

长下降沿时间的 KD*P 泡克耳斯盒驱动电源对全固态腔倒空激光器输出特性的影响

王小发^{1,2,3} 樊仲维^{1,3} 余锦¹ 石朝晖³ 黄科^{1,2,3} 黄玉涛^{1,2,3} 连富强^{1,2,3}

¹中国科学院光电研究院, 北京 100094
²中国科学院研究生院, 北京 100049
³北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100192

摘要 设计了一种脉冲激光二极管抽运的低重复频率全固态腔倒空激光器,为了尽可能减小损耗的影响,在腔内采用双薄膜偏振片结构,使反射率较高的垂直方向线偏振光在腔内振荡。以此装置为基础,就泡克耳斯盒驱动电源较长的下降沿时间对全固态腔倒空激光器输出特性的影响进行了实验研究。结果表明当泡克耳斯盒驱动电源的下降沿时间远大于腔内的一次往返时间时,激光器输出特性会发生明显地变化:增大电流强度会导致脉冲宽度增大,脉冲能量经历先增大后减少的过程;增大泡克耳斯盒驱动电源的开门时间,也会导致脉冲宽度和能量发生类似的变化。

关键词 激光器;KD*P 泡克耳斯盒;长下降沿时间;脉冲抽运;全固态腔倒空激光器;稳健性
中图分类号 O432.1+2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s102006

Influence of the Long Fall Time of KD*P Pockels Cell on Output Characteristics of Solid-State Cavity-Dumped Laser

Wang Xiaofa^{1,2,3} Fan Zhongwei^{1,3} Yu Jin¹ Shi Zhaohui³ Huang Ke^{1,2,3}
Huang Yutao^{1,2,3} Lian Fuqiang^{1,2,3}

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³Beijing Guoke Laser Technology Co., Ltd, Beijing 100192, China

Abstract A low-repetition-rate pulsed LD-pumped cavity-dumped solid-state lasers are designed, in order to minimize the influence of losses, two thin film polarizer are used in the cavity, so that the higher reflectivity of vertical vibration of linearly polarized light is retained in the cavity. Based on this device, The influence of the longer fall time of Pockels cell driving power influence on solid-state cavity-dumped lasers has been studied experimentally. The results show that when the fall time of Pockels cell driving power is longer than a round-trip time in the cavity, some significant changes will occur in the output characteristics of the laser, with the increase of current intensity, the pulse width will increase, and the pulse energy increases first and then decreases; with the increase of the gating time of Pockels cell power, some similar changes will occur on the pulse width and the pulse energy.

Key words lasers; KD*P Pockels cell; long fall time; pulse pump; all solid-state cavity-dumped laser; robustness
OCIS codes 140.3540; 140.3538; 140.4780; 140.3430

1 引言

激光器腔倒空技术是指利用快速光开关,使能

量以光场的形式在激光谐振腔内积聚,再利用快速光开关使激光腔的耦合输出由 0 变化到 100%,把

收稿日期: 2011-07-20; 收到修改稿日期: 2011-08-25

基金项目: 国家 863 计划(2009AA034701)和北京海淀区重大科技成果转化和产业化项目资助课题。

作者简介: 王小发(1979—),男,博士研究生,主要从事工业激光器方面的研究。E-mail: bluebaby0614@126.com

导师简介: 樊仲维(1965—),男,博士,研究员,主要从事全固态激光器方面的研究。

E-mail: fanzw002@163.com(通信联系人)

能量瞬间倒出,从而实现高能量、窄脉宽的激光输出^[1~10]。该技术已经在主振荡-功率放大器、削波技术^[11,12]、工业激光器、光通信、超快激光^[13,14]和再生腔^[15,16]等领域得到广泛应用。

电光倒空器作为全固态腔倒空激光器的关键部件,对其参数要求非常严格,一般使用泡克耳斯盒作为倒空器,合适的晶体有KD*P, RTP, KTP和铌酸锂晶体等。泡克耳斯盒驱动电源的下降沿时间是个重要的参量,决定了其开关的速度,在以往报道中认为,当泡克耳斯盒驱动电源的下降沿时间小于腔内的往返时间时,输出激光的脉冲宽度由腔内一次往返时间决定,当其大于腔内的一次往返时间时,激光器输出的脉冲宽度完全由泡克耳斯盒驱动电源的下降沿时间决定^[2]。本文基于KD*P泡克耳斯盒驱动电源,对脉冲抽运的全固态腔倒空激光器的进行了实验研究,得出了一些与以往报道不同的结果,并对此做出了合理的解释。该研究结果有助于优化全固态腔倒空激光器的输出特性,提高泡克耳斯盒驱动电源的稳健性。

