

基于光纤被动调 Q 的1570 nm纳秒脉冲铒镱双掺 全光纤双腔激光器

金东臣 孙若愚 魏守宇 任 军 刘 江 王 潜 王 璞

北京工业大学激光工程研究院,北京市激光应用技术工程技术研究中心,北京 100124

摘要 报道了一种基于光纤被动调 Q 的纳秒脉冲铒镱双掺全光纤激光器,该激光器采用线型双腔结构,利用单模双包层铒镱双掺光纤的可饱和吸收特性,同时结合谐振腔间的相互作用,获得高效、稳定的纳秒脉冲输出。最终能够实现平均功率为2.2 W、最窄脉宽为173 ns的1570 nm激光输出,脉冲重复频率在14~156 kHz范围内可调。

关键词 激光器; 光纤激光器; 光纤光栅; 纳秒脉冲; 被动调 Q

中图分类号 TN248 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1002006

1570 nm Nanosecond Pulse Generation from Er/Yb Co-Doped All-Fiber Dual-Cavity Laser with Fiber-Based Passive Q -Switched

Jin Dongchen Sun Ruoyu Wei Shouyu Ren Jun Liu Jiang Wang Qian Wang Pu

Beijing Research Center of Laser Application and Engineering, Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract A nanosecond Er/Yb co-doped all-fiber dual-cavity laser with fiber-based passive Q -switch is reported. The laser oscillator is constructed in a linear dual-cavity, and can achieve the efficient, stable nanosecond operation based on the saturable absorber of the single-mode double-cladding Er/Yb co-doped fiber and the cross-modulation of the dual-cavity. The maximum output power is 2.2 W, and the minimum pulse duration is 173 ns with the central wavelength of 1570 nm. Meanwhile, sequential nanosecond pulses can be obtained at the repetition rate of 14~156 kHz.

Key words lasers; fiber laser; fiber Bragg grating; nanosecond pulse; passive Q -switched

OCIS codes 140.3510; 060.3735; 320.4240; 140.3540;

1 引 言

纳秒脉冲激光器因其紧凑的结构设计、稳定的输出性能,可实现高能量的激光脉冲输出,在激光雷达、激光测距和激光加工等众多领域中有广阔应用前景^[1-5]。纳秒脉冲的产生方式多种多样^[6-9],传统方法主要以声光、电光调制等主动调 Q ^[10]、半导体激光器直接调制为主^[11],而近年来,增益光纤用做可饱和吸收体被动调 Q 逐渐引起人们的关注,因为这种脉冲产生方式可以实现真正意义上的全光纤化设计,全光纤激光器抗环境干扰能力强,与传统的声光、电光调 Q 等主动调 Q 方式相比,无需额外使用调制器,结构简单、紧凑;与半导体激光器直接调制方法相比,光纤可饱和吸收体可以工作在高功率条件下,振荡器能够直接输出高功率、高能量纳秒脉冲,很大程度上降低了系统的复杂性。

收稿日期: 2015-04-28; 收到修改稿日期: 2015-06-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61235010)、国家自然科学基金面上项目(61177048)、国家自然科学基金青年项目(61307054)、北京市科学技术委员会项目(Z131100003213010)。

作者简介: 金东臣(1989—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器及光纤放大器方面的研究。

E-mail: jindongchen1989@gmail.com

导师简介: 王 璞(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

目前国际上已有多种关于不同掺杂元素的光纤作为可饱和吸收体实现脉冲输出的报道^[12-16],2005年,Fotiadi等^[17]报道了一种用掺镱光纤作为增益介质、用掺钐光纤作为可饱和吸收体实现被动调Q的全光纤脉冲激光器,最窄脉宽为650 ns、最大单脉冲能量为19 μJ 。2009年,台湾国立成功大学Tsai等^[18-19]提出利用光纤模场失配法实现调Q、获得纳秒脉冲输出,并将其应用到掺镱和掺铒光纤激光器中,2010年,他们利用掺铒光纤作为可饱和吸收体,产生0.1~6 kHz重复频率范围内的纳秒脉冲输出,最窄脉宽为420 ns^[20],但受限于单模抽运源功率和模场适配熔接带来的承受功率问题,激光器输出仅为毫瓦量级。2010年,俄罗斯科学院Kurkov等^[21]报道了一种掺铒光纤用于被动调Q的掺铒光纤激光器,他们利用芯径为20 μm 的光纤获得了0.35 mJ单脉冲能量的输出,但输出功率不足1 W,斜效率仅为12%。2013年,本课题组报道了一种基于掺镱光纤作为可饱和吸收体的被动调Q、增益开关纳秒脉冲激光器^[22],采用包层抽运的线型双腔结构,获得了脉宽为45 ns,单脉冲能量为62 μJ ,峰值功率为1.4 kW的脉冲输出,在高抽运功率条件下激光输出斜效率超过60%。2014年,本课题组报道了一种高能量纳秒脉冲输出的掺镱全光纤激光器^[23],输出功率获得明显提升,单脉冲能量可以提高到数百微焦量级。

