

NYAB 晶体 Cr^{4+} :YAG 被动调 Q 的 激光特性研究*

赵圣之¹ 张行愚¹ 王青圃¹ 王松涛¹ 孙连科² 张少军²

(山东大学¹ 光学系, ² 晶体所 济南 250100)

提要 采用氙灯泵浦, Cr^{4+} :YAG 被动调 Q , 实现了自倍频晶体 NYAB 调 Q 激光运转, 测量了 Cr^{4+} :YAG 不同小信号透过率及不同泵浦能量下绿激光单脉冲的输出能量、脉冲宽度、重复率, 给出了描述 NYAB 晶体 Cr^{4+} :YAG 调 Q 工作原理的耦合波方程组, 数值求解该方程组所得的理论结果与实验值相符。

关键词 Cr^{4+} :YAG, NYAB 晶体, 被动调 Q , 数值解

1 引 言

近年来, 一种新的饱和吸收体 Cr^{4+} :YAG 作为被动 Q 开关的研究引起了人们的极大关注^[1,2]。由于四价铬的掺入, Cr^{4+} :YAG 在 0.9~1.2 μm 波段范围具有饱和吸收特性, 因而可作为 Nd 激光器的被动 Q 开关。与常用有机染料及色心晶体 $\text{Li}:\text{F}_2$ 被动 Q 开关相比, Cr^{4+} :YAG 具有热导性能好、吸收截面大、掺杂浓度高、饱和光强小、损伤阈值高、物化性能稳定、无退化现象等优点, 因此, 它是高功率、高重复率激光器及小型全固化激光器的理想 Q 开关。目前, 人们已研究了脉冲氙灯、连续氙灯泵浦的 Nd :YAG 及 LD 泵浦的 Nd :YAG 和 Nd :YVO₄ 晶体的 Cr^{4+} :YAG 被动调 Q 激光特性^[1~5], 但有关 Cr^{4+} :YAG 调 Q 倍频绿光特性的研究还未见报道。本文选用自激活自倍频复合功能材料 NYAB 作激光晶体, 采用氙灯泵浦, Cr^{4+} :YAG 进行被动调 Q , 实现了 NYAB 晶体被动调 Q 激光运转, 获得了 Cr^{4+} :YAG 不同小信号透过率及不同泵浦能量下绿激光单脉冲的输出能量、脉冲宽度、重复率。同时, 给出了 NYAB 晶体 Cr^{4+} :YAG 调 Q 工作原理的耦合波方程组, 利用计算机数值求解该方程组所得的理论结果与实验值相符。

2 Cr^{4+} :YAG 饱和吸收特性

Cr^{4+} :YAG 的饱和吸收特性可由图 1 所示的四能级模型描述。与常用被动 Q 开关不同, Cr^{4+} :YAG 激发态有着明显的吸收, 其吸收截面 $\sigma_e = 8.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, 基态的吸收截面 $\sigma_g = 4.3 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ 。另外, 由于激发态的寿命很长, 约 3.4 μs , 因此基态的饱和恢复时间较长。

Cr^{4+} :YAG 的小信号透过率 T_0 由基态吸收截面 σ_g , 掺杂离子浓度 n_{a0} 及吸收晶体的厚度 d

* 国家自然科学基金和山东省自然科学基金资助项目。

确定, 即 $T_0 = \exp(-\sigma_g n_{a0} d)$; 其饱和透过率 T_s 由激发态吸收截面 σ_e , 掺杂离子浓度 n_{a0} 及吸收晶体的厚度 d 确定, 即 $T_s = \exp(-\sigma_e n_{a0} d)$ 。

