

中红外 2.8 μm 光纤激光器机械调 Q 工作特性

沈炎龙 周松青 湛鸿伟 黄珂 栾昆鹏 陶蒙蒙 于力 易爱平 冯国斌

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 采用中心波长为 975 nm 半导体激光器(LD)抽运高掺铒氟化物双包层光纤 Er:ZBLAN,并在谐振腔内插入机械斩波器,获得了 2.8 μm 激光机械调 Q 输出。研究了激光器在不同抽运功率,不同工作频率条件下的输出特性,分析了脉冲分裂的原因。通过控制适当抽运功率,激光器工作在 3.5 kHz 条件下,获得了最大单脉冲能量 84.5 μJ ,脉宽 250.3 ns,峰值功率超过 300 W 的脉冲输出。

关键词 激光器;调 Q ;斩波器;中红外;光纤激光器;掺铒氟化物光纤

中图分类号 TN212 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0114002

Output Characteristics of Q -Switched Mid-Infrared Fiber Laser with a Mechanical Chopper

Shen Yanlong Zhou Songqing Chen Hongwei Huang Ke Luan Kunpeng
Tao Mengmeng Yu Li Yi Aiping Feng Guobin

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

Abstract A high power actively Q -switched mid-infrared fiber laser at 2.8- μm waveband is demonstrated by employing a 975 nm laser-diode pumping a piece of heavily Er³⁺-doped ZBLAN doubleclad fiber and a mechanical chopper into the cavity as the Q -switch. Output characteristics at different pump powers and various repetition rates is investigated. Meanwhile, the pulse spikes are observed and analyzed. The maximum pulse energy of 84.5 μJ , pulse duration of 250.3 ns and peak power of exceeding 300 W is obtained at a repetition rate of 3.5 kHz under a proper pump power.

Key word lasers; Q -switched; mechanical chopper; mid-infrared; fiber lasers; Er:ZBLAN

OCIS codes 060.2410; 140.3500; 140.3510; 140.3540; 140.3538

1 引言

近年来,中红外光纤激光器在激光医疗、红外抽运、激光光谱学以及红外对抗等领域有着潜在的应用前景而成为国内外研究热点^[1-4]。目前,中红外光纤激光器研究主要集中在基于掺铽或铽镨共掺、掺铒或铒镨共掺的 ZBLAN 光纤(53%ZrF₄-20%BaF₂-4%LaF₃-4%AlF₃-20%NaF)获得中红外波段(3 μm)激光输出^[5-8]。随着半导体激光器(LD)日益成熟^[9],LD 抽运的掺铽或铽镨共掺、掺铒或铒镨共掺的 ZBLAN 光纤中红外激光器输出功率水平得到了大幅提升^[10-11]。相比铽离子而言,商用的大功率 975 nm LD 成为铒离子的理想抽运源,因此,利用 975 nm LD 抽运 Er:ZBLAN 可以获得更高功率的中红外激光输出。目前,在公开报道文献中,2.8 μm 连续(CW)输出功率最大的是 Tokita 等^[11]在 2009 年报道的采用 975 nm LD 双向抽运 Er:ZBLAN 光纤,并通过液体冷却方式,获得了功率为 24 W、斜率效率为 14.5%的 2.8 μm 激光连续输出。2011 年,加拿大人 Faucher 等^[12]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%的激光输出。

收稿日期: 2015-08-03; 收到修改稿日期: 2015-09-02

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金课题(SKLLIM1412)

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(通信联系人)

国内开始开展中红外光纤激光器方面研究工作相对较晚。2012年,黄园芳等^[13]报道了功率为2.6 W、中心波长为2.786 μm 中红外激光输出;同年,他们在抽运功率为40 W条件下,获得了连续运转条件下最大功率为4.3 W的2.8 μm 激光输出,斜率效率为11.9%,光纤端面损伤限制了功率进一步提升^[14]。2013年,本课题组报道了中心波长为2.785 μm ,输出功率为瓦级激光输出,激光工作模式为单模^[15]。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10W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^[16]。

