

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0056-03

脉冲式 Nd:YAG/KTP/Cr⁴⁺:YAG 皮秒 绿光激光器的研究*

王加贤 张文珍

(华侨大学信息科学与工程学院, 泉州 362011)

提要 分析了 Cr⁴⁺:YAG 作为 1064 nm 激光的可饱和吸收体实现被动锁模的机理。采用合适的折叠腔实现闪光灯抽运的 Nd:YAG/KTP/Cr⁴⁺:YAG 激光器的被动锁模和腔内倍频, 得到输出能量为 12 mJ 的皮秒绿光脉冲序列。

关键词 Cr⁴⁺:YAG 晶体, 被动锁模, 腔内倍频, 皮秒绿光脉冲

中图分类号 TN248.1⁺3 **文献标识码** A

Investigation on Nd:YAG/KTP/Cr⁴⁺:YAG Picosecond Green Laser

WANG Jia-xian ZHANG Wen-zhen

(College of Info. Sci. & Eng., Huaqiao Univ., Quanzhou 362011)

Abstract This paper analyzes the mechanism of Cr⁴⁺:YAG passive mode-locking as a saturable absorber of 1064 nm laser. A suitable folding-cavity was adopted to achieve the mode-locking and the intracavity frequency doubling of a Nd:YAG/KTP/Cr⁴⁺:YAG laser pumped by a flash-lamp. The picosecond green pulse train with output energy of 12 mJ was obtained.

Key words Cr⁴⁺:YAG crystal, passive mode-locking, intracavity frequency doubling, picosecond green puls

1 引言

波长 532 nm 的高峰值功率皮秒绿光脉冲, 可用于激光医学、海洋探潜、核聚变等, 所以一直受到研究人员的重视。通常采用有机染料作为可饱和吸收体, 实现脉冲式 Nd:YAG 激光器的被动锁模, 再结合腔内或腔外倍频技术, 获得皮秒绿光脉冲。有机染料作为可饱和吸收体进行被动锁模, 虽能获得几十皮秒的脉冲, 但存在稳定性差、使用不方便等缺点。本文报道采用 Cr⁴⁺:YAG 作为可饱和吸收体、KTP 作为倍频器件, 实现闪光灯抽运的 Nd:YAG 激光器的被动锁模和腔内倍频, 获得输出能量为 12 mJ 的皮秒绿光脉冲; 并分析 Cr⁴⁺:YAG 的激发态吸收导致被动锁模过程及折叠腔的特点和所起的作用。

2 Cr⁴⁺:YAG 被动锁模分析

Cr⁴⁺:YAG 的发射谱处于 1.3 μm ~ 1.6 μm 波

长范围, 用它作为增益介质实现连续波、调 Q 或自锁模运转是近年来的研究热点。同时, Cr⁴⁺:YAG 又是 0.9 μm ~ 1.2 μm 激光的可饱和吸收体, 与传统的有机染料或色心晶体(如 LiF:F₂⁻)相比, 它的光学吸收截面大、光化学性能稳定、使用方便、使用寿命长, 非常适合作为连续或脉冲运转的 Nd:YAG 激光器的 Q 开关^[1,2]。Cr⁴⁺:YAG 晶体与 1064 nm 激光吸收有关的能级及主要跃迁过程可以简化如图 1 所示。基态 3A₂ 上 Cr⁴⁺ 离子被激发到激发态 3T₂ 上, 然后快速弛豫到能级 1E 上, 处于 1E 上的 Cr⁴⁺ 离子受激吸收跃迁到上能级 3T₁ 上, 经过一定的弛豫时间又返回到 1E。基态 3A₂ 和激发态 1E 上的 Cr⁴⁺ 离子对 1064 nm 激光的吸收截面分别为 $\sigma_g = 8.7 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 和 $\sigma_e = 2.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ^[3]。激发态 1E 的弛豫时间 τ_A 为 ~3.4 μs, 上能级 3T₁ 的弛豫时间为 550 ps^[4]。由于 1E 的弛豫时间相当长, 所以基态的饱和吸收只能调 Q 而不能实现被动锁模。当作用在 Cr⁴⁺:YAG 上的激光光强足够大时, Cr⁴⁺:YAG 具有很强的激发态吸收, 而且

