

# 用 $\text{Cr}^{4+}$ ·YAG 作被动调 $Q$ 的准连续板条 Nd ·YAG 激光器的性能研究

范安辅<sup>1</sup> 杨成龙<sup>2</sup> 徐天华<sup>3</sup> 王卫民<sup>2</sup> 陈津燕<sup>2</sup> 周 昕<sup>1</sup> 黄援朝<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 四川大学光电科学技术系 成都 610064; <sup>2</sup> 西南流体物理研究所; <sup>3</sup> 西南技术物理研究所)

**提要** 报道了用  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 作被动调  $Q$ , 重复率为 100 Hz 的激光二极管泵浦的准连续板条 Nd ·YAG 激光器的性能。观察到调  $Q$  脉冲的阈值泵浦功率、脉冲宽度、输出功率和调  $Q$  效率均与泵浦脉冲的宽度有关。得到 37.4 ns(FWHM) 的调  $Q$  脉冲。

**关键词**  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG, 被动调  $Q$ , 板条激光器

近年来发现掺四价的钪铝石榴石晶体( $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG)在  $1 \mu\text{m}$  附近具有可饱和吸收特性<sup>[1-3]</sup>。人们还详细研究了  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶体的光谱和能级结构<sup>[4]</sup>。 $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶体作为非线性可饱和吸收体可用于  $1.0 \sim 1.2 \mu\text{m}$  波段的被动调  $Q$ <sup>[3,5,6]</sup>。闪光灯泵浦的 Nd ·YAG 激光器用  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶体调  $Q$ , 已经得到了 65 ns<sup>[3]</sup> 和 28 ns<sup>[5]</sup> (FWHM) 的激光脉冲。最近,我国也对  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶体的吸收光谱进行了研究<sup>[7]</sup>, 并且用  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶体对 Nd ·YAG 激光器作了被动调  $Q$  实验<sup>[8]</sup>。与使用染料和色心晶体(如  $\text{LiF} \cdot \text{F}_2$ ) 作被动调  $Q$  开关相比,  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶体具有导热性好、稳定可靠等优点。本文给出了用  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶体(西南技术物理所生长)对重复率为 100 Hz 的激光二极管泵浦的准连续板条 Nd ·YAG 激光器进行被动调  $Q$  的实验结果, 这些实验结果对研制调  $Q$ 、小型化、全固体化的激光器是有意义的。

## 1 实验装置

实验装置如图 1 所示。高反射镜  $M_1$ 、输出耦合镜  $M_2$  和 Nd ·YAG 晶体构成激光振荡器。腔长为 30 cm;  $M_1$  为凹面镜, 曲率半径为 3 m, 反射率为 99%;  $M_2$  为平面镜, 反射率为 74%。Nd ·YAG 激光晶体是  $16 \text{ mm} \times 6 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$  的板条。用单块二极管经过一柱透镜泵浦, 重复频率为 100 Hz, 脉宽为  $180 \sim 330 \mu\text{s}$  可调。 $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶片厚 4 mm, 抛光后两个透光面镀  $1.06 \mu\text{m}$  的减反膜, 将  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶片插入激光腔中并靠近输出耦合镜。激光输出功

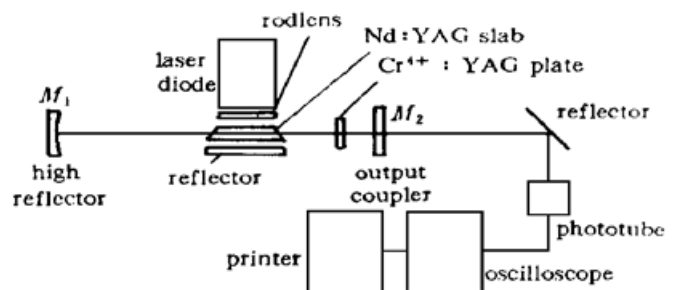


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental arrangement

率用 LPE-1A 型激光功率/能量计测量。输出的激光波形用上升时间为 1 ns 的 GD-10 型光电管和带宽为 500 MHz 的数字存储示波器测量,并用与示波器相连接的激光打印机将激光波形实时打印出来,或将磁盘插入示波器存储其信息,以供计算机提取。

