

doi: 10.3788/gzxb20164511.1114002

高 峰 值 功 率 中 红 外 $2.8 \mu\text{m}$ 脉 冲 光 纤 激 光 器

沈炎龙^{1,2}, 王屹山^{2,3}, 谌鸿伟¹, 黄珂¹, 陶蒙蒙¹, 栾昆鹏¹, 于力¹, 易爱平¹, 冯国斌¹

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

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(3 山西大学 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

摘 要:采用中心波长为 975 nm 半导体激光器泵浦高掺铒氟化物双包层光纤 Er : ZBLAN, 并在谐振腔内插入主动调 Q 元件, 获得了工作频率为 1~10 kHz 的 $2.8 \mu\text{m}$ 激光主动调 Q 脉冲输出. 在工作频率为 10 kHz 条件下, 获得了最大单脉冲能量为 134.5 μJ 、脉宽为 127.3 ns、峰值功率为 1.1 kW 的脉冲输出.

关键词: 光纤激光器; 高 峰 值 功 率; 中 红 外; 主 动 调 Q; 掺 铒 氟 化 物 光 纤

中图分类号: TN212; TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)11-1114002-5

High Peak Power Mid-infrared $2.8 \mu\text{m}$ Pulsed Fiber Laser

SHEN Yan-long^{1,2}, WANG Yi-shan^{2,3}, CHEN Hong-wei¹, HUANG Ke¹,

TAO Meng-meng¹, LUAN Kun-peng¹, YU Li¹, YI Ai-ping¹, FENG Guo-bin¹

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

(2 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(3 Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: A high peak power actively Q-switched mid-infrared fiber laser at $2.8 \mu\text{m}$ was demonstrated with a repetition rate of 1~10 kHz by employing a 975 nm laser-diode to pump a piece of heavily Er³⁺-doped ZBLAN double-clad fiber and a mechanical chopper into the cavity as the Q-switch. Stable Q-switched laser pulse with a maximum pulse energy of 134.5 μJ , pulse duration of 127.3 ns and peak power of 1.1 kW was obtained at a repetition rate of 10 kHz under a proper pump power.

Key words: Fiber laser; High peak power; Mid-infrared; Actively Q-switched; Er : ZBLAN

OCIS Codes: 140.0140; 060.2410; 140.3510; 140.3540; 140.3070

0 引 言

中红外 $3 \mu\text{m}$ 波段相干光源在军事和民用方面都有重要的应用^[1-2]. 相对于其他激光器, 光纤激光器具有效率高、光束质量好、结构紧凑、便携性好^[3]等优点, 因此, 中红外 $3 \mu\text{m}$ 波段光纤激光器是目前国内外的研究热点之一. 目前, 随着材料工艺的不断改进, 中红外光纤激光器研究主要集中在基于掺铋或铋谱共掺、掺铟或铟谱共掺的 ZBLAN (53% ZrF₄-20% BaF₂-4% LaF₃-4% AlF₃-20% NaF) 光纤获得中红外波段 ($3 \mu\text{m}$) 激光输出^[4-8]. 相比铋离子而言, 商用的大功率 975 nm

半导体激光器 (Laser Diode, LD) 成为铟离子的理想泵浦源, 因此, 利用 975 nm LD 泵浦 Er : ZBLAN 可以获得更高功率的中红外激光输出. 2007 年, X. Zhu 等在最大泵浦功率为 43 W 时, 获得了室温环境下超过 9 W 的中红外 $2.8 \mu\text{m}$ 激光输出^[9], 实现该波段光纤激光 10 W 量级输出; 2009 年, 日本人 Tokita 等采用 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 24 W、斜率效率为 14.5% 的激光稳定连续输出^[6]. 2007 年, 加拿大人 Faucher 等成功地在 ZBLAN 光纤上刻写光纤光栅, 2009 年, 他们实现了中红外光纤激光器全光纤结构, 2016 年, 实现了功率超

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金项目 (No. SKLLIM1503) 资助

第一作者: 沈炎龙 (1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高功率激光技术及应用. Email: yanlong_xian@126.com

导师 (通讯作者): 王屹山 (1970-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为光纤/固体超短脉冲激光技术及应用. Email: yshwang@opt.ac.cn

收稿日期: 2016-07-11; 录用日期: 2016-09-05

<http://www.photon.ac.cn>

过 30 W、斜率效率高达 35.4% 的激光输出^[8],为目前公开报道文献中,2.8 μm 连续(Continuous Wave, CW)输出功率最高水平.国内方面,从 2012 年开始,国内学者开始报道 3 μm 波段中红外光纤激光^[10].到目前为止,已经获得中红外光纤激光 10 W 量级及以上功率输出^[11-12].

