

文章编号 : 0253-2239(2002)01-0050-04

新型 $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$ 自倍频晶体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 激光特性研究*

赵圣之¹⁾²⁾ 王继扬¹⁾ 郑加安²⁾ 陈 磊²⁾ 张行愚²⁾ 王青圃²⁾

张其第²⁾ 张树军¹⁾ 张少军¹⁾ 孙连科¹⁾ 陈焕鑫¹⁾

(1), 山东大学晶体材料国家重点实验室, 济南 250100)
(2), 山东大学光学系, 济南 250100)

摘要: 采用氙灯抽运自倍频晶体 $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$ (简称 $\text{Nd}:\text{GdCOB}$), $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q , 实现了 $\text{Nd}:\text{GdCOB}$ 晶体被动调 Q 激光运转, 测量了饱和吸收体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 不同小信号透过率下绿激光单脉冲的输出能量、脉冲宽度、重复率, 给出了描述 $\text{Nd}:\text{GdCOB}$ 晶体调 Q 工作原理的耦合波方程组, 数值求解了该方程组, 所得的理论结果与实验值相符合。

关键词: $\text{Nd}:\text{GdCOB}$ 晶体; $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q ; 数值解

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

1 引 言

最近, 一种新型的硼酸盐类自倍频晶体 $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$ (简称 $\text{Nd}:\text{GdCOB}$) 受到了人们的极大关注^[1~5]。与常用的自倍频晶体 NYAB 相比, $\text{Nd}:\text{GdCOB}$ 晶体有着如下的显著优点: 对 $0.53\ \mu\text{m}$ 绿激光的自吸收较小 (只有 NYAB 晶体自吸收的 50%), 生长周期非常短, 而且能得到大尺寸的优质单晶等。因此, 这种晶体被认为是一种非常理想并有广泛应用前景的自倍频晶体。

$\text{Nd}:\text{GdCOB}$ 晶体为单斜双轴晶系, 目前, 文献报道的相位匹配方向有两个, 一是 $\theta = 90^\circ, \varphi = 46^\circ$ ^[1~3]; 另一个是 $\theta = 66.8^\circ, \varphi = 132.6^\circ$ ^[4,5]。通过采用钛宝石激光、激光二极管、染料激光作抽运源^[3,5,6], 已经获得了 $\text{Nd}:\text{GdCOB}$ 晶体 $0.53\ \mu\text{m}$ 绿激光的自由运转; 利用腔内放置声光调 Q 器件, 已经获得了 $\text{Nd}:\text{GdCOB}$ 晶体 $0.53\ \mu\text{m}$ 绿激光的主动调 Q 运转。

本文采用氙灯抽运自倍频晶体 $\text{Nd}:\text{GdCOB}$, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q , 实现了 $\text{Nd}:\text{GdCOB}$ 晶体调 Q 的激光运转, 测量了饱和吸收体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 不同小

信号透过率下绿激光单脉冲的输出能量、脉冲宽度、重复率, 给出了描述 $\text{Nd}:\text{GdCOB}$ 晶体调 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合。

2 实 验

2.1 实验装置

在实验过程中, 两个反射镜 R_1 和 R_2 构成长为 $38\ \text{cm}$ 的平面-平面腔, R_1 腔镜对基频光 $1.06\ \mu\text{m}$ 和倍频光 $0.53\ \mu\text{m}$ 高反射, R_2 腔镜为输出镜, 对基频光 $1.06\ \mu\text{m}$ 高反射, 对倍频光 $0.53\ \mu\text{m}$ 高透射。 $\text{Nd}:\text{GdCOB}$ 晶体采用 I 型相位匹配 (即 $\theta = 66.8^\circ, \varphi = 132.6^\circ$), 尺寸为 $\phi 3\ \text{mm} \times 20\ \text{mm}$, 采用尺寸为 $\phi 4\ \text{mm} \times 30\ \text{mm}$ 的氙灯抽运, 单椭圆聚光腔。作为被动调 Q 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 片放在靠近 R_1 腔镜的地方。用 LPE-1B 型能量计测量 $0.53\ \mu\text{m}$ 绿激光的能量, 用 TDS620B 型存储示波器测量脉冲的宽度和重复率。

