

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0012-04

# 高重复频率双调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>激光器

冯宇彤<sup>1,2</sup> 孟俊清<sup>1</sup> 陈卫标<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要** 在激光二极管单端抽运结构的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器中, 同时利用声光(AO)Q 开关和 Cr<sup>4+</sup>:YAG 可饱和吸收体被动 Q 开关, 实现 1.06 μm 激光高重复频率下(约 100 kHz)的双调 Q 运转。当抽运功率为 6.1 W, 重复频率为 125 kHz 时, 得到了最短脉冲宽度 7 ns 的输出脉冲。同样工作条件下, 腔内不插入 Cr<sup>4+</sup>:YAG 可饱和吸收体时, 脉冲宽度为 13 ns。结果表明, 与 AO 调 Q 方式相比, AO-Cr<sup>4+</sup>:YAG 双调 Q 方式运转可以有效地压窄脉冲宽度。

**关键词** 激光器; 声光调 Q; 高重复频率; 被动调 Q; 双调 Q

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0012

## High Pulse Repetition Rate, Doubly Q-Switched Nd:YVO<sub>4</sub> Laser

Feng Yutong<sup>1,2</sup> Meng Junqing<sup>1</sup> Chen Weibiao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
<sup>2</sup> North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract** In this paper, we report a laser diode-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser, doubly Q-switched by an acousto-optic (AO) Q-switch and a Cr<sup>4+</sup>:YAG saturable absorber. At the pump power of 6.1 W and the pulse repetition rate of 125 kHz, the shortest pulse width of 7 ns is achieved. When the Cr<sup>4+</sup>:YAG saturable absorber is removed from the resonator, the corresponding pulse width is 13 ns. In contrast to an AO Q-switched laser, it is shown that the pulse width is obviously compressed in a doubly Q-switched laser with AO and Cr<sup>4+</sup>:YAG.

**Key words** lasers; acousto-optic Q-switch; high repetition rate; passive Q-switch; double Q-switch

## 1 引 言

激光二极管(LD)端面抽运的全固态激光器体积小,腔内光束交叠效率高,光束质量好,并且 LD 和激光晶体这两个主要的热源分离,降低了整机的热管理难度,近年来发展十分迅速,已成为激光技术的一个重要发展方向<sup>[1]</sup>。本课题组采用全固态种子激光器和光纤放大器的混合式主振功率放大(MOPA)方式得到了平均功率 20 W,重复频率 150 kHz,脉冲宽度 15.3 ns 的激光输出<sup>[2,3]</sup>。在这种技术路线中,重复频率和脉冲宽度两个参数由提供信号光的全固态激光器决定,平均功率和光束质量两个指标则通过光纤放大器实现。许多应用场合要求保持高平均功率、高重复频率的同时,脉冲宽度能达到 10 ns 以下,即要求信号光的脉冲宽度要小

于 10 ns,为此,对全固态种子激光器进行了改进。

同时采用主动调 Q 和被动调 Q 技术的主被动双调 Q 技术,近年来已有一些报道<sup>[4~9]</sup>。声光(AO)调 Q 激光器输出脉冲信号上升沿较陡而下降沿缓慢,有一定的拖尾现象。而利用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 可饱和吸收体被动调 Q 的激光器脉冲宽度要窄许多,但由于 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体自身的激发态吸收性质,输出脉冲序列时间稳定性低,相邻脉冲幅值抖动较大。利用 AO Q 开关得到稳定的脉冲序列,同时利用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 可饱和吸收体压窄脉宽,可以得到稳定脉冲序列、窄脉冲宽度的激光输出。文献[8]报道了基于 AO-Cr<sup>4+</sup>:YAG 双调 Q 的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器,得到 40 kHz 重复频率下,对应脉宽为 32.8 ns。文献[9]中同样类型激光器在 10 kHz 重复频率下,脉

收稿日期: 2009-11-22; 收到修改稿日期: 2010-03-25

作者简介: 冯宇彤(1982—),男,博士研究生,主要从事激光技术方面的研究。E-mail: ytfeng@mail.siom.ac.cn

导师简介: 陈卫标(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光遥感技术方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shnc.ac.cn