与连续激光相比,高脉冲能量、高峰值功率的中红外脉冲激光在效应机理研究、生物医疗、激光光谱学等应用领域更为广阔^[13].一般,调 Q 是获得高脉冲能量输出的主要途径,因此,在过去的十年里,大量文献报道了采用主动或被动调 Q 获得高能量中红外光纤激光脉冲输出.在被动调 Q 方面,主要采用各种可饱和吸收体,包括外延层砷化镓(InAs)^[14]、 Fe^{2+} : ZnSe 晶体^[15-16]、石墨烯(grapheme)^[15,17]、半导体可饱和吸收镜(Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM)^[18-19]等.2015 年,Li 和 Qin 等分别利用拓扑绝缘体^[20](Topological Insulator)和黑磷^[21](Black Phosphorus)实现了中红外光纤激光被动调 Q 输出.与被动调 Q 相比,主动调 Q 的优点是频率可控,可以实现更高单脉冲能量和更高峰值功率输出.2004 年,Coleman 等采用旋转 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^[22];2011 年,Tokita 等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 、重频 120 kHz、峰值功率 0.9 kW 的脉冲输出^[23].目前,主动调 Q 方式主要有电光调 Q、声光调 Q 和机械调 Q.电光调 Q 在 3 μm 波段很难找到合适的晶体,而声光调 Q 所需要的声光 Q 开关在国内很难获得.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].2015 年,项目组利用机械调 Q 方法报道了单脉冲能量 84.5 μJ 、峰值功率超过 300 W 的 2.8 μm 中红外光纤激光脉冲输出,但是其峰值功率较低^[25].

本文在激光器腔内插入斩波器作为主动调 Q 元件,优化斩波器结构参量实现更高频率运转,获得高峰值功率中红外 2.8 μm 光纤激光主动调 Q 输出,实现了脉冲能量超过 130 μJ 、峰值功率超过 1 kW 的脉冲输出,激光器工作频率范围为 1~10 kHz.

1 实验装置

图 1 为中红外 2.8 μm 主动调 Q 光纤激光器结构示意图.泵浦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,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 3.2 m 的高掺铒 ZBLAN 双包层光纤,掺杂浓度为 6 mol%,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 .光纤两端装载在刻有特殊设计的 U 型槽的紫铜热沉中.975 nm 激光经由准直器($f=11$ mm)和非球面透镜($f=22$ mm)组成的泵浦耦合系统进入增益光纤内包层,泵浦耦合效率约为 80%.在谐振腔设计方面,采用特种光纤切割刀对光纤泵浦端进行 0 度角切割后将其作为激光器输出端,输出耦合率约为 96%(菲涅耳反射率约为 4%).光纤另一端进行约 10° 角度切割处理,以抑制寄生振荡.2.8 μm 信号光经焦距为 15 mm 的 CaF_2 透镜 L_1 准直后入射到镀金反射镜 M_1 上,反射镜 M_1 在 2.8 μm 处反射率约为 95%.在透镜 L_1 和光纤端面之间,插入主动调 Q 元件斩波器,斩波器工作频率从 1~10 kHz 连续可调,占空比为 50%.在泵浦耦合系统和光纤泵浦端之间,45° 角放置了双色镜(975 nm 高透 $T>95\%$,2.8 μm 高反 $R>99\%$),将 2.8 μm 激光耦合输出,然后通过焦距为 50 mm 的 CaF_2 透镜 L_2 准直后进入测量系统.测量系统有功率计(Gentec, UP19K-50L-H5)测量激光输出功率,中红外光谱仪(Andor Shamrock 750)测量激光输出光谱,碲镉汞探测器(Vigo PVM-2TE-10.6-2)以及示波器(Lecroy6100A)用以监测激光脉冲波形.

