

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0020-04

# 200 kHz, 8 ns 被动调 Q 高峰值功率 Nd:YAG 激光器

毛小洁 秘国江 邓明发 王 旭 钟国顺

(固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

**摘要** 采用激光二极管(LD)端面抽运,Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 热键合被动调 Q,在风冷的情况下,对激光脉冲重复频率、脉冲宽度、峰值功率、脉冲能量及其相互关系进行了理论分析和实验研究。获得了 200 kHz,8 ns,单脉冲能量 50 μJ 输出,峰值功率高达 6.25 kW。结果表明,理论分析和实验结果一致,此种激光器是重复频率高,脉宽窄,峰值功率高的全固态激光器。

**关键词** 激光器;固体激光器;激光二极管端面抽运;热键合;被动调 Q;高重复频率

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0020

## 200 kHz, 8 ns Passively Q-Switched High Peak Power Nd:YAG Laser

Mao Xiaojie Bi Guojiang Deng Mingfa Wang Xu Zhong Guoshun

(Science and Technology on Solid-State Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

**Abstract** Laser diode (LD) end-pumped, thermally bonded Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG passively Q-switched laser is theoretically analysed and experimentally studied. The key laser parameters such as repetition rates, pulse width, peak power, pulse energy and mutual relation are investigated. The high peak power of 6.25 kW, pulse energy of 50 μJ, pulse width of 8 ns, repetition rate of 200 kHz laser are obtained. Experiment shows that thermally bonded solid state laser has high repetition rate, short pulse width and high peak power.

**Key words** lasers; solid state laser; laser diode end-pumped; thermally bonded; passively Q-switched; high repetition rates

### 1 引 言

高重复频率、千瓦级峰值功率、窄脉冲和紧凑型全固态激光器被应用于许多方面,如环境监测、医学诊断和通信等。调 Q 技术是实现高重复频率、高峰值功率输出的最有效方法之一,而被动调 Q 具有结构简单、制作成本低和体积小等优点,因此被广泛应用。Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体以其饱和吸收性好,吸收谱范围宽,在 0.9~1.2 μm,到目前为止仍是 1.06 μm Nd:YAG 激光器最合适的被动调 Q 晶体材料之一,Cr<sup>4+</sup>:YAG 还具有热导性能好、吸收截面大、掺杂浓度高、饱和光强小、损伤阈值高、光化学性质稳定、无退化现象、寿命长、易实现高峰值输出功率和高脉冲重复频率<sup>[1,2]</sup>

等优点,是一种理想的被动 Q 开关材料。

本文介绍了在连续的 808 nm 激光二极管(LD)抽运下,采用被动调 Q 技术,对 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 热键合晶体,从理论和实验上研究了激光脉冲重复频率、脉冲宽度、峰值功率、脉冲能量及其相互关系。得到了 200 kHz,8 ns,单脉冲能量 50 μJ 的 1064 nm 光输出,其峰值功率高达 6.25 kW。此种激光器可广泛应用于环境监测、医学诊断和通信等领域。

### 2 理论分析

掺杂 Cr<sup>4+</sup>:YAG 作为被动 Q 开关的速率方程为<sup>[3]</sup>

收稿日期: 2010-01-05; 收到修改稿日期: 2010-03-02

作者简介: 毛小洁(1981—),男,硕士,助理工程师,主要从事固体激光技术方面的研究。

E-mail: maoxiaojie991220@163.com

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{\phi}{t_r} \left[ 2\sigma n l - 2\sigma_s n_s l_s - \ln\left(\frac{1}{R}\right) - L \right], \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = -\gamma\sigma\phi cn, \quad (2)$$

$$\frac{dn_s}{dt} = -\gamma_s\sigma_s\phi c n_s, \quad (3)$$

式中  $\phi$  为腔内光子数密度;  $n, \sigma, l$  分别为激活介质的反转粒子数密度、受激发射截面和通光长度;  $n_s, \sigma_s, l_s$  分别为饱和吸收体的的瞬时粒子数密度, 吸收截面和吸收长度;  $t_r$  为光子在腔内往返一次的时间;  $R$  为输出镜的反射率;  $L$  为激光器的双程光损耗,  $\gamma$  为反转因子,  $\gamma_s$  饱和吸收体的反转因子。

由被动 Q 开关的速率方程结合固体激光器的特征方程可推导出被动调 Q 激光器的单脉冲能量表达式<sup>[4]</sup>:

$$E = \frac{h\nu A}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_f}\right). \quad (4)$$

