

氟磷酸锶晶体 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 被动调 Q 激光特性研究*

赵圣之 张行愚 王青圃 王松涛 张其第
(山东大学光学系, 济南 250100)

孙连科 张少军
(山东大学晶体所, 济南 250100)

姚广涛 张振亚
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要 采用氙灯泵浦, 实现了掺钕氟磷酸锶晶体($\text{Nd} \cdot \text{S-FAP}$)以 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 作为被动调 Q 元件的 $1.059 \mu\text{m}$ 激光运转, 测量了 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 不同小信号透过率及不同泵浦能量下激光单脉冲的输出能量、脉冲宽度、重复率, 给出了 $\text{Nd} \cdot \text{S-FAP}$ 晶体 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 调 Q 工作原理的方程组, 数值求解该方程组所得的理论结果与实验值相符。

关键词 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$, 氟磷酸锶晶体, 被动 Q 开关, 数值解。

1 引 言

目前, 一种以新的饱和吸收体 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 作为被动 Q 开关的研究引起了人们的极大兴趣^[1, 2]。 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 晶体, 在 $0.9 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 波段范围具有饱和吸收特性, 因而可作为 Nd^{3+} 激活介质的饱和吸收型被动 Q 开关。常用的有机染料被动调 Q 器件早已商品化, 但有机染料的热稳定性差, 易分解褪色, 并且需要循环系统; $\text{LiF} \cdot \text{F}_2^-$ 色心晶体具有光化学稳定性和热稳定性, 可是, 色心晶体 $\text{Li} \cdot \text{F}_2^-$ 有随时间褪色的缺点。 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 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、无褪色现象等优点, 因此, 它是高功率、高重复率及小型全固化激光器的理想被动 Q 开关。由于晶体生长不同, 测量结果不相同, 文献报道其吸收截面和激发态寿命数值差异较大, 激发态寿命为 $3 \sim 4 \mu\text{s}$, 基态的吸收截面为 $3 \times 10^{-18} \sim 8.7 \times 10^{-18} \text{cm}^2$, 激发态吸收截面为 $2 \times 10^{-19} \sim 8.5 \times 10^{-19} \text{cm}^2$ 。近年来, 人们已研究了脉冲氙灯、连续氙灯泵浦的 $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$ 及激光二极管泵浦 $\text{Nd} \cdot \text{YAG}$ 和 $\text{Nd} \cdot \text{YVO}_4$ 晶体 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 被动调 Q 激光特性^[1-5], 但有关新型晶体氟磷酸锶($\text{Nd} \cdot \text{S-FAP}$)用 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 调 Q 所产生的激光特性的研究还未见报道。本文选用 $\text{Nd} \cdot \text{S-FAP}$ 晶体作激活介质, 华北光电所

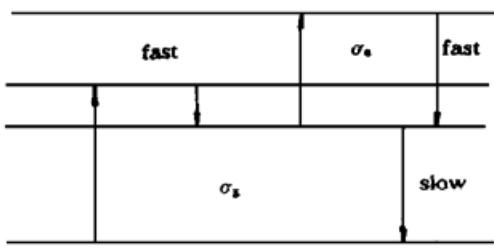
* 国家自然科学基金和山东省自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1997-11-14; 收到修改稿日期: 1998-02-19

生产的 Cr^{4+} :YAG 作被动调 Q 开关。经实验测定 Cr^{4+} :YAG 晶体的激发态寿命为 $3.2 \mu\text{s}$, 基态的吸收截面为 $4.3 \times 10^{-18} \text{cm}^2$, 激发态吸收截面为 $8.2 \times 10^{-19} \text{cm}^2$, 采用氙灯泵浦, 实现了 Nd :S-FAP 晶体被动调 Q $1.059 \mu\text{m}$ 激光运转, 获得了 Cr^{4+} :YAG 不同小信号透过率、不同泵浦能量下激光单脉冲的输出能量、脉冲宽度、重复率。同时, 给出了 Nd :S-FAP 晶体 Cr^{4+} :YAG 调 Q 工作原理的方程组, 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 理 论

