

500 kHz, 6 ns 高重复频率电光腔倒空 Nd:YVO₄激光器

石朝辉^{1,2} 刘学松^{1,2} 黄玉涛¹ 闫莹¹ 余锦¹ 樊仲维¹

(¹中国科学院光电研究院, 北京 100080

²北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 102211)

摘要 报道了一种基于电光腔倒空技术的高重复频率、短脉冲 Nd:YVO₄激光器。该激光器以 880 nm 连续波激光二极管作为端面抽运源,采用 BBO 晶体组成的普克尔盒作为电光 Q 开关。通过优化谐振腔,提高了激光器热稳定性和模式匹配效率。在 30 W 的抽运功率下,获得了脉冲重复频率最高为 500 kHz,脉冲宽度为 6 ns,平均功率为 10 W 的 1064 nm 稳定基横模脉冲激光输出。

关键词 激光技术;电光腔倒空;高重复频率;880 nm 抽运

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1002006

500 kHz, 6 ns High Repetition-Rate Electro-Optical Cavity Dumped Nd:YVO₄ Laser

Shi Zhaohui^{1,2} Liu Xuesong^{1,2} Huang Yutao¹ Yan Ying¹ Yu Jin¹ Fan Zhongwei¹

(¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

²Beijing GK Laser Technology Co., Ltd, Beijing 102211, China)

Abstract A high repetition-rate, short-pulse Nd:YVO₄ laser based on electro-optical cavity-dumped technology is reported. This laser, end-pumped by a continuous-wave 880 nm laser diode, employs a Pockels cell made up of BBO crystal as the electro-optical Q switch. The laser resonant cavity is optimized to improve its dynamically thermal stability and the mode-matching efficiency. When the pump power is 30 W, stable 1064 nm fundamental-mode laser pulses with the maximum repetition rate of 500 kHz, pulse width of 6 ns and average power of 10 W can be achieved.

Key words laser technology; electro-optical cavity-dumped; high-repetition rate; 880 nm pumping

OCIS codes 140.3390; 140.3480; 140.3540; 140.3530; 140.3580

1 引言

纳秒激光器结构相对简单,成本适中,可靠性高,广泛应用于激光加工、激光打标、激光测距等领域,窄脉宽、高峰值功率和高重复频率是这个领域的发展趋势^[1-5]。长久以来,纳秒级激光主要通过周期性改变激光器谐振腔损耗,即调 Q 技术实现。调 Q 激光器以工作物质的粒子数反转储存能量,激光脉冲宽度依赖于激光增益、脉冲重复频率及输出耦合比等因素。调 Q 激光器可获得的重复频率受限

于激光腔内光场的有限建立时间和重新抽运到反转粒子数所需的时间,重复频率提高意味着单个调 Q 脉冲所能获得的增益减小,这就会增加调 Q 脉冲的建立时间进而增大脉冲宽度。因此,一般的调 Q 技术很难在高脉冲重复频率下同时获得较窄的激光脉冲宽度。典型的调 Q 激光器的脉宽一般为几十纳秒或上百纳秒^[5],而且随着脉冲重复频率的提高,调 Q 激光器的脉宽通常会明显变宽。虽然用调 Q 技术也能产生纳秒级甚至亚纳秒级的短脉冲,但这需要

收稿日期: 2014-03-27; **收到修改稿日期**: 2014-06-03

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120024)、北京市科委科技新星计划(xx2012084)

作者简介: 石朝辉(1980—),男,博士,高级工程师,主要从事全固态激光技术方面的研究。

E-mail: shizh@126.com

很短的谐振腔和很高的激光增益,就需要激光晶体上的基横模光斑和抽运光斑都很小,限制了抽运功率,所以这种短脉冲调 Q 激光器的输出功率或单脉冲能量都相对较低^[6]。