## 2 实验结果

在实验中用初始透过率为 18% 的  $\text{Cr}^{4+}$  :YAG 晶体对重复率为 100 Hz 的二极管泵浦板条 Nd:YAG 激光器进行调 Q, 二极管泵浦的脉冲宽度可调。

1) 当泵浦脉冲宽度一定时,实现单个调 Q 脉冲工作存在一个阈值泵浦功率。例如,当二极管泵浦脉冲宽度为 330  $\mu\text{s}$  时,在 1.064  $\mu\text{m}$  波长处获得单个调 Q 脉冲的阈值泵浦功率为 1.06 W,调 Q 脉冲宽度(FWHM)为 39 ns,平均输出功率为 28 mW。输出的脉冲稳定,脉冲宽度的变化范围在 2% 以内,输出功率涨落不超过 3%。图 2(a) 是示波器存储的随机选取的一个脉冲波形。随着泵浦水平的提高,调 Q 脉冲数增加为 2 个(泵浦功率为 1.5 W)或 3 个(泵浦功率为 1.8 W),脉冲间隔平均为 80  $\mu\text{s}$ ,如图 2(b) 和(c) 所示。图 2(d) 是泵浦功率达到最大值 2.1 W 时输出的 3 个脉冲列中的一个,脉冲宽度为 37.4 ns,平均输出功率为 125 mW。可见,随着泵浦水平的提高,调 Q 脉冲数增多,输出的平均功率增大,脉冲宽度变窄。

