

## 光纤饱和吸收体掺镱全光纤化激光器

祖嘉琦<sup>1</sup>, 武 帅<sup>2</sup>, 张海涛<sup>1\*</sup>, 耿东颀<sup>3</sup>, 卢 姁<sup>4</sup>

1. 清华大学 精密仪器系 激光与光子技术研究室, 北京 100084;
2. 5111 信箱, 北京 100094;
3. 四川省科学器材有限公司, 四川 成都 610023;
4. 32021 部队, 北京 100094)

**摘 要:** 报道了一种基于光纤饱和吸收体的掺镱全光纤调 Q 激光器, 为了获得较高峰值功率较窄脉宽的激光脉冲输出, 利用掺镱光纤的可饱和吸收效应, 以 20/130  $\mu\text{m}$  规格的大模场双包层掺镱光纤作为增益光纤, 以 10/130  $\mu\text{m}$  规格的单模双包层掺镱光纤作为可饱和吸收体来实现被动调 Q。该激光器采用全光纤化的结构, 结构紧凑, 以较低的成本获得了较为高效的脉冲输出。最终获得了平均功率最高为 3 W, 直线效率约为 30%, 重复频率为 10~100 kHz 可调, 脉宽最窄为 344 ns, 光谱宽度为 0.05 nm、中心波长为 1 064 nm 的激光输出。

**关键词:** 激光技术; 激光器; 光纤激光; 脉冲激光; 光纤可饱和吸收体

**中图分类号:** TN248 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20190382

## Yb-doped all-fiber laser based on fiber saturable absorber

Zu Jiaqi<sup>1</sup>, Wu Shuai<sup>2</sup>, Zhang Haitao<sup>1\*</sup>, Geng Dongxian<sup>3</sup>, Lu Xu<sup>4</sup>

1. Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. 5111 mailbox, Beijing 100094, China;
3. Scientific Equipments Company of Sichuan Province, Chengdu 610023, China;
4. 32021 Force, Beijing 100094, China)

**Abstract:** An Yb-doped all-fiber Q-switched laser based on fiber saturable absorber was reported. In order to obtain laser pulses output with a higher peak power and a narrower pulse width, the saturable absorption effect of Ytterbium-doped fiber was used with laser. The 20/130  $\mu\text{m}$  large mode double cladding Yb-doped fiber was used as the gain fiber. The 10/130  $\mu\text{m}$  single mode double cladding Yb-doped fiber was used as saturable absorber. The laser adopted a all fiber-optic structure, and a relatively stable pulse output was obtained at a relatively low cost. The maximum average power was 3 W, the slope efficiency was 30%, the repetition rate was 10–100 kHz, and the minimum pulse duration was 344 ns with the spectral width of 0.05 nm and the central wavelength of 1 064 nm.

**Key words:** laser techniques; lasers; fiber lasers; pulse laser; fiber saturable absorber

收稿日期:2020-01-07; 修订日期:2020-02-11

基金项目:国家自然科学基金(61475081);四川省科技计划资助(2018JZ0015)

作者简介:祖嘉琦(1996—),男,博士生,主要从事光纤激光器方面的研究。Email: zujiaqi@gmail.com

通讯作者:张海涛(1973—),女,教授,博士生导师,主要从事大能量光纤激光、高稳定超荧光光纤光源等激光技术与应用方面的研究。

Email: zhanghaitao@mail.tsinghua.edu.cn

## 0 引言

光纤激光器自问世以来,由于光束质量好,高亮度,高效率,波长选择性和易于集成等优点,在材料加工、照明、目标探测、科学测量等领域都有极其广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。全光纤化的调 Q 激光器因为其独特的优势,逐渐成为激光领域人们研究的重点方向之一。调 Q 激光器可以通过主动 Q 开关或使用电光晶体的方式<sup>[3,4]</sup>,半导体可饱和吸收镜,石墨烯或其他类型的饱和吸收体(SA)等被动 Q 开关<sup>[5-6]</sup>来产生 Q 脉冲。与上述产生脉冲的方法相比,基于掺杂光纤作为可饱和吸收体来实现被动调 Q 的理论逐渐成熟,由于其简单和紧凑的系统构成,使之成为在各种光纤激光器中产生调 Q 脉冲的替代方法。在众多调 Q 光纤激光器设计中,全光纤配置的被动调 Q 激光器由于其结构坚固,输出稳定,尺寸紧凑且免维护操作而特别引人关注。利用不同掺杂光纤的可饱和吸收效应来产生脉冲输出,逐渐被应用于全光纤化的调 Q 激光器。