* 福建省自然科学基金和华侨大学科研基金资助课题。

上能级 $3T_1$ 的弛豫时间远小于腔的渡越时间和增益介质激光上能级寿命。这样,在基态吸收饱和,即 Q 开关打开后,腔内光强迅速增加,使得 $1E$ 能级上大量的 Cr^{4+} 离子受激吸收跃迁到上能级 $3T_1$ 上,经过 550 ps 的弛豫时间又返回到 $1E$ 能级。 Cr^{4+} 离子在 $1E$ 和 $3T_2$ 能级之间的上下跃迁,其效果造成对调 Q 脉冲进行调制,从而实现脉冲式 Q 值调制包络下的被动锁模。采用简单的速率方程可以求得激发态吸收的饱和光强为^[5]

$$I_s = h\nu/\sigma_e \cdot \tau_e \quad (1)$$

把光子能量 $h\nu$, $3T_1$ 能级寿命 τ_e 和激发态吸收截面 σ_e 值代入(1)式可求得 $I_s = 1.6 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 。 I_s 值很大,使得在一般光强下,如连续波模式或低强度的调 Q 模式, Cr^{4+} :YAG 只实现调 Q 而难以实现被动锁模。为了使作用在 Cr^{4+} :YAG 上光强达到或接近 I_s 值从而实现被动锁模,必须把 Cr^{4+} :YAG 置于腔内光束的光腰附近。

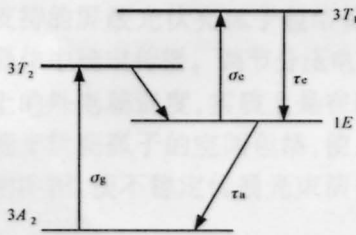


图 1 Cr^{4+} :YAG 能级图

Fig. 1 Scheme of the energy level of Cr^{4+} :YAG

3 实验装置与腔结构分析

脉冲式 Nd:YAG / KTP / Cr^{4+} :YAG 皮秒绿光激光器实验装置如图 2 所示。 M_1 和 M_2 是对 1064 nm 光高反凹面镜,其曲率半径分别为 $R_1 = 50 \text{ cm}$, $R_2 = 100 \text{ cm}$, M_1 和 M_2 的距离近似为 100 cm,构

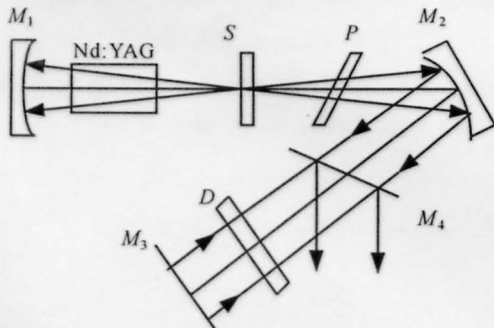


图 2 Nd:YAG/KTP/ Cr^{4+} :YAG 皮秒绿光激光器实验装置

Fig. 2 Experimental setup of Nd:YAG/KTP/ Cr^{4+} :YAG picosecond green laser

成半共心半共焦内腔 M_2 的折叠角 $2\theta \approx 10^\circ$ 。 M_3 是对 1064 nm 和 532 nm 光高反的平面镜, M_2 与 M_3 的距离为 50 cm。 M_4 是对 1064 nm 光高透对 532 nm 光高反的平面镜,与光轴成 45° 角放置,作为输出耦合镜。 S 是作为可饱和吸收体的 Cr^{4+} :YAG 晶体(由中科院上海光机所提供),其通光长度 2 mm、对 1064 nm 连续光的小信号透过率为 60%,晶体用铟膜包裹,装在铜套内通循环水冷却。直径 3.5 mm,长度 60 mm 的 Nd:YAG 棒由单根脉冲氙灯抽运,工作重复率为 1 Hz。Nd:YAG 棒尽量靠近 M_1 镜,以增加增益介质中的模体积,提高激光能量。倍频器件 D 是 II 类相位匹配的 KTP 晶体,切割方式为 $\theta = 90^\circ$, $\phi = 25^\circ$,晶体尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。 P 是厚度 1 cm、以布儒斯特角放置的石英平板,其作用是补偿因折叠镜引起的光束像散。输出激光由响应时间 1 ns 的 PIN 管构成的光电探测器接收并输入到 400 MHz 数字存储示波器上观察脉冲波形。用 PT-1 型激光能量计测量激光输出能量。

