

在平凹腔 Nd·YAG 激光器中 Cr⁴⁺·YAG 被动锁模的特性研究*

王加贤^{1,2} 张文珍² 王清月¹ 邢岐荣¹

¹ 天津大学精密仪器与光电工程学院超快激光研究室 天津 300072;
² 华侨大学应用物理系 泉州 362011

提要 在平凹稳定腔中用 Cr⁴⁺·YAG 作为可饱和吸收体实现了脉冲 Nd·YAG 激光器的被动锁模运转, 得到平均脉宽为 190 ps, 输出能量为 22 mJ 的脉冲序列。理论上分析了 Cr⁴⁺·YAG 被动锁模的动力学过程以及 Nd·YAG 的克尔透镜自聚焦在被动锁模中的作用。

关键词 Cr⁴⁺·YAG, 被动锁模, 克尔透镜自聚焦, 激发态吸收饱和

1 引言

近年来, 掺四价铬的钪铝石榴石(Cr⁴⁺·YAG)引起了人们广泛的研究兴趣。这种晶体既可作为激光增益介质, 在 1.34~1.58 μm 波长范围实现宽调谐激光运转^[1], 也可作为 0.9~1.2 μm 波长范围的可饱和吸收体, 已用于各类 Nd 激光器的被动 Q 开关^[2,3]。从 Cr⁴⁺·YAG 的能级结构看, 第一激发态的饱和吸收只能导致调 Q 而不能被动锁模。然而由于 Cr⁴⁺·YAG 存在着很强的激发态吸收, 而且第二激发态的弛豫时间相当短, 所以如果作用在 Cr⁴⁺·YAG 上的激光功率密度足够大, 使得激发态吸收达到饱和, 则可以实现被动锁模^[4]。我们在稳定的平凹直腔脉冲式 Nd·YAG 激光器中实现了 Cr⁴⁺·YAG 被动锁模, 得到平均脉宽为 190 ps, 输出能量为 22 mJ 的脉冲序列。本文报道这一实验结果, 并分析 Cr⁴⁺·YAG 被动锁模的动力学过程以及 Nd·YAG 的克尔透镜自聚焦在实现 Cr⁴⁺·YAG 被动锁模中的作用。

2 实验装置及结果

2.1 实验装置

Cr⁴⁺·YAG 被动锁模的实验装置如图 1 所示。M₁ 是曲率半径为 3 m 的全反射凹面镜; M₂ 是全反射平面镜; M₃ 是反射率为 15% 的输出耦合镜; P 是可变光阑, 其位置和孔径在实验中调整, 它不但保证了基横模运转, 而且与 Nd·YAG 的克尔透镜自聚焦相结合, 形成了 KLM 效应, 对 Cr⁴⁺·YAG 被动锁模起了一定的辅助作用。Φ4.5 mm×80 mm 的 Nd·YAG 棒由两根脉

* 国家自然科学基金和国家教委光电子信息工程开放实验室资助项目。

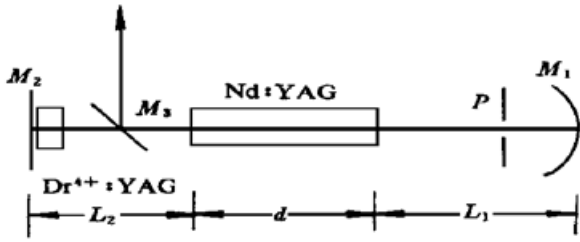


图 1 Cr⁴⁺:YAG 被动锁模 Nd:YAG 激光器的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for Cr⁴⁺:YAG passive mode locking of the Nd:YAG laser

冲氙灯泵浦,工作重复率为 1 Hz。棒的左端面与 M₂ 镜的距离 L₂ = 25 cm,右端面与 M₁ 镜的距离为 L₁,腔长 $L = L_1 + L_2 + d \times n_0$,实验中移动 M₁ 镜以改变腔长。Cr⁴⁺:YAG 由中国科学院上海光机所生长,通光长度为 2 mm,对 1.06 μm 连续光的小信号透过率为 63%,晶体装在铜套内加水冷却,紧靠 M₂ 镜放置。输出激光由 PIN 管构成的探测器接收并输入到存储示波器上观察锁模脉冲波形。