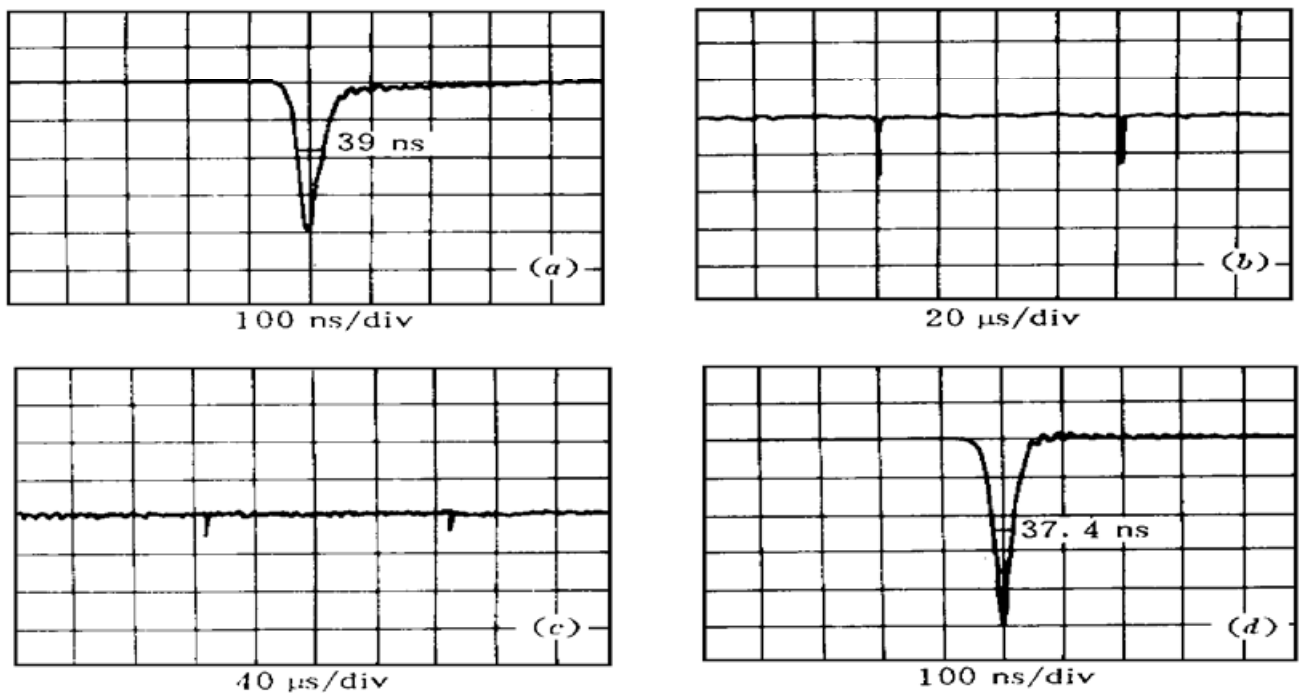


图 2 从  $\text{Cr}^{4+}$  :YAG 晶片被动调 Q 板条 Nd:YAG 激光器输出的激光脉冲的示波图

Fig. 2 Oscilloscope traces of output pulses from the slab Nd:YAG laser passively Q-switched with a  $\text{Cr}^{4+}$  :YAG plate The pump pulse width 330  $\mu\text{s}$ . (a) The Q-switched pulse under 1.06 W input pump threshold power; (b) A sequence of two short pulses is obtained under 1.5 W input pump power; (c) A sequence of three short pulses is obtained under 1.8 W input pump power; (d) Resolution of one of the three Q-switched pulses for the highest pump power of 2.1 W used

2) 获得单个调 Q 脉冲的阈值泵浦功率及脉冲宽度均与二极管泵浦脉冲的宽度有关。图 3 是在几种泵浦脉冲宽度下实现单个调 Q 脉冲工作的阈值泵浦功率。可以看到实现单个调 Q 脉冲的阈值泵浦功率随着泵浦脉冲宽度的增大而减小,当泵浦脉冲宽度大于 300  $\mu\text{s}$  时,这种减小趋势变得平缓。图 4 是输出的调 Q 脉冲的宽度随泵浦脉冲宽度的变化关系。随着泵浦脉冲

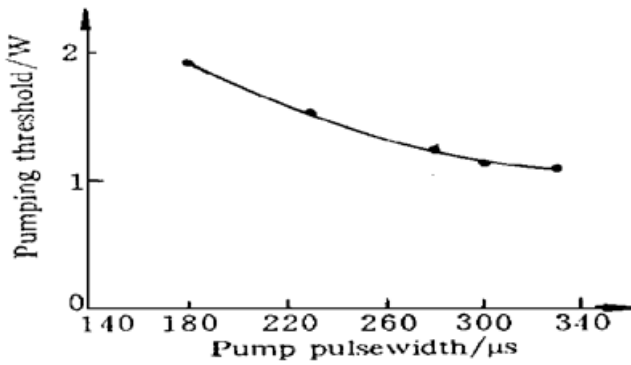


图3 获得单个调  $Q$  脉冲工作的阈值泵浦功率与泵浦脉冲宽度的关系

Fig. 3 The dependence of the pumping threshold on the pump pulse width for achieving single pulse operation

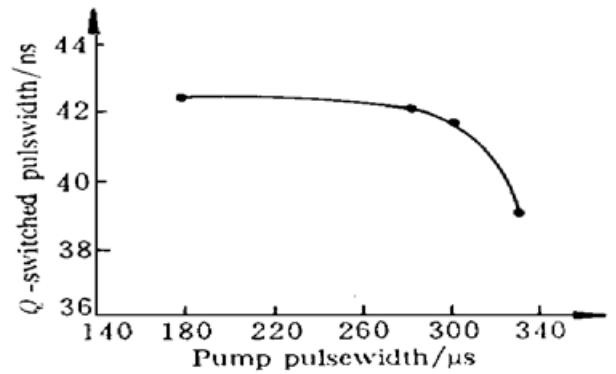


图4 在单个调  $Q$  脉冲工作的条件下, 调  $Q$  脉冲宽度与泵浦脉冲宽度的关系

Fig. 4 The dependence of the output  $Q$ -switched pulsewidth on the pump pulse width under the conditions of single pulse operation

宽度的增大, 调  $Q$  脉冲宽度变窄。

3) 当泵浦脉冲宽度减小到  $180 \mu\text{s}$  时, 即使提高泵浦水平, 甚至泵浦功率达到最高值, 均获得单个调  $Q$  脉冲输出, 且调  $Q$  脉冲的输出功率增大, 脉宽变窄。在阈值泵浦功率为  $1.9 \text{ W}$  时, 输出的单个调  $Q$  脉冲的功率和脉冲宽度分别为  $22 \text{ mW}$  和  $42.4 \text{ ns}$ ; 在泵浦功率为  $2.1 \text{ W}$  时, 输出的单个调  $Q$  脉冲的功率和脉冲宽度分别为  $30 \text{ mW}$  和  $39.2 \text{ ns}$ 。