宽为 16 ns。文献[7]报道的同样双调 Q 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器,得到了 10 kHz 重复频率下,脉宽 13.6 ns 的输出。前述工作充分表明在单独 AO 调 Q 激光器中,加入可饱和吸收体可以有效地压窄脉宽,本文以 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体为激光工作物质,研究了在高重复频率(约 100kHz)下,采用 AO-Cr<sup>4+</sup>:YAG 主被动双调 Q 方式的激光输出特性,在重复频率为 125 kHz 时,获得了平均功率 440 mW,脉冲宽度 7 ns 的输出脉冲。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示,采用结构紧凑的平-凹腔结构,腔长约 55 mm;平面镜靠近抽运源的一面镀 808 nm 增透膜,靠近激光晶体的一面镀 1064 nm 高反膜和 808 nm 增透膜;用作耦合输出镜的凹镜曲率半径为 5000 mm,对 1064 nm 波长透射率为 15%;抽运源为光纤耦合输出的激光二极管,发射谱线的中心波长为 807 nm,输出光纤的数值孔径为 0.22;光纤输出光束经耦合透镜系统后的抽运光斑直径约 200 μm,耦合效率为 90%;激光晶体是掺杂原子数分数为 0.5% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,尺寸为 3 mm×3 mm×6 mm,两个通光面镀 808 nm 和 1064 nm 增透膜,晶体上下底面垫铜箔置于黄铜热沉上,热沉表面镀金以防止表面氧化减弱冷却效果;AO Q 开关通光方向长度为 33 mm,两个通光面均镀有 1064 nm 增透膜,Q 开关本征频率为 40.68 MHz,衍射损耗 83%;Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动 Q 开关置于激光晶体和 AO Q 开关之间。

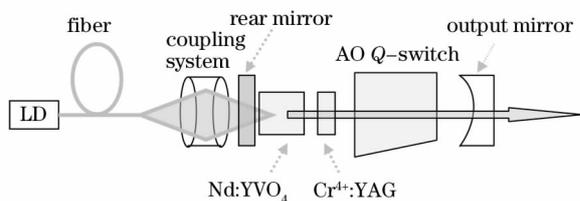


图 1 双调 Q 装置图

Fig. 1 Schematic of doubly Q-switched laser

## 3 实验结果及分析

输出镜对 1064 nm 透射率  $T=15\%$  时,在不同的 AO 调制频率下,对不同初始透射率的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动 Q 开关对输出脉冲宽度的影响效果进行了研究,发现对于同一 AO 调制频率,初始透射率  $T_0=70\%$  的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动 Q 开关对脉冲宽度的压缩效果最为明显。图 2 给出了重复频率 125 kHz

时,不同初始透射率情况下,输出脉冲的脉冲宽度随抽运功率的变化曲线。

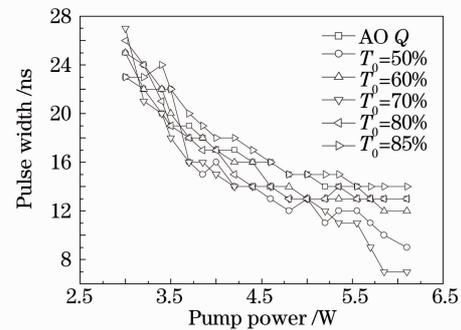


图 2 125 kHz 时,不同初始透射率下脉冲宽度与抽运功率的关系

Fig. 2 Pulse width versus pump power with different initial transmissions at 125 kHz

从图 2 可以看出,在初始透射率  $T_0=70\%$  时,随着抽运功率的增大,与 AO 调 Q 相比,主被动双调 Q 方式对脉冲宽度的压缩效果也越明显,在抽运功率 6.1 W 时,通过 AO 调 Q 获得的脉宽是 13 ns,而利用 AO-Cr<sup>4+</sup>:YAG ( $T_0=70\%$ ) 主被动调 Q 获得的脉宽仅 7 ns,相应的脉冲时序波形图如图 3 所示。

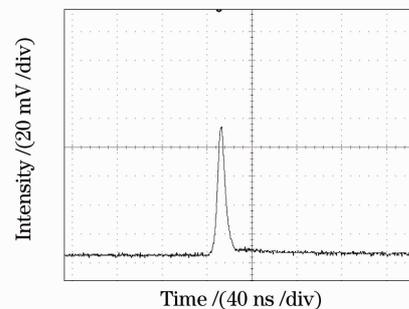


图 3 125 kHz 时双调 Q 脉冲时序波形图

Fig. 3 Doubly Q-switched pulse shape at the repetition rate of 125 kHz

图 4 是在不同 AO 调制频率下,腔内有无 Cr<sup>4+</sup>:YAG ( $T_0=70\%$ ) 可饱和吸收体时的平均输出功率随抽运功率的变化关系。从图 4 可以看出,在腔内有无 Cr<sup>4+</sup>:YAG 可饱和吸收体时,平均输出功率都随抽运功率的增加而增加,但在同样抽运功率条件下,双调 Q 的平均输出功率明显低于单 AO 调 Q 的输出,这是由于 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动 Q 开关的残余吸收导致的,这相当于引入非常大的插入损耗,并且双调 Q 时的斜率效率要低于单 AO 调 Q。