本文在前期相关工作的基础上进行波长拓展,利用铒镱双掺光纤作为可饱和吸收体,获得人眼安全波段的脉冲激光输出,该激光器采用独特双腔设计,能够产生平均功率为2.2 W、最窄脉宽为173 ns、输出波长为1570 nm的稳定脉冲输出,脉冲重复频率在14~156 kHz范围内可调。

2 实验装置

基于掺杂光纤作为可饱和吸收体用于被动调Q,实现纳秒脉冲输出的铒镱双掺全光纤双腔激光器如图1所示。

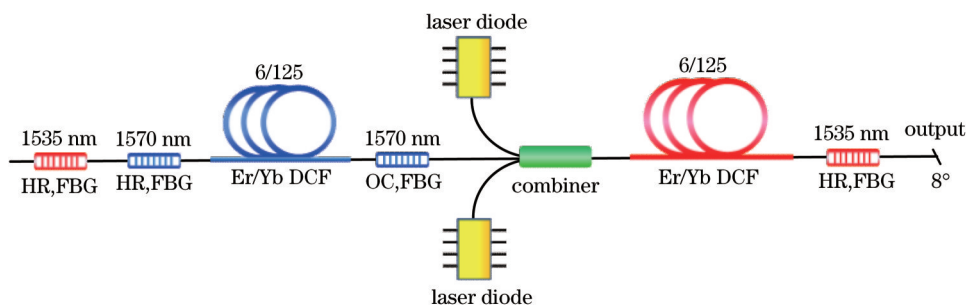


图1 铒镱双掺全光纤双腔激光器实验装置

Fig.1 Experimental setup of Er/Yb co-doped all-fiber dual-cavity laser

该实验装置采用线型腔结构,包括外腔、内腔两部分,外腔由中心波长为1535 nm、带宽为0.5 nm、反射率 $R \geq 99\%$ 、刻写在SM28光纤的光纤光栅对构成,内腔由中心波长为1570 nm、带宽为0.5 nm、刻写在SM28光纤的光纤光栅对组成,其中一只光纤光栅的反射率为80%,用作输出端口,另一只光纤光栅的反射率 $R \geq 99\%$,两个腔的增益介质均为6/125 铒镱双掺的双包层光纤(SM-EYDF-6/125-HE),其在915 nm波长处的包层吸收系数为0.9 dB/m,在1535 nm波长的纤芯吸收系数为43 dB/m,纤芯数值孔径为0.18。该激光器的抽运源为光纤耦合输出的多模半导体激光器,中心波长为976.3 nm,带宽为0.2 nm,最大输出功率为9 W。抽运光经(2+1)×1多模抽运合束器耦合进外腔增益光纤,产生的放大自发辐射(ASE)在1535 nm光纤光栅构成的谐振腔内往返振荡,此时内腔的增益光纤起到可饱和吸收的作用,然后产生的1535 nm脉冲激光对1570 nm内腔进行纤芯抽运,该过程类似传统的增益开关,最终获得的1570 nm纳秒脉冲经由外腔增益光纤传播后输出腔外。整个实验装置的输出激光波长由内腔的光纤光栅中心波长决定。

3 实验结果及分析

当外腔选择4 m长增益光纤、内腔选择1.5 m长的增益光纤时,抽运功率增加值约为227 mW,1570 nm激光达到输出阈值,通过示波器可以观察脉冲调制现象,随着抽运功率增加至740 mW,脉冲调制现象逐渐趋于稳定,此时脉冲序列的重复频率为14 kHz,继续增加抽运功率,可以明显看到脉冲宽度随之减小,重复频