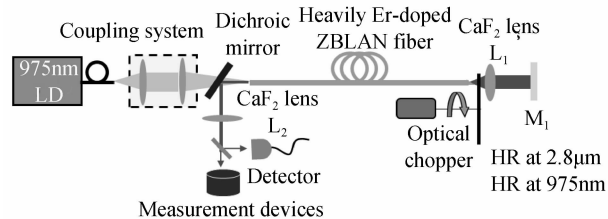


图 1 中红外 2.8 μm 主动调 Q 光纤激光器结构示意图
Fig. 1 Schematic layout of experimental setup for the actively Q-switched Er: ZBLAN fiber laser

2 实验结果及讨论

不同的工作频率,激光器泵浦阈值不同.斩波器频率越低,开启时间越长,越有利于激光形成振荡.固定激光器工作频率($f=10$ kHz),增加泵浦功率,当泵浦功率超过 1.7 W 时,获得了 2.8 μm 调 Q 脉冲激光输出.改变斩波器工作频率,可以获得与斩波器相同频率的激光脉冲输出.图 2 为激光器频率为 10 kHz 条件下典型的稳定脉冲时序图,激光器最小脉宽约为 127.3 ns.也就是说,当注入的泵浦功率小于 5.8 W 时,单个泵浦周期内只有一个脉冲.在此基础上,继续增大泵浦功率,在单个泵浦周期内,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 $\tau\sim\text{ms}$ 远远大于腔内光子寿命 $\tau_c\sim\text{ns}$,因此很容易观察到脉冲分裂现象^[27].也就是说,在调 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,同时泵浦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.泵浦功率越大,出现的弛豫尖峰就越多.因此,继续增加泵浦功率,单个泵浦周期内的弛豫尖峰增多,且第一个脉冲脉宽呈缩小趋势,但是对提高第一个脉冲的峰值功率作用并不显著.本文后续研究限于只有单个脉冲输出情况,即脉冲出现分裂前的情况.

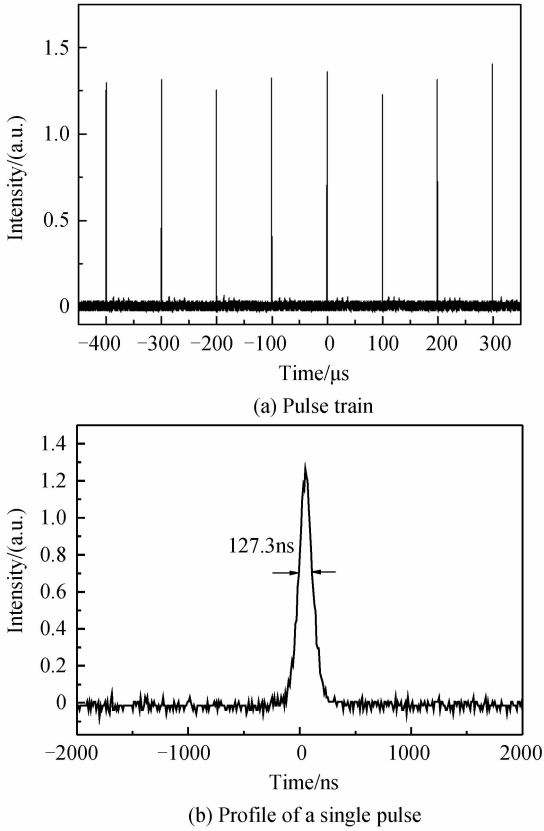


图2 中红外主动调Q激光脉冲时间特性($f=10\text{ kHz}$)
Fig. 2 Measured temporal characteristics of actively Q-switched laser pulse ($f=10\text{ kHz}$)

