

# 掺钕离子固体激光器的被动式 $Q$ 调制 及其锁模输出

陈振文 刘海北 郑邵家 张胜雄 蔡宏盛

(中央大学光电科学研究所 中坜 320)

**提要** 用四种饱和吸收体(醋酸盐塑胶染料,  $\text{LiF} \cdot \text{F}_2^-$ ,  $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ , 离子性色滤片玻璃(colour filter glass))做被动式调制元件,对 Nd·YAG 激光器等做纯  $Q$  值调制及  $Q$  值调制包络的锁模调制. 分析了  $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$  晶体材料的参数值、能级跃迁及其原子速率方程式(Rate equation)对产生  $Q$  值调制及锁模调制的物理机制;并优化了  $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$  晶体及激光共振腔和操作工作点,使其达到最低阈值、最高效益及 100% 锁模调制的激光输出.

**关键词**  $Q$  值调制及锁模调制, Nd·YAG 激光, 被动激光调制

我们曾研制并发表了多种掺钕离子固体激光器家族,如 Nd·YAG 激光器, Nd·玻璃激光器, Nd·YVO<sub>4</sub> 激光器和  $\mu$ -Nd·YAG 激光器等被动式  $Q$  值调制及被动式锁模调制输出. 上述激光器中使用的被动式  $Q$  值调制或锁模调制元件不外是醋酸盐染料片(plastic dye sheet), 含氟分子离子氟化锂色心晶体<sup>[1-3]</sup>( $\text{LiF} \cdot \text{F}_2^-$ ), 掺铬离子钇铝石榴石晶体<sup>[4]</sup>( $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ )及离子态色滤片玻璃<sup>[4]</sup>(colour filter glass, eg. Schott RG1000)等. 最近我们对其机制及理论作更深入的研究后发现,这四种元件的材质参数特性和能级跃迁都有相似性,并可用激光共振腔内的饱和光强完整地解释其  $Q$  值调制现象、锁模调制现象及脉冲式  $Q$  值调制包络下的锁模调制.

本文以应用最广泛的  $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$  晶体片被动式调制元件使用在 Nd·YAG 激光共振腔中产生  $Q$  值调制及锁模调制. 从材料的参数特性、激光共振腔内饱和吸收光强造成调制元件的原子能级跃迁和激光工作点(operating points)等多方面理论分析及推算两种不同调制的机制. 利用此数值可以实验得到此四种被动式调制元件的纯  $Q$  值调制激光输出或纯锁模调制激光输出以及脉冲式  $Q$  值调制包络内的锁模调制激光输出,并将它们并列分析比较. 更重要的是用  $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$  晶体锁模的 Nd·YAG 激光可以得到更低阈值、更高效益、完全 100% 锁模的激光输出;并且其共振腔长度可大大缩短;锁模脉冲数目更多;还有它的锁模可不必使用困难及复杂的对撞脉冲锁模技术而只要用最简单的四元件共振腔加上适当的控制激光抽运工作点即可达到.

## 1 理论分析

$\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$  晶体的典型吸收光谱如图 1, 而它对 1.064 nm 波长吸收的能级跃迁<sup>[2,3]</sup>如图

2. 当  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶体置于激光共振腔中时, 其基态是  $^3A_2$ , 而其第一激发态是  $^3T_2$ . 其中各能级的原子粒子数可以用  $N_1$  及  $N_2$  来表示. 而从  $^3T_2$  弛豫回到  $^3A_2$  的时间  $\tau_1$  为  $3.4 \mu\text{s}$ .  $\sigma_x$  是由  $^3A_2$  基态跃迁至  $^3T_2$  激发态的吸收截面, 数值为  $8.7 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ . 当  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶体作饱和吸收调制元件时, 其机制可用此二能级的跃迁及弛豫来表述.  $^3T_2$  及  $^3A_2$  能级的粒子密度速率方程为

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = - N_1 \left[ \frac{\sigma_x}{2\pi\hbar\nu} \right] I + N_2/\tau_1 \tag{1}$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = N_1 \left[ \frac{\sigma_x}{2\pi\hbar\nu} \right] I - N_2/\tau_1 \tag{2}$$

$I$  为激光光强:

$$\frac{\partial I}{\partial z} = - I(\sigma_x N_1 + \sigma_e N_2) \tag{3}$$

式中  $\hbar\nu$  是一个光子的能量,  $t$  和  $z$  分别是时间和纵向坐标.  $\sigma_e$  是  $N_2$  粒子的激发态吸收截面, 为  $2.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ .

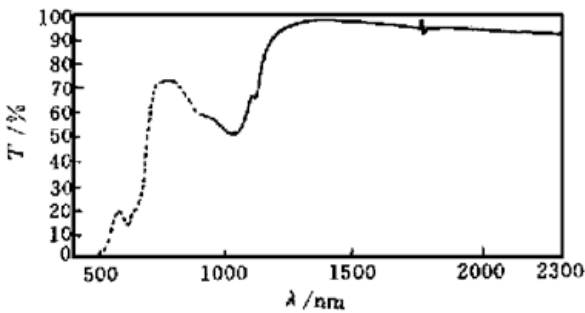


图 1  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶体吸收光谱

Fig. 1 Absorption spectrum of the  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG crystal

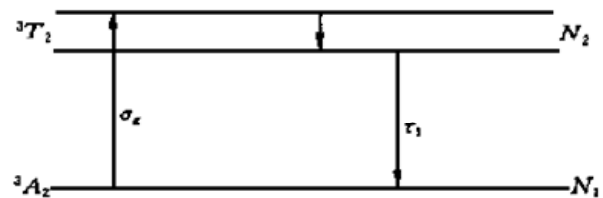


图 2  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶体能级跃迁图:  $Q$  值调制饱和吸收

Fig. 2 Energy diagram of the  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG crystal: saturable absorption of  $Q$ -switch operation

从以上方程解得此饱和吸收体的饱和光强

$$I_s = \frac{2\pi\hbar\nu}{\sigma_x \tau_1}$$

用  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶体做 Nd ·YAG 激光  $Q$  值调制,  $I_{sg} = 6.3 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ , 也就是说, 只要共振腔内激光光强大于  $6.3 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ ,  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 就可以做很好的 Nd ·YAG 激光被动式饱和吸收  $Q$  值调制元件.

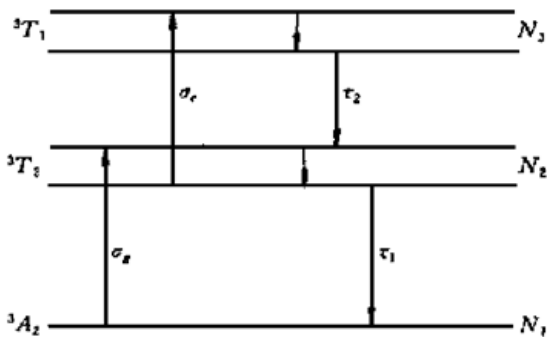


图 3  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶体能级跃迁图:  $Q$  值调制包络锁模饱和吸收

Fig. 3 Energy diagram of the  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG crystal: saturable absorption of  $Q$ -switch enveloped mode-locking operation

下面讨论共振腔内激光光强远大于此饱和光强时及  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 的高激发态吸收跃迁. 图 3 为更高能级全图. 当共振腔内光强够高时,  $^3T_1$  能级会聚集很多粒子, 其粒子数为  $N_3$ . 从  $^3T_1$  到  $^3T_2$  的弛豫时间只需  $50 \text{ ps}$ . 此更高的二能级跃迁也可用另一组粒子密度速率方程来描述

$$\frac{dN_2}{dt} = - N_2 \left[ \frac{\sigma_e}{2\pi\hbar\nu} \right] I + \frac{N_3}{\tau_2} \tag{4}$$

$$\frac{dN_3}{dt} = N_2 \left[ \frac{\sigma_e}{2\pi\hbar\nu} \right] I - \frac{N_3}{\tau_2} \tag{5}$$

解(8)及(9)式, 可得

$$I_{se} = \frac{2\pi\hbar\nu}{\sigma_e\tau_2} \tag{6}$$

也就是说  $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$  晶体高激发态饱和吸收光强度是  $I_{se} = 7.5 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ . 而此饱和吸收之跃迁及快速弛豫变化调制就是被动式锁模调制的机制.

