

文章编号: 0258-7025(2004)10-1153-04

# 激光二极管抽运的被动调 Q Nd:GdVO<sub>4</sub>激光器

李宇飞, 侯学元, 孙渝明, 潘 雷

(山东大学信息学院光学系, 山东 济南 250100)

**摘要** 利用激光二极管作为抽运源, 分别用 Cr<sup>4+</sup>:YAG, GaAs 和染料片作为饱和吸收体, 研究了 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器的被动调 Q 特性。Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体尺寸为 4 mm×4 mm×6 mm, 掺 Nd 浓度为 1%。利用小信号透过率分别为 91% 和 95% 的 Cr<sup>4+</sup>:YAG, 调 Q 的阈值分别为 0.63 W 和 0.57 W; 在抽运功率为 3.69 W 时, 分别得到了脉宽为 64 ns, 80 ns, 脉冲能量为 3.66 μJ, 3.41 μJ, 重复率为 325 kHz, 378 kHz 的稳定调 Q 脉冲。利用 580 μm 厚的 GaAs 调 Q 的阈值为 0.39 W, 在抽运功率为 3.69 W 时, 得到了脉宽为 7.8 ns, 脉冲能量为 2.15 μJ, 重复率为 366 kHz 的稳定调 Q 脉冲。利用初始透过率为 70% 的染料片调 Q 获得的脉冲最窄, 但是其插入损耗大, 抽运阈值高, 输出也不稳定。

**关键词** 激光技术; Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器; 激光二极管抽运; 被动调 Q; Cr<sup>4+</sup>:YAG, GaAs; 染料片

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## Laser-Diode Pumped Passively Q-Switched Nd:GdVO<sub>4</sub> Laser

LI Yu-fei, HOU Xue-yuan, SUN Yu-ming, PAN Lei

(Optics Department of Shandong University, Ji'nan, Shandong 250100, China)

**Abstract** Passively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> laser performance was investigated by using laser-diode as pump source, and Cr<sup>4+</sup>:YAG (Cr<sup>4+</sup>:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>), GaAs and dye as saturable absorber, respectively. The laser crystal sample of 4 mm×4 mm×6 mm with 1% Nd concentration was used. For Cr:YAG with small signal transmission 91% and 95%, the thresholds were 0.63 W and 0.57 W, respectively. At the pump power of 3.69 W, stable laser pulses with 64 ns and 80 ns pulse duration, 3.66 μJ and 3.41 μJ pulse energy, 325 kHz and 378 kHz pulse repetition rate were generated with the two Cr:YAG saturable absorbers, respectively. The threshold for a 580 μm GaAs wafer was 0.39 W. At the pump power of 3.69 W, stable laser pulses with 7.8 ns pulse duration, 2.15 μJ energy and 366 kHz pulse repetition rate were produced with GaAs saturable absorber. The narrowest Q-switched laser pulse could be obtained with a dye wafer with 70% initial transmission. But because of its high insert loss, the threshold was high and the output was not stable.

**Key words** laser technique; Nd:GdVO<sub>4</sub> laser; LD pump; passive Q-switch; Cr<sup>4+</sup>:YAG, GaAs; dye wafer

## 1 引 言

激光二极管(LD)抽运的被动调 Q 全固态激光器是产生纳秒、亚纳秒范围内脉冲激光的理想光源, 可以被广泛地应用于激光雷达、测距、遥感、非线性光学处理和材料加工等领域, 具有广阔的应用前景<sup>[1~3]</sup>。Nd:GdVO<sub>4</sub> 是一种适合 LD 抽运的新型激光晶体, 它对 808 nm 的抽运光有高的吸收系数, 在

1.06 μm 处有大的发射截面, 其最大的优点是热导率高, 沿〈110〉方向的热导率高达 11.7 W/(m·K), 可以与 Nd:YAG 晶体相媲美, 几乎比 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体热导率高两倍<sup>[4]</sup>。因此 Nd:GdVO<sub>4</sub> 是一种很有应用价值的激光晶体, 一些文献报道了 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的激光性能, 如基频连续<sup>[4,5]</sup>, 基频声光调 Q<sup>[4]</sup>, 倍频连续<sup>[6,7]</sup>, 倍频声光调 Q<sup>[4,8]</sup> 以及氙灯抽运的 Nd