目前,国内外报道的以各种掺杂光纤作为可饱和吸收体的激光器,功率大概为 mW 到 W 量级,脉宽为几十纳秒到几百纳秒,频率多为 10~200 kHz<sup>[7-9]</sup>。

2013 年加拿大瑞尔森大学报道了一种全光纤被动 Q 开关 Yb 掺杂激光器<sup>[10]</sup>,使用一段 Sm 掺杂光纤作为可饱和吸收体,该激光器产生 1 064 nm 的脉冲和 28 μJ 脉冲能量以及 200 ns 脉冲宽度,重复频率为 100 kHz。2014 年胡等人报道了一种全光纤被动调 Q 掺镱光纤激光器和一块 Sm 掺杂光纤作为可饱和吸收体<sup>[11]</sup>,激光产生 70 μJ, 41 ns 输出脉冲,峰值功率为 1.7 kW,重频 100 kHz。2015 年,中国北京工业大学报道了一种基于光纤被动调 Q 的纳秒脉冲掺镱双掺全光纤激光器<sup>[12]</sup>,利用掺镱双掺光纤作为可饱和吸收体,输出激光脉冲的脉宽为 173 ns、波长为 1 570 nm,平均功率为 2.2 W,脉冲重复频率调谐范围为 14~156 kHz,2017 年该课题组利用掺铒光纤作为可饱和吸收体实现了 1 993 nm 处 20~33.3 kHz 重复频率,256.3 mW 平均功率,87 ns 脉宽的激光输出<sup>[13]</sup>。2018 年, Rahman 等人利用掺铒光纤作为可饱和吸收体<sup>[14]</sup>,采用环形腔结构,得到了波长 1069 nm,脉宽 2.87 μs,输出功率为 4.8 mW 的激光输出。

文中采用了 20/130 μm 的大模场掺镱光纤作为增

益光纤,以掺铒光纤作为可饱和吸收体来实现被动调 Q,这样的设计的特点在于,能够在提高激光器功率的同时,保证良好的光束质量,抑制非线性效应,最终获得了平均功率最高为 3 W,直线效率约为 30%,重复频率为 10~100 kHz 可调,脉宽最窄为 344 ns,3 dB 光谱线宽为 0.05 nm、中心波长为 1 064 nm 的激光输出。

## 1 激光器结构

文中实验采用的激光器结构如图 1 所示。

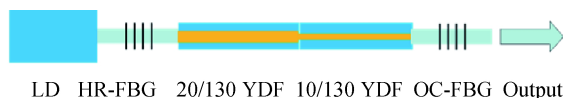


图 1 激光器结构

Fig.1 Laser structure

左侧为 976 nm 波长的 LD 泵浦源,连接到一个高反射率光纤布拉格光栅上,规格为 10/130 nm,栅区长度为 4 mm,中心波长为 1 063.97 nm,光谱 3 dB 带宽为 0.78 nm,反射率为 99.989%,紧接着右侧接有 3.5 m 长度的大模场掺镱双包层有源光纤 LMA-YDF-20/130,作为整个系统的增益光纤,在 976 nm 处的包层吸收大约为 8.7 dB/m。增益光纤的右端与 1.2 μm 长的 YDF-10/130 Yb 掺杂双包层光纤相连,作为可饱和吸收体(SA)。SA 光纤与一个低反射率光纤光栅相连,规格为 10/130 nm,栅区长度为 10 mm,中心波长为 1 063.85 nm,光谱 3 dB 带宽为 0.07 nm,反射率为 13.05%。作为输出镜,右侧接有泄漏器,用于去除包层中的残余泵浦光。为了减少不同芯径的光纤熔接所造成的熔接损耗,笔者使用了光纤熔接机的 SWEEP 扫描电弧功能,在熔接过程中电弧逐渐从中心向小芯径光纤一侧偏移,从而达到一个渐变扩芯的效果,实现不同光纤之间的模场匹配,最终 10/130 光纤与 20/130 nm 光纤熔接在 1 064 nm 处的损耗为 1.5 dB。

## 2 物理机制分析

该激光器被动调 Q 的物理机制为,当泵浦不足时,远离注入端的掺杂光纤由于泵浦不充分的缘故,导致无法形成粒子数的反转,等效为可饱和吸收体,产生饱和和自吸收效应,最终会产生被动调 Q 激光脉冲出现;随着泵浦功率的不断增加,用作可饱和吸收体

