

# 声光调 Q 光纤激光器输出脉冲多峰现象的实验研究

郝海洋 李莉 杨亚婷 方妍 王海燕 胡贵军

吉林大学通信工程学院, 吉林 长春 130012

**摘要** 搭建了声光调 Q 脉冲光纤激光器实验系统,研究了输出的调 Q 脉冲多峰现象。通过调节系统的抽运功率、声光 Q 开关的重复频率、开启时间、上升时间等可调参数进行实验,寻找多峰个数少、形状好的调 Q 脉冲。最终在抽运功率为 8 W, Q 开关重复频率为 10 kHz, 开启时间为 260 ns, 上升时间为 150 ns 时,得到一个前沿有稍微突起的调 Q 脉冲输出,此时激光转换效率约为 23.6%。实验成功地减少了输出脉冲波形多峰的个数,优化了调 Q 脉冲的输出波形。对实验结果进行的分析为声光调 Q 光纤激光器获取输出平滑脉冲提供了方法。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 声光调 Q; 多峰; 优化

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0601005

## Experimental Research on Multi-Peak Phenomenon of Acousto-Optic Q-Switched Fiber Laser Output Pulse

Hao Haiyang Li Li Yang Yating Fang Yan Wang Haiyan Hu Guijun

College of Communications Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

**Abstract** An acousto-optic Q-switched fiber laser experimental system has been established, and the multi-peak phenomenon of the output Q-switched pulse has been analyzed. In order to find the Q-switched pulse with less multi-peak number and better shape, we adjust the controllable parameters like the pump power of system, the repetition rate of acousto-optic Q-switch, opening time and rise time. At last, when the pump power is 8 W, repetition frequency of Q-switch is 10 kHz, opening time is 260 ns, and rise time is 150 ns, we have got a Q-switched output pulse with a slightly protuberance in the front, the conversion rate of laser is about 23.6% at the moment. The multi-peak number of output pulse is reduced successfully in the experiment, and the output waveform of Q-switched pulse is optimized. The analysis of the experiment result provides methods for outputting smooth pulse of acousto-optic Q-switched fiber laser.

**Key words** lasers; fiber laser; acousto-optic Q-switched; multi-peak; optimization

**OCIS codes** 140.3538; 140.3540; 170.1065

## 1 引言

调 Q 脉冲光纤激光器具有窄脉宽、高质量、高峰值功率等特点,同时还具有结构紧凑、转换效率高、光束质量高等优点,在激光加工、通信、医学、军事等领域有着广泛的应用<sup>[1-4]</sup>。近年来,由于声光调 Q 光纤激光器可以方便地控制输出脉冲的重频、脉宽等参数,在输出脉冲稳定度方面也更具优势,因而成为国内外学者的研究热点<sup>[5-7]</sup>。González-García 等<sup>[8]</sup>搭建了钕镱共掺声光调 Q 光纤激光器系统,获得了 1549 nm 脉冲激

收稿日期: 2015-12-21; 收到修改稿日期: 2016-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(61575078)、吉林省科技发展计划(20140203009GX)、吉林省发改委产业技术研究专项(2014Y087)

作者简介: 郝海洋(1991—),男,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光器与放大器方面的研究。

E-mail: 18204316516@163.com

导师简介: 胡贵军(1970—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤通信技术和器件等方面的研究。

E-mail: hugj@jlu.edu.cn(通信联系人)

光,光-光转换效率高达 50%。Stutzki 等<sup>[9]</sup>实现了在重复频率 5 kHz 下,平均功率 140 W、脉冲宽度 60 ns、脉冲能量 26 mJ 的脉冲输出,其光束质量优于 1.3。He 等<sup>[10]</sup>采用声光调 Q 技术,利用光纤光栅构成谐振腔,光子晶体光纤作为增益介质,峰值功率能够达到 130 kW。王立新等<sup>[11]</sup>搭建的主振荡功率放大器(MOPA)系统中,种子源为全光纤声光调 Q 激光器,获得平均功率为 29.8 W、脉冲质量优于 1.32 的偏振脉冲激光。