3 理 论

设腔内基频光和倍频光均为理想平面波, 且仅是时间的函数。当激活介质的长度为 l , Cr⁴⁺ :YAG 的长度为 d , 光学谐振腔的长度为 L , 激光器工作在理想共线匹配条件时, 基频光和倍频光在腔内往返一周的时间为 $t_r = [2ln_1 + 2dn_2 + 2(L - l - d)]/c$, n_1, n_2 为基频光对激活晶体和 Cr⁴⁺ :YAG 的折射率, c 为光速。如果用 I_1 和 I_2 分别表示腔内基频光和倍频光的光强, n 和 n_a 分别表示激活晶体的反转粒子数密度和 Cr⁴⁺ :YAG 饱和原子数密度, 忽略基频光和倍频光群速的差别, 由激光理论、耦合波方程及考虑到 Cr⁴⁺ :YAG 激发态的吸收, 可以导出 NYAB 晶体 Cr⁴⁺ :YAG 调 Q 时的激光器工作原理方程组^{16~ 81}

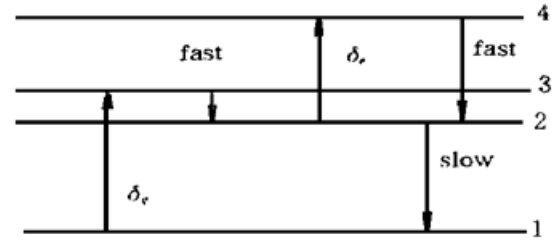


图 1 Cr⁴⁺ :YAG 的能级图

Fig. 1 Energy level diagram of Cr⁴⁺ :YAG

理想共线匹配条件时, 基频光和倍频光在腔内往返一周的时间为 $t_r = [2ln_1 + 2dn_2 + 2(L - l - d)]/c$, n_1, n_2 为基频光对激活晶体和 Cr⁴⁺ :YAG 的折射率, c 为光速。如果用 I_1 和 I_2 分别表示腔内基频光和倍频光的光强, n 和 n_a 分别表示激活晶体的反转粒子数密度和 Cr⁴⁺ :YAG 饱和原子数密度, 忽略基频光和倍频光群速的差别, 由激光理论、耦合波方程及考虑到 Cr⁴⁺ :YAG 激发态的吸收, 可以导出 NYAB 晶体 Cr⁴⁺ :YAG 调 Q 时的激光器工作原理方程组^{16~ 81}

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{I_1}{t_r} [2\sigma n l - 2\sigma_g n_a d - 2\sigma_e d (n_{a0} - n_a) - 2l B d_{\text{eff}} I_2^{1/2} - (2\alpha_1 l + \delta_1)] \quad (1)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = \frac{I_1}{t_r} \cdot 2l B d_{\text{eff}} I_2^{1/2} - \frac{I_2}{t_r} (2\alpha_1' l + 2\alpha_2 d + \delta_2) \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = - \frac{4\sigma n I_1}{h\nu} \quad (3)$$

$$\frac{dn_a}{dt} = - \frac{4\sigma_g n_a I_1}{h\nu} \quad (4)$$

式中, σ 为激活介质的受激发射截面, σ_g 为 Cr⁴⁺ :YAG 的吸收截面, σ_e 为 Cr⁴⁺ :YAG 激发态的吸收截面, n_a 为 Cr⁴⁺ :YAG 基态的原子数密度, n_{a0} 为 n_a 的起始值, α_1 为激活介质的吸收系数, δ_1 对应于基频光其他损耗, d_{eff} 为有效非线性极化系数, B 为常量, $B = 16\pi^2 \nu (2\pi/cn_1)^{1/2}/cn_1$, ν 为基频光的频率, h 为普朗克常数, α_1' 为激活介质对倍频光的吸收系数, α_2 为 Cr⁴⁺ :YAG 对倍频光的吸收系数, δ_2 为对应于倍频光的其他损耗。

利用计算机数值求解联立方程(1)~ (4), 可得出 NYAB 晶体 Cr⁴⁺ :YAG 被动调 Q 绿光脉冲的理论结果, 方程中各参量列于表 1。

表 1 方程(1)~ (4)中的有关参数*

Table 1 Related parameters in equations (1)~ (4)