率随之增加,同时输出功率也随之增加,平均输出功率与抽运功率基本呈线性关系。在抽运功率增加的过程中,最终能够实现平均功率为 2.2 W,最窄脉宽为 173 ns 的稳定纳秒脉冲输出,脉冲重复频率在 14~156 kHz 范围内可调。图 2 是 1 GHz 示波器记录的稳定脉冲序列。其中图 2(a)为低抽运功率下,激光器工作在重复频率为 14 kHz 条件下的脉冲序列;图 2(b)为抽运功率增加至 12.4 W 后,激光器工作在重复频率为 156 kHz 条件下的脉冲序列。

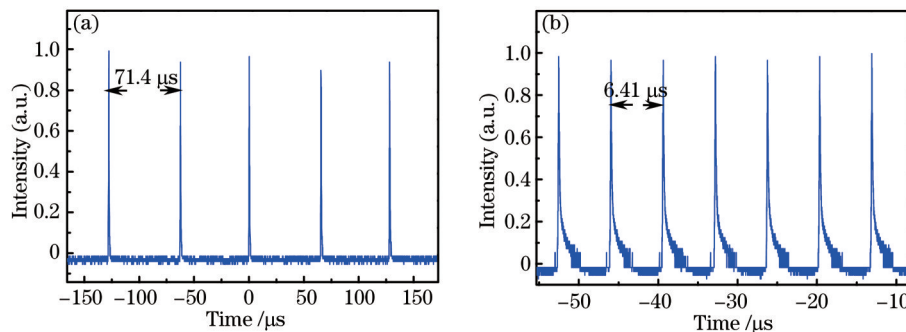


图 2 工作在不同重复频率条件下的脉冲序列。(a) 14 kHz;(b)156 kHz

Fig.2 Pulse trains of laser operating at different repetition rates. (a) 14 kHz; (b) 156 kHz

当激光器运作在重复频率为 156 kHz 条件下(抽运功率为 12.4 W),激光器的输出光谱如图 3 所示,通过分辨率为 0.02 nm 的光谱仪(YOKOGAWA 6370B)测得输出光谱的中心波长为 1570.4 nm,光谱半峰全宽为 0.18 nm,光谱波峰位置相对噪声的信噪比近 50 dB。此外,从输出光谱图中可以发现 1535 nm 波长成分,主要是由于光纤光栅工作在高抽运功率条件下时,会有部分 1535 nm 激光从光栅处溢出腔外,但因其强度较弱,两波长成分强度相差 20 dB(100 倍),通过图 3 插图所示的线性输出光谱可以发现输出波长成分仍以 1570 nm 为主,1535 nm 激光可近似忽略。

为了深入研究该激光器的输出性能,改变激光器外腔的增益光纤长度可以发现其平均功率输出和斜效率 η 如图 4 所示。

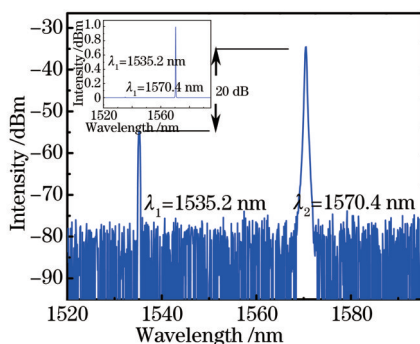


图 3 全光纤双腔激光器的输出光谱图,插图为线性光谱

Fig.3 Optical spectrum of the all-fiber dual-cavity laser, inset is linear output spectrum

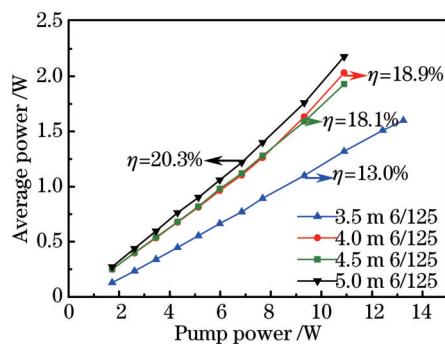


图 4 不同外腔增益光纤长度时平均输出功率随抽运功率的变化

Fig.4 Average power versus pump power with different lengths of gain fiber in external-cavity

从图 4 可以看出,平均输出功率基本与抽运功率呈线性变化关系,同时外腔增益光纤越长,可获得最大平均输出功率呈增长趋势,且具有更高的斜效率。当外腔增益光纤长度为 5 m 时,最大输出功率可以达到 2.2 W,此时的抽运功率为 10.9 W,数据拟合得到的斜效率为 20.3%。目前实验装置的器件以 6/125 光纤为主,受限于器件的损伤阈值而未能继续提高抽运功率,在后续研究中若采用更高性能的实验器件,激光输出斜效率有望进一步提升。