2 实验装置

图1为实验装置简图。其中LD为自制的脉冲式半导体激光器模块,半导体制冷器制冷,温度控制在25℃左右,传输光纤内径为400 μm, M1和M2构成抽运光的耦合头,放大倍数为2, M3(对808 nm增透,对1064 nm高反射)为一端镜,增益介质为掺杂浓度为0.5%(原子数分数)的Nd:YAG晶体,尺寸为3 mm×3 mm×15 mm, TFP1和TFP2为薄膜偏振片, WP为λ/4波片, KD*P泡克耳斯盒为德

国 LINOS PHOTONICS 公司生产,横向加压,晶体长25 mm,直径为8 mm,四分之一波电压为3.4 kV,表面膜层的破坏阈值为4000 MW/cm², M4(对1064 nm高反射)为另一端镜, TFP2作为输出镜,整个激光器腔长为400 mm。

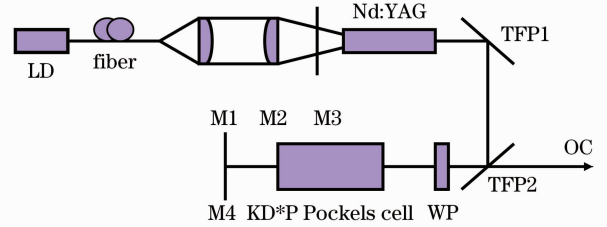


图1 脉冲激光二极管抽运全固态腔倒空激光器装置
Fig. 1 Pulsed LD-pumped solid-state cavity-dumped laser device

3 实验结果与讨论

3.1 脉冲抽运源

实验中腔倒空激光器所用的抽运源采用脉冲式半导体激光器,抽运周期为250 μs, 1 Hz重复频率运行时的占空比为1:4000,最高运行电流为250 A,最大输出能量为43.5 mJ,抽运光斑为近超高斯平顶分布,直径为0.79 mm,比设计的腔模直径0.76 mm略大,模式匹配较好。图2(a)为脉冲式LD的输出功率E随电流I变化的曲线,输出能量与电流基本呈线性变化。图2(b)为相纸上获得的抽运光的光斑图样,中心白色部分为有效光斑,与耦合头1:2的设计相符合。图2(c)为抽运光的波形图,在时间上为近超高斯平顶分布,半峰全宽(FWHM)约为244 μs,利用脉冲抽运能够提高抽运光的峰值功率,减少热效应等的不良影响。

