

文章编号: 0258-7025(2004)01-0001-04

# 激光二极管抽运 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 激光器的实验研究

杨成伟<sup>1</sup>, 霍玉晶<sup>1</sup>, 尹晓东<sup>1</sup>, 陈千颂<sup>1</sup>, 张宝顺<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 清华大学电子工程系, 北京 100084; <sup>2</sup> 长春理工大学高功率半导体激光器国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要** 对激光二极管(LD)抽运的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  全固态激光器进行了实验研究。着重研究了抽运功率、 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体的初始透过率及其在激光腔中的位置等因素对激光器输出脉冲宽度和重复频率等性能的影响,并对实验结果进行了相应的分析讨论,在理论上加以合理的解释。

**关键词** 激光技术;  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ ; 被动调 Q; 重复频率; 脉冲宽度

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

## Experimental Study on LD Pumped $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ Laser Passively Q-switched by $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$

YANG Cheng-wei<sup>1</sup>, HUO Yu-jing<sup>1</sup>, YIN Xiao-dong<sup>1</sup>, CHEN Qian-song<sup>1</sup>, ZHANG Bao-shun<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China  
<sup>2</sup>State Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of  
Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** The experimental study on LD pumped  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  laser passively Q-switched by  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  was carried out. Especially, the emphasis was on the influence of pump power, initial transmissions of  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  and its position in the laser cavity on the pulse width and repetition rate of laser output. The experiment results were analyzed and discussed.

**Key words** laser technique;  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ ; passively Q-switched; repetition rate; pulse width

## 1 引 言

调 Q 脉冲激光器是应用最为广泛的脉冲激光器之一,在激光测距、目标指示、激光制导、激光医疗、激光打标等领域有着广泛的应用。调 Q 技术有主动调 Q(电光调 Q,声光调 Q,转镜调 Q 等)和被动调 Q(染料调 Q,色心晶体调 Q 等)两种。主动调 Q 需要外加电设备或机械控制,结构比较复杂,价格相对较高,体积较大,并且不易实现高脉冲重复率和高转换效率。相对于主动调 Q,被动调 Q 具有结构简单、重量轻、体积小、无需外加电源设备或机械控制(无调 Q 功耗)、价格低廉、易实现器件的小型化等优点,因

而在很多领域获得广泛应用。

被动调 Q 激光器中,染料调 Q 由于染料的化学稳定性差,输出不稳定,并且受染料低热导率的限制,重复频率不高。色心氟化锂( $\text{F}_2^-:\text{LiF}$ )则有随时间褪色(退化现象)的缺点,因而应用也受到限制。

20 世纪 90 年代以来,以掺四价铬的钇铝石榴石晶体( $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ )为代表的掺  $\text{Cr}^{4+}$  离子晶体用作被动 Q 开关开始受到关注。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  在  $0.9\sim 1.2\ \mu\text{m}$  具有宽的吸收带和良好的可饱和吸收特性,特别适合作  $1.06\ \mu\text{m}$  Nd 激光器的被动 Q 开关。与染料及色心  $\text{F}_2^-:\text{LiF}$  晶体相比, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  具有热

收稿日期:2002-09-02

基金项目:国防科技重点实验室基金(51456050103JW0103)资助课题。

作者简介:杨成伟(1977—),男,清华大学电子工程系博士研究生,主要从事全固态激光器及激光测距方面的研究。E-

mail:ycw99@sem.tsinghua.edu.cn

万方数据

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、使用方便、寿命长、易实现高功率输出和高脉冲重复频率等优点,是一种理想的被动 Q 开关材料。并且  $\text{Cr}^{4+}$  离子可以和  $\text{Nd}^{3+}$  离子掺杂在同一基质晶体内,构成自调 Q 激光器,使器件更加小型化<sup>[1~4]</sup>。

本文从实验方面对 LD 抽运  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q 激光器的性能进行了比较全面的研究,对  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q 的理论研究见文献<sup>[1]</sup>。