收稿日期: 2003-06-23; 收到修改稿日期: 2003-09-05

作者简介: 李宇飞(1957—), 男, 山东乐陵人, 山东大学信息学院光学系高级工程师, 主要从事激光技术方面的研究工作。

E-mail: yufeili@sdu.edu.cn

:GdVO<sub>4</sub>晶体的脉冲激光性能<sup>[9]</sup>等。但对 LD 抽运的 Nd:GdVO<sub>4</sub>晶体的被动调 Q 激光性能,研究得较少。Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体有大的吸收截面,低的饱和强度,适当的激发态寿命,高的热导率和抗光伤阈值,是一种被广泛使用的理想被动调 Q 晶体。半导体材料 GaAs 有高的热导率和化学稳定性,并且有明显的光学非线性特性,也是一种优良的调 Q 材料,近几年来已经引起了人们的广泛关注<sup>[10~12]</sup>。本文分别利用 Cr<sup>4+</sup>:YAG, GaAs 和染料片,研究了 LD 抽运的被动调 Q Nd:GdVO<sub>4</sub>激光器,并对三者的调 Q 激光输出特性进行了分析比较。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示。谐振腔采用平-凹腔,腔长约 80 mm。凹镜 M<sub>1</sub> 靠近抽运端的一面镀 808 nm 增透膜,靠近 Nd:GdVO<sub>4</sub>晶体的一面镀 808 nm 增透膜和 1.06 μm 全反膜。平面镜 M<sub>2</sub> 为对 1.06 μm 部分透过的输出镜。激光晶体 Nd:GdVO<sub>4</sub> [w(Nd) = 1%] 尺寸为 4 mm × 4 mm × 6 mm,两通光面镀 1.06 μm 增透膜。晶体侧面用铝箔包裹置于紫铜块内,并用半导体致冷器冷却控温。抽运源为光纤束耦合输出的大功率半导体激光器系统,输出激光中心波长在 22℃ 时为 807.5 nm,数值孔径 NA = 0.22,光纤输出光束经聚焦系统后的抽运光斑半径约为 0.44 mm。调 Q 片分别为 Cr<sup>4+</sup>:YAG, GaAs 和染料片,实验中紧靠 M<sub>2</sub> 放置。两片 Cr<sup>4+</sup>:YAG 小信号透过率分别为 T<sub>0</sub> = 91% 和 T<sub>0</sub> = 95%, GaAs 样品厚度为 580 μm,双面镀 1.06 μm 增透膜,染料片初始透过率为 70%。输出的激光能量和激光脉冲波形分别用 LPE-1B 型功率计(中国科学院物理所提供)和 TDS620B 数字示波器(美国 Tectronix 公司提供)测量。

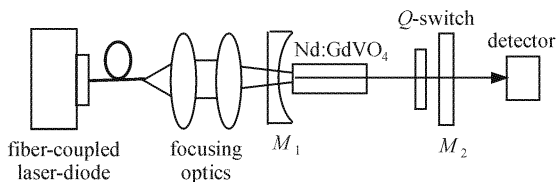


图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

## 3 实验结果及分析

实验中在输出镜透过率  $T = 25\%$  的条件下,对 Cr<sup>4+</sup>:YAG 和 GaAs 调 Q 激光的平均输出功率

$P_{av}$ , 重复率  $F$  和调 Q 脉冲波形进行了测量。由于染料片调 Q 激光输出功率太小,仅对其抽运阈值和脉冲波形进行了测量。图 2 给出了平均输出功率随抽运功率的变化关系。从图中可以看出,平均输出功率随抽运功率成线性增加,相同抽运功率下, Cr<sup>4+</sup>:YAG 调 Q 激光的平均输出功率要高于 GaAs 调 Q 激光的平均输出功率。T<sub>0</sub> 为 91%, 95% 的 Cr<sup>4+</sup>:YAG, GaAs 和染料片调 Q 对应的抽运阈值分别为 0.63 W, 0.57 W, 0.39 W 和 1.62 W。当抽运功率为 3.69 W 时, T<sub>0</sub> 为 91%, 95% 的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 和 GaAs 调 Q 对应的最高平均输出功率分别为 1.12 W, 1.23 W 和 0.58 W, 相应的光-光转换效率分别

