

LD 抽运声光调 Q 1064 nm 窄脉宽激光器

董小龙¹ 付喜宏² 高兰兰¹ 张帆¹ 焦石¹ 纪冠东¹¹长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 激光二极管(LD)抽运固体激光器(SSLs)通过声光(A-O)调Q方法获得的短脉冲激光在激光测距、激光雷达等领域有着广泛的应用。从调Q速率方程出发,通过理论分析与合理的模拟,解释了脉冲输出平均功率和脉冲宽度与反转粒子数密度之间的关系。为了获得脉宽相对较窄的脉冲输出,在平-平谐振腔结构中使用LD单端抽运偏振吸收与发射的Nd:YVO₄晶体,在抽运电流为32.6 A,重复频率为33.5 kHz,腔长为62 mm,输出镜透射率为50%的条件下获得了最短脉冲宽度为4.4 ns的脉冲激光输出。在抽运电流为31.6 A,腔长为77 mm的条件下,获得脉冲宽度为5.5 ns、峰值功率为26 kW的1064 nm脉冲激光输出。并且讨论了腔长、重复频率以及输出耦合镜透射率与脉冲宽度的变化关系。

关键词 激光器;激光二极管抽运固体激光器;窄脉宽;声光调Q;有效储能时间

中图分类号 O437 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.091402

Narrow Pulse Width Laser Diode Pumped Acousto-Optically Q-Switched 1064 nm Laser

Dong Xiaolong¹ Fu Xihong² Gao Lanlan¹ Zhang Fan¹ Jiao Shi¹ Ji Guandong¹¹College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China²State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract Narrow pulse laser can be obtained from laser diode (LD) pumped acousto-optically (A-O) Q-switched all solid state lasers (SSLs), which is useful in many applications such as laser ranging, laser radar, etc. According to Q-switching rate equation, the relationships between pulse average power, pulse width and inverted population density are explained by theoretical analysis and reasonable model. LD side pumped Nd:YVO₄ crystal which is polarized absorption and emission in a flat-flat cavity is used to achieve narrower pulse width. On conditions that the pumped current is 32.6 A, the repetition rate is 33.5 kHz, the cavity length is 62 mm, the transmittance is 50%, the shortest pulse width of 4.4 ns is obtained. On conditions that the pumped current is 31.6 A, the cavity length is 77 mm, a 1064 nm laser output with the pulse width of 5.5 ns and the peak power of 26 kW is obtained. Cavity length, repetition rate and transmittance of output mirror as functions of pulse width have been discussed.

Key words lasers; laser diode pumped all solid state lasers; narrow pulse width; acousto-optically Q-switched; effective energy storage time

OCIS codes 140.3538; 140.3540; 140.3430

1 引言

由于声光(A-O)调Q方法是有低插入损耗和较小的时间抖动,并且在连续可调谐脉冲重复频率下可以提供高稳定性,所以非常适合用于抽运固体激光器(SSLs)来产生窄脉宽输出。作为激光工作物质的Nd:YVO₄晶体具有大受激发射截面和线偏振输出的特性,一直在激光调Q领域有着广泛应用^[1-3]。近年来将两者

收稿日期: 2014-02-24; 收到修改稿日期: 2014-04-21; 网络出版日期: 2014-08-16

作者简介: 董小龙(1988—),男,硕士研究生,主要从事非线性频率变换以及激光调Q技术方面的研究。

E-mail: 171199519@qq.com

导师简介: 高兰兰(1975—),女,博士,副教授,主要从事LD抽运全固态激光器技术研究。E-mail: gll_75@163.com (通信联系人)

结合应用的报道很多,不仅仅用于二次谐波的产生^[4-6],在光学参量振荡器(OPO)中也有应用^[7-8],但理论与实验相结合的窄脉宽研究相对较少^[9-11]。本文通过对脉宽影响因素的分析,在抽运电流为32.6 A,重复频率为33.5 kHz,腔长为62 mm,输出镜透射率为50%的条件下获得了最短脉冲宽度为4.4 ns的脉冲激光输出。在抽运功率为31.6 A,腔长为77 mm的条件下,获得了脉冲宽度为5.5 ns,峰值功率为26 kW的1064 nm脉冲激光输出。