相比之下,腔倒空技术是一种能有效产生短脉冲、高重复频率激光的特殊调 Q 技术。不同于一般的调 Q 激光器,腔倒空激光器的储能单元是谐振腔,它所产生的脉冲宽度只依赖于谐振腔腔长和 Q 开关速度,与激光介质的增益特性及重复频率无关。理论上,只要 Q 开关的反应速度足够快,从腔内倒出的激光脉冲宽度就等于激光在腔内的往返渡越时间。而且,通过控制激光脉冲倒空前在腔内的往返振荡次数使其获得充分的放大,腔倒空激光器可产生比普通调 Q 激光器高得多的重复频率。早在 20 世纪 70 年代,人们就用声光调制器作为 Q 开关实现了重复频率高达兆赫兹量级的腔倒空激光器^[7-10]。但是,受限于声速和通光截面积,声光调制器反应速度较慢,这导致声光腔倒空激光器的脉冲宽度在百纳秒量级。随着反应时间只有几个纳秒的电光 Q 开关技术的成熟,现在人们更多使用电光腔倒空技术同时获得短脉宽、高重复频率的激光脉冲^[11-13]。在过去的报道中,纳秒电光腔倒空激光器的重复频率都在 200 kHz 以下。2006 年,McDonagh 等^[12]报道了一种使用高功率 888 nm 半导体激光器抽运 Nd:YVO₄ 晶体,BBO 晶体作为电光 Q 开关的腔倒空激光器,获得了 6 ns 脉宽,100 kHz 的重复频率。2011 年,于欣等^[13]报道了一种使用 879 nm 半导体激光器抽运键合 Nd:GdVO₄

晶体,RTP 晶体作为电光 Q 开关的腔倒空激光器,获得了 3.8 ns 脉宽,100 kHz 的重复频率。

本文报道了一种高重复频率、短脉冲电光腔倒空 Nd:YVO₄ 激光器。该激光器采用连续波 880 nm 激光二极管端面直接抽运方式,降低热效应的同时保证了高光束质量的基横模激光振荡。通过合理地设置谐振腔型,该激光器具有高的热稳定性和模式匹配效率。最终,在 30 W 抽运功率下,实现了最高脉冲重复频率达 500 kHz 的稳定脉冲激光输出,平均功率为 10 W,脉冲宽度为 6 ns。

2 实验装置及原理

电光腔倒空激光器的常用腔型主要有线型腔和 V 形腔两种。前者腔内振荡光是 p 偏振光,s 偏振光从偏振片反射输出;后者腔内振荡光是 s 光,p 偏振光从偏振片透射输出。对于实际的偏振片,不仅 s 偏振光的反射损耗要小于 p 光的透射损耗,而且 s 偏振光的偏振度要大于 p 光的偏振度。所以使用 V 形腔可以获得更小的腔内插入损耗和偏振度更高的线偏振光。该激光器的实验装置如图 1 所示,腔长约为 700 mm。从本质上,它与 V 形腔结构的工作原理相同:s 偏振光在腔内振荡,p 偏振光从薄膜偏振片 TFP1 透射输出,但不同于一般 V 形腔的是增加了一个薄膜偏振片 TFP2 用于反射腔内振荡光。这样一方面可以避免不规则腔型,使激光器结构更紧凑,体积更小,另一方面可以进一步提高偏振度,提高放大效率。

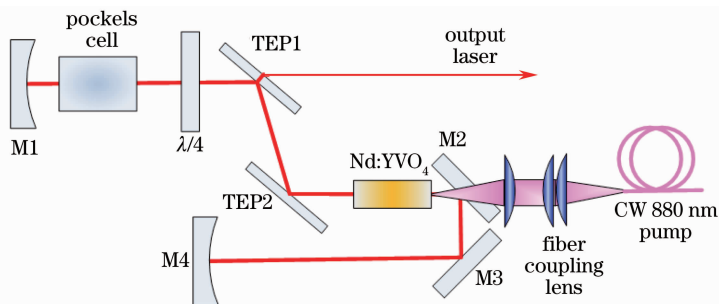


图 1 短脉冲、高重复频率电光腔倒空激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the electro-optical cavity-dumped laser with short pulses and high-repetition rate

