

LD 泵浦 Nd : YVO₄ / V : YAG 被动调 Q 1.34 μm 激光器

薛庆华^{1,2} 郑 权¹ 卜轶坤^{1,2} 钱龙生¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理所, 长春 130022)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 利用新型实用的晶体材料 V : YAG 作为被动调 Q 元件, 实现了激光二极管泵浦 Nd : YVO₄ 的 1.34 μm 激光谱线调 Q 运转. 研究了饱和吸收体小信号透过率对激光稳定性的影响, 得出使用小信号透过率 T₀ 小的 V : YAG 可使激光脉冲能量和重复频率稳定的结论. 在 1.6 W 的泵浦条件下, T₀ 为 96%、89% 和 85% 时, 4 h 脉冲能量和重复频率稳定性分别为 15%、10% 和 5%. 使用 T₀ 为 85% 的 V : YAG, 获得了平均功率输出功率 96 mW, 脉宽 8.8 ns, 重复频率 25 kHz, 峰值功率 436 W, 脉冲能量 3.84 μJ 的实验结果.

关键词 饱和吸收体; 被动调 Q; V : YAG; Nd : YVO₄; 1.34 μm

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

0 引言

脉冲宽度为 ns 级的 1.3 μm 波段激光在非线性光学研究、光通讯第二窗口的装置检测、光纤传感等方面有着广泛的应用前景^[1,2], 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^[2].

使用广泛的被动调 Q 晶体 Cr : YAG 饱和吸收波长范围为 0.8 μm ~ 1.2 μm^[3-5], 但它不再适合 1.3 μm 波段饱和吸收调 Q. 近年来, 半导体材料的饱和吸收镜 (SESAMs)^[6] 和量子点 PbS^[7] 在该波段的调 Q 得到了发展, 但前者存在着插入损耗较大、损伤阈值低的缺点, 而后者还处于发展阶段.

新型的晶体材料 V : YAG 饱和吸收波段宽, 为 750 ~ 1444 nm, 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^[2]. 已经成功地在 0.78 μm、1.06 μm、1.3 μm、1.44 μm 等波段实现了激光器的调 Q 或锁模运转^[2,7-9].

工作物质 Nd : YVO₄ 吸收带宽, 受激发射截面大, 偏振吸收、偏振发射, 自然双折射使热致双折射引起的损耗可以忽略, 这些特点使其广泛地用于 LD 泵浦全固态激光器中. 关于 Nd : YVO₄ 的 1.34 μm 的连续运转已有很多报道^[10,11], 但由于缺少晶体材料饱和吸收体, 在被动调 Q 方面国内尚未有文献报道.

本文利用新型实用的晶体材料 V : YAG 作为

被动调 Q 元件, 实现了 Nd : YVO₄ 的 1.34 μm 激光调 Q 运转. 研究了饱和吸收体小信号透过率对调 Q 激光器稳定性的影响, 得出使用小信号透过率小的 V : YAG 可使激光脉冲能量和重复频率稳定的结论. 泵浦功率为 1.6 W, T₀ 为 96%、89% 和 85% 时, 4 h 脉冲能量和重复频率稳定性分别为 15%、10% 和 5%. 用 T₀ = 85% 的 V : YAG, 获得了平均功率输出功率 96 mW, 脉宽 8.8 ns, 重复频率 25 kHz, 峰值功率 436 W, 脉冲能量 3.84 μJ 的实验结果.

1 V : YAG 调 Q 特性分析

V : YAG 的线性吸收光谱范围很宽, 大于 1000 nm, 存在着 425、600、800、1140、1320 nm 附近的五个吸收峰, 强度近似按 425、600、800、1140、1320 nm 递减排列^[2], 很适合作 1.34 μm 激光的被动调 Q 元件.

V : YAG 在 1.34 μm 处基态吸收截面大, 激发态吸收截面小, 分别为^[2]

$$\sigma_{gsa} = (7.2 \pm 2.6) \times 10^{-18} \text{ cm}^2,$$

$$\sigma_{esa} = (7.4 \pm 2.8) \times 10^{-19} \text{ cm}^2$$

两者比值为

$$\beta = \sigma_{esa} / \sigma_{gsa} \approx 0.1$$

即对应的激发态再吸收损耗小.