2 理论分析

由于声光Q开关的脉冲持续时间(纳秒级)一般小于光脉冲建立时间(微秒级)^[12],假定Q开关打开前不存在自发辐射,Q开关打开后光抽运停止,腔内损耗 δ 为阶跃函数。那么四能级系统可以简化为二能级系统,从而有

$$\frac{d\Delta n}{dt} = -\frac{\Delta n_0}{\Delta n_t} 2\delta\phi, \quad (1)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \left(\frac{\Delta n_0}{\Delta n_t} - 1\right)\delta\phi, \quad (2)$$

式中 Δn_0 为初始反转粒子数密度, Δn_t 为阈值反转粒子数密度, ϕ 为腔内的光子数密度。若定义 Δn_f 为最终反转粒子数密度,则

$$\Delta n_0 - \Delta n_f = \Delta n_t \ln\left(\frac{\Delta n_0}{\Delta n_f}\right), \quad (3)$$

那么可以用 Δn_0 , Δn_f 和 Δn_t 来表示输出脉冲的平均功率和脉冲宽度

$$P_{av} = \frac{Tf}{T+f} \Delta n_t \ln\left(\frac{\Delta n_0}{\Delta n_f}\right) h\nu V, \quad (4)$$

$$\Delta\tau = \tau_c \frac{\ln\left(\frac{\Delta n_0}{\Delta n_f}\right)}{\frac{\Delta n_0}{\Delta n_t} - \ln\left(\frac{\Delta n_0}{\Delta n_t}\right) - 1}, \quad (5)$$

式中 T 为输出镜的透射率, f 为脉冲重复频率, $h\nu$ 为光子能量, V 为光束在激光晶体中的有效体积, τ_c 为激光上能级粒子数寿命。从图1可以看出, $\Delta n_0 = \Delta n_t$ 时没有激光振荡形成, $P_{av} = 0$,随着 $\Delta n_0/\Delta n_t$ 的增大,输出平均功率逐渐增大,当 Δn_0 趋于饱和时,即使增大激光二极管(LD)抽运功率,输出脉冲的平均功率变化趋势也会减弱。从图2可以看出,随着 $\Delta n_0/\Delta n_t$ 的增大,脉冲宽度呈现递减趋势。这是由于随着 $\Delta n_0/\Delta n_t$ 的增大,腔内净增益变大,粒子数急剧增长,脉冲上升沿宽度 τ_1 变小,故脉宽呈现递减趋势;但在图形后半部分脉冲宽度随 $\Delta n_0/\Delta n_t$ 增大而变小的趋势减弱。这是因为此时脉冲宽度受到的输出耦合镜透射率 T 、腔长 L 以及

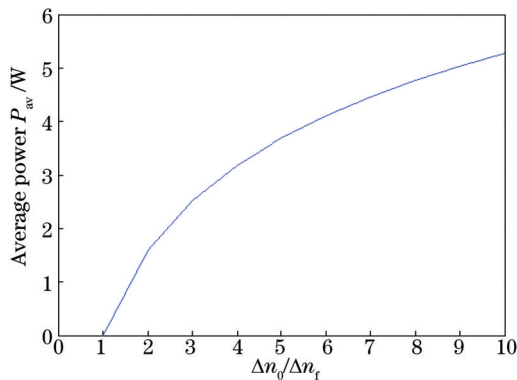


图1 脉冲平均功率随 $\Delta n_0/\Delta n_t$ 的变化关系

Fig.1 Dependence of pulse average power on $\Delta n_0/\Delta n_t$

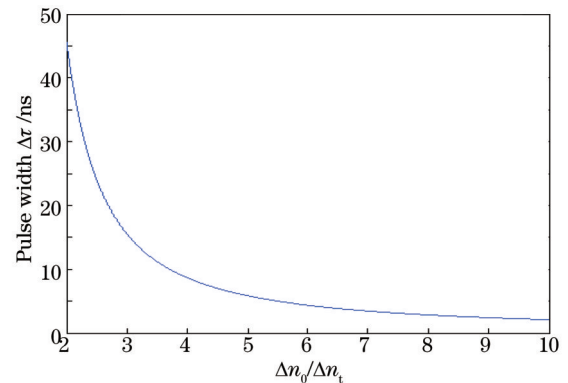


图2 脉冲宽度随 $\Delta n_0/\Delta n_t$ 的变化关系

Fig.2 Dependence of pulse width on $\Delta n_0/\Delta n_t$

重复频率 f 的影响大于 $\Delta n_0/\Delta n_1$ 的影响,所以图形后半部分的主要影响因素已经不是 $\Delta n_0/\Delta n_1$ 。当腔内光子数趋近于饱和,如何快速地将腔内光子数释放出来将会成为影响脉宽的重要因素。定义有效储能时间为^[13]