在激光器中,抽运源是中心波长为 880 nm、最大输出功率为 30 W 的连续波(CW)激光二极管(LD)模块。与常用的 808 nm 抽运波长相比,采用 880 nm 波长可以把基态 Nd³⁺ 直接抽运到激光上能级⁴F_{3/2},没有 Nd³⁺ 从抽运带⁴F_{5/2} 能级无辐射跃迁到⁴F_{3/2} 能级的过程,降低了量子亏损带来的能量损

失,使发热比重减少 25%。这不仅能提高激光的转化效率,还能减弱激光晶体的热透镜效应,降低晶体端面因温度过高、应力过大带来的断裂风险^[14]。抽运光芯径为 400 μm、数值孔径(NA)为 0.22 的光纤和放大倍率为 1:2 的扩束聚焦系统耦合到激光晶体里,抽运光束腰直径为 0.8 mm。增益介质位于

谐振腔光路的中心,采用 a 轴切割、0.5% 掺杂的 Nd:YVO₄ 晶体,其尺寸为 4 mm×4 mm×20 mm,晶体前后表面都镀有 880 nm 和 1064 nm 增透膜。激光晶体用铝箔包裹后固定在紫铜水冷热沉中,冷却水温为 25 °C。Nd:YVO₄ 晶体受激发射截面大,上能级寿命短,非常有利于高重复频率激光运转。采用端面抽运方式的好处一是便于热管理,二是易于实现振荡光与抽运光的模式匹配,输出高光束质量的激光。M1 和 M4 是 0° 凹面反射镜,曲率半径都是 600 mm,内表面均镀有 1064 nm 高反膜。M2 和 M3 分别为 45° 平面反射镜,内表面均镀有 1064 nm 高反膜;另外,M3 前后表面还镀有 880 nm 高透膜。1/4 波片通过旋转可以调节腔内的偏振态。普克尔盒(Pockels cell)采用 BBO 晶体,端面均镀有 1064 nm 增透膜,通光口径为 2.5 mm。BBO 晶体作为电光 Q 开关的突出优点是插入损耗较小,消光比高,抗光损伤阈值高,而且不像 RTP 等电光晶体那样热效应明显,更适合高功率下使用;其不利之处是由于电光系数小,需要较高的驱动电压。该激光器中 BBO 晶体尺寸为 3 mm×3 mm×40 mm,较大的晶体纵横比可以使电光 Q 开关的 1/4 波电压降至 2 kV 以下。实验所使用的高频高压电光驱动的上升沿、下降沿时间都小于 4 ns,最高重复频率为 500 kHz。

在腔倒空的工作过程中,1/4 波片光轴与 s 偏振及 p 偏振均呈 45° 夹角。在 Q 开关不加电压的情况下由偏振片反射的 s 偏振光两次通过 1/4 波片后变为 p 偏振光经 TFP1 透射输出,此时输出耦合率为 100%,谐振腔处于高损耗状态,无法形成激光振荡,增益介质吸收抽运光以粒子数反转形式储存能量。在某一时刻给 Q 开关加上 1/4 波电压后,Q 开关相当于另一个 1/4 波片, s 偏振光两次通过 1/4 波片和 Q 开关后偏振态不发生改变,仍被 TFP1 反

调 Q 激光脉冲会在腔内快速建立并在腔内往复振荡而被不断放大。在脉冲能量达到最大值时,突然撤去 Q 开关上的电压,谐振腔输出耦合率再次快速变为 100%,谐振腔内储存的激光能量在经历一次腔内循环后就会全部倒出腔外,形成高峰值功率短脉冲。如果 Q 开关的开门时间比往返渡越时间长,则输出脉宽由关门时间决定。激光脉冲的重复频率等于 Q 开关的加压频率。虽然在一定抽运功率下,重复频率的增加会导致单程增益的减小,但可以通过延长 Q 开关加压时间——增加脉冲在腔内循环次数进行弥补。所以,腔倒空激光器的脉宽基本与重复频率无关。

