

Cr⁴⁺ YAG 被动调 Q 与被动锁模的研究*

王加贤 张文珍

(华侨大学电气技术系, 泉州 362011)

摘要 分析 Cr⁴⁺ YAG 晶体对 1.06 μm 激光的可饱和吸收特性. 从速率方程出发, 导出基态和第一激光态反转 Cr⁴⁺ 粒子数密度的变化率、第一和第二激发态的饱和光强. 由此得出 Cr⁴⁺ YAG 的第一激光态的饱和吸收只能实现调 Q, 而第二激发态的饱和吸收可以导致锁模. 在同一台脉冲式 Nd YAG 激光器中用 Cr⁴⁺ YAG 晶体作为可饱和吸收体. 改变腔长和其它实验条件, 既可实现被动调 Q 运转, 得到脉宽 20 ns、能量 125 mJ 的巨脉冲输出; 又可实现被动锁模运转, 得到脉宽 190 ps、能量 35 mJ 的锁模脉冲序列.

关键词 Cr⁴⁺ YAG, 可饱和吸收, 被动调 Q, 被动锁模

分类号 TN 248.13

Cr⁴⁺ YAG(掺四价铬的钇铝石榴石)是近年来引起广泛重视的新型可饱和吸收材料. 由于它对 1.06 μm 波长的光有很好的可饱和吸收特性, 所以适合作为各类 Nd 激光器的被动 Q 开关. 同其它被动调 Q 器件(如色心晶体或染料溶液)比较, Cr⁴⁺ YAG 被动调 Q 具有饱和光强小、稳定性好、使用方便等优点^[0,2]. 由于 Cr⁴⁺ YAG 第一激发态的驰豫时间达微秒量级, 因此, 利用第一激发态的饱和吸收只能调 Q 而不能锁模^[6]. 我们注意到, Cr⁴⁺ YAG 具有很强的激发态吸收, 而且第二激发态的驰豫时间相当短. 所以, 当腔内光强足够大, 使得激发态吸收饱和, 则可以实现被动锁模. 这已经在带有抗共振环结构的接近临界稳定的 CPM 非稳腔 Nd YAG 激光器中得到证实^[6]. 进一步的实验发现: 在稳定的平凹直腔 Nd YAG 激光器中, 只要改变腔长, 既可以实现 Cr⁴⁺ YAG 被动调 Q, 也可以实现被动锁模. 本文报道这一实验结果, 并给予合理的理论解释.

1 Cr⁴⁺ YAG 的饱和吸收特性

Cr⁴⁺ YAG 的能级结构与主要跃迁过程如图 1 所示. 跃迁 1,2 是对 1.06 μm 激光的基态吸收和激发态吸收, 其吸收截面分别为 $\sigma_g = 7 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$, $\sigma_e = 5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$. 第一激发态(3T₂)和第二激发态(3T₁)的驰豫时间分别为 $\tau_1 = 3.4 \mu\text{s}$ 和 $\tau_2 = 50 \text{ ps}$ ^[6], 其它非辐射跃迁都比第一激发态到基态(3A₂)的辐射跃迁快很多. 可以得到 3 个能级上 Cr⁴⁺ 粒子数密度的变化率和腔内光强的变化为

$$\frac{dN_1}{dt} = -N_1 \frac{\sigma_g I}{h\nu} + \frac{N_2}{\tau_1}, \quad (1a)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -N_1 \frac{\sigma_g I}{h\nu} - \frac{N_2}{\tau_1} + \frac{N_3}{\tau_2} - \frac{N_2 \sigma_e I}{h\nu}, \quad (1b)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = +N_2 \frac{\sigma_e I}{h\nu} - \frac{N_3}{\tau_2}, \quad (1c)$$

$$\frac{dI}{dz} = -I(\sigma_g N_1 + \sigma_e N_2), \quad (1d)$$

式中 $h\nu$ 为激光光子能量, I 为光强.

1.1 第一激发态的饱和吸收

当激光器运转在低强度的调 Q 模式且 Q 开关打开后, 虽有少量 Cr^{4+} 离子在 $3T_2$ 与 $3T_1$ 之间来回跃迁, 但远远不会使 $3T_1$ 饱和. 可以认为, Cr^{4+} 离子只分布在 $3A_2$ 与 $3T_2$ 上, 即

$$N_1 + N_2 = N_0,$$

N_0 为晶体中的 Cr^{4+} 粒子数密度. 忽略式(1b)右边第 3, 4 项, 由式(1a), (1b) 可以解出 $3A_2$ 和 $3T_2$ 上的 Cr^{4+} 粒子数密度之差为

$$\Delta N = \frac{N_0 \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{\sigma_g I}{h\nu} \right)}{\left(\frac{\sigma_g I}{h\nu} + \frac{1}{\tau_1} \right)} \times \left\{ 1 - \exp \left[\left(\frac{\sigma_g I}{h\nu} + \frac{1}{\tau_1} \right) t \right] \right\}. \quad (2)$$

采用文献 [6] 提供的方法, 可由式(2) 求出第一激发态饱和吸收的恢复时间(τ_1) 为 $3.4 \mu\text{s}$.