## 2 实验结果

对上述分析及得到的数值做实验验证. 我们所用的激光器结构如图 4 所示, 是一种最简单和最无调制晶体损害的四元件激光共振腔. 其中的元件参数为:  $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$  激光棒直径为 5 mm, 长为 64 mm,  $\text{Nd}$  浓度为 1.1%; 输出镜的反射率为 65%. 四种被动式调制元件依次放入, 我们可以得到非常好的 Q 值调制脉冲, 如图 5 (a) ~ (d), 它们依次为染料片、色心晶体、 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$  晶体及 RG1000 色滤片玻璃调制的输出. 利用同样的结构及元件, 增加  $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$  激光的抽运使激光共振腔内光强增加, 对每一被动调制元件可以得到 Q 值调制包络的完全锁模调制脉冲串输出, 如图 6 (a) ~ (d) 所示.

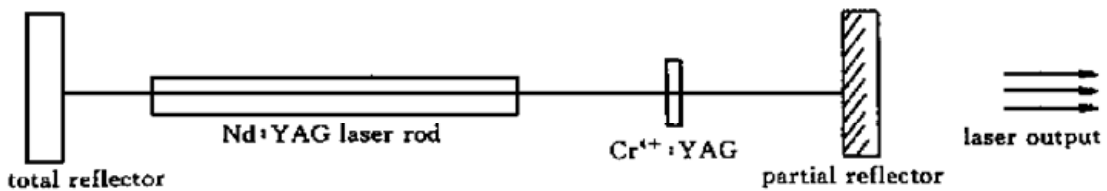


图 4 被动式 Q 值调制和锁模调制  $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$  激光器共振腔

Fig. 4 Passively Q-switched and mode-locked  $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$  laser resonator

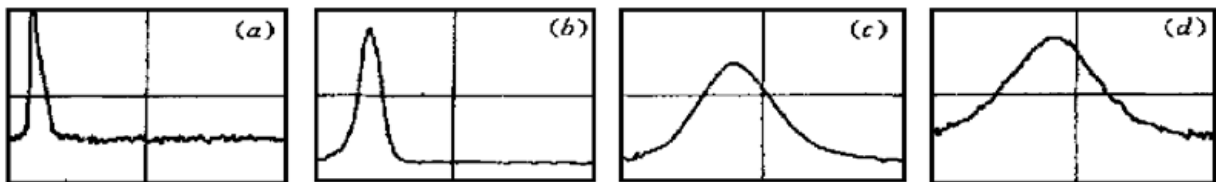


图 5 使用染料片 (a),  $\text{LiF} \cdot \text{F}_2$  晶体 (b),  $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$  晶体 (c) 及 RG1000 色滤片玻璃 (d) 的被动式 Q 值调制  $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$  激光输出

Fig. 5 Output of the  $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$  lasers passively Q-switched by plastic dye sheet (a),  $\text{LiF} \cdot \text{F}_2$  crystal (b),  $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$  crystal (c), and RG1000 colour filter glass (d)

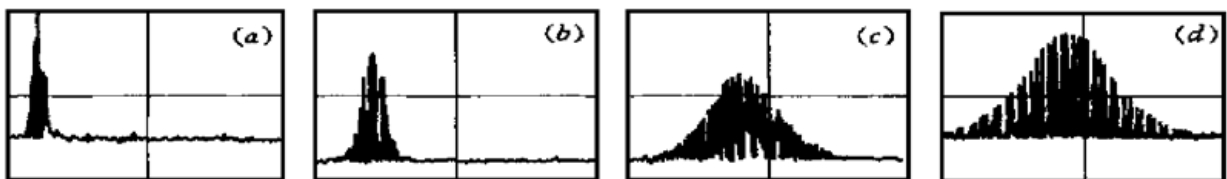


图 6 使用染料片 (a),  $\text{LiF} \cdot \text{F}_2$  晶体 (b),  $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$  晶体 (c) 和 RG1000 色滤片玻璃 (d) 的被动式 Q 值调制包络锁模  $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$  激光输出