2.2 实验结果

调节抽运电压使输出的绿激光在存储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 1 是 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 小信号透过率 $T_0 = 0.87$ 时示波器绿激光的脉冲形状。

图 2 和图 3 是单脉冲能量和脉冲宽度随 $\text{Cr}^{4+}:$

* 高等学校重点实验室访问学者基金、教育部博士点基金和山东省自然科学基金资助课题。

E-mail: shengzhi-zhao@yahoo.com.cn

收稿日期 2000-10-23; 收到修改稿日期 2000-12-21

YAG 小信号透过率 T_0 的变化情况,其圆点是实验值。

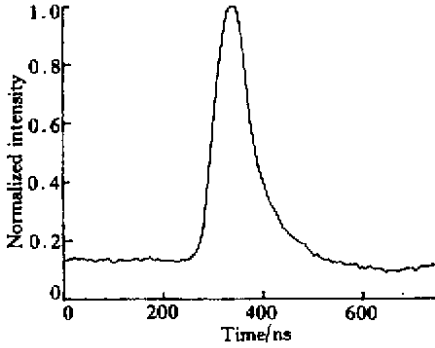


Fig. 1 Oscilloscope pulse shape of green laser when $T_0 = 0.87$

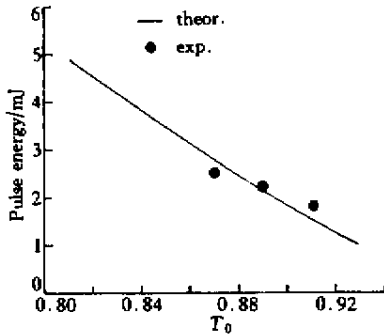


Fig. 2 Single pulse energy versus T_0

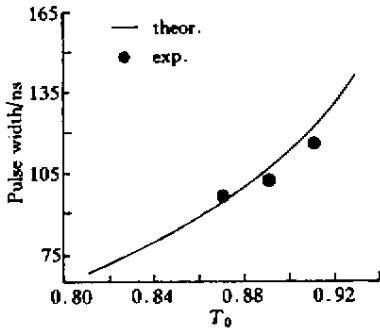


Fig. 3 Pulse width versus T_0

实验结果表明,随 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 小信号透过率 T_0 的减少,绿激光的单脉冲能量增大而脉冲宽度减小。当 $T_0 = 0.87$ 时,脉冲宽度为 95 ns,单脉冲能量为 2.5 mJ,相应于功率密度为 $0.3 \text{ MW}/\text{cm}^2$ 。

随着抽运电压的增加,在一次抽运时间内,就会出现多个脉冲,其脉冲重复率可由脉冲间隔计算出来。图 4 给出了不同 T_0 下脉冲重复率随抽运能量的变化,其圆点是实验值。图 4 表明,脉冲重复率随抽运能量的增大而增加,这一实验结果与文献 [7] 的报道相同。

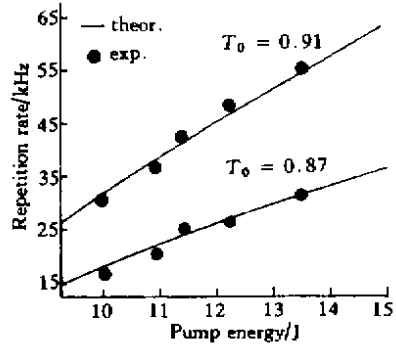


Fig. 4 Pulse repetition rate versus pump energy for different T_0

3 理论估算和讨论

根据速率方程理论和倍频理论,可以导出 $\text{Nd}:\text{GdCOB}$ 自倍频晶体、 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 时光器的工作原理方程组^[7]:

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

$$\frac{dI_2}{dt} = \left(\frac{I_1}{t_r}\right) 2lBd_{\text{eff}} \sqrt{I_2} - \frac{I_2}{t_r} (2\alpha'_1 l + 2\alpha_2 d + \delta_2), \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = R_p - \frac{n}{\tau} - \frac{4\sigma n I_1}{h\gamma}, \quad (3)$$