由于稳态时, 有 $\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = 0$, 吸收饱和时对空间平均有 $N_1 = N_2$, 代入式(1a), 可得到第一激发态的饱和光强为

$$I_{s1} = \frac{h\nu}{\sigma_g \tau_1}. \quad (3)$$

把有关参数代入, 则 $I_{s1} = 5.5 \times 10^4 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. 第一激发态的饱和光强很小, 在一般实验条件下, 很容易实现被动调 Q. 由于第一激发态的饱和吸收恢复时间远远大于光脉冲在腔内来回一次所需的时间, 所以无法达到被动锁模. 因此, 当腔内光强较小时, Cr^{4+} YAG 是可起到调 Q 作用的慢饱和吸收体.

1.2 第二激发态的饱和吸收

当作用在 Cr^{4+} YAG 上的激光功率密度足够大时, 基态上的 Cr^{4+} 离子首先被抽空跃迁到 $3T_2$ 上, 很强的激发态吸收使得 $3T_1$ 上能保持相当数量的 Cr^{4+} 离子. 在 Q 开关打开后, 由于第一激发态的驰豫时间远远大于脉冲宽度, 可以认为 Cr^{4+} 离子只在 $3T_2$ 与 $3T_1$ 之间来回跃迁, 基态并不参加该动力学过程, 即 $N_2 + N_3 = N_0$. 根据这个假设, 忽略式(1b) 右边的第 1, 2 项, 由式(1b), (1c) 解出 $3T_2$ 与 $3T_1$ 的 2 个能级上的 Cr^{4+} 粒子数密度之差, 其表示式与式(2) 的差别在于用 α, τ_2 代替 σ_g, τ_1 . 因此, 可得出第二激发态的饱和吸收恢复时间(τ_2) 为 50 ps , 饱和光强为

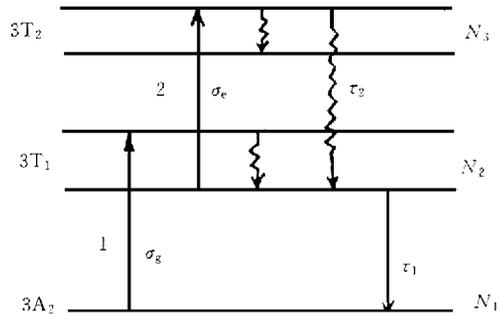


图 1 Cr^{4+} YAG 能级图

$$I_{s2} = \frac{h\nu}{\sigma_e \pi}. \quad (4)$$

由于第二激发态饱和和吸收的恢复时间很短,所以当腔内光强足够大使得激发态吸收达到饱和时,则可以在实现调 Q 的同时实现被动锁模.

2 实验装置与实验结果

2.1 实验装置

Cr^{4+} YAG 被动调 Q 与被动锁模的实验装置如图 2 所示. M_1 是曲率半径为 3 m 的全反射凹面镜, M_2 是全反射平面镜, M_3 是输出耦合镜(可根据实验情况更换不同反射率的镜片). Nd:YAG 棒的尺寸为直径 4.5 mm, 长度为 80 mm. 2 根氙灯泵浦, 工作重复率为 1 Hz, 棒的左端面与 M_2 镜的距离(L_2)为 30 cm, 右端面与 M_1 镜的距离(L_1)在实验中调整, 腔长 $L = L_1 + L_2 + d/n_0$, d 为棒的长度, n_0 为棒的折射率. Cr^{4+} YAG 通光长度为 2 mm, 对 1.06 μm 连续光的小信号透过率约为 60%, 晶体装在铜套内加水冷却, 靠近 M_2 镜. 输出激光由 PIN 管构成的探测器接收并输入到 HP 54502 A 型数字示波器上观察脉冲波形.