Fig. 6 Output of the  $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$  lasers passively Q-switched and mode-locked by plastic dye sheet (a),  $\text{LiF} \cdot \text{F}_2$  crystal (b),  $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$  crystal (c), and RG1000 colour filter glass (d)

表 1  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶体被动式锁模 Nd ·YAG 激光器的结果与 J. Wang 等发表结果的比较Table 1 Comparison of J. Wang *et al.*'s results and our results of the Nd ·YAG laser passively mode-locked by a  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG crystal

Merits	J. Wang <i>et al.</i>	NCU
Depth of modulation	81%	100%
Resonator configuration	Curved-plane resonator	Plane parallel resonator (Corner cube resonator)
Resonator length	CPM > 300 cm	< 60 cm
Q-switched pulse envelope	120 ns (FWHM)	140 ns (FWHM)
Q-switched pulse envelope	250 ns (full width)	430 ns (full width)
Mode-locked pulse separation	20 ns	4 ns
Mode-locked pulse number	14	108
Lower threshold	Input = 125 J	Input < 7 J (5.6%)
Higher efficiency	13.5 mJ/125 J	10 mJ/7 J (13.2 times)

表 2 四种被动晶体调 Q 和锁模 Nd ·YAG 激光器的结果比较

Table 2 Nd ·YAG laser passively modulated by the plastic dye sheet,  $\text{LiF} \cdot \text{F}_2^-$  colour center crystal,  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG crystal and RG100 coloured glass filter modulators

	Plastic dye	$\text{LiF} \cdot \text{F}_2^-$	$\text{Cr}^{4+}$ ·YAG	RG1000
Q-switched pulsewidth (FWHM)	22 ns	46 ns	140 ns	173 ns
Q-switched pulsewidth (Full width)	75 ns	144 ns	430 ns	450 ns
Mode-locked pulses number	13	33	108	112
Mode-locked pulses separation	4 ns	4 ns	4 ns	4 ns
Mode-locked pulses depth	100%	100%	100%	100%
Input energy	7 J	7 J	7 J	7 J
Output energy	10 mJ	10 mJ	10 mJ	10 mJ
Modulator O. D. at 1.06 $\mu\text{m}$	0.34	0.22	0.27	0.20
Q-switched pulse output power	0.46 MW	0.22 MW*	0.07 MW*	0.06 MW*
Mode-locked pulses output power	3.85 MW	1.52 MW*	0.47 MW*	0.45 MW*
Pulse-repetition-rates	0.5~ 3 Hz	30 Hz	30 Hz	30 Hz

\* : The laser system was not optimized to obtain the maximum output power owing to the different surfaces qualities, total intracavity transmittance and the modulation bleached transmittance difference etc. .

我们对  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 的锁模效果做优化, 并和文献[4]作比较, 结果见表 1. 由表可见, 由于

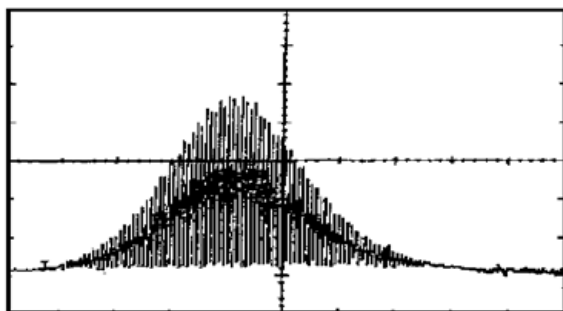


图 7 使用  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG 晶体作被动式调制元件的 100% 锁模 Nd ·YAG 激光输出

Fig. 7 100% mode-locked Nd ·YAG laser passively modulated by the  $\text{Cr}^{4+}$  ·YAG crystal

掌握了理论数值, 所以, (1) 可以得到完全 100% 锁模调制, 而非只有 81% 锁模调制深度的输出; (2) 本文用最简单的四元件平行共振腔即可, 而不需用八元件且对撞锁模特别结构; (3) 所用共振腔长只需 30~ 60 cm, 不必用到 300 cm 长; (4) 所获得的半高全宽(FWHM) Q 值调制激光脉冲为 140 ns, 而另一种则是 120 ns; (5) 所得到的全脉宽 Q 值调制激光为 430 ns, 而另一种则是 250 ns; (6) 在 Q 值调制包络内所产生的锁模激光脉冲数目为 108 个, 而另一种则只有 18 个; (7) 本激光器的输入阈值能量小于 7 J 即可, 而不需

