

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0139-03

Cr⁴⁺:YAG 晶体作为可饱和吸收体用于主-被动锁模的 Nd:YAG 激光器

冷雨欣 陆海鹤 林礼煌 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

提要 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为可饱和吸收体用于主-被动锁模的 Nd:YAG 激光器中, 获得了稳定和完全的 1064nm 锁模脉冲列。更换具有不同初始透过率的 Cr⁴⁺:YAG 晶体, 获得了从 0.8 ns 到 2.4 ns 宽的单个锁模脉冲。对于使用不同初始透过率的 Cr⁴⁺:YAG 晶体, 存在一个合适的初始透过率, 使得脉冲宽度最短。考虑激发态的吸收, 利用速率方程分析了锁模的动力学过程, 解释了实验结果。

关键词 Cr⁴⁺:YAG 晶体, 主-被动锁模, 激发态吸收

中图分类号 TN248.1⁺3 **文献标识码** A

Cr⁴⁺:YAG Crystal Used as Saturable Absorber in Active-passive Mode-Locking Nd:YAG Laser

LENG Yu-xin LU Hai-he LIN Li-huang XU Zhi-zhan

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

Abstract Cr⁴⁺:YAG crystal was used as a saturable absorber in an active-passive mode-locked Nd:YAG laser. The stable and complete mode-locked pulse train was achieved at 1064 nm. The duration of a single pulse from ~0.8 ns to 2.4 ns was obtained by using Cr⁴⁺:YAG crystals with the different initial transmissions, and there was a shortest pulse width. The mode-locking dynamic process of Cr⁴⁺:YAG crystal was discussed to explain the experimental result, and the effect of excited-state absorption was considered.

Key words Cr⁴⁺:YAG, active-passive mode-locking, excited-state absorption

Cr⁴⁺:YAG 晶体作为可饱和吸收体已经被广泛地用作 Nd:YAG 激光器中的 Q 开关, 产生调 Q 脉冲。同时 Cr⁴⁺:YAG 晶体也是一种优良的激光晶体, 可以产生光谱范围在 1340 nm 到 1580 nm 的飞秒激光脉冲。最近, 利用 Cr⁴⁺:YAG 晶体在 1064 nm 附近的激发态吸收和激发态上能级的短寿命, 可能对 Nd:YAG 激光器进行锁模^[1]。由于 Cr⁴⁺:YAG 晶体的激发态饱和和吸收需要的光强和晶体初始透过率的限制, 利用 Cr⁴⁺:YAG 晶体的被动锁模不太稳定, 而且锁模脉冲的宽度难以通过更换不同初始透过率的晶体控制^[2]。

我们报道了在主-被动锁模的 Nd:YAG 激光器中, 利用 Cr⁴⁺:YAG 晶体作为可饱和吸收体, 获得了稳定和完全的锁模脉冲列。实验表明, 用具有不同初始透过率的 Cr⁴⁺:YAG 晶体, 可以获得不同宽度的锁模脉冲。其中存在一个合适的初始透过率使

得锁模脉冲宽度最短。通过速率方程的计算, 分析了 Cr⁴⁺:YAG 晶体的激发态吸收和 Q 开关的影响, 也发现存在一个初始透过率可以获得最佳的锁模效果, 验证了实验的结果。在实验中得到的不同宽度的纳秒主-被动锁模脉冲得到了解释, 并且和较宽的主动锁模脉冲和调 Q 脉冲进行了比较。

根据 Cr⁴⁺:YAG 晶体的能级图, 通过速率方程, 可以获得晶体初始透过率 T_0 和激发态饱和吸收光强 I_0 的关系[图 1(a)]:

$$T_0 = \exp[\sigma_g/\sigma_e(1 - I_0/I_{s0} - \ln I_0/I_{s0})] \quad (1)$$

以及晶体初始透过率 T_0 和可饱和吸收体的调制 $T-T_0$ 间的关系 [图 1(b)]:

$$T - T_0 = T_0 \exp[(1 - T)I\sigma_g/I_{s0}\sigma_e] \times \left(\frac{1 + TI\tau_1/I_{s0}\tau_3}{1 + I\tau_1/I_{s0}\tau_3} \right)^{1-\sigma_g/\sigma_e} - T_0 \quad (2)$$