在实验和实际应用中,输出脉冲的平滑度也是声光调 Q 光纤激光器的重要指标之一。然而,声光调 Q 光纤激光器输出脉冲会出现多峰现象<sup>[12-17]</sup>,这降低了输出脉冲的质量,难以得到理想、平滑的脉冲波形,从而影响加工效果<sup>[18-19]</sup>。例如:多峰问题会使激光打标机打出来的文字或图案看上去不太清楚,出现所谓的“连笔”现象,并且边缘会有锯齿状线条,用手触摸不够平滑,如果多峰问题严重,还会影响激光作用材料上的热效应,使打标材料融化,造成打标失败;多峰问题还会使激光焊接的焊缝外观粗糙,周边有毛刺,激光熔斑粗大,严重时会出现裂纹。所以多峰现象也成为声光调 Q 脉冲光纤激光器研究中亟待解决的问题。国内外学者就此问题进行了理论上的仿真研究,Liu<sup>[12]</sup>通过建立行波模型的方法,从数值上分析了腔中的能量和粒子数对多峰的影响;Wang 等<sup>[13-14]</sup>通过仿真的方法解释了 Q 开关的扰动对多峰问题的影响;Upadhyaya 等<sup>[20]</sup>阐述了非线性效应[受激布里渊散射(SBS)和受激拉曼散射(SRS)]对多峰的影响。然而这些研究都是理论上的分析和仿真,缺少实验研究。因此,本文对声光调 Q 脉冲光纤激光器输出的脉冲波形多峰现象进行了实验研究,通过调节系统的抽运功率、声光 Q 开关的重复频率、开启时间、上升时间等参数,减少多峰的个数,优化输出调 Q 脉冲的形状,从而获得较好的调 Q 脉冲输出,并对实验结果进行了分析。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。实验采用一段 4 m 长的内包层为八边形的双包层掺镱光纤(YDCF)作为增益介质,其纤芯直径为 10 μm,内包层直径为 130 μm,纤芯/内包层有效数值孔径为 0.08/0.46,在 975 nm 附近的吸收损耗为 3.9 dB/m。采用一对中心波长均为 1064 nm 的高低反光栅作为激光器的谐振腔,高反光栅(HR)的反射率为 99.6%,3 dB 带宽为 2.03 nm;低反光栅(LR)的反射率为 9.8%,3 dB 带宽为 0.92 nm。用带尾纤输入输出的、中心波长为 1064 nm 的声光调制器(AOM)作为主动调 Q 器件,其插入损耗为 1.9 dB,用其一级衍射方向进行激光输出。AOM 由一台脉冲信号发生器(PSG)提供驱动信号,可以方便地调节激光器的输出参数和激光器的运行状态。用最大输出功率为 9 W、波长为 980 nm 的多模激光二极管(LD)作抽运源。LD 输出首先接入抽运保护器,通过(2+1)×1 耦合器耦合进入 LR,形成后向抽运的激光器。隔离器(ISO)保证了激光的单方向传输,并在一定程度上保证了激光器的稳定运行。所有元器件均采用光纤熔接的方式进行连接。

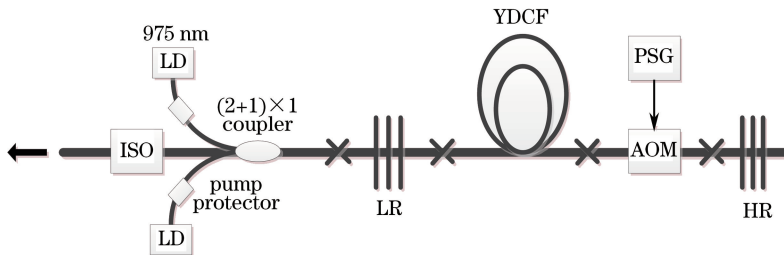


图 1 声光调 Q 脉冲光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Experiment setup of the acousto-optic Q-switched pulse fiber laser

## 3 实验结果及分析

### 3.1 输出调 Q 脉冲波形随抽运功率的变化

首先分析了调 Q 脉冲输出波形随抽运功率的变化情况。固定声光 Q 开关的重复频率为 10 kHz,开启时间为 5 μs,上升时间为 20 ns。测得抽运功率分别为 2、4、6、8 W 时,输出功率分别为 446 mW、908 mW、1.38 W、1.856 W,光-光转换效率约为 23%;又在以上功率下测得调 Q 脉冲输出波形的变化情况,如图 2 所