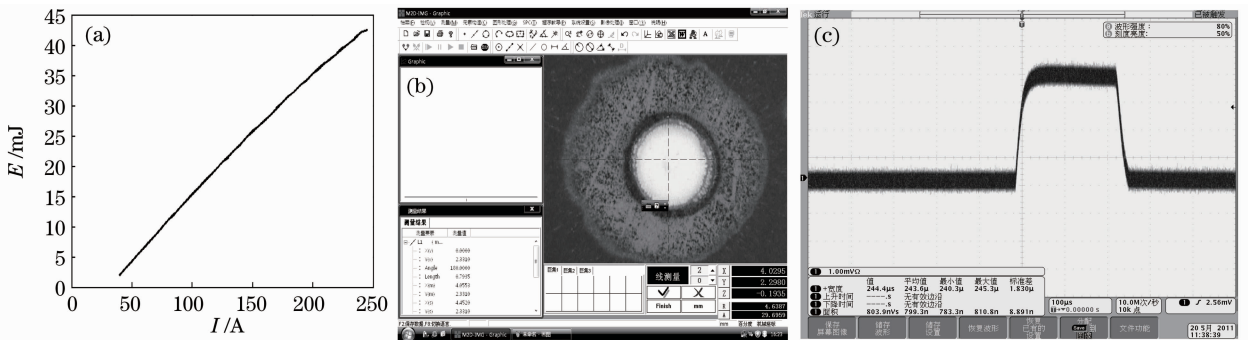


图2 脉冲抽运源的输出特性

Fig. 2 Output characteristics of pulsed pump source

3.2 KD*P泡克耳斯盒驱动电源的时序特性

由于抽运光是脉冲的,激光器要想运行,其他的时序信号必须与抽运脉冲的时序信号同步。泡克耳

斯盒驱动电源是自制的退压式电源,利用电信号的下降沿来实现开关控制,定义泡克耳斯盒驱动电源的下降沿时间为T,输出激光脉冲的FWHM用T₁

表示,自抽运脉冲开始到何时开始降压这一时间延迟用 D_1 表示,定义为有效抽运时间。泡克尔斯盒的开门时间用 D_2 表示,腔内的一次往返时间用 τ_1 表示($\tau_1 = 2L/c$, L 为激光器腔长, c 为光在真空中的光速),具体时序关系如图 3 所示。在图 3(a)中,抽运脉冲的波形上很尖锐的峰为输出激光的位置,这个位置之前的时间即为有效抽运时间 D_1 ,从这个位置开始,泡克尔斯盒驱动电源的两个电极电势的变

化规律以及激光输出情况如图 3(b)所示(所测图为感应笔测得,并非严格实际高压波形,但很接近),两个电极开始都处在高电势,其中一电极电势(黑线)直接降为参考值,而另一电极(灰线)会有一阶梯下降,然后持续一段时间开门时间 D_2 之后才降为零,阶梯状产生的原因是由于泡克尔斯盒本身的电容产生了一定的压降,中间脉冲即为输出的激光脉冲。

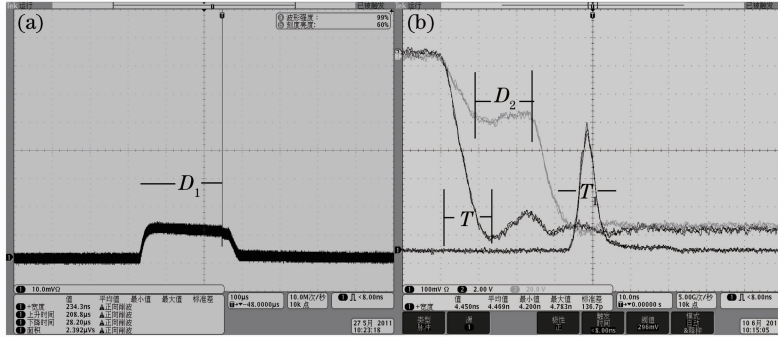


图 3 脉冲激光二极管抽运腔倒空激光器的时序关系图

Fig. 3 Timing diagram of pulsed LD pumped cavity-dumped laser

3.3 泡克尔斯盒驱动电源长的下降沿时间对腔倒空激光器输出特性的影响

众所周知,泡克尔斯盒驱动电源的下降沿时间小于腔内的往返时间时,腔倒空输出激光的脉冲宽度由 τ_1 决定,这时,改变电流强度及开门时间 D_2 ,使激光器运行在远离增益饱和和效应的状态下,脉冲

宽度等于腔内往返时间,并且不会因其他因素发生明显变化。但是,当泡克尔斯盒驱动电源的下降沿时间大于腔内往返时间时,情况变得较为复杂,选择下降沿时间 $T=12$ ns 的普克尔盒驱动电源作为研究对象,与腔内往返时间 τ_1 (约为 3 ns)相比,其值要大的多,假定在泡克尔斯盒两电极的电势差达到四

