

# LD 泵浦 Cr : YAG 被动调 Q 556nm 黄光激光器 \*

贾富强<sup>1,2</sup> 郑 权<sup>1</sup> 薛庆华<sup>1,2</sup> 卜轶坤<sup>1,2</sup> 钱龙生<sup>1</sup>

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘 要** 通过对谐振腔镜镀制合理的激光薄膜, 成功实现了 LD 泵浦 Nd : YAG 1.112  $\mu\text{m}$  激光谱线的运转. 利用 LBO 腔内倍频 Nd : YAG/Cr : YAG 结构获得了高重复频率被动调 Q 556 nm 全固态黄光激光器, 在注入泵浦功率为 1.6 W 时, 得到平均功率 51 mW, 脉冲宽度 48 ns, 重复频率 8.9 kHz, 峰值功率高达 119 W 的脉冲黄光输出.

**关键词** LD 泵浦; 被动调 Q; 黄光激光器; 556 nm

**中图分类号** TN24 **文献标识码** A

## 0 引言

激光二极管(LD)泵浦的全固态激光器因效率高、结构紧凑、寿命长, 日益引起人们重视<sup>[1~3]</sup>, 尤其是调 Q 方式运转具有脉冲宽度窄、峰值功率高、重复频率高等优点, 在微加工、测距、遥感、激光雷达、光学数据存储、微外科等领域有广泛应用. 与主动调 Q 激光器相比较, 全固态被动调 Q 激光器结构更简单, 不需要任何外部驱动装置. 近几年, 随着具有良好物理化学性能的可饱和吸收体的出现, 利用它进行被动调 Q 已经引起国内外学者的极大兴趣. 同时, 由于 Cr : YAG 在 0.9~1.2  $\mu\text{m}$  波段范围具有很好的饱和吸收特性, 目前已经成功实现该波段的被动调 Q 和锁模运转<sup>[4,5]</sup>. 到目前为止, 以闪光灯和 LD 作为泵浦源, 用 Cr : YAG 进行被动调 Q 已经在 Nd : YAG、Nd : YLF、Nd : YVO<sub>4</sub> 和 Nd : GdVO<sub>4</sub> 等激光中取得成功, 输出了高重复频率红外激光脉冲<sup>[6~9]</sup>. 在 Nd : YAG 中, Nd<sup>3+</sup> 的 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> (0.946  $\mu\text{m}$ ) 和 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> (1.064  $\mu\text{m}$ 、1.112  $\mu\text{m}$ ) 的激光跃迁正好对应于 Cr : YAG 的吸收波段 (0.9~1.2  $\mu\text{m}$ ), 同时利用 Nd : YAG 作为激光晶体 (以 0.946  $\mu\text{m}$  和 1.064  $\mu\text{m}$  为基频光运转)、Cr : YAG 被动调 Q 和通过腔内倍频获得脉冲运转的可见光波段的绿光 (532 nm) 和蓝光 (473 nm) 激光器也早已经有报道<sup>[10,11]</sup>, 但利用 Nd : YAG 的 1.112  $\mu\text{m}$  这条谱线, 来获得谐振腔内调 Q 倍频 556 nm 黄光激光器目前为止还没有报道. 脉冲运转的黄光激光器由于特殊的视觉灵敏特性, 在激光医疗上的应用非常广泛, 它可以作为若丹明 6G 脉冲染料激光 555.0 nm 的替

代产品, 来治疗青光眼、先天性瞳孔残膜等眼病. 同时它的波长非常接近人眼最敏感波长 555 nm, 可以作为照明光源发光效率的比较标准, 另外它还是 He-Ne 543 nm 和 Kr 568 nm 激光器的替代光源.

本文报道了使用国产连续 LD 泵浦 Nd : YAG/LBO/Cr : YAG 结构的高重复频率被动调 Q 黄光激光器. 在注入泵浦功率为 1.6 W 时, 得到平均功率为 51 mW, 脉冲宽度 48 ns, 重复频率 8.9 kHz 的调 Q 脉冲黄光输出, 峰值功率高达 119 W.