## 2 实验装置

实验用 LD 纵向同轴抽运  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体得到 1064 nm 近红外激光,用  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体作饱和吸收体进行被动调 Q,获得脉冲激光。激光器的实验装置如图 1 所示。其中,用连续输出功率为 1 W,波长为 808.5 nm 的 LD 作为抽运光源,它的发光面积为  $100\ \mu\text{m}\times 1\ \mu\text{m}$ ;用  $3\ \text{mm}\times 3\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$ ,浓度为 3 at.-% 的  $a$  轴向切割的  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  晶体作激光工作介质。其通光面为平行平面,它的一个通光面镀对

808.5 nm 抽运光高透射 ( $T > 95\%$ )、对 1064 nm 光高反射 ( $R > 99.8\%$ ) 的反射膜。 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  的另一个通光表面和  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  的两个通光表面上镀有对 1064 nm 光的增透膜(剩余反射率  $R < 0.5\%$ );用焦距为 3 mm 的非球面透镜把 LD 的光束聚焦到激光晶体内部,LD 的光有 70% 被耦合到激光晶体内部;采用平凹激光稳定谐振腔,其平面反射镜为镀制在激光晶体上的反射镜,凹面反射镜为曲率半径为 10 cm 的介质膜反射镜,它对 1064 nm 光高反射,反射率为  $R = 95\%$ 。如图 1 所示,激光器腔长为  $l$ , $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体与输入反射镜的距离为  $d$ 。用 HH 型高稳定 LD 驱动器为 LD 提供稳定度优于 1 mA 的工作电流,并对激光器进行精度优于  $0.1\text{ }^\circ\text{C}$  的温度控制。实验使用 LP-3A 型激光功率计测量输出功率;使用 PIN 光电二极管对输出脉冲探测,并在示波器(Agilent 54622A)上显示脉冲波形。

实验中采用两块  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体对激光器性能进行了研究,一块的初始透过率为 77.7%,厚度为 0.5 mm;另一块的初始透过率为 93.6%,厚度为 1 mm。两块  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体的直径都为 1 cm。

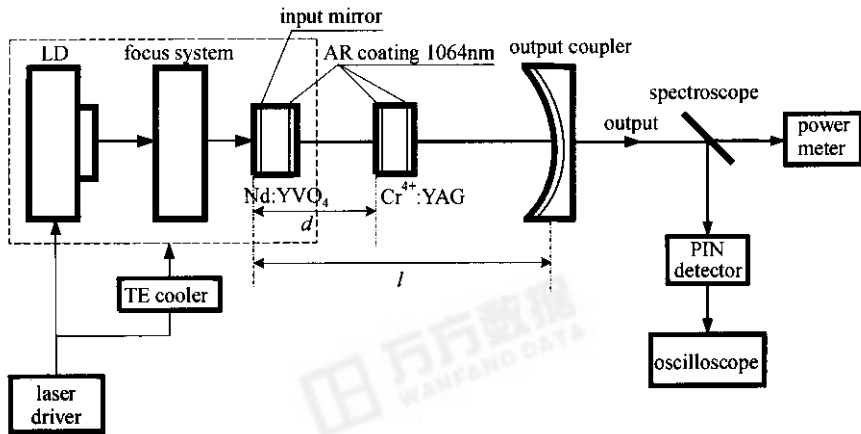


图 1 LD 抽运  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q 激光器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LD pumped  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  passively Q-switched laser

