

基于单模光纤的锁模再生放大器

黄莉莉¹ Logan Wright² 胡明列¹ Frank Wise² 王清月¹

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

²康奈尔大学应用与工程物理学院, 伊萨卡 14853, 美国

摘要 对基于单模光纤的锁模再生放大器(即基于脉冲起振的耗散孤子锁模激光器)的动力学过程进行数值模拟, 分析了输出脉冲能量、时域宽度、光谱宽度随入射脉冲在腔内循环次数增加的演化过程。实验中通过插入电光调制器使振荡腔从脉冲起振, 阐述了该电光调制器选取脉冲的工作时序, 实现了入射脉冲在腔内稳定循环 13 次; 同时, 在固定入射脉冲腔内循环 2 次的前提下, 分析了抽运功率对输出光谱的影响, 最终输出单脉冲能量为 20 nJ, 光谱宽度约为 60 nm 的脉冲。此外, 还分析了基于单模光纤的锁模再生放大器输出脉冲能量增长受限的原因。

关键词 激光器; 耗散孤子; 超短脉冲; 电光调制器

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0801007

Mode-Locked Regenerative Amplifier Based on Single Mode Fiber

Huang Lili¹ Logan Wright² Hu Minglie¹ Frank Wise² Wang Qingyue¹

¹Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology Ministry of Education,

School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

²School of Applied and Engineering Physics, Cornell University, Ithaca 14853, USA

Abstract The dynamic evolution of the mode-locked regenerative amplifier based on single mode fiber, which is also called pulse-based start-up dissipative soliton mode-locked laser, is numerically simulated, and the evolutions of the pulse energy, pulse duration, and spectral bandwidth versus the cycling number of the incident pulse in the cavity are analyzed. By using an electro-optic modulator in the cavity, the input pulses can be successfully injected into the cavity for circulation. With the demonstration of the timing sequence of the modulator, the laser runs steadily for 13 roundtrip. Meanwhile, when the circulation roundtrip is fixed at 2, the influence of the pump power on the output spectrum is investigated. The final output laser pulse has a spectral bandwidth of 60 nm and single-shot pulse energy of 20 nJ. Besides, the reason that the output pulse energy is limited in the mode-locked regenerative amplifier based on a single mode fiber is also analyzed.

Key words lasers; dissipative soliton; ultrashort pulse; electro-optic modulator

OCIS codes 140.3538; 140.4050; 140.7090; 140.3510

1 引 言

飞秒激光技术具有峰值功率高、脉冲时间短、光谱范围宽等优点,在光化学^[1]、微纳加工^[2-4]、太赫兹^[5]、精密测量^[6]以及超连续谱的制备^[7]等领域具有不可替代的作用。光纤锁模激光器由于光束是在细长的光纤中传输的,所以具有良好的散热性、优异的环境稳定性和接近衍射极限的光束质量等优点,从而成为研究的热点之一。但是光被束缚在模场直径为几微米的纤芯中,较高的峰值功率使其受到非线性效应的影响,优化

收稿日期: 2016-03-01; **收到修改稿日期:** 2016-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(61322502,61535009,11274239)、教育部创新团队发展计划(IRT13033)、强场激光物理国家重点实验室开放基金、天津市应用基础与前沿技术研究计划(13JCQNJ01400)

作者简介: 黄莉莉(1989—),女,博士研究生,主要从事高功率光纤飞秒激光器方面的研究。E-mail: huanglili@tju.edu.cn

导师简介: 胡明列(1978—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事超短脉冲激光及放大系统和非线性效应方面的研究。

E-mail: huminglie@tju.edu.cn(通信联系人)