$n(t = 0)$		$(2\sigma_g n_{a0} d + 2\alpha_1 l + \delta_1)/2\sigma l$		
σ	$2.01 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$		n_2	1.810
σ_g	$4.3 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$		α_1	0.41 cm^{-1}
σ_e	$8.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$		α_1'	0.45 cm^{-1}
n_{a0}	$2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$		α_2	1.1 cm^{-1}
d_{eff}	$6.82 \times 10^{-9} \text{ esu}$		δ_1	0.24
n_1	1.755		δ_2	0.25

* $\sigma, n_1, d_{\text{eff}}$ from *Acta Optica Sinica*, 1992, **12**(11): 969~ 974; n_2 from *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(5): 930~ 937; $\sigma_g, \sigma_e, n_{a0}, \alpha_1, \alpha_1', \alpha_2, \delta_1, \delta_2$ from the experimental measurement.

图 2 给出了 $T_0 = 0.87$ 时 $0.53 \mu\text{m}$ 绿光脉冲形状与腔长 L 的关系, 图 3 给出了 $L = 48 \text{ cm}$ 时 $0.53 \mu\text{m}$ 绿光脉冲形状与 T_0 的关系。

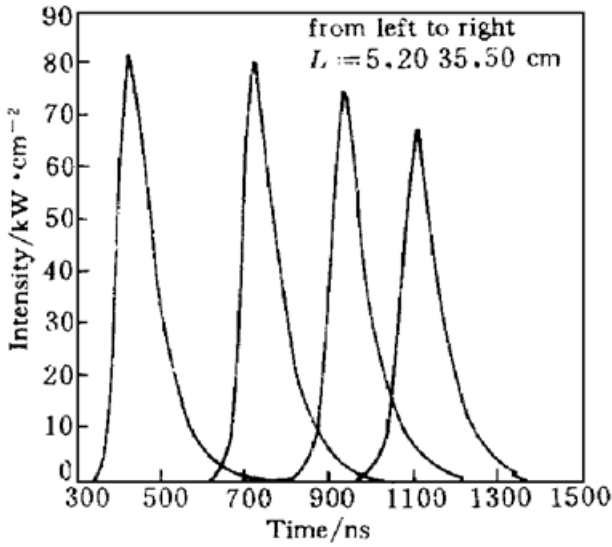


图 2 $T_0 = 0.87$ 时 $0.53 \mu\text{m}$ 脉冲形状与腔长的关系
Fig. 2 Relation between the $0.53 \mu\text{m}$ pulse shape and the cavity length L when $T_0 = 0.87$

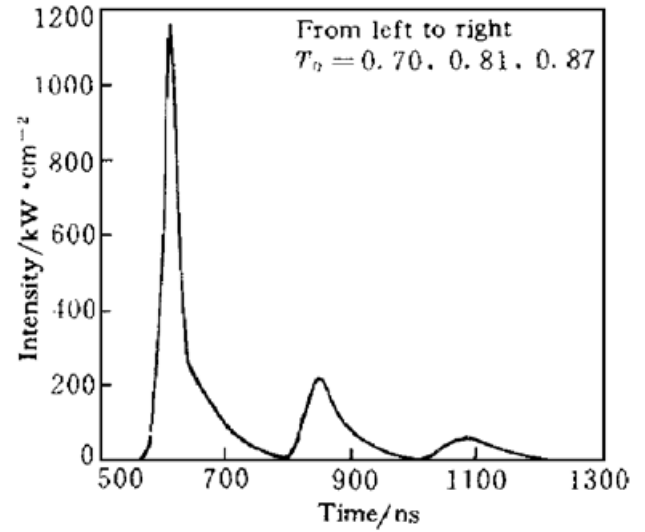


图 3 $L = 48 \text{ cm}$ 时 $0.53 \mu\text{m}$ 脉冲形状与 T_0 的关系
Fig. 3 Relation between the $0.53 \mu\text{m}$ pulse shape and T_0 when $L = 48 \text{ cm}$