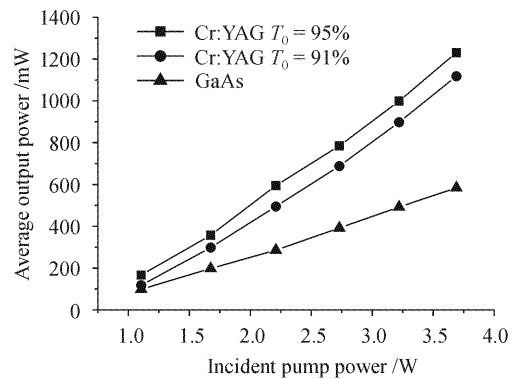


图 2 平均输出功率随抽运功率的变化

Fig. 2 Average output power versus pump power

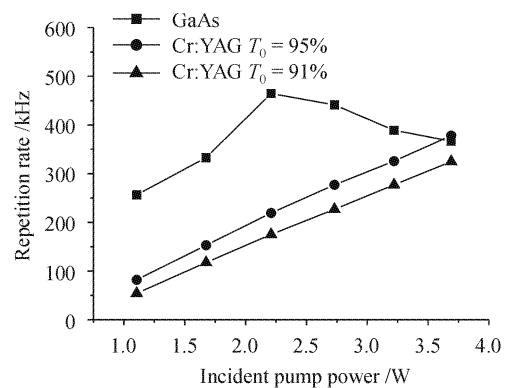


图 3 重复率随抽运功率的变化关系

Fig. 3 Repetition rate versus pump power

为 30.3%, 33.3% 和 15.8%。图 3 给出了重复率随抽运功率的变化关系。从图中可以看出,在现有抽运功率水平下, Cr<sup>4+</sup>:YAG 调 Q 的重复率比 GaAs 调 Q 的重复率要低,但随抽运功率却一直成线性增加。GaAs 调 Q 的重复率开始时随抽运功率的增加而增加,在 2.47 W 时达到最大值 513 kHz,然而继续提高抽运功率,脉冲重复率却出现了下降,这种随

抽运功率的提高重复率下降的现象与传统的其他被动调 Q 开关不同, 该现象在 GaAs 被动调 Q Nd:YAG 激光器和 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器中同样存在<sup>[10~12]</sup>, 其详细的理论机制尚待研究。不过认为 GaAs 材料的热效应可能是导致这一现象的主要原因<sup>[13]</sup>, 随着抽运功率的提高, GaAs 材料的热效应越来越显著, 导致 GaAs 可饱和吸收特性发生变化, 引起弱光透过率减小, 结果表现为脉冲重复率降低。另外可能的原因是随着腔内光强的增加, GaAs 中双光子吸收和自由载流子吸收使脉冲重复率下降。

