

Cr⁴⁺·YAG 的可饱和吸收特性 与被动 Q 开关性能研究*

欧阳斌 丁彦华 万小珂 林礼煌 邓佩珍

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 运用速率方程计算了 Cr⁴⁺·YAG 晶体的可饱和吸收特性参数, 包括初始吸收系数、饱和吸收系数、饱和光强和损耗调制度。用 Cr⁴⁺·YAG 对脉冲和连续 Nd·YAG 激光器进行了被动调 Q, 在脉冲 Nd·YAG 激光器上得到了 8 ns 的调 Q 激光脉冲, 在连续 Nd·YAG 激光器的调 Q 中得到了间隔和幅度抖动小于 5% 的输出脉冲序列。

关键词 Cr⁴⁺·YAG, 可饱和吸收, 被动调 Q, 激发态吸收调 Q 和锁模。

1 引 言

掺四价铬的钇铝石榴石晶体(Cr⁴⁺·YAG)是一种新型光学晶体, 它既具有宽范围(1.34~1.58 μm)的可调谐激光输出性能, 又具有显著的可饱和吸收特性(0.9~1.2 μm)^[1]。目前, 这种晶体作为掺钕激光器的被动 Q 开关已受到很大的重视^[2]。现在, 在闪光灯泵浦的 Nd·YAG 激光器上用这种晶体调 Q 已经可以得到 27 ns 的激光脉冲^[3]。与其它常用的 Nd 激光器被动 Q 开关(如有机染料、色心晶体 LiF·F₂⁻ 等)相比, Cr⁴⁺·YAG 晶体具有稳定、可靠、耐用、热导性好、掺杂浓度高、饱和光强小等优点。为进一步揭示这种晶体的可饱和吸收特性, 本文将运用速率方程计算其吸收特性参数, 并给出(用中国科学院上海光学精密机械研究所生长的)Cr⁴⁺·YAG 晶体对脉冲和连续 Nd·YAG 激光器进行调 Q 的实验结果。

2 吸收特性计算

Cr⁴⁺·YAG 与 1.06 μm 波长激光吸收有关的能级及跃迁过程如图 1 所示。N₁, N₂, N₃, N₄ 分别表示各能级的粒子数密度, σ_g 和 σ_e 表示基态和激发态吸收(ESA)截面, σ_g = 8.7 × 10⁻¹⁹ cm², σ_e = 2.2 × 10⁻¹⁹ cm²^[4]。辐射跃迁速率(ω₂, ω₃ 和 ω₄) 比其它过程都快得多, 故 N₃ 和 N₄ 可以忽略。室温下, 基态吸收的恢复时间约为 3.4 μs, 从 3T₁ 到 3T₂ 能级的弛豫时间约为 50 ps^[5]。

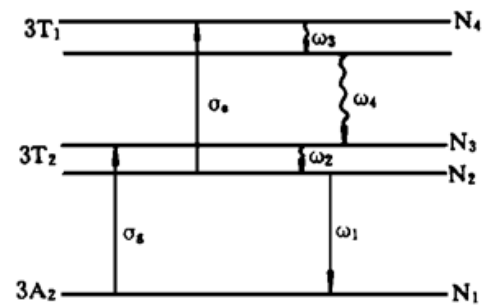


Fig. 1 Energy level diagram of Cr⁴⁺·YAG for calculating its absorption parameters

* 本研究获国家攀登计划和国家自然科学基金资助。

用 I 代表激光进入晶体前的强度, 则描述和计算 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 跃迁吸收的速率方程如(1)式所示。

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = - N_1 \left(\frac{\sigma_g}{h\nu} \right) I + \omega N_2, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = N_1 \left(\frac{\sigma_g}{h\nu} \right) I - \omega N_2, \quad (1b)$$

$$\frac{\partial I}{\partial z} = - I (\sigma_g N_1 + \sigma_e N_2), \quad (1c)$$

式中 $h\nu$ 是一个光子的能量, t 和 z 分别是时间和纵向坐标。方程(1a)和(1b)描述了吸收和弛豫过程中基态和第一激发态粒子数的变化。方程(1c)给出了沿晶体长度方向传播的激光脉冲的变化。实际使用的晶体表面镀有增透膜, 因此方程中不考虑晶体表面的菲涅耳反射, 方程也没有考虑光在晶体中的散射和其它损耗。

