

# $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$ 在对撞脉冲锁模的 $\text{Nd}\text{-YAG}$ 激光器中实现被动锁模的研究\*

王加贤 张文珍

(华侨大学应用物理系, 泉州 362011)

王清月 邢岐荣

(天津大学精仪学院超快激光研究室, 天津 300072)

邓佩珍 徐军 乔景文

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 在理论上提出了  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  作为可饱和吸收体在  $\text{Nd}\text{-YAG}$  激光器中实现被动锁模的可能性, 运用速率方程组导出在强激光脉冲作用下  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  激发态吸收的恢复时间和饱和光强。实验上在带有抗共振环结构的接近于介稳腔的脉冲式  $\text{Nd}\text{-YAG}$  激光器中用  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  作为可饱和吸收体实现被动锁模运转, 得到能量 13.5 mJ、平均脉宽 180 ps 的锁模脉冲序列。

**关键词**  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$ , 激发态吸收, 饱和光强, 被动锁模。

## 1 引言

掺四价铬的钇铝石榴石( $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$ )是近年来发展起来的一种新型光学晶体, 它可以作为(1.34~1.58)  $\mu\text{m}$  范围的可调谐激光增益介质, 用克尔透镜锁模方法获得飞秒激光脉冲<sup>[1~3]</sup>。同时, 它也是(0.9~1.2)  $\mu\text{m}$  范围的可饱和吸收体, 用它作为脉冲式或连续  $\text{Nd}\text{-YAG}$  激光器的被动调  $Q$  器件, 具有稳定性好、结构简单、使用方便、饱和光强小等优点, 从而引起人们的重视, 并在短短几年里得到了迅速的发展<sup>[4~6]</sup>。然而, 由于  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  第一激发态的弛豫时间长(微秒量级), 在一般实验条件下, 靠它的吸收饱和和恢复不能进行被动锁模。作者在分析该晶体能级结构和主要跃迁过程特点的基础上认为, 由于  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  有很强的激发态吸收而且第二激发态弛豫时间相当短(50 ps), 所以当腔内光强足够大使得激发态吸收达到饱和时, 可以实现被动锁模。采用带有抗共振环结构的接近介稳腔的对撞脉冲锁模的非稳腔来提高  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  处的激光功率密度, 实现在  $\text{Nd}\text{-YAG}$  激光器中用  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  作为可饱和吸收体进行被动锁模, 得到脉冲宽度为 180 ps 的锁模脉冲序列。

\* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-02-12; 收到修改稿日期: 1998-04-14

## 2 Cr<sup>4+</sup> ·YAG 作为可饱和吸收体被动锁模的机理分析

Cr<sup>4+</sup> ·YAG 属于石榴石系列。该晶体与 1.06 μm 激光吸收有关的能级与主要跃迁过程如

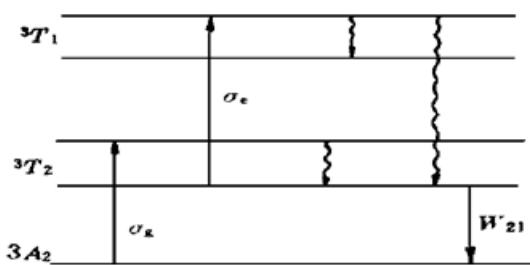


Fig. 1 Energy levels for Cr<sup>4+</sup> ·YAG with ground state and excited state absorption

图 1 所示, 可以用四能级模型描述其饱和性能, 其基态和激发态吸收(ESA)的吸收截面分别为  $\sigma_g \approx 8.7 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 、 $\sigma_e \approx 2.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ <sup>[5]</sup>。Cr<sup>4+</sup> ·YAG 的能级结构与跃迁的主要特点是: 具有明显的激发态吸收; 无辐射跃迁速率比辐射跃迁速率 ( $3T_2 \rightarrow 3A_2$ ) 大很多; 特别是  $3T_1$  的弛豫时间  $\tau_3$  ( $\sim 50 \text{ ps}$ ) 远远小于  $3T_2$  的辐射寿命 ( $\sim 3.4 \mu\text{s}$ )<sup>[7~9]</sup>。

在强激光脉冲作用下, 考虑到 Cr<sup>4+</sup> ·YAG 第一激发态  $3T_2$  的弛豫时间远远大于脉冲宽度, 忽略  $3T_2$  到

$3A_2$  的跃迁过程, 得到  $3A_2$ 、 $3T_2$ 、 $3T_1$  三个能级上 Cr<sup>4+</sup> 离子数密度的变化率方程及腔内光强的变化为