除了输出功率,在效应机理研究,生物医疗,激光光谱学等应用领域^[17-19],需要高峰值功率的中红外脉冲激光,而获得途径一般采用调 Q 方式。2004年,Coleman等^[20]报道了采用旋转 Q 开关获得中红外Er/Pr:ZBLAN光纤激光脉冲输出,平均功率为19 mW,频率为19.5 kHz;2011年,Tokita等^[21]在腔内插入声光开关,获得了平均输出功率12 W,最大单脉冲能量为100 μJ ,重复频率120 kHz,峰值功率0.9 kW的脉冲输出;2012年和2013年,Chen分别用Fe:ZnSe晶体^[22]和石墨烯^[23]实现了被动调 Q 输出。主动调 Q 主要有电光调 Q 、声光调 Q 和机械调 Q 。相对前两种调 Q 方式,机械调 Q 具有频率易控、结构简单、稳定性好、成本及外围设备要求低等优点^[24]。

本文报道了通过采用在激光器腔内插入斩波器作为主动调 Q 元件,获得中红外2.8 μm 光纤激光机械调 Q 输出,实现了脉冲能量超过80 μJ ,峰值功率超过300 W的脉冲输出。研究了激光器调 Q 输出工作特性,分析了影响提高激光器输出功率、脉冲能量的因素,提出了进一步提高激光器输出脉冲峰值功率的有效途径。

2 实验装置

中红外2.8 μm 机械调 Q 光纤激光器结构示意图如图1所示。抽运源采用最大连续输出功率50 W、中心波长为975 nm、尾纤耦合输出的半导体激光器(LD,北京凯普林光电科技有限公司),其尾纤的芯径和数值孔径分别是105 μm 和0.22。增益介质为一根长度约为3.5 m的高掺铒ZBLAN双包层光纤(Fiberlabs Inc),掺杂浓度为6%,芯径直径和数值孔径分别是33 μm 和0.12。内包层形状为八边形,其直径和数值孔径分别是为330 μm 和0.55,外包层直径为470 μm 。光纤端面装载在刻有特殊设计的U型槽的紫铜热沉中。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($f=11$ mm)和非球面透镜($f=22$ mm)组成。在谐振腔设计方面,光纤抽运端亦作为激光器输出端,采用特种光纤切割刀对其进行0度角切割,该端面菲涅耳反射率约为4%,因此,谐振腔输出耦合率约为96%。光纤抽运端装载在刻有特殊设计的U型槽的紫铜热沉中。光纤另一端进行约10°角度切割处理,以抑制寄生振荡^[25]。2.8 μm 信号光经焦距为15 mm的CaF₂透镜准直后入射到镀金反射镜上,在2.8 μm 处反射率约为95%。在透镜和镀金反射镜之间,插入斩波器(美国Stanford Research Systems公司,SR540),斩波器工作频率从1~3.5 kHz连续可调,占空比为60%。在抽运耦合系统和光纤抽运端之间,45度角放置了双色镜(975 nm高透,透射率 $T>95\%$,2.8 μm 高反,反射率 $R>99\%$),将2.8 μm 激光耦合输出,然后通过焦距为50 mm的CaF₂透镜准直后进入测量系统。测量系统有功率计(Gentec, UP19K-50L-H5),中红外光电探测器(Vigo, PVM-2TE-10.6-2)中红外光谱仪(Andor Shamrock 750),以及示波器(Lecroy 6100A)。

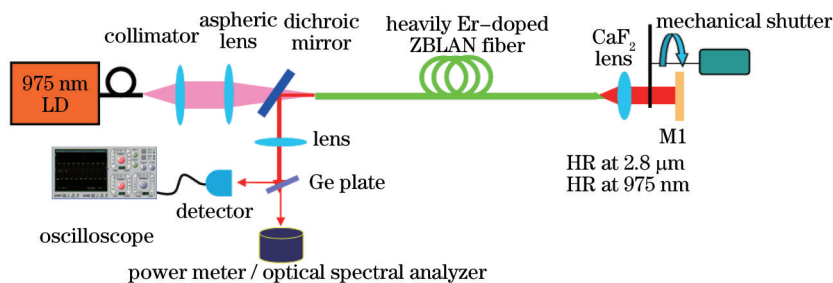


图1 中红外机械调 Q 光纤激光器结构示意图

Fig.1 Schematic layout of experimental setup for mechanically Q -switched Er:ZBLAN fiber laser

3 实验结果与分析

首先,观察激光器连续自由运转情况,调节抽运功率,当注入的抽运功率超过1 W时,获得中红外激光连续输出,2.8 μm 激光最大输出功率超过1 W,斜率效率约为13.2%。在腔内插入斩波器,通过改变斩波器工作