式中  $n_i$  为增益介质内总反转粒子数密度,  $n_f$  为脉冲结束时增益介质的反转粒子数密度;  $A$  为激光束在激光介质内的光斑面积。脉冲峰值功率

$$P_{\max} = \frac{h\nu A l'}{\gamma t_r} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \phi_{\max}. \quad (5)$$

式中  $l'$  为谐振腔腔长。

### 3 实验结果及分析

实验装置包括三部分, 808 nm 光纤抽运源, Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体和输出耦合透镜。实验装置示意图如图 1 所示。

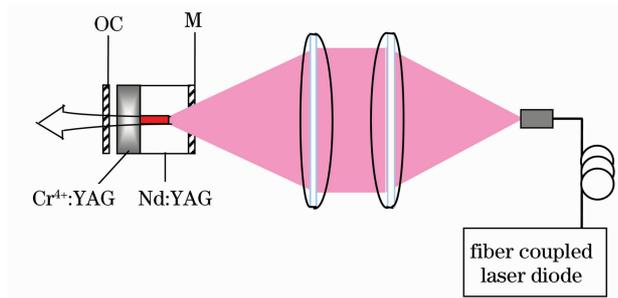


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic figure of the experimental setup

808 nm 光纤抽运源为 30 W, 输出光纤芯径为 400  $\mu\text{m}$ , 数值孔径 0.22, 最大输出功率为 35 W。Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体尺寸为 4 mm  $\times$  4 mm  $\times$  11.72 mm, 其中 Nd:YAG 长度为 9.7 mm, 掺杂原子数分数为 0.5%, 不键合一端 M 镀 808 nm 增透膜和 1064 nm 全反膜; Cr<sup>4+</sup>:YAG 长度约为 2.7 mm, 初始透射率为 89%, 如图 2(a) 所示。输出平平镜<sup>[5]</sup> OC 和

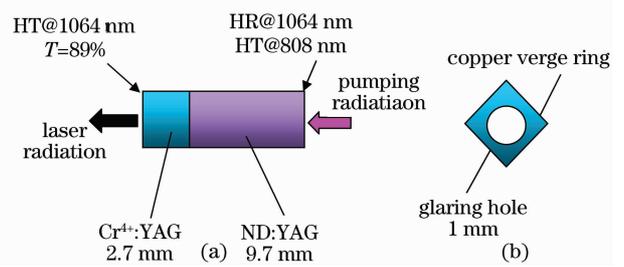


图 2 (a) Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体, (b) Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体端面热层

Fig. 2 (a) Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG crystal, (b) Cr<sup>4+</sup>:YAG crystal end heat sink

M 够成谐振短腔。Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体放在一大块热层上, 用风扇加以制冷。为了充分冷却 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体<sup>[6,7]</sup>, 在它的端面加了一个铜圆盘, 只留出 1 mm 的出光孔, 如图 2(b) 所示。

在相同的抽运功率下, 输出镜采用不同的透射率时得到的输出 1064 nm 光功率随注入 808 nm 光功率的变化如图 3 所示, 此时 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体端面没加热层。

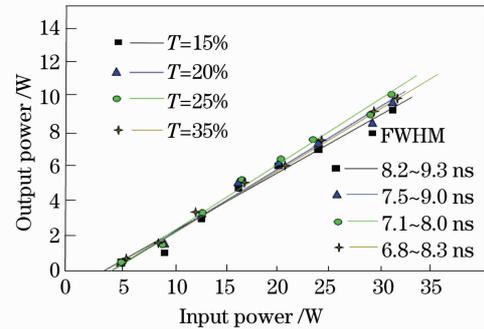


图 3 输出镜透射率不同时输出功率随注入功率的变化关系

Fig. 3 Output power versus input pump power with different transmissions

从图 3 可以看出, 当输出镜透射率  $T=15\%$  时, 激光腔的阈值低, 但输出 1064 nm 光功率的增长变化较大, 脉宽较宽; 随着输出镜透射率的增加, 输出 1064 nm 光功率的变化接近一条直线, 脉冲宽度变窄。当  $T=25\%$  时, 功率增长快, 脉冲波动范围小, 在 32.5 W 的抽运功率下, 获得了 9.8 W 的 1064 nm 光输出, 脉冲宽度为 8.0 ns。当  $T=35\%$ , 相同的注入下, 输出功率开始下降。综合考虑输出功率和脉冲宽度的情况下, 选择  $T=25\%$  作为输出镜的透射率。

