

文章编号: 0258-7025(2001)01-0001-03

# 凸-ARR 非稳腔中 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 调 $Q$ 激光器的研究\*

吴逢铁 张文珍

(华侨大学应用物理系 泉州 362011)

**摘要** 在带抗共振环(Anti-resonant Ring, ARR)的非稳腔 Nd:YAG 激光器中,采用  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  作为被动调  $Q$  元件,获得单脉冲能量  $> 85 \text{ mJ}$ ,脉宽  $40 \text{ ns}$  和能量起伏  $0.4\%$  的高能量、高稳定调  $Q$  激光脉冲。同时对平-凸非稳腔和平-平介稳腔进行实验比较,并对腔型和实验结果进行了初步分析。

**关键词**  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  调  $Q$  激光器 抗共振环 非稳腔

中图分类号: TN 248.1<sup>+3</sup> 文献标识码: A

## Study on $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ $Q$ -switched Laser with Convex-ARR Unstable Resonator

WU Feng-tie ZHANG Wen-zhen

(Department of Applied Physics, Huaqiao University, Quanzhou 362011)

**Abstract** By using  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  as a saturable absorber, a high energy and high stability  $Q$ -switched pulse with a single pulse energy  $> 85 \text{ mJ}$ , pulse-width of  $40 \text{ ns}$  and energy fluctuation of  $0.4\%$  was obtained in an unstable resonator Nd:YAG laser with an anti-resonant ring(ARR) structure. The experiments on plane-convex unstable resonator and plane-plane critical resonator were also tested for comparison and the results were analyzed.

**Key words**  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ ,  $Q$ -switched laser, anti-resonant ring, unstable resonator

### 1 引言

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  是近年来引起人们极大关注和兴趣的新型可饱和吸收材料,它在  $0.9 \sim 1.2 \mu\text{m}$  波段范围具有很好的饱和吸收特性。已成功实现该波段的被动调  $Q$  和锁模运转<sup>[1,2]</sup>。相比于其他被动调  $Q$  材料, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  具有稳定的物化性能,导热性好,损伤阈值高,饱和光强小,使用方便等优点。它既可作为脉冲激光器的  $Q$  开关,也非常适合连续激光器的被动调  $Q$ ,甚至铬离子可以和激活离子掺杂在同一基质晶体内,构成自调  $Q$  固体激光器<sup>[3]</sup>。因此有理由认为  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  是构成全固化、简单实用的调  $Q$  激光器最有希望的可饱和吸收体  $Q$  开关之一。

目前, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调  $Q$  激光器的研究已有多篇报道。作者大多采用平-平介稳腔和平-凹稳定

腔,这些激光器的输出不稳定性一般在  $3\% \sim 5\%$ <sup>[4~6]</sup>,同时输出能量也受到一定限制。为了使  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  调  $Q$  激光器得到更广泛的应用,研究高稳定性、高能量的激光输出是很有必要和意义的。本文采用带抗共振环(ARR)的凸-ARR 非稳腔结构,该腔的两大特点是(1)利用非稳腔结构,大大提高激光输出能量和改善激光模式(2)引入 ARR 结构非常有效地稳定激光输出。从而获得了高能量、高稳定的调  $Q$  激光脉冲输出。

### 2 实验装置和结果

实验装置如图 1 所示,采用凸-ARR 非稳腔。有效腔长  $L = L_1 + ln + L_2 + L_3 = 900 \text{ mm}$ ( $l$  为增益介质 Nd:YAG 棒长度, $n$  为其折射率)。凸面全反镜的曲率半径  $R_1 = -2000 \text{ mm}$ ,  $M_2$  为 50/50 分光镜,平面镜  $M_2, M_3, M_4$  构成抗共振环,其等效为一平面全反镜。 $M_0$  为 50/50 输出耦合镜。Nd:YAG 棒尺寸为  $\phi 4.5 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ,由双脉冲氙灯抽运,工作重复频率为  $1 \text{ Hz}$ 。可饱和吸收体  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ (由中