在没有脉冲分裂条件下,随着激光器工作频率的增加,获得单脉冲输出的最大平均功率也增加.实验研究了频率为 10 kHz 条件下激光脉冲工作特性.图3为激光器输出平均功率随注入的泵浦功率变化关系,可以看出,激光输出功率随泵浦功率呈线性增大,激光器工作阈值为 1.7 W,斜率效率高达 30.2%.虽然该效率与斯托克斯效率(35%)接近,但与理论计算值还相差较远.这是因为,在中红外高掺铒(6 mol%) ZBLAN 光纤中,能量上转换机制使得激光下能级离子可以得到循环利用,因此,此类高掺铒光纤激光器理论效率可达 50% 以上^[28].图4为激光脉冲宽度和峰值功率随泵浦功率变化关系,随着泵浦功率增加,激光器脉宽变窄,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 134.5 μJ,对应的最小脉宽为 127.3 ns,可以估算出,最大峰值功率为 1056.6 W.

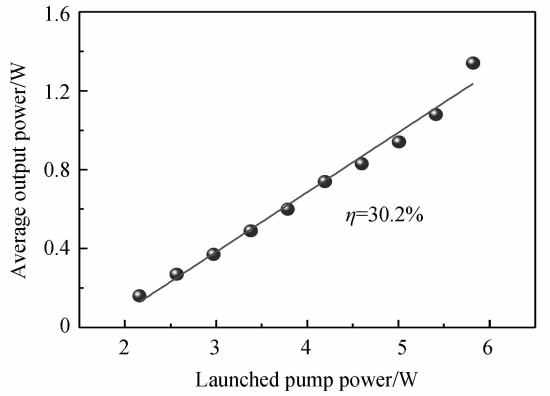


图3 脉冲激光输出平均功率随注入泵浦光功率的变化曲线($f=10\text{ kHz}$)
Fig. 3 Pulse width and peak power varies with launched pump power ($f=10\text{ kHz}$)

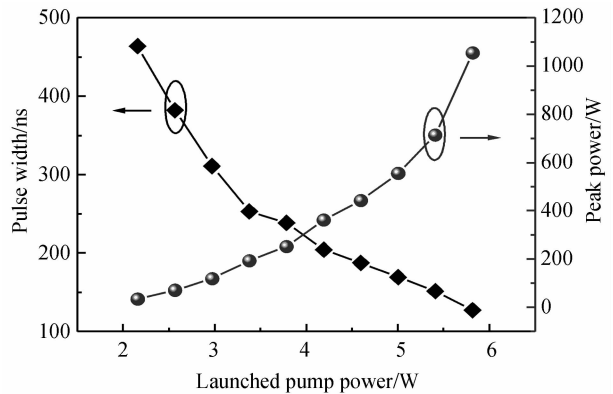


图4 脉冲宽度、峰值功率随注入泵浦光功率的变化曲线($f=10\text{ kHz}$)
Fig. 4 Pulse width and peak power varies with launched pump power ($f=10\text{ kHz}$)

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条件下对应有最大的泵浦功率和最大的脉冲能量和峰值功率.图5为激光脉冲宽度和峰值功率

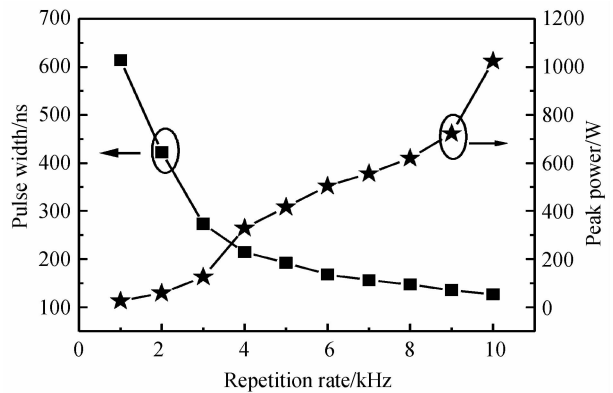


图5 激光脉冲宽度、峰值功率随工作频率变化关系
Fig. 5 Pulse width and peak power versus repetition rate
随工作频率的变化关系.可以看出,随着工作频率的增加,激光脉宽变小,而峰值功率呈线性增加趋势.在调Q激光器中,激光脉冲的脉宽可以由式(1)计算得出^[27]