图 1 所示是 Cr^{4+} :YAG 晶体简化的四能级模型。与波长 $1.06 \mu\text{m}$ 饱和吸收有关的跃迁是



从基态 1 到能级 3, 并很快弛豫到能级 2, 受激态的吸收从能级 2 到能级 4, 由能级 4 到能级 2 的弛豫时间约 50ps 。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 $\sigma_e = 8.2 \times 10^{-19} \text{cm}^2$, 而基态的吸收截面 $\sigma_g = 4.3 \times 10^{-18} \text{cm}^2$ 。另外, 由于激发态的寿命约 $3.2 \mu\text{s}$, 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 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(离子数/升) n_{a0} 及吸收晶体的厚度 d 确定, 即 $T_s = \exp(-\sigma_e n_{a0} d)^{[4]}$ 。

根据速率方程理论, 考虑一个由 Cr^{4+} :YAG 饱和吸收体被动调 Q 的固体激光器, 能够得出激光腔内振荡光强 I_1 、激活介质的反转粒子数密度 n 和 Cr^{4+} :YAG 饱和吸收体基态粒子数密度 n_a 耦合方程组^[6~8]:

$$\frac{dI_1}{dt} = \frac{I_1}{t_r} [2\sigma n l - 2\sigma_g n_a d - 2\sigma_e d (n_{a0} - n_a) - 2\alpha l - \ln(1/R) - \delta] \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = R_p - \frac{n}{\tau} - \frac{4\sigma n I_1}{h\nu} \quad (2)$$

$$\frac{dn_a}{dt} = \frac{(n_{a0} - n_a)}{\tau_a} - \frac{4\sigma_g n_a I_1}{h\nu} \quad (3)$$

式中, R_p 为泵浦速率, σ 为激活介质的受激发射截面, σ_g 为 Cr^{4+} :YAG 的基态吸收截面, σ_e 为 Cr^{4+} :YAG 激发态的吸收截面, n_{a0} 为 n_a 的起始值, α 为激活介质的吸收系数, 光在腔内往返一周的时间为 $t_r = [2\ln n_1 + 2dn_2 + 2(L - l - d)]/c$, n_1 、 n_2 为基频光对激活晶体和 Cr^{4+} :YAG 的折射率, c 为光速, l 为激活介质的长度, L 为光学谐振腔的长度, δ 对应于其它损耗, R 为输出反射镜的反射率, τ 为激活介质的辐射寿命, τ_a 为 Cr^{4+} :YAG 的饱和恢复时间, $h\nu$ 为光子的能量。

由输出反射镜输出到腔外的光强 I_2 可由下式给出:

$$I_2 = I_1 \frac{\ln(1/R)}{2\sigma_g n_a d + 2\sigma_e d (n_{a0} - n_a) + 2\alpha l + \delta + \ln(1/R)} \quad (4)$$

利用计算机数值求解联立方程(1)、(2)、(3)、(4)式, 可得出 Nd :S-FAP 晶体 Cr^{4+} :YAG 被动调 Q 激光脉冲的理论结果。方程中各参量列于表 1。

图 2 给出了 $T_0 = 0.87$ 、 $R = 0.81$ 、 $R_p = 1.4 \times 10^{23} \text{s}^{-1} \text{cm}^{-3}$ 时 $1.059 \mu\text{m}$ 激光一段脉冲列随时间变化情况, 由相邻两脉冲的时间间隔, 可以计算出激光脉冲重复率为 154KHz 。

Table 1. Related parameters* in equations (1), (2), (3) and (4)

σ	$5.4 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$	n_1	1.631
σ_g	$4.3 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$	n_2	1.81
σ_e	$8.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$	α	0.73 cm^{-1}
n_{a0}	$2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	δ	0.408
τ	290 μs	L	5 cm
τ_a	3.2 μs	l	0.3 cm

* σ 、 τ 、 n_1 quoted *Chinese Phys. Lett.*, 1995, 12(6) : 355

n_2 quoted *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1995, 12(5) : 930

n_{a0} 、 α are the parameters for $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$, σ_g 、 σ_e 、 τ_a are measured values.