的掺杂光纤逐渐被漂白,激光输出脉冲减小,如果持续增加泵浦功率,将会产生连续的激光输出。掺杂稀土离子的光线具有吸收截面大,上能级寿命短的特点,因此能够在调 Q 开关中产生更高的重复频率<sup>[9]</sup>。

20 μm 和 10 μm 直径芯的 Yb 掺杂光纤分别被用作增益光纤和可饱和吸收体光纤。当增益光纤吸收泵浦功率时,放大的自发辐射 (ASE) 开始积累。尽管如此,腔体中可饱和吸收体光纤的高损耗阻碍了激光的产生。当 ASE 达到漂白可饱和吸收体光纤的阈值时,由于在增益光纤中已经建立了较高的粒子数反转,因此谐振腔中 Q 因子的突然增加启动了调 Q 过程, Q 开关脉冲消耗了使腔返回到吸收状态的反转。增益光纤和可饱和吸收体光纤之间的较大的直径比允许更多的能量在 Q 开关之前存储在增益光纤中,这更有利于更高的峰值功率和更窄的脉宽产生。同时使用了使用大模场 LMA-20/130-YDF 光纤,因为自相位调制 (SPM) 和受激拉曼散射 (SRS) 的功率阈值与模场面积成比例,采用这种配置,能够有效地抑制 SRS 和 SPM 的非线性效应的影响。

### 3 实验结果及分析

在激光器搭建之初,采用了连续泵浦的方式进行泵浦,成功获得了 1 064 nm 的调 Q 激光,低于 6 W 的平均泵浦功率下,由于粒子数反转不足,无法获得稳定的调 Q 脉冲串,高于 6 W 的泵浦平均功率可以获得较为稳定的脉冲串,因此该激光器的阈值功率约为 6 W。但是获得的调 Q 激光有比较严重的弛豫振荡脉冲,电流在加到 5 A 左右,对应 LD 泵浦功率 8 W 左右出现效果较好调 Q 现象,在 18 W 左右脉冲变得不稳定;调节电流,随着泵浦功率的提高,可以看到重复频率不断增加,从开始获得较为稳定的脉冲输出开始 (6 W),到稳定脉冲消失之前 (18 W),在此范围内调节泵浦功率,获得的重复频率为 60~150 kHz。这是在预期范围之内的,泵浦电流越大,可饱和吸收体光纤光纤漂白时间越短,但是在连续泵浦下脉冲质量较差,有很严重的弛豫振荡脉冲,采用脉冲泵浦的方式可以有效抑制弛豫振荡脉冲,提高脉冲质量。图 2 是在 10 W 的连续泵浦下获得的脉冲波形。