频率,获得与斩波器相同频率的 $2.8\ \mu\text{m}$ 激光脉冲输出。不同工作频率下,激光器输出功率随注入的抽运功率的变化关系如图2所示。可以看出,激光器在不同工作频率下,抽运阈值基本相同,约为 $1\ \text{W}$ 。同时,在相同工作频率下,激光器输出平均功率随抽运功率呈线性增大趋势;而在相同抽运功率下,随着工作频率增加,激光器平均功率也增大,也就是工作频率越高,激光器工作斜率效率也越高。这是因为,随着频率增加,单个周期内激光器停止振荡时间越短,自发辐射粒子数越少,下一个周期开关开启时有更多上能级的粒子参与受激振荡。值得注意的是,在脉冲工作模式,激光器输出功率有饱和趋势。这是因为,相比连续模式,激光器在脉冲工作模式下单个周期非振荡时间上能级粒子向下无辐射跃迁产生废热更多。从图2可以预见,如能进一步提高工作频率到兆赫兹量级,激光器输出平均功率将进一步提高,直至逼近连续工作模式。也就是,激光器将从脉冲到准连续,再到连续工作模式。

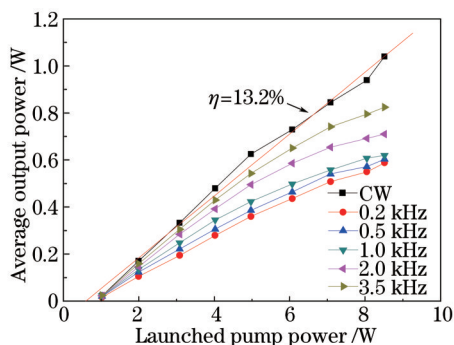


图2 不同工作频率下激光器输出功率随注入抽运光功率变化关系

Fig.2 Output power as a function of launched pump power at various repetition rates

固定斩波器工作频率($F=3.5\ \text{kHz}$),增加抽运源功率,获得单个周期内只有一个脉冲条件下的稳定激光脉冲输出,如图3所示,激光脉冲最小脉宽约为 $250.3\ \text{ns}$ 。在此基础上,继续增大抽运功率,激光器脉冲在单个周期内,主脉冲之后伴随有幅值递减的弛豫振荡激光尖峰,此即脉冲分裂现象^[26]。由于激光上能级寿命 τ (ms量级)远远大于腔内光子寿命 τ_c (ns量级),因此很容易观察到脉冲分裂现象^[27],如图4所示。事实上,调 Q 脉冲形成过程中,激光输出脉冲为 Q 开关开启时激光弛豫振荡输出第一个脉冲。如果此时 Q 开关没有关闭,同时抽运脉冲能量大于某个值,使得激光上能级继续聚集大量粒子,在满足振荡条件下,这些上能级粒子向下跃迁,形成第二个脉冲甚至更多脉冲。如果抽运功率足够大,单个周期内的弛豫振荡将达到平衡。除非特殊说明,本文后续研究仅限于没有出现脉冲分裂下的激光输出。

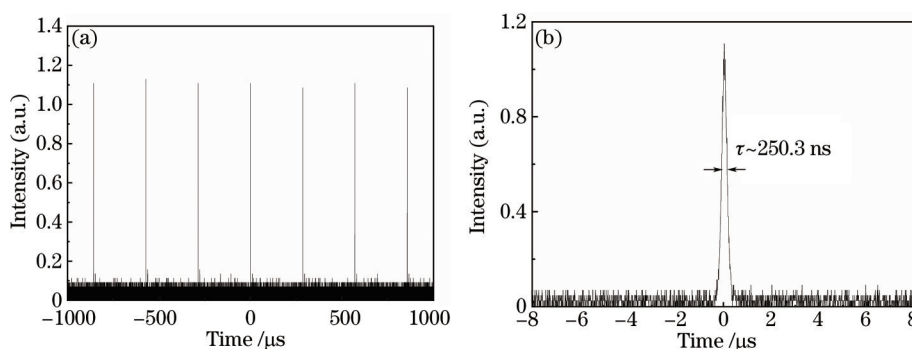


图3 无脉冲分裂下中红外脉冲激光时间特性($F=3.5\ \text{kHz}$)。(a) 脉冲序列;(b) 单个脉冲波形

Fig.3 Measured temporal characteristics of mid-infrared laser pulses without pulse spikes ($F=3.5\ \text{kHz}$).

