

瓦级 100-nm 可调谐中红外 Er:ZBLAN 光纤激光器

沈炎龙 湛鸿伟 黄珂 栾昆鹏 于力 易爱平 冯国斌 叶锡生

西北核技术研究所, 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

摘要 报道了输出功率为瓦级, 调谐范围超过 100 nm 的中红外 2.8 μm 波段光纤激光器。采用中心波长为 975 nm 半导体激光器抽运高掺铒氟化物(Er:ZBLAN)双包层光纤, 以闪耀光栅为调谐元件, 室温下实现了功率大于 1 W、宽范围可调谐的 2.8 μm 波段光纤激光输出, 最大调谐范围达 122 nm。激光器在波长 2.831 μm 处输出功率为 1.02 W, 斜率效率为 21.6%。

关键词 激光器; 光纤激光器; 可调谐; 中红外; 掺铒氟化物光纤

中图分类号 TN212, TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1002008

Watt-Level 100-nm Tunable Mid-Infrared Er:ZBLAN Fiber Laser

Shen Yanlong Chen Hongwei Huang Ke Luan Kunpeng Yu Li Yi Aiping
Feng Guobin Ye Xisheng

State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology,
Xi'an, Shaanxi 710024, China

Abstract A watt-level 100-nm tunable 2.8 μm -band mid-infrared fiber laser is demonstrated. By employing a blazing grating as the feedback, output power exceeding 1 W, tuning range of higher than 100 nm from heavily Er³⁺-doped ZBLAN double-clad fiber pumped by a laser-diode centered at 975 nm is obtained in continuous wave regime. Output power at 2.831 μm of the fiber laser is 1.02 W corresponding to the slope efficiency as high as 21.6%.

Key words lasers; fiber laser; tunable; mid-infrared; Er:ZBLAN

CIOS codes 140.3460; 140.3510; 140.3600

1 引言

中红外 3 μm 波段范围包括了许多重要的分子特征谱线, 而且是空气中极重要的大气窗口之一, 因此, 中红外 3 μm 相干光源在军事和民用方面都有重要的应用, 是目前国内外研究热点^[1-2]。一般, 3 μm 中红外波段红外光源主要由以下几种方式产生: 1) AlGaAsSb、InGaAsSb、InAs/(In) GaSb 等铟化物禁带半导体材料直接制作的中红外波段的半导体激光器^[3]; 2) 采用非线性晶体进行非线性频率变换, 如光学参量振荡(OPO)技术通过频率下转换技术将短波红外调谐到中波红外^[4-6]; 3) 半导体激光器抽运稀土离子掺杂的低声子能量玻璃光纤^[7]、晶体^[8]以及过渡金属离子掺杂的 II-VI 族半导体材料^[9]的中红外激光晶体产生的红外波段激光。与传统的固体和气体激光器相比, 光纤激光器具有光束质量好、体积小、转换效率高、散热效果好等优点^[10]而得到越来越广泛的应用。

目前, 最常用的中红外光纤为氟化物光纤^[11]和硫化物光纤^[12]。氟化物光纤中典型组分(质量分数)为 53%ZrF₄, 20%BaF₂, 4%LaF₃, 3%AlF₃ 和 20%NaF(ZBLAN), 声子能量为 550 cm⁻¹, 波长 2~5 μm 波段的光可以实现低损耗传输^[13]。在过去的十年里, 已经利用氟化物 ZBLAN 光纤中掺 Er³⁺ 或共掺 Er³⁺/Pr³⁺ 实现了 3 μm 波段高功率激光输出^[14-16]。2007 年, Zhu 等^[17]获得了室温环境下超过 9 W 的中红外 2.8 μm 激光输出, 首次实现了该波段光纤激光

收稿日期: 2015-05-08; 收到修改稿日期: 2015-06-16

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1309)

作者简介: 沈炎龙(1983—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事高功率激光技术及应用方面的研究。