图 5 是在不同 AO 调制频率下,腔内有无 Cr<sup>4+</sup>:YAG ( $T_0=70\%$ ) 可饱和吸收体时的脉冲宽度随抽

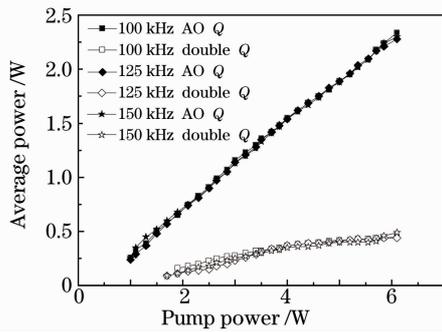


图 4 不同重复频率下平均输出功率与抽运功率的关系  
Fig. 4 Average power versus pump power at different pulse repetition rates

运功率的变化关系。从图 5 可以看出,在相同抽运功率下,双调 Q 和单 AO 调 Q 的脉宽都随重复频率的增大而增大;在相同重复频率下,双调 Q 和单 AO 调 Q 的脉宽都随着抽运功率的增大而减小,并且双调 Q 时的脉冲宽度始终小于单 AO 调 Q 时的脉冲宽度,  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 被动 Q 开关对脉宽的压缩效果随着抽运功率的增大而增加。

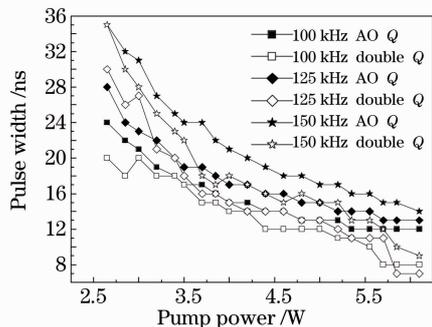


图 5 不同重复频率下脉冲宽度与抽运功率的关系  
Fig. 5 Pulse width versus pump power at different pulse repetition rates

图 6 是在不同 AO 调制频率下,腔内有无  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG ( $T_0=70\%$ ) 可饱和吸收体时的峰值功率随抽

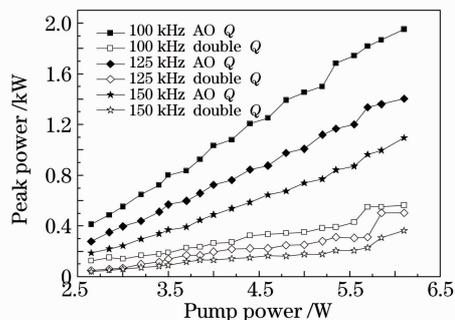


图 6 不同重复频率下峰值功率与抽运功率的关系  
Fig. 6 Peak power versus pump power at different pulse repetition rates

运功率的变化关系。从图 6 中可以看出,在相同抽运功率下,单 AO 调 Q 和双调 Q 的峰值功率都随着重复频率的增大而减小,并且其差值也随着重复频率的增大而减小;在相同重复频率下,双调 Q 和单 AO 调 Q 的峰值功率都随着抽运功率的增大而增大,并且其差值也随着抽运功率增大而增大。

此外,从图 4 中还可以看出,当重复频率在约 100 kHz 时,不论腔内有无  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体,不同的调制频率对应的平均输出功率曲线都相差不大,这是由于  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体工作在高重复频率条件下时,其平均输出功率已经接近连续性能,在实验中,当 AO 调制频率高于 100 kHz 后,平均输出功率就基本不变,这与文献[7~9]中调制频率仅几十千赫兹的情形不同。在这种工作状态下,相同抽运功率时的单脉冲能量随着重复频率的增加而减小。

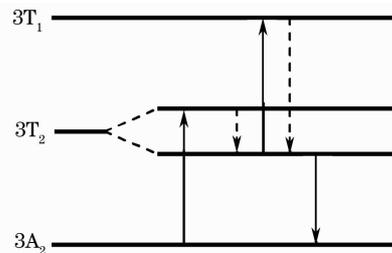


图 7  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 可饱和吸收体的能级图  
Fig. 7 Energy level diagram of  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG

具有激发态吸收的  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 可饱和吸收体的能级结构和主要跃迁过程如图 7 所示,其中第一激发态  $3T_2$  包括两个能态,晶体中跃迁过程包括  $3A_2$  到  $3T_2$  的基态吸收和  $3T_2$  到  $3T_1$  的激发态吸收,室温下  $3T_1$  和  $3T_2$  的能级寿命分别为 0.5 ns 和 4.1  $\mu\text{s}$ [10]。实验中  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体初始透射率  $T_0=70\%$ ,其最大透射率为  $T_{\max}=\exp(-n_0\sigma_{es}l_s)=90\%$ ,其中  $n_0$  为  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体基能态粒子密度,  $l_s$  为晶体厚度 1 mm,  $\sigma_{es}$  为激发态吸收横截面积  $2\times 10^{-18}\text{cm}^2$ 。 $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体的饱和能量密度为  $E_s=270\mu\text{J}/\text{mm}^2$ ,实验中输出光束光斑半径约 0.25 mm,当  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体内的能量密度达到饱和时,对应的输出光束脉冲能量为 7.95  $\mu\text{J}$ 。也就是说当单个脉冲的能量不足以使  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体被“饱和”或“漂白”时,其最大透射率就低于  $T_{\max}$ ,若谐振腔内仍然可以满足增益大于损耗的阈值条件,依然能够实现激光振荡输出,每次  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体被“漂白”的程度不同,会使得输出脉冲序列中脉冲幅值的起伏较大,在实验中也观察到了这样的现象。当脉冲能量较大时,输出脉冲的幅值基本平稳。

文献[7]对 AO 调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>激光器中 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体被动 Q 开关对脉冲宽度的作用效果进行了理论上的分析,指出与单 AO 调 Q 相比,主被动双调 Q 的工作方式可以有效压窄输出脉冲的脉宽,并在实验中当调制频率分别为 10 kHz 和 40 kHz 时,对单调 Q 和双调 Q 时的脉宽进行了测量比较,验证了理论分析结果。对重复频率高于 100 kHz 情况下的实验结果进行了测量,证实了在高重复频率下主被动双调 Q 的工作方式依然可以压窄输出脉冲的脉冲宽度。文献[11]从速率方程出发,对双调 Q 激光器输出脉冲能量最大时的优化参数进行了理论计算,并从实验上进行了验证,但并未给出此时优化条件下对脉冲宽度的影响,以上述工作为基础,对双调 Q 激光器输出脉冲脉宽最窄时的优化参数的理论分析工作正在进行中。

## 4 结 论

报道了一台采用 AO-Cr<sup>4+</sup>:YAG 主被动双调 Q 工作方式,工作在高重复频率下的 LD 端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器,在重复频率 125 kHz 下,抽运功率 6.1 W 时,得到了脉宽 7 ns 的输出,并对在高重复频率下出现的实验现象进行了理论上的分析,指出高重复频率下对 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动 Q 开关“饱和”的不足是输出脉冲幅值波动较大的主要原因。

## 参 考 文 献

1 M. J. F. Dignonnet, C. J. Gaeta, Theoretical analysis of optical

- fiber laser amplifiers and oscillators[J]. *Appl. Opt.*, 1986, **24**(3): 333~342
- 2 Feng Yutong, Meng Junqing, Bi Jinzi *et al.*. High repetition rate, short pulse-width all-solid-state laser seed for fiber amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1173~1176  
冯宇彤, 孟俊清, 毕进子等. 高重复频率、窄脉宽全固态光纤放大器种子源[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1173~1176
- 3 S. Du, J. Zhou, F. Zhang *et al.*. 20-W average-power, high repetition-rate, nanosecond pulse with diffraction-limit from a all fiber MOPA system[J]. *Microw. Opt. Techn. Lett.*, 2008, **50**(10): 2546~2549
- 4 H. Plaessmann, Kevin S. Yamada, Charles E. Rich *et al.*. Subnanosecond pulse generation from diode-pumped acousto-optically Q-switched solid-state lasers[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(33): 6616~6619
- 5 Z. Li, Z. Xiong, N. Mooreb *et al.*. Pulse width reduction in AO Q-switched diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser with GaAs coupler[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **237**(4): 411~416
- 6 G. Li, S. Zhao, K. Yang. Compression of the pulse width in a diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser with double Q-switches[J]. *Opt. Eng.*, 2005, **44**(3): 034204
- 7 K. Yang, S. Zhao, G. Li *et al.*. Pulse compression in AO Q-switched diode-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> laser with Cr<sup>4+</sup>:YAG saturable absorber[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **80**: 687~692
- 8 Gao Liyan, Wang Chunxing, Tian Wenmiao *et al.*. Study of diode pumped double Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> Laser[J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(3): 227~229  
高利岩, 王春兴, 田文苗等. LD 泵浦双调 Q Nd:YVO<sub>4</sub>激光器实验研究[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(3): 227~229
- 9 G. Wang, S. Liu, L. Li *et al.*. Diode-pumped doubly Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> Laser[J]. *Laser Phys.*, 2007, **17**(12): 1349~1352
- 10 Z. Burshtein, P. Blau, Y. Kalisky *et al.*. Excited-state absorption studies of Cr<sup>4+</sup> ions in several garnet host crystals[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(2): 292~299
- 11 D. Li, S. Zhao, G. Li *et al.*. Optimization of doubly Q-switched lasers with both an acoustic-optic modulator and a Cr<sup>4+</sup>-doped saturable absorber [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2006, **42**(5): 500~508