(a) Pulse train; (b) profile of an individual pulse

为了研究激光脉冲在出现脉冲分裂前的输出特性,代表性地选取了频率为 $3.5\ \text{kHz}$ 条件下,激光脉冲工作特性,如图5所示。图5(a)为激光器单脉冲能量随抽运功率变化关系,脉冲能量随抽运功率呈线性增大关系。图5(b)给出了激光脉冲宽度和峰值功率随抽运功率变化关系,与其他调 Q 结果类似^[19],随着抽运功率增加,激光器脉宽变短,峰值功率呈线性增大趋势。在没有脉冲分裂情况下,激光器最大单脉冲能量为 $84.5\ \mu\text{J}$,对应的最小脉宽为 $250.3\ \text{ns}$,通过计算,最大峰值功率为 $337.6\ \text{W}$ 。

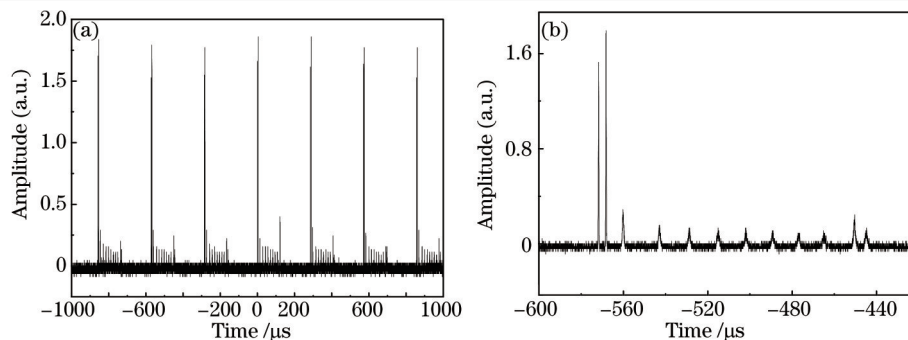


图4 脉冲分裂下中红外脉冲激光时间特性($F=3.5$ kHz)。(a)脉冲序列; (b)单个脉冲波形

Fig.4 Measured temporal characteristics of mid-infrared laser pulses under pulse spikes ($F=3.5$ kHz).

(a) Pulse train; (b) profile of an individual pulse

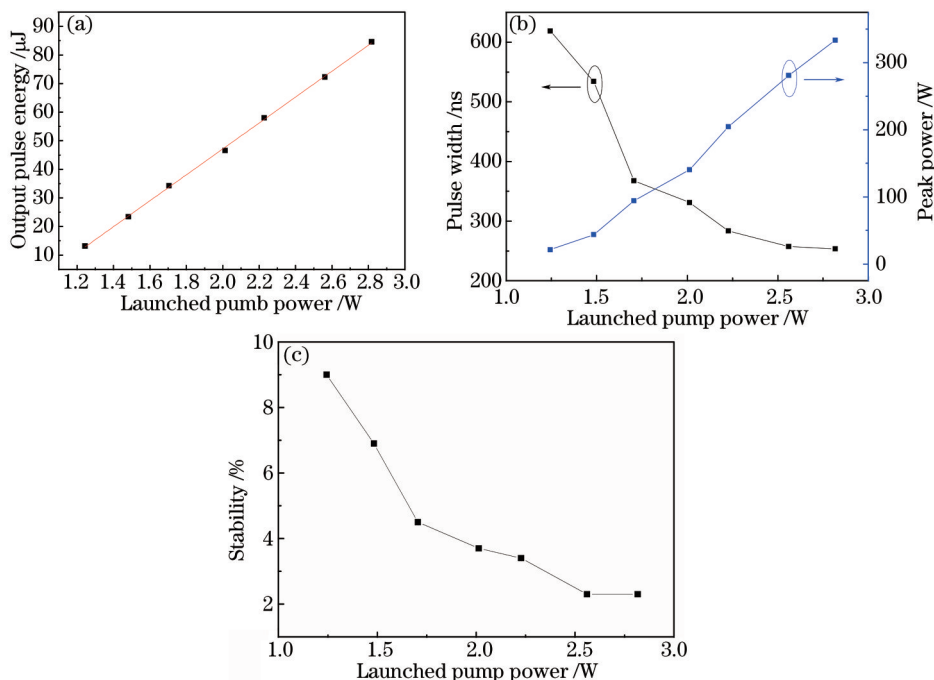


图5 无脉冲分裂下 $2.8 \mu\text{m}$ 脉冲激光输出特性($F=3.5$ kHz)。(a)激光单脉冲能量随抽运功率变化关系;