2.2 实验结果

实验中发现,腔长较小时,激光器运转在调 Q 状态;随着腔长的增加,调 Q 脉冲出现调制,并且随着

腔长的增加而加深。腔长超过 260 cm,示波器上观察到锁模脉冲;腔长在 280 cm 左右,锁模几率较高,稳定性较好;腔长进一步增加,锁模几率和稳定性反而下降,锁模的较佳腔长范围为 280 ± 5 cm。当 L = 280 cm,泵浦能量为 90 J 时,把一个孔径为 1.2 mm 的光阑置于距离 Nd:YAG 棒右端面 70 cm 处,可以使锁模几率提高 20%,达到 60% 以上;多次测量的输出能量为 22 ± 1 mJ。示波器上的锁模脉冲序列如图 2 所示,序列中的脉冲间隔接近 20 ns,与光脉冲在腔内来回一次所需要的时间相符。图 3 是在监测锁模波形和能量的情况下,用非共线二次谐波法测定的自相关曲线,曲线上每个数据点是 10 次测量的平均值,可以看出平均脉宽为 190 ps。

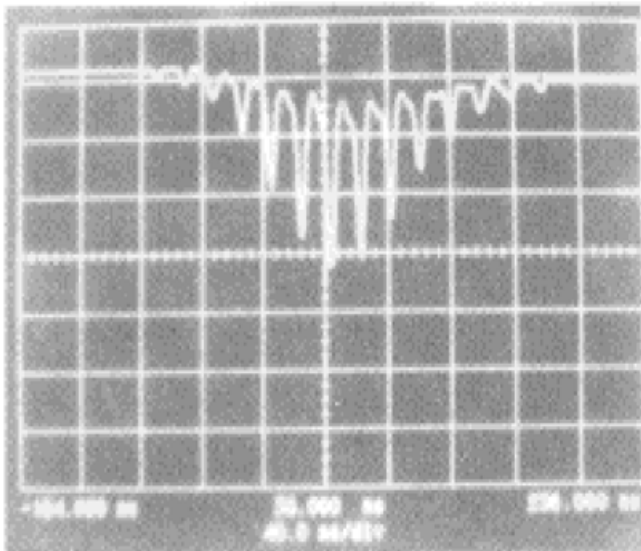


图 2 L = 280 cm 时激光器输出的锁模脉冲波形 (扫描时间: 40 ns/div)

Fig. 2 Oscillogram of the mode-locked pulse train from the Nd:YAG laser with cavity length of 280 cm (scanning time: 40 ns/div)

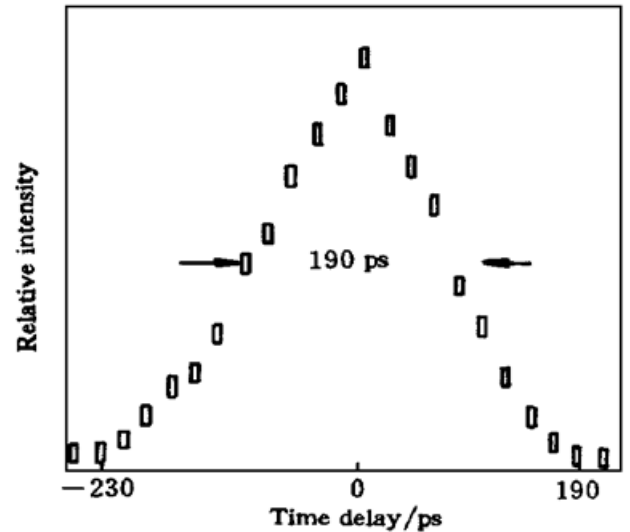


图 3 非共线二次谐波的自相关曲线

Fig. 3 Curve of the autocorrelation function of noncollinear second harmonic generation

实验结果表明,合适的腔长是实现 Cr⁴⁺:YAG 被动锁模的关键因素。这是因为采用长腔可以使腔内光束的束腰半径减小,锁定的纵模数增加,而且还与 Nd:YAG 的克尔透镜自聚焦有关。

