

Cr⁴⁺·YAG 被动调 Q 的单向环形腔 Nd·YAG 激光器研究*

陈 军 朱 琦 包成芳 邱文法

乔景文

(浙江大学现代光学国家重点实验室 杭州 310027)

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

提要 介绍了利用辅助镜的 Nd·YAG 单向环形腔, 并利用 Cr⁴⁺·YAG 晶体作为可饱和吸收被动调 Q 器件。对环形腔的设计进行了分析, 并对利用不同初始透过率的 Cr⁴⁺·YAG 晶体作为调 Q 器件所获得的脉冲序列进行了测量, 对结果进行了初步分析。

关键词 环形腔, Cr⁴⁺·YAG, 被动调 Q

1 实验装置

实验装置如图 1 所示, 环形腔由 M₁ ~ M₅ 组成, 全部为平面镜, 其中 M₁ 为输出耦合镜。实验中采用了不同反射率的输出耦合镜进行实验, 其中效果较好的为 R = 50% 及 70% 两种 M₂, M₃, M₄ 为 45° 的全反镜, M₅ 为 0° 全反镜。辅助镜 M₅ 的存在迫使行波在腔内逆时针环行, 从 M₁ 输出。激光介质是 $\phi 4 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ 的 Nd·YAG 棒, 用脉冲氙灯泵浦, 最大单脉冲泵浦能量为 30 J, 在 1 Hz 下运行。环形腔长为 86 cm, 腔内用 Cr⁴⁺·YAG 晶体作可饱和吸收的被动调 Q 器件, 我们使用了两种不同初始透过率的晶体, 得到了不同的脉冲宽度。同时在腔内插入一个 F-P 标准具以选纵模, 并插入了一个可变光阑, 以获得较好的横模。

在调整时首先不考虑单向环形, 而对由 M₁ ~ M₄ 组成的双向环形腔作光路调整, 得到双向激光输出, 从 M₁ 的两个方向均可看到激光输出。然后放置 M₅, 调整它到与入射光束垂直, 原路返回环形腔, 可以在 M₁ 的输出方向上观察到激光斑点由二个合为一个, 亮度增加。这时如果从 M₂ ~ M₄ 的任一个全反镜泄漏的光斑中观察, 当未调节正确时, 可以在两个方向, 例如在 A 与 B 上均看到有泄漏光斑, 当调整 M₅ 到正

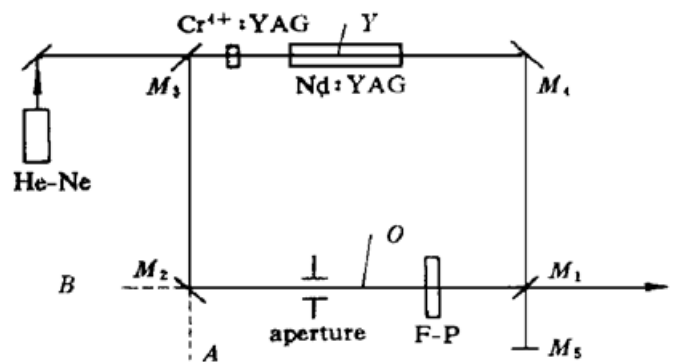


图 1 单向环形激光谐振腔的实验装置
M₁: 输出镜; M₂ ~ M₅: 对 1.06 μm 的全反镜;
Y: YAG 棒的中心点; O: 束腰位置

Fig. 1 Experimental arrangement of the unidirectional ring laser resonator

M₁: output mirror; M₂ ~ M₅: total reflection mirrors at 1.06 μm ; Y: the center of YAG rod; O: position of the beam waist

* 国家自然科学基金及国防科工委跨行业基金(96JZ. 1. 1. JW0402)资助项目。

确位置时,其中只有逆向环形的光斑 A ,而顺时针环形光斑 B 消失。此时若挡住 M_5 ,则又可观察到 A, B 两处的光斑。

在调整好自由振荡后,插入 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体,一般若晶体两面平行性较好,则不需要多作调整即可观察到调 Q 脉冲序,而若平行性不好,则环形腔光路发生改变,需要进一步调整后才能出光。我们分别对两块晶体作了实验,一块为 $\phi 5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,通光表面镀增透膜,初始透过率为 70% (柏林工业大学提供),得到了脉宽在 200 ns 左右的调 Q 脉冲序。另一块为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,通光表面镀增透膜,初始透过率为 30% 左右(中国科学院上海光机所提供),得到了脉宽在 25 ns 左右的调 Q 脉冲序。之后插入一块 F-P 标准具,并调节小孔光阑得到了稳定的激光输出。

