

文章编号: 0258-7025(2005)05-0597-04

# $V^{3+}$ :YAG 被动调 Q 1.319 $\mu\text{m}$ 全固态激光器

薛庆华, 郑 权, 卜铁坤, 钱龙生

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要**  $V^{3+}$ :YAG 是一种新型的饱和吸收体, 利用激光二极管(LD)抽运激光工作物质 Nd:YAG,  $V^{3+}$ :YAG 被动调 Q, 成功地实现了 1.319  $\mu\text{m}$  全固态激光器的脉冲运转。在 1.6 W 的抽运功率条件下, 使用小信号透过率为 89% 和 96% 的  $V^{3+}$ :YAG 时, 分别获得平均输出功率 93 mW 和 192 mW, 最小脉冲宽度(FWHM)7.9 ns 和 9.2 ns, 重复频率 8.4 kHz 和 27.8 kHz, 峰值功率大于 1.4 kW 和 750 W, 脉冲能量 11  $\mu\text{J}$  和 6.9  $\mu\text{J}$  的 1.319  $\mu\text{m}$  脉冲激光输出, 利用示波器的统计功能, 测量了脉冲能量和重复频率的稳定度, 结果表明 4 h 稳定度均优于 5%。

**关键词** 激光技术; 饱和吸收体;  $V^{3+}$ :YAG 晶体; 被动调 Q; 全固态激光器

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A

## Diode-Pumped Passively Q-Switched Nd:YAG 1.319 $\mu\text{m}$ Lasers with a $V^{3+}$ :YAG Crystal

XUE Qing-hua, ZHENG Quan, BU Yi-kun, QIAN Long-sheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract**  $V^{3+}$ :YAG is a new type of saturable absorber. LD-pumped Nd:YAG lasers passively Q-switched at 1.319  $\mu\text{m}$  with a  $V^{3+}$ :YAG were reported. When the pump power was 1.6 W, the results of average output power of 93 mW and 192 mW, minimum pulse width (FWHM) of 7.9 ns and 9.2 ns, pulse repetition rate of 8.4 and 27.8 kHz, peak power of greater than 1.4 kW and 750 W, pulse energy of 11  $\mu\text{J}$  and 6.9  $\mu\text{J}$  were obtained for the small signal transmission of 89% and 96%, respectively. The stability of pulse energy and repetition rate was measured by the statistic function of the oscillograph. The results showed that the stability was better than 5% for 4 h.

**Key words** laser technique; saturable absorber;  $V^{3+}$ :YAG crystal; passively Q-switched; all-solid-state laser

## 1 引 言

脉冲宽度为纳秒级的 1.3  $\mu\text{m}$  波段激光在非线性光学研究、光通信第二窗口装置检测、光纤传感、激光雷达、医疗等方面有着广泛的应用前景<sup>[1,2]</sup>, 利用被动调 Q 是实现这一要求的简单、高效、低成本的实用方法<sup>[2]</sup>。

使用广泛的被动调 Q 晶体 Cr:YAG 饱和吸收波长范围为 0.8~1.2  $\mu\text{m}$ <sup>[3~5]</sup>, 但它不适合 1.3  $\mu\text{m}$  波段调 Q。近年来, 半导体材料的饱和吸收镜 (SESAMs)<sup>[6]</sup> 和量子点 PbS<sup>[1]</sup> 在 1.3  $\mu\text{m}$  波段的调 Q 得到了发展, 但前者存在着损耗较大、损伤阈值较低的缺点, 而后者还处于发展阶段。

新型的晶体材料  $V^{3+}$ :YAG 饱和吸收波段宽 (0.75~1.44  $\mu\text{m}$ ), 基态吸收截面大, 激发态吸收损耗小, 恢复时间短, 饱和能量密度低, 损伤阈值高, 是一种综合性能优良、有着广泛应用前景的被动调 Q 元件<sup>[2,7~10]</sup>。A. M. Malyarevich 等<sup>[2]</sup> 首次将其引入到激光二极管抽运全固态激光器中, 以 Nd:YVO<sub>4</sub> 为工作物质, 获得了平均功率约 27 mW, 脉宽为 9.3 ns, 单脉冲能量 3.26  $\mu\text{J}$  的 1.342  $\mu\text{m}$  调 Q 脉冲输出; V. P. Mikhailov 等<sup>[8]</sup> 的早期研究表明:  $V^{3+}$ :YAG 可有效地实现激光器调 Q 和锁模运转; A. Agnesi 等<sup>[9]</sup> 通过合理的腔型设计, 实现了亚纳秒 1.342  $\mu\text{m}$  锁模输出; 作为调 Q 波段的扩展, Jan.