对图 2 装置的折叠腔进行简单分析可知, M_1 与 M_2 之间有一光腰, M_2 与 M_3 之间的光束近似为平行光束,在光腰附近放置 Cr^{4+} :YAG 晶体,能使晶体处有足够大的激光功率密度从而容易使 Cr^{4+} :YAG 的激发态吸收达到饱和。根据倍频理论,KTP 晶体的倍频效率与相位匹配条件有关,有一定发散角的球面波可看成不同方向波矢量的均匀平面波的叠加,而这些波矢量方向不同的平面波不可能在同一个匹配方向上达到相位匹配。因此,采用图 2 所示的折叠腔,使通过倍频晶体的光束近似为平行光束,对于提高倍频效率是很有利的。采用从腔内反射输出,即将基频光往返二次通过晶体产生的倍频光一并由 M_4 镜耦合输出,显然比从端镜透射输出更能提高输出的倍频光能量。

4 实验结果与讨论

首先进行基频光的被动锁模运转实验。不放入倍频晶体, M_3 换成对 1064 nm 光反射率为 15% 的平面镜,在 Nd:YAG 棒与石英平板之间插入 Cr^{4+} :YAG 晶体,当 Cr^{4+} :YAG 所处位置偏离光腰较大时,锁模几率和锁模稳定性随之下降。在较佳运转条件下,测得输出的基频光能量为 21 mJ。在监测锁模波形和输出能量的情况下,用非共线自相关二次谐波法测定脉冲宽度为 160 ps(每一数据点均是

10 次测量的平均值)。其次进行被动锁模和腔内倍频实验。不改变 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 位置,在 M_3 镜前面放置 KTP 晶体,并把 M_4 更换为对 1064 nm 光高透对 532 nm 光高反的平面输出镜,输出镜后面插入 1064 nm 光的滤光片。精细调整 KTP 晶体位置及角度后,测得输出的绿光能量为 12 mJ,转换效率为 57%,示波器上观察到的稳定的锁模脉冲波形如图 3 所示。可以看出序列中的脉冲间隔为 10 ns,与腔的渡越时间相符,调 Q 包络的持续时间约为

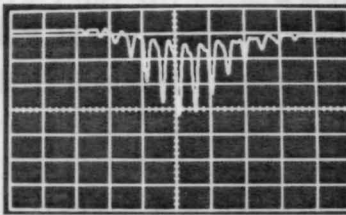


图 3 锁模光脉冲波形(扫描时间 20 ns/div.)
Fig.3 Oscillogram of the mode-locked pulse train
(scanning time: 20 ns/div.)

140 ns,脉冲调制深度大于 90%。

参 考 文 献

- 1 Y. Shimony, Z. Burshtein, Y. Kalisky *et al.*. Progress in Q-switching of Nd:YAG laser using $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ saturable absorber. *J. Nolin. Opt. Phys. and Materials*, 1996, **5** (3):495~504
- 2 Ouyang Bin, Ding Yanhua, Wan Xiaoke *et al.*. Saturable absorption of $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ and its performance as passive Q-Switches. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16** (12):1665~1670 (in Chinese)
- 3 Y. Shimony, Z. Burshtein, Y. Kalisky. $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ as passive Q-switch and brewster plate in a pulsed Nd:YAG laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, **QE-31** (10): 1738~1741
- 4 Ren Yuxin, Lin Lifuang, Ouyang Bing *et al.*. Absorption of excited state of $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ crystal. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(2):225~227 (in Chinese)
- 5 Wang Jiaxian, Zhang Wenzhen, Wang Qingyue *et al.*. Passive mode-locking in a CPM Nd:YAG laser using $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(8):983~987 (in Chinese)