E-mail: shenyanlong@nint.ac.cn

器 10 W 量级输出;2009年,Tokita等^[18]通过液体冷却方式,获得了 24 W 的激光连续输出,这也是迄今为止公开报道的 2.8 μm 光纤激光器最高连续输出功率;2011年,Faucher等^[19]成功地在 ZBLAN 光纤上刻写光纤光栅,实现了全光纤结构,并获得功率超过 20 W,斜率效率高达 35.4% 的单模激光输出;除了输出功率,在激光光谱学、光电对抗、生物检测等应用领域^[20-22],还需要激光器输出具有可调谐能力,即具有宽的调谐范围和窄线宽,并且在长波具有较大输出功率。2007年,Zhu等^[23]报道了室温下基于 Er:ZBLAN 光纤调谐特性,获得了调谐范围为 2.71~2.83 μm 激光输出,最大输出功率超过 2 W,但 2.83 μm 处激光输出功率有限(小于 200 mW);2008年,他们采用 Er/Pr:ZBLAN 光纤在室温下获得了 2.7~2.8 μm 输出,激光器在 2.83 μm 处并没有输出^[24],以上两组实验中,激光器工作的斜率效率均约为 10%;2010年,Tokita等^[25]采用约 100 W 高功率激光二极管(LD)抽运 Er:ZBLAN 光纤,通过冷却方式,实现了调谐范围为 2710~2880 nm、最大功率为 11 W 的激光输出,斜率效率为 11%。从上述报道可以看出,在较高抽运功率下,光纤中产生的废热对长波激光输出有较大影响。

从 2012 年开始,项目组开展了基于 Er:ZBLAN 光纤中红外光纤激光器研究工作。2013 年,报道了自由运转,功率为瓦级,中心波长为 2.785 μm 的中红外激光连续输出^[26];2014 年,通过对抽运端面特殊处理和有效防护,将输出功率提升到 10 W 量级,获得了最大功率为 9.2 W,斜率效率为 24.8% 的单模激光输出^[27]。本文报道了室温下输出功率为瓦级的高效中红外 3 μm 波段可调谐光纤激光器。采用自然风冷,获得了调谐范围为 2.709~2.831 μm ,调谐宽度达 122 nm 的激光输出,激光器在 2.831 μm 处功率超过 1 W,斜率效率为 21.6%。

2 实验装置

图 1 为中红外可调谐光纤激光器结构示意图。抽运源为带尾纤输出的中心波长为 975 nm、最大连续输出功率 50 W 的 LD。其尾纤的芯径和数值孔径分别是 105 μm 和 0.22。975 nm 激光经抽运耦合系统进入增益光纤内包层。抽运耦合系统由准直器(焦距 $f=11$ mm)和非球面透镜($f=22$ mm)组成。通过抽运耦合测试,此耦合系统的耦合效率达 80%。增益介质为一根长约为 2.7 m 的高掺铒 ZBLAN 双包层光纤(Fiberlabs Inc),掺杂质量分数为 6%,芯径尺寸和数值孔径分别是 33 μm 和 0.12,内包层尺寸和数值孔径分别是为 330 μm 和 0.55,外包层尺寸为 470 μm 。为了提高抽运光的吸收效率,减少抽运光在内包层中的螺旋传输,内包层形状选为八边形^[28]。对光纤抽运端,采用光纤切割刀进行 0° 角切割后,装载在刻有特殊设计的 U 型槽的紫铜热沉中,该端面亦用作激光器输出端,输出耦合率约 96%(4% 的非涅耳反射率)。光纤另一端进行 10° 角度切割处理,以抑制寄生振荡^[29]。2.8 μm 信号光经焦距为 15 mm 的 CaF_2 透镜准直后入射到可调谐激光器核心部件——闪耀光栅上。闪耀光栅采用立特罗工作模式,一方面为激光器提供反馈,另一方面起波长选择作用,其刻线密度为 625 line/mm,闪耀波长为 2.8 μm ,闪耀角为 61.2°,2.8 μm 处衍射效率约为 90%。在抽运耦合系统和光纤抽运端之间,45° 角放置了双色镜,975 nm 高透,2.8 μm 高反,将 2.8 μm 激光耦合输出,然后通过焦距为 50 mm 的 CaF_2 透镜准直后进入测量系统。测量系统有功率计(Gentec, UP19K-50L-H5)和中红外光谱仪(Andor Shamrock750)。

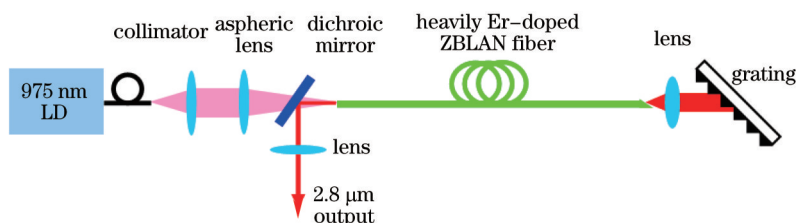


图 1 中红外可调谐光纤激光器结构示意图

Fig.1 Schematic layout of experimental setup for tunable Er:ZBLAN fiber laser

3 实验结果与分析

首先,观测了激光器在自由运转条件下激光器输出光谱。当谐振腔反馈元件为镀金全反镜时,激光器工作在自由运转模式。激光器在 2.8 μm 激光输出功率为 1.03 W 时的输出光谱如图 2 所示。激光器的中心波长为 2.793 μm ,呈双峰分布,且谱宽相对较宽,约为 3 nm。