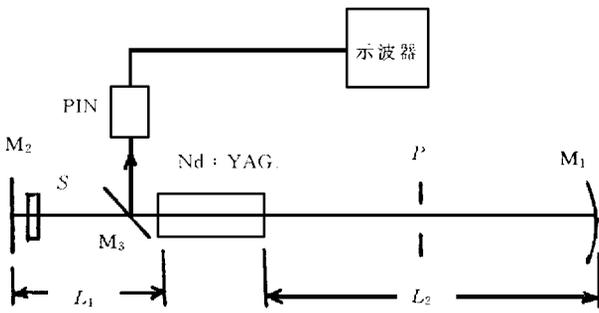


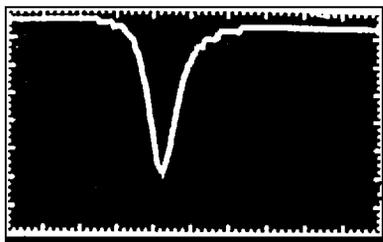
图 2 Cr^{4+} YAG 被动调 Q 与锁模的实验装置

输出激光由 PIN 管构成的探测器接收并输入到 HP 54502 A 型数字示波器上观察脉冲波形.

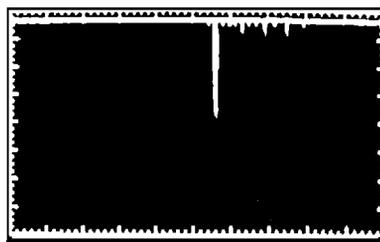
2.2 实验结果

2.2.1 调 Q 运转 腔长(L)小于 100 cm 时, 激光器运转在调 Q 模式, 示波器上观察到的调 Q 脉冲光滑而且非常稳定.

图 3(a)是在泵浦能量为 110 J, M_3 镜的反射率为 15% 和 L 为 60 cm 时, Nd:YAG 激光器输出的巨脉冲; 图 3(b)是一次泵浦出现的调 Q 脉冲序列. 可以看出, 调 Q 脉冲呈钟形时,



(a) 单脉冲波形(水平坐标 20 ns · 格⁻¹)



(b) 脉冲序列(水平坐标 100 μs · 格⁻¹)

图 3 Nd:YAG 激光器被动调 Q 输出波形

前、后沿时间差不多, 脉宽(半功率点宽度)约为 20 ns, 序列中脉冲间隔为 20 μs . 在一次泵浦里虽有多脉冲, 但最大脉冲的强度远远大于其它小脉冲, 能量基本集中在主脉冲上. 这种情形对于激光加工、激光测距等应用是很有利的^[7]. 用 PT-1 型能量计测量输出能量为 125 mJ.

多次测量的能量波动在 1% 以内, 说明输出稳定性很好. 随着腔长的增加, 调 Q 脉冲出现调制, 而且调制深度随着腔长的增加而加深.

2.2.2 锁模运转 腔长 L 大于 260 cm 时, 示波器上观察到锁模脉冲; L 在 280 cm 左右时, 锁模几率最高(达 60% 以上), 稳定性最好; L 超过 290 cm, 锁模几率和稳定性反而变差. 当 L 等于 280 cm、泵浦能量为 125 mJ、输出镜的反射率为 15% 时, 锁模脉冲序列如图 4 所示. 序列中的脉冲间隔近 20 ns, 与光脉冲在腔内来回一次所需的时间相符, 脉冲包络的持续时间约为 320 ns. 在监测锁模脉冲和输出能量的情况下, 用非共线二次谐波自相关法测定脉冲宽度.

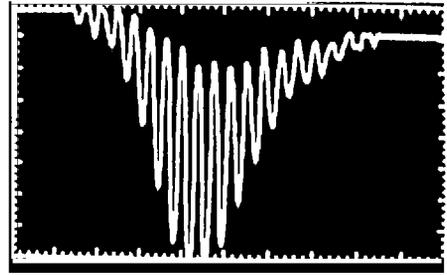


图 4 Nd YAG 激光器输出的锁模脉冲序列

倍频元件是 KTP 晶体, 产生的 $0.53 \mu\text{m}$ 的激光由光电二极管构成的探测器接收, 用峰值可保持的灵敏电流计给出读数, 每个数据点为 10 次测量的平均值(相对强度 I), 可以确定平均脉宽为 190 ps. 图 5 是非共线二次谐波的自相关曲线, 用 PT-1 型能量计测量输出能量为 35 mJ, 延迟时间用 t 表征. 把输出镜换成反射率 30% 的镜片, 锁模几率下降, 锁模波形也变得很差.