为了抑制弛豫振荡脉冲,之后采用了脉冲泵浦的

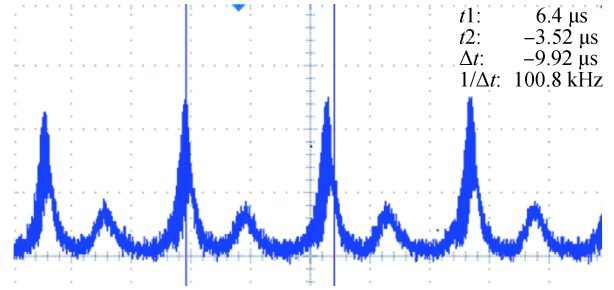


图 2 10 W 连续泵浦下的脉冲波形

Fig.2 Pulses of 10 W CW pumping

方式,首先测量了不同占空比、重复频率以及电流下的泵浦功率和输出功率的关系 (图 3),可以看到整体的效率约为 30% 左右。

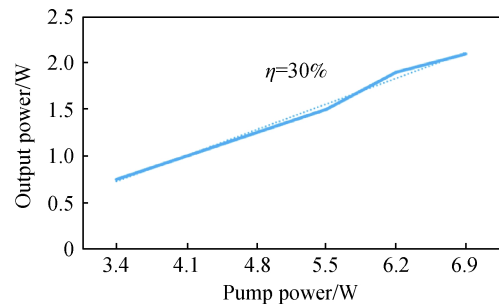


图 3 平均泵浦功率和平均输出功率的关系图

Fig.3 Average pumping power versus average output power

对激光输出的光谱进行了测量如图 4(a)、(b) 所示。中心波长为 1 063.74 nm,谱宽为 0.05 nm,这和选

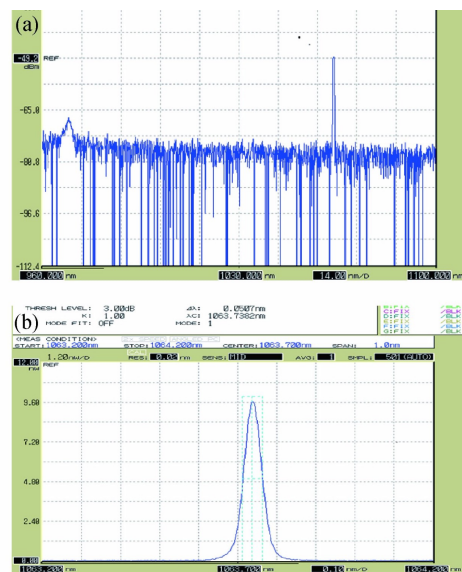


图 4 (a) 光谱测量结果 1; (b) 光谱测量结果 2

Fig.4 (a) Spectral measurement result 1 ;(b) Spectral measurement result 2

择的光纤布拉格光栅的参数基本一致,其中还残留着极少量的 970 nm 波长附近的残余泵浦光,但强度和所得激光相差太大基本可以忽略。同时较窄较平滑的光谱图也表明有效抑制了系统中的非线性效应。

M2 的测量结果为 1.06 左右,图 5 为 CCD 下输出光斑形状和能量分布,可以看到光束质量良好,实现了单模激光输出。

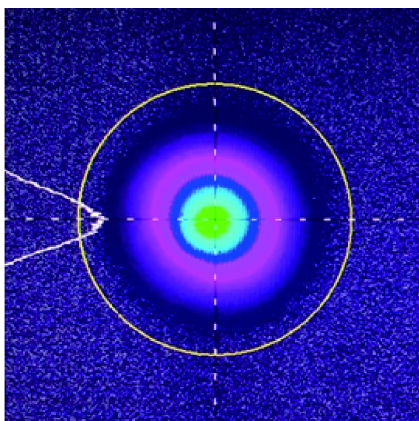


图 5 CCD 下输出光斑形状和能量分布

Fig.5 Output spot shape and energy distribution under CCD

对所得脉冲波形进行了测量,测量了在不同脉冲泵浦时间、重复频率和电流下获得的脉冲序列,实现了 0~100 kHz 重复频率可调节,与具体脉冲的质量和电流、占空比、频率都有关系。其中能够获得较好脉冲序列的参数有:重频 100 kHz,泵浦时间 5  $\mu\text{s}$ ,电流 7 A;重频 90 kHz,泵浦时间 6  $\mu\text{s}$ ,电流 6 A;重频 70 kHz,泵浦时间 7  $\mu\text{s}$ ,电流 7 A;重频 50 kHz,泵浦时间 8  $\mu\text{s}$ ,电流 6.5 A。如图 6(a) 和 (b) 分别是给定条件下获得的重复频率为 100 kHz 和 80 kHz 的脉冲序列。过短或过长的泵浦时间或者过小或者过大的电流都会导致不稳定的脉冲序列以及弛豫振荡脉冲等现象,这是由于泵浦时间过短或者电流太小不足以形成调 Q,而过大的电流过长的泵浦时间又会导致能量溢出引发弛豫振荡脉冲,如图 7 所示,为重频 90 kHz,泵浦时间 6  $\mu\text{s}$ ,电流 7 A 条件下,相对于稳定的脉冲序列参数 (90 kHz, 6  $\mu\text{s}$ , 6 A) 泵浦电流更高,有比较明显的弛豫振荡脉冲。

对脉冲的稳定性形状以及脉宽等参数进行了测量,图 8 分别是重频 100 kHz,泵浦时间 5  $\mu\text{s}$ ,电流 6.5 A 以及重频 100 kHz,泵浦时间 5  $\mu\text{s}$ ,电流 8 A 下获得的