V : YAG 恢复时间 τ 短, 为 $22 \pm 6 \text{ ns}$ ^[2], 合理设计腔型可获得亚纳秒脉冲宽度的调 Q 锁模输出^[8].

V : YAG 在 1.3 μm 处的饱和能量密度 E_{sat} 低^[2], 小于 0.05 J/cm², 相应的饱和功率密度小于 7 MW/cm².

工作物质 Nd: YVO₄ 在 1.34 μm 处激光受激发射截面约为^[2] $\sigma_{em} = 6.0 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, V: YAG 的基态吸收截面与它的比值较大为 $\alpha = \sigma_{gsa} / \sigma_{em} \approx 10$, 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^[12], 因此 Nd: YVO₄/V: YAG 是一种较好的组合结构, 接近快速调 Q 激光器.

2 实验装置

V: YAG 被动调 Q 1.34 μm 激光的实验装置如图 1, 实验中使用最大输出功率为 2 W 的 LD 作泵浦源, 25℃ 时的发射中心波长为 0.808 μm, 发光面为 1×200 μm, 发散全角为 36×10°. 泵浦光经耦合效率为 90% 左右的光学系统准直聚焦后, 在工作物质 Nd: YVO₄ 内的平均光斑半径为 80 μm, 椭圆度约为 95%. Nd: YVO₄ 的尺寸为 3×3×2 mm, 沿 a 轴切割, 掺杂浓度为 1.0 atm%, 实验测得其对泵浦光的吸收大于 95%. Nd: YVO₄ 左端面镀 0.808 μm 减反膜(透过率大于 95%)和 1.34 μm 高反膜(反射率大于 99.9%)构成谐振腔的一个腔镜, 右端面镀 1.06/1.34 μm 减反膜, 剩余反射率尽可能小(小于 0.1%), 以减小标准具带来寄生振荡效应, 该面并没有考虑对泵浦光的反射, 输出镜的曲率半径为 50mm, 凹面镀 1.06 μm 的减反和 1.34 μm 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尽可能地短, 以获得短脉冲输出, 同时考虑到模式匹配取 10 mm, 不考虑热透镜, 这时工作物质内的基模光斑半径 $\omega_i \approx 92.4 \mu\text{m}$. 三块 V: YAG 样品, 对 1.34 μm 波段小信号透过率 T_0 分别为 85%、89% 和 96%, 表面镀 1.34 μm 附近的宽带减反膜, 为了减小泵浦光的影响, 将其紧靠输出镜放置, V: YAG 内的光斑半径 $\omega_s \approx 103.3 \mu\text{m}$. 在这种腔型下, 使被动调 Q 的 α 值减小到原来的 0.8 倍(ω_i^2 / ω_s^2), 但仍能很好地满足饱和吸收体被动调 Q 的第二阈值条件, 即在激光建立之前先使被动调 Q 晶体饱和.

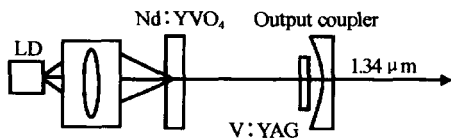


图 1 实验装置
Fig. 1 The setup of experiments

3 实验结果及分析

不放入 V: YAG, 在 1.6 W 的泵浦功率时, 获

得 1.34 μm 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 μm 泵浦光, 测量得到最大输出为 663 mW.

腔内分别放入 $T_0 = 96\%$ 、 89% 和 85% 的 V: YAG, 在不同的泵浦功率下, 用重庆四十四所上升时间 < 1ns 的 InGaAs 快速 PIN 光电二极管, 接瑞士 Lecroy 9361C 双通道 300 MHz 示波器, 测量脉冲宽度(FWHM), 脉冲重复频率, 并观察脉冲能量和频率的稳定性, 同时用功率计记录相应平均功率. 在 1.6 W 的泵浦功率时, 平均功率、脉冲宽度、重复频率、峰值功率、单脉冲能量的结果总结于表 1.

