-infrared fiber lasers operating within the range of 2.5–5.0 μm , research groups worldwide have achieved significant milestones in the past decade. Nevertheless, compared with the advanced near-infrared waveband, a significant gap still exists in the output power of mid-infrared fiber lasers. The primary challenge lies in the development of mid-infrared fibers with high damage thresholds, broad transmission windows, and advanced ion-doping capabilities. The lack of high-quality mid-infrared fiber functional devices also hinders an effective increase in the output power of mid-infrared fiber lasers. The solution lies in the development of mid-infrared fiber functional devices with high damage thresholds and broad operating bandwidths. The heat load is another critical factor limiting the enhancement of laser power, and damage to laser systems is mostly related to excessive heat loads. Therefore, new methods for suppressing heat generation and regulating heat loads are required to achieve high-power mid-infrared fiber lasers.

Key words lasers; mid-infrared laser; rare earth ions; Raman lasers; supercontinuum spectrum; fluoride fibers