从 0~25 W 抽运注入下, 输出功率的变化均匀, 随着抽运功率的进一步提高, 当抽运功率达到 30 W 时, 输出功率增长幅度下降<sup>[8,9]</sup>。这可能是 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体的冷却效果不佳造成的, 由于

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体长度只有2.7 mm,所以采用 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体输出端面加紫铜热沉的方法,只留下1 mm的出光孔,并进一步冷却。加紫铜热沉前后的输出功率和脉冲宽度的对比如图4所示。

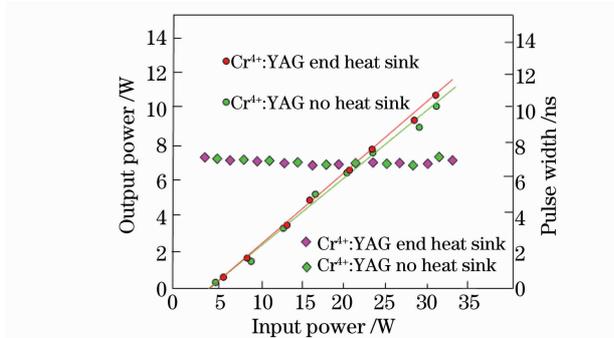


图4 加紫铜热沉前后的输出功率和脉冲宽度

Fig. 4 Output power and pulse width with heat sink and without heat sink

从图4可以看出,在0~25 W抽运功率时, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体端面加热沉与不加热沉,对输出功率和脉冲宽度几乎没影响。随着抽运功率增加,不加热沉的功率增长趋缓。在抽运功率32.5 W时,不加热沉输出功率9.8 W,加热沉输出功率10.5 W,功率增加7.1%,而且此时脉冲宽度也没有明显变宽。

随着抽运功率的提高,腔内增益系数变大,达到

出光阈值的时间缩短,所以两次漂白 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 的时间缩短,提高了输出重复频率,同时也提高了输出功率<sup>[10]</sup>。腔内光子数增长的速度和反转粒子数衰减速度加剧,脉冲建立和消失时间缩短,脉冲宽度变窄,输出高的峰值功率<sup>[10]</sup>。单脉冲能量和峰值功率与抽运功率的关系如图5所示。

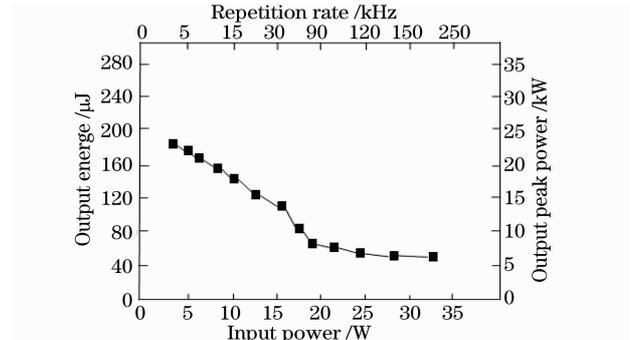


图5 单脉冲能量和峰值功率与抽运功率的关系

Fig. 5 Output pulse energy and peak power versus input power

在图5中,随着抽运功率的增加,重复频率逐渐增大,相应的单脉冲能量下降,当抽运功率超过20 W时,单脉冲能量下降缓慢。在200 kHz,32.5 W抽运时,单脉冲能量50  $\mu\text{J}$ 输出,峰值功率高达6.25 kW,测量此时的脉冲波形如图6所示。

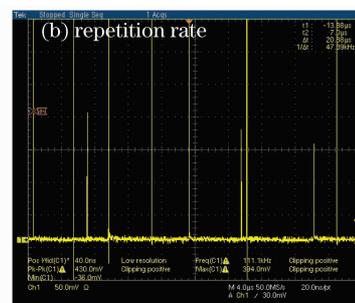
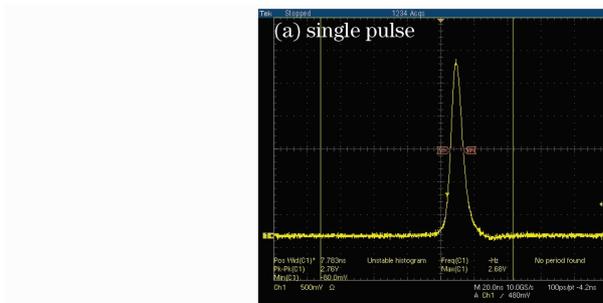