将谐振腔镀金全反镜换为调谐元件—闪耀光栅,研究激光器输出光谱的调谐特性。当注入的抽运功率约为 1 W 时,通过转动光栅,调节信号光与光栅的入射角度,即可选择反馈波长,实现激光器调谐输出,其典型的调谐输出光谱如图 3 所示。室温下,激光器调谐范围为 2.709~2.831 μm ,宽度达 122 nm。从图 3 可以看出,在此抽运功率水平下,激光器在 $\lambda=2.79 \mu\text{m}$ 处输出功率最大,输出功率约为 76 mW,其谱线宽度约为自由运转的一半,即 1.5 nm,说明光栅具有选线和压缩线宽的作用。而在此波长两侧,激光输出功率呈降低趋势。这是因为增益光纤在该波长处增益最大,且光栅在该波长衍射效率最高,而在其两侧,增益变小,衍射效率逐渐降低,腔内损耗逐渐增加,从而使激光器输出功率降低^[30]。

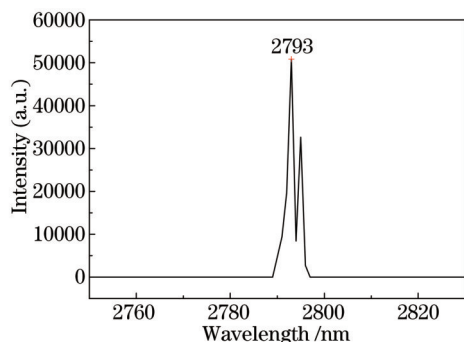


图 2 中红外光纤激光器自由运转输出光谱
Fig.2 Output spectra of mid-infrared fiber laser in free-running

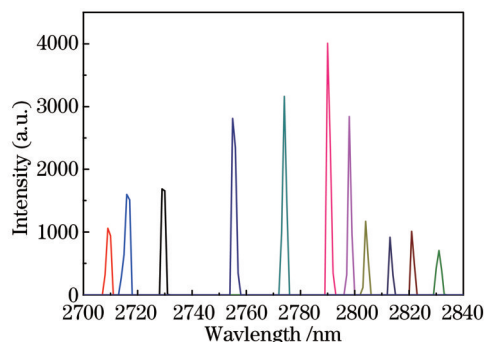


图 3 中红外 Er:ZBLAN 光纤激光器调谐输出典型光谱图
Fig.3 Typical output spectra of tunable mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser

调节光栅入射角,使得激光器输出波长在图 3 调谐范围的边缘 2.831 μm 处。此时,固定光栅,测量激光输出功率随抽运功率变化关系,如图 4 所示。激光最大功率为 1.02 W,斜率效率约为 21.6%,比文献[23-25]的斜率效率高出一倍,抽运阈值约为 2.5 W。与波长 2.775 μm 激光工作阈值相比,激光器在 2.831 μm 工作时抽运阈值更高,同时效率有所降低。这是因为,闪耀光栅在 2.831 μm 处衍射效率更低,增加了激光器腔内损耗。从图中还可以看出,功率曲线并没有饱和趋势,意味着进一步加大抽运功率,可以进一步提高激光器在该波长的输出功率。在实验过程中,光纤产生的废热不利于长波高功率输出,通过进一步对光纤进行冷却和温控,有利于提高长波输出功率。另外,实验发现,抽运功率越高,激光器输出波长调谐范围整体向长波方向移动,同时调谐范围缩小,与文献[23,25]结果一致。国际上对导致高抽运功率下调谐范围的缩小的机制尚不明确^[23],Tokita 等^[25]认为产生这种现象的原因是由于增益光纤中 OH 基的吸收所引起,但这种解释还有待进一步证实。

图 5 给出了激光器工作在 $\lambda=2.831 \mu\text{m}$ 处,不同激光输出功率下的激光光谱变化情况。可以看出,与自由运转条件下提高抽运功率激光波长发生红移相比^[27],激光工作波长基本上稳定无漂移,且激光光谱谱宽明显变窄,为 1.5 nm。