(b)脉冲宽度、峰值功率随注入的抽运光功率变化曲线; (c) 脉冲稳定性随抽运功率变化

Fig.5 Output characteristics of $2.8 \mu\text{m}$ laser pulse without pulse spikes ($F=3.5$ kHz). (a) Pulse energy versus launched pump power;

(b) pulse width and peak power varies with launched pump power; (c) stability of amplitude as a function of launched pump power

另外,在示波器上取样 20 个脉冲,计算得到脉冲幅值稳定性随抽运功率变化如图 5(c)所示。可以看出,在抽运功率接近阈值时,激光器工作稳定性较差,不稳定度接近 10%。而随着抽运功率升高,激光器输出脉冲越稳定。抽运功率越高,粒子抽运速率越快,建立振荡平衡的速度也越快。

调节斩波器频率,改变激光器工作频率。激光器不同工作频率对应应有最大的抽运功率和最大的脉冲能量和峰值功率。图 6 为激光脉冲宽度和峰值功率随工作频率的变化关系。可以看出,随着工作频率的增加,激光脉宽变小,而峰值功率呈线性增加趋势。在调 Q 激光器中,激光脉冲的极限脉宽 τ_p 可以由(1)式计算^[28]得出:

$$\tau_p = 1.76 \frac{2T_R}{\Delta R}, \quad (1)$$

式中 T_R 为光子在谐振腔内往返时间,在本文中为 37.5 ns , ΔR 为 Q 开关调制深度,斩波器调制深度取 1,得到极限宽度为 132 ns 。因此,不发生脉冲分裂情况下,进一步提高斩波器工作频率,可以进一步提高抽运功率,可望获得更窄脉宽、更高峰值功率脉冲输出。

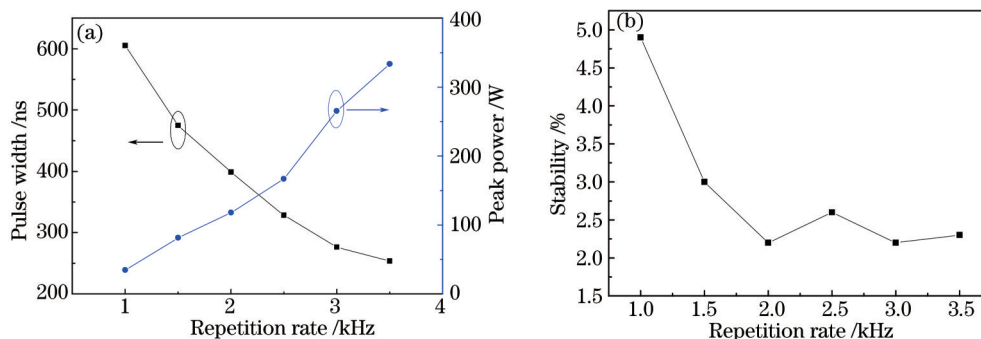


图6 不同工作频率下激光输出特性。(a)激光脉冲宽度、峰值功率随工作频率变化关系;(b)脉冲稳定性随抽运功率变化
Fig.6 Output characteristics of 2.8 μm laser pulse at various repetition rates. (a) Pulse width and peak power versus repetition rate;
(b) stability of amplitude versus repetition rate

采用 Andor Shamrock750 中红外光谱仪测量了激光器输出光谱,如图 7 所示。在相同抽运功率下,激光器不同工作频率下输出光谱如图 7(a)所示,中心波长基本一致,为 2.794 μm ,谱宽约为 8 nm。通过选用合适的波长选择元件,比如光栅,可以获得更窄光谱激光输出^[29]。图 7(b)给出了激光器在 3.5 kHz 工作频率下,不同抽运功率下激光器输出光谱变化。可以看出,随着抽运功率增加,激光中心波长发生红移,谱宽变宽,与连续自由运转输出光谱结果基本一致^[16]。

