

文章编号: 1001-3806(2015)06-0780-05

## 高重频风冷声光调 $Q$ 光纤激光器实验研究

陈鹏飞, 伍波\*, 沈琪皓, 何幸镨

(西南技术物理研究所, 成都 610041)

**摘要:** 为了实现功率稳定的风冷高重频脉冲光纤激光器, 采用主振荡功率放大结构, 对声光调  $Q$  的全光纤激光器进行了研究。振荡级采用声光调  $Q$  方案, 以光纤光栅对为激光器腔镜, 915nm 激光二极管连续抽运, 得到了中心波长 1064nm、重复频率 10kHz 到 130kHz 可调的激光脉冲输出。采用两级大模场双包层光纤放大, 实现了平均功率 101W、脉冲宽度 328.1ns、3dB 光谱宽度 0.6nm 的激光输出。第二放大级光光转换效率 69%, 激光器总光光转换效率达 62.7%。分析了声光调  $Q$  产生的宽种子光脉冲经放大后发生波形畸变的原因。结果表明, 采用 915nm 抽运波长提高了激光器输出激光功率稳定性, 在风冷的情况下输出功率长期稳定性优于 2%。

**关键词:** 激光技术; 全光纤激光器; 主振荡功率放大; 声光  $Q$  开关; 功率稳定性

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.06.010

### Experiment research of high repetition rate acousto-optic $Q$ -switched fiber laser under air cooling

CHEN Pengfei, WU Bo, SHEN Qihao, HE Xingkai

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to obtain the air cooling high repetition fiber laser with stable power, an acoustic-optic  $Q$ -switched all-fiber laser with master oscillator power amplifier structure was studied. The oscillator used the scheme of acousto-optic  $Q$ -switched with a pair of fiber Bragg grating as laser cavity mirrors. Pumped by 915nm laser diodes, 1064nm laser pulse output was acquired with adjustable repetition rates from 10kHz to 130kHz. Through two-stage double clad large mode area fiber amplifier, 101W output power was obtained with 328.1ns pulse width. The 3dB optical spectrum width of fiber laser was 0.6nm. Optical-optical efficiency of the second amplifier stage was 69%. The total optical-optical efficiency of laser was 62.7%. The distortion cause of long width seed pulse created by acousto-optic  $Q$ -switched through the amplification was studied. The experimental results show that pumped by 915nm laser diodes, the long-term stability of output power is proved to less than 2% under air cooling.

**Key words:** laser technique; all-fiber laser; master oscillator power amplifier; acousto-optic  $Q$ -switched; power stability

### 引言

脉冲光纤激光器根据其脉冲形成原理可分为调  $Q$  光纤激光器、锁模光纤激光器以及增益调制激光器<sup>[1-2]</sup>。调  $Q$  技术通过在谐振腔内插入电光或声光调  $Q$  器件产生激光脉冲, 是一种获得几十到几百纳秒脉冲输出的主要技术手段。近年来, 国内外关于脉冲宽度为纳秒量级的 1064nm 波长全光纤声光调  $Q$  光纤激光器的报道相对较多。1999 年, OFFERHAUS 等人采用声光调  $Q$  方案, 获得了重复频率 500Hz、单脉冲能量 2.3mJ 的脉冲输出<sup>[3]</sup>。2002 年, LIMPET 等人采用调

$Q$  的 Nd:YAG 薄片激光器作为种子源, 实现了波长 1064nm 最大平均功率 100W 的放大激光输出, 当重复频率为 50kHz 时, 单脉冲能量 2mJ, 脉冲宽度 90ns<sup>[4]</sup>。2010 年, LECOURT 等人用主动调  $Q$  的方式获得了 10ns 的脉冲输出<sup>[5]</sup>。2011 年美国的 IPG 公司报道了最大输出平均功率 200W、能量 10mJ 的调  $Q$  脉冲光纤激光器。国内早期采用空间耦合方式获得调  $Q$  脉冲输出。2006 年上海光学精密机械研究所采用空间抽运耦合主振荡功率放大 (master oscillator power amplifier, MOPA) 结构, 在重复频率为 100kHz 时得到了平均功率为 133.8W 的声光调  $Q$  激光脉冲输出<sup>[6]</sup>。随着大功率光纤合束器的发展, 到 2009 年出现了采用全光纤结构的大功率掺  $\text{Yb}^{3+}$  脉冲光纤激光器<sup>[7]</sup>。2011 年, 华北光电技术研究所报道了全光纤结构主振荡功率放大掺  $\text{Yb}^{3+}$  脉冲光纤激光器, 以光纤光栅为腔镜, 光纤型声光调  $Q$  的光纤激光器为种子源, 通过两级放