2 实验结果

在未加调 Q 晶体及标准具情况下,得到自由振荡平均功率为 10 mJ 的 $1.06 \mu\text{m}$ 脉冲。插入透过率为 70% 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体、标准具和小孔,得到的调 Q 脉冲序一般包含 7~10 个小脉冲,脉冲间隔为 $20 \mu\text{s}$,单脉冲的宽度为 200 ns。在这种情况下,脉冲宽度对入射光束与调 Q 晶体光轴夹角的变化及腔镜的调节不灵敏,在稍稍转动 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体时,脉宽均为 200 ns 左右。改变输出镜的反射率或改变氙灯泵浦能量,只可能改变脉冲序列内的脉冲个数,而不改变脉冲宽度及脉冲间隔。

在泵浦能量较低时可只含有一个脉冲。

当插入透过率为 30% 的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体时,得到输出能量 5 mJ 的调 Q 脉冲序,脉冲序内含 5~10 个脉冲。单脉冲间隔为 $10 \mu\text{s}$,而单脉冲宽度则较大程度地依赖于入射光束与晶体的夹角。我们发现在利用初始透过率为 30% 的晶体时,对腔镜的调节或晶体角度的调节都会明显影响输出脉冲的宽度,图 2 示出的三个不同脉宽的脉冲波形是在 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体稍作角度调整同时对腔镜作了相应调节得到的,脉冲宽度分别为 27 ns, 39 ns, 149 ns。而对于初始透过率为 70% 的晶体,这种现象不明显,甚至将其应用在腔长为 40 cm 的直线腔中,获得的脉宽也为 200 ns 左右。这种现象表明 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体被动调 Q 的漂白过程与腔内自由振荡时的功率密度有联系,而且这种联系在初始透过率低(掺杂高)的晶体中表现尤为明显。理论上的明确解释尚未能给出,仅在下一节中作了初步讨论。

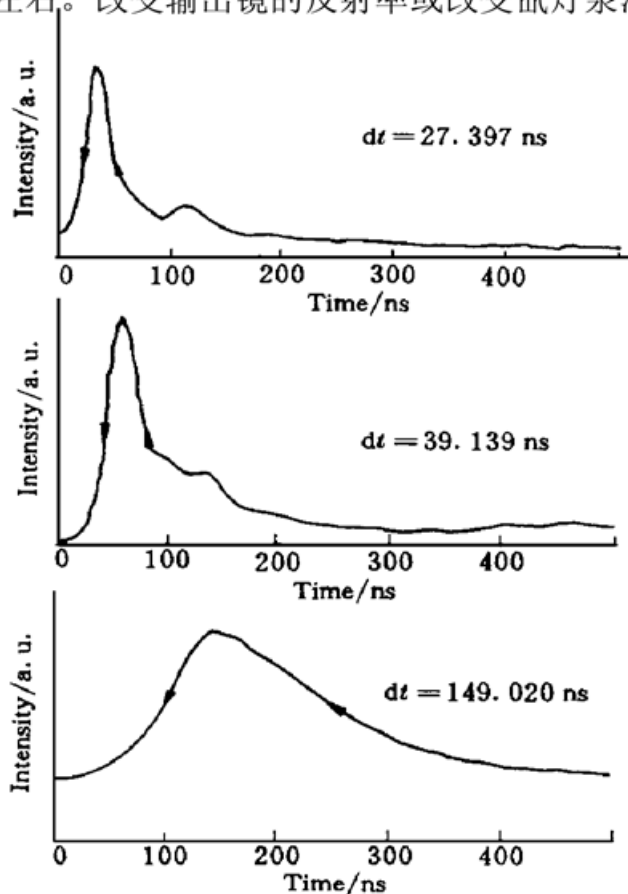


图 2 当旋转 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 及调整腔镜时用瞬态数字仪测量的脉冲时间形状

Fig. 2 Laser pulses measured by a transient digitizer with the $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ rotated and the cavity mirrors adjusted