4) 输出的调  $Q$  脉冲功率与泵浦脉冲宽度有关, 输出功率随泵浦脉冲宽度的增大而增大, 且是非线性的。

5) 输出的调  $Q$  脉冲功率与不调  $Q$  输出激光功率之比, 即调  $Q$  脉冲的能量提取效率(调  $Q$  效率) 也与泵浦脉冲宽度有关。实验结果示于图 5。图中实线部分表示在单个调  $Q$  脉冲工作条件下能量提取效率与泵浦脉冲宽度的关系, 泵浦脉冲宽度增大, 调  $Q$  效率增加, 最高调  $Q$  效率可达  $74\%$ 。图中虚线部分表示泵浦功率为  $2.1 \text{ W}$  时出现多个调  $Q$  脉冲情形下的调  $Q$  效率与泵浦脉冲宽度的关系, 仍然是调  $Q$  效率随泵浦脉冲宽度的增大而增大, 只是增大变得平缓一些, 泵浦脉冲宽度为  $330 \mu\text{s}$  时, 其调  $Q$  效率为  $47.3\%$ 。

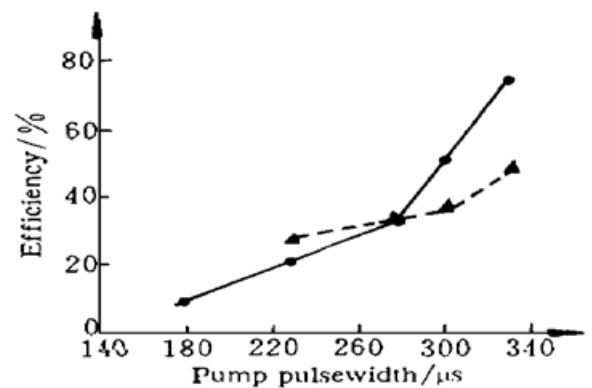


图5 调  $Q$  效率与泵浦脉冲宽度的关系

Fig. 5 The dependence of the energy extraction efficiency of  $Q$ -switched pulses on the pump pulsewidth

solid line: under the condition of the single  $Q$ -switched pulse operation; dashed line: under the multiple  $Q$ -switched pulses operation for the pump power of  $2.1 \text{ W}$  used

### 3 结论和讨论

用  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体被动调  $Q$ 、激光二极管泵浦的准连续  $\text{Nd}:\text{YAG}$  激光器, 其调  $Q$  脉冲的一些特性与泵浦脉冲的宽度有关。对于一定的泵浦脉冲宽度, 只有当泵浦功率达到一定阈值时才实现单脉冲工作。阈值泵浦功率随泵浦脉冲宽度的增大而减小, 调  $Q$  脉冲宽度随泵浦脉冲宽度的增大而变窄。当泵浦脉冲宽度减小到  $180 \mu\text{s}$  时, 系统均输出稳定的单个调  $Q$  脉冲; 泵浦水平的提高, 只使调  $Q$  脉冲宽度变窄, 不会出现多脉冲列。如果泵浦脉冲宽度增大, 在提高泵浦水平时, 出现 2 个或 3 个脉冲列, 这些脉冲的间隔平均为  $80 \mu\text{s}$ ; 输出的调  $Q$  脉冲功率明显增大。