固体激光器设计需要考虑谐振腔的热稳定性和抽运光与振荡光的模式匹配。在固体激光器中,增益介质的热透镜效应使其可以近似为一个凸透镜,其焦距反比于抽运功率。热透镜效应的存在不仅会影响激光输出功率和光束质量,而且如果设计时不加特殊处理,抽运功率的波动会引起输出激光功率及激光光斑大小的波动,严重影响激光器的稳定性,甚至使谐振腔变为非稳腔,无法形成激光振荡。动态热稳腔的要求就是保证在一定的热透镜焦距变化范围内,增益介质、输出耦合器及 Q 开关等关键器件上的激光光斑变化足够小。另外,增益介质上的模场光斑半径要略小于抽运光斑半径,即实现模式匹配。模场光斑太小会引起高阶模振荡,劣化光束质量;模场光斑太大,会使基横模模场边缘没有被充分放大,减小输出功率。在该激光器中,在 30 W 抽运功率注入下,热透镜焦距的计算值和测量值均在 500 mm 左右。图 2(a)和(b)是根据 ABCD 传输矩阵法计算得到的激光晶体、TFP1 表面模场光斑大小随热透镜焦距的变化。可以看到,热透镜焦距在 400~800 mm 的变化范围内,这两个关键器件上的模场光斑变化只有 3% 和 8%,这就保证了激光器的

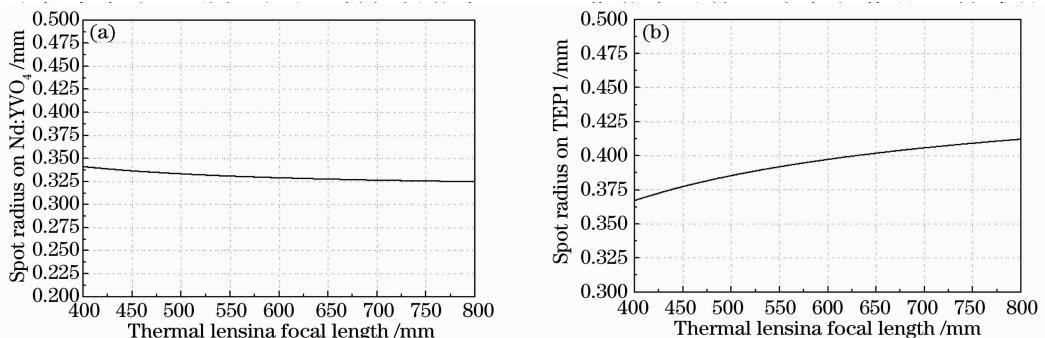


图 2 增益介质和 TFP1 上的模场光斑半径随热透镜焦距的变化

Fig. 2 Variations in mode spot-radius on the laser gain medium and TFP1 with thermal focal length

图 2(a)可以看出,激光晶体上的模场光斑半径在 $0.32 \mu\text{m}$ 左右,与抽运光斑束腰半径 $0.4 \mu\text{m}$ 的比值接近 $0.8:1$,可以实现基横模光斑与抽运光斑的良好模式匹配。

3 实验结果与讨论

首先验证了这台激光器的连续出光能力。激光器在一定抽运功率下的最大输出功率与输出耦合比相关,通过旋转 $1/4$ 波片可以方便地实现 TFP1 输出耦合比 T 的连续可调,

$$T(\alpha) = \sin^2(2\alpha),$$

式中 α 为 $1/4$ 波片光轴相对于零延迟点的夹角。在 30 W 抽运功率下,激光振荡产生时 Nd:YVO₄ 晶体吸收的抽运功率大于 28 W 。如果腔内不插入普克尔盒,激光器最大输出功率可达 15 W ,光-光转化效率大于 50% ,这主要得益于 880 nm 抽运波长降低了激光跃迁的量子缺陷。如果腔内插入普克尔盒,最大输出功率降至 12 W ,一方面是因为普克尔盒通光口径较小会引起较大的插入损耗,另一方面 BBO 晶体较长增加了其对准的调试难度。

当各器件调至最佳状态后,旋转 $1/4$ 波片使谐振腔处于高损耗状态,此时没有激光从 TFP1 输出。将普克尔盒装入谐振腔内,加上高压驱动信号并调节普克尔盒的方向使激光器工作在腔倒空状态。用高速硅光电探头 (DET10A, Thorlabs Inc.) 接收功