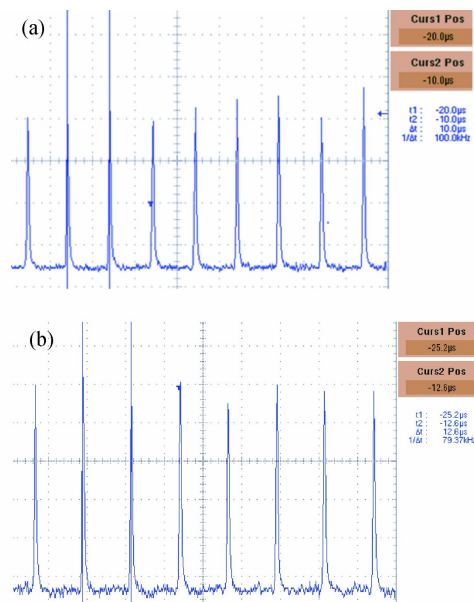


图 6 (a)100 kHz 重复频率脉冲序列;(b)80 kHz 重复频率脉冲序列

Fig.6 (a) Pulses at a 100 kHz repeat frequency; (b) Pulses at a 80 kHz repeat frequency

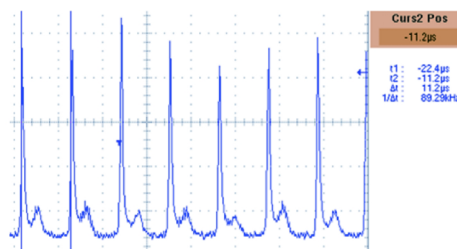


图 7 给定条件下 90 kHz 存在弛豫振荡脉冲的序列

Fig.7 Relaxation oscillation pulses at 90 kHz for a given condition

脉冲波形,可以观察到峰值功率提高且脉宽变窄的情况,从 595 ns 提升到了 434 ns,预期结果如此:随着泵浦振幅的增加,增益光纤中的 ASE 需要更少的时间来建立和漂白 SA。此外,由于泵浦光强度较高,一旦 SA 被漂白,增益光纤中较高的反转数量快速消耗,导致在 Q 开关过程中提取的脉冲宽度较短和脉冲能量较高。腔内的高功率强度改善了受激发射过程。脉冲的时间稳定性为 7% 左右,峰值的抖动 13%,脉冲的幅度稳定性可能受到温度影响较大,因为实验中 LD 使用风冷散热,温度控制并非十分精确,导致脉冲存在一些不稳定,这个问题在后续进行脉冲放大后可获得一定改善。可以发现脉冲形状是不对称的,陡峭的上升沿和较缓的尾部边缘,这是调 Q 脉冲的典型特征。图 9 为实验中获得的最窄脉宽为 344 ns 的波形。

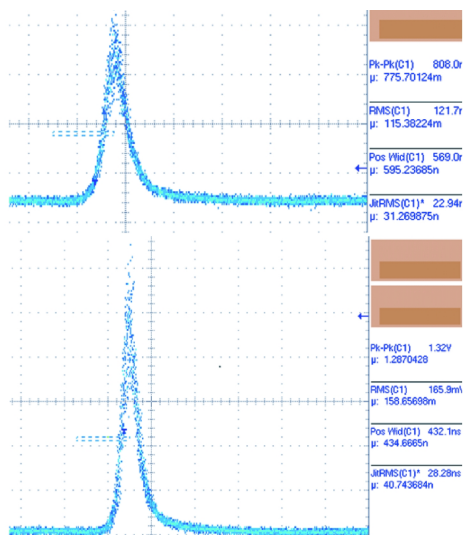


图 8 两种泵浦条件下获得的脉冲波形 (脉宽) 对比

Fig.8 Comparison of pulse waveforms (pulse width) obtained under two pumping conditions

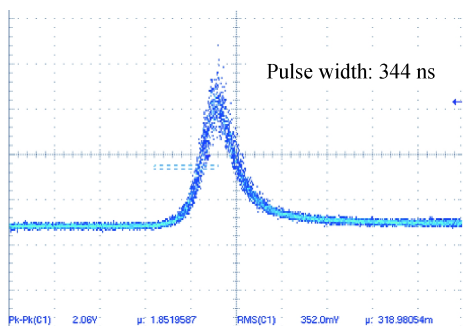


图 9 获得的最窄脉宽 344 ns 的脉冲波形

Fig.9 Obtained pulse waveform with the narrowest pulse width of 344 ns

## 4 结论

报道了一种基于光纤可饱和吸收体的掺镱全光纤化被动调 Q 激光器, 利用掺镱光纤的可饱和吸收体性质, 来实现被动调 Q, 采用全光纤化的设计, 激光器结构采用 20/130 双包层掺镱光纤作为增益光纤, 10/130 掺镱光纤作为可饱和吸收体, 这种结构的设计有利于获得更高峰值功率、更窄脉宽的激光脉冲产生, 分别以连续以及脉冲泵浦的方式进行泵浦, 对脉冲的波形、光束质量等参数进行了测量, 在合适的泵浦条件下, 获得了较窄谱宽和较为稳定的纳秒脉冲输出, 平均功率最高为 3W, 直线效率约为 30%, 重复频率为 10~100 kHz 可调, 脉宽最窄为 344 ns, 光谱宽度为 0.05 nm、中心波长为 1 064 nm 的激光输出。该激