示。由图 2 可知,当抽运功率分别为 2、4、6、8 W 时,输出的脉冲序列的频率均为 10 kHz,而输出的脉冲宽度分别为 235、105、98、64 ns,多峰的个数分别 9、6、3、3。因此,可以得出:随着抽运功率的增加,脉冲宽度随之变窄,而输出调 Q 脉冲波形多峰的个数也逐渐减少。

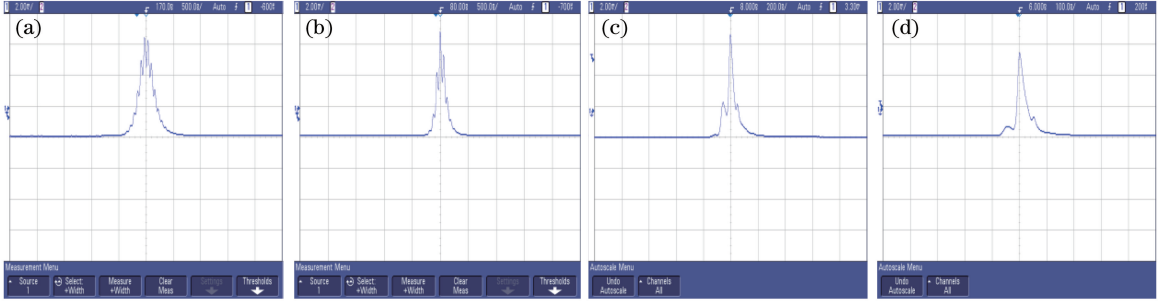


图 2 不同抽运功率下的输出脉冲波形图。(a) 2 W; (b) 4 W; (c) 6 W; (d) 8 W

Fig. 2 Output pulse waveform graphs under different pump powers. (a) 2 W; (b) 4 W; (c) 6 W; (d) 8 W

### 3.2 输出调 Q 脉冲波形随重复频率的变化

固定抽运功率为 8 W, Q 开关开启时间为 5  $\mu$ s, 上升时间为 20 ns。测得重复频率分别为 10、20、50、100 kHz 时,输出功率为 1.856、2.001、2.024、2.018 W,光-光转换效率随重复频率的增加先增加后不变,最高值为 25.3%;又在以上重复频率下测得调 Q 脉冲输出波形的变化情况,结果如图 3 所示。由图 3 可知,当重复频率分别为 10、20、50、100 kHz 时,输出的脉冲序列的频率依次为 10、20、50、100 kHz,而输出的脉冲宽度分别为 64、92、245、625 ns,多峰的个数分别 3、4、8、14。因此,可以得出结论:随着重复频率的增加,脉冲宽度随之变宽,而输出的调 Q 脉冲波形上多峰的个数也逐渐增加。

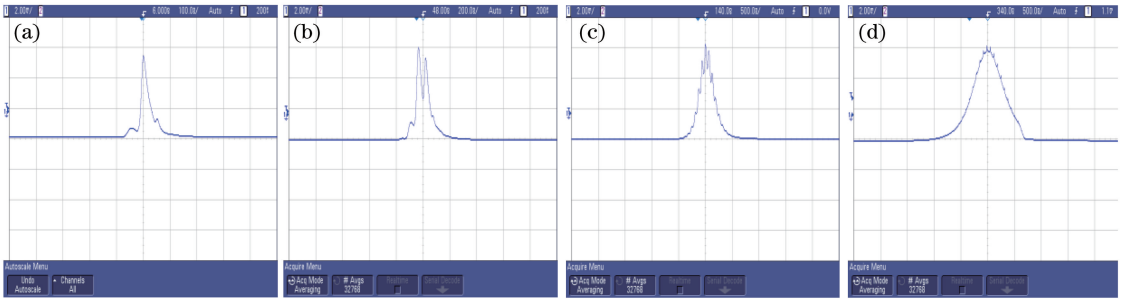


图 3 不同重复频率下的输出脉冲波形图。(a) 10 kHz; (b) 20 kHz; (c) 50 kHz; (d) 100 kHz

Fig. 3 Output pulse waveform graphs under different repetition frequencies.

