

文章编号: 1000-5013(2008)03-0342-05

# 高功率 LD 抽运的 Nd: YVO<sub>4</sub> 被动调 Q 激光器

王加贤, 彭吉昌, 李立卫

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 在二极管(LD)抽运的 Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器中, 采用 Cr<sup>4+</sup>: YAG(钇铝石榴石)作为可饱和吸收体, 可获得 1.06 μm 的被动调 Q 脉冲激光输出. 当腔长为 9 cm, 抽运功率为 13.4 W 时, 得到重复频率为 38.5 kHz, 平均功率为 1.35 W 的调 Q 脉冲序列, 其单个脉冲能量为 35 μJ, 脉宽为 25 ns, 峰值功率为 1.4 kW. 比较不同腔长下平均功率随抽运功率的变化关系, 以及不同抽运功率下的脉冲重复频率、脉冲宽度和单脉冲能量; 分析热透镜效应对输出功率的影响, 以及受激粒子上转换效应对脉冲能量的影响, 结果表明, 理论分析和实验结果相一致.

关键词: 激光技术; LD 抽运; 热透镜; 上转换; Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器

中图分类号: TN 248.102

文献标识码: A

二极管(LD)抽运的 Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器具有结构紧凑、性能稳定、转换效率高和寿命长等优点. 然而, 由于 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体的受激辐射截面大、上能级寿命短、储能较低, 所以在 Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器中实现被动调 Q 相对比较困难. 近年来, 相继在 LD 抽运的 Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器中, 采用 Cr<sup>4+</sup>: YAG 和 GaAs 作为可饱和吸收体实现被动调 Q<sup>[1-3]</sup>, 但这些研究大多采用低功率的 LD 抽运. 本文在较大功率的 LD 连续抽运下, 实现 Cr<sup>4+</sup>: YAG 对 Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器的被动调 Q, 从实验和理论两个方面对 LD 抽运的 Nd: YVO<sub>4</sub> 被动调 Q 激光器输出特性进行了研究.

## 1 实验装置

实验装置如图 1 所示. 作为抽运源的 LD 带有微通道冷却, 其在 25 °C 时的工作波长为 808 nm, 经芯径 600 μm, 数值孔径 0.22 的光纤耦合输出, 再经泵浦耦合镜头准直聚焦后, 端面抽运 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体. Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体采用 a 向切割, 尺寸为 4 mm × 4 mm × 8 mm, 掺杂的质量分数为 0.5%, 通光长度为 8 mm, 两个通光面镀上 808 nm 和 1.06 μm 激光的增透膜, 晶体用微通道热沉通水冷却. Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器采用简单的平凹腔结构, M<sub>1</sub> 是对 808 nm 高透且对 1.06 μm 高反的, 曲率半径为 50 cm 的凹面镜, M<sub>2</sub> 是对 808 nm 高透且对 1.06 μm 透过率为 15% 的平面输出镜. SA 是作为可饱和吸收体的 Cr<sup>4+</sup>: YAG 晶体, 通光长度为 2 mm, 两面抛光并镀上 1.06 μm 增透膜, 对 1.06 μm 激光的初始透过率为 63%. 该晶体夹在两片钻有适当小孔的铜片之间, 铜片置于热沉板上通循环水冷却, 冷却水的温度控制在 20 °C. 输出激光由硅快速光电二极管 PIN 接收, 输入到 HP 公司的 300 MHz 存储示波器(OSC)上观察和显示脉冲波形, 用 Molelectron Detector 公司的

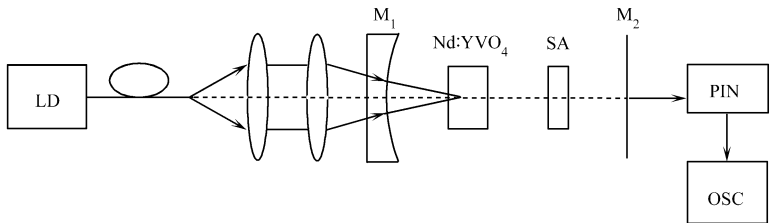


图 1 被动调 Q 激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of passively Q-switched laser

收稿日期: 2007-11-02

作者简介: 王加贤(1955-), 男, 教授, 主要从事固体激光技术与器件的研究. E-mail: wangjx@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(A0619923); 国务院侨办科研基金资助项目(05QZR11)