光纤锁模激光器动力学过程是控制非线性效应的有效途径之一。目前,激光器中脉冲成型机制主要有孤子锁模^[8-9],呼吸孤子锁模^[10],被动自相似锁模^[11],主动自相似锁模^[12-13]和耗散孤子锁模^[14]。耗散孤子锁模相对于其他脉冲成型机制而言,腔内能够承受的非线性相移达到 10π ,可支持较高的单脉冲能量输出。其中基于传统单模光纤的耗散孤子锁模激光器,其单脉冲能量最高输出为 20 nJ^[15],利用大模场面积光子晶体光纤能够将其单脉冲能量提高至 867 nJ^[16]。通过数值模拟计算发现,在一定的参数条件下,从脉冲起振的单模光纤耗散孤子锁模振荡腔可以输出单脉冲能量为 80 nJ 的脉冲,传统的耗散孤子锁模利用非线性偏振旋转进行锁模,从噪声中提取脉冲,通过调节波片实现锁模的建立。本文提出基于单模光纤搭建耗散孤子锁模振荡腔的方案,利用固体激光器中再生放大技术^[17]实现激光器从脉冲起振,即在腔内加入电光调制器件,将入射脉冲引入到耗散孤子锁模的振荡腔中,进而实现脉冲在腔内的循环运转。通过调节电光调制器驱动设备的计数器,研究了再生放大器循环次数对脉冲在腔内振荡的影响,并分析了抽运功率对输出脉冲的影响。

2 数值模拟

基于耗散孤子锁模振荡器建立数值模型,利用非线性薛定谔方程模拟脉冲在光纤中的色散和非线性过程。模拟的腔内器件主要包含两段单模光纤、掺镱(Yb³⁺)的增益光纤、输出耦合器,可饱和吸收体和双折射滤波器。不同于一般激光腔模拟从白噪声起振的设定,本次激光器模拟设定为从脉冲起振,给定一个高斯脉冲,使其逐一通过所有器件,这个过程可视为一个腔内循环。图 1 所示为一组典型的从脉冲起振的耗散孤子锁模的腔内动力学过程,其中种子脉冲半峰全宽为 100 fs,无啁啾高斯脉冲能量为 0.01 nJ,腔内第一段单模光纤是长为 100 cm、纤芯直径为 6 μm 的传统单模光纤,第二段光纤是长为 50 cm、纤芯直径为 7 μm 的掺 Yb³⁺ 单模增益光纤,第三段光纤是 50 cm 长的单模光纤,增益光纤饱和能量为 24 nJ,双折射滤波器的带宽为 40 nm,增益带宽为 40 nm,80% 的腔内脉冲能量通过输出耦合器输出,脉冲在腔内损耗为自身能量的 40%。由图 1 可知,种子脉冲在腔内循环 5~6 次后趋于稳定,无论是时域还是谱域,输出光谱的宽度和形状都不再发生变化。输出光谱具有陡峭的两沿,属于典型的耗散孤子锁模机制输出的光谱形状。图 2 所示为输出脉冲的各项参数随腔内循环次数的变化情况,稳定输出的单脉冲能量高达 80 nJ,光谱均方根宽度接近 40 nm,对应的变换极限的脉冲约为 50 fs。

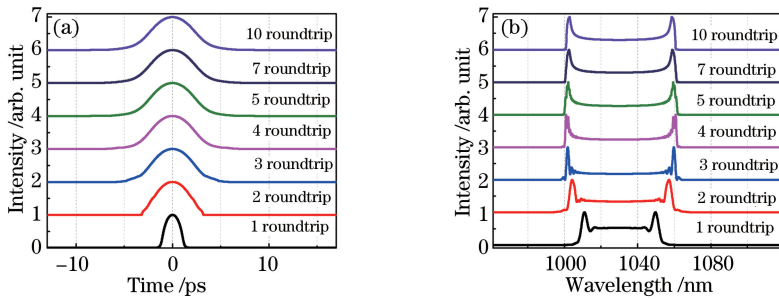


图 1 从脉冲起振的耗散孤子锁模振荡腔输出脉冲随着腔内循环次数的变化。(a)时域; (b)谱域

Fig. 1 Output pulse of dissipative soliton mode-locked oscillation cavity starting from pulse injection versus number of roundtrip. (a) Time domain; (b) spectral domain