我们对得到的光斑利用 F-P 标准具进行干涉测量,虽然未能达到单纵模运行,但干涉图表明环形腔已工作在较好的模式下。

在最近的光纤位相共轭激光实验中,我们用此环形腔输出的激光直接耦合到光纤中,当环形腔输出脉冲能量为 2.5 mJ,重复频率分别为 1, 20, 30, 50, 100 Hz 时,均得到了很好的位相共轭反射光斑。其远场发散度变化很小。图 3 示出了 1 Hz 及 100 Hz 时的位相共轭反射光斑。这说明环形本身的输出是十分稳定的。

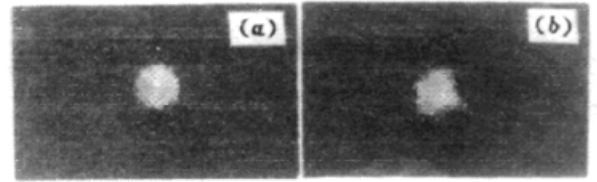


图 3 在重复率为 1 Hz (a) 和 100 Hz (b) 时的远场激光光斑

Fig. 3 Far field laser spots for the repetition rates of 1 Hz (a) and 100 Hz (b)

3 环形腔设计及特性

在连续、高重复率脉冲灯泵浦激光器中,由于 YAG 棒存在热透镜效应,可将其作为类透镜介质。其焦距可以由下式给出^[1]

$$\frac{1}{f} = 4n_0 l \cdot k \cdot P_{in}^\alpha \quad (1)$$

其中 l 为 YAG 棒长, P_{in} 为泵浦功率, k, α 与系统有关。取任意点 x 为传递矩阵的起始位置,其到 YAG 棒中心 Y 点距离为 x , 腔长为 $2L$, 得到环形腔的 $ABCD$ 传递矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 2L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{x}{f} & 2L - \frac{x}{f}(2L - x) \\ -\frac{1}{f} & -\frac{1}{f}(2L - x) + 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据稳定条件 $\left| \frac{A+D}{2} \right| \leq 1$, 得到 $f \geq \frac{L}{2}$ 。当满足 $A + D = 0$ 时, 谐振腔对 YAG 棒热透镜焦距随泵浦功率的起伏不灵敏^[2]。所以当 $f = L$ 时, 即当热焦距等于半腔长时, 整个腔对泵浦功率的起伏最不灵敏。

根据传递矩阵起始位置光束半径^[3]得到 YAG 棒 Y 处的光束半径(Y 的位置如图 1)

$$W_Y = \left[\frac{2\lambda}{\pi} \frac{|2L|}{\sqrt{4 - \left| 2 - \frac{2L}{f} \right|^2}} \right]^{1/2} \quad (3)$$

由(3)式可以得到图 4。由图 4 可见 W_Y 是 YAG 棒相当的热透镜主面上的光斑半径。在中、小功率情况下可看作是 YAG 棒上的平均光斑半径^[4], 因此 W_Y 的大小直接关系到输出功率的大小。由图 4 可以看出在区域 Γ 内热焦距的变化将引起 W_Y 剧烈地变化, 反之区域 Γ 内的变化则会缓慢得多。图 4 纵坐标中的 0.82 为归一化系数, 即当 $f = 1 \text{ m}$ 时, W_Y 为 0.82 mm。

虽然 $L = f$ 是腔热稳定最佳条件。但是对于重复率变化要求较高的激光器, 这一点是无法对任何重复率满足的。因此对于重复率激光器应使热焦距变化在 Γ 区, 并尽可能靠近 $f = L$ 点, 即根据重复率最高时的热焦距 f 来确定腔长。

整个腔的另一个重要特性是选模性能, 根据自孔径选模条件

$$L = \frac{\pi}{8\lambda} r^2 \quad (4)$$

以直径为 $\phi 5 \text{ mm} \sim 10 \text{ mm}$ 的 YAG 棒为例, 求得 L 约为 2.3~9.3 m, 这对于 $f = L$ 的要求显然太长了。所以在系统中加入小孔光阑, 等效于人为地减小 YAG 棒半径来满足自孔径选模条件。当然这样将减少激活介质的模体积。因此对两方面的要求要有一个合理的兼顾。