(a) 10 kHz; (b) 20 kHz; (c) 50 kHz; (d) 100 kHz

### 3.3 输出调 Q 脉冲波形随声光 Q 开关开启时间的变化

实验还分析了调 Q 脉冲输出波形随声光 Q 开关开启时间的变化情况。固定抽运功率为 8 W, 声光 Q 开关重复频率为 10 kHz, 上升时间为 20 ns, 测得开启时间分别为 1000、500、450、400 ns 时,输出功率变化不大,约为 1.828 W,光-光转换效率约为 22.8%;又在以上开启时间下测得调 Q 脉冲输出波形的变化情况,结

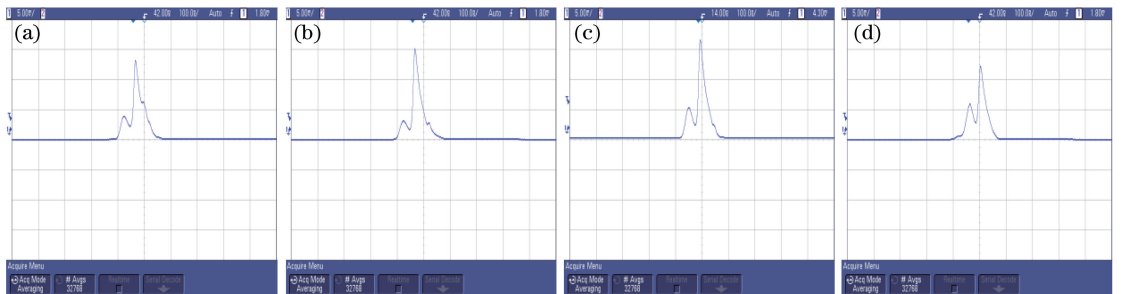


图 4 不同开启时间下的输出脉冲波形图。(a) 1000 ns; (b) 500 ns; (c) 450 ns; (d) 400 ns

Fig. 4 Output pulse waveform graphs under different opening times. (a) 1000 ns; (b) 500 ns; (c) 450 ns; (d) 400 ns

果如图 4 所示。由图 4 可知,当开启时间分别为 1000、500、450、400 ns 时,输出的脉冲序列的频率均为 10 kHz,而输出的脉冲宽度分别为 89、75、71、67 ns,多峰的个数分别 3、3、3、2。因此,可以得出:随着 Q 开关开启时间的减小,脉冲宽度随之变窄,而输出的调 Q 脉冲波形上多峰的个数也逐步减少。

### 3.4 输出调 Q 脉冲波形随声光 Q 开关上升时间的变化

最后分析了调 Q 脉冲输出波形随声光 Q 开关上升时间的变化情况。固定抽运功率为 8 W,声光 Q 开关重复频率为 10 kHz,开启时间为 300 ns,测得上升时间分别为 50、70、100、120 ns 时,输出功率保持不变,约为 1.843 W,光-光转换效率约为 23%;又在以上上升时间下测得调 Q 脉冲输出波形的变化情况,结果如图 5 所示。由图 5 可知,当上升时间分别为 50、70、100、120 ns 时,输出的脉冲序列的频率均为 10 kHz,而输出的脉冲宽度没有变化,多峰的个数也没有变化,但是多峰的形状发生了改变,左峰开始降低,右峰开始升高,最终右峰超过左峰。