这里 $I_{s0} = h\nu/\sigma_e\tau_3$ 是 Cr⁴⁺:YAG 晶体的激发态饱和

吸收的光强。目前不同报道中的晶体参数各不相同, 根据我们使用的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体参数, $I_{s0} =$

261 MW/cm^2 。

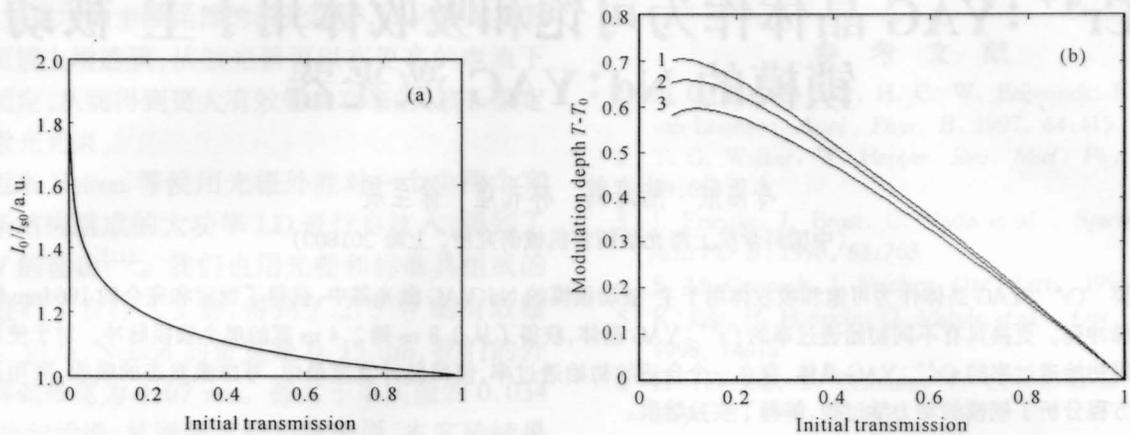


图 1 (a) 晶体初始透过率 T_0 与激发态饱和吸收光强 I_0 的关系; (b) 晶体初始透过率 T_0 与可饱和吸收体的调制 $T - T_0$ 间的关系

Fig.1 (a) Saturable intensity I_0 of the crystal is changed with the initial transmission T_0 for $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ crystal; (b) Modulation $T - T_0$ of the saturable absorber is changed with the different initial transmission T_0 of $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ crystal.

The incident intensity $I_0 = 1.5I_{s0}$ (1), I_{s0} (2) and $0.5I_{s0}$ (3)

从图 1 中可见, 晶体初始透过率越小, 晶体激发态饱和吸收需要的光强就越大, 因此产生被动锁模需要的光强也越大。当晶体初始透过率比较大时, 作为可饱和吸收体的透过率调制也比较小, 因此锁模效应也比较小。晶体初始透过率在 0.1 附近, 可以获得比较大的调制, 可以获得较好的锁模效应。

2.4 ns 的不同宽度的主-被动锁模脉冲列 (图 2)。当采用初始透过率 $T = 36.3\%$ 的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体时, 获得了最短, 最稳定的锁模脉冲列。

实验中, 直接将 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体和声光调制器插入 $\text{Nd} : \text{YAG}$ 激光腔中。声光调制器工作在 50 MHz。激光器腔长 $\sim 1500 \text{ mm}$ 。在实验中, 更换不同初始透过率的 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体时, 微调激光器腔长, 使其和声光调制器工作频率匹配。随着 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体初始透过率的改变, 获得了从 0.8 ns 到