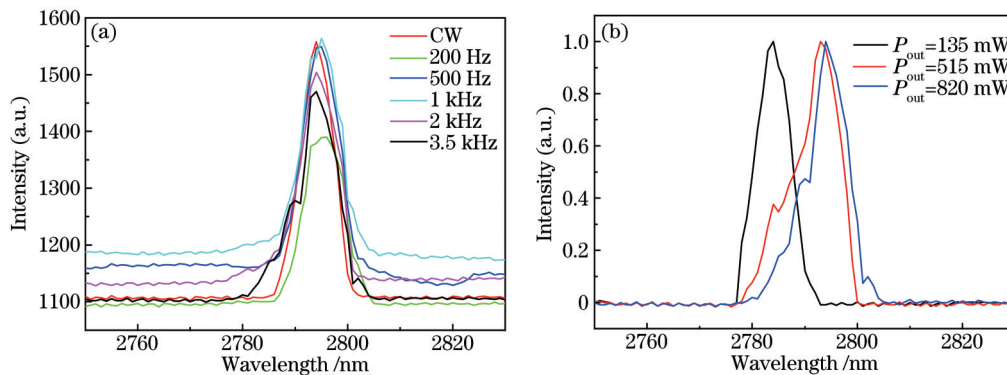


图7 中红外 2.8 μm 光纤脉冲激光器输出光谱。(a)不同工作频率下激光光谱变化($P_{\text{pump}}=5\text{ W}$);
(b)不同输出功率下激光光谱变化($F=3.5\text{ kHz}$)

Fig.7 Output spectra of mid-infrared 2.8 μm fiber laser.(a)Output spectra at different repetition rates($P_{\text{pump}}=5\text{ W}$);
(b)output spectra at different output powers ($F=3.5\text{ kHz}$)

4 结 论

采用中心波长为 975 nm 半导体激光器(LD)抽运高掺铒氟化物双包层光纤 Er:ZBLAN,并在谐振腔内插入机械斩波器,获得了 2.8 μm 激光机械调 Q 输出。研究了激光器在不同抽运功率,不同工作频率条件下的输出特性,分析了脉冲分裂的原因。激光器在没有脉冲分裂、工作频率为 3.5 kHz 的情况下,获得了最大单脉冲能量 84.5 μJ ,脉宽 250.3 ns,峰值功率达 340 W 的脉冲输出。通过提高抽运功率和斩波器工作频率,可以进一步提升激光脉冲能量和峰值功率。

参 考 文 献

- Zhu X, Peyghambarian N. High-power ZBLAN glass fiber lasers: review and prospect[J]. Advances in Optoelectronics, 2010: 1-23.
- Chen Hao, Li Jianfeng, Ou Zhonghua, et al.. Progress of mid-infrared fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(11): 111402.
陈 昊, 李剑锋, 欧中华, 等. 中红外光纤激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(11): 111402.
- Peng Jue, Wang Weimin, Peng Yuefeng, et al.. Optical parametric amplifier based on PPMgO:CLN[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602004.
彭 珏, 王卫民, 彭跃峰, 等. 基于 PPMgO:CLN 的光参量放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602004.
- Tan Gaijuan, Xie Jijiang, Zhang Laiming, et al.. Recent progress in mid-infrared laser technology[J]. Chinese Optics, 2013, 6(4):