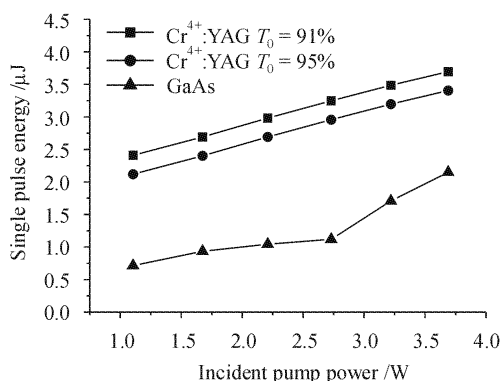


图 4 单脉冲能量随抽运功率的变化关系

Fig. 4 Single pulse energy versus pump power

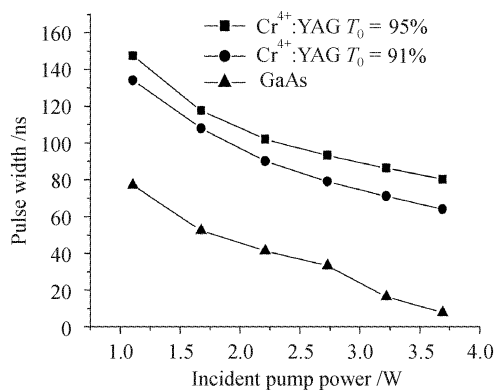


图 5 脉冲宽度随抽运功率的变化关系

Fig. 5 Pulse width versus pump power

图 4 给出了单脉冲能量随抽运功率的变化。可以看出在相同的抽运功率下, Cr<sup>4+</sup>:YAG 调 Q 的单脉冲能量较高且一直成线性增加。GaAs 调 Q 的脉冲能量在抽运功率达到一定强度后迅速增大, 这与传统的可饱和调 Q 结果不同, 但却与上面得到的脉冲重复率随抽运功率的提高而降低的实验结果是一致的。图 5 给出了脉冲宽度随抽运功率的变化关系。从图中可以看出, 在相同的抽运功率下, GaAs

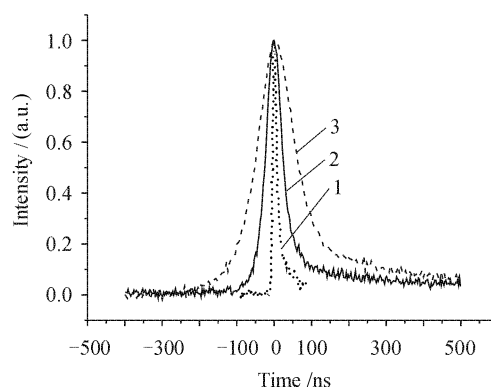


图 6 抽运功率 1.95 W 时三种调 Q 片的波形

(1: 染料片, 宽度 13 ns; 2: GaAs, 宽度 54 ns;  
3: T<sub>0</sub> = 91% Cr<sup>4+</sup>:YAG, 宽度 120 ns)

Fig. 6 Pulse profiles for the three Q-switch wafers at the pump power of 1.95 W

(1: dye, 13 ns width; 2: GaAs, 54 ns width;  
3: T<sub>0</sub> = 91% Cr<sup>4+</sup>:YAG, 120 ns width)

调 Q 的脉冲宽度要比 Cr<sup>4+</sup>:YAG 调 Q 的脉冲宽度窄许多。在抽运功率为 3.69 W 时, T<sub>0</sub> 为 91%, 95% 的 Cr<sup>4+</sup>:YAG, GaAs 分别得到了最短脉宽 64 ns, 80 ns 和 7.8 ns。图 6 给出了在抽运功率为 1.95 W 时, T<sub>0</sub> 为 91% 的 Cr<sup>4+</sup>:YAG, GaAs 和染料片调 Q 的波形。图 6 表明, 相同的抽运功率下, 染料片调 Q 的脉宽最窄, 但其对称性不如 GaAs 和 Cr<sup>4+</sup>:YAG 调 Q 的波形好, 且在实验中输出不稳定。

## 4 结 论

研究了 LD 抽运的利用 Cr<sup>4+</sup>:YAG, GaAs 和染料片被动调 Q Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器的激光输出特性, 并对三种调 Q 方式下的激光输出特性进行了比较。在抽运功率为 3.69 W 时, 利用小信号透过率为 91% 和 95% 的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 分别得到了脉宽为 64 ns, 80 ns, 脉冲能量为 3.66 μJ, 3.41 μJ, 重复率为 325 kHz, 378 kHz 的稳定调 Q 脉冲; 利用 GaAs 得到了脉宽为 7.8 ns, 脉冲能量为 2.15 μJ, 重复率为 366 kHz 的稳定调 Q 脉冲。研究表明, 采用 GaAs 被动调 Q, 其抽运阈值低, 脉冲宽度窄, 脉冲重复率高, 但其脉冲重复率与抽运功率不是线性关系, 因而适合于 LD 抽运小功率 Nd:GdVO<sub>4</sub> 准连续器件。中功率器件可采用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q, 另外其抽运阈值要高一些, 脉冲宽度较 GaAs 宽, 但其平均输出功率、脉冲重复率及单脉冲性能均随抽运功率成线性关系。染料片调 Q 尽管可获得较短脉冲宽度, 但