\* 福建省自然科学基金(F9810013)和福建省优秀留学回国人员科研基金资助项目。

收稿日期 2000-05-23;收到修改稿日期 2000-08-09

中国科学院上海光机所提供)尺寸为  $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 4.75\text{ mm}$ , 其通光长度为  $4.75\text{ mm}$ , 对  $1.06\text{ }\mu\text{m}$  光的小信号透过率为  $33\%$ 。将  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  置于 ARR 中心。激光输出能量由 PT-1 型激光能量计测定, 用 PIN 构成的探测器接收激光并由 HP54502A 型  $400\text{ MHz}$  数字式存储示波器观察脉冲波形和测定脉宽。

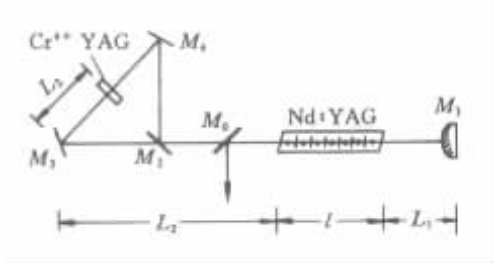


图1 实验装置简图

Fig.1 Scheme of experimental setup

实验时, 控制抽运电压并由示波器监测激光输出波形, 当输出单个调  $Q$  脉冲时, 测得其平均输出能量为  $85.6\text{ mJ}$  (数据为 10 次以上测定的平均值), 由公式  $\Delta E/\bar{E} = (\sum_{i=1}^m |E_i - \bar{E}|) / n\bar{E}$  算得输出激光能量起伏为  $0.4\%$ 。公式中,  $m$  为测量次数,  $\bar{E}$  为

所测能量的平均值, 而  $E_i$  为单次测量的能量值。图 2 为调  $Q$  脉冲的示波器照片, 其脉冲宽度 (FWHM) 为  $40\text{ ns}$ 。当谐振腔长缩短为  $500\text{ mm}$  时, 获得脉宽为  $20\text{ ns}$  的调  $Q$  脉冲。

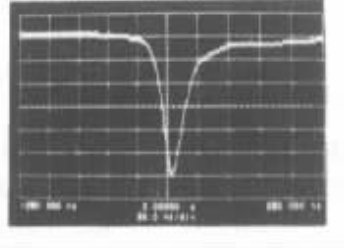


图2 调  $Q$  脉冲示波器照片

Fig.2 Oscilloscope photograph of  $Q$ -switched pulse ( $50\text{ ns/div}$ )

为了验证非稳腔结构对提高输出能量的作用, 以及引入 ARR 结构对稳定激光输出的作用, 对同一  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  饱和吸收体, 分别做了平-凸非稳腔和平-平介稳腔的调  $Q$  实验, 有关实验参数和结果列于表 1。

表1 不同腔型的实验结果

Table 1 Experimental results in different cavity configurations

Cavity configuration	Cavity length $L/\text{mm}$	Position of $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$	Output energy $E/\text{mJ}$	Pulse width $\tau/\text{ns}$	Fluctuation of energy/%
Convex-ARR	900	Center of ARR	85.6	40	0.4
Plane-convex	500	In front of convex mirror	70.5	23	1.9
Plane-plane	500	In front of plane mirror	29.7	20	3.8

### 3 结果分析

实验结果有如下几个特点:

(1) 采用非稳光学谐振腔, 大大提高了激光输出能量。如凸-ARR 和平-凸非稳腔的输出能量分别为  $85.6\text{ mJ}$  和  $70.5\text{ mJ}$ , 远远大于平-平介稳腔的  $29.7\text{ mJ}$ 。这是由于非稳腔具有大的和均匀的模体积, 可充分有效地利用激活介质中的增益介质粒子, 因而可获得比同类稳腔激光器高得多的能量输出。

(2) 非稳腔结构有效地提高了输出激光的稳定性。输出能量起伏由平-平腔的  $3.8\%$  提高到平-凸和凸-ARR 非稳腔的  $1.9\%$  和  $0.4\%$ 。其中重要原因是由于非稳腔具有良好的横模鉴别和控制能力, 易获得单横模激光输出, 这对改善激光输出的