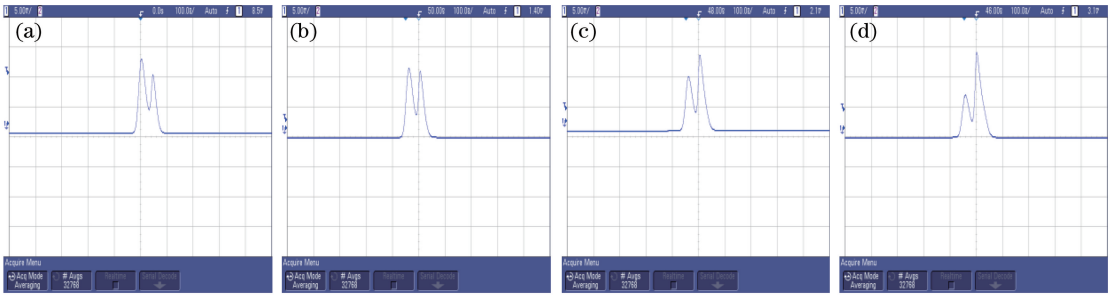


图 5 不同上升时间下的输出脉冲波形图。(a) 50 ns; (b) 70 ns; (c) 100 ns; (d) 120 ns

Fig. 5 Output pulse waveform graphs under different rise times. (a) 50 ns; (b) 70 ns; (c) 100 ns; (d) 120 ns

### 3.5 实验结果的优化

上述实验结果表明:抽运功率越大或者重复频率越小,输出脉冲波形的多峰个数越少;声光调 Q 开关的开启时间越小,输出脉冲波形的多峰个数进一步减少;随着声光调 Q 上升时间的改变,输出脉冲上多峰的形状得到优化。

在上述实验的基础上,固定抽运功率为 8 W,重复频率为 10 kHz,进一步优化开启时间和上升时间两个参量。一个前提是,声光调 Q 开关的开启时间不可能一直减小,如果开启时间过短,输出的调 Q 脉冲序列的频率变成重复频率的 1/2,出现“半频”现象,不符合输出调 Q 脉冲的频率等于重复频率的条件。因此经过开启时间和上升时间的优化,在开启时间为 260 ns、上升时间为 150 ns 时,得到如图 6 所示的优化后的调 Q 脉冲波形,此时输出功率为 1.88 W,光-光转换效率约为 23.6%。

此外,在图 6 中,优化后的脉冲波形前沿有个“小峰”存在,该“小峰”会对功率放大时输出的峰值功率有一定的影响。这是由于前沿有“小峰”的存在,在放大的过程中首先会消耗一定数量的反转粒子数,从而使得放大后的主峰峰值功率相对于理想的平滑高斯脉冲放大后获得的主峰峰值功率有所降低,因而影响输出时的峰值功率。但是,优化后的脉冲波形相对于多峰时的脉冲波形已经有了很大的改善。所以,下一步工作将会继续寻找解决“脉冲多峰”的方法,进一步优化前沿“小峰”,以期获得完美的高斯脉冲波形。

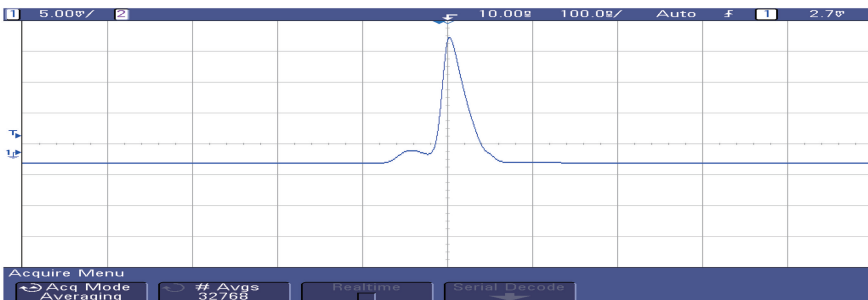


图 6 优化后的输出脉冲波形图

Fig. 6 Output pulse waveform graph after optimization

### 3.6 理论分析

根据调 Q 理论,输出调 Q 脉冲的宽度随声光 Q 开关关闭时间内积累的反转粒子数的增多而压窄。而在多峰现象中,调 Q 脉冲包络上峰与峰之间的间隔为常数,该常数等于光在腔内往返一周的时间<sup>[13-14]</sup>。因此,当声光调 Q 光纤激光器腔长固定时,由于调 Q 脉冲包络上峰与峰之间的间隔固定,输出的调 Q 脉冲宽度变窄会导致输出波形上的多峰个数减少。