2.1 极限吸收系数计算

下面运用方程组(1)计算 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 的小信号吸收系数和饱和吸收系数。

(1a)和(1b)式相加并积分, 得

$$N_1 + N_2 = N_0 \quad (2)$$

N_0 是总粒子数密度或吸收杂质中心浓度。在小信号下, $N_2 \approx 0$, $N_1 \approx N_0$, 代入(1c)式, 积分得

$$I = I_0 \exp(-\sigma_g N_0 d) \quad (3)$$

其中 I_0 为激光进入晶体前的强度, d 为晶体厚度。根据(3)式, 小信号微分吸收系数为

$$\alpha_0 = \sigma_g N_0 \quad (4)$$

小信号透过率, 即初始透过率为

$$T_0 = \exp(-\sigma_g N_0 d) \quad (5)$$

饱和水平下, $N_1 \approx 0$, $N_2 \approx N_0$ 。此时的微分吸收系数为

$$\alpha_s = \sigma_e N_0 \quad (6)$$

饱和透过率为

$$T_s = \exp(-\sigma_e N_0 d) \quad (7)$$

激发态吸收截面决定了饱和时的剩余吸收大小。

2.2 饱和光强计算

如果泵浦光是连续的, 或者是长脉冲(相对于 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 的弛豫时间), 则 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光的吸收可达到稳态, 从而有

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = 0 \quad (8)$$

又由(1a)和(1b), 可得

$$N_2 = \left(\frac{\sigma_g}{\omega} \right) \left(\frac{I}{h\nu} \right) N_1 \quad (9)$$

由于饱和时对空间平均有 $N_2 \approx N_1$, 代入上式得到饱和光强近似为

$$I_s = \left(\frac{\omega}{\sigma_g} \right) h\nu \quad (10)$$

将 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 的参数代入上式, 计算得到 $I_s = 6.3 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$, Sennaroglu 等人报道的实验

结果是 43 kW/cm^{2[6]}。

2.3 最大 Q 值突变量

Q 开关突变前后的 Q 值阶跃量或损耗阶跃值是描述 Q 开关的重要参数。根据 1.3 节的计算, Cr⁴⁺·YAG Q 开关能够产生的损耗变化为

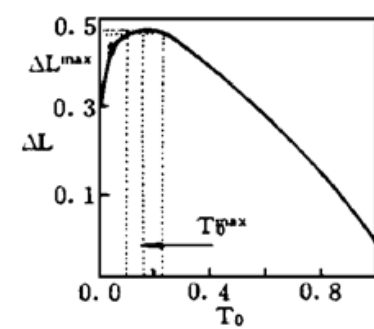
$$\Delta L = T_s - T_0 = \exp(-\sigma_e N_0 d) - \exp(-\sigma_g N_0 d) \tag{11}$$

将(5)式代入上式, 并设 $\gamma = \sigma_g / \sigma_e$, 则有

$$\Delta L = (T_0)^{1/\gamma} - T_0. \tag{12}$$

根据 Shimony 等人的测量结果^[4], $\gamma = 4$, 因此

$$\Delta L = (T_0)^{1/4} - T_0 \tag{13}$$



按此式计算得到的 Q 开关损耗阶跃量与初始透过率的关系如图 2 所示。

从上图可以看出, 存在着恰当的初始透过率 T_0^{\max} , 使得 Q 开关在饱和前后引入的腔损耗变化量为最大的 ΔL^{\max} 。为寻得使 ΔL 最大的初始透过率, (12) 式两边对 T_0 微分, 并令之等于 0, 即

$$\frac{d\Delta L}{dT_0} = 0$$

由上式可求得对应最大 ΔL 的初始透过率为

$$T_0^{\max} = \gamma \left(\frac{\gamma}{1-\gamma} \right) \tag{14}$$

将此式代入(12)式, 得到最大损耗阶跃量为

$$\Delta L^{\max} = (T_0^{\max})^{1/\gamma} - T_0^{\max} = \gamma^{1/\gamma} - \gamma^{1-1/\gamma} \tag{15}$$

将 $\gamma = 4$ 代入(14) 和(15) 式, 分别得到 $T_0^{\max} = 0.157$ 和 $\Delta L^{\max} = 0.472$ 。