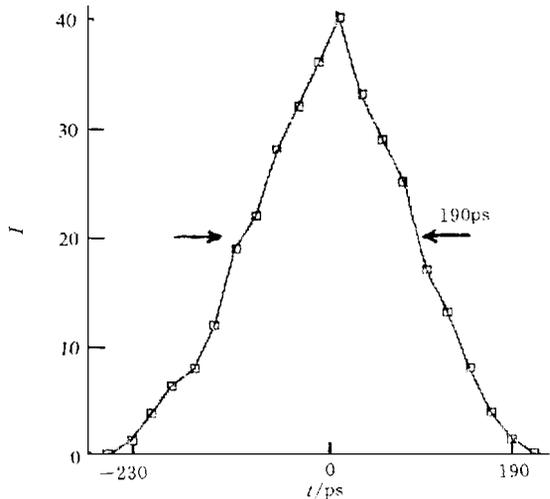


图 5 二次谐波的自相关函数曲线

2.3 实验结果分析

用 Cr^{4+} YAG 作为可饱和吸收体, 当腔长较小时, Nd YAG 激光器运转在调 Q 模式; 而腔长大时, 激光器运转在被动锁模状态. 造成这种差别的主要原因有.

- (1) 随着腔长的增加, Cr^{4+} YAG 上的光斑半径减小, 激光功率密度提高, Cr^{4+} 离子的激发态吸收加剧.
- (2) 腔长大时, 锁定的纵模数多, 有利于脉宽的压缩和激光峰值功率的增加.
- (3) 腔长大时, 腔接近临界稳定, Cr^{4+} YAG 和 Nd YAG 晶体的克尔透镜自聚焦强度增加^[8]. 自聚焦使 Cr^{4+} YAG 上的光斑半径大大减小, 而且与腔内光阑相结合, 起到另一种快饱和吸收体的作用, 使 Cr^{4+} YAG 的被动锁模更容易达到.

3 结论

由于 Cr^{4+} YAG 晶体特殊的能级结构和跃迁过程, 使得它在不同光强的条件下既可作为调 Q 器件, 又可作为被动锁模器件. 通过改变 Nd YAG 激光器的腔长, 可以获得脉宽 20 ns、能量 125 mJ 的调 Q 巨脉冲, 或获得脉宽 190 ps、能量 35 mJ 的锁模脉冲序列输出.

参 考 文 献

- 1 Yankov P. Cr^{4+} YAG Q-switching of Nd: host laser oscillators. J. Phys. (D) Appl. Phys., 1994, 27 (6): 1 118 ~ 1 120
- 2 Shimony Y, Burshtein Z, Kalisky Y. Cr^{4+} YAG as passive Q-switch and Brewster plate in a pulse Nd YAG laser. IEEE, J. Quantum Electron, 1995, 31(10): 1 738 ~ 1 741
- 3 欧阳斌, 丁彦华, 万小柯等. Cr^{4+} YAG 的可饱和吸收特性与被动 Q 开关性能研究. 光学学报, 1996, 16 (12): 1 665 ~ 1 670
- 4 王加贤, 张文珍, 邢岐荣等. 采用 Cr^{4+} YAG 为可饱和吸收体实现脉冲 Nd YAG 激光器锁模运转. 中国激光, 1998, 25(1): 36 ~ 37
- 5 Alphan S, Clifford R P. Efficient continuous-wave chromium-doped YAG laser. J. Opt. Soc. Am. (B), 1995, 5(12): 930 ~ 938
- 6 邱佩华, 陈述春. 五甲川和十一甲川染料的辐射量子效率和吸收恢复时间. 中国激光, 1982, 10(3): 143 ~ 146
- 7 吴旭峰, 张文珍, 郭亨群. 激光热处理的工艺与机理探讨. 华侨大学学报(自然科学版), 1998, 19(2): 133 ~ 136
- 8 Vittorio M, Giulio C, Sandro De S. ABCD matrix analysis of propagation of gaussian beams through kerr media. Opt. Commun., 1993, 96(4): 348 ~ 355

A Study on Passive Q-Switching and Passive Mode Locking of Cr^{4+} YAG Crystal

Wang Jiaxian Zhang Wenzhen

(Dept. of Elec. Tech., Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

Abstract With regard to Cr^{4+} YAG crystal, the authors analyse its saturable absorption characteristics and derive the saturated light intensity of its first and second excited states. With Cr^{4+} YAG as saturable absorber in Nd YAG laser, both passive Q-switching and passive mode locking can be realized by changing the length of cavity.

Keywords Cr^{4+} YAG, saturable absorption, passive Q-switching, passive mode locking