当激光器工作在不同外腔增益光纤长度条件下(增益光纤长度分别为 3.5、4.0、5.0 m),输出脉冲宽度和重复频率变化如图 5 所示。

从图 5(a)可以看出,该激光器的输出脉冲宽度随抽运功率的增加而减小,与传统被动调 Q 机制的脉冲变化规律一致,实验所得的最窄脉宽为 173 ns。此外,从图中的变化曲线中还能够发现增益光纤长度对脉宽

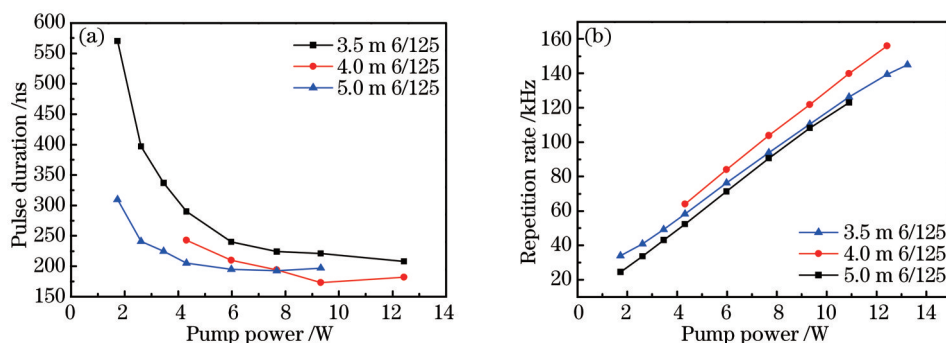


图5 不同外腔增益光纤长度时脉冲宽度和重复频率随抽运功率的变化

Fig.5 Pulse duration and repetition rate variation versus pump power with different lengths of gain fiber in external-cavity

变化的影响,说明该类激光器的脉冲宽度不仅只与抽运功率有关,还与双腔结构中外腔所提供增益的强度有关。外腔所提供的强增益更易于漂白可饱和吸收光纤,降低脉冲的建立时间以减小脉宽。此外,传统被动调Q激光器的脉宽还与整个振荡腔的腔长(包括有源光纤长度、无源光纤长度)有关,谐振腔的长度的增加会导致脉冲往返时间的增加,不利于脉冲窄化。综上所述,脉冲宽度的窄化与谐振腔腔长、可饱和吸收光纤的漂白时间、抽运强度和出光阈值等多个因素密切相关。早期 Herda 等^[24]曾提出被动调Q激光器工作在强抽运条件下,由于增益压缩效应而导致的脉冲变窄机制。当假设谐振腔损耗远大于可饱和损耗时,

$$\tau = \frac{3.52T_r}{q_0 + A\sqrt{P/P_{\text{threshold}} - 1}}, \quad (1)$$

式中

$$A = \sqrt{\frac{2T_r}{\tau_g} \cdot \lg\left(\frac{E_{\text{sat},g}}{\tau_g P_0}\right) \cdot (l + q_0)}, \quad \frac{P}{P_{\text{threshold}}} = \frac{g_0}{l + q_0}, \quad (2)$$

式中 T_r 表示往返时间,由腔长决定; q_0 表示可饱和损耗; P 表示抽运功率; g_0 表示小信号增益; $E_{\text{sat},g}$ 表示饱和能量; $P_{\text{threshold}}$ 表示阈值抽运功率, P_0 表示腔内初始功率; τ_g 表示可饱和吸收体的恢复时间; l 表示谐振腔损耗。从(1)式中,可以看出脉冲与谐振腔腔长即往返时间呈正比,而与抽运功率呈反比,基本与实验所得结果图5(a)一致。此外,在保证内腔增益光纤的饱和吸收条件下,若继续缩短谐振腔中无源光纤和增益光纤长度(换用更高吸收系数的掺杂光纤可以继续降低谐振腔腔长),输出脉宽将会进一步减小。而对于该激光器的内腔激光是在外腔脉冲的纤芯抽运下产生的,通过优化外腔的工作波长,一定程度上提高内腔对外腔激光的吸收系数,也有可能实现短腔长条件下得到较短脉冲输出。

