

# LD 泵浦的声光调 Q 高重复率 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器

孙渝明 侯学元 李宇飞

(山东大学信息学院光学系, 济南 250100)

**摘要** 报道了利用 LD 泵浦、1.06 μm 声光调 Q 准连续 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器的输出特性. 当泵浦功率为 4.15 W, 重复率为 40 kHz 时, 获得的最大平均输出功率为 1.46 W, 光-光转换效率为 35.1%, 斜效率为 44.2%. 在重复率为 10 kHz 时, 获得了最短脉宽 24 ns, 最大单脉冲能量为 63.2 μJ, 相应峰值功率为 2.62 kW.

**关键词** 半导体激光器; 泵浦; Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体; 声光调 Q

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A

## 0 引言

半导体激光器 (LD) 泵浦的固体激光器 (DPSSL) 具有高效率、光束质量好、结构紧凑、寿命长等优点, 在军事、医学、信息、工业、科研等领域具有广泛的用途. Nd:GdVO<sub>4</sub> 是一种适合 LD 泵浦的新型激光晶体. 与现在广泛使用的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体相比, Nd:GdVO<sub>4</sub> 不仅对 808 nm 波长的泵浦光具有较高的吸收系数和在 1.06 μm 波长处具有较大的受激发射截面 ( $7.6 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ ), 以及较高的钕离子掺杂而不发生浓度猝灭效应, 其最大的优点是热导率高, 沿〈110〉方向的热导率高达 11.7 W/M.K, 可以与 Nd:YAG 晶体相比拟, 几乎比 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的热导率高两倍. 因此 Nd:GdVO<sub>4</sub> 是一种很有应用前景的激光晶体, 近年来引起了广泛关注, 一些文献报道了 LD 泵浦 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的基频和倍频的激光性能<sup>[1-6]</sup>.

DPSSL 的调 Q 器件具有高重复率、高平均功率和高光-光转换效率等优点, 在激光雷达、激光测距和光电对抗等方面的应用中都显现了极大的优越性. 对于 LD 泵浦的 1.06 μm 声光调 Q Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器, Zhang H. J. 等进行过相关报道<sup>[3]</sup>, 在重复率为 60 kHz, 得到了 7.25 W 的功率输出, 光-光转换效率为 38.1%, 斜效率为 42.9%. 本文报道了在短平-凹腔中利用 LD 单端泵浦声光调 Q Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器的输出特性, 比较了不同输出镜透过率和声光调制频率下激光的输出性能.

## 1 实验装置

实验装置如图 1 所示. 谐振腔采用平-凹腔, 腔长约 100 mm. 凹镜 M<sub>1</sub> 靠近泵浦端的一面镀 808 nm

增透膜, 靠近 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的一面镀 808 nm 增透膜和 1.06 μm 全反膜. 平面镜 M<sub>2</sub> 为对 1.064 μm 部分透过的输出镜. 泵浦源为光纤束耦合输出的半导体激光器系统, 输出激光中心波长为 808 nm, 数值孔径 NA=0.22, 光纤输出光束经聚焦系统后的泵浦光斑半径约为 0.44 mm. 激光晶体 Nd:GdVO<sub>4</sub> 由山东大学晶体所提供, 掺杂浓度为 1 at%, 尺寸为 4×4×6 mm<sup>3</sup>, 两通光面镀 1.06 μm 增透膜. 晶体侧面用铝箔包裹置于紫铜块内, 并用半导体致冷器冷却控温在 20 °C. 所使用的 QSGSU-6/Q 型声光 Q 开关 (中国电子科技集团公司第二十六研究所) 的长度为 20 mm, 两通光面镀 1.06 μm 增透膜, 衍射损耗为 85%, 调制重复率 1~40 kHz 可调, 中心频率为 70 MHz, 驱动电功率为 2.3 W, 电脉冲上升时间为 8 ns, 下降时间为 14 ns. 声光调 Q 器件紧靠 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体. 输出的脉冲激光能量和激光脉冲信号分别用 LPE-1B 型功率计 (中科院物理所) 和 TDS620B 数字示波器 (Tectronix Inc. USA) 测量.