4 实验与结果

4.1 实验装置

图 4 是实验装置示意图。反射镜 R_1 和 R_2 构成平-平腔, R_1 对基频光和倍频光均为高反, R_2 对基频光高反, 倍频光高透。NYAB 晶体的尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$, 用尺寸为 $\phi 4 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的氙灯泵浦, 采用单椭圆聚光腔。考虑 Cr^{4+} :YAG 对绿光的吸收, 将用于调 Q 的 Cr^{4+} :YAG 片放在靠近 R_1 的地方。用 NJ-1 型激光能量计测量 $0.53 \mu\text{m}$ 绿光的能量, 用存贮示波器测量脉冲的宽度及重复率。

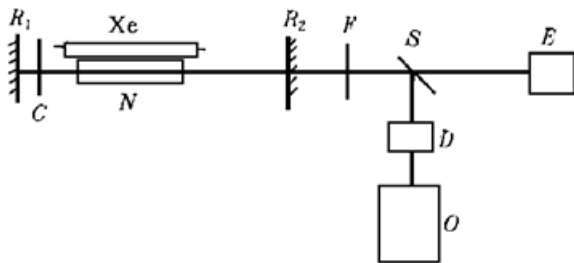


图 4 实验装置图

R_1, R_2 : 反射镜; N : NYAB 晶体; C : Cr^{4+} :YAG 膜; F : 滤光片;
Xe: Xe 闪光灯; S : 分束器; E : 能量计; D : 检测器; O : 示波器
Fig. 4 Experimental setup
 R_1, R_2 : reflectors; N : NYAB crystal; C : Cr^{4+} :YAG film; F : filter; Xe: xenon flash lamp; S : splitter; E : energy meter; D : detector; O : oscilloscope

4.2 实验结果

调节泵浦电压使输出的绿激光在存贮示波器中只有单个脉冲, 此时, 测量其脉冲宽度和脉冲能量。图 5 是当 $T_0 = 0.81, L = 10 \text{ cm}$ 时 $0.53 \mu\text{m}$ 绿光脉冲的示波器波形, 图示表明脉冲的宽度为 80 ns 。图 6 和图 7 分别给出了在不同的谐振腔长 L 和不同的 Cr^{4+} :YAG 小信号透过率 T_0 情况下绿光单脉冲能量和脉冲宽度。图示表明, 绿光脉冲的能量随腔长的增加而略有减少, 随所用 Cr^{4+} :YAG 小信号透过率的减少而增大, 其脉冲宽度随腔长的增加而增加, 随所用 Cr^{4+} :YAG 小信号透过率的减少而减少。从图 6 和图 7 中可以看出, 理论和实验基本相符, 但也有差别, 这可能是有些假设未必完全合理造成的。

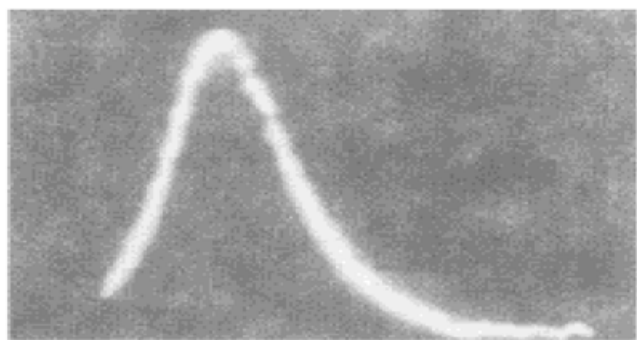


图 5 $T_0 = 0.81, L = 10 \text{ cm}$ 激光脉冲形状
 Fig. 5 Pulse shape of a $0.53 \mu\text{m}$ laser when $T_0 = 0.81$, and $L = 10 \text{ cm}$

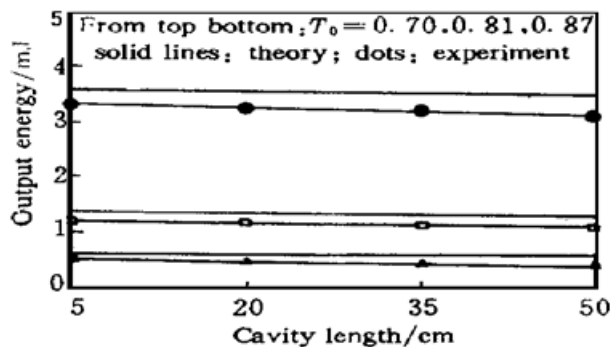


图 6 不同 T_0 情况下, 激光能量与 L 的关系
 Fig. 6 Relation between laser energy and L for different T_0