从图 2 中可见, 随着晶体初始透过率 T_0 的减小, 晶体激发态饱和吸收需要的人射光强相应增大, 而激光器振荡的阈值相应增加。因此难以获得激发态饱和吸收, 晶体的调 Q 影响增加。锁模效应主要来自主动锁模, 使得锁模脉冲宽度增加。而随着晶体初始透过率 T_0 的增加, 晶体激发态饱和吸收需要的人射光强减小。但是作为饱和吸收体, 调制的幅度相应减小, 导致锁模脉冲宽度增加, 同时锁模的

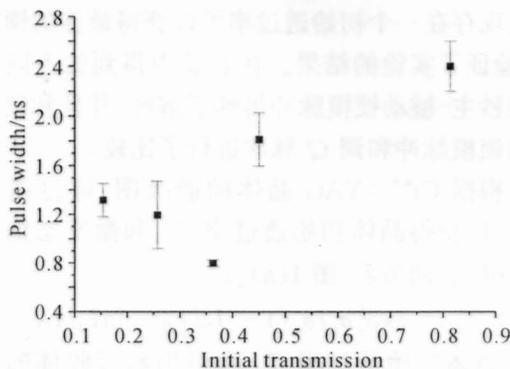


图 2 主-被动锁模脉冲宽度 (FWHM) 与 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体初始透过率 T_0 的关系

Fig.2 Relation between the active-passive mode-locking pulse width (FWHM) and the initial transmission T_0 of $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ crystal

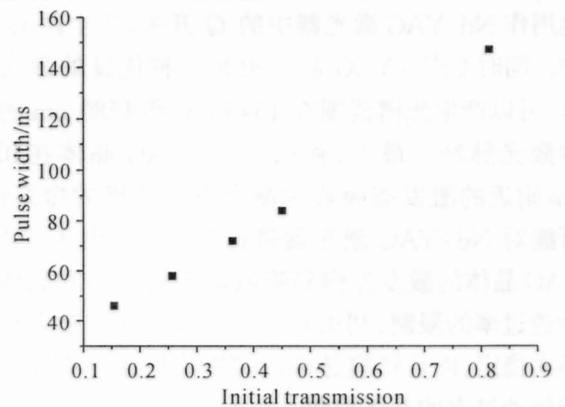


图 3 调 Q 脉冲宽度 (FWHM) 与 $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ 晶体初始透过率 T_0 的关系

Fig.3 Relation between the Q pulse width (FWHM) without the AOM working and the initial transmission T_0 of $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$ crystal

稳定性也相应下降。因此,存在一个最佳的晶体初始透过率,使得锁模脉冲最短,最稳定。

作为比较,从激光器中取出 Cr⁴⁺:YAG 晶体,单独使用声光调制器,产生主动锁模脉冲列。其单个锁模脉冲宽度为 2.8 ns。脉冲宽度不可调,而且比主-被动锁模脉冲宽。然后关闭声光调制器,在激光器中单独使用 Cr⁴⁺:YAG 晶体。此时晶体作为调 Q 元件,激光器输出调 Q 脉冲宽度远大于主-被动锁模脉冲宽度。而且调 Q 脉冲宽度随着晶体的初始透过率 T₀ 的增加而单调增加(图 3)。

在本工作中, Cr⁴⁺:YAG 晶体提供了获得 ~1 ns 量级可调谐脉冲宽度的全固体激光器的简便途径。这种纳秒脉冲宽度介于调 Q 脉冲和被动锁

模脉冲之间,可以用于 ICF 等物理研究领域,也可以作为大型激光系统的种子源。利用主-被动锁模的技术,也可以采用其他可饱和吸收体以获得其他波长或脉冲宽度的稳定的锁模脉冲。

参 考 文 献

- 1 Lin Lihuang, Ouyang Bin, Leng Yuxin *et al.*. Mode-locked Nd:YAG laser using Cr⁴⁺:YAG crystal at 1.064 μm. CLEO'99, 1999 Paper CTuK36
- 2 Yung-Fu Chen, S. W. Tsai, S. C. Wang. High-power diode-pumped Q-switched and mode-locked Nd:YVO₄ laser with a Cr⁴⁺:YAG saturable absorber. *Opt. Lett.*, 2000, 25:1442~1444