功率计测量激光功率.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 激光器的输出功率与抽运功率的关系

在自由运转(未调 Q)和调 Q 运转下,测量激光器在腔长分别为 9, 15, 22 cm 时的输出平均功率,平均功率( $P$ )随抽运功率( $P_{in}$ )的变化如图 2 所示.由图 2 看出,对于 3 种不同的腔长,在抽运功率较小的情况下,输出的平均功率随抽运功率的增加而增加.当  $L=22$  cm 时,随着抽运功率的增加,平均功率达最大值后随即呈下降趋势;而当  $L=9, 15$  cm 时,平均功率依然递增;当抽运功率增加到一定值(约 15 W),对于  $L=9$  cm,呈饱和现象;而对于  $L=15$  cm,平均功率达最大值后转呈下降趋势,这主要是热透镜效应造成的.可以看出,热透镜效应对短腔影响不明显,但对长腔且大功率抽运时影响明显.

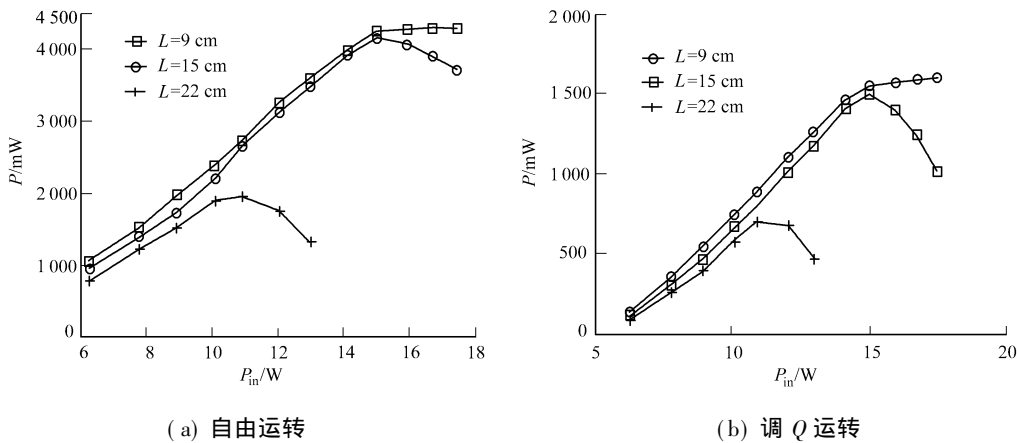


图 2 平均功率随抽运功率的变化

Fig. 2 Average output power variation with different pump power

### 2.2 热透镜效应对输出功率的影响

在光抽运作用下,固体激光介质等效为一个焦距为  $F$  的,随抽运功率的变化而变化的热透镜,等效的腔结构如图 3 所示.热透镜公式<sup>[4]</sup>为

$$F = \frac{\pi k_c \omega_p^2}{P_{in} \eta_{abs} \eta_b (dn/dT) [1 - \exp(-\alpha_p l)]}. \quad (1)$$

式(1)中,  $k_c$  为热导率,  $\omega_p$  为抽运光斑半径,  $dn/dT$  为热光系数,  $\alpha_p$  为介质吸收系数,  $l$  为激光晶体长度,  $P_{in}$  为抽运功率,  $\eta_b$  为吸收的能量转化为热量的转化系数,  $\eta_{abs}$  为介质对抽运光的吸收系数.对于掺杂质量分数为 0.5% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,  $k_c = 0.054$  ( $\text{cm} \cdot \text{K}$ )<sup>-1</sup>,  $dn/dT = (4.7 \pm 0.6) \text{MK}^{-1}$ ,  $\alpha_p = 14.8 \text{cm}^{-1}$ ,  $\eta_b = 20\%$ ,  $\eta_{abs} = 86.2\%$ <sup>[5]</sup>.本实验中,  $l = 8 \text{mm}$ ,  $\omega_p = 460 \mu\text{m}$ .由于激光腔输出镜为平面镜,故腔内激光束腰位于输出镜面上,即  $\omega_0 = \omega_2$ .采用  $g$  参数法<sup>[6]</sup>,有

$$g_1 = 1 - \frac{L - L_1}{F} - \frac{L_0}{R_1}, \quad g_2 = 1 - \frac{L_1}{F}. \quad (2)$$

式(2)中,  $L_0 = L - \frac{L_1(L - L_1)}{F}$ ,  $R_1 = 500 \text{mm}$ ,  $L_1 = 3 \text{mm}$ .由此可得输出镜面上高斯光束的束腰半径为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\lambda}{\pi}} \left[ \frac{g_1}{g_2(1 - g_1 g_2)} \right]^{\frac{1}{4}}. \quad (3)$$