图6 脉冲波形图

Fig. 6 Output of single pulse

单脉冲波形如图6(a)所示,脉冲宽度为7.783 ns,重复频率波形如图6(b)所示,重复频率达到了200 kHz。单脉冲波形没有拖尾现象,说明重复频率较稳定。使用LBA-500型光束分析仪测定远场光斑图如图7所示。

## 4 结论

采用激光二极管端面抽运, $\text{Nd}:\text{YAG}/\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 热键合被动调Q,在风冷的情况下,对激光脉冲重复频率、脉冲宽度、峰值功率和脉冲能量及其相互关系进行了理论分析和实验研究。理论分析和实验结果

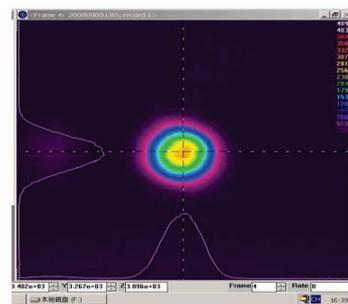


图7 远场光斑图

Fig. 7 Far field beam disk of the selected pulse

基本一致,在抽运功率32.5 W时, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶体端面加热沉,输出功率为10.5 W,相对于 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 晶

体端面不加热沉时,功率增加 7.1%;重复频率为 200 kHz,脉冲宽度为 8 ns,单脉冲能量 50  $\mu$ J,峰值功率高达 6.25 kW。这种激光器结构简单、可靠性高,在环境监测、医学诊断和通信等领域有广泛的用途。

### 参 考 文 献

- 1 Shi Chaohui, Fan Zhongwei, Zhang Ying *et al.*. High efficiency and high power all-solid-state ultraviolet laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 29~32  
石朝辉, 樊仲维, 张 瑛 等. 高效率高功率全固态紫外激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 29~32
- 2 Li Yimin, Tan Huiming, Fu Xihong *et al.*. Characteristics of intracavity-frequency-doubled Nd<sup>3+</sup>:GdVO<sub>4</sub>/LBO deep blue 456 nm laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1308~1312  
李义民, 檀慧明, 付喜宏 等. 腔内倍频 Nd<sup>3+</sup>:GdVO<sub>4</sub>/LBO 深蓝 456 nm 激光器的工作特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1308~1312
- 3 J. J. Degnan. Optimization of passively Q-switched lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(11): 1890~1901
- 4 Zeng Qinyong, Wan Yong, Zhu Dayong *et al.*. High repetition pulse rate diode pumped passively Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2006, **35**(z3): 177~182  
曾钦勇, 万 勇, 朱大勇 等. 半导体泵浦被动调 Q 高重复 Nd:YAG 激光器[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(z3): 177~182
- 5 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. The Theory of Laser[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004  
周炳琨, 高以智, 陈侗嵘 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004
- 6 Sun Yao, Li Tao, Yu Guolei *et al.*. Characteristics of laser diode end-pumped laser crystal on thermal effect and second harmonic generation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 359~363  
孙 尧, 李 涛, 于果蕾 等. 激光二极管端面抽运 Nd:GdYVO<sub>4</sub> 晶体热效应分析及倍频研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 359~363
- 7 Dai Shutao, Ji Jianghua, Zhu Xiaolei. Novel double Q-switcher structure for thermal induced depolarization compensation in all-solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 337~340  
戴殊韬, 纪江华, 朱小磊. 双调 Q 开关热退偏补偿全固态激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 337~340
- 8 W. Koehner. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Yiwen, Cheng Guoxiang *et al.* Transl. Beijing: Science Press, 2003  
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙 文, 江泽文, 程国祥 等译. 北京: 科学出版社, 2003
- 9 Yang Yongming, Guo Zhen, Wang Shiyu *et al.*. Thermal effect of end deformation on the parameters of end pumped DPL[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2006, **35**(2): 148~152  
杨永明, 过 振, 王石语 等. 端面形变对端泵 DPL 参数的影响[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(2): 148~152
- 10 Wang Wei, Liu Xingang, Liu Yingtong. Laser diode pumped Nd:NYW/LBO green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 646~648  
王 巍, 刘析钢, 刘英同. 激光二极管抽运的 Nd:NYW/LBO 绿光激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 646~648