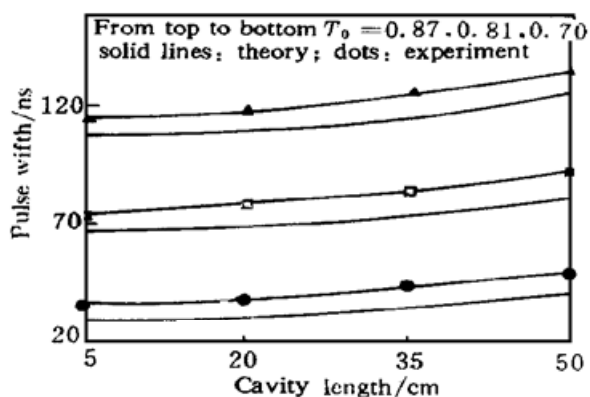


图 7 不同 T_0 情况下, 激光脉宽与 T_0 的关系
 Fig. 7 Relation between pulse width and L for different T_0

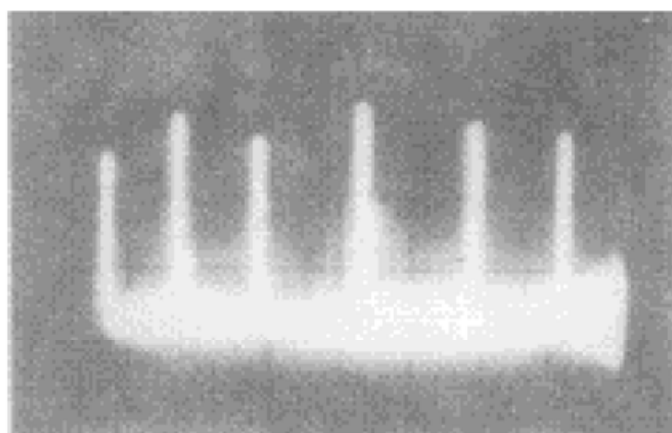


图 8 脉冲列的示波器波形
 Fig. 8 An oscillogram of pulse trains

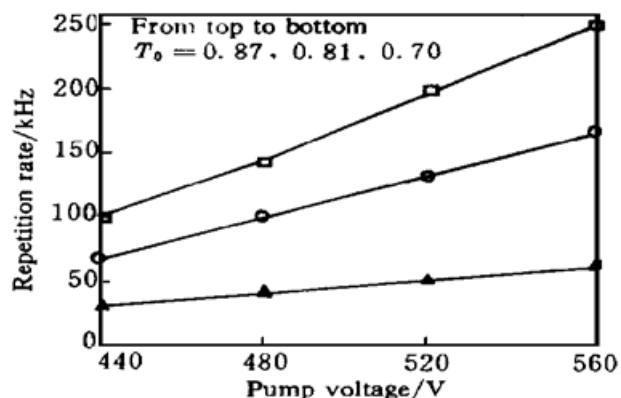


图 9 不同 T_0 情况下, 重复率与泵浦电压的关系
 Fig. 9 Repetition rate versus pump voltage for different T_0

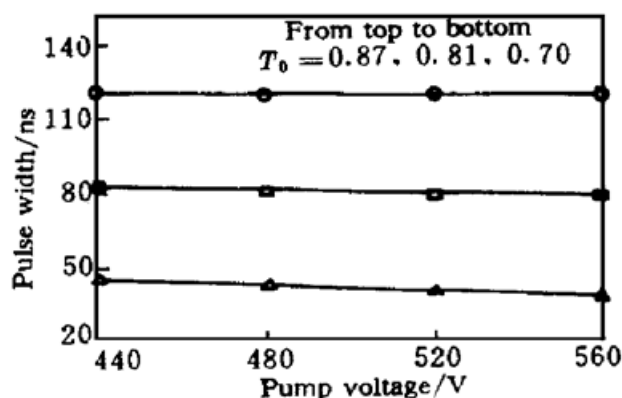


图 10 不同 T_0 情况下, 脉宽与泵浦电压的关系
 Fig. 10 Pulse width versus pump voltage for different T_0