3 理论分析

3.1 Cr⁴⁺·YAG 被动锁模的动力学过程

Cr⁴⁺·YAG 的能级结构与主要跃迁过程如图 4 所示, 图中第一激发态 3T₂ 包括 3E 和 3B₂ 两个能态。对 1.06 μm 激光存在着 3A₂ 到 3T₂ 的基态吸收和 3T₂ 到 3T₁ 的激发态吸收, 其吸收截面分别为 $\sigma_g \approx 7 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ 和 $\sigma_e \approx 5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, 而且 3T₁ 的弛豫时间 ($\tau_3 \approx 50 \text{ ps}$) 远远小于 3T₂ 的辐射寿命 ($\tau_1 \approx 3.4 \mu\text{s}$)^[5]。当腔内激光脉冲不够强时, 绝大部分铬离子只在 3A₂ 到 3T₂ 之间来回跃迁。由于 3T₂ 的弛豫时间远远大于光脉冲在腔内来回一次所需要的时间, 所以 3T₂ 的吸收饱和只能导致调 Q。当作用在 Cr⁴⁺·YAG 上的激光功率密度足够大时, 不仅可实现 3A₂ 到 3T₂ 的吸收饱和, 同时也可实现 3T₂ 到 3T₁ 的吸收饱和从而导致被动锁模。其动力学过程为: 基态上的 Cr⁴⁺ 离子首先被抽空到 3T₂, 在 Q 开关打开后, 处于 3T₂ 的 Cr⁴⁺ 离子受激吸收跃迁到 3T₁, 经过 50 ps 的弛豫时间又返回到 3T₂, 对调 Q 脉冲进行调制, 起到快饱和吸收体的作用进而实现被动锁模。因此, 在锁模中起作用的饱和光强就是激发态吸收的饱和光强, 即

$$I_s = \frac{h\nu}{\sigma_e \tau_3} \quad (1)$$

将有关参数代入(1)式, 得到 $I_s = 7.5 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 。在一般的实验条件下, 如此大的饱和光强, 是难于实现 Cr⁴⁺·YAG 的被动锁模的。

3.2 Nd·YAG 克尔透镜自聚焦的作用

我们认为, 在 Cr⁴⁺·YAG 被动锁模过程中, Nd·YAG 的克尔透镜自聚焦起了一定的作用。其理由是: (1) 对于 $R = 300 \text{ cm}$, $L = 280 \text{ cm}$ 的平凹腔, 腔内光束的束腰半径为 0.05 cm, 根据腔内激光能量、序列中的脉冲个数以及脉宽, 可粗略估算作用在 Cr⁴⁺·YAG 上的平均峰值功率密度为 $5.4 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 小于饱和光强。考虑到 Nd·YAG 的克尔透镜自聚焦效应之后^[6], Cr⁴⁺·YAG 处的光斑尺寸变小, 功率密度提高, 使其更接近饱和光强; (2) 实验中观察到锁模有一个较佳的腔长范围。这是因为, 该腔的结构接近半共心腔, 腔内光束的束腰在 Cr⁴⁺·YAG 附近, 在考虑了 Nd·YAG 的克尔透镜自聚焦效应后, 其腔长的变化对 Cr⁴⁺·YAG 处的光斑尺寸有更强烈的影响; (3) 腔内加入小孔光阑后, 可实现单横模(基横模)运转; 这样更有利于 Nd·YAG 的克尔自聚焦作用。对此可以作出进一步的理论分析和计算。

在图 1 所示的装置中, 由于 Cr⁴⁺·YAG 晶体相对很薄; 低重复率工作时, 腔内各元件的热透镜现象不明显, 所以只需考虑 Nd·YAG 的克尔透镜自聚焦效应。为了计算自聚焦引起的激光振荡模式的变化, 采用 Magni 等的 ABCD 矩阵公式^[7], 即光在晶体中的传输用下式表示

$$M_K = \sqrt{1 - \gamma} \begin{pmatrix} 1 & d/n_0 \\ -n_0\gamma & (1 - \gamma)d \end{pmatrix} \quad (2)$$