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

式中, I_1 、 I_2 为基频波和倍频波的光强, n 为反转粒子数密度, n_a 为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 饱和吸收体基态原子数密度, σ 为激活介质的受激发射截面, t_r 为基频光和倍频光在腔内往返一周的时间,

$$t_r = \frac{2n_1 l + 2n_2 d + \chi(L - l - d)}{c},$$

式中, n_1 为激活介质的折射率, n_2 为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的折射率, l 为激活介质的长度, L 为腔长, d 为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 片的厚度, $T_0 = \exp(-\sigma_g n_{a0} d)$, σ_g 为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 基态的吸收截面, n_{a0} 为 n_a 的起始值, σ_e 为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 受激态的吸收截面, τ 为激活介质的辐射寿命, τ_a 为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 基态饱和恢复时间, R_p 为抽运速率, α_1 、 α'_1 分别为激活介质对基频波和倍频波的吸收系数, α_2 为 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 对倍频波的吸收系数, δ_1 、 δ_2 为基频波和倍频波的其他损耗, $h\gamma$ 为光子的能量, c 为真空中的光速, B 为一个常数,

$$B = \frac{16\pi^2(2\pi/cn_1)^{1/2}}{cn_1}$$

根据对一般调 Q 过程的处理^[7], 在 Q 脉冲形成这段很短的时间(纳秒至几十纳秒)内(3)式中可略去 R_p 和 $(n/\tau) \times \tau$ 为几十至几百微秒), 从而可简化为:

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

同理可知, 对慢饱和恢复吸收体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ (τ_a 为 $3.2 \mu\text{s}$), 在 Q 脉冲形成期间, 可略去(4)式中 $(n_{a0} - n_a/\tau_a)$ 项, 简化为:

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

利用计算机数值求解联立方程(1)式、(2)式、(5)式、(6)式, 可以得出 $\text{Nd}:\text{GdCOB}$ 晶体 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 绿激光单脉冲的输出特性。表 1 给出了方程中的有关参数。图 5 给出了 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 小信号透过率 $T_0 = 0.87$ 时计算的绿激光的脉冲形状, 其峰值功率为 $0.36 \text{ MW}/\text{cm}^2$, 脉冲宽度为 93.5 ns , 相应于单脉冲能量 2.76 mJ , 这与实验值脉冲宽度 95 ns 、单脉冲能量 2.5 mJ 非常接近。

Table 1. Related parameters in equations (1)(2), (5) and (6)

$n(t=0)$	$(2\sigma_g n_{a0} d + 2\alpha_1 l + \delta_1 l) \gamma 2\sigma l$
σ	$2.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$
σ_g	$4.3 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$
σ_e	$8.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
n_{a0}	$2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
d_{eff}	$2.75 \times 10^{-9} \text{ esu}$
n_1	1.72
n_2	1.81
α_1	0.15 cm^{-1}
α'_1	0.18 cm^{-1}
α_2	1.0 cm^{-1}
δ_1	0.15
δ_2	0.22

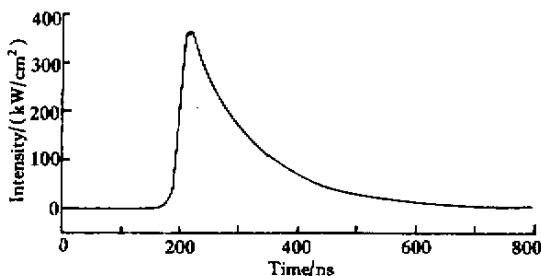


Fig.5 Calculated pulse shape when $T_0 = 0.87$

图 2 和图 3 中的实线为计算的绿激光的单脉冲能量和脉冲宽度随 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 小信号透过率 T_0 的变化。图中表明, 理论计算与实验结果基本相符。