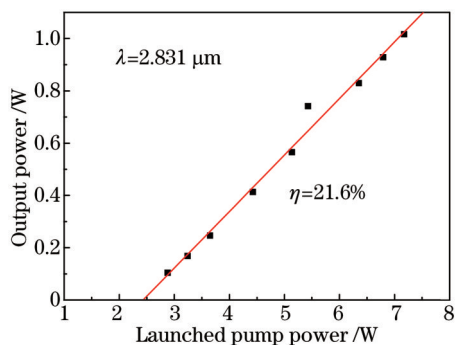


图 4 波长 2.831 μm 处激光功率随注入抽运功率变化曲线
Fig.4 Output power as a function of launched pump power at 2.831 μm

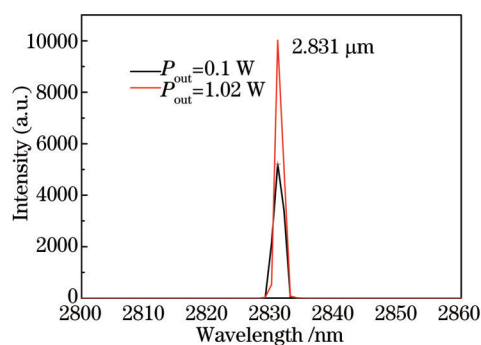


图 5 不同激光输出功率下激光光谱($\lambda=2.831 \mu\text{m}$)
Fig.5 Output spectra at various output powers ($\lambda=2.831 \mu\text{m}$)

4 结 论

报道了基于闪耀光栅,室温下获得输出功率为瓦级的中红外 3 μm 波段可调谐光纤激光器。激光器调谐范围达 122 nm,在 2.83 μm 以上波长处输出功率超过 1 W,斜率效率为 21.6%。通过优化激光器参数,并提高抽运功率,有望进一步提高调谐输出功率及拓展激光调谐范围。

参 考 文 献

- 1 Wang Ying, Luo Zhengqian, Xiong Fengfu, *et al.*. Numerical optimization of 3~5 μm mid-infrared ZBLAN fiber Raman lasers[J]. *Laser&Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 061405.
王 莹,罗正钱,熊凤福,等.数值优化 3~5 μm 中红外 ZBLAN 光纤拉曼激光器的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(6): 061405.
- 2 Chen Yubin, Wang Hongyan, Lu Qisheng, *et al.*. Optically pumped mid-infrared gas lasers[J]. *Laser&Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 010005.
陈育斌,王红岩,陆启生,等.光抽运中红外气体激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(1): 010005.
- 3 Zhang Xiong. Investigation of Devices and Physics for Antimonide Lasers and Photodiodes in Mid-Infrared[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, 2004.
张 雄.中红外波段碲化物激光器、探测器器件与物理研究[D].上海:中国科学院上海微系统与信息技术研究所,2004.
- 4 Haakestad M W, Fonnum H, Lippert E. Mid-infrared source with 0.2 J pulse energy based on nonlinear conversion of Q-switched pulses in ZnGeP₂[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 8556-8564.
- 5 Chang Jianhua, Yang Zhenbo, Lu Zhou, *et al.*. A Novel multi-wavelength mid-infrared difference frequency generation laser source based on PPLN[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1002009.
常建华,杨镇博,陆 洲,等.一种新型的基于 PPLN 的多波长中红外激光光源[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1002009.
- 6 Fan Jintao, Hu Minglie, Gu Chenglin, *et al.*. High power femtosecond green-pumped optical parametric oscillator based on lithium triborate[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0902009.
范锦涛,胡明列,顾澄琳,等.基于 LBO 的高功率飞秒绿光抽运的光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0902009.
- 7 J A Hamrington. Infrared Fibers and Their Applications[C]. SPIE, Bellingham, Wash, USA, 2004.
- 8 Arbabzadah E, Chard S, Amrania H, *et al.*. Comparison of a diode pumped Er:YSGG and Er:YAG laser in the bounce geometry at the 3 μm transition[J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 25860-25865.
- 9 Mirov SB, Fedorov VV, Martyskhin DV, *et al.*. Progress in mid-IR Cr²⁺ and Fe²⁺ doped II-VI materials and lasers[J]. *Optical Material Express*, 2011, 1(5): 898-910.
- 10 URQUHART P. Review of rare earth doped fibre lasers and amplifiers[J]. *IEE Proceedings*, 1988, 135(6): 385-407.
- 11 P W France, M G Drexhage, J M Parker, *et al.*. Fluoride Glass Optical Fibers[M]. 1990, Glasgow: Blackie.
- 12 L B Shaw, B Cole, P A Thielen, *et al.*. Mid-wave IR and long-wave IR laser potential of rare-earth doped chalcogenide glass fiber [J]. *Journal of Quantum Electronics*, 2001, 48(9): 1127-1137.
- 13 X S Zhu, N Peyghambarian. High-power ZBLAN glass fiber lasers: review and prospect[J]. *Advances in OptoElectronics*, 2010, 2010: 1-323.
- 14 S D Jackson, T A King, M Pollnau. Diode-pumped 1.7 W erbium 3- μm fiber laser[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(16): 1133-1135.
- 15 D Faucher, M Bernier, N Caron, *et al.*. Erbium-doped all-fiber laser at 2.94 μm [J]. *Opt Lett*, 2009, 34(21): 3313-3315.
- 16 Tokita, S Murakami, M Shimizu, S, *et al.*. 12 W Q-switched Er:ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(15): 2812-2814.
- 17 Zhu X, Jain R K. 10-W-level diode-pumped compact 2.78 μm ZBLAN fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(1): 26-28.
- 18 Tokita S, Murakami M, Shimizu S, *et al.*. Liquid-cooled 24 W mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser[J]. *Opt Lett*, 2009, 34(20): 3062-3064.
- 19 Faucher D, Bernier M, Androz G, *et al.*. 20 W passively cooled single-mode all-fiber laser at 2.8 μm [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(7): 1104-1106.
- 20 Peng Yuefeng, Wei Xingbin, Wang Weimin, *et al.*. High efficiency 2.7 μm tunable mid-infrared laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 30(9): 2624-2628.
彭跃峰,魏星斌,王卫民,等.高效率中红外 2.7 μm 可调谐激光器[J]. *中国激光*, 2010, 30(9): 2624-2628.
- 21 Xu Xiaojun, Li Xiao, Shang Yaping, *et al.*. Fiber laser pumped 34.2 W CW mid-infrared optical parametric oscillator[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(8): 0809002.
许晓军,李 霄,尚亚萍,等.光纤激光抽运 34.2 W 连续波中红外光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0809002.