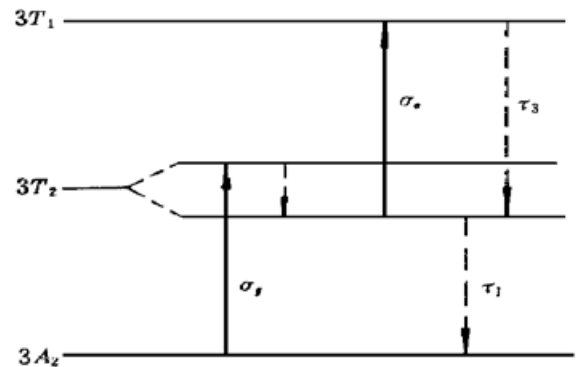


图 4 Cr⁴⁺·YAG 的能级结构图

Fig. 4 Schematic energy level diagram of Cr⁴⁺·YAG

$$y = \frac{P}{P_c} \left[1 + \frac{1}{4} \left[\frac{2\pi n_0 w_c^2}{\lambda d} - \frac{\lambda d}{2\pi n_0 w_0^2} \right]^2 \right]^{-1} \quad (3)$$

式中, d 为 Nd·YAG 棒的长度, n_0 为棒的折射率, P 为激光功率,

$$P_c = c\epsilon_0\lambda^2/(2\pi n_2)$$

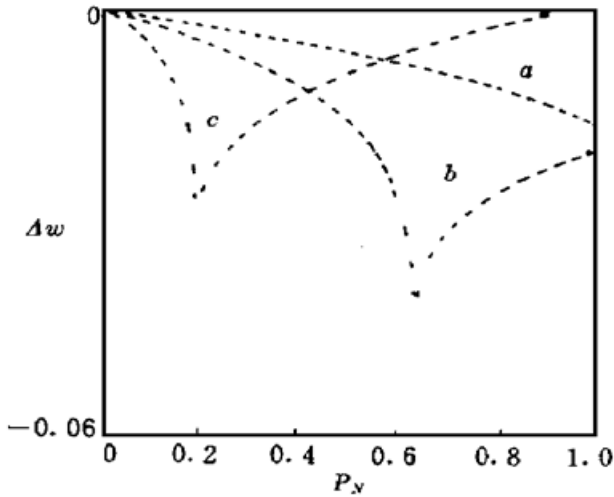


图5 不同腔长时,平面镜上光斑半径变化随归一化功率的变化

Fig. 5 Change of beam radius on mirror M_2 versus the normalized power for different cavity lengths

(a) $L = 270$ cm; (b) $L = 280$ cm; (c) $L = 290$ cm

为自聚焦的阈值功率, w_c, w_0 分别为 $P = 0$ 时求出的 Nd·YAG 棒中间的光斑半径和腔内激光束的束腰半径。克尔介质矩阵(2)和自由空间的传输矩阵、反射镜的变换矩阵结合起来得到光束在腔内往返一周的 $ABCD$ 矩阵。根据这个矩阵可计算 M_2 镜上的光斑半径变化 $\Delta w = w(P) - w(0)$ 随归一化激光功率 $P_N = P/P_c$ 的变化情况, 结果如图 5 所示。计算时选择 $L = 270$ cm, 280 cm, 290 cm 三种腔长进行比较。

从图 5 可以看出, 对于 $L = 270$ cm 的腔, 自聚焦使 M_2 镜上的光斑尺寸变化不大。对于 $L = 290$ cm 的腔, 当 $P_N = 0.2$ 时, 自聚焦的焦点出现在 M_2 镜附近, M_2 镜上光斑尺寸可大大减小; 随着 P_N 的增大, 自聚焦的焦点更靠近 Nd·YAG 棒, 因此 M_2 镜上的光斑尺寸增大。对于 $L = 280$ cm 的腔, 在 $P_N < 0.6$ 范围内, M_2 镜上的光斑尺寸都是随着 P_N 的增加而下降。这说明腔长在 280 cm 附近时自聚焦所起的作用较大, 与实验结果相符合。