率计表面的散射光并连接至采样速率为 2.5 Gb/s 的数字示波器 (DPO4104, Tektronix Inc.) 上探测光脉冲信号并测量脉冲宽度。

可以看到,光脉冲序列的重复频率在 $200 \sim 500 \text{ kHz}$ 变化的过程当中,在 200 kHz 下激光脉冲宽度最窄为 4.936 ns ,在 500 kHz 下脉冲宽度最宽为 6.352 ns ,考虑到电光驱动器参数变化及测量误差等因素的影响,可以认为激光脉冲宽度基本等于光波在激光谐振腔内往返的渡越时间(考虑晶体的折射率),与前述内容一致。但随着重复频率的增大,单程激光增益逐渐减小,此时要通过增加光脉冲在腔内的往返振荡次数使其在倒空前能从增益介质提取更多的能量从而提高输出功率。这样在 $200 \sim 500 \text{ kHz}$ 重复频率变化过程中,在不同的脉冲重复频率下分别优化脉冲的往返振荡次数以后,激光平均输出功率一直保持在 10 W 左右。图 3(a)~(h) 分别是 $200 \sim 500 \text{ kHz}$ 不同重复频率下的稳定腔倒空输出脉冲序列轨迹与单脉冲波形,脉冲-脉冲能量不稳定性小于 2% 。此时用光束轮廓质量分析仪 (Beamview, Coherent Inc.) 测得的远场激光光斑如图 4 所示,光斑圆度大于 95% , x - y 方向上光强分布的高斯拟合系数分别为 0.97 和 0.98 ,可以判断此时为高质量基横模高斯光束振荡。良好的光束质量一方面依赖于抽运光和振荡光的模式匹配,另一方面也得益于普克尔盒的小孔径光阑的限模作用。

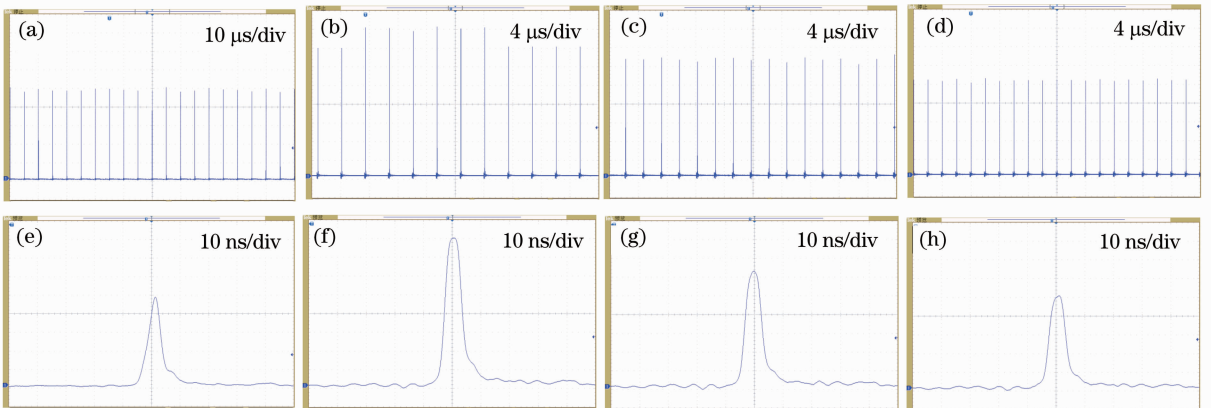


图 3 重复频率下腔倒空输出脉冲序列和单脉冲波形。(a)~(d)重复频率分别为 $200, 300, 400, 500 \text{ kHz}$ 时的输出脉冲序列;
(e)~(h)重复频率分别为 $200, 300, 400, 500 \text{ kHz}$ 时的单脉冲波形

Fig. 3 Oscilloscope traces of (a)~(d) the pulse trains $200, 300, 400, 500 \text{ kHz}$ respectively and (e)~(h) the single pulse shape at the repetition rate of $200, 300, 400, 500 \text{ kHz}$ respectively