表 1 1.6W 泵浦时激光器输出参数

T_0	平均功率/mW	脉冲宽度/ns	重复频率/kHz
96%	316	20	130
89%	204	12	55
85%	96	8.8	25

实验中, 各小信号透过率下的平均输出功率与泵浦功率近似成线性关系, 稳定性均小于 2%.

图 2~4 为不同小信号透过率下调 Q 激光参数随泵浦功率的变化关系. 可以看出脉冲宽度在一定的泵浦功率下几乎不变, 但随泵浦功率的增加而减小. $T_0 = 96\%$ 的 V: YAG 减小的最明显, 从激光阈值附近的 155 ns 减小到 1.6 W 泵浦下的 20 ns. 另外, 在相同的泵浦功率下, 调制深度大的 V: YAG, 相应的脉冲宽度小.

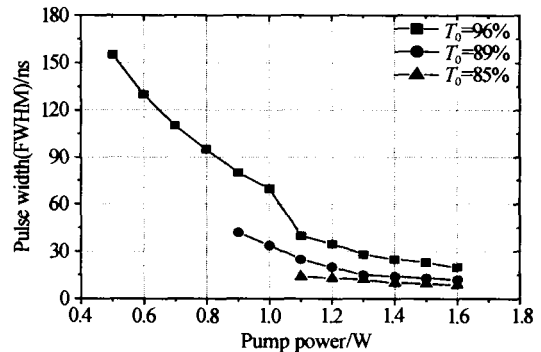


图 2 脉冲宽度(FWHM)与泵浦功率的关系
Fig. 2 Pulse width(FWHM) versus pump power

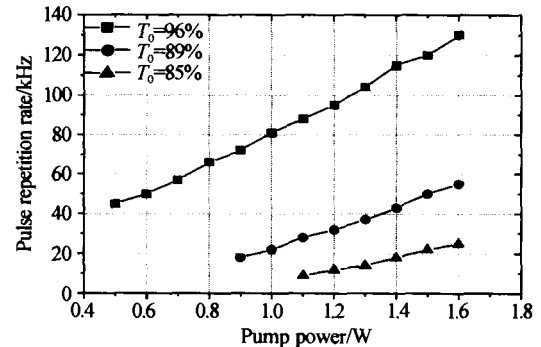


图 3 脉冲重复频率与泵浦功率的关系
Fig. 3 Pulse repetition rate versus pump power

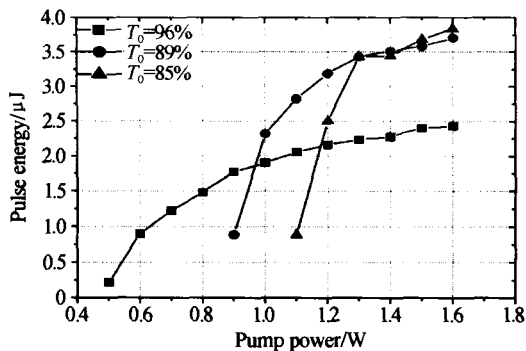
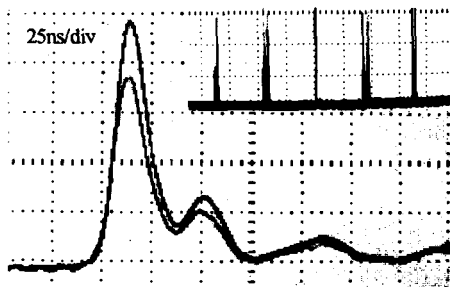
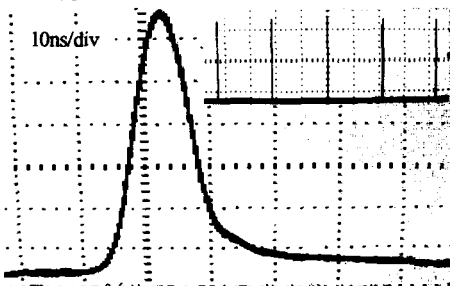