## 3 实验结果及分析

### 3.1 连续激光输出

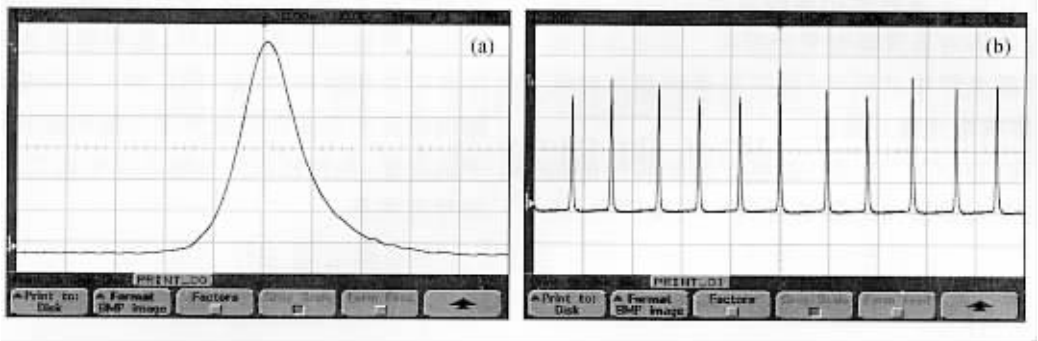
激光谐振腔中未放入可饱和吸收体  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ ,可获得 1064 nm 的连续激光输出。输出反射镜反射率为 95%,谐振腔长度  $l = 1\ \text{cm}$ 。在 1 W 的 LD 抽运功率下,获得 250 mW 的连续激光输出。

### 3.2 饱和吸收体的初始透过率对脉冲激光输出的影响

在激光腔中加入饱和吸收体  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体

后,对激光腔进行调整,获得脉冲激光输出。输出反射镜反射率为 95%, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体初始透过率为 93.6%;饱和吸收体与全反镜距离  $d = 6\ \text{mm}$ 。激光腔长  $l = 1\ \text{cm}$ 。抽运功率 1 W,获得重复频率 540 kHz 的脉冲激光输出,脉冲宽度 67 ns,平均输出功率为 64 mW。图 2 为示波器观察到的激光脉冲波形。

由图 2 可以看出,激光器的输出并不是很稳定,激光脉冲的重复频率和峰值功率都有一定的波动,这是由被动调 Q 的机理所决定的。另外,外界干扰也会造成激光脉冲输出的不稳定。

图 2  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q 激光脉冲波形

(a) 单脉冲波形; (b) 脉冲序列波形

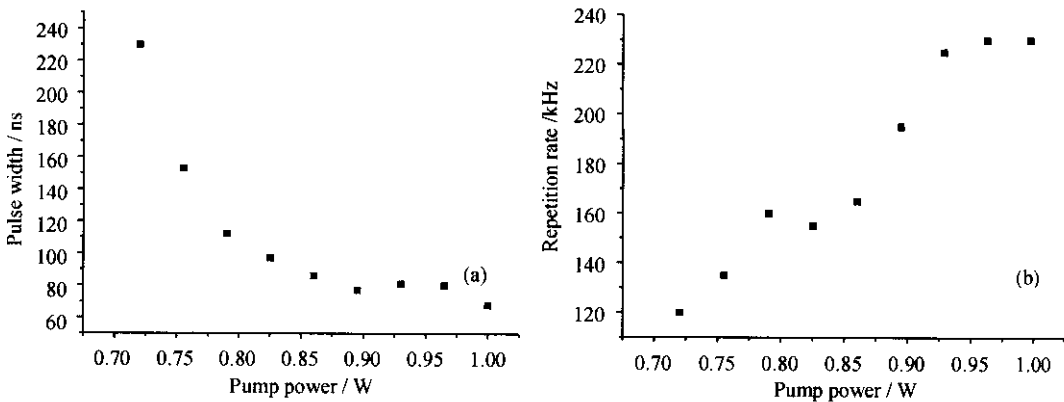
Fig. 2 Oscilloscope traces of laser pulse passively Q-switched by  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ (a) single pulse shape (50 ns/div); (b) pulse trains (2  $\mu\text{s}/\text{div}$ )

图 3 (a) 脉冲宽度与抽运功率的对应关系; (b) 重复频率与抽运功率的对应关系

Fig. 3 (a) Relation of pulse width vs pump power; (b) Relation of repetition rate vs pump power