收稿日期: 2004-05-27; 收到修改稿日期: 2004-09-67

作者简介: 薛庆华(1978—), 男, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 主要从事全固态激光器件及非线性频率变换技术。E-mail: xueqinghua1978@sina.com

K. Jabczynski 等<sup>[7]</sup>利用灯抽运 Cr:LiCAF, 实现了 0.78  $\mu\text{m}$  波长的调 Q 运转; 最近, A. V. Podlipensky 等<sup>[10]</sup>又实现了 Nd:YAG 1.44  $\mu\text{m}$  低增益激光谱线的调 Q 输出。

本文利用新型的晶体材料  $\text{V}^{3+}:\text{YAG}$  作为被动调 Q 元件, 以 Nd:YAG 为工作物质, 实现了 1.319  $\mu\text{m}$  激光的调 Q 运转。

## 2 $\text{V}^{3+}:\text{YAG}$ 调 Q 特性分析

$\text{V}^{3+}:\text{YAG}$  的线性吸收光谱如图 1 所示<sup>[2]</sup>, 可以看出光谱范围很宽, 大于 1000 nm, 在 425 nm, 600 nm, 800 nm, 1140 nm, 1320 nm 附近有 5 个吸收峰, 实验证明其在 0.75~1.44  $\mu\text{m}$  具有饱和吸收特性, 可在此波段作为被动调 Q 元件。它在 1.3  $\mu\text{m}$  处的基态吸收截面大<sup>[2]</sup>, 为  $\sigma_{\text{gsa}} = (7.2 \pm 2.6) \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ , 激发态吸收截面小<sup>[2]</sup>, 为  $\sigma_{\text{esa}} = (7.4 \pm 2.8) \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ , 两者比值为  $\beta = \sigma_{\text{esa}}/\sigma_{\text{gsa}} \approx 0.1$ , 即对应的激发态再吸收损耗小。它的恢复时间较短, 为  $22 \pm 6 \text{ ns}$ <sup>[2]</sup>, 合理设计腔型可获得调 Q 锁模运转<sup>[9]</sup>。 $\text{V}^{3+}:\text{YAG}$  在 1.3  $\mu\text{m}$  处的饱和能量密度  $E_{\text{sat}}$  低<sup>[2]</sup>, 小于  $0.05 \text{ J/cm}^2$ , 相应的饱和功率密度小于  $7 \text{ MW/cm}^2$ 。其损伤阈值高, 目前文献中还没有关于它损伤的相关报道。

工作物质 Nd:YAG 在 1.319  $\mu\text{m}$  处的激光受激发射截面小, 约为  $\sigma_{\text{em}} = 8.7 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ <sup>[11]</sup>, 这样  $\text{V}^{3+}:\text{YAG}$  的基态吸收截面与它的比值很大, 为  $\alpha = \sigma_{\text{gsa}}/\sigma_{\text{em}} \approx 80$ , 即能够很好地在激光建立之前先使被动调 Q 晶体饱和, 增加工作物质内的饱和能量, 结果使激光的输出能量和峰值功率增加, 利于调 Q 运转<sup>[12]</sup>, 因此 Nd:YAG/ $\text{V}^{3+}:\text{YAG}$  是一种很好的组合结构。