$$\tau_r = \left(\frac{1}{\tau_p} + \frac{1}{\tau_c} \right)^{-1}, \quad (6)$$

式中 τ_p 为 LD 抽运速率。那么输出脉冲的下降沿宽度 τ_2 将主要受限于 τ_r ,也就是说此时 τ_r 对脉冲宽度的影响较大。为了进一步压缩脉宽,在确保 $\Delta n_0/\Delta n_1$ 数值足够大的情况下,实验中分析了输出耦合镜透射率 T 、腔长 L 以及重复频率 f 与脉宽的变化关系。

3 实验装置

实验装置如图3所示。激光二极管的连续输出功率为0~60 W可调谐。激光谐振腔采用平-平腔结构。激光工作物质是掺杂离子数分数为0.5%的 α 轴切割的Nd:YVO₄晶体,靠近抽运端镀808 nm增透膜和1064 nm高反膜,另一端面镀1064 nm增透膜,并用钢铂包紧置于紫铜块中,温度控制在17.5℃。声光介质采用熔融石英,驱动频率为(40.68±0.1) MHz,两端镀有1064 nm增透膜。声光晶体靠近工作物质放置。输出耦合镜M₁镀1064 nm部分反射部分增透膜。以上装置同时采用风冷和半导体制冷(TEC)。使用Thorlabs的DET210型光电探头,RIGOL DS2202型示波器测量输出激光脉冲的重复频率和脉冲宽度,示波器带宽为200 MHz。使用LP-3C型功率计测量输出脉冲的平均功率。

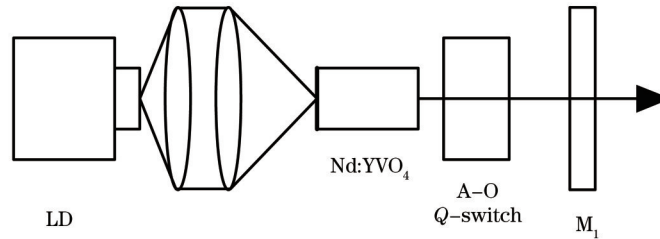


图3 声光调Q实验装置图

Fig.3 Experimental setup of the A-O Q-switched

4 实验结果与分析

为了研究谐振腔腔长与脉冲宽度的关系,在重复频率为33.5 kHz条件下取透射率为50%的平面镜作为输出镜M₁,得到的结果如图4所示,在同一抽运功率条件下,脉冲宽度随着谐振腔腔长的增大而增大。这是因为在同一抽运功率条件下,初始反转粒子数不变,腔长增大会使得激光输出阈值增大,从而使阈值反转粒子数增多, $\Delta n_0/\Delta n_1$ 比值下降,脉冲宽度增加。也可以理解为随着腔长的增大,腔内光子数寿命 τ_c 会变大,由(6)式可知,有效储能时间 τ_r 变大,从而使脉冲下降沿宽度变宽,脉冲宽度增加。从图4也可以看出随着抽运功率的增加,脉冲宽度不是一直减小,正如前述分析,当腔内光子数足够大时,脉冲下降沿宽度 τ_2 将成为限制脉宽的重要因素,所以在高抽运功率下减小 τ_r 是缩短脉宽的有效方法。

随着抽运电流的增大,输出脉冲的平均功率也逐渐增大,但增大的趋势有所减弱,这与前述分析相吻合。在抽运电流为30 A,腔长为80 mm,重复频率为45 kHz的条件下得到的最大脉冲平均功率为5.8 W,光-光转换效率为24.4%。