从图 2 可以看出, 在 T_0^{\max} 附近, 若 ΔL 下降 0.1, 对应的 T_0 下降到 0.1 或增加到 0.23。因此选取初始透过率在 10% ~ 23% 这个较宽的范围内的 Cr⁴⁺·YAG 晶体开关, 都能得到较大的损耗调制。

3 实 验

3.1 实验装置

实验装置如图 3 所示。高反射率镜 M_1 , 输出耦合镜 M_2 以及 Nd·YAG 激光棒构成激光振荡器, 此激光器用脉冲氙灯或连续氙灯泵浦。为实现用 Cr⁴⁺·YAG 调 Q, 将加工并镀膜的这种晶体(薄片)插入激光腔中。实验中用 PIN 管和 Tektronix 7834 存储示波器测量输出激光波形。

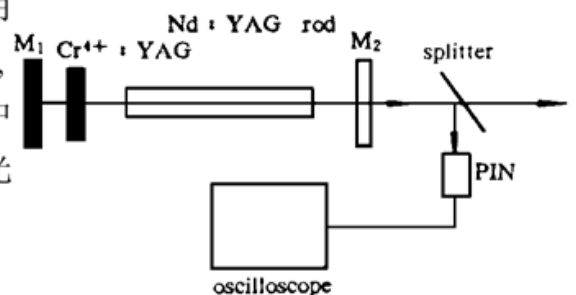


Fig. 3 Experimental setup for Nd·YAG laser Q-switching using Cr⁴⁺·YAG

3.2 实验结果

3.2.1 脉冲 Nd·YAG 激光器调 Q

实验中用初始透过率在 10% ~ 70% 范围的各种 Cr⁴⁺·YAG 晶体都实现了对脉冲 Nd·YAG 激光器的调

Q 。

如果 M_1 为半径 0.9 m 的凹面镜, Q 开关为 $T_0 = 42\%$ 的 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 晶体, 则在闪光灯的一次泵浦里, 会出现多个调 Q 脉冲, 如图 4(a), 而且大多数脉冲都是调制的, 如图 4(b)。这与 Eichler 等人以及 Shimony 等人的实验结果相似^[4, 7]。在图 4(a) 中, 多脉冲间隔平均为 20 μs , 相当于 50 kHz 的重复率。实验中激光器腔长 42 cm。

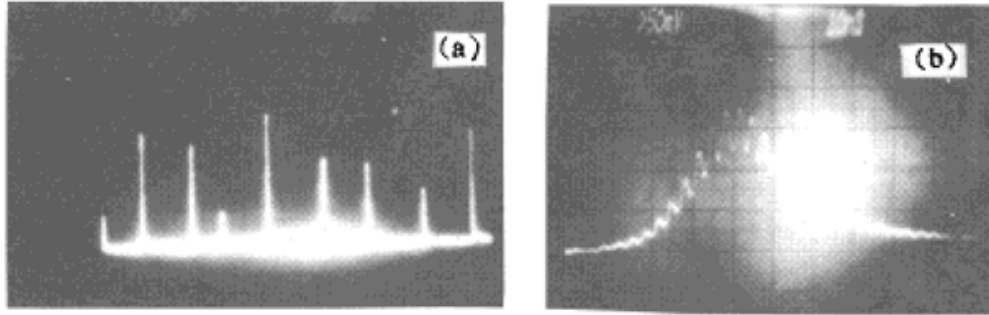


Fig. 4 (a) Multi-spikes of Q -switched pulsed Nd·YAG laser with Cr^{4+} ·YAG, (b) Self-modulation of Q -switched pulse

由于 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 的饱和光强较小, 所以当腔内净增益较大时, Q 开关很容易多次打开, 在一次闪光灯的泵浦里, 容易出现多个调 Q 脉冲。这对提高调 Q 重复率很有利。但是如果需要获得单脉冲, 可增加输出耦合, 也可减小 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 的初始透过率。使用初始透过率为 10% 的 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$, 并将激光器腔长缩短为 25 cm, 选用透过率 65% 的输出耦合镜以及全反射平面后腔镜, 得到的调 Q 脉冲宽度为 8 ns, 其波形如图 5 所示。

