

文章编号: 0258-7025(2007)04-0461-04

激光二极管双端抽运声光调 Q 高重复频率 Nd:GdVO₄ 激光器

李旭东, 于 欣, 于俊华, 陈德应

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要 激光二极管(LD)抽运的固体激光器(DPSSL)的调 Q 器件是获得高重复频率、高峰值功率的有效手段之一, 随着激光雷达、激光加工业的发展, 要求调 Q 器件向着更高重复频率的方向发展。Nd:GdVO₄ 以其优异的物理和激光特性, 使得它在激光二极管端面抽运固体激光器的声-光(A-O)调 Q 器件中, 即使在很高的调制重复频率下, 仍可获得窄脉宽、高峰值功率的脉冲激光输出。理论分析了影响脉冲激光的输出能量和脉宽大小的决定因素, 研究了脉宽、平均输出功率及峰值功率随调 Q 重复频率的变化关系。利用双激光二极管双端抽运 Nd:GdVO₄ 晶体棒, 实现了声-光调 Q 高重复频率窄脉宽 1063 nm 激光输出。在晶体入射端面总抽运功率约 43 W 条件下, 当重复频率 $f = 10$ kHz 时, 获得脉宽 $\Delta t = 10.2$ ns, 单脉冲能量 $E = 0.95$ mJ, 峰值功率 $P_M = 93.1$ kW 的输出; 在重复频率 $f = 100$ kHz 时, 获得 $\Delta t = 28.1$ ns, $E = 0.10$ mJ, $P_M = 3.6$ kW 的结果。

关键词 激光技术; Nd:GdVO₄ 激光器; 声光调 Q; 激光二极管双端抽运; 高重复频率

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Laser Diode Double-End-Pumped Acousto-Optically Q-Switched Nd:GdVO₄ Laser with High Repetition Rate

LI Xu-dong, YU Xin, YU Jun-hua, CHEN De-ying

(Institute of Opto-Electronics Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang, 150080, China)

Abstract Laser diode (LD) pumped Q-switched solid-state lasers (SSLs) can achieve high repetition rates and high peak power. With the development of lidar and laser machining, diode-pumped SSLs (DPSSLs) with higher repetition rates are required. In the LD-end-pumped acousto-optically (A-O) Q-switched solid state lasers, Nd:GdVO₄, which has excellent physical and laser properties, is able to obtain a laser output of short pulse width even at very high repetition rates. The major factors that have influence on pulse energy and pulse width are analyzed, pulse width, average output power and peak power as a function of the repetition rates have been studied. Double Nd:GdVO₄ crystals laser end-pumped by double LD is reported, and A-O Q-switched laser of 1063 nm with high repetition rate and short width is achieved. At the total pump power of 43 W, pulse width of 10.2 ns, pulse energy of 0.95 mJ and peak power of 93.1 kW are obtained at the repetition rate of 10 kHz; 28.1 ns, 0.10 mJ and 3.6 kW are produced respectively at 100 kHz.

Key words laser technique; Nd:GdVO₄ lasers; acousto-optically Q-switched; laser diode double-end-pumped; high repetition rate

1 引 言

激光二极管(LD)端面抽运的固体激光器

(DEPSSL)具有结构紧凑、效率高、光束质量好和寿命长等优点,近年来在国内外发展迅速。而且它可

收稿日期:2006-09-13; 收到修改稿日期:2006-11-29

基金项目:哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助项目。

作者简介:李旭东(1980—),男,山东莱州人,博士研究生,主要从事半导体激光抽运固体激光器方面的研究。

E-mail:kevin2025@163.com

导师简介:陈德应(1965—),男,黑龙江哈尔滨人,博士生导师,主要从事强场物理和非线性光学方面的研究。

E-mail:dychen@hit.edu.cn

以通过调 Q 来获得高重复频率、高平均功率、窄脉宽和高光-光转换效率的脉冲激光输出,在激光雷达、激光加工等领域中都具有较好的发展前景。

Nd:GdVO₄ 晶体是 1992 年由俄罗斯科学家首先研制出来的一种新型激光晶体^[1],已被越来越多的人所认识和使用^[2~4]。T. Ogawa 等^[5]研制了高效的 Nd:GdVO₄ 声光调 Q 激光器,在重复频率 40 kHz 时,获得了最短激光脉冲 7 ns 激光输出;Junhai Liu 等^[6]报道了激光二极管端面抽运的 Nd:GdVO₄ 声光调 Q 激光器,在高重复频率 60 kHz 时,获得平均功率 7.25 W 的脉冲输出,在重复频率 10 kHz 时,获得能量 340 μJ,峰值功率 26.2 kW 的脉冲输出。Nd:GdVO₄ 晶体较传统的 Nd:YAG 晶体,在 808 nm 处具有较高的吸收系数和在 1063 nm 处具有较大的受激发射截面 ($7.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$),同时其热导率也很接近 Nd:YAG,约 11.7 W/(m·K),这就保证了 Nd:GdVO₄ 晶体在较高功率抽运下产生较小的热透镜效应,不易发生炸裂。再考虑到它具有偏振输出的特性,从而使其即使在很高的重复频率下,仍可获得窄脉宽、高峰值功率的激光输出。