分别取  $L = 9, 15, 22$  cm,将式(1),(2)代入式(3),由此解出束腰半径与抽运功率及腔长的关系,如图 4 所示.可以看出,随着抽运功率的增加及短腔的情况下,光腰变化很小;但随着腔长的增加,腔内光腰因为热透镜焦距的减小而迅速减小.当抽运功率增加到一定值时,对于  $L = 22$  cm 的长腔,谐振腔会逸出稳定区,由此可对实验结果做出合理的解释.在短腔时,输出平均功率近似的线性随抽运功率增大.这是因为热透镜效应对谐振腔的影响较小,束腰半径变化不大,在长腔时,随着抽运功率的增大,晶体的热

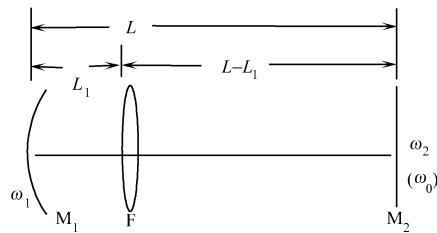


图 3 等效的腔结构

Fig. 3 Equivalent resonator structure

透镜效应对谐振腔的影响明显, 高斯光束的束腰半径减小, 热致衍射损耗增大<sup>[7]</sup>, 从而导致输出平均功率的降低.

2.3 抽运功率对调 Q 激光重复频率和脉冲宽度的影响

固定腔长  $L = 9\text{ cm}$ , 测量在不同抽运功率下的脉冲重复频率( $f$ )和脉冲宽度( $W$ ), 实验结果如图 5 所示. 在较佳的实验条件下, 即抽运功率为  $13.4\text{ W}$  时, 得到重复率  $38.5\text{ kHz}$ , 平均功率  $1.35\text{ W}$  的调 Q 脉冲序列, 单个脉冲能量为  $35\text{ }\mu\text{J}$ , 脉宽为  $25\text{ ns}$ , 峰值功率为  $1.4\text{ kW}$ . 示波器上观察到的  $12\text{ W}$  抽运功率下, 调 Q 脉冲序列和相应展开后的单脉冲波形, 分别如图 6(a), (b) 所示. 从图 5(a) 可以看出当抽运功率较小时, 调 Q 脉冲重复频率随着抽运功率的增加而增加. 抽运功率的不断加, 调 Q 脉冲重复频率的增加逐渐趋缓. 抽运功率较小时, 脉

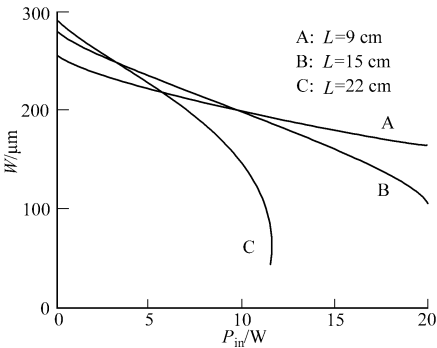
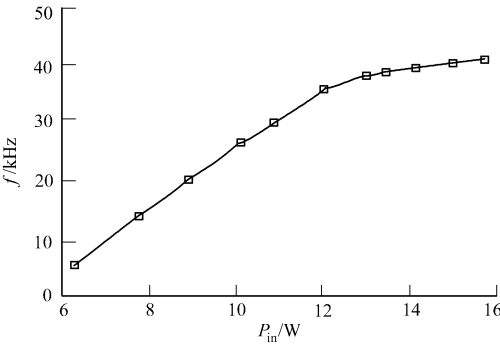
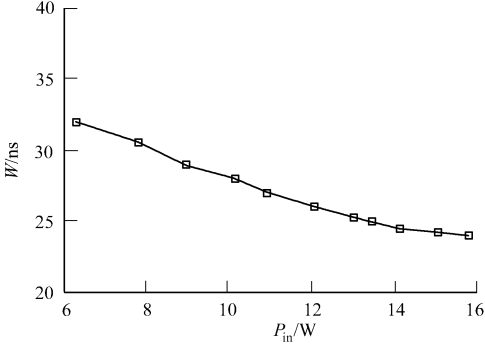


图 4 腰斑半径随抽运功率的变化

Fig.4 Radius of the beam waist variation with differnt pump power



(a) 脉冲重复频率



(b) 脉冲宽度

图 5 抽运功率对脉冲重复频率和宽度的影响

Fig.5 Pulse repetition rate and pulse duration versus pump power

冲重复频率随着抽运功率的增加而增加. 究其原因是, 抽运功率的增加, 导致了激光工作物质上能级反转粒子数密度增加; 激光腔内的净增益系数变大, 增益达到调 Q 阈值的时间变短. 所以, 漂白可饱和吸收体时间间隔也相应的缩小, 缩短了调 Q 周期, 重复频率提高.