为了研究重复频率与脉冲宽度的关系,在腔长为80 mm条件下取透射率为50%的平面镜作为输出镜M₁。如图5所示,在同一抽运功率条件下,脉冲宽度随着重复频率的增加而增大。这是因为在相同抽运功率条件下,脉冲重复频率越大,抽运到上能级的粒子数 n_2 越少, $\Delta n_0/\Delta n_1$ 比值下降,脉冲上升沿宽度增大,脉冲宽度增加,所以在抽运功率一定的情况下过高的重复频率不易产生较小的脉宽,而过低的重复频率又会使得平均功率下降。

为了研究输出镜透射率与脉冲宽度的关系,在重复频率为33.5 kHz条件下取腔长为80 mm,所得结果如图6所示。在同一抽运功率条件下透射率 T 越大,阈值反转粒子数 Δn_1 越大, $\Delta n_0/\Delta n_1$ 比值变小,脉冲上升

沿宽度变大,从而脉宽变大;但随着透射率 T 增加,腔内光子数寿命 τ_c 变小,导致 τ_f 变小,脉冲下降沿宽度减小,从而脉宽减小。所以存在一个最佳透射率使得脉冲上升和下降沿宽度最短,从而脉宽最短。实验中选择透射率为 50% 的输出镜,配合较短的腔长,可以有效降低 τ_f ,从而在大的抽运功率下获得更小的脉冲宽度。图中随抽运电流的增大脉冲宽度出现不稳定趋势,这是由于在大的抽运电流下热透镜效应明显,从而引起了谐振腔的不稳定。

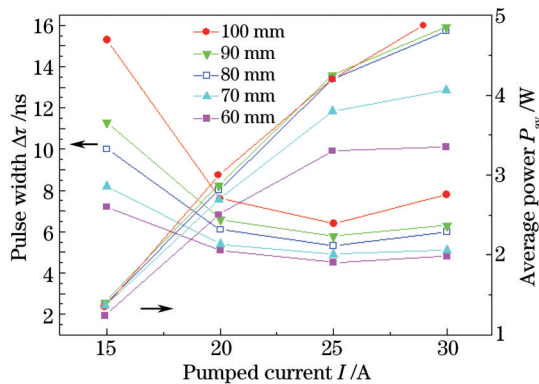


图4 不同腔长下脉冲宽度与平均功率和抽运功率的变化关系

Fig.4 Dependence of pulse width and average power P_{av} on pumped current at different lengths

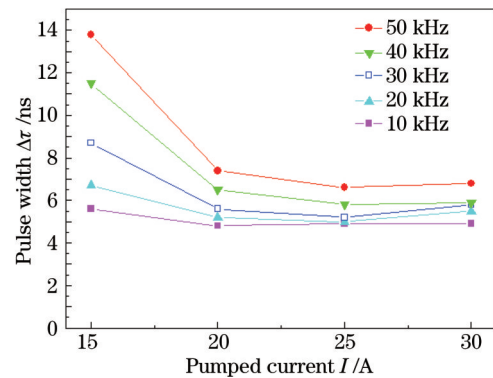


图5 不同重复频率下脉冲宽度与抽运功率的变化关系

Fig.5 Dependence of pulse width on pump power at different pulse repetition rates

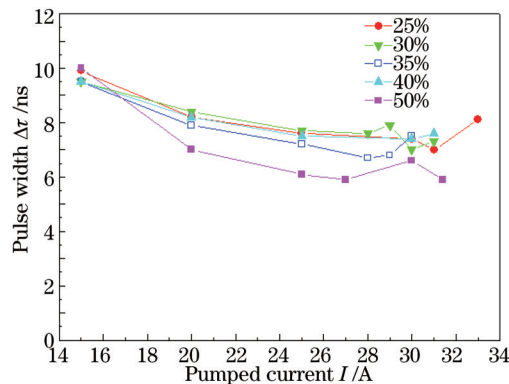


图6 不同输出镜透射率下脉冲宽度与抽运功率的变化关系

Fig.6 Dependence of pulse width on pump power at different output coupler transmissions