稳定性是有利的。由于 Nd:YAG 激光器增益较高, 若不采用相应技术抑制高阶横模, 就容易出现多模振荡。由于模式之间的竞争, 各横模的强度此起彼伏, 随机变化, 这是造成激光输出不稳定的因素之一<sup>[4]</sup>。

(3) ARR 结构的引入进一步提高激光输出的稳定性, 这一作用在对撞脉冲锁模 (CPM) 固体激光器中已得到广泛的应用<sup>[7,8]</sup>, 理论计算和解释也较为明确<sup>[9]</sup>。至于它在调  $Q$  激光器中理论上的明确解释尚未能给出, 下面仅作简单初步的分析。当  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  可饱和吸收体置于 ARR 中心, 两等光强、相向传播的光脉冲在  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  处相撞, 相干叠加同时对  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  可饱和吸收体进行漂白, 假如由于某种因素引起相向传播的光脉冲幅度不一

致那么在漂白  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  过程中,吸收体对幅度高的脉冲将有较大的损耗,如果两脉冲从增益介质处得到相同增益,这种随机因素造成的幅度不一致会很快消除而趋于一致,这就进一步稳定了激光的运转。

(4) 实验结果也指出短腔调  $Q$  激光器可获得较窄的脉宽,这同文献 [10] 的理论计算和实验结果是一致的。

## 4 结 论

本文以  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体作为可饱和吸收体,采用凸-ARR 非稳腔结构,实现了高能量、高稳定的被动调  $Q$  激光输出,解决了一般被动调  $Q$  激光起伏较大、输出能量较小的不足,这一结果将使调  $Q$  激光脉冲获得更广泛的应用。

## 参 考 文 献

- 1 P. Yankov.  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$   $Q$ -switching of Nd: host laser oscillators. *J. Phys. (D): Appl. Phys.*, 1994, **27**(6): 1118 ~ 1120
- 2 Wang Jiaxian, Zhang Wenzhen, Xing Qirong *et al.*. Investigation of  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  passive mode locking in a pulsed Nd:YAG laser. *Optics & Laser Technology*, 1998, **30**(5): 303 ~ 305

- 3 S. Zhou, K. K. Lee, Y. C. Chen. Monolithic self- $Q$ -switched Cr, Nd:YAG laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(7): 511 ~ 512
- 4 Ding Yanhua, Ouyang Bin, Xu Jun *et al.*. Stability and power improvement in passive  $Q$ -switching of CW Nd:YAG laser using  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ . *Chinese J. Lasers (中国激光)*, 1997, **A24**(3): 197 ~ 201 (in Chinese)
- 5 Jiang Dongsheng, Zhou Shouhuan, Liu Shenggang *et al.*. High Repetition rate passively  $Q$ -switched diode-pumped Nd:YAG laser. *Chinese J. Lasers (中国激光)*, 1999, **A26**(11): 961 ~ 964 (in Chinese)
- 6 Zhang Xinyu, Zhao Shenzi, Wang Qinpu *et al.*. Theoretical and experimental study of  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$   $Q$ -switching characteristics. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 1998, **18**(9): 1180 ~ 1185 (in Chinese)
- 7 Wu Fengtie, Zhang Wenzhen. Intracavity frequency doubling effects in different picosecond unstable resonators with KTP crystal. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 1999, **19**(1): 141 ~ 144 (in Chinese)
- 8 Wu Fengtie, Zhang Wenzhen. Consideration of angular acceptance angle in BBO crystal on a highly efficient second harmonic generation. *Optics & Laser Technology*, 1998, **30**(3/4): 189 ~ 192
- 9 M. S. Stix, E. P. Ippen. Pulse shaping in passively mode-locked ring dye lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, **QE-19**(4): 520 ~ 526
- 10 Zhao Shenzi, Wang Qinpu, Zhang Xinyu *et al.*. Study on intracavity-doubling of a new low-threshold high efficiency Nd:  $\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$  crystal. *Acta Photonica Sinica (光子学报)*, 1996, **25**(12): 1081 ~ 1085 (in Chinese)