图4 单脉冲能量与泵浦功率的关系

Fig. 4 Single pulse energy versus pump power

从图 3、4 可以看出,脉冲重复频率和能量稳定性随小信号的不同取值变化很大,从 $T_0=96\%$ 的大于 15% 变化到 $T_0=85\%$ 的 5% 以内。

图 5、6 分别是使用 $T_0=96\%$ 和 85% 时的 V:YAG 饱和吸收体时,在相同的泵浦功率下的典型脉冲形状和脉冲序列。实验中使脉冲的幅度都在探测器线性工作范围内,示波器上都为 60 mV,可以看出, $T_0=96\%$ 的 V:YAG 对应的光脉冲除了主峰外,还存在着一个幅度约为主峰 1/4 的次峰以及一些类似弛豫震荡小峰;图 6 中 $T_0=85\%$ 的 V:YAG 的光脉冲很光滑,不存在着次峰;而 $T_0=89\%$ 的 V:YAG 的典型脉冲形状介于前两者之间。实验观察到当次峰存在时,激光的脉冲能量和重复频率不稳定,反之,激光器的稳定性很好,如图所示。

图 5 $T_0=96\%$ 的 V:YAG 激光脉冲形状Fig. 5 Type pulse shape for V:YAG of $T_0=96\%$ 图 6 $T_0=85\%$ 的 V:YAG 激光脉冲形状Fig. 6 Type pulse shape for V:YAG of $T_0=85\%$

上面的实验现象可解释为:脉冲从建立到结束并没有完全用尽激光上能级的反转粒子数,大的小信号透过率对应着小的调制深度,剩余的反转粒子仍能够使饱和能量密度低的 V:YAG 再次漂白,建立第二个光脉冲,此后以此类推得到近似弛豫振荡

的小脉冲输出,这样每次最终剩余反转粒子数具有不确定性,将会影响下次脉冲的建立时间,造成脉冲能量和重复频率的不稳定;相反,小的透过率对应着大的调制深度,剩余反转粒子数不足以使 V:YAG 再次漂白,结果输出的光脉冲平滑,有利于下次脉冲的建立,使脉冲能量和重复频率都稳定。

上面只是在输出镜的透过率一定的情况下进行的实验和分析,如果增加输出耦合损耗,使剩余反转粒子数不能使再次漂白饱和吸收体,那么也可以在小信号透过率大的 V:YAG 激光器中得到光滑的脉冲波形,相应地得到稳定的脉冲重复频率和单脉冲能量。

4 结论

利用新型实用的晶体材料 V:YAG 作为被动调 Q 元件,实现了 Nd:YVO₄ 的 1.34 μm 激光调 Q 运转。研究了饱和吸收体小信号透过率对激光稳定性的影响,得出使用小信号透过率小的 V:YAG 可使激光脉冲能量和重复频率稳定的结论。在 1.6 W 的泵浦条件下, T_0 为 96%、89% 和 85% 时,4 h 脉冲能量和重复频率稳定性分别为 15%、10% 和 5%。腔内放入小信号透过率为 85% 的 V:YAG 时,获得平均功率输出功率 96 mW,脉宽 8.8 ns,重复频率 25 kHz,峰值功率 436 W,脉冲能量 3.84 μJ 的实验结果。通过合理的腔型设计或改变 Nd:YVO₄ 的切割方式来增加 α 值,有望得到脉冲能量和重复频率稳定、峰值功率超过千瓦的 1.34 μm 脉冲输出。

