

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0049-03

# LD 抽运的小型化高重复频率被动 Q 开关激光器

张大勇, 赵鸿, 姜东升, 王建军, 赵书云, 杨涛, 周寿桓

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要** 介绍了 LD 端面抽运的 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动 Q 开关激光器的基本原理,并给出了相关的仿真和实验结果。最终在 2 kHz 的高重复频率下得到了单脉冲能量为 33 μJ,脉冲宽度为 3.9 ns 稳定的单纵模激光输出。

**关键词** 激光技术; LD 抽运; Cr<sup>4+</sup>:YAG; 被动 Q 开关; 高重复频率; 单纵模

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

## Study on LD End-Pumped and Passively Q-Switched Miniature Laser with High Repetition

ZHANG Da-yong, ZHAO Hong, JIANG Dong-sheng, WANG Jian-jun,  
ZHAO Shu-yun, YANG Tao, ZHOU Shou-huan

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract** The principle of LD end-pumped and passively Q-switched Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG laser is introduced in the paper; the result of relative simulation and experiment is also presented. The stable single longitude mode laser pulse with energy of 33 μJ and FWHM of 3.9 ns with 2 kHz high repetition is acquired.

**Key words** laser technique; LD end-pump; Cr<sup>4+</sup>:YAG; passively Q-switch; high repetition; single longitude mode

近年来发展起来的掺 Cr<sup>4+</sup>离子晶体如 Cr<sup>4+</sup>:YAG, Cr<sup>4+</sup>:Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, Cr<sup>4+</sup>:GSGG, Cr<sup>4+</sup>:YSO 等作为掺 Nd<sup>3+</sup>离子固体激光器的被动 Q 开关引起了人们的极大兴趣,其中 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体由于具有优良的物化性能及适中的可饱和吸收特性从而倍受关注。

### 1 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的可饱和吸收特性

Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体具有显著的可饱和吸收特性(0.9~1.2 μm)<sup>[1]</sup>,是近年来人们发现的新型 Nd 激光 Q 开关材料。

Cr<sup>4+</sup>:YAG 的饱和吸收特性可由图 1 所示的四能级模型描述<sup>[2]</sup>。与基态吸收和激发态吸收(饱和吸收)相联系的分别是 1-3 和 2-4 跃迁,其吸收截面分别为  $\sigma_s$  和  $\sigma_{ESA}$ 。基态 1 的粒子吸收光子跃迁到态 3,态 3 的寿命非常短(约为 ps 量级),粒子很快弛豫到态 2。态 2 到态 4 的吸收为激发态吸收,粒子到达态 4 后又很快弛豫到态 2(约为 ps 量级)。在室温下,第一激发态 2 的寿命约为 3.4 μs。所以,态 3 和态 4 的粒子布居数可以忽略,只有态 1 和态 2 可以实现稳态布居。

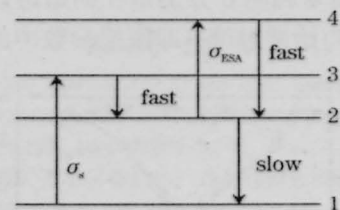


图 1 Cr<sup>4+</sup>:YAG 的能级图

Fig.1 Schematic of the level structure of Cr<sup>4+</sup>:YAG

对 Cr<sup>4+</sup>:YAG 而言,在低光强照射下,Cr<sup>4+</sup>离子大部分处于基态,因而有大的基态到激发态吸收;随着光强的增加,大量的 Cr<sup>4+</sup>离子被激发到激发态,基态吸收趋于饱和。然而大量的 Cr<sup>4+</sup>离子处于激发态会引起激发态吸收,激发态吸收使材料的饱和透过率小于 100%,增加了可饱和吸收体的插入损耗,不仅影响激光输出能量,而且使高平均功率工作时晶体需要冷却。

### 2 被动 Q 开关激光器输出特性的仿真

Cr<sup>4+</sup>离子掺杂的可饱和吸收体带有明显的激发态吸收,其用作被动 Q 开关时的激光速率方程如下<sup>[3]</sup>:

作者简介: 张大勇(1975-),男,华北光电技术研究所硕士研究生,主要从事小型高重复频率二极管抽运激光技术的研究。

Email: zdy75@sina.com

$$\frac{d\phi}{dt} = \left[ 2\sigma_g N_g J_g - 2\sigma_s N_s J_s - 2\sigma_{ESA} (N_{si} - N_s) t_s - \left[ \ln\left(\frac{1}{R}\right) + L \right] \right] \frac{\phi}{t_r}$$

$$\frac{dN_g}{dt} = \Lambda_p - \frac{N_g}{t_g} - \gamma_g \sigma_g c \phi N_g$$

$$\frac{dN_s}{dt} = \frac{1}{t_s} (N_{si} - N_s) - \gamma_s \sigma_s c \phi N_s \frac{A_g}{A_s}$$

其中  $\phi$ ,  $N_g$ ,  $N_s$  分别为腔内光子密度、增益介质内的粒子反转密度和可饱和吸收体内的基态瞬时粒子布居密度。

图 2 是从该耦合方程出发得到的被动 Q 开关激光器的仿真曲线,其中各系数及边界条件的选取详见文献[5]。

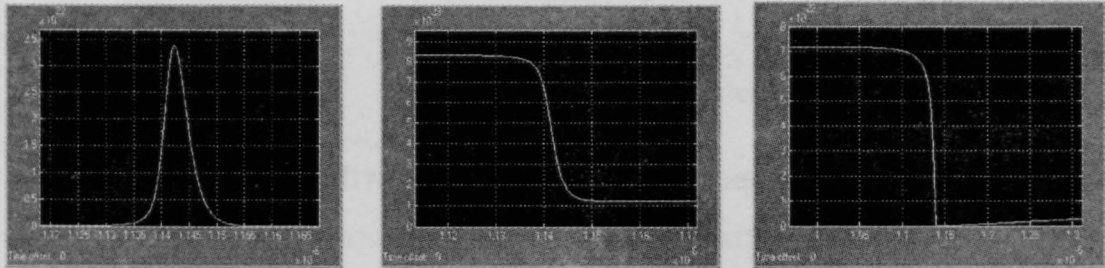


图 2 光子数密度、粒子反转密度和初始基态布居密度仿真曲线

Fig.2 Simulative graph of photon density, populations inversion density and initial ground state populations density

### 3 各参数对激光器输出特性的影响

在仿真中,改变抽运速率,从输出脉冲的形状几乎看不到变化。由于脉冲建立时间只有十几个纳秒,在这极短的时间内抽运过程的影响是极小的,以致于可以忽略不计。

图 3, 图 4 和图 5 分别是在初始透过率较大的情况下改变初始透过率 [即模拟参数中的可饱和吸

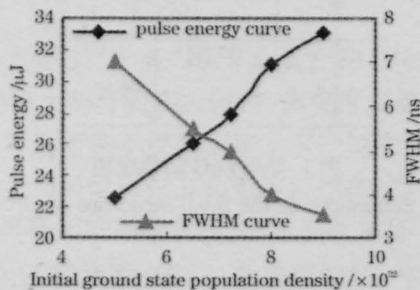


图 3 脉冲能量和宽度随可饱和吸收体的初始基态布居密度变化曲线

Fig.3 Graph of pulse energy and FWHM versus initial ground state populations density of SA

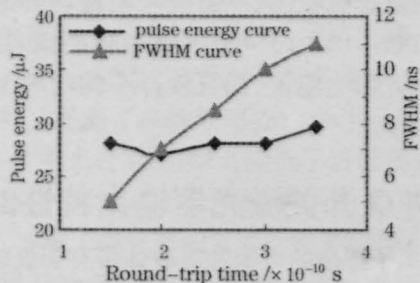


图 4 脉冲能量和宽度随光子在腔内的渡越时间变化曲线  
Fig.4 Graph of pulse energy and FWHM versus round-trip time