克尔透镜自聚焦使 M_2 镜上的光斑尺寸减小, 作用在 Cr^{4+} ·YAG 上的激光功率密度提高, 达到或超过饱和光强。例如, 对于 $L = 280$ cm 的腔, 当 $P_N = 0.4$ 时, 由于自聚焦的作用, Cr^{4+} ·YAG 上的功率密度可提高约 1.64 倍。由于在这种闪光灯泵浦的激光器中, 锁模过程太短, 所以 Kerr 透镜效应的作用只是加速了激发态的饱和吸收。

4 讨论

与其他可饱和吸收体, 例如五甲川染料比较, Cr^{4+} ·YAG 被动锁模的锁模几率较低, 稳定性较差, 脉宽也大了很多。主要原因是: Cr^{4+} ·YAG 激发态吸收不易饱和(它的激发态吸收截面比五甲川染料小 1000 多倍), 这样锁模脉冲的形成需要一个较长的时间过程, 在脉冲闪光灯泵浦的调 Q 状态下, 激光持续时间太短, 不足以达到最窄锁模脉冲的状态。作者认为, 如果选择合适浓度的 Cr^{4+} ·YAG 晶体和提高晶体的破坏阈值, 同时优化激光器的各项参数, 使得作用在 Cr^{4+} ·YAG 上的激光功率密度进一步提高, 可望改善锁模几率和稳定性。

Cr^{4+} ·YAG 虽然不是 Nd·YAG 激光器锁模运转理想的可饱和吸收体, 但对它的研究却有一定的意义, 即 Cr^{4+} ·YAG 与 Nd·YAG 一起可能形成双锁模双波长激光输出。

致谢 感谢中国科学院上海光机所邓佩珍、徐 军、乔景文为本研究提供了 Cr^{4+} ·YAG 晶体。

参 考 文 献

- 1 Yuzo Ishida, Kazunori Naganuma. Compact diode-pumped all-solid-state femtosecond Cr⁴⁺·YAG laser. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(1): 51~ 53
- 2 Y. Shimony, Z. Burshtein, Y. Kalisky. Cr⁴⁺·YAG as passive Q-switch and Brewster plate in a pulsed Nd·YAG laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(10): 1738~ 1741
- 3 P. Yankov. Cr⁴⁺·YAG Q-switching of Nd·host laser oscillators. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1994, **27**(6): 1118~ 1120
- 4 Ouyang Bin, Ding Yanhua, Wan Xiaoke *et al.*. Saturable absorption of Cr⁴⁺·YAG and its performance as passive Q-switches. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(12): 1665~ 1670 (in Chinese)
- 5 Alphan Sennaroglu, Clifford. R. Pollock, Howard Nathel. Efficient continuous-wave chromium-doped YAG laser. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(5): 930~ 937
- 6 K. X. Liu, C. J. Flood, D. R. Walker *et al.*. Kerr lens mode locking of a diode-pumped Nd·YAG laser. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(19): 1361~ 1363
- 7 Vittorio Magni, Giulio Cerullo, Sandro De Silvestri. ABCD matrix analysis of propagation of gaussian beams through Kerr media. *Opt. Commun.*, 1993, **96**(4~ 6): 348~ 355

Investigation on Characteristics of Cr⁴⁺·YAG Passive Mode Locking in a Nd·YAG Laser with a Plane-concave Cavity

Wang Jiaxian^{1,2} Zhang Wenzhen² Wang Qingyue¹ Xing Qirong¹

¹*Ultrafast Laser Lab., The College of Precision Instrument & Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072*

²*Department of Applied Physics, Huaqiao University, Quanzhou 362011*

Abstract The passive mode-locking in a pulsed Nd·YAG laser with a plane-concave cavity by using Cr⁴⁺·YAG as the saturable absorber was achieved. The pulse train with a pulse duration of 190 ps and output energy of 22 mJ was obtained. This paper also analyzed the dynamical progress of Cr⁴⁺·YAG passive mode-locking and the action of Kerr lens self-focus of Nd·YAG in the progress.

Key words Cr⁴⁺·YAG, passive mode locking, Kerr lens self-focus, saturation of excited-state absorption