因其插入损耗大,抽运阈值高,不适合在准连续激光器件中应用。

### 参 考 文 献

- 1 Chen Weibiao, Nobuo Takkeuchi. Diode pumped,  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG passively Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5):385~388  
陈卫标, Nobuo Takkeuchi. LD抽运的 $\text{Cr}^{4+}$ :YAG被动调Q Nd:YAG激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5):385~388
- 2 Du Chenlin, Liu Junhai, Wang Zhengping *et al.*. LD-pumped acousto-optic Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser with high repetition rates and short pulse width [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):489~491  
杜晨林,刘均海,王正平等. LD抽运声光调Q高重复频率短脉宽Nd:YVO<sub>4</sub>激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6):489~491
- 3 Du Chenlin, Qin Lianjie, Meng Xianlin *et al.*. Study of high-power continuous-wave 1.34  $\mu\text{m}$  Nd:GdVO<sub>4</sub> laser end-pumped by laser-diode array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):681~683  
杜晨林,秦连杰,孟宪林等. LD抽运高功率连续波1.34  $\mu\text{m}$  Nd:GdVO<sub>4</sub>激光器研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):681~683
- 4 J. H. Liu, Z. S. Shao, X. L. Meng *et al.*. High-power CW Nd:GdVO<sub>4</sub> solid-state laser end-pumped by a diode-laser-array [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **164**:199~202
- 5 H. J. Zhang, J. H. Liu, J. Y. Wang *et al.*. Characterization of the laser crystal Nd:GdVO<sub>4</sub> [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(1):18~27
- 6 Yin Zhao, Shen Deyuan, Ueda Ken-Ichi. A laser-diode pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10):1374~1377  
尹 召,沈德元,值田宪一. 激光二极管抽运的Nd:GdVO<sub>4</sub>激光器[J]. *光学学报*, 2000, **20**(10):1374~1377
- 7 J. H. Liu, Z. S. Shao, H. J. Zhang *et al.*. Diode-laser-array end-pumped intracavity frequency-doubled 3.6 W CW Nd:GdVO<sub>4</sub>/KTP green laser [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **173**:311~314
- 8 J. H. Liu, C. L. Du, Z. P. Wang *et al.*. Diode-pumped Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> green laser formed with a flat-flat resonator [J]. *Optics & Laser Technol.*, 2001, **33**:177~180
- 9 Pan Lei, Hou Xueyuan, Li Yufei *et al.*. Performance of xenon-lamp pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> pulse laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(3):262~264  
潘 雷,侯学元,李宇飞等. 氙灯抽运Nd:GdVO<sub>4</sub>晶体的脉冲激光性能[J]. *中国激光*, 2004, **31**(3):262~264
- 10 T. T. Kajava, A. L. Gaeta. Q-switching of a diode-pumped Nd:YAG laser with GaAs [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(16):1244~1246
- 11 Li Ping, Wang Qingpu, Zhang Xingyu *et al.*. Study of laser-diode pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser with GaAs saturable absorber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3):298~302  
李 平,王青圃,张行愚等. 激光二极管抽运的Nd:YVO<sub>4</sub> GaAs被动调Q激光器研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3):298~302
- 12 Li Ping, Wang Qingpu, Li Shichen *et al.*. Multi-watt Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser with GaAs output coupler [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(1):31~33
- 13 M. O. Manasreh, W. C. Mitchel, D. W. Fischer. Observation of the second energy level of the EL2 defect in GaAs by the infrared absorption technique [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(9):864~866

\*\*\*\*\*

## 本 刊 增 页 启 事

为了缩短论文发表周期,经上级批准,从2005年第1期起,本刊将从128页增至144页。欢迎专家学者踊跃投稿。

中国激光编辑部

2004年10月