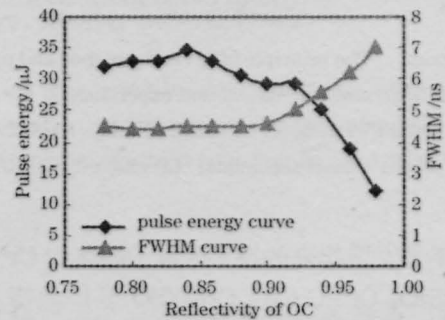


图 5 脉冲能量和宽度随输出耦合镜的反射率变化曲线

Fig.5 Graph of pulse energy and FWHM versus reflectivity of OC

收体的初始基态布居密度  $N_{si}, N_{si} = \ln(1/T_0)/\sigma_s J_s$ , 腔长(即模拟参量中的腔内渡越时间  $t_r$ )和输出耦合镜反射率得到的脉冲能量和脉宽的变化仿真曲线图,从图中可非常直观地得到这些参量对激光器输出特性的影响。

### 4 被动 Q 开关激光器的输出结果及讨论

图 6 是被动 Q 开关激光器的装置原理图。连续输出 2 W 的 LD 抽运光经耦合系统进入  $\phi 2 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  的 Nd:YAG 晶体中,YAG 的一端镀 808 nm 的增透膜和 1064 nm 的全反膜,另一端镀 1064 nm 的增透膜。全反膜与输出耦合镜构成谐振腔,将初始透过率约为 90% 的  $\text{Cr}^{++}$ :YAG 晶体插入腔中,两端镀 1064 nm 的增透膜。输出耦合镜曲率半径为  $r = 500 \text{ mm}$ ,耦合透过率 8%。图 7 是该激光器一个典型的脉冲波形图,脉宽约为 5.7 ns。在连续输出 2 W 的 LD 抽运允许的情况下适当地减小 Q 开关的初始

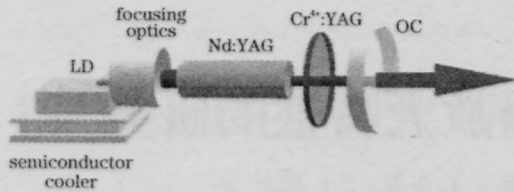


图 6 被动 Q 开关激光器实验布局图

Fig.6 Experimental schematic of passively Q-switched laser

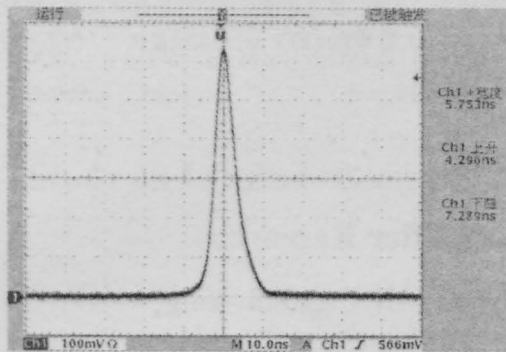


图 7 激光器输出实验脉冲波形

Fig.7 Experimental pulse scope of the laser's output

透过率,得到的最小脉宽可达 3.9 ns,此时的脉冲能量约为 33 μJ。

该激光器在设计时采用方波脉冲抽运方式,可以通过适当地选择抽运脉冲的脉宽和幅度使激光发射脉冲的频率与抽运脉冲的频率一致,从而实现激光脉冲频率的外部调制,以这种方式激光器可在 2 kHz 的频率下稳定地工作。激光器一个典型的抽