图5(b)是当选择不同长度的外腔增益光纤长度时,输出脉冲的重复频率随抽运功率的变化,随着抽运功率的增加,脉冲重复频率随之线性增加,但因此次增益光纤长度变化不大,激光器工作在不同外腔增益光纤长度条件下,重复频率相近,在几十至百千赫兹量级变化。

当外腔增益光纤选择5 m长的6/125 铒镱双掺光纤、内腔选择1.5 m长的6/125 铒镱双掺光纤时,激光器

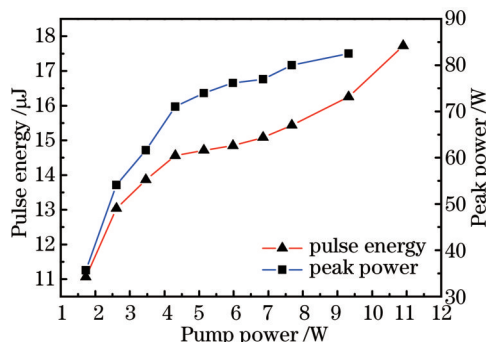


图6 激光输出的单脉冲能量和峰值功率随抽运功率的变化曲线

Fig.6 Pulse energy and peak power variation versus pump power

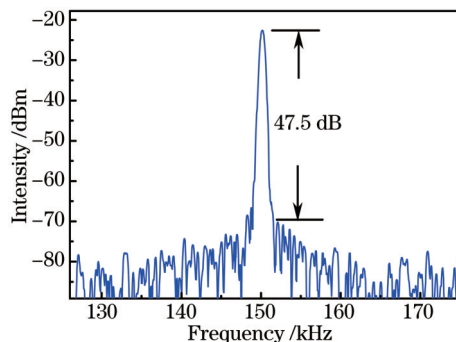


图7 激光器输出的射频谱图

Fig.7 Radio-frequency spectrum of all-fiber dual-cavity laser output

输出的单脉冲能量和峰值功率变化如图6所示。

从图6可以看出,单脉冲能量和峰值功率随抽运功率的增加而增加,激光输出的最大单脉冲能量为17.7 μJ ,最大峰值功率为82 W,根据本课题组早期报道的实验结果^[9],后续可以通过优化实验方案,选择更大芯径光纤配置来提高单脉冲能量,同时通过缩短腔长来降低输出脉冲宽度,有望进一步提升单脉冲能量和峰值功率。

此外,当激光器运作在重复频率为150 kHz时,利用频谱仪测得激光输出的信号噪声比为47.5 dB,如图7所示。同时,利用示波器测得输出脉冲的峰-峰值抖动小于3%,很好地说明了激光器输出的稳定性,而且当激光器连续运作数小时后,其平均功率波动较小。

4 结 论

报道了一种工作在人眼安全波段的纳秒脉冲全光纤双腔激光器,该激光器利用光纤的可饱和吸收特性实现被动调 Q ,采用独特的双腔结构设计,能够实现平均功率为2.2 W、最窄脉宽为173 ns、输出波长1570 nm的稳定脉冲输出,脉冲重复频率在14~156 kHz范围内可调,该类激光器采用全光纤化连接,设计简单、结构紧凑,抗环境干扰能力强,同时结合谐振腔间的相互作用可以保证脉冲激光的稳定高效输出。此外,这种脉冲产生技术可以推广至其他波段,可以作为高性能纳秒脉冲产生方式的新选择。