保持 1 W 的抽运功率不变, 改变  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体初始透过率为 77.7%, 获得激光脉冲宽度为 18 ns, 重复频率为 3 kHz。

降低饱和吸收体的初始透过率, 激光输出脉冲宽度变窄, 重复频率降低。这是因为, 饱和吸收体的初始透过率降低后, 腔内插入损耗变大, 激光阈值也相应变大, 在同样的抽运条件下, 反转粒子数达到阈值需要更长的时间, 两次漂白可饱和吸收体的时间间隔增大了, 因而激光输出的重复频率降低。另外, 激光阈值的增高, 使激光晶体上能级积累的反转粒子数密度增大, 脉冲的建立和熄灭过程所需要的时间就会变短, 因而能获得更窄的脉冲输出。

### 3.3 抽运功率对脉冲激光输出的影响

实验还研究了 LD 抽运功率对输出激光脉冲宽度和重复频率的影响。实验条件如下: 输出反射镜反射率为 95%,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体初始透过率为 77.7%, 激光腔长度  $l = 1$  cm,  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体与全反镜的距离  $l = 60$  mm。图 3 为实验获得的输出脉

冲宽度、重复频率与抽运功率的对应关系。

由图 3 可以看出, 随着抽运功率的提高, 输出激光脉冲宽度变窄, 重复频率提高 (个别数据不太符合, 是由于被动调 Q 输出不够稳定造成的)。这是因为, 当抽运功率增加时, 激光晶体上能级粒子数集聚的速度增加, 反转粒子数密度增大, 腔内静增益系数变大, 增益达到阈值所用的时间缩短, 因此两次漂白可饱和吸收体的时间间隔缩小了, 缩短了调 Q 周期, 提高了调 Q 脉冲的重复频率。另外, 由于腔内静增益系数变大, 腔内光子数的增长及反转粒子数的衰减就变得更迅速, 因此脉冲的建立及熄灭过程就更短, 脉冲宽度变窄<sup>[5]</sup>。利用初始透过率为 93.6% 的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体进行实验, 也获得了相似的结果。

### 3.4 饱和吸收体的位置对脉冲激光输出的影响

由于饱和吸收体  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体的漂白是通过激光晶体的放大的自发辐射造成的, 而激光晶体的自发辐射具有一定的发散角, 这会造成在激光腔

中不同位置处自发辐射光功率的面密度不同,从而影响饱和和吸收体对自发辐射光的吸收。因此改变饱和和吸收体在激光腔中的位置,会使晶体的漂白时间改变,从而影响激光脉冲输出。

因此,我们对  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体在激光腔中的位置的改变对激光器输出的影响进行了实验研究。实