3 实验装置及原理

3.1 实验装置

再生放大器实验装置如图 3 所示,主要包含种子源(OSC)、脉冲压缩装置(光栅对)、掺镱双包层单模光纤(Yb DC Fiber)振荡腔、电光调制器(EOM)及其驱动设备,其中 HWP 为二分之一波片,BF 为双折射滤波器,HR 为高反镜。种子源输出脉冲的重复频率为 44 MHz,中心波长在 1050 nm 附近,输出脉冲通过隔离器(ISO)之后用 1000 lp/mm 的透射光栅对进行压缩,压缩后的脉冲宽度为 135 fs,种子源脉冲的平均功率为 33 mW,单脉冲能量为 0.75 nJ。在种子源脉冲通过光栅对之前,插入一个楔片反射出部分脉冲光并耦合入光电探测器中,并将转换后的电信号接入电光调制器的驱动设备中。利用偏振分束器 PBS 2、PBS 3 和

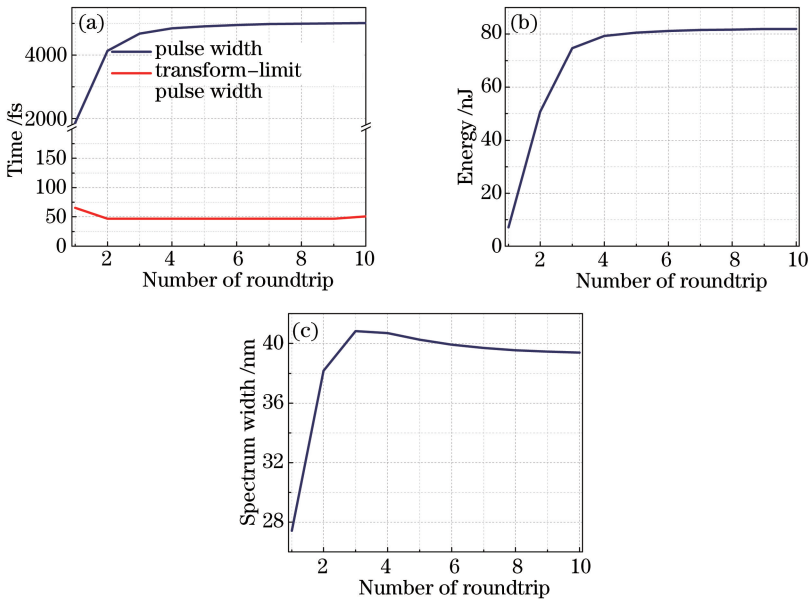


图 2 输出脉冲随着循环次数的变化曲线。(a)脉冲宽度；(b)单脉冲能量；(c)输出光谱宽度

Fig. 2 Output pulse versus number of roundtrip. (a) Pulse duration; (b) single pulse energy; (c) output spectrum width

EOM 将压缩后的种子源脉冲导入耗散孤子锁模振荡腔内,该振荡腔主要由两段长度为 50 cm 的单模光纤 (SMF)和一段长度为 3 m 的双包层单模增益光纤组成,增益光纤纤芯直径为 $7 \mu\text{m}$ 。振荡腔抽运源是波长为 976 nm 的半导体激光器,通过合束器反向抽运增益光纤,增益光纤在 976 nm 处的抽运吸收系数为 7.8 dB/m。利用隔离器确保光在环形腔中单向运转,利用准直器实现光在空间和光纤中的相互转换,将隔离器和四分之一波片(QWP)之后的准直器安装在可位移平台上,通过调节位移平台来调整耗散孤子锁模振荡腔的重复频率,使得整个腔的重复频率与种子脉冲的重复频率大致相同,从而保证 EOM 正常工作。

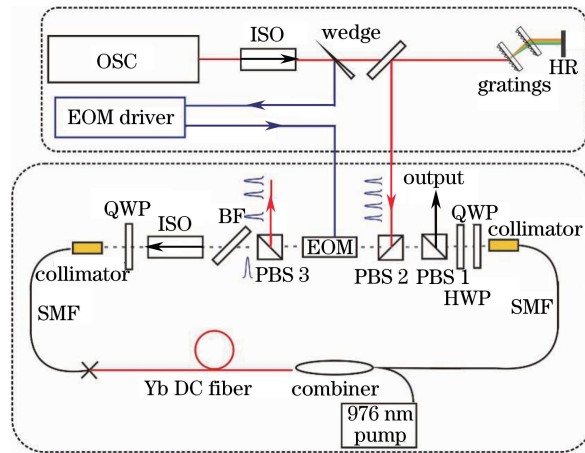


图 3 基于光纤的再生放大器实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of regenerative amplifier based on fibers