随着泵浦电压的增加, 在一次氙灯泵浦时间内, 就会出现多个脉冲, 如图 8 所示, 其脉冲重复率可由脉冲间隔计算出来。图 9 和图 10 给出了腔长为 30 cm 时不同 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 小信号透过率 T_0 下脉冲重复率和脉冲宽度随泵浦电压的变化。由图可见, 脉冲重复率随泵浦电压的增大而增加, 而脉冲宽度随泵浦电压的增大略有减少。这一实验结果与文献[2]的报道相同。

5 结 论

采用氙灯泵浦自倍频晶体 NYAB, 实现了 NYAB 晶体 $0.53 \mu\text{m}$ 绿光激光 Cr^{4+} :YAG 被动调 Q 运转。利用计算机数值求解耦合波方程组所得的理论结果与实验相符。实验结果表明, Cr^{4+} :YAG 是一种性能优良的被动 Q 开关, 由于其饱和光强小, 热导性好, 特别适合连续激光器和高重复率激光器调 Q 。

参 考 文 献

- 1 J. J. Zayhowski, C. Dill. Diode-pumped passively Q -switched picosecond microchip lasers. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(18): 1427~ 1429
- 2 Y. Shimony, Z. Burshtein, A. Ben-Amar Baranga *et al.*. Repetitive Q -switching of a CW Nd :YAG laser using Cr^{4+} :YAG saturable absorbers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1996, **32**(2): 305~ 310
- 3 Y. Shimony, Z. Burshtein, Y. Kalisky. Cr^{4+} :YAG as passive Q -switch and Brewster plate in a pulse Nd :YAG laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(10): 1738~ 1741
- 4 Ouyang Bin, Ding Yanhua, Wan Xiaoke *et al.*. Saturable absorption of Cr^{4+} :YAG and its performance as passive Q -switches. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(12): 1665~ 1670 (in Chinese)
- 5 Wang Junmin, Li Ruining, Yang Weidong *et al.*. CW output and high repetitive passive Q -switching of a Nd :YVO₄ laser coupled directly by a laser diode. *Chinese J. Laser* (中国激光), 1996, **A23**(12): 1057~ 1060 (in Chinese)
- 6 Yen-kuang Kuo, Man-Fang Huang, Milton Birnbaum. Tunable Cr^{4+} :YSO Q -switched Cr :LiCAF laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(4): 657~ 663
- 7 Wang Qingpu, Zhang Xingyu, Zhao Shengzhi. *Laser Physics*. Jinan: Shandong University Press, 1993. 254~ 315 (in Chinese)
- 8 Y. S. Shen. *The Principle of Nonlinear Optics*. John Wiley & Sons, Inc., 1984. Chap. 3

NYAB Crystal Lasing Characteristics Using a Cr^{4+} :YAG Passive Q -switch

Zhao Shengzhi¹ Zhang Xingyu¹ Wang Qingpu¹ Wang Songtao¹
Sun Lianke² Zhang Shaojun²

(¹Optics Department, ²Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

Abstract Using a xenon flash lamp as the pump source, Cr^{4+} :YAG as a passive Q -switch, we have realized the green laser output at $0.53 \mu\text{m}$ from a self-frequency-doubling NYAB crystal. The green laser output energy, pulse width and repetition rate under conditions of different cavity lengths and small-signal transmission of Cr^{4+} :YAG were measured. Meanwhile, Cr^{4+} :YAG Q -switched coupling wave rate equations for NYAB crystal were given and numerical solutions of the equations were in agreement with the experimental results.

Key words Cr^{4+} :YAG, NYAB crystal, passive Q -switch, numerical solution