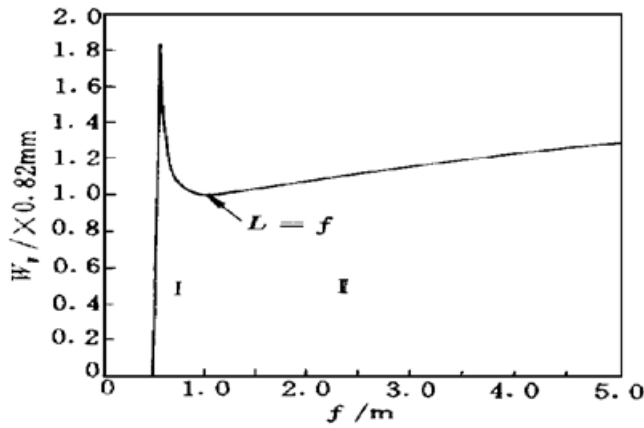


图4 YAG棒上的光斑尺寸对YAG棒热透镜焦距的变化关系

Fig. 4 Average spot size on the YAG rod varies with the thermal focal lens of the YAG rod ($L = 1$)

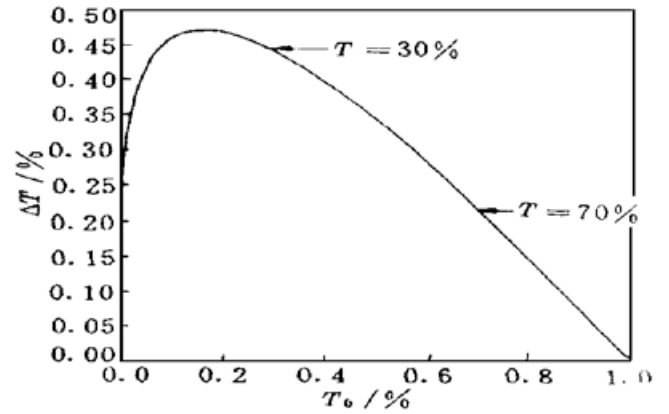


图5 不同透过率的Cr⁴⁺·YAG在饱和前后的吸收率变化

Fig. 5 The variation of absorptivity before and after saturation of Cr⁴⁺·YAGs of different initial transmissivities ($r = 4$)

小信号情况下,根据Cr⁴⁺·YAG晶体的初始透过率及饱和时的透过率^[5]可求得Cr⁴⁺·YAG晶体Q开关能够产生的损耗突变为

$$\Delta T = (T_0)^{1/4} - T_0 \quad (5)$$

根据(5)式得图5。 ΔT 的极点位置处于 $T_0 = 15.7\%$ 处,显然 $T_0 = 30\%$ 时的Q值大于在70%时的Q值,因此用初始透过率 $T_0 = 30\%$ 的Cr⁴⁺·YAG晶体作被动调Q时得到较小的脉冲宽度。

参 考 文 献

- 1 W. Koechner. Thermal lensing in a Nd·YAG laser rod. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(11): 2548~ 2553
- 2 C. L. Tang, H. Statz, G. deMars. Regular spiking and single-mode operation of ruby laser. *Appl. Phys. Lett.*, 1963, **2**(11): 222~ 224
- 3 Lu Yaxong, Lü Baida. Matrix Optic. Dalian Polytechnical University Publication. 1989. 206~ 216 (in Chinese)
- 4 Hu Guojiang, Wang Dongmei, Yang Tiangxing *et al.*. Intracavity frequency doubled Nd·YAG laser with high frequency conversion efficiency. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1997, **A24**(5): 391~ 396 (in Chinese)
- 5 Oyang Bing, Ding Yanhua, Wang Xiaoke *et al.*. Saturable absorption character of Cr⁴⁺·YAG and its performance as passive Q switches. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(12): 1665~ 1670 (in Chinese)

A Unidirectional Nd·YAG Ring Laser Resonator with a Cr⁴⁺·YAG Passive Q-switch

Chen Jun Zhu Qi Bao Chengfang Qiu Wenfa

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Qiao Jingwen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract A unidirectional Nd·YAG ring laser resonator with an auxiliary mirror was introduced. Cr⁴⁺·YAG crystals were used as a saturable passive Q-switch. The ring resonator was designed and a sequence of Q-switch pulses using Cr⁴⁺·YAG crystals of different initial transparencies were observed and analyzed.

Key words ring resonator, Cr⁴⁺·YAG, passive Q-switch