

# Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动锁模 Nd:YAG 绿光激光器研究

王加贤 张文珍

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建泉州 362011)

**摘要** :分析 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动锁模机理及 KTP 晶体的倍频效率,设计合适的谐振腔以保证 Cr<sup>4+</sup>:YAG 处有足够大的激光功率密度和通过 KTP 的光束为平行光束。实现了 Cr<sup>4+</sup>:YAG 作为可饱和吸收体的脉冲式 Nd:YAG 腔内倍频激光器的被动锁模运转,得到波长 532nm 输出能量为 13.5mJ 的皮秒单脉冲序列。

**关键词** Cr<sup>4+</sup>:YAG、被动锁模、腔内倍频、Nd:YAG 绿光激光器

## Investigation on Cr<sup>4+</sup>:YAG passively mode-locked Nd:YAG green laser

Wang Jiaxian Zhang Wenzhen

(College of Information Science & Engineering, Huaqiao University, 362011, Quanzhou)

**Abstract** This paper analyzes the mechanism of Cr<sup>4+</sup>:YAG passive mode-locking and frequency doubled efficiency of KTP crystal. A suitable cavity has been designed to ensure the largest laser power density in Cr<sup>4+</sup>:YAG and the parallel beam of light through the KTP crystal. By using Cr<sup>4+</sup>:YAG as a saturable absorber, we have realized the passive mode-locking operation of a pulsed intracavity frequency doubled Nd:YAG laser and obtained the single pulse train with the output energy of 13.5mJ at 532nm and with picoseconds pulse duration.

**Key words** Cr<sup>4+</sup>:YAG, passive mode-locking, intracavity frequency doubled, Nd:YAG green laser

高功率的皮秒绿光脉冲在激光探测、激光医疗、非线性光谱学等领域有着广泛的应用前景,所以受到研究人员的重视。多年来,人们一直采用有机染料作为可饱和吸收体实现脉冲式抽运的 Nd:YAG 激光器的被动锁模,再配合腔外或腔内倍频方法以获得高能量的皮秒绿光脉冲。然而,有机染料具有使用不方便、稳定性差、难以实现锁模激光器的全固化等缺点。本研究采用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 作为可饱和吸收体, KTP 作为倍频器件,实现脉冲式抽运的 Nd:YAG 激光器的被动锁模和腔内倍频,获得输出能量 13.5mJ 的皮秒绿光脉冲。

### 实验装置

Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动锁模 KTP 腔内倍频 Nd:YAG 绿光激光器实验装置如图 1 所示。M<sub>1</sub>

是对基频光(1.06μm)高反的曲率半径 R<sub>1</sub>=100cm 的球面镜, M<sub>2</sub> 是对基频光和倍频光(0.53μm)高反的平面镜, F 是镀上 1.06μm 增透膜的透镜(焦距 f), M<sub>3</sub> 是对基频光高透对倍频光高反的平面输出镜。透镜与球面镜的距离,总的等效腔长为 150cm。S 是作为可饱和吸收

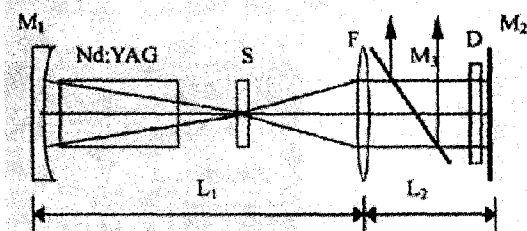


图1 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动锁模 Nd:YAG 绿光激光器实验装置

\* 本研究项目得到福建省自然科学基金(A0010018)和国务院侨办科研基金资助

体的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ , D 是倍频器件。直径 3.5mm、长度 60mm 的  $\text{Nd}:\text{YAG}$  棒由单根脉冲氙灯抽运,工作重复率为 1Hz,  $\text{Nd}:\text{YAG}$  棒尽量靠近球面镜以增加增益介质的模体积,提高基频光功率。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  由中科院上海光机所提供,通光长度 2mm、对  $1.06\mu\text{m}$  连续光的小信号透过率为 60%。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  用铟膜包裹,装在铜套内通循环水冷却。采用 II 类相位匹配的 KTP 晶体作为倍频器件,切割方式为  $\theta=90^\circ$ ,  $\varphi=25^\circ$ 。晶体长度 3mm。输出激光由 PIN 管构成的探测器接收并输入到 54502A 型 400MHz 数字存储示波器上观察脉冲波形。