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -N_1 \frac{\sigma_g}{h\nu} I \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = N_1 \frac{\sigma_g}{h\nu} I - N_2 \frac{\sigma_e}{h\nu} I + N_3/\tau_3 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = N_2 \frac{\sigma_e}{h\nu} I - N_3/\tau_3 \quad (3)$$

$$\frac{\partial I}{\partial Z} = -I(\sigma_g N_1 + \sigma_e N_2) \quad (4)$$

当腔内光强不够大时, 激光器运转在调  $Q$  状态, 可忽略  $3T_1$  上的粒子数分布, 即  $N_3 = 0$ , 由(1)式解出  $N_1 = N_0 \exp(-\sigma_g I/h\nu)$ 。当腔内光强足够大, 基态吸收很快达到饱和, 很强的激发态吸收使得  $3T_1$  能级上能保持相当多的 Cr<sup>4+</sup> 离子。在小于第一激发态的弛豫时间( $\mu\text{s}$ )范围内, 可认为 Cr<sup>4+</sup> 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。因此, (2)式和(3)式可写成

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -N_2 \sigma_e I/h\nu + N_3/\tau_3, \quad \frac{\partial N_3}{\partial t} = N_2 \sigma_e I/h\nu - N_3/\tau_3 \quad (5)$$

在基态被抽空情况下, 有  $N_2 + N_3 = N_0$ ,  $N_0$  为晶体中掺杂浓度。令  $\Delta N(t) = N_2(t) - N_3(t)$  为  $3T_2$  与  $3T_1$  能级上的 Cr<sup>4+</sup> 离子数密度之差, 代入上面方程, 可以解出

$$\Delta N = \frac{N_0(1/\tau_3 - \sigma_e I/h\nu)}{\sigma_e I/h\nu + 1/\tau_3} \left[ 1 - \exp \left[ \left( \frac{\sigma_e}{h\nu} I + \frac{1}{\tau_3} \right) t \right] \right] \quad (6)$$

为了求出激发态饱和吸收的恢复时间, 令(6)式中的  $I = 0$ , 于是得到

$$\Delta N = N_0 [1 - \exp(-t/\tau_3)] \quad (7)$$

在两个脉冲的间隔时间内, 吸收系数的瞬时值

$$\alpha(t) = \sigma_e \Delta N(t) = \alpha_0 [1 - \exp(-t/\tau_3)] \quad (8)$$

(8)式中的  $\alpha_0 = \sigma_e N_0$  是激发态的小信号吸收系数,  $\tau_3$  就是激发态吸收的恢复时间。

稳态时,  $dN_2/dt = dN_3/dt = 0$ , 激发态吸收饱和时对空间平均有  $N_2 \approx N_3$ , 把这两个条件代入到(5)式第 2 式, 可得到激发态吸收的饱和光强近似为

$$I_{S2} = h\nu/\sigma_e \tau_3 \quad (9)$$

将 Cr<sup>4+</sup> ·YAG 的有关参数代入(9)式, 得到  $I_{s2} \approx 1.75 \times 10^{10} \text{ W/cm}^2$ , 而它的第一激发态的饱和光强为  $I_{s1} = 4.3 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ <sup>[8]</sup>, 两者相差非常大, 这正是 Cr<sup>4+</sup> ·YAG 在一般光强下, 如连续波模式和低强度的调 Q 模式, 只实现调 Q 而难以实现被动锁模的原因所在。

通过上面的分析可知, 由于 Cr<sup>4+</sup> ·YAG 基态饱和吸收的恢复时间远远大于激光脉冲在腔内来回所需的时间, 所以基态的饱和吸收只能实现调 Q 而不能被动锁模, 但如果腔内光强足够大使得激发态吸收达到饱和, 则可以在实现调 Q 的同时实现被动锁模。

### 3 用 Cr<sup>4+</sup> ·YAG 实现被动锁模的实验研究

#### 3.1 实验装置

图 2 是用 Cr<sup>4+</sup> ·YAG 作为可饱和吸收体实现对撞脉冲锁模的 Nd ·YAG 激光器。M<sub>1</sub> 是曲率半径 3 m 的凹面全反射镜; M<sub>3</sub>、M<sub>4</sub>、M<sub>5</sub> 组成抗共振环, 其长度为 430 mm; M<sub>2</sub> 是有一定反射透射比的介质膜片, 作为输出耦合镜。YAG 棒的尺寸是  $\phi 4.5 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ , 其左端面与 M<sub>2</sub> 镜距离 120 mm, 右端面与 M<sub>1</sub> 镜的距离在实验中调整以改变腔长。F 为可变光阑; L 为补偿透镜, 用来压缩输出光束的发散角。Cr<sup>4+</sup> ·YAG 由中国科学院上海光学精密机械研究所生长, 所用的晶体薄片通光长度 2 mm, 对 1.06 μm 连续光的小信号透过率为 63%。晶体用钢皮包裹, 装在铜套内加水冷却,