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(2011YQ110059)

作者简介: 陈鹏飞(1990-), 女, 硕士研究生, 主要从事脉冲光纤激光器的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: 147448024@qq.com

收稿日期: 2014-11-17; 收到修改稿日期: 2014-12-12

大后得到了平均功率 102.5W、脉冲宽度约 240ns 的激光输出,光光转换效率为 60%<sup>[8]</sup>。2012 年,国防科学技术大学报道了平均输出功率为 62W、脉宽 157ns 的全光纤型调 Q 脉冲光纤激光器<sup>[9]</sup>。2013 年,北京理工大学报道了全光纤化高功率线偏振掺镱脉冲光纤激光器,利用全光纤化声光调 Q 光纤激光器作为种子源,通过保偏放大获得了偏振输出功率 29.8W<sup>[10]</sup>。上述文献中对光纤调 Q 理论和振荡及放大实验方法报道较多,但是没有对激光器的功率稳定性分析以及对放大前后脉冲波形变化的比较分析。

本文中报道了全光纤声光调 Q 光纤激光器,采用主振荡功率放大方案,通过两级正向抽运放大获得了重复频率 120kHz、平均功率 101W、脉冲宽度 328.1ns、光束质量为 1.6、风冷条件下长期功率稳定性小于 2% 的激光输出,并分析了实验中声光调 Q 产生的宽种子光脉冲经放大后发生波形畸变的原因。

### 1 调 Q 激光器的理论分析

调 Q 的基本原理是通过某种方法使谐振腔的损耗  $\delta$  (或 Q 值) 依据规定的程序变化,刚开始抽运时,把激光器内的损耗调高,此时由于激光器阈值高而不能产生激光振荡,亚稳态上的粒子数得到积累,在积累到一定程度,迅速调低激光腔内的损耗,阈值也突然降低,这时反转集居数大大超过阈值,受激辐射迅速的增强<sup>[11]</sup>。即在极短时间内上能级储存粒子的能量转变为激光辐射的能量,在输出端输出一个极强的激光巨脉冲。根据激光腔内工作物质的粒子数和腔内光子数变化建立速率方程<sup>[12]</sup>:

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -2 \frac{\Delta n}{\Delta n_{th}} \delta \varphi \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \left( \frac{\Delta n}{\Delta n_{th}} - 1 \right) \delta \varphi \quad (2)$$

式中,  $\Delta n$  是反转粒子数密度,  $\delta$  为激光腔内损耗,  $\varphi$  为腔内光子数,  $\Delta n_{th}$  是反转粒子数密度阈值。

在  $t = t_p$  时刻,反转粒子数降至  $\Delta n_{th}$ ,这时激光腔内的光子数达到最大值  $N_{max}$ ,此时输出功率为最大  $P_{max}$ ,速率方程变为:

$$\frac{dN}{d\Delta n} = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta n_{th}}{\Delta n} - 1 \right) \quad (3)$$

初始光子数和调 Q 脉冲开始时的反转粒子数密度分别用  $N_{in}$  和  $\Delta n_{in}$  表示,将上式积分得<sup>[13]</sup>:

$$\int_{N_{in}}^N dN = \frac{1}{2} \int_{\Delta n_{in}}^{\Delta n_{th}} \left( \frac{\Delta n_{th}}{\Delta n} - 1 \right) d\Delta n \quad (4)$$

$$N = N_{in} + \frac{1}{2} \left( \Delta n_{in} - \Delta n + \Delta n_{th} \ln \frac{\Delta n}{\Delta n_{in}} \right) \quad (5)$$