参 考 文 献

- 1 D J Richardson, J Nilsson, W A Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited][J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(11): B63-B92.
- 2 C Jauregui, J Limpert, A Tünnermann. High-power fibre lasers[J]. Nature Photon, 2013, 7(11): 861-867.
- 3 Sun Runyu, Jin Dongchen, Cao Yi, *et al.*. Hundred-watt-level 1030 nm ytterbium-doped picosecond all-fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1002004.
孙若愚, 金东臣, 曹 颖, 等. 百瓦级 1030 nm 皮秒脉冲掺镱全光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1002004.
- 4 Liu Jiang, Wang Pu. High-power passively Q -switched nanosecond-pulsed thulium-doped fiber laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1202006.
刘 江, 王 璞. 高功率被动调 Q 纳秒脉冲掺铥光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1202006.
- 5 Wu Quan, Fan Zhongwei, Yu Jin, *et al.*. Research progress of nanosecond regime pulsed fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 060004.
吴 权, 樊仲维, 余 锦, 等. 纳秒量级脉冲光纤激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 060004.
- 6 S Y Set, H Yaguchi, Y Tanaka, *et al.*. Laser mode locking using a saturable absorber incorporating carbon nanotubes[J]. J Lightwave Technol, 2004, 22(1): 51-56.
- 7 J Liu, S Wu, Q Yang, *et al.*. Stable nanosecond pulse generation from a grapheme-based passively Q -switched Yb-doped fiber laser [J]. Opt Lett, 2011, 36(20): 4008-4010.
- 8 J Xu, J Liu, S Wu, *et al.*. Graphene oxide mode-locked femtosecond erbium-doped fiber lasers[J]. Opt Express, 2012, 20(14): 15474-15480.
- 9 Liu Jia, Liu Jiang, Wang Pu. Cladding pumped nanosecond passively Q -switched Yb-doped fiber laser with Cr^{4+} : YAG as a saturable absorber[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(11): 1101002.
刘 佳, 刘 江, 王 璞. Cr^{4+} : YAG 被动调 Q 纳秒脉冲包层抽运掺镱光纤激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(11): 1101002.
- 10 Zhang H, Shen X, Chen D. High energy and high peak power nanosecond pulses generated by fiber amplifier[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2014, 26(22): 2295-2298.
- 11 W Shi, Q Fang, J Fan. 700 kW peak power monolithic nanosecond pulsed fiber laser[C]. Proceedings of CLEO, 2014: STu2N.2.
- 12 S D Jadcson. Passively Q -switched Tm^{3+} -doped silica fiber lasers[J]. Appl Opt, 2007, 46(16): 3311-3317.
- 13 D B S Soh, S E Bisson, B D Patterson, *et al.*. High-power all-fiber passively Q -switched laser using a doped fiber as a saturable absorber: numerical simulations[J]. Opt Lett, 2010, 36(13): 2536-2538.
- 14 S W Moore, D B S Soh, S E Bisson, *et al.*. 400 μJ 79 ns amplified pulses from a Q -switched fiber laser using an Yb^{3+} -doped fiber saturable absorber[J]. Opt Express, 2012, 20(21): 23778-23789.
- 15 C E Preda, G Ravet, P Mégret. Experimental demonstration of a passive all-fiber Q -switched erbium- and samarium-doped laser

- [J]. Opt Lett, 2012, 37(4): 629-631.
- 16 V V Dvoyrin, V N Mashinsky, E M Dianov. Yb - Bi pulsed fiber lasers[J]. Opt Lett, 2007, 32(5): 451-453.
- 17 A A Fotiadi, A S Kurkov, I M Razdobreev, All-fiber passively Q -switched ytterbium laser[C]. IEEE, Proceedings of CLEO-Europe, Munich, 2005: 515.
- 18 T Y Tsai, Y C. Fang, Z Lee, *et al.*. All-fiber passively Q -switched erbium laser using mismatch of mode field areas and a saturable-amplifier pump switch[J]. Opt Lett, 2009, 34(19): 2891 - 2893.
- 19 T Y Tsai, Y Fang, H M Huang, *et al.*. Saturable absorber Q -and gain-switched all-Yb³⁺ all-fiber laser at 976 and 1064 nm[J]. Opt Express, 2010, 18: 23523-23528.
- 20 T Y Tsai, Y C Fang, S H Hung. Passively Q -switched erbium all-fiber lasers by use of thulium-doped saturable-absorber fibers[J]. Opt Express, 2010, 18(10): 10049-10054.
- 21 AS Kurkov, Ya E Sadovnikova, A V Marakulin, *et al.*. All fiber Er-Tm Q -switched laser[J]. Laser Phys Lett, 2010, 7(10): 795-797.
- 22 D Jin, R Sun, H Shi, *et al.*. Stable passively Q -switched and gain-switched Yb-doped all-fiber laser based on a dual-cavity with fiber Bragg gratings[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26027-26033.
- 23 D Jin, R Sun, S Wei, *et al.*. High pulse-energy generation from a monolithic Yb-doped all-fiber dual-cavity laser with fiber-based passive Q -switch[C]. Conference of ASSL, 2014: AM5A. 40.
- 24 R Herda, S Kivistö, O G Okhotnikov, Dynamic gain induced pulse shortening in Q -switched lasers[J]. Opt Lett, 2008, 33(9): 1011-1013.

栏目编辑：宋梅梅