### 理论分析

#### 1. $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动锁模机理分析

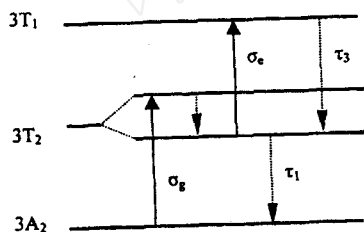


图 2  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  的能级结构图

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  是近年来出现的一种新型宽带可调谐固体激光材料,吸收谱在  $0.9\sim 1.2\mu\text{m}$  波长范围,发射谱在  $1.3\sim 1.6\mu\text{m}$  波长范围<sup>[1]</sup>。它既可作为激光增益介质,又可作为  $\text{Nd}:\text{YAG}$  激光器的可饱和吸收体<sup>[2,3]</sup>。与传统的有机染料或色心晶体(例如  $\text{LiF}:\text{F}_2^-$ )比较,它作为  $\text{Nd}:\text{YAG}$  激光器的 Q 开关具有吸收截面大、饱和光强低、光化学性能稳定、损伤阈值高和使用方便等优点。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  的能级结构和主要跃迁过程如图 2 所示。对  $1.06\mu\text{m}$  激光存在着  $3\text{A}_2$  到  $3\text{T}_2$  的基态吸收和  $3\text{T}_2$  到  $3\text{T}_1$  的激发态吸收,其吸收截面分别为  $\sigma_e$  和  $\sigma_a$ <sup>[4]</sup>。第一激发态  $3\text{T}_2$  的弛豫时间为  $\sim 3.4\mu\text{s}$ ,第二激发态  $3\text{T}_1$  的弛豫时间根据最新研究结果为 550 ps<sup>[5]</sup>。由于第一激发态的弛豫时间相当长,所以基态的饱和吸收只能调 Q 而不能实现锁模。

— 390 —

然而,我们注意到: $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  具有很强的激发态吸收,而且第二激发态的弛豫时间远小于腔的渡越时间(ns 量级)和增益介质激光上能级寿命( $\mu\text{s}$  量级),所以当腔内激光功率密度足够大,在基态吸收饱和和 Q 开关打开后,处于  $3\text{T}_2$  的  $\text{Cr}^{4+}$  离子受激吸收跃迁到  $3\text{T}_1$ ,经过 550 ps 的弛豫时间又返回到  $3\text{T}_2$ 。 $\text{Cr}^{4+}$  离子在  $3\text{T}_2$  与  $3\text{T}_1$  之间的跃迁,其效果造成对调 Q 脉冲进行调制,从而实现被动锁模。在小于第一激发态的弛豫时间内, $3\text{T}_1$  和  $3\text{T}_2$  上的  $\text{Cr}^{4+}$  离子数密度变化率为

$$\frac{dN_3}{dt} = \frac{N_2\sigma_e I}{h\nu} - \frac{N_3}{\tau_3}, \quad \frac{dN_2}{dt} = -\frac{N_2\sigma_e I}{h\nu} + \frac{N_3}{\tau_3} \quad (1)$$

稳态时有  $dN_2/dt = dN_3/dt = 0$ , 激发态吸收饱和和对空间平均有,把这二个条件代入(1)式,可得到激发态吸收的饱和光强为

$$I_s = h\nu / \sigma_e \tau_3 \quad (2)$$

把  $1.06\mu\text{m}$  激光的光子能量  $h\nu$ 、第二激发态寿命  $\tau_3$  和吸收截面  $\sigma_e$  代入(2)式可得  $I_s = 1.6 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$ 。 $I_s$  值很大,这正是在一般光强下  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  难以实现被动锁模的原因所在。只有当作用在它上面的光强超过激发态吸收的饱和光强时, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  才可以实现被动锁模。

#### 2. 倍频效率分析

由倍频理论可知,倍频光的功率密度由下式决定<sup>[6]</sup>

$$S_{2\omega} = 2\sqrt{\mu_0/E_0} \cdot \frac{\omega^2 d_{eff} S_{\omega} x}{n^3 c^2} \cdot \left( \sin \frac{\Delta k \cdot x}{2} / \frac{\Delta k \cdot x}{2} \right)^2 \quad (3)$$