当  $\Delta n = \Delta n_{th}$  时,  $N$  达到最大值  $N_{max}$ ,此时输出功率为最大值  $P_{max}$ 。由于  $N_{in} \ll N_{max}$ , (5) 式变为:

$$N_{max} \approx \frac{1}{2} \left( \Delta n_{in} - \Delta n_{th} + \Delta n_{th} \ln \frac{\Delta n_{th}}{\Delta n_{in}} \right) = \frac{1}{2} \Delta n_{th} \left( \frac{\Delta n_{in}}{\Delta n_{th}} + \ln \frac{\Delta n_{th}}{\Delta n_{in}} - 1 \right) \quad (6)$$

峰值功率  $P_{max}$  为:

$$P_{max} = \frac{h\nu}{2t_p} \left( \frac{\Delta n_{in}}{\Delta n_{th}} + \ln \frac{\Delta n_{th}}{\Delta n_{in}} - 1 \right) \quad (7)$$

对于声光调 Q 激光器峰值功率  $P_{max}$ 、脉冲重复频率  $f$ 、脉冲宽度  $\tau$  以及平均功率  $P_{ave}$  的关系式为:

$$P_{ave} \approx \tau f P_{max} \quad (8)$$

对掺  $Yb^{3+}$  脉冲光纤放大器的分析通常通过二级级粒子数速率方程和抽运光、信号光功率传输方程的数值计算得到。在输入种子光功率较强的情况下,放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 的影响较小。放大级增益光纤长度根据增益光纤对抽运光的吸收系数进行优化。通常增益光纤对抽运光的总吸收系数达到 10dB 时,吸收效率可以达到 90%。并且由于掺  $Yb^{3+}$  光纤对 1064nm 波长信号光的吸收系数较低,在不引起非线性效应的前提下,放大级中可以使用较长的增益光纤。

### 2 实验装置

脉冲光纤激光器实验装置如图 1 所示,采用主振荡 + 2 级功率放大方案。振荡级谐振腔以一对光纤布喇格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 为腔镜,光纤光栅对的纤芯直径为 10 $\mu$ m,中心波长 1064nm,反射率  $R$  分别为 99.5% 和 10.1%。振荡腔中插入一只光纤型声光 (acousto-optic, AO) Q 开关实现调 Q 脉冲输出, Q 开关的上升时间大于 100ns。谐振腔中采用 10 $\mu$ m/130 $\mu$ m 大模场掺  $Yb^{3+}$  光纤 (large mode area- $Yb^{3+}$  doped

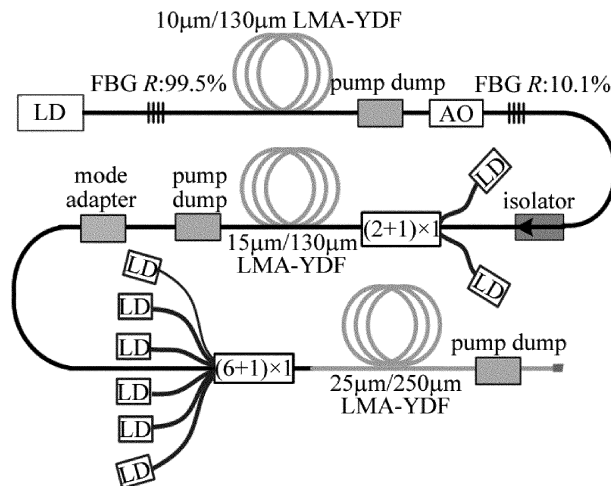


Fig. 1 Experimental setup of the pulsed fiber laser

fiber, LMA-YDF) 为增益介质,该光纤对 915nm 波长吸收系数为 1.35dB/m,在采用 915nm 波长 LD 抽运时光纤长度优化为约 10m。谐振腔中采用自制的功率剥除器泄露包层中剩余抽运光,避免剩余抽运光损坏声光 Q 开关。种子光通过 (2 + 1) × 1 光纤合束器的信号输入端耦合到第一放大级。第一放大级采用的 15μm/130μm 大模场掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤为增益介质,长度优化为约 8m。第 1 级放大器通过自制的功率剥除器泄露包层中剩余抽运光后,注入到第二放大级。第二放大级信号与抽运光输入采用 (6 + 1) × 1 光纤合束器,合束器信号输入端光纤为 25μm/250μm,与第一放大级输出光纤不匹配。为了不影响注入光束的光束质量和功率稳定性,在 (6 + 1) × 1 合束器前端接入了 15μm/130μm 光纤到 25μm/250μm 光纤的模场匹配器。第 2 级放大器采用 25μm/250μm 大模场掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤为增益介质,长度优化为 7m。第二放大级激光通过功率剥除器滤除剩余抽运光后输出,输出端切 8° 斜角。实验中均采用 915nm 波长大功率激光二极管 (laser diode, LD) 为抽运源。相比于 976nm 波长抽运,掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤对 915nm 波段的吸收谱线更宽。因此在不采用精确温控的情况下,光纤激光器的输出功率不易受到抽运 LD 波长随温度漂移的影响,输出功率稳定性更高。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 振荡级脉冲种子光输出