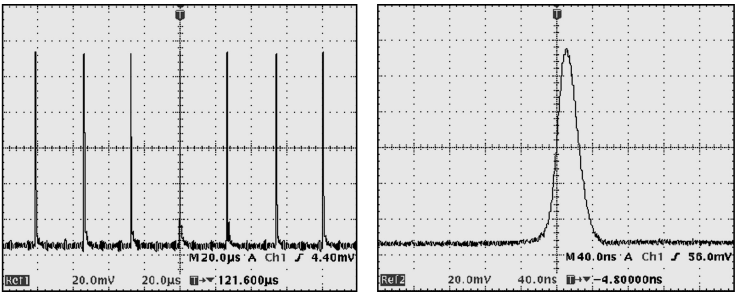
抽运功率较大时, 调 Q 脉冲重复频率增加变缓有如下两个原因.

(1) 当抽运功率增加到一定程度时,

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  的激发态吸收加剧, 减小了  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  上能级的粒子数, 延长了  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被漂白的时. (2) 当抽运功率较大时, 增益介质的激发态吸收和能量传递上转换的作用, 使得增益介质上能级的粒子数下降, 所以自发辐射的光强较小, 不易使吸收体饱和. 从图 5(b) 可以看出, 脉冲宽度随着抽运功率的增加而减小. 这是因为抽运功率的增加使激光腔内的净增益系数变大, 加快了腔内光子数的增长和上能级反转粒子数的衰减, 导致调 Q 脉冲的建立和关闭过程越短, 单脉冲的宽度变窄.

2.4 受激粒子上转换效应对单脉冲能量的影响

由实验结果计算出的单脉冲能量随抽运功率的变化, 如图 7 所示. 从图 7 可以看出, 单脉冲能量( $E$ )随抽运功率的增加而增加, 这可以从受激粒子上转换效应(ETU)分析这一实验结果. 受激粒子上转换效应是处于激光上能级的两个 Nd 粒子相互作用, 其中一个粒子跃迁到激光下能级, 另一个粒子被激发到较高能级, 因此它减少了激发态的粒子数和粒子寿命<sup>[8]</sup>.



(a) 调 Q 脉冲序列 ( $20\text{ }\mu\text{s} \cdot \text{格}^{-1}$ ) (b) 单脉冲波形 ( $40\text{ ns} \cdot \text{格}^{-1}$ )

图 6 12 W 抽运功率下的脉冲波形

Fig.6 Pulse wave form for pump power of 12 W

Hardman 等<sup>[9]</sup>测量了端面抽运的 Nd:YLF 激光器在输出和不输出两种不同状态下热透镜效应,发现 ETU 过程导致激光器不输出比输出时的热透镜效应大得多. 在调 Q 激光器中重复频率较低时,激光上能级的粒子数来不及消耗,因此上能级积累的粒子数较多,上转换概率较大. 上转换产生的热量增加,热透镜效应增强,使腔内的附加损耗增加<sup>[10]</sup>. 由此可以看出,在其他条件不变的情况下,激光腔内的损耗是重复频率的函数,设为  $\delta_i$ . 对于调 Q 激光器,在抽运功率低即重复频率低时,  $\delta_i$  值大;而当抽运功率高即重复频率高时,  $\delta_i$  值小<sup>[11]</sup>. 文[12]给出的被动调 Q 的单脉冲能量  $E$ ,  $\frac{\Delta n_{i0}}{\Delta n_i}$ ,

$\frac{\Delta n_i}{\Delta n_i}$  分别为

$$E = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln \frac{\Delta n_i}{\Delta n_i}, \tag{4}$$

$$\frac{\Delta n_{i0}}{\Delta n_i} = \frac{\ln(1/R) + (\sigma_2/\sigma_1) \ln(1/T_0^2) + \delta_i}{\ln(1/R) + \ln(1/T_0^2) + \delta_i}, \tag{5}$$

$$\frac{\Delta n_i}{\Delta n_i} = 1 + \left(\frac{\Delta n_{i0}}{\Delta n_i}\right) \ln\left(\frac{\Delta n_i}{\Delta n_i}\right) - \left(1 - \frac{\Delta n_{i0}}{\Delta n_i}\right) \left[1 - \left(\frac{\Delta n_i}{\Delta n_i}\right)^\alpha\right] / \alpha. \tag{6}$$