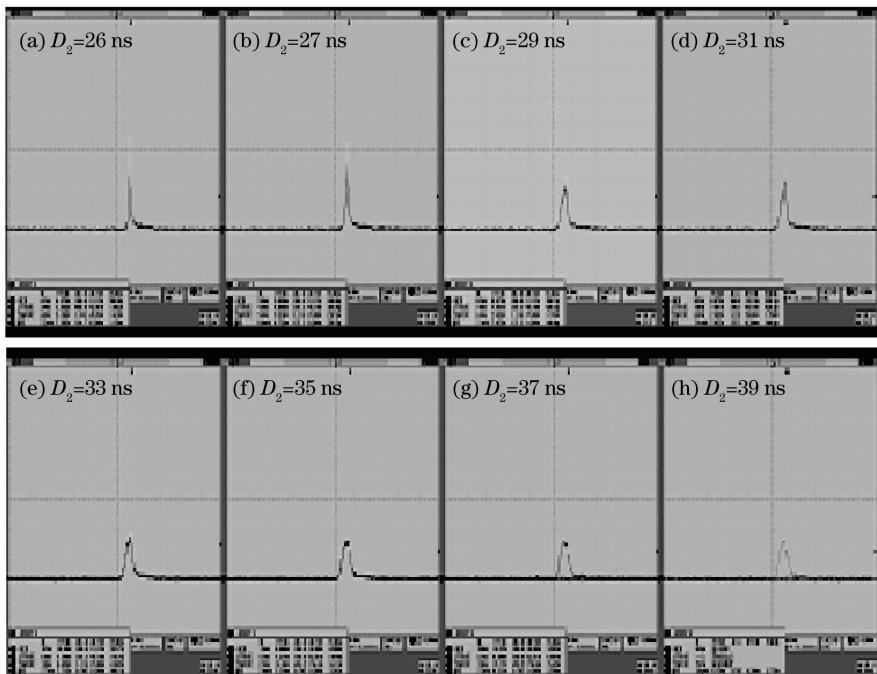


图 4 开门时间在 26~39 ns 之间变化时的脉冲波形

Fig. 4 Output pulse waveform of the laser with the gating time between 26 and 39 ns

分之一波电压时(实际情况是较为接近),分别考察电流强度和开门时间 D_2 的变化对腔倒空激光器输出特性的影响。

3.3.1 改变泡克尔斯盒的开门时间

当固定驱动电流 $I=184$ A,有效抽运时间 $D_1=230$ μ s 时,改变泡克尔斯盒的开门时间,腔倒空出来的脉冲宽度不是像以前报道的完全由泡克尔斯盒的下降沿时间决定,而是不断变化的。由图 4 可见,脉冲的波形处在不断地变化之中,幅值下降,宽度明显变化,先是前沿下降,再扩展到后沿。图 5 给出了泡克尔斯盒驱动电源的开门时间在 26~39 ns 之间变化时,脉冲能量和脉冲宽度随开门时间 D_2 的变化关系。由图 5 可知,脉冲能量(实线)随着开门时间的增加,开始呈线性增加,然后趋向饱和,之后慢慢下降。这是因为脉冲在腔内经历了增益饱和的过程,由于损耗的存在,之后脉冲能量会逐渐下降。脉冲宽度(虚线)由 4 ns 左右增加到 11.39 ns 左右,这个过程和以往报道是有差距的,以往报道认为,脉冲宽度完全是由泡克尔斯盒的下降沿时间决定。然而,从图 5 来看,脉冲宽度和增益介质有很大的联系,在接近增益饱和时,脉冲宽度变化剧烈,但是所有测得的脉冲宽度都小于泡克尔斯盒驱动电源的下降沿时间,因此泡克尔斯盒驱动电源下降沿时间决定了脉冲宽度的上限。所以,输出脉冲宽度是由增益介质和泡克尔斯盒驱动电源的下降沿时间共同决定的。

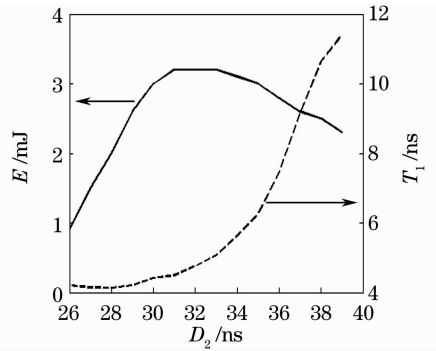


图 5 脉冲宽度和脉冲能量随着开门时间的变化规律

Fig. 5 Pulse width and pulse energy versus gating time

3.3.2 改变电流强度

固定开门时间 $D_2=26$ ns 和有效抽运时间 $D_1=230$ μ s,考察了电流强度对腔倒空激光器输出特性的影响。图 6 为不同电流强度下的输出波形图。随着电流强度的增加,脉冲幅度逐渐下降,脉冲宽度也逐渐变大,脉冲形状逐渐变复杂,规律和改变泡克尔斯盒开门时间 D_2 的过程非常相似。图 7 为脉冲宽度和脉冲能量随着电流强度的变化关系图。脉冲宽度(虚线)不断增加,脉冲能量(实线)也经历了增益饱和的过程,但是与改变泡克尔斯盒开门时间 D_2 时存在不同,脉冲能量饱和后,基本维持在小范围不变,虽然损耗依旧存在,但是由于在高抽运的激励下,损耗的部分能量马上得到补充,从而维持了一个动态平衡。脉冲宽度在接近增益饱和时,也同