实验中以 915nm 波长 LD 为抽运源,研究振荡级在不同输入抽运功率和重复频率下的输出特性。图 2 为抽运功率分别为 8.3W 和 9.7W 时不同重复频率的激光输出特性曲线。从图中可知同一重复频率时激光输出功率随着抽运功率的增加而增大,当抽运功率一定时,激光平均输出功率随着脉冲重复频率的增加而逐渐减小,这是因为随着重复频率的增加,声光 Q 开关工作周期变短,在抽运功率不变的情况下腔内光子在一个声光 Q 开关周期内积累的数量变少。

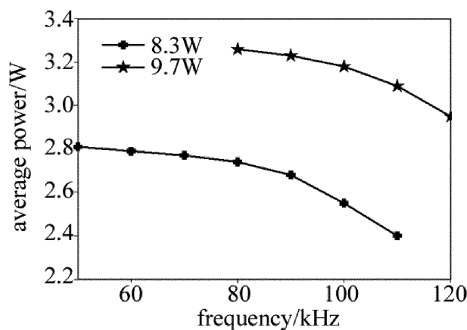


Fig. 2 Average output power vs. repetition rate at different pump power

当抽运功率为 9.7W、重复频率为 120kHz 时,实

现了平均功率 2.95W、脉冲宽度 264ns、3dB 光谱宽度 0.32nm、中心波长 1064.96nm 的振荡级激光输出。图 3a 和图 3b 中分别为振荡级激光输出的脉冲波形和光谱。从图 3a 可知,振荡级输出的调 Q 脉冲波形不光滑。输出脉冲宽度可以通过缩短振荡级腔长减小,但是由于振荡级使用的声光 Q 开关上升时间大于 100ns,缩短腔长对减小脉冲宽度的效果有限,并且减小增益光纤的长度会导致输出功率的下降,因此在振荡级实验中最后采用了 264ns 脉冲宽度。

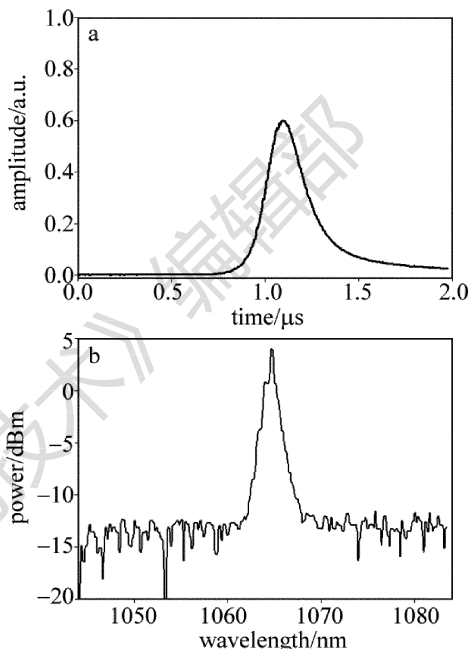


Fig. 3 Pulse shape and optical spectrum of oscillator  
a—pulse shape b—output optical spectrum

#### 3.2 第一放大级激光输出

以振荡级输出的重频 120kHz、脉宽 264ns、平均功率 2.95W 的脉冲激光为第一放大级的种子光。没有抽运光注入时,直接通过第一放大级的平均功率为 2.4W。一级放大后的激光输出功率与抽运功率的关系如图 4 所示。从图 4 可知,激光输出功率与抽运注入功率呈线性关系,未出现饱和现象,继续增加抽运注入功率,激光输出功率将会进一步增大。当抽运注入功率为 34.4W 时激光输出平均功率为 24.1W。图 5