$$\tau_p = 1.25 \frac{2 \cdot \mu(r)r}{r-1-\ln r} T_R \quad (1)$$

式中, T_R 为光子在谐振腔内往返时间, 在本文中为 32.6 ns, r 为泵浦超阈值, $\mu(r)$ 为激光腔内储能的利用率. 在最大泵浦功率时, r 为 3.36, $2 \cdot \mu(r)$ 为 0.95^[27], 将上述值代入式(1)中, 可以得到脉宽估算值为 113.1 ns, 与实际测量值 127.3 ns 接近. 因此, 提高斩波器工作频率, 可以进一步提高泵浦功率, 可望获得更窄脉宽、更高峰值功率脉冲输出.

图 6 为激光器在 10 kHz 工作频率下, 不同泵浦功率下激光器输出光谱. 可以看出, 随着泵浦功率增加, 激光中心波长由低功率时的 2783.8 nm 红移至高功率时的 2796.3 nm, 同时谱宽稍微变宽 (~8 nm), 这就典型的激光红移现象. 这是因为, 随着泵浦功率升高, 光纤介质温度也随之升高, 使得激光上下能级之间跃迁能带宽度变窄, 对应的辐射光子波长变长, 即波长发生红移. 通过选用合适的波长选择元件, 比如光栅, 可以获得中心波长稳定、光谱宽度更窄的激光输出^[29].

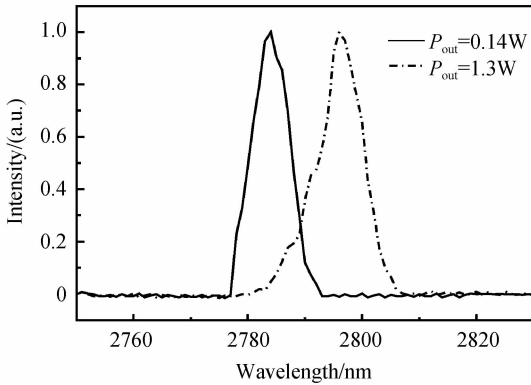


图 6 中红外 2.8 μm 光纤脉冲激光器不同输出功率下的输出光谱

Fig. 6 Output spectra at different output powers

3 结论

本文采用 975 nm 半导体激光器泵浦高掺铒氟化物双包层光纤 Er : ZBLAN, 并在谐振腔内插入斩波器, 获得了高脉冲能量、高峰值功率的 2.8 μm 主动调 Q 脉冲激光输出. 研究了激光器在不同泵浦功率, 不同工作频率条件下的输出特性. 在最大工作频率为 10 kHz 的条件下, 获得了最大单脉冲能量为 134.5 μJ 、脉宽为 127.3 ns、峰值功率超过 1 kW 的脉冲输出. 通过提高泵浦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

[1] JACKSON S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser[J]. *Nature Photonics*, 2012, **6**: 43-431.
 [2] ZHU X, PEYGHAMBARIAN N. High-power ZBLAN glass fiber lasers; review and prospect [J]. *Advances in Opto Electronics*, 2010, **2010**: 1-23.
 [3] URQUHART P. Review of rare earth doped fibre lasers and amplifiers[J]. *IEEE Proceedings*, 1988, **135**(6): 385-407.
 [4] JACKSON S D, BUGGE F, ERBERT G. Directly diode-