125 J 的高输入能量; (8) 我们的器件在 7 J 输入可有 10 mJ 输出, 而另一种在 125 J 输入只有 13.5 mJ 输出, 也就是说效率提高了 13.2 倍. 表 2 为四种被动式晶体调  $Q$  和锁模 Nd·YAG 激光的结果比较.

图 7 是一个更清楚的低输入阈值、高效益输出、完全 100% 锁模的脉冲式 Nd·YAG 激光使用  $\text{Cr}^{4+}$ ·YAG 晶体作被动式调制元件的激光输出. 图 8 (a), (b) 则是共振腔内饱和光强低于  $10^9 \text{ W/cm}^2$  临界强度时, 不完全锁模的激光输出图.

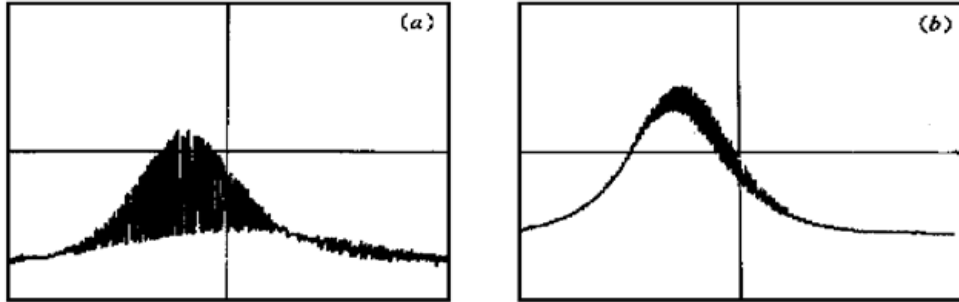


图 8 使用  $\text{Cr}^{4+}$ ·YAG 晶体作被动式调制元件的不完全锁模 Nd·YAG 激光输出

Fig. 8 Partially mode-locked Nd·YAG laser passively modulated by the  $\text{Cr}^{4+}$ ·YAG crystal

### 参 考 文 献

- 1 Junwen Chen, Hon-Fai Yau, Hei-Pei Liu *et al.*. Passive  $Q$ -switch and mode-locking modulators for Nd·hosted lasers. *Optics & Laser Technology* (to be published)
- 2 A. G. Okhrimchuk, A. V. Shestakov. Performance of  $\text{Cr}^{4+}$ ·YAG laser crystal. *Opt. Materials*, 1994, **3** (1): 1~ 13
- 3 Alphan Sennaroglu, Clifford R. Pollock, Howard Nathel. Efficient continuous-wave chromium-doped YAG laser. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(5): 930~ 937
- 4 Wang Jiaxian, Zhang Wenzhen, Xing Qirong *et al.*. Investigation of  $\text{Cr}^{4+}$ ·YAG passive mode-locking in a pulsed Nd·YAG laser. *Optics & Laser Technology*, 1998, **30**(5): 303~ 305

## Nd·hosted Lasers Passive by $Q$ -switched and Mode-locked by Saturable Absorbers

Chen Junwen Liu Hai-Pei Cheng Chao-Chia

Chang Sheng-Hsiung Tsai Hung-Sheng

(Institute of Optical Sciences, National Central University, Chung-Li 320)

**Abstract** Nd·hosted lasers passively  $Q$ -switched or/and mode-locked by the plastics dye sheet, the  $\text{LiF} \cdot \text{F}_2$  colour centre crystal, the  $\text{Cr}^{4+}$ ·YAG crystal and the schott colour filter glass were investigated. A detail analysis of the mode-locking effect in combination with  $Q$ -switching was provided. Interpretations were given based on the characteristic features of the materials, like saturation intensity and relaxation time.

**Key words**  $Q$ -switch and mode-locking, Nd·hosted lasers, passive modulators