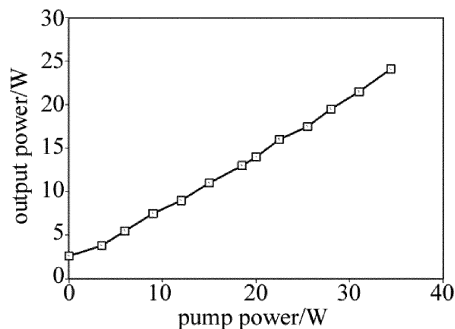


Fig. 4 Average output power vs. pump power of the first amplifier

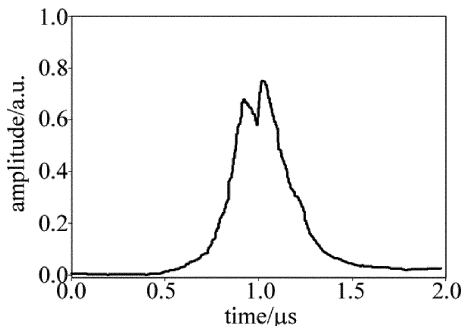


Fig. 5 Pulse shape of the first amplifier

为第一放大级输出的脉冲波形。在逐渐增加抽运功率的过程中,发现输出激光脉冲的下降沿率先变得平滑而后上升沿会出现小的突起或尖刺,整个放大过程中脉冲先被压窄而后被展宽,这是在放大过程中脉冲的下降沿被压缩而上升沿被展宽的综合效应与种子光脉冲不平滑共同作用的结果。

### 3.3 第二放大级激光输出

第二放大级没有抽运光注入时,直接输出的平均功率为 19.8W。第二放大级激光输出功率与抽运功率的关系如图 6 所示。从图 6 可知,激光输出功率与抽运注入功率呈线性关系,并未出现饱和。第 2 级放大器注入抽运功率为 117W 时,放大激光平均输出功率为 101W,相应的光光转换效率达 69%,光纤激光器总的光光转换效率达 62.7%。

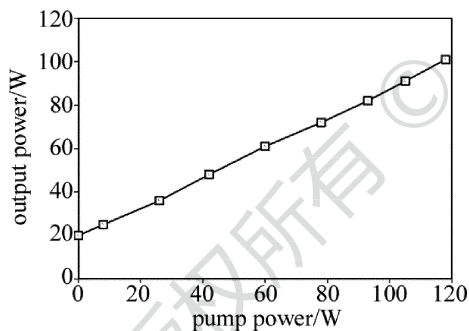


Fig. 6 Average output power vs. pump input power of the second amplifier

激光器采用风冷的温控方式,增益光纤缠绕后紧贴金属板,抽运 LD 涂抹导热脂后固定在热沉上,在这样的条件下激光器工作 2s 后输出趋于稳定,8h 监测,测量激光器长期功率稳定性优于 2%。用光束质量仪测量输出激光的光束质量为 1.6。

在输出激光功率为 101W、重复频率 120kHz 时,测量脉冲宽度约为 328.1ns。使用光谱仪测量输出脉冲激光光谱,输出激光中心波长 1064.9nm,光谱宽度为 0.6nm。激光输出脉冲波形和光谱如图 7 所示。