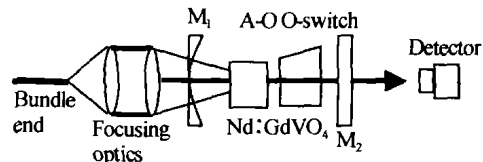


图 1 实验装置图  
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

## 2 实验结果及分析

根据调 Q 理论<sup>[7,8]</sup>, 在重复率为 f 时, 激光器的平均输出功率 P<sub>av</sub>, 单脉冲能量 E, 脉冲宽度 t<sub>p</sub> 分别为

$$P_{av} = \frac{Tf}{T+f} (n_i - n_t) h\nu V \quad (1)$$

$$E = \left(\frac{1}{\gamma}\right) V h\nu (n_i - n_t) \frac{T}{T+L} \quad (2)$$

$$t_p = \frac{2L'}{c(T+L)} \frac{n_i - n_t}{n_i - n_t [1 + \ln(n_i/n_t)]} \quad (3)$$

式中,  $T$  为输出透过率,  $n_i$  和  $n_f$  分别为初始和最终翻转粒子数,  $L$  为谐振腔的其它损耗,  $n_i$ ,  $n_t$  和  $n_f$  分别为初始、阈值和最终翻转粒子数,  $\nu$  为光子的频率,  $\gamma$  为粒子数反转因子(对于三能级系统  $\gamma = 2$ , 对于四能级系统  $\gamma = 1$ ),  $L'$  为谐振腔的光学长度,  $c$  为真空中的光速,  $V$  为光束在激光晶体中的体积. 从式(1)、(2)、(3)可以看出, 对于一定的输入能量或功率, 输出透过率  $T$  越大, 则输出能量或功率也越大. 但是  $T$  增大, 又会使阈值泵浦功率增大, 使输出功率减小. 因此, 对于一定的输入功率, 存在一个最佳输出透过率, 使得激光器具有最大的输出功率. 实验中分别对不同的输出透过率(10%, 20%, 40%, 50%)进行了比较, 对激光输出平均功率和调  $Q$  脉冲进行测量. 输出镜的透过率越小, 谐振腔内振荡光的功率密度越高, 输出功率就会趋向饱和, 激光晶体的热透镜效应也会越严重, 从而导致谐振腔进入非稳定区. 在 10% 的输出透过率下, 激光输出不稳定且脉冲波形发生畸变. 随着输出镜透过率的增大, 激光器能够稳定输出调  $Q$  脉冲的泵浦功率范围也变大. 在本实验条件下, 40% 的输出镜透过率为最佳, 激光器稳定输出的泵浦功率范围最大, 平均输出功率和单脉冲能量最高, 脉宽也最窄.

我们选取 40% 的输出透过率, 在不同的调  $Q$  重复率(10 kHz, 20 kHz, 30 kHz, 40 kHz)下, 研究了其激光输出性能. 图 2 给出了不同重复率下输出功率与泵浦功率的变化关系. 可以看出, 对应同样的泵浦功率, 在较高的重复率时, 平均输出功率也较高, 斜率效率也较高. 在重复率为 40 kHz, 泵浦功率为 4.15 W 时, 获得最大平均输出功率 1.46 W, 转换效率为 35.1%, 斜效率为 44.2%. 图 3 为在不同的调  $Q$  重复率下, 脉冲宽度随泵浦功率的变化关系曲线图. 从图 3 看出, 在重复率一定时, 脉宽随泵浦功率的增加而减小; 在同样的泵浦功率下, 脉宽随重复率的增大而增大. 在重复率为 10 kHz, 泵浦功率为 4.15 W 时, 得到最短脉宽为 24 ns, 图 4 为该脉冲的示波器记录的波形. 实验中激光为单模输出, 激

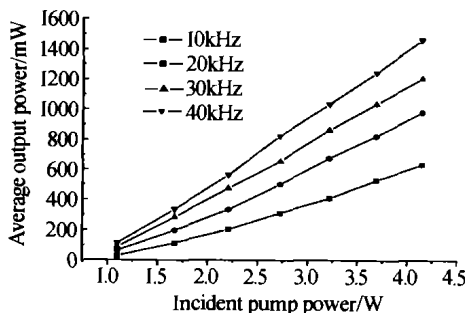


图 2 不同重复率下, 平均输出功率与泵浦功率的关系  
Fig. 2 Energy per pulse as a function of pump power at different repetition rates