参考文献

- Savitski V G, Malyarevich A M, Yumashev K V, et al. Diode-pumped Nd:YVO₄ and Nd:KGd(WO₄)₂ 1.3 lasers passively Q-switched with PbS-doped glass. *Appl Phys B*, 2003, **79**: 253~256
- Malyarevich A M, Denisov I A, Yumashev K V, et al. V:YAG—a new passive Q-switch for diode-pumped solid-state lasers. *Appl Phys B*, 1998, **67**: 555~558
- 郑权, 赵岭, 邵永红. Cr:YAG 被动调 Q 全固态 473 nm 蓝光激光器. *中国激光*, 2003, **30**(8): 673~676
Zheng Q, Zhao L, Shao Y H. Cr:YAG passively Q-switched blue laser at 473 nm. *Chinese Journal of Laser*, 2003, **30**(8): 673~676
- 薛庆华, 郑权, 王军营, 等. 用被动调 Q 激光器腔外倍频检验 KTP 的切割质量. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1032~1034
Xue Q H, Zheng Q, Wang J Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1032~1034
- 赵卫, 王涛, 杨延龙, 等. 用于种子注入的微型二极管泵浦激光器. *光子学报*, 2003, **32**(7): 786~789
Zhao W, Wang T, Yang Y L, et al. *Acta Photonica*

- Sinica, 2003, **32**(7): 786~789
- 6 Fluck R, Braun B, Gini E, *et al.* Passively Q-switched 1.34- $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ microchip laser with semiconductor saturable-absorber mirrors. *Optics Letters*, 1997, **22** (13): 991~993
 - 7 Jabczynski J K, Waldemar Zendzian, Zygmunt Mierczyk, *et al.* Chromium-doped LiCAF laser passively Q switched with a $\text{V}^{3+} : \text{YAG}$ crystal. *Applied Optics*, 2001, **40**(36): 6638~6645
 - 8 Agnesi A, Guandalimi A, Reali G, *et al.* Diode pumped $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ laser at 1.34 μm Q-switched and mode locked by a $\text{V}^{3+} : \text{YAG}$ saturable absorber. *Optics Communications*, 2001, **194**: 429~433
 - 9 Podlipensky A V, Yumashev K V, Kuleshov N V, *et al.* Passive Q-switching of 1.44 μm and 1.34 μm diode-pumped $\text{Nd} : \text{YAG}$ lasers with a $\text{V} : \text{YAG}$ saturable absorber. *Appl Phys B*, 2003, **76**: 245~247
 - 10 Chen Y F, Lee L J, Huang T M, *et al.* Study of high-power diode-end-pumped $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ laser at 1.34 μm : influence of Auger upconversion. *Optics Communications*, 1999, **163**: 198~202
 - 11 Hamish Ogilvy, Michael, Withford J, *et al.* Efficient diode double-end-pumped $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ laser operating at 1.34 μm . *Optics Express*, 2003, **11**(19): 2411~2415
 - 12 Degnan J J. Optimization of passively Q-switched lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, **31**(11): 1890~1901

LD-pumped $\text{Nd} : \text{YVO}_4 / \text{V} : \text{YAG}$ Passively Q-switched 1.34 μm Laser

Xue Qinghua^{1,2}, Zheng Quan¹, Bu Yikun^{1,2}, Qian Longsheng¹

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130022

² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2004-05-27

Abstract A LD-pumped $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ laser passively Q-switched at 1.34 μm by using $\text{V} : \text{YAG}$ which is a new type of crystal saturable absorber. The relationship between the stability of pulse laser and the small signal transmission of $\text{V} : \text{YAG}$ was studied. The results show the laser is stable when the $\text{V} : \text{YAG}$ with smaller signal transmission is used. When the pump power is 1.6 W, the stability of pulse energy and repetition rate for 4 hours is 15%, 10.5% for $\text{V} : \text{YAG}$ with small signal transmission of 96%, 89%, 85%, respectively. The results of average power of 96mW, minimum pulse width (FWHM) of 8.8 ns, pulse repetition rate of 25 kHz, peak power of 436 W and pulse energy of 3.84 μJ were obtained for small signal transmission of 85%.

Keywords Saturable absorber; Passively Q-switched; $\text{V} : \text{YAG}$; $\text{Nd} : \text{YVO}_4$; 1.34 μm



Xue Qinghua was born on February 25, 1978, in Jilin, China. He received the M. S. degree in 2004 from Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS. He is presently pursuing the PHD degree in optical engineering at Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS. He is interested in all solid-state lasers, nonlinear frequency conversion.