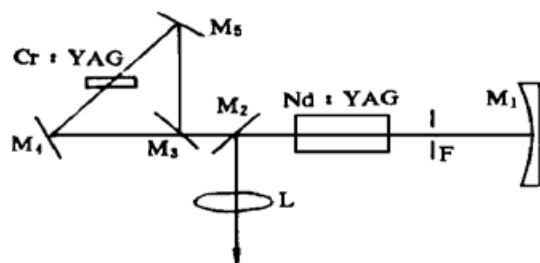


Fig. 2 Experimental setup for CPM Nd ·YAG laser using Cr<sup>4+</sup> ·YAG as saturable absorber

置于抗共振环路中间。激光器的工作重复率为每秒 1 次。用 PIN 管构成的探测器接收激光并输入到 Hewlett Packard 公司的 54502A 型 400 MHz 数字示波器上观察脉冲波形; 用非共线自相关二次谐波法测定脉冲宽度; 用 PT-1 型激光能量计测量输出能量。

#### 3.2 实验结果与分析

通过比较, 选取输出耦合镜 M<sub>2</sub> 的反射透射比为 15% ~ 85%, 泵浦能量 125 J, 在此情况下移动 M<sub>1</sub> 镜进行不同腔长的实验。结果表明: 腔长较短时( $L < 1000 \text{ mm}$ ), 激光器运转在调 Q 状态; 腔长增加, 调 Q 脉冲中出现调制而且调制深度随着腔长的增加而加深; 当腔长  $L = 3000 \text{ mm}$ , 即构成介稳腔时, 观察到好的锁模脉冲, 但抗共振环的介质膜片及 Cr<sup>4+</sup> ·YAG 晶体很快就被激光击伤; 实验在  $L = 3000 \text{ mm}$  附近调整腔长, 当腔长  $L = 3100 \text{ mm}$  时, 介质膜片和晶体不被击伤, 而且有较好的锁模脉冲输出。在此情况下, 把孔径 1.5 mm 的光阑置于离凹面镜 1700 mm 处, 发现输出稳定性和锁模几率都有明显提高, 锁模几率达 50%。图 3

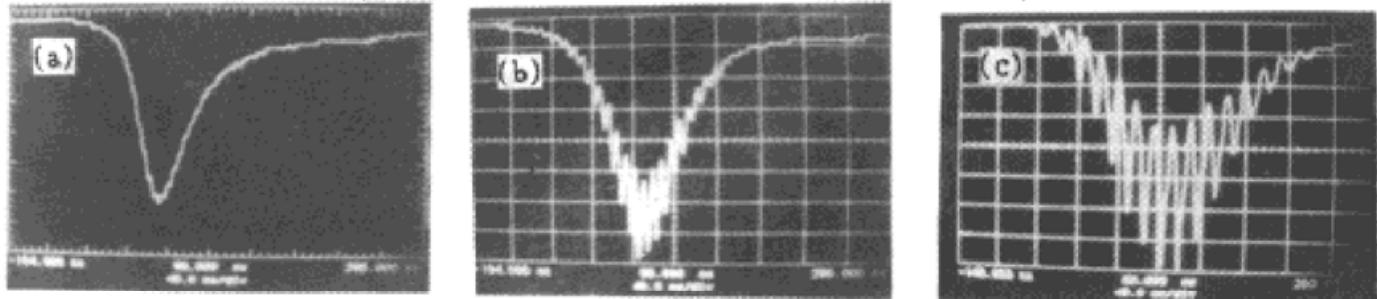


Fig. 3 Output laser pulses of Nd ·YAG laser with different cavity length  $L$  using Cr<sup>4+</sup> ·YAG saturable absorber (scanning time 40 ns/div). (a)  $L = 1000 \text{ mm}$ , (b)  $L = 1500 \text{ mm}$ , (c)  $L = 3100 \text{ mm}$

中(a)、(b)、(c)三张照片分别对应  $L = 1000 \text{ mm}$ 、 $L = 1500 \text{ mm}$ 、 $L = 3100 \text{ mm}$  时激光器输出脉冲。可以看出, 图3(c)所示的锁模脉冲序列中的脉冲间隔近似为 20 ns, 与脉冲在腔内来回一次所需的时间相符, 脉冲包络约为 240 ns。测得单脉冲序列能量 13.5 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量脉冲宽度, 得到平均脉冲宽度大约为 180 ps。