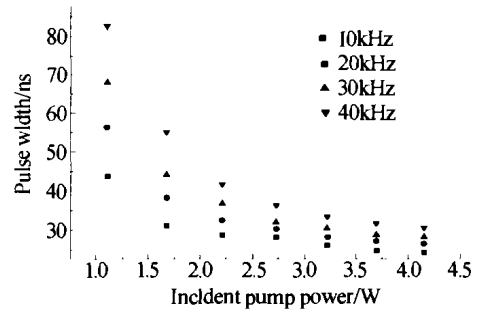


图 3 不同重复率下, 脉冲宽度与泵浦功率的关系  
Fig. 3 Energy per pulse as a function of pump power at different repetition rates

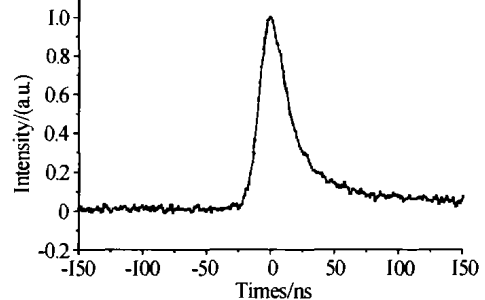


图 4 调  $Q$  脉冲的示波器波形, 脉宽 24 ns  
Fig. 4 Oscilloscope trace of a  $Q$ -switched pulse, the pulse width is 24 ns

激光器连续运转 30 min, 激光输出功率和调  $Q$  波形保持稳定.

利用公式  $E = P_{av}/f$  和  $P_{peak} = E/t_p$ , 其中  $t_p$  是脉冲宽度, 可计算出单脉冲的能量  $E$  和峰值功率  $P_{peak}$ . 图 5、6 分别为在 40% 输出透过率下, 不同重复率的单脉冲能量和峰值功率与泵浦功率的关系. 从图中可以看出, 在同样的重复率下, 单脉冲能量和峰值功率随着泵浦功率的增加而增大; 在一定的泵浦功率下, 重复率越低, 单脉冲能量越高, 又因为脉宽也变窄, 因此峰值功率就会更高. 这种现象可以用声光调  $Q$  的理论来解释<sup>[9]</sup>: 当重复率大于激光晶体的自发跃迁辐射几率  $\sigma_s$  时, 反转粒子数密度尚未达到饱和便因进入高  $Q$  状态而迅速衰减, 因此初始反转粒子数不大, 峰值功率也较小. 由于 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体激光上能级寿命约为 90 ~ 100  $\mu$ s, 因此其峰值功率应在重复率为 10 kHz 左右时为最大, 随着重复率的增加, 峰值功率将减小. 实验中, 在重复率为 10 kHz

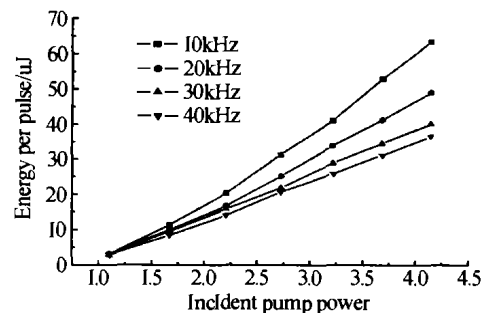


图 5 不同重复率下, 单脉冲能量与泵浦功率的关系  
Fig. 5 Pulse width as a function of pump power at different repetition rates

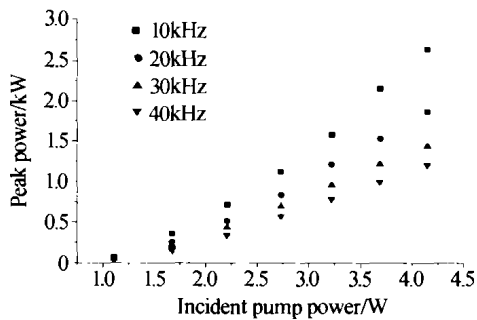


图6 不同重复率下,峰值功率和泵浦功率的关系

Fig. 6 Peak power as a function of pump power at different repetition rates

时,获得最大单脉冲能量 63.2  $\mu\text{J}$  和最大峰值功率 2.62 kW,与理论预测相符.