- 501-512.
谭改娟, 谢冀江, 张来明, 等. 中波红外激光技术最新进展[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 501-512.
- 5 Jackson S D. Single-transverse-mode 2.5-W holmium-doped fluoride fiber laser operating at 2.86 μm [J]. Opt Lett, 2004, 29(4): 334-336.
- 6 Jackson S D. Singly Ho^{3+} -doped fluoride fibre laser operating at 2.92 μm [J]. Electron Lett, 2004, 40(22): 1400-1401.
- 7 D Faucher, M Bernier, N Caron, *et al.*. Erbium-doped all-fiber laser at 2.94 μm [J], 2009, Opt Lett, 34(21): 3313-3315.
- 8 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.
- 9 Zhou Minchao, Jiang Xianfeng, Zhang Lifang, *et al.*. Optical performance of high power laser diode stack[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1202004
周旻超, 江先锋, 张丽芳, 等. 大功率半导体激光器叠阵的光学性能[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1202004.
- 10 Jackson S D. High-power and highly efficient diode-cladding pumped holmium-doped fluoride fiber laser operating at 2.94 μm [J]. Opt Lett, 2009, 34(15): 2327-2329.
- 11 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.
- 12 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.
- 13 Huang Yuanfang, Peng Yuefeng, Wei Xingbin, *et al.*. Watt-level continuous wave 2.8 μm mid-infrared Er:ZBLAN fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502007.
黄园芳, 彭跃峰, 魏星斌, 等. 瓦级连续波 2.8 μm 中红外 Er:ZBLAN 光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502007.
- 14 Peng Yuefeng, Wei Xingbin, Huang Yuanfang, *et al.*. Muti-watt-level mid-infrared 2.8 μm fiber laser[C]. The 10th Conference of Opto-Electronics Technology, 2012, GD02-024: 195.
彭跃峰, 魏星斌, 黄园芳, 等. 数瓦级中红外 2.8 μm 光纤激光器[C]. 第十届全国光电技术学术交流会, 2012, GD02-024: 195.
- 15 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抽运瓦级单模高掺铒中红外光纤激光器[J]. 光子学报, 2014, 43(3): 03014002 .
- 16 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): 0314002.
沈炎龙, 黄珂, 周松青, 等. 10 W 级高效率单模 2.8 μm 中红外光纤激光器[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0314002 .
- 17 Zhang Jianmin, Feng Guobin, Yang Pengling, *et al.*. Thermal issues of photoconductive HgCdTe detector in mid-infrared laser parameter measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 22-30.
张检民, 冯国斌, 杨鹏翎, 等. 碲镉汞光导探测器在中红外激光测量中的热问题[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 22-30.
- 18 Wei C, Zhu X. Norwood R A. Passively Q -Switched 2.8 μm nanosecond fiber laser[J]. Photon Tech Lett, 2012, 24(19): 1741-1744.
- 19 Hu T, Hudson D D, Jackson S D. Actively Q -switched 2.9 m $\text{Ho}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ -doped fluoride fiber laser[J]. Opt Lett, 2009, 37(11): 2145-2147.
- 20 Coleman D J, King T A, Ko D K, *et al.*. Q -switched operation of a 2.7 μm cladding-pumped $\text{Er}^{3+}/\text{Pr}^{3+}$ codoped ZBLAN fibre laser[J]. Optics Communications, 2004, 236(2004): 379-385.
- 21 S Tokita, M Murakami, S Shimizu, *et al.*. 12 W Q -switched Er:ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. Opt Lett, 2011, 36(15): 2812-2814.
- 22 C Wei, X Zhu, R A Norwood, *et al.*. Er^{3+} -doped ZBLAN fiber laser Q -switched by Fe:ZnSe[C]. CLEO Technical Digest, 2012: JW2A61.
- 23 C Wei, X Zhu, F Wang, *et al.*. Graphene Q -switched 2.78 μm Er^{3+} -doped fluoride fiber laser[J]. Opt Lett, 2013, 38(17): 3233-3235.
- 24 Xu Yan, Xie Jijiang, Li Dianjun, *et al.*. Q -switch techniques of CO_2 laser[J]. Chinese Optics, 2014, 7(2): 196-207.
徐艳, 谢冀江, 李殿军, 等. CO_2 激光调 Q 技术[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 196-207.
- 25 Zhu X, Jain RK. 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.
- 26 Du Geguo, Zhang Lingcong, Zhao Junqing, *et al.*. Actively Q -switched thulium-doped double-clad fiber laser[J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2012, 29(5): 417-420.
杜戈果, 张灵聪, 赵俊清, 等. 主动调 Q 掺铥双包层光纤激光器[J]. 深圳大学学报理工版, 2012, 29(5): 417-420.
- 27 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.
- 28 Li J F, Luo H Y, He Y L, *et al.*. Semiconductor saturable absorber mirror passively Q -switched 2.97 μm fluoride fiber laser[J]. Laser Phys Lett, 2014, 11(6): 065102.
- 29 Feng Jiansheng, Yuan Xiao, Xiong Baoxing, *et al.*. Wavelength stability and linewidth narrowing[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0514001.
封建胜, 袁孝, 熊宝星, 等. 用于抽运铽蒸气激光器的半导体激光器波长稳定与线宽窄化研究[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0514001.