在上述的声光调 Q 光纤激光器实验中,可以看出系统的抽运功率、声光 Q 开光的重复频率、开启时间都影响到输出脉冲波形上多峰个数。而实际上,这些可调参数都是通过影响输出调 Q 脉冲的宽度进而影响输出波形上的多峰个数。

当抽运功率比较小或者重复频率比较高时,声光 Q 开关关闭时间内积累的反转粒子数也比较少,谐振腔增益较低,此时输出的调 Q 脉冲的宽度比较宽,输出的调 Q 脉冲包络上的多峰个数会比较多;随着抽运功率的增加或者重复频率的减小,声光 Q 开关关闭时间内积累的反转粒子数增多,谐振腔增益增大,输出调 Q 脉冲宽度变窄,从而导致输出的调 Q 脉冲包络上的多峰个数减少。声光 Q 开关开启时间的减小,一方面会引起声光 Q 开关关闭时间的增加,使得声光 Q 开关关闭时间内积累的反转粒子数增加,谐振腔增益增大,输出调 Q 脉冲宽度变窄;另一方面,由于声光 Q 开关开启时间的减少,可能会对输出调 Q 脉冲进行截断,导致输出调 Q 脉冲宽度变窄。总之,声光 Q 开关开启时间的减小也使得调 Q 脉冲宽度变窄,从而导致输出调 Q 脉冲波形上的多峰个数减少。

实验通过调节 Q 开关的上升时间,使得输出波形的左右峰高度发生相互变化。原因在于当增大 Q 开关的上升时间时,释放的粒子数的最大速率将向后推迟,使得光子数密度达到最高值的时刻向后推迟,输出脉冲波形达到最高峰的时刻也向后推迟,这样也就出现了如图 5 所示的现象:左峰开始降低,右峰开始升高,最终右峰超过左峰。调节 Q 开关的上升时间,并没有改变多峰的个数,但是能够改变多峰的形状,优化输出脉冲波形。

通过上述实验和理论分析可知:由于调 Q 脉冲包络上峰与峰之间的间隔为常数,减小输出脉冲的宽度可以减少输出脉冲波形上显示的多峰个数,但是要想改变多峰的形状,优化输出脉冲波形,还需要调节 Q 开关的上升时间,通过改变不同时刻光子数的密度大小来改变多峰的形状,优化输出脉冲波形。

## 4 结 论

通过实验研究了声光调 Q 脉冲光纤激光器输出调 Q 脉冲波形上的多峰现象。通过对系统的抽运功率、声光 Q 开关的重复频率、开启时间、上升时间等可调参数进行调节,分析了输出调 Q 脉冲波形的特性以及规律,最终在抽运功率为 8 W,重复频率为 10 kHz,Q 开关的开启时间为 260 ns,上升时间为 150 ns 时,得到了一个主峰以及前沿有稍微突起的 Q 脉冲输出。利用简单可调的参数,减少输出调 Q 脉冲波形多峰的个数,优化输出波形的形状,这些针对多峰现象的实验研究对 MOPA 系统以及激光倍频等实验寻找良好的种子源脉冲具有一定的指导作用。

### 参 考 文 献

- Deng Ben, Wang Jie, Jiang Peipei, *et al.*. High peak power microchip laser and its LIBS application[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1102005.  
邓 奔, 王 杰, 姜培培, 等. 高功率微片激光器及其在 LIBS 中的应用[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1102005.
- Ouyang D Q, Zhao J Q, Zheng Z J, *et al.*. 110 W all fiber actively Q-switched thulium-doped fiber laser[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(1): 1-6.
- Feng Yutong, Wang Xiongfei, Zhu Chen, *et al.*. Experiment research of 100 W, all-fiber acousto-optic Q-switched fiber laser[J]. High Power Laser & Particle Beams, 2011, 23(6): 1444-1448.  
冯宇彤, 王雄飞, 朱 辰, 等. 100 W 全光纤声光调 Q 光纤激光器实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6): 1444-1448.
- Ji Xiang, Zhou Pu, Wang Xiaolin, *et al.*. High peak-power Q-switched all-fiber pulse laser based on acousto-optic modulator[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s102001.