本文利用双激光二极管双端抽运双 Nd:GdVO₄ 短晶体棒,研制了一台声-光(A-O)调 Q 的高重复频率固体激光器,研究了脉宽、平均功率和峰值功率随重复频率的变化关系,并分别在重复频率为 10 kHz 和 100 kHz 时,对输出脉冲激光的性能进行了测试。

2 理论分析

根据 Wagner 等推导出的速率方程的解,对 Q 开关三能级系统的输出激光能量 E 和脉冲宽度 Δt 可分别表示为^[7]

$$E = \frac{h\nu A}{4\sigma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right), \quad (1)$$

$$\Delta t = \tau_c \frac{n_i - n_f}{n_i - n_i [1 + \ln(n_i/n_f)]}, \quad (2)$$

式中 $h\nu$ 为光子能量, σ 为受激发射截面, A 为有效光束截面, R 为输出镜反射率, τ_c 为腔内光子寿命, n_i 和 n_f 分别为调 Q 状态下的初始和最终反转粒子数密度,它们之间满足

$$n_i - n_f = n_i \ln(n_i/n_f), \quad (3)$$

n_i 为阈值反转粒子数密度,即

$$n_i = (2\sigma l)^{-1} [\ln(1/R + L)], \quad (4)$$

式中 l 为激活材料的长度, L 为谐振腔往返一次损耗。由(1)和(2)式可以看出,在输出镜反射率 R 一

定的条件下,要获得高能量和窄脉宽的激光输出,主要靠增加高储能和储能利用率,即提高 n_i/n_f 和 n_i/n_i 的值来解决,所以在激光器的运转过程中,一方面应该采取措施增加有效入射抽运功率,适当增加掺 Nd³⁺ 浓度及晶体棒长度,提高抽运速率,使得 Q 开关在“关闭”的情况下可以积累更多的反转粒子数 n_i ; 另一方面也需要选用合适的谐振腔结构形式及腔参量,例如采用热稳平-平腔尽量缩短谐振腔的长度以减少腔内衍射损耗,选择输出镜的最佳透射率等。

同时 n_i 也受调 Q 重复频率 f 的约束,当 $f \gg 1/\tau$ 时,表示初始反转粒子数 n_i 还没有积累到饱和值就产生脉冲激光输出,因此脉冲能量和脉宽都不能达到最佳值;当 $f \ll 1/\tau$ 时,会造成 n_i 达到过饱和后才开始 Q 突变,此时由于自发辐射跃迁的影响,部分反转粒子数将损耗掉,这必然会影响到调 Q 器件的激光性能。由于 Nd:GdVO₄ 的上能级寿命 $\tau \approx 90 \mu\text{s}$, 所以对于声光调 Q 的 Nd:GdVO₄ 激光器来讲,它的最佳调制重复频率约在 11 kHz 左右。

在实验中,利用双激光二极管双端抽运双 Nd:GdVO₄ 短晶体棒构建平-平热稳腔,为减小射频超声波在晶体中的渡越时间,获得窄脉宽激光输出,将 Q 开关放置在腔中间位置。选取透射率 $T = 40\%$ 的输出镜,在不同重复频率下对激光器输出激光的脉宽和平均功率进行测量,然后计算出在不同调制重复频率下的脉冲激光能量 E 和脉冲峰值功率 P_M 。在双端激光二极管总入射有效抽运功率约 43 W 的条件下,分别测量了脉冲宽度 Δt_p 和平均输出功率 \bar{P} 随重复频率 f 的变化,并得出 P_M 随 f 的变化关系。

3 实验装置

实验装置如图 1 所示。其中 LD1 和 LD2 均为最大输出功率为 110 W 的光纤耦合激光器,循环水冷却,光纤芯径 400 μm,数值孔径 NA=0.22; 两块 Nd:GdVO₄ 晶体尺寸均为 4 mm × 4 mm × 8 mm, Nd³⁺ 掺杂原子数分数为 0.5%, 晶体 M_1 面镀膜为 808 nm 高透, 1063 nm 部分反射, 晶体 M_2 面镀膜为 808 nm 高透, 1063 nm 高反, 两晶体置于采用循环冷却水制冷的紫铜热沉上, 水温为 15 °C; M_3 为 1063 nm 45° 全反镜; 声光 Q 开关由 NEOS 公司生产, 射频频率为 41 MHz, 最大射频功率为 50 W; LD1 和 LD2 输出的 808 nm 激光经光学耦合系统后, 在晶体中聚焦成直径约 400 μm 的光斑; 输出的