在实验中发现每个重复频率对应着一个光脉冲在腔内的往返振荡次数的最佳值。小于这一最佳值,平均输出功率达不到最大值;超过这一最佳值,起初表现为平均输出功率下降,接着出现腔倒空输

出脉冲峰值功率变得不稳定。而且随着重复频率的降低,这一现象更加明显。在 200 kHz 重复频率下,如果脉冲腔内往返次数设为 25 次,此时的腔倒空输出脉冲序列如图 5(a)所示,可以看出各脉冲幅

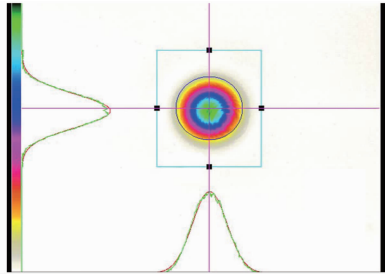


图4 腔倒空输出远场激光光斑分布

Fig. 4 Far-field laser beam profile of the cavity-dumped output

度不再一致;此时的单个脉冲波形如图5(b)所示,峰值出现明显的抖动,这一现象与再生放大器“倍周期分叉”效应的动力学原理类似^[15-16]。可以解释为在高重复频率下,腔倒空脉冲的时间间隔短于增益介质的上能级寿命(Nd:YVO₄:100 μ s),抽运没有

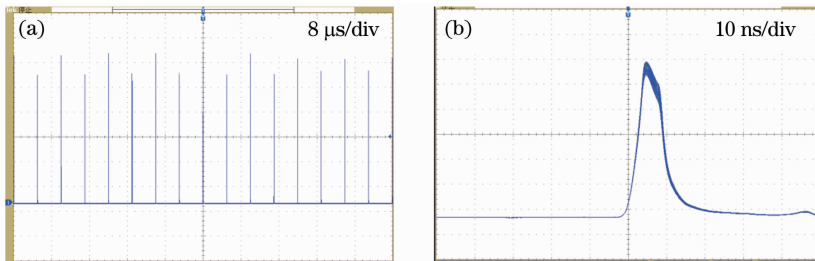


图5 在200 kHz重复频率下过多腔内往返次数导致(a)不等高脉冲序列;(b)单脉冲峰值抖动波形

Fig. 5 At 200 kHz repetition rate, over intra-cavity round-trip number results in (a) non-uniform pulse train and (b) peak-jittering pulse shape

4 结 论

报道了一种880 nm连续波端面抽运的高重复频率、窄脉宽电光腔倒空Nd:YVO₄激光器。在30 W抽运功率下,可产生重复频率最高为500 kHz,脉宽为6 ns,平均输出功率为10 W的高光束质量基横模激光脉冲输出。通过优化谐振腔型设计,可以使该激光器具有良好的热稳定性和模式匹配效率。指出高重复频率腔倒空激光器中,脉冲在腔内的往返振荡次数不仅影响激光输出功率,而且对输出脉冲的稳定性有显著影响。

参 考 文 献

- 1 Y F Chen, Y P Lan. Comparison between *c*-cut and *a*-cut Nd:YVO₄ lasers passively Q-switched with a Cr³⁺:YAG saturable absorber[J]. Appl Phys B, 2002, 74(4-5): 415-418.
- 2 Y F Ma, X Yu, X D Li. Improved performance of acoustooptically Q-switched Nd:GdVO₄ laser by using the planoconvex cavity[J]. Laser Phys, 2008, 18(12): 1505-1507.
- 3 Zhu Xiaolei, Tang Hao, Li Xiaoli, et al.. Recent progresses of LD pumped solid state lasers with high repetition rate electro-optic Q-switch[J]. Chinese J Laser, 2009, 36(7): 1654-1659.