3.2 工作时序

通过电光调制器 EOM 和偏振分束器 PBS 2、PBS 3 将脉冲导入到耗散孤子锁模振荡腔中。拆去 EOM 两端自带的格兰棱镜,则 EOM 的作用相当于普克尔盒(Pockel cell),根据驱动电信号状态决定是否改变入射光的偏振状态。楔片导出的脉冲序列经过光电探测器之后转化成电信号,该电信号为 EOM 驱动的时钟信号,驱动器中的计数器可以设置导入的入射脉冲的重复频率,如果设置计数器为 N ,则表示从每 $N+1$ 个入射脉冲序列中选择一个脉冲导入到振荡腔内。种子脉冲序列如图 4(a)所示,该脉冲为垂直偏振的线偏光。设置计数器为 2,则驱动器输出给 EOM 加压装置的晶体管-晶体管逻辑电平(TTL)信号,如图 4(b)所示。当 A 脉冲经过 PBS 2 入射至 EOM 时,EOM 收到的 TTL 信号处于高电平,EOM 将入射光偏振状态改

变为水平偏振,通过 PBS 3 进入振荡腔内循环。当下一个入射脉冲 B 来临时,EOM 收到的 TTL 信号处于低电平,不改变入射脉冲的偏振状态,所以入射脉冲 B 保持垂直的偏振状态通过 EOM 并从 PBS 3 输出腔外。此时脉冲 A 在腔内循环一次后保持水平偏振状态通过 EOM,在腔内开始第二个循环。脉冲 C 重复和脉冲 B 一样的过程,保持原有偏振态通过 EOM 并从 PBS 3 输出。当脉冲 D 入射时,EOM 收到的 TTL 信号为高电平,改变入射脉冲的偏振状态,则脉冲 D 从垂直偏振变为水平偏振之后进入振荡腔内,A 在腔内循环三次后,被 EOM 从水平偏振改成垂直偏振通过 PBS3 导出腔外。根据以上描述,被选入腔内进行振荡的脉冲序列如图 4(c)所示,没有导入腔内的脉冲如图 4(d)所示。

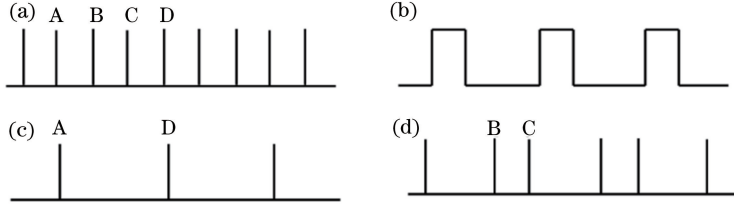


图 4 入射脉冲导入和导出耗散孤子锁模振荡腔的时序图。(a)种子源脉冲序列;(b)经过计数器后的驱动 EOM 的 TTL 信号;(c)被 EOM 选出导入耗散孤子锁模振荡腔的脉冲序列;(d)从 PBS 3 输出的未被导入的脉冲序列

Fig. 4 Time sequence of the incident pulse importing into and exporting from dissipative soliton mode-locked oscillation cavity. (a) Seed pulse sequence; (b) TTL signal for driving EOM after counter; (c) pulse sequence picked by EOM to import into dissipative soliton mode-locked oscillation cavity; (d) pulse sequence exported from PBS 3 which is not imported

4 实验结果及分析

由于所使用的振荡腔是典型的非线性偏振旋转锁模,所以能量可以从 PBS 1 耦合输出,设置计数器为 2,图 5 所示为从 PBS 1 处测得的输出脉冲序列,可以观测到脉冲每经过一次腔内循环输出能量就会增加一次。

在抽运功率为 1.5 W 的情况下,设置计数器为 1,调节波片锁模,锁模状态可以稳定维持 1~2 个月,且在轻微震动的条件下依然可以维持稳定,振荡腔对环境温度的敏感性与无电光调制器件的耗散孤子锁模激光器相同。增加计数器数值,同时保持波片位置不变,脉冲经过循环之后输出的光谱如图 6 所示。在保证振荡腔稳定运转的前提下,每一个入射脉冲可在腔内最多循环 13 次,循环次数大于 13 次,则无法获得稳定的锁模脉冲输出。