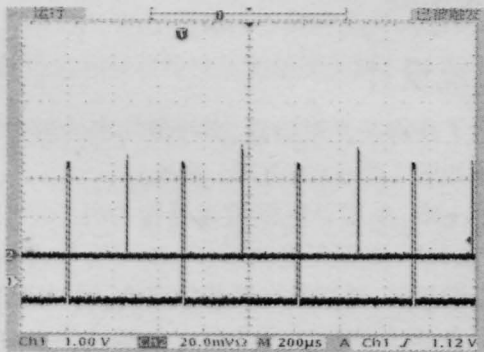


图 8 抽运触发脉冲与激光脉冲延时关系图

Fig.8 Scope of relation between pumping trigger pulses and laser pulses

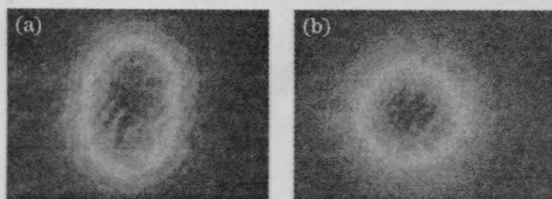


图 9 激光光束截面图

Fig.9 Cross image of laser beam

(a) With Cr³⁺:YAG; (b) without Cr³⁺:YAG

运触发脉冲与激光脉冲的延时关系如图 8 所示。

另外,在不采取其他改善激光器光束质量措施的情况下,Cr³⁺:YAG 被动 Q 开关激光器依然能实现比较好的光束质量,这应归结于 Cr³⁺:YAG 晶体本身的选模作用<sup>[6]</sup>。

图 9 是实验中用光束分析仪采集的插入 Cr³⁺:YAG 晶体前后的激光光束截面图,从图中可非常直观地看出 Cr³⁺:YAG 晶体对光束空间分布的改善作用。

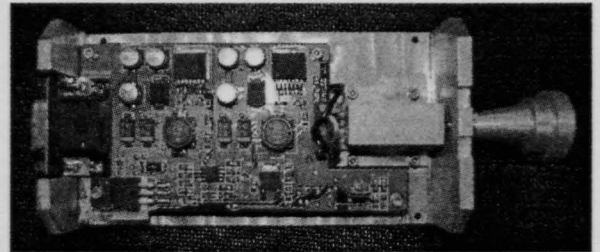


图 10 整机结构图

Fig.10 Full image of the laser

由于 Cr³⁺:YAG 晶体形成的所谓空间“损耗光栅”<sup>[6]</sup>,使其也具有纵模选择作用。在示波器上可以观察采样波形,脉冲保持长时间稳定,未看到拍频波形;通过 F-P 标准具也可以清晰地观察到一套干涉条纹,这都可证明该激光器运转在单纵模状态。

### 参考文献

- 1 Ouyang Bin, Ding Yanhua, Wan Xiaoke *et al.* Saturable absorption of Cr³⁺:YAG and its performance as passive Q-switches [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(12):1665-1670
- 2 欧阳斌,丁彦华,万小珂等.Cr³⁺:YAG 的可饱和吸收特性与被动 Q 开关性能研究[J]. *光学学报*, 1996, **16**(12):1665-1670
- 3 Huang Caohong, Yin Saotang. The development of new Q-switching material: Cr³⁺:YAG [J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2001, **18**(4):289-292
- 4 黄朝红,殷绍唐.新型 Q 开关材料 Cr³⁺:YAG 的研究概况[J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(4):289-292
- 5 A. Agnesi, S. D. Acqua, C. Morello *et al.* Diode-pumped neodymium laser repetitively Q-switched by Cr³⁺:YAG solid-state saturable absorbers [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 1997, **3**(1):45-52
- 6 Zhang Dayong. Study on the technology of LD end-pumped and Q-switched lasers with high repetition rate [D]. Master Paper of NCRIEO, 2003, 34-36
- 7 张大勇.LD 抽运的高重复 Q 开关激光技术研究[D].华北光电技术研究所硕士学位论文, 2003, 34-36
- 8 Zheng Quan, Chen Yingxin, Zhao Ling *et al.* Mode selection effects of Cr:YAG as passive Q-switches [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(5):550-552
- 9 郑权,陈颖新,赵岭等.可饱和吸收体 Cr:YAG 作被动 Q 元件时的选模作用[J]. *光子学报*, 2002, **31**(5):550-552
- 10 Y. C. Chen, Li Shiqun, K. K. Lee *et al.* Self-stabilized single-longitudinal-mode operation in a self-Q-switched Cr, Nd:YAG laser[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(17):1418-1419