式(4), (5)中,  $\sigma_1, \sigma_2$  为 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的基态和激发态吸收截面,  $R$  为输出镜反射率,  $h\nu$  为光子能量,  $A$  为 Nd:YVO<sub>4</sub> 中的光束截面面积,  $\Delta n_i$  为初始反转粒子数密度,  $\Delta n_i$  为脉冲结束时反转粒子数密度.  $T_0$  为 Cr<sup>4+</sup>:YAG 初始透过率,  $\Delta n_{i0}$  为引入的参量,是  $\alpha \rightarrow \infty$  情况下脉冲峰值时的反转粒子数密度.  $\alpha = \sigma_1/\gamma\sigma$ , 其中  $\sigma$  为 Nd:YVO<sub>4</sub> 的受激发射截面,  $\gamma$  为反转因子,对于四能级系统<sup>[13]</sup>,  $\gamma$  取值为 1. 把式(5)代入式(6),数值求解  $\ln(\frac{\Delta n_i}{\Delta n_i})$ , 并比较在不同损耗即不同重复频率时的  $\ln(\frac{\Delta n_i}{\Delta n_i})$ .

对于 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器实验, 参数为  $R=0.85$ ,  $T_0=0.63$ ,  $\sigma=160\text{ pm}^2$ <sup>[6]</sup>,  $\sigma_1=430\text{ pm}^2$ ,  $\sigma_2=82\text{ pm}^2$ <sup>[12]</sup>,  $\gamma=1$ ,  $\delta=0.05$ ,  $\Delta\delta=0.005$ , 计算结果如图 8 所示. 从图 8 可以看出,  $\ln(\Delta n_i/\Delta n_i)$  随腔内损耗  $\delta_i$  的减小而增加, 即随重复频率的增加而增加.

由式(4)可知,  $\ln(\Delta n_i/\Delta n_i)$  的增加必然导致单脉冲能量  $E$  的增加. 这表明单脉冲能量随抽运功率的增加而增加, 与图 7 所示的实验结果相吻合. 从图 7 可以看出, 随着抽运功率的不断 增加, 出现了饱和现象. 这是因为, 抽运功率较大时, 重复频率的增加变缓(图 5), 相应的激光腔内的损耗  $\delta$  减小变缓, 使得  $\ln(\Delta n_i/\Delta n_i)$  的增加变缓. 由式(4)易知,  $\ln(\Delta n_i/\Delta n_i)$  的增加变缓必然导致单脉冲能量的增加变缓, 因此出现饱和现象.

### 3 结束语

对 LD 抽运, Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的输出特性进行理论和实验研究. 结果表明, 抽运功率和谐振腔长度都会影响激光器输出的平均功率、脉冲重复频率、脉冲宽度和单脉冲能量. 对于较长的谐振腔, 激光晶体的热透镜效应导致在抽运功率较大时, 激光器输出功率随抽运功率的增加而下降. 随着抽运功率的增加, 脉冲的重复频率和脉冲能量增加, 而脉冲宽度减小. 可根据上述变化规律合理选择激光器的参数和抽运功率, 以满足实际应用的需要.