数值求解(1)式~(4)式可以得出在一次抽运时间内会有多个脉冲, 由脉冲间隔可以获得脉冲的重复率。图 4 中的实线给出了在不同的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 小信号透过率 T_0 下脉冲的重复率随抽运能量的变化, 抽运能量从 10 J 变化到 13.5 J 时, 抽运速率 R_p 的值从 $2.19 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ 到 $2.8 \times 10^{23} \text{ s}^{-1}$ 。图 4 表明理论结果和实验值也基本相符。

结论 采用氙灯抽运自倍频晶体 $\text{Nd}:\text{GdCOB}$, 实现了 $\text{Nd}:\text{GdCOB}$ 晶体 $0.53 \mu\text{m}$ 绿激光 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 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值基本相符。实验结果表明, $\text{Nd}:\text{GdCOB}$ 晶体是一种优良的新型的自倍频晶体, 其易生长、易得到大尺寸的单晶和对绿激光比较小的自吸收表明它是一种非常有应用前景的非线性光学晶体。这种类型的激光器将有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Mougél F, Aka G, Kahn-Harari A *et al.*. Infrared laser performance and self-frequency doubling of $\text{Nd}^{3+}:\text{Ga}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$ ($\text{Nd}:\text{GdCOB}$). *Opt. Mater.*, 1997, **8**(3):161~173
- [2] Vivien D, Mougél F, Aka G *et al.*. Neodymium-activated $\text{Ca}_4\text{Gd}_3\text{O}_{10}$ ($\text{Nd}:\text{GdCOB}$): A multifunctional material exhibiting both laser and nonlinear optical properties. *Laser Phys.*, 1998, **8**(3):759~763
- [3] Mougél F, Augé F, Aka G *et al.*. New green self-frequency-doubling diode-pumped $\text{Nd}:\text{Ga}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$ laser. *Appl. Phys. (B)*, 1998, **67**(5):533~535
- [4] Zhang S, Cheng Z, Han J *et al.*. Growth and investigation of efficient self-frequency-doubling $\text{Nd}_x:\text{Gd}_{1-x}\text{Ga}_4\text{O}(\text{BO}_3)_3$ crystal. *J. Crystal Growth*, 1999, **206**(3):197~202
- [5] Wang C, Chow Y T, Gambling W A *et al.*. Efficient self-frequency doubling of $\text{Nd}:\text{GdCOB}$ crystal by type-I phase matching out of its principle planes. *Opt. Commun.*, 2000, **174**(1~3):471~474
- [6] Hou Xueyuan, Sun Yuming, Li Yufei *et al.*. Laser characteristics of new self-frequency doubling crystal $\text{Nd}^{3+}:\text{Ga}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$. *Opt. & Laser Technol.*, 2000, **32**(2):135~138
- [7] Zhao S, Zhang X, Wang Q *et al.*. Passively Q -switched self-frequency doubling $\text{Nd}_x\text{Y}_{1-x}\text{Al}_3(\text{BO}_3)_4$ laser with $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ saturable absorber. *Opt. & Laser Technol.*, 1998, **30**(4):239~242

Passively Q -Switched Self-Frequency Doubling $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$ Laser with $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ Saturable Absorber

Zhao Shengzhi¹⁾²⁾ Wang Jiyang¹⁾ Zheng Jia'an²⁾ Chen Lei²⁾ Zhang Xingyu²⁾
Wang Qingpu²⁾ Zhang Qidi²⁾ Zhang Shujun¹⁾ Zhang Shaojun¹⁾ Sun Lianke¹⁾
Chen Huanchu¹⁾

(1), State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Jinan 250100)

(2), Optics Department, Shandong University, Jinan 250100

(Received 23 October 2000; revised 21 December 2000)

Abstract: $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_4\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$, known as Nd:GdCOB, is a new self-frequency doubling laser crystal. Using $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ as passive Q -switch, the Q -switched laser running at $0.53 \mu\text{m}$ with the Nd:GdCOB crystal is realized. The pulse width, single pulse energy and repetition rate under different small-signal transmission of $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ and different pump conditions are measured and the numerical solutions of the coupling wave rate equations agree with the experimental results.

Key words: Nd:GdCOB crystal; passive Q -switch; numerical solution