在增大抽运功率的过程中发现,激光脉冲波形在上升沿一侧逐渐出现凸起,并随着输出功率的增大而变得尖锐。继续增加抽运功率,输出脉冲波形出现多

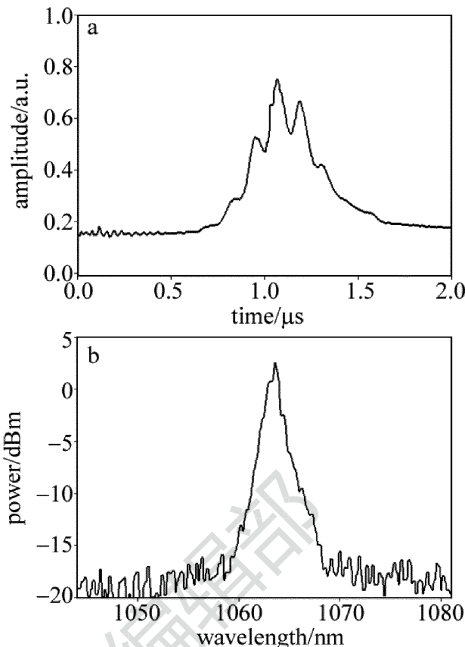


Fig. 7 Pulse shape and optical spectrum of laser output

a—pulse shape b—output optical spectrum

个尖锐波峰,如图 7a 所示。上述现象与第一放大级的输出脉冲波形变化情况相同,只是由于注入抽运功率远大于第一放大级,导致输出脉冲波形上升沿的变化更加明显。这是由于注入的调 Q 脉冲波形不平滑,而且在未饱和放大前提下,随着抽运功率的增大,放大级增益光纤内储能增加,种子光脉冲通过放大级时上升沿首先被放大,上能级粒子数因为被消耗而迅速减少,随后又会因抽运的抽运而快速增多,准备参与下一次的放大,并且抽运功率越大,上能级粒子数增加得越快。种子脉冲上升沿越宽越不平滑,脉冲在放大过程中出现的波峰个数将会越多。

## 4 结 论

设计了全光纤结构的风冷脉冲光纤激光器装置,振荡级采用声光调 Q 方案,输出激光脉冲重复频率 10kHz 到 130kHz 可调。以 120kHz 重复频率、脉冲宽度 264ns、平均功率 2.95W 的振荡级输出为种子光,经过两级正向抽运放大后获得了功率为 101W、脉冲宽度为 328.1ns、光谱宽度为 0.6nm 的激光输出。光纤激光器总的光光转换效率达 62.7%,光束质量为 1.6,8h 内监测输出功率稳定性小于 2%。

### 参 考 文 献

- [1] SUN H, WEI K H, QIAN K, *et al.* Gain switched all-fiberized pulse Yb fiber laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(1): 43-47 (in Chinese).
- [2] LARSEN C, GIESBERTS M, NYGA S, *et al.* Q-switched all-fiber laser with narrow bandwidth[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 12302.

- [3] OFFERHAUS H L, ALVAREZ-CHAVEZ J A, NILSSON J. Multi-mJ, multi-watt *Q*-switched fiber laser[C]//Lasers and Electro-Optics Conference. New York, USA; IEEE, 1999: 834-836.
- [4] LIMPET J, HOFER S, LIEM A, *et al.* 100W average-power, high-energy nanosecond fiber amplifier[J]. Applied Physics, 2002, B75(4): 477-479.
- [5] LECOURT J B, BERTRAND A, HERNANDEZ Y, *et al.* Short pulse and high repetition rate actively *Q*-switched all-in-fiber laser[J]. Electronics Letters, 2010, 46(5): 365-367.
- [6] KONG L F, LOU Q H, ZHOU J, *et al.* 133W pulsed fiber amplifier with large-mode-area fiber[J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2006, 45(1): 010502.
- [7] FENG Y T, DU S T, YANG Y, *et al.* All-fiber MOPA laser based on LD pulse modulation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(8): 1932-1936 (in Chinese).
- [8] FENG Y T, WANG X F, ZHU Ch, *et al.* Experiment research of 100W, all-fiber acousto-optic *Q*-switched fiber laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1444-1448 (in Chinese).
- [9] ZHANG H W, WANG X L, ZHOU P, *et al.* 6mJ, high-average-power, all-fiberized *Q*-switched fiber master oscillator power amplifier with low repetition rate[J]. Applied Optics, 2012, 51(29): 6933-6936.
- [10] WANG L X, CAI J, JIANG P P, *et al.* All fiberized high power linear polarized pulsed ytterbium-doped fiber laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(2): 350-354 (in Chinese).
- [11] LAN X J. Laser technology [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2005: 108-114 (in Chinese).
- [12] RAE S, BENNION I, CARDWELL M J. New numerical model of stimulated Brillouin scattering in optical fibers with nonuniformity[J]. Optics Communications, 1996, 12(3): 611-616.
- [13] CHEN C J, WAI P K A, MENYUK C R. Stability of passively mode-locked fiber lasers with fast saturable absorption[J]. Optics Letters, 1994, 19(3): 198-200.