根据对一般调 Q 过程的处理^[8], 在 Q 脉冲形成这段很短的时间(纳秒至几十纳秒), 在(2) 式中可略去 R_p 和 (n/τ) 项(几十微秒至几百微秒), 从而可简化为:

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{4\sigma n I_1}{h\nu} \quad (5)$$

对 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 慢饱和恢复吸收体(3.2 μs), 在 Q 脉冲形成期间, 可略去(3) 式中的 $(n_{a0} - n_a)/\tau_a$ 项, 简化为:

$$\frac{dn_a}{dt} = -\frac{4\sigma_g n_a I_1}{h\nu} \quad (6)$$

利用计算机数值求解联立方程(1)、(4)、(5)、(6) 式, 可以得出 Nd·S-FAP 晶体 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 被动调 Q 激光单脉冲的输出特性, 图 3 给出了当 $R = 0.81$ 时 1.059 μm 激光脉冲形状随 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 小信号透过率 T_0 的变化, 图 4 给出了当 $T_0 = 0.70$ 时 1.059 μm 激光脉冲形状随输出反射镜反射率 R 的变化。

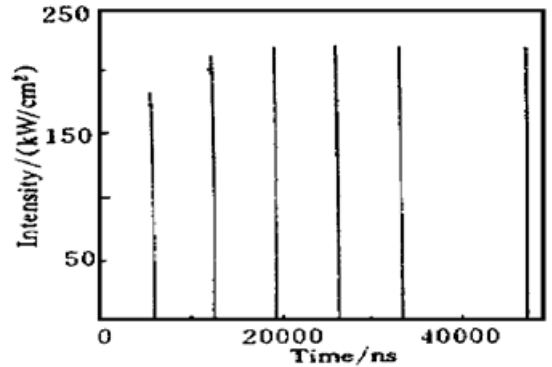


Fig. 2 Shape of pulse trains when $T_0 = 0$.
87, $R = 0.81$

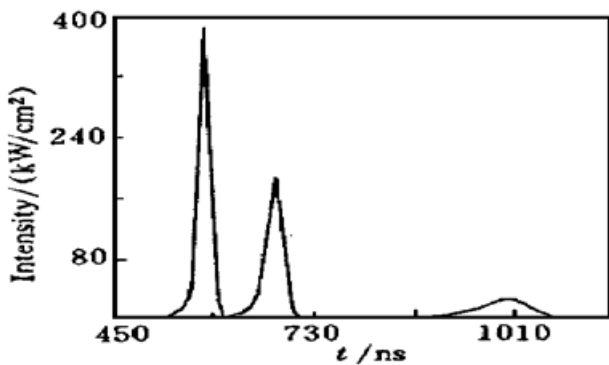


Fig. 3 Pulse shape versus T_0 when $R = 0.81$. From left to right $T_0 = 0.81, 0.84, 0.87$

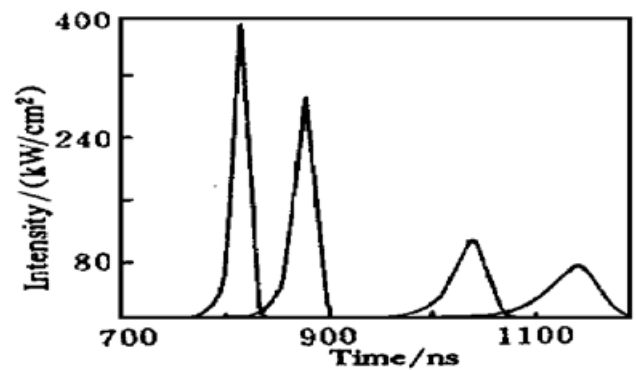


Fig. 4 Pulse shape versus R when $T_0 = 0.70$. From left to right $R = 0.7, 0.6, 0.5, 0.4$