图 6 是各种泵浦水平(泵浦能量)下调 Q 脉冲能量和不调 Q 输出激光能量之比, 即调 Q 效率。实验时, 后腔镜 M_1 为全反射平面镜, M_2 透过率为 40%, 腔长 35 cm, 所用的 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 样品初始透过率为 28%。实验时也存在调 Q 多脉冲输出, 且随着泵浦水平的提高, 单次泵浦中调 Q 脉冲数增加。从图 6 可以看出调 Q 效率随着泵浦能量增加而增加, 最高调 Q 效率可达 68%。图中可看出在此泵浦能量范围内, 这种增加出现了饱和的趋势。

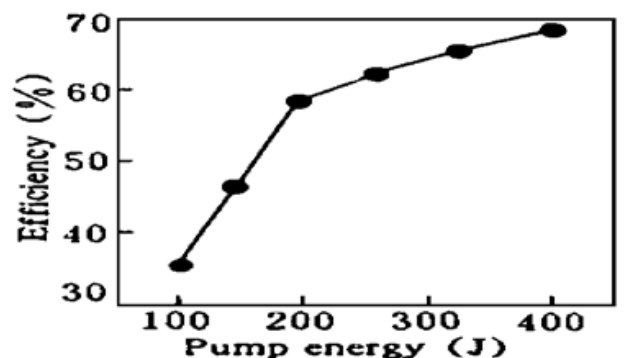
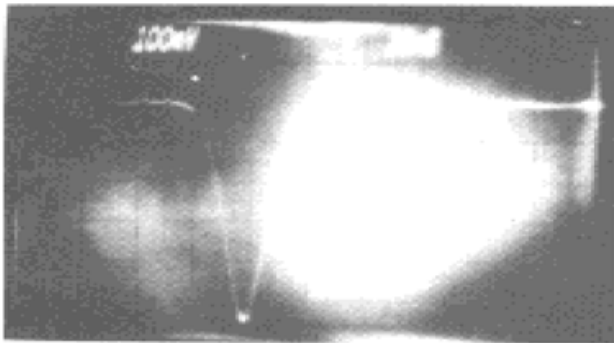


Fig. 5 Output laser pulse shape of Q -switched Nd·YAG laser

Fig. 6 The dependence of extraction energy efficiency on pump energy

3.2.2 连续 Nd·YAG 激光器调 Q

由于 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 的饱和光强较小, 所以它十分适合于连续激光器被动调 Q , 也容易产生高重复率。采用初始透过率 92% 的 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 晶片(厚 1 mm)对连续 Nd·YAG 激光器进行了调 Q 。实验时激光器腔长 0.48 m, 输出耦合镜反射率为 96%。

在多横模振荡时, 得到频率为 7.3 kHz 的脉冲序列。但是由于横模间的模式竞争, 输出

稳定性较差。在腔内加入光阑选单基横模(TEM_{00})后,调 Q 脉冲序列稳定性得到改善。图 7 (a) 是观测相邻脉冲时间间隔稳定性的示波图,它由示波器存储的随机选取的五对相邻脉冲的叠加;图 7(b) 是观测每个脉冲波形稳定性的示波图,它是存储的十个单脉冲的波形的叠加。可以看出调 Q 脉冲波形、间隔和幅度比较稳定,脉冲序列的间隔和幅度的抖动小于 5%。

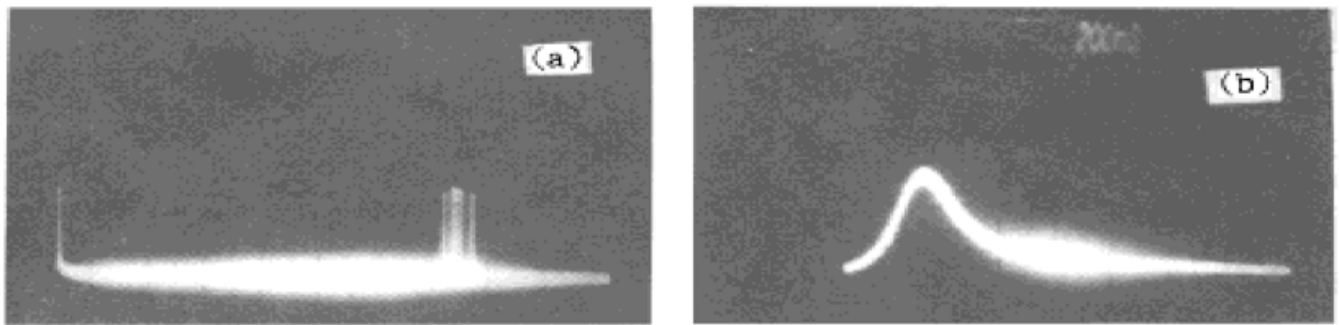


Fig. 7 (a) Overlapping of five pairs of Q-switched pulses, lasing in single TEM_{00} mode, (b) Overlapping of ten single Q-switched pulses, lasing in single TEM_{00} mode