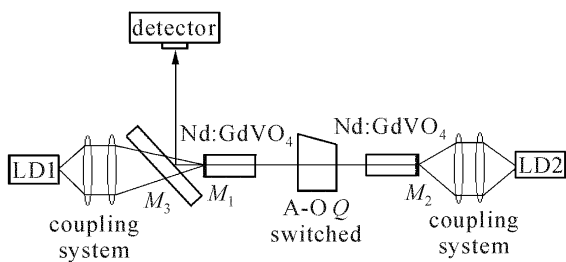


图 1 声光调 Q 装置图

Fig. 1 Setup of A-O Q-switched laser

\bar{P} 和 Δt 分别由 2835C 功率计(美国 Newport 公司)和 DET210/M 型 Si 光探测器探测, TDS3032B 示波器(美国 Tektronix 公司)显示脉冲波形。

4 实验结果及分析

图 2 和图 3 分别为激光脉冲的 Δt 和 \bar{P} 随 f 的变化曲线。由图 2 可知,随着 f 的增加, Δt 也逐渐增大,由 10 kHz 时的最短脉宽 10.2 ns 逐渐增大到 120 kHz 时的 31.6 ns。

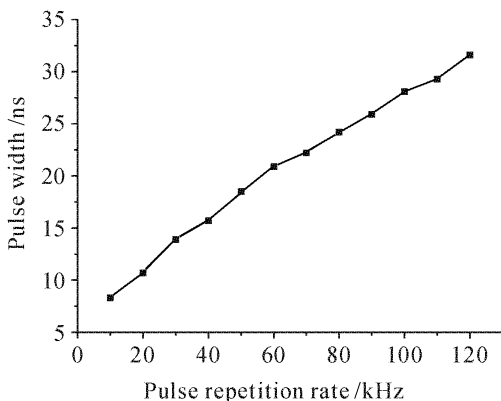


图 2 脉冲宽度与重复频率的关系

Fig. 2 Pulse width versus pulse-repetition rate

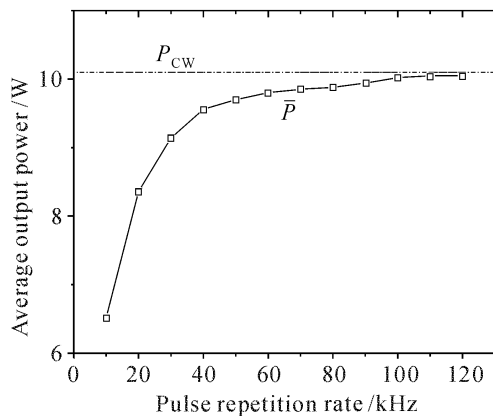


图 3 平均输出功率与重复频率的关系

Fig. 3 Average output power versus pulse-repetition rate

虽然 Nd:GdVO₄ 的上能级寿命 τ 不是很长,不

利于反转粒子数的大量积累,但由于其较大的受激发射截面,使得 $\tau \times \sigma_s = 6.84 \times 10^{-23} \text{ s} \cdot \text{cm}^2$ (这是高重复频率、窄脉宽激光二极管抽运固体激光器的一项很有利的综合指标),因此仍可获得窄脉宽的激光输出,这足可看出 Nd:GdVO₄ 晶体是非常适合于高重复频率窄脉宽的激光二极管抽运固体激光器激光输出的。由图 3 可以看出,随着重复频率的增加,平均输出功率逐步提高。当 $f > 60 \text{ kHz}$ 时,平均功率上升趋于缓慢,已接近连续功率,这时动静比接近于 1。