- 冀翔, 周朴, 王小林, 等. 基于声光调  $Q$  的高峰值功率全光纤脉冲激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s102001.
- 5 Dai Shutao, Li Jinhui, Shi Fei, *et al.*. High repetition rate high pulse energy single longitudinal mode master oscillator laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(12): 1202001.  
戴殊韬, 李锦辉, 史斐, 等. 高重复频率大能量单纵模主振荡激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1202001.
- 6 Dong Xiaolong, Fu Xihong, Gao Lanlan, *et al.*. Pulse width laser diode pumped acousto-optically  $Q$ -switched 1064 nm laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(9): 091402.  
董小龙, 付喜宏, 高兰兰, 等. LD 抽运声光调  $Q$  1064 nm 窄脉宽激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(9): 091402.
- 7 Fang Q, Qin Y G, Wang B, *et al.*. 230 W average-power all-fiber-based actively  $Q$ -switched fiber master oscillator-power amplifier[J]. Applied Optics, 2013, 52(27): 6744-6747.
- 8 González-García A, Ibarra-Escamilla B, Pottiez O, *et al.*. High efficiency, actively  $Q$ -switched Er/Yb fiber laser[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 48: 182-186.
- 9 Stutzki F, Jansen F, Liem A, *et al.*. 26 mJ, 130 W  $Q$ -switched fiber-laser system with near-diffraction-limited beam quality[J]. Optics Letters, 2012, 37(6): 1073-1075.
- 10 He J, Du S T, Wang Z W, *et al.*. Linearly-polarized short-pulse AOM  $Q$ -switched 978 nm photonic crystal fiber laser [J]. Optics Express, 2013, 21(24): 29249-29254.
- 11 Wang Lixin, Cai Jun, Jiang Peipei, *et al.*. All fiberized high power linear polarized pulsed ytterbium-doped fiber laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(2): 350-354.  
王立新, 蔡军, 姜培培, 等. 全光纤化高功率线偏振掺镱脉冲光纤激光器[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 350-354.
- 12 Liu Z. The split pulses from actively  $Q$ -switched fiber lasers[J]. Laser Physics, 2013, 23(12): 125105.
- 13 Wang Y, Xu C Q. Switching-induced perturbation and influence on actively  $Q$ -switched fiber lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(11): 1583-1596.
- 14 Wang Y, Xu C Q. Actively  $Q$ -switched fiber lasers: switching dynamics and nonlinear processes [J]. Progress in Quantum Electronics, 2007, 31(3): 131-216.
- 15 Shekhar N K, Chowdhury S D, Sen R, *et al.*. Numerical and experimental study of multi-peaked and trimmed pulses in an actively  $Q$ -switched fiber laser [C]. International Conference on Fibre Optics and Photonics, Optical Society of America, 2014: T3A.34.
- 16 Zhao H M, Lou Q H, Zhou J, *et al.*. Characteristic of pulsed fiber laser induced by switching time[J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(2): 124-126.
- 17 Chowdhury S D, Shekhar N, Saha M, *et al.*. Broadband generation by multiple four-wave mixing process due to ASE  $Q$ -switching in high-power double-clad ytterbium-doped fiber amplifier[C]. SPIE/COS Photonics Asia, International Society for Optics and Photonics, 2014: 926610.
- 18 Zhao Hongming, Lou Qihong, Zhou Jun, *et al.*. Study of characteristics acousto-optic  $Q$ -switched double-clad fiber laser with different cavity configurations[J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(6): 3525-3530.  
赵宏明, 楼祺洪, 周军, 等. 不同腔结构下的声光调  $Q$  双包层光纤激光器特性研究[J]. 物理学报, 2008, 57(6): 3525-3530.
- 19 He Jing, Zhao Hongming, Zhou Jun, *et al.*. Single-ended fiber coupled acousto-optic  $Q$ -switched all-fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502008.  
何晶, 赵宏明, 周军, 等. 单端光纤耦合的声光调  $Q$  全光纤化光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502008.
- 20 Upadhyaya B N, Usha C, Kuruvilla A, *et al.*. Mechanisms of generation of multi-peak and mode-locked resembling pulses in  $Q$ -switched Yb-doped fiber lasers[J]. Optics Express, 2007, 15(18): 11576-11588.