3 实验与结果

3.1 实验装置

在实验中, 两个反射镜 R_1 和 R_2 构成腔长为 5 cm 的平-平腔, R_1 对 1.06 μm 光高反, R_2 的反射率可变。Nd·S-FAP 晶体的尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 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。用于调 Q 的 $\text{Cr}^{4+} \cdot \text{YAG}$ 片放在靠近 R_1 的地方。用 NJ-J1 型激光能

量计测量 $1.059 \mu\text{m}$ 激光的能量, 用 PHILIPS (PM 3266) 存贮示波器测量脉冲的宽度及重复率。

3.2 实验结果

调节泵浦电压使输出的激光在存贮示波器只有单个脉冲, 此时, 测量其脉冲宽度和脉冲能量。图 5 和图 6 分别给出了不同的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 小信号透过率 T_0 情况下激光单脉冲能量和脉冲宽度随输出反射镜反射率的变化。其线是数值解的结果, 点是实验值。图示表明, 随所用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 小信号透过率和输出反射镜反射率的减少, 单脉冲的能量增加, 脉冲宽度变窄。从图 5 和图 6 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。

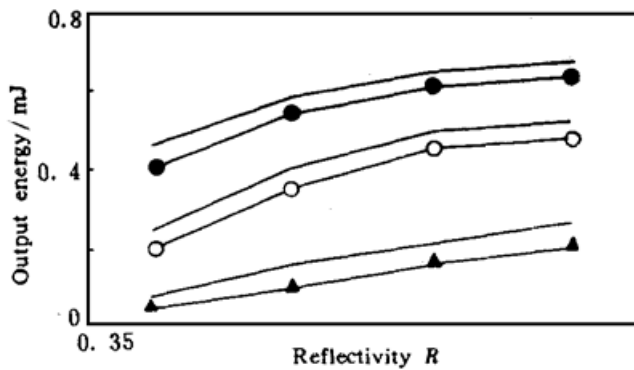


Fig. 5 Pulse energy versus R for different T_0 . From top to bottom $T_0 = 0.81, 0.84, 0.87$

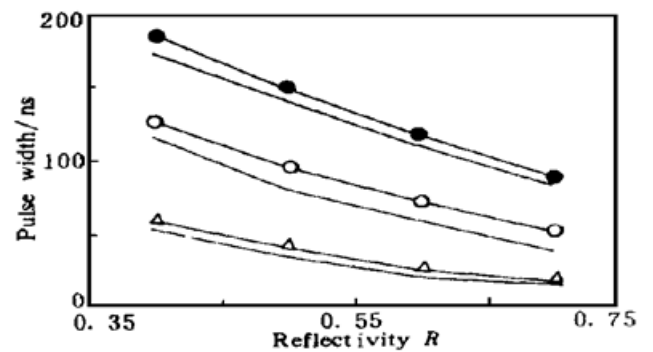


Fig. 6 Pulse width versus R for different T_0 . From top to bottom $T_0 = 0.87, 0.84, 0.81$

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 7 所示, 其脉冲重复率可由脉冲间隔计算出来。图 8 给出了 $R = 0.81$ 时不同 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 小信号透过率 T_0 下脉冲重复率随泵浦能量的变化。其线是数值解的结果, 点是相应的实验值。对于 T_0 从 0.87 到 0.81, 在不同的泵浦能量下, R_p 的值从 $8.2 \times 10^{22} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-3}$ 到 $1.6 \times 10^{23} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-3}$ 。图示表明, 脉冲重复率随泵浦能量的增大而增加, 这一实验结果与文献[2]的报道相同。