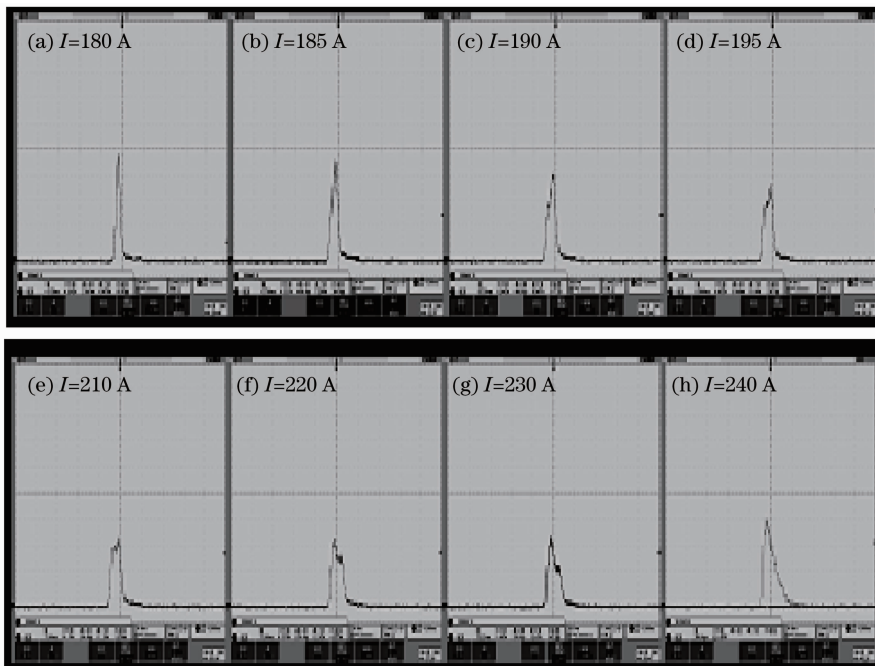


图 6 电流强度在 180~240 A 之间变化时的激光器输出波形

Fig. 6 Output pulse waveform of the laser with the current between 180 and 240 A

样呈线性增加,但在接近泡克耳斯盒的下降沿时间时,趋于饱和。这种情况下,脉冲宽度同样也是由增益介质和泡克耳斯盒驱动电源的下降沿时间共同决定的。此外,在电流为240 A的高电流情况下,激光器并无漏光现象发生,激光腔的开关状况较好,说明脉冲宽度和能量的变化并不是由漏光造成的。

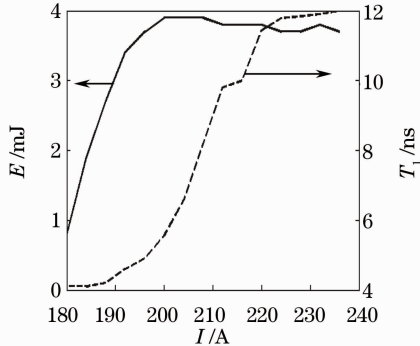


图7 脉冲宽度和脉冲能量随电流强度的变化规律

Fig. 7 Pulse width and pulse energy versus current intensity

4 结 论

基于脉冲抽运的全固态腔倒空激光器装置,实验研究了长下降沿时间的KD*P泡克耳斯盒驱动电源对腔倒空激光器输出特性的影响。研究发现:当下降沿时间大于腔内的一次往返时间时,随着泡克耳斯盒驱动电源的开门时间的增加,激光器倒出的脉冲宽度呈线性增加,而不像以往报道的完全由下降沿时间决定。脉冲的输出能量经历先增加,后减少的变化过程,脉冲的形状变化较大,前沿先发生分裂,能量下降,脉宽变宽,随后后沿开始下降到与前沿持平,接着后沿继续下降,脉冲宽度始终在变化中,但没有观察到超过下降沿时间的脉冲。改变电流强度,变化规律和改变开门时间的过程类似,说明两者作用的过程基本相同,它们都受到增益饱和和效应的影响,不同之处在于增加电流强度能够补偿腔内的损耗。总之,在下降沿时间大于腔内往返时间的情形下,倒出脉冲的宽度是由增益介质和泡克耳斯盒驱动电源的下降沿时间共同决定的。虽然泡克耳斯盒驱动电源的下降沿时间较长(约为12 ns),但在脉冲抽运的情况下,通过平衡电流强度和泡克耳斯盒驱动电源的开门时间,依然可以获得脉冲宽度短至4 ns左右,脉冲能量为3.2 mJ的腔倒空激光输出,泡克耳斯盒驱动电源的稳健性得到了很大提高。