pumped holmium fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2007, **32** (17): 2496-2498.
 [5] 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.
 [6] TOKITA S, MURAKAMI M, SHIMIZU S. Liquid-cooled 24 W mid-infrared Er : ZBLAN fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(20): 3062-3064.
 [7] 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.
 [8] JIA Yu-jie, LIN Jian, ZHANG Wen-jun, *et al.* Effect of fluoride on up-conversion and infrared luminescence properties of Er³⁺/Yb³⁺ co-doped tellurite glass[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(3): 287-292.
 贾玉洁, 林健, 张文俊, 等. 氟化物对 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺的碲酸盐玻璃上转换和红外发光性能的影响[J]. *发光学报*, 2014, **35** (3): 287-292.
 [9] ZHU X, JAIN R. 10-W-level diode-pumped compact 2.78 μm ZBLAN fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(1): 26-28.
 [10] HUANG Yuan-fang, PENG Yue-feng, WEI Xing-bin, *et al.* Watt-level continuous wave 2.8 μm mid-infrared Er : ZBLAN fiber laser[J]. *Chinese Journal of 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.
 [11] SHEN Yan-long, HUANG Ke, ZHOU Song-qing, *et al.* 10-W level high efficiency single-mode mid-infrared 2.8 μm fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(5): 0502008.
 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): 0502008.
 [12] WANG Le-le, LUO Hong-yu, XIE Ji-tao, *et al.* 15 W high power 2.9 μm mid-infrared cascade Er : ZBLAN fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(7): 0719001.
 王乐乐, 罗鸿禹, 谢记涛, 等. 15 W 高功率 2.9 μm 中红外级联掺铒 ZBLAN 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2015, **42**(7): 0719001.
 [13] HU T, HUDSON D D, JACKSON S D. Actively Q-switched 2.9 μm Ho³⁺/Pr³⁺-doped fluoride fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2009, **37**(11): 2145-2147.
 [14] FREICHS C, UNRAU U B. Passive Q-switching and mode-locking of erbium-doped fluoride fiber lasers at 2.7 μm [J]. *Optics Fiber Technology*, 1996, **2**: 358-366.
 [15] ZHU G, ZHU X, BALAKRISHNAN K, *et al.* Fe²⁺ : ZnSe and graphene Q-switched singly Ho³⁺-doped ZBLAN fiber lasers at 3 μm [J]. *Optics Material Express*, 2013, **3**: 1365-1377.
 [16] WEI C, ZHU X, NORWOOD R A, *et al.* Passively Q-switched 2.8 μm nanosecond fiber laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, **24**(19): 1741-1744.
 [17] WEI C, ZHU X, WANG F, *et al.* Graphene Q-switched 2.78 μm Er³⁺-doped fluoride fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(17): 3233-3236.
 [18] LI J, LUO H, WANG L, *et al.* Mid-infrared passively switched pulsed dual wavelength Ho³⁺-doped fluoride fiber laser at 3 μm and 2 μm [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 10770.
 [19] SHEN Yan-long, WANG Yi-shan, LUAN Kun-peng, *et al.* Watt-level passively Q-switched heavily Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 26659.

- [20] LI J, LUO H, WANG L, *et al.* 3 μm mid-infrared pulse generation using topological insulator as the saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(15): 3659-3662.
- [21] QIN Z, XIE G, ZHANG H, *et al.* Black phosphorus as saturable absorber for the Q-switched Er : ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(19): 24713-24718.
- [22] COLEMAN D J, KING T A, KO D K, *et al.* Q-switched operation of a 2.7 μm cladding-pumped Er³⁺/Pr³⁺ codoped ZBLAN fibre laser[J]. *Optics Communications*, 2004, **236**(2004): 379-385.
- [23] TOKITA S, MURAKAMI M, SHIMIZU S, *et al.* 12W Q-switched Er : ZBLAN fiber laser at 2.8 μm [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(15): 2812-2814.
- [24] XU Yan, XIE Ji-jiang, LI Dian-jun, *et al.* Q-switch techniques of CO₂ laser[J]. *Chinese Optics*, 2014, **7**(2):196-207.
徐艳,谢冀江,李殿军,等. CO₂ 激光调 Q 技术[J]. 中国光学, 2014, **7**(2):196-207.
- [25] SHEN Yan-long, ZHOU Song-qing, CHEN Hong-wei. Output characteristics of Q-switched mid-infrared fiber laser with a mechanical chopper[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, **36**(1): 0114002.
沈炎龙,周松青,谌鸿伟,等. 中红外 2.8 μm 光纤激光器机械调 Q 工作特性[J]. 光学学报, 2016, **36**(1): 0114002.
- [26] DU Ge-guo, ZHANG Ling-cong, ZHAO Jun-qing, *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] 陈钰清,王静环. 激光原理[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005.
- [28] 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.
- [29] WANG F, SHEN D, FAN D, *et al.* Spectrum narrowing of high power Tm : fiber laser using a volume Bragg grating[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(9): 8937-8941.