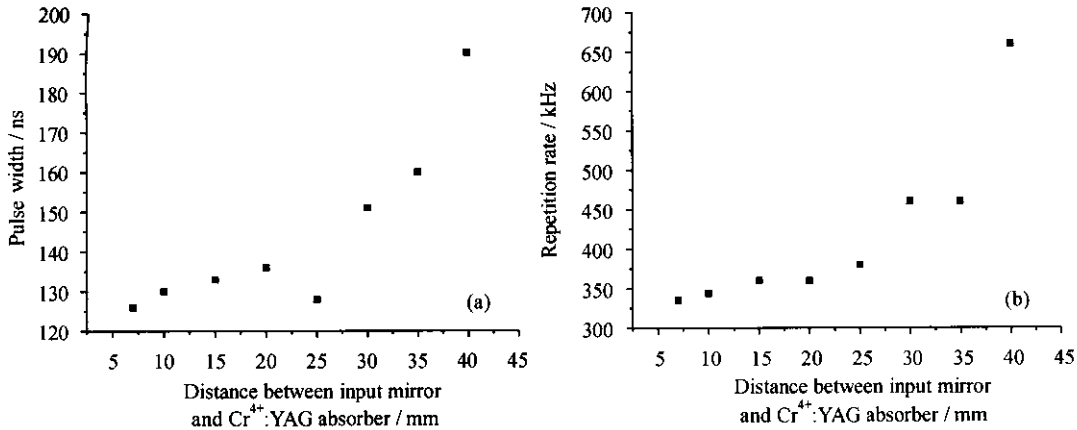


图 4 (a) 脉冲宽度与饱和吸收体位置的对应关系;(b) 重复频率与饱和吸收体位置的对应关系

Fig. 4 (a) Relation of pulse width vs the position of absorber; (b) Relation of repetition rate vs the position of absorber

由图 4 可以看出,改变  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体在激光腔中的位置,能够引起激光脉冲输出的改变。 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体距离激光晶体越远,激光脉冲宽度越宽,重复频率越高(个别数据由于被动调 Q 输出的不稳定而不太符合)。

脉冲变宽是由于饱和吸收体离激光晶体越远,自发辐射光功率面密度越小,对自发辐射吸收的减少,使饱和吸收体饱和变慢,因而脉冲建立的时间变长,脉宽变宽。重复频率升高是由于饱和吸收体离激光晶体越远,饱和越慢,受上能级粒子数弛豫的影响,输出激光的单脉冲能量减小(实验证明也是如此),当激光器产生一个脉冲后,为下一个脉冲的产生所需要积蓄的能量减少,积蓄时间变短,所以脉冲时间间隔缩短,重复频率提高。

## 4 结 论

对 LD 抽运的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q Nd:YVO<sub>4</sub> 全固态激光器进行的实验研究,获得了以下结果:降低饱和吸收体的初始透过率,激光输出脉冲宽度变窄,重复频率降低;提高 LD 抽运功率,激光输出脉冲宽度变窄,重复频率提高;在激光腔中, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体距离激光晶体越远,激光脉冲宽度越宽,重复频率越高数据

验条件如下:抽运功率为 1 W,激光腔长为 5 cm。输出反射镜反射率为 95%,饱和吸收体  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体初始透过率为 93.6%。图 4 为实验测得的激光输出的脉冲宽度和重复频率与饱和吸收体在激光腔中的位置(饱和吸收体与输入反射镜之间的距离  $d$ )的对应关系。

另外,由实验结果可以看到, $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q 激光器虽然具有结构简单、重量轻、体积小、易实现器件小型化和具有高的转换效率及脉冲重复频率等优点,但是无法控制脉冲产生时刻、重复频率和峰值功率,因而在一些应用中受到限制。针对上述缺点,研制出可主动控制的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q 激光器,在激光测距、激光雷达等领域将有很广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- Xingyu Zhang, Shengzhi Zhao, Qingpu Wang *et al.*. Optimization of  $\text{Cr}^{4+}$ -doped saturable-absorber Q-switched lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(12):2286~2294
  - A. Agnesi, S. Dell'Acqua, C. Morello *et al.*. Diode-pumped neodymium lasers repetitively Q-switched by  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  solid-state saturable absorbers [J]. *IEEE J. Sel. Top. in Quantum Electron.*, 1997, **3**(1):45~52
  - Shiqun Li, Shouhuan Zhou, Pei Wang *et al.*. Self-Q-switched diode-end-pumped Cr, Nd:YAG laser with polarized output [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(3):203~204
  - Z. Hong, H. Zheng, J. Chen *et al.*. Laser-diode-pumped  $\text{Cr}^{4+}, \text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  self-Q-switched laser with high repetition rate and high stability [J]. *Appl. Phys. B*, 2001, **73**:205~207
  - Wang Mingwei, Xing Qirong, Wang Qingyue *et al.*. Experimental study on a CW Nd:YAG laser Q-switched by  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  absorber [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(10):872~876
- 王明伟,邢岐荣,王清月等. CW Nd:YAG 激光器中  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q 的实验研究[J]. 中国激光, 1998, **A25**(10):872~876