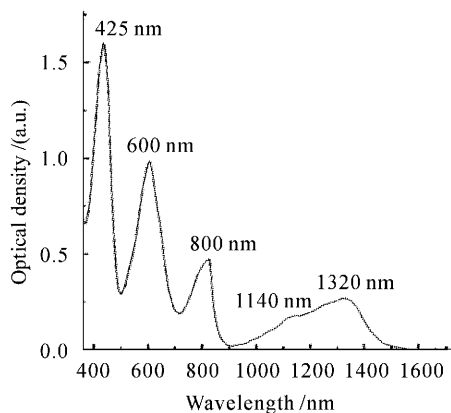


图 1  $\text{V}^{3+}:\text{YAG}$  的线性吸收谱

Fig. 1 Linear absorption spectrum of  $\text{V}^{3+}:\text{YAG}$

## 3 实验装置

实验装置如图 2 所示, 实验中使用最大输出功率为 2 W 的激光二极管作抽运源, 25  $^{\circ}\text{C}$  时的发射中心波长为 0.808  $\mu\text{m}$ , 发光面为  $1 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ , 发散全角为  $36^{\circ} \times 10^{\circ}$ 。抽运光经耦合效率为 90% 左右的光学系统准直聚焦后, 在工作物质 Nd:YAG 内的平均光斑半径为 80  $\mu\text{m}$ , 椭圆度约为 95%。Nd:YAG 的尺寸为  $\phi 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , 掺杂原子数分数为 1.0%, 实验测得其对抽运光的吸收大于 80%, Nd:YAG 的左端面镀 0.808  $\mu\text{m}$  减反膜(透过率大于 95%)和 1.319  $\mu\text{m}$  高反膜(反射率大于 99.9%)构成谐振腔的一个腔镜, 右端面镀 1.064  $\mu\text{m}$  和 1.319  $\mu\text{m}$  减反膜, 剩余反射率尽可能小(小于 0.1%), 以减小标准具带来的寄生振荡效应, 该面并未考虑对抽运光的反射; 输出镜的曲率半径为 50 mm, 凹面镀 1.064  $\mu\text{m}$  的减反膜和 1.319  $\mu\text{m}$  部分反射膜, 透过率分别为 99% 和 7%, 输出镜平面膜系要求与工作物质的右端面相同。由于脉冲宽度近似与腔的光程成正比, 因此腔的几何长度在机械允许的条件下应尽可能地短, 以获得短脉冲输出, 同时考虑到模式匹配腔的几何长度取 10 mm, 这时计算得到工作物质内的基模光斑半径为 90  $\mu\text{m}$ 。两块  $\text{V}^{3+}:\text{YAG}$  样品对 1.3  $\mu\text{m}$  波段小信号透过率  $T_0$  分别为 89% 和 96%, 表面镀 1.3  $\mu\text{m}$  附近的宽带减反膜, 为了减小抽运光的影响, 将其紧靠输出镜放置。

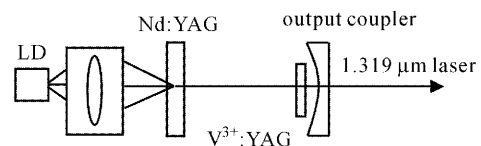


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

## 4 实验结果

不放入  $\text{V}^{3+}:\text{YAG}$ , 在 1.6 W 的抽运功率时, 获得 1.319  $\mu\text{m}$  的连续激光输出, 用 Coherent 公司的 LM-3 探头接 FieldMaster-GS 功率计, 滤去 0.808  $\mu\text{m}$  抽运光, 测量得到最大输出功率为 450 mW。

放入  $T_0 = 96\%$  的  $\text{V}^{3+}:\text{YAG}$  时, 仔细调节, 得到最大平均输出功率为 192 mW 的调 Q 脉冲输出。用重庆 44 所上升时间小于 1 ns 的 InGaAs 快速 PIN 光电二极管, 接瑞士 Lecroy 9361C 双通道 300 MHz 示波器, 测得脉冲宽度 (FWHM) 为 9.2 ns, 重复频率为 27.8 kHz, 峰值功率为 750 W。放入  $T_0 = 89\%$   $\text{V}^{3+}:\text{YAG}$  后, 得到平均输出功率 93 mW, 脉冲宽度

7.9 ns, 重复频率为 8.4 kHz, 峰值功率大于 1.4 kW 的脉冲输出, 典型的波形和脉冲序列如图 3, 图 4 所示。波形对称性很好, 利用示波器的统计功能测得脉冲能量和频率 4 h 稳定度优于 5%。

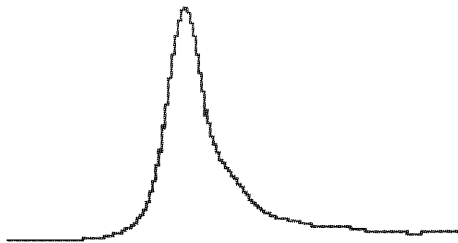


图 3 1.319 μm 激光脉冲形状  
Fig. 3 Pulse shape for 1.319 μm laser

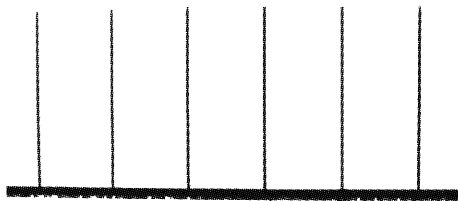


图 4 1.319 μm 激光脉冲序列  
Fig. 4 Oscilloscope traces of pulse for 1.319 μm laser

图 5~图 9 是 89% 和 96% 小信号透过率下调 Q 激光参量随抽运功率的变化关系。可以看出平均功率随抽运功率近似成线性关系, 激光阈值分别为 0.8 W 和 0.5 W, 斜率效率分别为 11.6% 和 17.5%; 脉冲宽度随抽运功率的增加而减小, T<sub>0</sub> = 96% 的 V<sup>3+</sup>:YAG 减小得更明显, 从激光阈值附近的 32 ns 减小到 1.6 W 抽运功率下的 9.2 ns, 在相同的抽运功率下, 由于 T<sub>0</sub> = 89% 的 V<sup>3+</sup>:YAG 调制深度较 96% 的大, 相应的脉冲宽度较 96% 的就要小; 重复频率与抽运功率 P 近似成线性关系<sup>[13]</sup>:  $f = P/P_{th}\tau$ , 其中 P<sub>th</sub> 为阈值抽运功率, τ = 230 μs 为 Nd:YAG 的荧光寿命; 峰值功率和单脉冲能量随抽运功率呈现出线性、阶梯增加的趋势