我们认为泵浦脉冲宽度影响调  $Q$  脉冲的性能,其原因在于  $\text{Cr}^{4+}$  :YAG 晶体中的  $\text{Cr}^{4+}$  在激发态有一定寿命。在  $\text{Cr}^{4+}$  :YAG 中,  $\text{Cr}^{4+}$  在激发态的衰减寿命是  $3.2 \pm 0.2 \mu\text{s}$ <sup>[3]</sup>, 与激光晶体的激发态寿命相比, 这个寿命是相当长的, 也正因为如此, 在一定泵浦功率水平下, 才有可能使  $\text{Cr}^{4+}$  :YAG 中的  $\text{Cr}^{4+}$  吸收中心被漂白, 从而使腔内形成激光成为可能(即被动调  $Q$ )。但是, 这个寿命与泵浦脉冲宽度相比, 又显得太短, 因而当泵浦脉冲宽度较宽时, 在较高的泵浦水平下, 在  $\text{Cr}^{4+}$  基态吸收恢复之后,  $\text{Cr}^{4+}$  吸收中心就可能第二次、第三次地被漂白, 从而使腔内形成第二个、第三个脉冲输出。多脉冲列的脉冲间隔平均为  $80 \mu\text{s}$ , 泵浦脉冲宽度越窄, 出现多脉冲列的可能性越小; 泵浦脉冲宽度越宽, 出现多脉冲列的可能性越大。调  $Q$  脉冲数越多, 平均输出功率就越大。

在调  $Q$  脉冲波形的后沿底部出现了一些小的振荡, 这是由于测量电缆的反射造成的, 改善测量系统的阻抗匹配, 这种振荡痕迹可以消除。

### 参 考 文 献

- 1 H. Eilers, K. R. Hoffman, W. M. Dennis *et al.*. Saturation of  $1.064 \mu\text{m}$  absorption in Cr, Ca :Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> crystals. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(25): 2958~ 2960
- 2 P. Yankov. Cr<sup>4+</sup> :YAG  $Q$ -switching of Nd :host laser oscillators. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1994, **27**(6): 1118~ 1120
- 3 Y. Shimony, Z. Burshtein, Y. Kalisky. Cr<sup>4+</sup> :YAG as passive  $Q$ -switch and Brewster plate in a pulsed Nd :YAG laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(10): 1738~ 1741
- 4 H. Eilers, U. Hømmerich, S. M. Jacobsen *et al.*. Spectroscopy and dynamics of Cr<sup>4+</sup> :Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>. *Phys. Rev. B*, 1994, **49**(22): 15505~ 15513
- 5 Y. Shimony, Y. Kalisky, B. H. T. Chai. Quantitative studies of Cr<sup>4+</sup> :YAG as a saturable absorber for Nd :YAG laser. *Opt. Mater.*, 1995, **4**(4): 547~ 551
- 6 H. J. Eichler, A. Haase, M. R. Kokta *et al.*. Cr<sup>4+</sup> :YAG as passive  $Q$ -switched for a Nd :YALO oscillator with an average repetition rate of 2.7 kHz, TEM<sub>00</sub> mode and 13 W output. *Appl. Phys. B*, 1994, **58**(5): 409~ 411
- 7 Xu Jun, Deng Peizhen, Wang Siting *et al.*. Absorption and oxygen-annealing characterization of Cr<sup>4+</sup> in Cr, Ca :Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> crystal. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1996, **A23**(4): 363~ 365 (in Chinese)
- 8 Ouyang Bin, Ding Yanhua, Wan Xiaoke *et al.*. Saturable absorption of Cr<sup>4+</sup> :YAG and its performance as passive  $Q$ -switches. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(12): 1665~ 1670 (in Chinese)

## Study of Performance of a Cr<sup>4+</sup> :YAG Passively $Q$ -switched QCW Slab Nd :YAG Laser

Fan Anfu<sup>1</sup> Yang Chenglong<sup>2</sup> Xu Tianhua<sup>3</sup> Wang Weimin<sup>2</sup>  
Chen Jinyan<sup>2</sup> Zhou Xin<sup>1</sup> Huang Yuanchao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Opto-electronics Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064; <sup>2</sup>Southwest Institute of Fluid Physics, Chengdu 610003; <sup>3</sup>Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041

**Abstract** In this paper the performance of a Cr<sup>4+</sup> :YAG passively  $Q$ -switched diode-laser-pumped QCW slab Nd :YAG laser with a repetition rate of 100 Hz is reported. The dependence of the pumping threshold, the pulse width, the average output power as well as the energy extraction efficiency of  $Q$ -switched pulses on input pump pulsewidth was observed. A pulse width (FWHM) of 37.4 ns of the  $Q$ -switched laser was obtained. The laser system operated very stably.

**Key words** Cr<sup>4+</sup> :YAG, passively  $Q$ -switched, slab Nd :YAG laser