图 4 和图 5 分别为调制重复频率为 10 kHz 和 100 kHz 时的脉冲图。

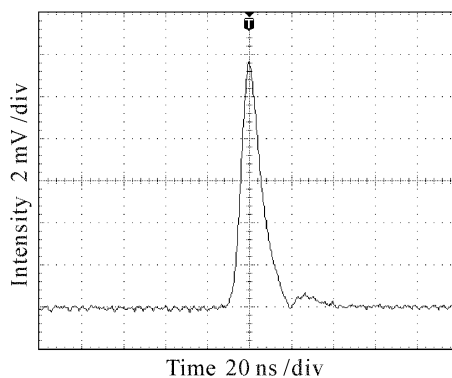


图 4 10 kHz 时的脉冲图

Fig. 4 Pulse shape at the pulse repetition rate of 10 kHz

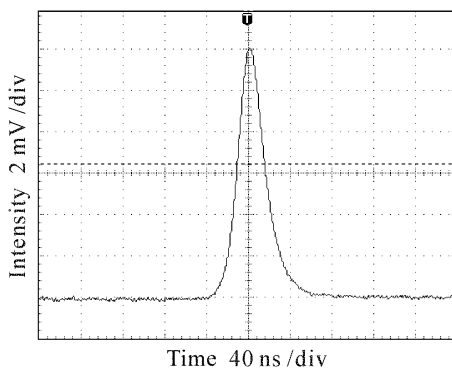


图 5 100 kHz 时的脉冲图

Fig. 5 Pulse shape at the pulse repetition rate of 100 kHz

图 6 为根据测得的 Δt_p 和 \bar{P} 推算出来的 P_M 随 f 的变化关系。由图 6 可以看出,随着 f 的增加,脉冲峰值功率 P_M 在逐渐减小。当 f 在 10~60 kHz 之间时, P_M 变化幅度很大,这主要是由两方面原因造成的:一方面,随着 f 的增大, Δt_p 增大;而另一方面, \bar{P} 随 f 的增加而趋向饱和。在这两方面的综合作用下,导致 P_M 下降趋势很大。当 f 在 60~120 kHz 之间时, P_M 下降趋势缓慢,这主要是由于 f 在此范围内

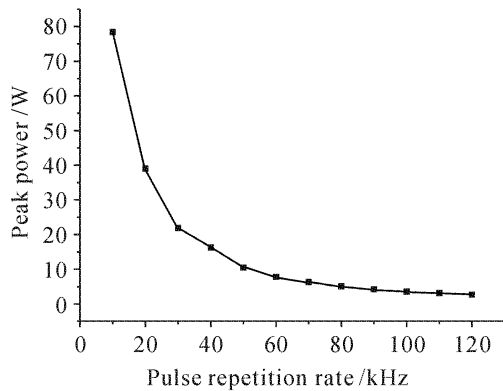


图 6 峰值功率与重复频率的关系

Fig. 6 Peak power versus pulse repetition rate

\bar{P} 变化缓慢而 Δt_p 持续增加的缘故。

5 结 论

作为一种新型的激光晶体, Nd:GdVO₄ 以其较高的热导率、较大的受激发射截面、较大的吸收系数、适中的上能级寿命及偏振输出等优异特性, 采用声光 Q 开关调制, 可确保即使在很高的重复频率下, 也可获得窄脉宽的激光输出, 在调 Q 的激光二极管固体激光器中日益发挥出巨大潜力。实验利用双激光二极管双端抽运双 Nd:GdVO₄ 晶体棒, 实现了声-光调 Q 高重复频率的 1063 nm 激光输出。在晶体入射端面总抽运功率约 43 W 的条件下, 当 $f = 10$ kHz 时, 获得 $\Delta t = 10.2$ ns, $E = 0.95$ mJ, $P_M =$

93.1 kW 的输出; 当 $f = 100$ kHz 时, 获得 $\Delta t = 28.1$ ns, $E = 0.10$ mJ, $P_M = 3.6$ kW 的输出。在今后工作中, 若能进一步优化参量, 声-光调 Q Nd:GdVO₄ 激光器还具有深入挖掘的巨大潜力, 特别是在 100 kHz 的高重复调制频率下, 相信可以取得更佳的调 Q 脉冲激光输出。

参 考 文 献

- 1 T. Jensen, V. G. Ostroumov, J. P. Meyn *et al.*. Spectroscopic characterization and laser performance of diode-laser pumped Nd:GdVO₄ [J]. *Appl. Phys. B*, 1994, **58**(5):373~379
- 2 Yin Zhao, Shen Deyuan, Ueda Ken-Ichi. A laser-diode pumped Nd:GdVO₄ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10):1374~1377
尹 钊, 沈德元, 植天宪. 激光二极管抽运的 Nd:GdVO₄ 激光器 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(10):1374~1377
- 3 Xu Fanghua, Ma Lili, Wang Zhengping *et al.*. Laser diode-pumped Nd:GdVO₄ microchip laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1166~1168
徐方华, 马丽丽, 王正平等. 激光二极管抽运 Nd:GdVO₄ 微片激光器 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1166~1168
- 4 Wei Wu, Guiqiu Li, Shengzhi Zhao *et al.*. Pulse width reduction in diode-pumped, doubly Q-switched Nd:GdVO₄/KTP green laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(7):402~404
- 5 T. Ogawa, T. Imai, K. Onodera *et al.*. Efficient pulse operation of Nd:GdVO₄ laser with AO Q-switch [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(4):521~524
- 6 Junhai Liu, Changqing Wang, Chenlin Du *et al.*. High-power actively Q-switched Nd:GdVO₄ laser end-pumped by a fiber-coupled diode-laser array [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **188**(1-4):155~162
- 7 W. Koechner. *Solid-State Laser Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2005. 469~474
W. 克希耐尔. *固体激光工程* [M]. 北京: 科学出版社, 2005. 469~474