典型的调 Q 脉冲序列重复率为 3.0 kHz,平均功率为 0.3 W,脉冲宽度为 0.3 μs ,脉冲峰功率为 330 W。

4 讨 论

由于 Cr^{4+} ·YAG 晶体对激光吸收具有很小的饱和光强,又有很好的热导性,因此很适合于连续激光器的被动调 Q,而且可以实现高重复率的激光调 Q,这将使这种晶体在各种激光器中如 LD 激光器中获得广泛的应用,也将为激光器的小型化创造条件。

Cr^{4+} ·YAG 是掺钕激光器的很好的被动 Q 开关,本研究中已用这种晶体调 Q 得到短至 8 ns 的激光脉冲。但是由于 Cr^{4+} ·YAG 吸收上能级的弛豫时间较长(微秒量级),因此它不能用来进行被动锁模。不过 Cr^{4+} ·YAG 晶体对 1.06 μm 激光有很强的激发态吸收,其吸收的上能级(3T_1 , 参见图 1)弛豫时间相当短,约为 50 ps,其吸收截面也较大($2.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$),因此如果有足够的光强使 Cr^{4+} ·YAG 的激发态吸收达到饱和,则有可能实现被动锁模。关于这种假设的进一步的理论与实验研究正在进行中。

衷心感谢中国科学院上海光学精密机械研究所晶体组的徐军、乔景文等同志给予的大力支持,感谢他们在实验中提供优质 Cr^{4+} ·YAG 晶体。

参 考 文 献

- [1] A. G. Okhrimchuk, A. V. Shestakov, Performance of YAG· Cr^{4+} laser crystal. *Opt. Material*, 1994, **3**(1): 1~ 13
- [2] P. Yankov, Cr^{4+} ·YAG Q-switching of Nd-host laser oscillators. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1994, **27**(12): 1118~ 1120
- [3] Yehoshua Shimony, Yehoshua Kalisky, Bruce H. T. Chai, Quantitative studies of Cr^{4+} ·YAG as a saturable absorber for Nd·YAG laser. *Opt. Materials*, 1995, **4**(6): 547~ 551
- [4] Y. Shimony, Z. Burshtein, Y. Kalisky, Cr^{4+} ·YAG as passive Q-switch and Brewster plate in a pulsed Nd·YAG laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(10): 1738~ 1741
- [5] G. M. Zverev, A. V. Shestakov, Tunable near-infrared oxide crystal lasers, in *Tunable Solid-State Lasers, Vol. 5 of OSA Proceedings Series*, M. Shand and H. P. Jenssen, eds, Optical Society of Ameri-

ca, Washington, D. C., 1989: 66~ 70

- [6] Alphan Sennaroglu, C. R. Pollock, H. Nathel, Efficient continuous-wave chromium-doped YAG laser. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(5): 930~ 937
- [7] H. J. Eichler, A. Haase, M. R. Kokta *et al.*, Cr⁴⁺ ·YAG as passive Q-switch for a Nd ·YALO oscillator with an average repetition rate of 2.7 kHz, TEM₀₀ mode and 13 W output. *Appl. Phys. B*, 1994, **58**(5): 409~ 411

Saturable Absorption of Cr⁴⁺ ·YAG and Its Performance as Passive Q-Switches

Ouyang Bin Ding Yanhua Wan Xiaoke Lin Lihuang Deng Peizhen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 16 July 1996)

Abstract Key absorption parameters of Cr⁴⁺ ·YAG are calculated based on rate equations. Pulsed Nd ·YAG laser is Q-switched using Cr⁴⁺ ·YAG to generate 8 ns laser pulse. CW Nd ·YAG laser is also Q-switched using this crystal and both period jitter and amplitude fluctuation of output pulse train are less than 5%.

Key words Cr⁴⁺ ·YAG, saturable absorption, passive Q-switching, ESA Q-switching and mode-locking.