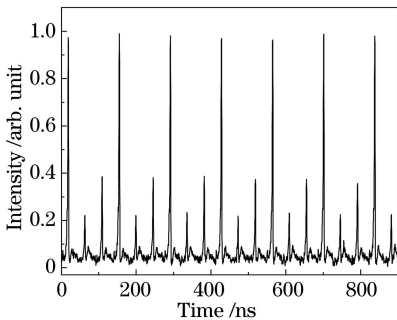


图 5 入射脉冲在振荡腔内循环三次后在 PBS 1 处测得的输出脉冲序列

Fig. 5 Output pulse sequence measured at PBS 1 after three roundtrip of circulation for the input pulse in oscillation cavity

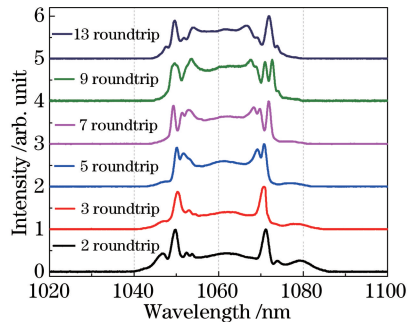


图 6 当抽运功率为 1.5 W 时从 PBS 1 输出的光谱随着脉冲循环次数的变化

Fig. 6 Spectra exported from PBS 1 versus number of roundtrip at pump power of 1.5 W

保持脉冲腔内循环次数 2 不变,图 7 所示为输出光谱随抽运功率的变化过程。光谱随着抽运功率的增加不断展宽。当抽运功率为 0.822 W 时,输出光谱半峰全宽约为 38 nm,单脉冲能量约为 2.5 nJ。随着脉冲抽运功率的不断加,脉冲输出光谱的半峰全宽也不断增加。在抽运功率为 4.4 W 时,输出脉冲光谱的半峰

全宽约为 60 nm,输出的单脉冲能量约为 20 nJ,脉冲宽度为 65 fs。当抽运功率增加到 5.2 W 时,光谱在 1062 nm 波长附近出现尖峰,调节波片无法消除该尖峰,因此输出能量无法得到进一步提升。这是因为在连续光抽运的条件下,上能级粒子数始终处于反转状态,同时由于再生放大腔本身存在腔结构,即使有脉冲注入振荡腔内成为主脉冲振荡,在抽运功率增加到一定数值时,上能级剩余的反转粒子数依然能够提供足够的增益使得光谱上出现尖峰或者腔内存在子脉冲振荡(时域上可以观测到子脉冲),子脉冲的存在会影响输出主脉冲的性能。在增益足够高时,子脉冲的能量会随着抽运功率的增加而增加,同时子脉冲个数也会增加,这使得主脉冲的能量无法进一步得到提升。因此,虽然在数值模拟中从脉冲起振的耗散孤子锁模激光器能够获得较高的单脉冲能量,但是在实际实验中由于子脉冲的影响基于单模光纤的再生放大器的输出单脉冲最多可获得 20 nJ 的能量。虽然增加入射脉冲的平均功率可以在一定程度上提高子脉冲的抽运功率阈值,但是无法从根本上解决该问题。

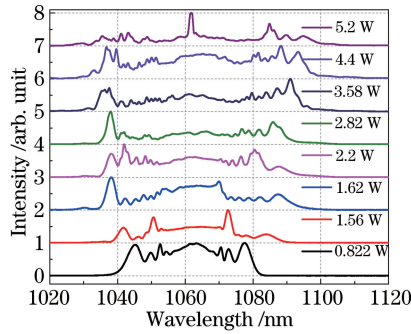


图 7 脉冲循环两次后,PBS 1 处输出的光谱随脉冲抽运功率的变化

Fig. 7 Spectra exported from PBS 1 versus pump power at two roundtrips

5 结 论

利用电光调制器搭建了从脉冲起振的耗散孤子锁模振荡腔,阐述了利用电光调制器件实现脉冲导入的工作原理,实现了当抽运功率为 1.5 W 时最多 13 次循环的稳定运转。在固定入射脉冲腔内循环次数为 2 的条件下,分析了光谱宽度随抽运功率增加而展宽的过程,最终获得能量约为 20 nJ、光谱宽度约为 60 nm 的脉冲,同时分析了再生放大器的单脉冲能量受限于腔内子脉冲的过程。进一步利用脉冲抽运源,并结合更加理想的饱和吸收体来增加子脉冲在腔内的损耗,从而抑制子脉冲在腔内的振荡,最终使得基于单模光纤的再生放大器能够输出更高单脉冲能量。