足够的时间使每个脉冲增益恢复到稳定值,破坏了放大过程所消耗的反转粒子数和抽运阶段增加的反转粒子数之间的平衡性,致使相邻脉冲之间的放大过程相互影响。例如:第一个调Q脉冲在腔内循环放大,不断从增益介质中提取能量;当循环次数超过某一值时,过高的脉冲能量导致本次放大结束时的增益和腔倒空后第二个调Q脉冲产生时的初始增益太小,即使循环相同次数,第二个脉冲倒空时提取的能量也很小,放大器没有饱和;不过这为第三个调Q脉冲提供了大的初始增益,所以第三个脉冲可提取的能量又变大,这一过程不断循环往复造成了腔倒空脉冲峰值功率在多个值之间跳动。所以,对于高重复频率腔倒空激光器,控制激光脉冲在腔内往返振荡次数是获得高功率和高脉冲稳定性激光输出的关键环节之一。

朱小磊,唐昊,李小莉,等.高重复频率电光调Q全固态激光器研究进展[J].中国激光,2009,36(7):1654-1659.

- 4 Liu Rui, Yu Yongji, Chen Xinyu, et al.. 150 kHz Q-switched adhesive-free bond composite Nd:YVO₄/Nd:GDVO₄ laser[J]. Chinese J Lasers, 39(6): 0602001.
- 5 Yan Ying, Zhang Hengli, Li Jing, et al.. LD pumped acoustic-optic Q-switched Nd:YVO₄ slab laser[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1162-1165.
- 6 闫莹,张恒利,李静,等.激光二极管抽运声光调Q Nd:YVO₄板条激光器[J].中国激光,2010,37(5):1162-1165.
- 7 Xia Yin, Junqing Meng, Jifeng Zu, et al.. Semiconductor saturable-absorber mirror passively Q-switched Yb:YAG microchip laser[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(8): 081402.
- 7 J M Moran. Calculation of the minimum repetition rate of a cavity-dumped four-level laser[J]. J Quantum Electron IEEE, 1976, 12(10): 639-644.
- 8 Herman A Kruegle, Lothar Klein. High peak power output, high PRF by cavity dumping a Nd:YAG laser[J]. App Opt, 1976, 15(2): 466-471.
- 9 P G Konvisar, A A Fomichev. Optimization and stability of a continuously pumped YAG:Nd³⁺ laser with strong intracavity modulation[J]. Sov J Quantum Electron, 1980, 11(6): 749-759.
- 10 Zeng Qinyong, Wan Yong, Niu Ruihua, et al.. Research of

- laser-diode-pumped high repetition rate cavity dumping Nd:YAG laser[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(7): 551—554.
- 曾钦勇, 万 勇, 牛瑞华, 等. LD 泵浦高重频腔倒空 Nd:YAG 激光输出研究[J]. *激光与红外*, 2006, 36(7): 551—554.
- 11 Li Li, Fan Zhongwei, Yu Jin, *et al.*. Experimental research on 12.5 μ J electro-optical cavity-dumped mode-locked picosecond laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(7): 071403.
- 李 丽, 樊仲维, 余 锦, 等. 12.5 μ J 光电腔倒空锁模皮秒激光器的实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(7): 071403.
- 12 Louis McDonagh, Richard Wallenstein, Ralf Knappe. 47 W, 6 ns constant pulse duration, high repetition-rate cavity-dumped Q-switched TEM₀₀Nd:YVO₄ oscillator[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(22): 3303—3305.
- 13 X Yu, C Wang, Y F Ma, *et al.*. Performance improvement of high repetition rate electro-opticalcavity-dumped Nd:GdVO₄ laser [J]. *Appl Phys B*, 2012, 106: 309—313.
- 14 Peng Zhu, Daijun Li, Peixin Hu, *et al.*. High efficiency 165 W near-diffraction-limited Nd : YVO₄ slab oscillator pumped at 880 nm[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(17): 1930—1932.
- 15 Jochen Dörring, Alexander Killi, Uwe Morgner. Period doubling and deterministic chaos in continuously pumped regenerative amplifiers[J]. *Opt Express*, 2004, 12(8): 1759—1768.
- 16 Chen Meng, Chang Liang, Yang Chao, *et al.*. 100 kHz Nd:YVO₄ picosecond regenerative amplifier end-pumped by 914 nm laser diode [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602010.
- 陈 檬, 常 亮, 杨 超, 等. 914 nm LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 100 kHz 皮秒再生放大器 [J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602010.

栏目编辑:胡 冰