参 考 文 献

- 1 A. K. Sharm, R. A. Joshi, R. K. Patidar *et al.*. A simple highly stable and temporally synchronizable Nd: glass laser oscillator delivering laser pulses of variable pulse duration from sub-nanosecond to few nanoseconds[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **272**(2): 455~460
- 2 Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. 3rd Edition, Springer, 1992. 476~481
- 3 Feng Chengyong, Fan Zhongwei, Cui Jianfeng *et al.*. Electro optically cavity dumped Nd:YLF lasers with high beam quality and short pulse[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(1): 32~35
冯承勇, 樊仲维, 崔建丰等. 高光束质量短脉宽电光腔倒空 Nd:YLF 激光器[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(1): 32~35
- 4 D. Malim, R. A. Bradbury, A. Hordvik *et al.*. Production of intense sub-nanosecond pulses by cavity dumping[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1974, **10**(1): 20~25
- 5 Zeng Qinyong, Wan Yong, Niu Ruihua *et al.*. Research of laser-diode-pumped high repetition rate cavity dumping Nd:YAG laser [J]. *Laser and Infrared*, 2006, **36**(7): 551~554
曾钦勇, 万勇, 牛瑞华等. LD泵浦高重复腔倒空 Nd:YAG 激光输出研究[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(7): 551~554
- 6 D. Cheng. Instability of cavity-dumped YAG laser due to time-varying reflections[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1973, **9**(6): 585~588
- 7 R. H. Johnson. Characteristics of acousto optic cavity dumping in a mode-locked laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, **9**(2): 255~257
- 8 L. McDonagh, R. Wallenstein, R. Knappe. 47 W, 6 ns constant pulse duration, high repetition rate cavity-dumped Q-switched TEM₀₀ Nd: YVO₄ oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(22): 3303~3305
- 9 Zhang Bingyuan, Li Gang, Chen Meng *et al.*. Electro optically cavity dumped laser diode pumped mode locked Nd:YAG laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 356~358
张丙元, 李港, 陈檬等. 电光腔倒空激光二极管抽运 Nd:YAG 锁模激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 356~358
- 10 Wang Sha, Chen Jun, Ge Jianhong *et al.*. Cavity dumping of a mode locked Nd:YAP laser working at 1341 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 1925~1928
汪莎, 陈军, 葛剑虹等. 工作在1341 nm的LD纵向抽运腔倒空锁模 Nd:YAP 激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 1925~1928
- 11 Guo Xiaodong, Wang Shiji, Gu Yuan *et al.*. Temporal shaping of pulses in a Q-switched Nd:YLF laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(8): 995~998
郭小东, 王世绩, 顾援等. 调Q激光脉冲的腔内时间整形[J]. *光学学报*, 1995, **15**(8): 995~998
- 12 Dong Xiaogang, Li Liangyu, Yan Sixian *et al.*. Producing mono-pulse laser of nanosecond burst-length by cutting-apart from Q-beam self-triggered[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4): 465~469
董小刚, 李良钰, 晏思贤等. 调Q激光自触发斩波产生纳秒脉宽单脉冲激光[J]. *中国激光*, 2007, **34**(4): 465~469
- 13 X. Zhou, K. Henry, M. Margaret. Positive-dispersion cavity-dumped Ti: sapphire laser oscillator and its application to white light generation[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(21): 9750~9757
- 14 M. Siegel, J. Aus-der-Au, A. Guandalini. High repetition rate cavity-dumped Yb:KYW femtosecond oscillator[J]. *CLEO, San Jose*, 2010, CT_uV4
- 15 B. Alan, X. Liu, M. Gerard *et al.*. Diode-pumped Nd: glass kilohertz regenerative amplifier for sub-picosecond micro-joule level pulses[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(18): 4163~4167
- 16 H. Liu, J. Nees, G. Mourou *et al.*. Yb:KGd(WO₄)₂ chirped-pulse regenerative amplifiers [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **203**(3-6): 315~321