其中, $\omega$ 、 $S_{\omega}$  分别为基频光角频率和功率密度, $x$ 、 $d_{eff}$  和  $n$  分别为倍频晶体的长度、有效非线性系数和折射率。可以看出:在晶体长度一定的情况下,倍频效率与基频光功率密度、晶体的有效非线性系数和相位匹配条件有关。KTP 晶体硬度大、化学性能稳定、不潮解、光损伤阈值高(大于  $400\text{MW/cm}^2$ ),特别是非线性系数大(约为 KDP 的 15 倍),所以适宜作为  $\text{Nd}:$

YAG 激光器的倍频器件。为了提高倍频效率,除了应在不损伤晶体的前提下提高晶体处的基频光功率密度外,还应尽量保证通过晶体的光束为平行光束,因为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迭加,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。

### 3. 谐振腔结构分析

采用图 1 所示的三镜腔,并设置,可以使得  $M_1$  与 F 之间有一个较小光腰,而且  $M_2$  与 F 之间近似为平行光束。在光腰附近放置  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ ,能保证  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  处有足够大的激光功率密度,使  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  的激发态吸收达到饱和;在  $M_2$  镜与 F 之间放置倍频晶体,能提高倍频效率;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输出镜  $M_3$  耦合输出,也可以增加倍频光的输出能量。

在腔长和球面镜曲率半径确定的情况下,透镜 F 的焦距  $f$  对  $M_1$  与 F 之间的光腰半径  $\omega_1$ 、 $M_2$  与 F 之间的平行光束的光束半径  $\omega_2$  都有影响。考虑到腔的稳定性及 KTP 晶体的破坏阈值,选取透镜焦距  $f = 25\text{cm}$ 。根据实验装置中的有关参量(计算时取  $R_1 = 100\text{cm}$ ,  $L = 150\text{cm}$ ,  $L_1 = 99.5\text{cm}$ ),运用光线传输矩阵求得  $\omega_1 = 0.18\text{mm}$ 、 $\omega_2 = 0.46\text{mm}$ 。

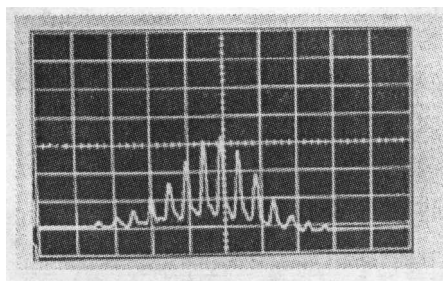


图 3 锁模光脉冲波形(扫描时间:20ns/div)

### 实验结果

先不放入倍频晶体,取  $M_3$  为对基频光反射率 15% 的平面镜,在光腰附近插入  $\text{Cr}^{4+}:$

YAG 晶体,特别注意不能损伤晶体表面。调整成腔后,在示波器上观察到锁模脉冲波形,用 PT-1 型激光能量计测得基频光能量为 23mJ,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基频光脉冲宽度为 160ps。放入 KTP 晶体后,并把  $M_3$  更换为对基频光高透对倍频光高反的平面镜,而且  $M_3$  镜后面放置 1.06 $\mu\text{m}$  波长的滤光片。精细调整 KTP 晶体角度,示波器上可观察到稳定的锁模脉冲,如图 3 所示。序列中的脉冲间隔近似为 10ns,与腔的渡越时间相符,脉冲包络的持续时间约为 140ns,脉冲调制深度大于 90%。腔内各元件调整到最佳位置时,测得倍频光单脉冲序列能量为 13.5mJ。

### 结 论

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  存在着较强的激发态吸收而且第二激发态的弛豫时间远小于腔的渡越时间,所以当作用在  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  上的激光功率密度足够使激发态吸收饱和,则  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  可以实现被动锁模。采用合适的三镜腔结构,既保证了  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  处有较小的光束半径,又使通过倍频晶体的基频光近似为平行光束;采用倍频光从腔内反射输出的方法,构成双通倍频,提高了倍频光输出能量。本研究实现了用  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  作为可饱和吸收体,用 KTP 作为倍频器件的脉冲式抽运的内腔倍频 Nd:YAG 激光器的被动锁模运转,得到了较好的实验结果。

### 参 考 文 献

- [1] A. G. Okhrimchuk, *Opt. Material*, 1994, 3(1):1-13
- [2] Y. Ishida, *Opt. Lett.*, 1996, 21(1):51
- [3] 欧阳斌等. 光学学报, 1996, 16(12):1665
- [4] Y. Shimony, *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, QE-31(10):1738
- [5] 冷雨欣等. 光学学报, 2001, 21(2):225
- [6] 沈德元等. 中国激光, 1996, A23(8):673