### 3 结论

Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体热导率高的优点,使其比 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体更适合于高功率 LD 泵浦的连续运转和准连续运转. 本文报道了 LD 泵浦的,声光调 Q 准连续 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器的输出特性. 在重复率为 40 kHz 时,得到 1.46 W 的平均功率输出,光-光转换效率为 35.1%,斜率效率为 44.2%;在重复率为 10 kHz 时,获得了最短脉宽 24.1 ns. 实验结果与理论分析吻合. 在较高的泵浦功率和较长持续时间下,未出现功率下降现象,表明 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的热透镜效应并不严重,如果进一步提高泵浦功率,可望得到更大平均功率或峰值功率的激光输出.

#### 参考文献

- 1 Wyss Chr P, Lüthy W, Weber H P, *et al.* Performance of diode-pumped 5 W Nd<sup>3+</sup>:GdVO<sub>4</sub> microchip laser at 1.06  $\mu\text{m}$ .

- 2 Liu J, Shao Z, Meng X, *et al.* High-power CW Nd:GdVO<sub>4</sub> solid-state laser end-pumped by a diode-laser-array. *Optics Communi*, 1999, **164**(4-6):199~202
- 3 Zhang H, Liu J, Wang J, *et al.* Characterization of the laser crystal Nd:GdVO<sub>4</sub>. *J Opt Soc Am(B)*, 2002, **19**(1):18~27
- 4 尹钊,沈德元,植田宪一. 激光二极管抽运的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器. *光学学报*, 2000, **20**(10):1374~1377  
Yin Z, Shen D Y, Ueda Ken-Ichi. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10):1374~1377
- 5 Liu J, Shao Z, Zhang H, *et al.* Diode-laser-array end-pumped intracavity frequency-doubled 3.6 W CW Nd:GdVO<sub>4</sub>/KTP green laser. *Optics Communi*, 2000, **173**(1-6):311~314
- 6 Liu J, Du C, Wang Z, *et al.* Diode-pumped Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> green laser formed with a flat-flat resonator. *Optics & Laser Tech*, 2001, **33**(3):177~180
- 7 克希耐尔 W. 固体激光工程(5版). 北京:科学出版社, 2002. 417  
Koechner W. *Solid-state Laser Engineering* (5<sup>th</sup> edition). Beijing: Science Press, 2002. 417
- 8 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:YVO<sub>4</sub> 激光器. *中国激光*, 2002, **A29**(6):489~491  
Du C L, Liu J H, Wang Z P, *et al.* *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **A29**(6):489~491
- 9 刘敬海,徐荣甫. 激光器件与技术. 北京:北京理工大学出版社, 1995. 161  
Liu J H, Xu R F. *Laser Device and Technology*. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995. 161

## LD-pumped A-O Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> Laser with High Repetition Rates

Sun Yuming, Hou Xueyuan, Li Yufei

Optics Department of Shandong University, Ji'nan 250100

Received date:2003-06-30

**Abstract** An acousto-optic Q-switched, LD pumped, quasi-continuous Nd:GdVO<sub>4</sub> laser at 1.06  $\mu\text{m}$  is reported. At the pump power of 4.15 W and the repetition rate of 40 kHz, the maximum average output power 1.46 W is obtained, corresponding to an optical conversion efficiency of 35.1% and a slope efficiency of 44.2%. At the repetition rate of 10 kHz, the shortest pulse width 24 ns and the highest single pulse energy 63.2  $\mu\text{J}$  are produced, corresponding to the peak power of 2.62 kW.

**Keywords** Laser-diode; Pumping; Nd:GdVO<sub>4</sub>; A-O Q-switched



**Sun Yuming** was born in 1957, in Chongqing. He graduated from physics department, Shandong University in 1981. He is now a senior engineer in Information Science & Engineering College, Shandong University. His present research interests are laser technology and its application.