光器的效率、脉宽压缩以及脉冲稳定性都有一定提升空间, 未来会进行进一步的优化。

## 参考文献:

- [1] Hong Ziming, Ai Qingsong, Chen Kun. High precise 3D visual measurement based on fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0803011. (in Chinese)  
洪梓铭, 艾青松, 陈昆. 基于光纤激光的高精度三维视觉测量技术[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 0803011.
- [2] Gao Jing. Tunable mode-locked fiber laser pumped supercontinuum source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 25-30. (in Chinese)  
高静. 可调谐锁模光纤激光器泵浦的超连续谱光源[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(1): 25-30.
- [3] Hu Xing, Cheng Dejiang, Guo Zhiyan, et al. Highly efficient RTP electro-optic Q-switched Nd: YVO<sub>4</sub> laser by end-pumping at 914 nm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0105001. (in Chinese)  
胡星, 程德江, 郭芷妍, 等. 914 nm LD泵浦RTP电光调Q的高效率Nd:YVO<sub>4</sub>激光器[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(1): 0105001.
- [4] Liu Yuqian, Zhang He, Jin Liang, et al. Compact quasi continuous pumped Nd: YAG Q-switched solid laser [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 413-424. (in Chinese)  
刘宇乾, 张贺, 金亮, 等. 紧凑型准连续泵浦调Q Nd:YAG激光器[J]. *中国光学*, 2019, 12(2): 413-424.
- [5] Li Jingzhao, Chen Zhenqiang, Zhu Siqi. Passively Q-switched laser with a Yb: YAG/Cr<sup>3+</sup>: YAG/YAG composite crystal [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(1): 55-61. (in Chinese)  
李景照, 陈振强, 朱思祁. 基于Yb:YAG/Cr<sup>3+</sup>:YAG/YAG键合晶体的被动调Q激光器[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(1): 55-61.
- [6] Tang Rui, Gao Ziye, Wu Zhengmao, et al. Output characteristics of diode-pumped passively Q-switched Yb: CaYAlO<sub>4</sub> pulsed laser based on a SESAM [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(1): 167-178. (in Chinese)  
唐睿, 高子叶, 吴正茂, 等. 基于SESAM被动调Q的激光二极管泵浦Yb:CaYAlO<sub>4</sub>脉冲激光器[J]. *中国光学*, 2019, 12(1): 167-178.
- [7] Lu Y, Gu X. Kilowatt peak power pulses from a passively Q-switched Yb-doped fiber laser with a smaller-core Yb-doped fiber as a saturable absorber [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(3): 1-7.
- [8] Tsai T Y, Fang Y C, Huang H M, et al. Saturable absorber Q-

- and gain-switched all-Yb<sup>3+</sup> all-fiber laser at 976 and 1064 nm [J]. *Optics Express*, 2010, 18(23): 23523–8.
- [9] Zhou J, Lu Y, He B, et al. Q-switched laser in an SMS cavity for inhibiting nonlinear effects [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(19): 6080–6084.
- [10] Hu M, He B, Liu H, et al. High-peak power, all-fiber passively Q-switched laser using a Sm-doped fiber saturable absorber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(14): 2510–2515.
- [11] Lu Y, Gu X. All-fiber passively Q-switched fiber laser with a Sm-doped fiber saturable absorber [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1997.
- [12] Jin Dongchen, Sun Ruoyu, Wei Shouyu, et al. 1570 nm nanosecond pulse generation from Er/Yb Co-doped all-fiber dual-cavity laser with fiber-based passive Q-switched [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1002006. (in Chinese)
- 金东臣, 孙若愚, 魏守宇, 等. 基于光纤被动调Q的1570 nm纳秒脉冲钕镱双掺全光纤双腔激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1002006.
- [13] Liu Wei, Jin Dongchen, Sun Ruoyu, et al. 1993 nm nanosecond pulse generation from Tm-doped all-fiber dual-cavity laser with fiber-based saturable absorber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0801006.
- [14] Rahman M F A, Latiff A A, Rusdi M F M, et al. Q-switched ytterbium-doped fiber laser via a thulium-doped fiber saturable absorber [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(22): 6510.