致谢 感谢刘占伟同学与作者的有益讨论及对论文的帮助。

参 考 文 献

- 1 Pedersen S, Herek J L, Zewail A H. The validity of the "diradical" hypothesis: Direct femtosecond studies of the transition state structures[J]. Science, 1994, 266(5189): 1359-1364.
- 2 Long Xuewen, Bai Jing, Liu Xin, *et al.* Inscription of waveguides in terbium gallium garnet using femtosecond laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0432002.
龙学文, 白晶, 刘欣, 等. 飞秒激光在铽镓石榴石中的光刻光波导[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0432002.
- 3 Wang Jixiang, Ran Lingling, Kong Degui, *et al.* Microstructures on the surface of Si induced by femtosecond laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s114002.
王积翔, 冉玲玲, 孔德贵, 等. 飞秒激光在硅表面诱导微结构[J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s114002.
- 4 Chen Chao, Yang Xianhui, Wang Chuang, *et al.* High-order tilted fiber Bragg gratings carved with femtosecond laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0506001.
陈超, 杨先辉, 王闯, 等. 飞秒激光刻写高阶倾斜光纤 Bragg 光栅[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0506001.
- 5 Li J, Chai L, Shi J, *et al.* Efficient terahertz wave generation from GaP crystals pumped by chirp-controlled pulses from femtosecond photonic crystal fiber amplifier[J]. Appl Phys Lett, 2014, 104(3): 031117.

- 6 Holzwarth R, Zimmermann M, Udem T, *et al.* Optical clockworks and the measurement of laser frequencies with a mode-locked frequency comb[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(12): 1493-1501.
- 7 Li Pan, Shi Lei, Wang Xuefeng, *et al.* Experimental investigation of the supercontinuum generated by amplified high repetition mode-locked pulses[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s2): s214006.
李 磐, 时 雷, 王学锋, 等. 基于高重复频率锁模脉冲放大产生超连续谱的实验研究[J]. 光学学报, 2015, 35(s2): s214006.
- 8 Mollenauer L F, Stolen R H. The soliton laser[J]. Opt Lett, 1984, 9(1): 13-15.
- 9 Nelson L E, Jones D J, Tamura K, *et al.* Ultrashort-pulse fiber ring lasers[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 1997, 65(2): 277-294.
- 10 Tamura K, Ippen E P, Haus H A, *et al.* 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser [J]. Opt Lett, 1993, 18(13): 1080-1082.
- 11 Ilday FÖ, Buckley J R, Clark W G, *et al.* Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser[J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(21): 213902.
- 12 Renninger W H, Chong A, Wise F W. Amplifier similaritons in a dispersion-mapped fiber laser[J]. Opt Express, 2011, 19(23): 22496-22501.
- 13 Oktem B, Ülgüdür C, Ilday F Ö. Soliton-similariton fibre laser[J]. Nature Photon, 2010, 4(5): 307-311.
- 14 Chong A, Buckley J, Renninger W, *et al.* All-normal-dispersion femtosecond fiber laser[J]. Opt Express, 2006, 14(21): 10095-10100.
- 15 Chong A, Renninger W H, Wise F W. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser with pulse energy above 20 nJ[J]. Opt Lett, 2007, 32(16): 2408-2410.
- 16 Baumgartl M, Lecaplain C, Hideur A, *et al.* 66 W average power from a microjoule-class sub-100 fs fiber oscillator[J]. Opt Lett, 2012, 37(10): 1640-1642.
- 17 Huang Yutao, Fan Zhongwei, Niu Gang, *et al.* 100 kHz repetition rate picosecond regenerative amplifier with high pulse stability[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502009.
黄玉涛, 樊仲维, 牛 岗, 等. 高脉冲稳定性的 100 kHz 皮秒再生放大器[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502009.