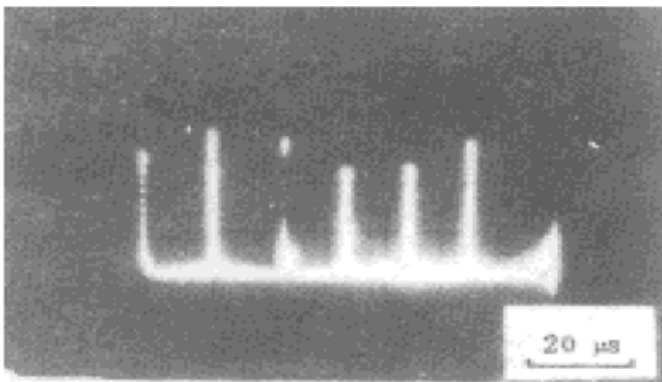


Fig. 7 Oscilloscope photograph of pulse trains

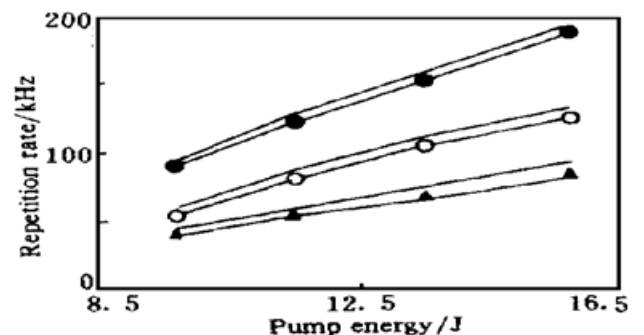


Fig. 8 Repetition rate versus pulse energy for different T_0 when $R = 0.81$. From top to bottom $T_0 = 0.87, 0.84, 0.81$

结 论 采用氙灯泵浦 $\text{Nd}:\text{S-FAP}$ 晶体, 以 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 为被动调 Q 元件, 实现了 $\text{Nd}:\text{S-FAP}$ 晶体 $1.059 \mu\text{m}$ 激光的调 Q 运转。利用计算机数值求解耦合方程组所得的理论结果与实验相符。由于 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体的饱和光强小, 热导性好, 无褪变, 是掺钕连续激光器和高重率激光器理想的被动调 Q 开关。这种类型的激光器将有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] J. J. Zayhowski, C. Dill III. 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. Quant. Electron.*, 1996, **QE-32**(2) : 305~ 309
- [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. Quant. Electron.*, 1995, **QE-31**(10) : 1738~ 1741
- [4] 欧阳斌, 丁彦华, 万小珂等. Cr^{4+} ·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
- [5] 王军民, 李瑞宁, 杨炜东等. 激光二极管直接耦合泵浦的 Nd ·YVO₄ 激光器连续运转和高重复率被动调 Q 运转. 中国激光, 1996, **A23**(12) : 1057~ 1060
- [6] Yen-Kuang Kuo, Man-Fan Huang, Milton Birnbaum. Tunable Cr^{4+} ·YSO Q -switched Cr ·LiCAF laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, **QE-31**(4) : 657~ 663
- [7] 王青圃, 张行愚, 赵圣之. 激光物理学, 济南: 山东大学出版社, 1993. 254~ 315
- [8] A. E. Siegman. *Lasers*, Mill Valley, CA Univ. Sci. Books, 1986. 1024~ 1026

 Cr^{4+} ·YAG Q -Switched Laser Characteristics of Nd ·Sr₅(PO₄)₃F Crystal

Zhao Shengzhi Zhang Xingyu Wang Qingpu

Wang Songtao Zhang Qidi

(Optics Department, Shandong University, Jinan 250100)

Sun Lianke Zhang Shaojun

(Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

Yao Guangtao Zhang Zhenya

(North China Institute of Electron-Optics, Beijing 100015)

(Received 14 November 1997; revised 19 February 1998)

Abstract Using xenon flash lamp as pump source and Cr^{4+} ·YAG as passive Q -switch, we have performed the Q -switched laser operation at 1.059 μm with a Nd ·Sr₅(PO₄)₃F crystal and measured the single pulse output energy, pulse width and repetition rate under different small-signal transmission of Cr^{4+} ·YAG and, different reflectivity of output reflector. Meanwhile, the Cr^{4+} ·YAG Q -switched coupling rate equations for Nd ·Sr₅(PO₄)₃F crystal were given. The numerical solutions of the equations were in agreement with the experimental results.

Key words Cr^{4+} ·YAG, Nd ·Sr₅(PO₄)₃F crystal, passive Q -switch, numerical solution.