作者认为, 腔长  $L = 3100 \text{ mm}$  时, 腔的几何参量为  $g_1 = 1$ ,  $g_2 = 1 - L/R \approx -0.03$ , 是接近于介稳腔的非稳腔。腔的二个共轭像点一个在腔外, 一个在  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  所处的位置附近, 像点的光功率密度非常大; 腔长大时, 锁定的纵模数多, 脉宽较窄, 有利于激光峰值功率的提高。采用抗共振环结构, 把  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  晶体置于环路中间, 相向传播的二列脉冲在晶体中形成的瞬态光栅效应使晶体内的光强出现明显的强弱空间分布, 而在强度最大处容易导致激发态吸收饱和。在腔内放置光阑, 保证了基横模运转, 使激光增益全部集中到参与锁模的基横模上来。上述三种措施都有利于提高  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  处的激光功率密度, 使激发态吸收达到饱和, 从而实现锁模。

## 4 结论与讨论

通过对  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  能级结构与主要跃迁过程的分析可知, 由于第二激发态  $3T_1$  的弛豫时间相当短, 所以当腔内光强足够大使得激发态吸收达到饱和时,  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  可以实现被动锁模。运用速率方程, 在一定的近似条件下, 求出激发态吸收的恢复时间和饱和光强。在带有抗共振环结构的接近于介稳腔的对撞脉冲锁模  $\text{Nd-YAG}$  激光器中, 用  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  作为可饱和吸收体, 选择合适的腔参数和其它工作参数, 实现了被动锁模运转, 得到能量 13.5 mJ、平均脉宽 180 ps 的锁模脉冲序列。

用  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  实现被动锁模的困难在于: 1)  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  激发态的饱和光强相当大, 在一般实验条件下, 腔内光强与这个数值相差甚多, 所以只能运转在调  $Q$  状态; 2)  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  晶体的破坏阈值限制了腔内激光功率密度的大幅度提高。本文的实验结果还不够理想, 锁模脉冲底部不平, 说明还有连续光成份, 脉冲宽度也较大, 其原因是  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  掺杂浓度不够高, 腔内光强不够大。作者相信, 随着晶体质量的提高和激光器各项参数的进一步优化, 能得到更好的实验结果。 $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  作为新型的可饱和吸收体, 能在被动锁模方面得到广泛的应用。

## 参 考 文 献

- [1] A. G. Okhrimchuk, A. V. Shestakov, Performance of YAG·Cr<sup>4+</sup> laser crystal. *Opt. Material*, 1994, 3(1) : 1~13
- [2] YUZO Ishida, Kazunori Naganuma, Compact diode-pumped all-solid-state femtosecond Cr<sup>4+</sup>-YAG laser. *Opt. Lett.*, 1996, 21(1) : 51~53
- [3] P. J. Conlon, Y. P. Tong, P. M. W. French et al., Femtosecond pulse generation from a synchronously pumped, self-mode-locked Cr<sup>4+</sup>-YAG laser. *J. Mod. Opt.*, 1995, 42(4) : 723~726
- [4] Y. Shimony, Z. Burshtein, Y. Kalisky et al., Progress in  $Q$ -switching of Nd-YAG lasers using Cr<sup>4+</sup>-YAG saturable absorber. *J. Nonlin. Opt. Phys. and Materials*, 1996, 5(3) : 495~504
- [5] 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. Quant. Electron.*, 1995, QE-31(10) : 1738~1741
- [6] 丁彦华, 欧阳斌, 徐军等, 连续 Nd-YAG 激光器中 Cr<sup>4+</sup>-YAG 被动调 Q 的稳定性和功率的提高. 中

国激光, 1997, **A24**(3) : 197~ 201

- [7] 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 America, Washington, D. C., 1989. 66~ 70
- [8] Alphan Sennaroglu, C. R. Pollock, H. Nathel, Efficient continuous-wave chromium-doped YAG laser. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1995, **12**(5) : 930~ 937
- [9] 欧阳斌, 丁彦华, 万小柯等,  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  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) : 1665~ 1670

## Passive Mode-Locking in a CPM Nd-YAG Laser Using $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$

Wang Jiaxian Zhang Wenzhen

(Department of Applied Physics, Huaqiao University, Quanzhou 362011)

Wang Qingyue Xing Qirong

(Ultrafast Laser Laboratory, The College of Precision Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072)

Deng Peizhen Xu Jun Qiao Jingwen

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

(Received 12 February 1998; revised 14 April 1998)

**Abstract** The possibility of using  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  as saturable absorber to achieve passively mode-locked operation in a Nd-YAG Laser is proposed theoretically. From the rate equations, we derived the resumption time and the saturable light intensity of the excited-state of  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  acted by strong laser pulses. Passively mode-locked operation is experimentally realized by using  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$  as saturable absorber in a pulsed Nd-YAG laser with a nearly critical stable resonator and an antiresonant ring. The pulse train with energy of 13.5 mJ and pulse duration of 180 ps are obtained.

**Key words**  $\text{Cr}^{4+}\text{-YAG}$ , excited-state absorption, saturable light intensity, passively mode-locking.