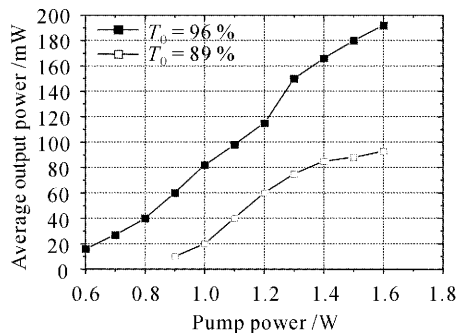


图 5 调 Q 平均输出功率与抽运功率的关系  
Fig. 5 Average output power versus pump power

势, 体现了 Nd:YAG/V<sup>3+</sup>:YAG 结构 1.319 μm 激光器的快速调 Q 性质 (α > 10) 和被动调 Q 的特性。

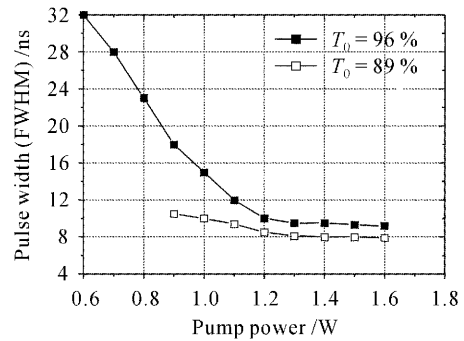


图 6 脉冲宽度与抽运功率的关系  
Fig. 6 Pulse width (FWHM) versus pump power

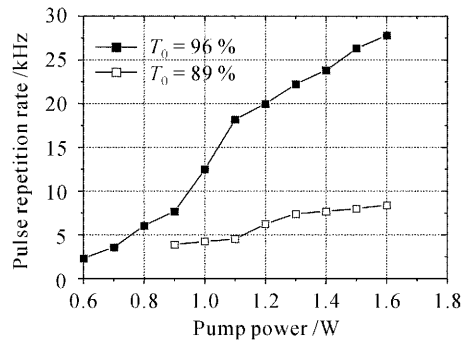


图 7 脉冲重复频率与抽运功率的关系  
Fig. 7 pulse repetition rate versus pump power

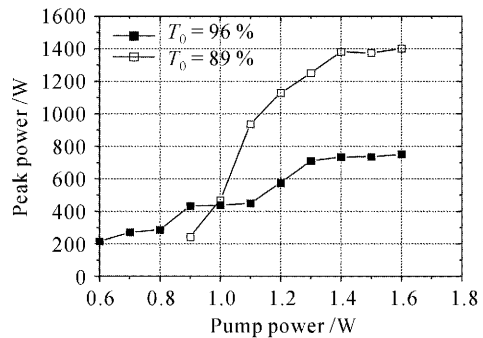


图 8 峰值功率与抽运功率的关系  
Fig. 8 Peak power versus pump power

图 9 中采用小信号透过率分别为 89% 和 96% 的 V<sup>3+</sup>:YAG, 前者单脉冲能量随抽运功率呈上升的变化趋势, 而后者基本上呈振荡变化, 可能是由于后者太薄, 仅 0.235 mm, 为前者的 1/2, 散热不好造成的。虽然腔内没有偏振元件, 但输出的 1.319 μm 脉冲激光有很强的偏振性, 与 Cr:YAG 调 Q Nd:YAG 激光器的 1.064 μm 输出十分相似, 这有利于非线性频率变换<sup>[14]</sup>。