- 22 Wang Liusan, Cao Zhensong, Wang Huan, *et al.*. A widely tunable mid-infrared difference frequency generation laser and its detection of atmospheric water[J]. Chinese J Lasers, 2011, 31(4): 0414003.
汪六三, 曹振松, 王 欢, 等. 宽调谐中红外差频激光及大气水汽浓度探测[J]. 中国激光, 2011, 31(4): 0414003.
- 23 Zhu X, Jain R. Compact 2 W wavelength-tunable Er:ZBLAN mid-infrared fiber laser[J]. Opt Lett, 2007, 32(16): 2381-2383.
- 24 Zhu X, Jain R. Watt-level 100-nm tunable 3- μm fiber laser[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(2): 156-158.
- 25 Tokita S, Hirokane M, Murakami M, *et al.*. Stable 10 W Er:ZBLAN fiber laser operating at 2.71~2.88 μm [J]. Opt Lett, 2010, 35(23): 3943-3945.
- 26 Shen Yanlong, Huang Ke, Zhu Feng, *et al.*. Laser diode-pumped watt-level single mode heavily erbium-doped mid-infrared fiber laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(3): 03014002.
沈炎龙, 黄 珂, 朱 峰, 等. LD泵浦瓦级单模高掺铒中红外光纤激光器[J]. 光子学报, 2014, 43(3): 03014002.
- 27 Shen Yanlong, Huang Ke, Zhou Songqing, *et al.*. 10 W-level high efficiency single-mode mid-infrared 2.8 μm fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0502008.
沈炎龙, 黄 珂, 周松青, 等. 10 W级高效率单模中红外 2.8 μm 光纤激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502008.
- 28 Liu A, Ueda K. The absorption characteristics of circular, offset, and rectangular double-clad fibers[J]. Opt Commun, 1996, 132(5-6): 511-518.
- 30 Zhu X, Jain R K. Watt-level Er-doped and Er-Pr-codoped ZBLAN fiber amplifier at the 2.7-2.8 μm wavelength range[J]. Opt Lett, 2008, 33(14): 1578-1580.
- 31 Chen Yuqing, Wang Jinghuan. Principle of Lasers[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005.
陈钰清, 王静环. 激光原理[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005.

栏目编辑: 宋梅梅