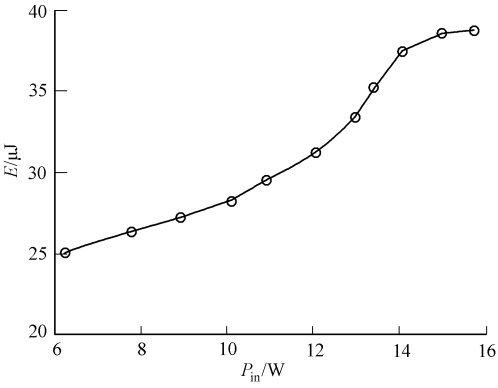


图 7 单脉冲能量随抽运功率的变化

Fig. 7 Single pulse energy variation with different pump power

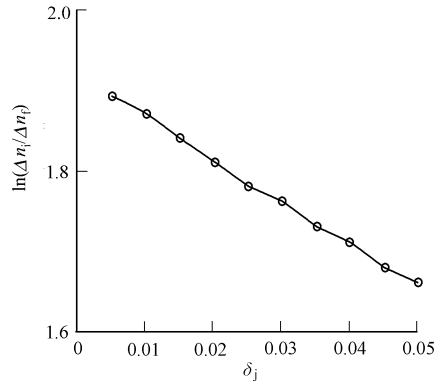


图 8  $\ln(\Delta n_i/\Delta n_i)$  随  $\delta_i$  的变化

Fig. 8  $\ln(\Delta n_i/\Delta n_i)$  variation with different  $\delta_i$

## 参考文献:

- [1] 杨成伟, 霍玉晶, 尹晓东, 等. 激光二极管抽运  $\text{Cr}^{4+}$ : YAG 被动调  $Q$  Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器的实验研究[J]. 中国激光, 2004, 31(1): 1-4.
- [2] 杨克建, 赵圣之, 赵宏明, 等. LD 泵浦 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体 GaAs 被动调  $Q$  激光理论和实验研究[J]. 光子学报, 2005, 34(2): 169-172.
- [3] 柳 强, 巩马理, 闫 平, 等. LD 光纤耦合端面泵浦 Nd: YVO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>: YAG 激光器[J]. 激光技术, 2002, 26(6): 401-402.
- [4] INNOCENZI M E, YURA H T, FINCHER C L, et al. Thermal modeling of continuous wave end-pumped solid state lasers[J]. Applied Physics Letters, 1990, 56(19): 1831-1833.
- [5] 张潮波, 宋 峰, 孟凡臻, 等. 利用输出功率测量激光二极管端面抽运的固体激光器热透镜焦距[J]. 物理学报, 2002, 51(7): 1517-1520.
- [6] KOECHNER W. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 54-55, 184-185.
- [7] 郑加安, 赵圣之, 王青圃, 等. 晶体热效应对 LD 端面泵浦固体激光器优化设计的影响[J]. 光子学报, 2001, 30(6): 724-729.
- [8] GUYOT Y, MANAA H, RIVOIRE J Y, et al. Excited-state absorption and upconversion studies of Nd<sup>3+</sup>-doped single crystals Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, YLiF<sub>4</sub>, and LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub>[J]. Physical Review (B), 1995, 51(2): 784-799.
- [9] HARDMAN P J, CLARKSON W A, FRIEL G J, et al. Energy-transfer upconversion and thermal lensing in high-power end-pumped Nd: YLiF<sub>4</sub> laser crystals[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(4): 647-655.
- [10] 冯 衍, 宋 峰, 赵丽娟, 等. LD 抽运 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体中的上转换及其影响[J]. 物理学报, 2001, 50(2): 335-340.
- [11] 杨 林, 黄维玲, 丘军林, 等. Cr<sup>4+</sup>: YAG 被动调  $Q$  激光器中受激粒子上转换效应对脉冲的影响研究[J]. 物理学报, 2003, 52(10): 2471-2475.
- [12] 张行愚, 赵圣之, 王青圃, 等. Cr<sup>4+</sup>: YAG 调  $Q$  特性的理论和实验研究[J]. 光学学报, 1998, 18(9): 1180-1185.
- [13] 吴念乐, 吕亚军, 陆兴华, 等. 含 Cr 离子饱和吸收体被动调  $Q$  解析解[J]. 光学学报, 1996, 16(12): 1813-1818.

## Investigation on Passively $Q$ Switched Nd: YVO<sub>4</sub> Laser Pumped by High-Power Laser Diode

WANG Jia-xian, PENG Ji-chang, LI Li-wei

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** A Cr<sup>4+</sup>: YAG saturable absorber was inserted into a diode end-pumped Nd: YVO<sub>4</sub> laser and passively  $Q$ -switched pulses at the wavelength of 1.06  $\mu\text{m}$  was realized. When the pump power was 13.4 W and the cavity length was 9 cm, the pulse trains with average output power of 1.35 W, repetition rate of 38.5 kHz, pulse duration of 25 ns, single pulse energy of 35  $\mu\text{J}$  and peak power of 1.4 kW were obtained. In experiment, the relation of average output power versus pump power was studied for different cavity length, and the pulse repetition rate, the pulse duration and single pulse energy were also compared for different pump power. In theory, the influence of thermal lens on the output power was investigated, and the influence of energy transfer upconversion effect on the pulse energy was also analyzed. The theoretical analysis was consistent with the experimental result.

**Keywords:** laser technique; laser diode pump; thermal lens; upconversion; Nd: YVO<sub>4</sub> laser

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)