5 结 论

脉冲宽度可以用 $\Delta\tau = \tau_1 + \tau_2$ 来表示,通过增大抽运功率来增加初始反转粒子数密度从而减小 τ_1 是获得窄脉宽的一种方法。当腔内光子数密度足够大时,如何快速地将腔内光子数释放出来从而减小 τ_2 将会成为影响脉宽的重要因素。这就要求使用较短的腔长和透射率较大的输出镜,从而尽可能缩短 τ_f ,减小 τ_2 ,最终获得更短的脉冲宽度。在抽运功率为 31.6 A,腔长为 77 mm,重复频率为 33.5 kHz 的条件下获得脉冲宽度为 5.5 ns,峰值功率为 26 kW 的 1064 nm 脉冲激光输出。在腔长为 62 mm 时获得的最短脉宽为 4.4 ns。

参 考 文 献

- 1 Liu Rui, Yu Yongji, Chen Xinyu, *et al.*. 150kHz Q-switched adhesive-free bond composite Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ laser [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(6): 0602001.
刘 瑞,于永吉,陈薪羽,等. 150 kHz生长型复合Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄电光调Q激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(6): 0602001.
- 2 Duan Yanmin, Zhu Haiyong, Feng Zhengrong, *et al.*. Laser diode end-pumped Nd:YVO₄ self-Raman laser at 559 nm with sum-frequency mixing [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502002.
段延敏,朱海永,凤正荣,等. 半导体激光端面抽运Nd:YVO₄自拉曼和频559 nm激光[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502002.
- 3 Liu Yongna, Jiang Feihong, Wang Shumei, *et al.*. LD-pumped passively Q-switched c-cut Nd:YVO₄ self-Raman laser

- with Cr⁴⁺:YAG [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0702004.
- 刘永纳, 江飞虹, 王淑梅, 等. LD抽运Cr⁴⁺:YAG被动调Q c-cut Nd:YVO₄自拉曼激光器 [J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0702004.
- 4 Feng Lichun, Huo Yujing, He Shufang, *et al.*. LD-pumped acousto-optically Q-switched 532 nm laser with high repetition rate [J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(4): 461-465.
- 冯立春, 霍玉晶, 何淑芳, 等. 激光二极管抽运声光调Q高重复频率532 nm激光器 [J]. 中国激光, 2005, 32(4): 461-465.
- 5 Y J Huang, P Y Chiang, H C Liang, *et al.*. Efficient high-power UV laser generated by an optimized flat-flat actively Q-switched laser with extra-cavity harmonic generations [J]. Opt Commun, 2012, 2012, 285(1): 59-63.
- 6 Wang Qin, Chenlin Du, Shuangchen Ruan, *et al.*. Double-end-pumped acoustic-optically Q-switched intracavity-frequency-doubling red laser [C]. SPIE, 2007, 6279: 62791C.
- 7 H T Huang, J L He, X L Dong, *et al.*. High-repetition-rate eye-safe intracavity KTA OPO driven by a diode-end-pumped Q-switched Nd:YVO₄ laser [J]. Appl Phys B, 2008, 90(1): 43-45.
- 8 Y F Chen, S W Chen, S W Tsai, *et al.*. High-repetition-rate eye-safe optical parametric oscillator intracavity pumped by a diode-pumped Q-switched Nd:YVO₄ laser [J]. Appl Phys B, 2003, 76(3): 263-266.
- 9 Y Wang, M Gong, H Zhang. 2 ns pulse width high repetition rate short cavity acousto-optically Q-switched Nd:YVO₄ laser [J]. Electron Lett, 2007, 43(7): 1-2.
- 10 Y Wang, L Huang, H Zhang, *et al.*. A fundamental mode miniature acousto-optically Q-switched Nd:YVO₄ laser with short pulse width at high repetition rates [J]. Laser Physics, 2008, 5(4): 286-290.
- 11 Du Chenlin, Liu Junhai, Wang Zhengping, *et al.*. LD-pumped acousto-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser with high repetition rates and short pulse width [J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(6): 489-491
- 杜晨林, 刘均海, 王正平, 等. LD抽运声光调Q高重复频率短脉宽Nd:YVO₄激光器 [J]. 中国激光, 2002, 29(6): 489-491.
- 12 Lan Xinju. Laser Technology [M]. Beijing: Science Press, 2001. 92-93.
- 蓝信钜. 激光技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 92-93.
- 13 Tracy S Kubo, Thomas J Kane. Diode-pumped laser at five eye-safe wavelengths [J]. IEEE J Quantum Electron, 1992, 28(4): 1033-1040.