另外, 从图中可以看出, 通过选择饱和吸收体

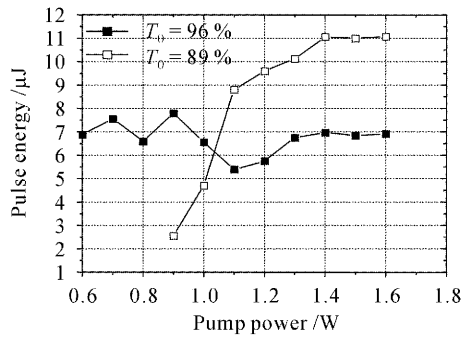


图 9 单脉冲能量与抽运功率的关系

Fig. 9 Single pulse energy versus pump power

$V^{3+}$ :YAG 的小信号透过率和抽运功率的大小,可以获得优化的各调 Q 参量激光输出,如果进一步调节输出镜的透过率,将会得到更多的优化脉冲参量结果。

## 5 结 论

利用新型饱和吸收体  $V^{3+}$ :YAG 被动调 Q,获得了激光二极管抽运 Nd:YAG 1.319  $\mu\text{m}$  全固态激光器的脉冲运转。在 1.6 W 的抽运功率条件下,使用小信号透过率为 89% 的  $V^{3+}$ :YAG,得到平均功率 93 mW,最小脉冲宽度小于 7.9 ns,峰值功率大于 1.4 kW,单脉冲能量 11  $\mu\text{J}$  的实验结果。进一步采用频率变换可获得红外、可见、紫外波段的激光输出。同时, $V^{3+}$ :YAG 可应用到其他波段的调 Q 获得巨脉冲激光输出。

## 参 考 文 献

- 1 V. G. Savitski, A. M. Malyarevich, K. V. Yumashev *et al.*. Diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 1.3  $\mu\text{m}$  lasers passively Q-switched with PbS-doped glass[J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **76**: 253~256

- 2 A. M. Malyarevich, I. A. Denisov, K. V. Yumashev *et al.*. V:YAG — a new passive Q-switch for diode-pumped solid-state lasers[J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **67**: 555~558
- 3 Y. Shimony, Z. Burshtein, Y. Kalisky. Cr<sup>4+</sup>:YAG as passive Q-switch and Brewster plate in a pulsed Nd:YAG laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(10): 1738~1741
- 4 Chen Wei-biao, Nobuo Takeuchi. Diode pumped, Cr<sup>4+</sup>:YAG passively Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5): 385~388  
陈卫标, Nobuo Takeuchi. LD 抽运的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5): 385~388
- 5 Ou Pan, Yan Ping, Gong Mali *et al.*. LD-pumped passively Q-switched Nd<sup>3+</sup>:YAG microchip laser and its stability[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12): 1465~1469  
欧攀, 闫平, 巩马理等. 激光二极管抽运的被动调 Q Nd<sup>3+</sup>:YAG 微晶片激光器及其稳定性[J]. *光学学报*, 2002, **22**(12): 1465~1469
- 6 R. Fluck, B. Braun, E. Gini *et al.*. Passively Q-switched 1.34- $\mu\text{m}$  Nd:YVO<sub>4</sub> microchip laser with semiconductor saturable-absorber mirrors[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 991~993
- 7 Jan K. Jabczynski, Waldemar Zendzian, Zygmunt Mierczyk *et al.*. Chromium-doped LiCAF laser passively Q switched with a V<sup>3+</sup>:YAG crystal [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(36): 6638~6645
- 8 V. P. Mikhailov, N. V. Kuleshov, N. I. Zhavoronkov *et al.*. Optical absorption and nonlinear transmission of tetrahedral V<sup>3+</sup> (d<sup>2</sup>) in yttrium aluminum garnet[J]. *Opt. Mater.*, 1993, **2**(4): 267~272
- 9 A. Agnesi, A. Guandalini, G. Reali *et al.*. Diode pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 1.34  $\mu\text{m}$  Q-switched and mode locked by a V<sup>3+</sup>:YAG saturable absorber[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **194**: 429~433
- 10 A. V. Podlipensky, K. V. Yumashev, N. V. Kuleshov *et al.*. Passive Q-switching of 1.44  $\mu\text{m}$  and 1.34  $\mu\text{m}$  diode-pumped Nd:YAG lasers with a V:YAG saturable absorber[J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **76**: 245~247
- 11 Jack Marling. 1.05~1.44  $\mu\text{m}$  tunability and performance of the CW Nd<sup>3+</sup>:YAG laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1978, **QE-14**(1): 56~62
- 12 John J. Degnan. Optimization of passively Q-switched lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(11): 1890~1901
- 13 I. Freitag, A. Tunnermann, H. Welling. Passively Q-switched Nd:YAG ring lasers with high average output power in single-frequency operation[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(10): 706~708
- 14 Zheng Quan, Zhao Ling, Shao Yong-hong *et al.*. Cr:YAG passively Q-switched all-solid-state blue laser at 473 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8): 673~676  
郑权, 赵岭, 邵永红等. Cr:YAG 被动调 Q 全固态 473 nm 蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2003, **30**(8): 673~676