## 1 理论分析

在 Nd : YAG 激光晶体中, 钕离子 (Nd<sup>3+</sup>) 取代了 YAG 基质中的钇离子 (Y<sup>3+</sup>), Nd<sup>3+</sup> 在晶格场的作用下, 发生了斯塔克分裂, 其能级结构如图 1. 从图 1 中可以看出 1064 nm、1112 nm 这两条谱线都对应 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 这两个能态之间跃迁, 只是其上下能级不同且分别对应于不同的斯塔克分裂子能级, 其中 1064 nm 对应的是 R<sub>2</sub> 到 Y<sub>3</sub> 的跃迁, 1112 nm 对应的是 R<sub>2</sub> 到 Y<sub>6</sub> 的跃迁. 1112 nm 与 Nd : YAG 常

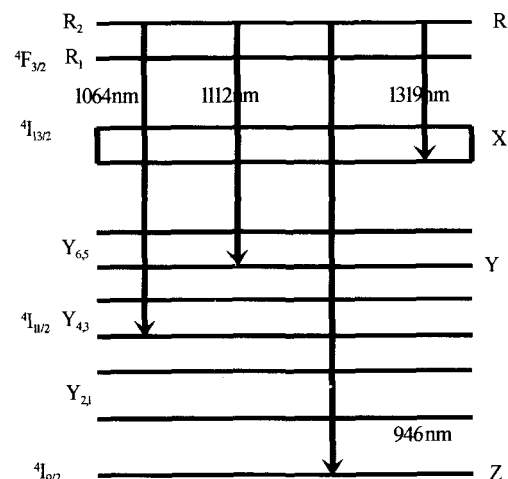


图 1 Nd : YAG 的能级图  
Fig. 1 The energy level of Nd : YAG

\* 国家高技术研究发展计划 (2002AA311141) 资助项目  
Tel: 0431-5516837 Email: jfq555@yeah.net  
收稿日期: 2004-07-26

用谱线的激光特性比较<sup>[12,13]</sup>如表1,其中 $\sigma$ 表示受激辐射截面, $\Delta\nu$ 表示激光谱线的频宽, $\beta$ 表示荧光辐射相对强弱的分支比.从表1中可以看出,1112 nm这条谱线的相对性能约为1064 nm的二分之一,受激发射截面约为1064 nm的十三分之一,约是1319 nm的三分之一,是946 nm的五分之三,所以为了获得增益较小的1112 nm这条激光谱线的运转,不仅需

表1 Nd:YAG中各主要谱线的激光特性比较

$\lambda/\text{nm}$	Transition	$\sigma(10^{-20}\text{cm}^2)$	$\Delta\nu/\text{cm}^{-1}$	$\beta(\text{Branching ratio})$	Relative performance
1064	$R_2-Y_3$	45.8	5	0.135	99
1112	$R_2-Y_6$	3.6	14	0.025	49
946	$R_1-Z_5$	5.1	9	0.040	46
1319	$R_1-X_1$	8.9	6	0.018	34

## 2 实验装置

实验中采用中科院半导体所生产的连续输出功率为2 W、中心发射波长为807.5 nm的LD作为泵浦源.泵浦光经耦合光学系统CO准直、扩束、聚焦以后光斑半径约为99  $\mu\text{m}$ ,泵浦光入射到Nd(Nd:YAG)的左端面,Nd:YAG的尺寸为 $\Phi 4 \times 3\text{ mm}^3$ ,掺杂浓度为1.0at%,Nd:YAG的左端面镀制1112 nm的高反射膜,作为谐振腔的一个腔镜,输出镜OC是曲率半径为50 mm的平凹镜,凹面镀制1112 nm高反射膜和倍频光的增透膜,同时谐振腔还要整体考虑对增益较大各谱线的透过率情况,只有增益较大的这几条谱线被抑制掉,1112 nm这条谱线才可以起振.

Cr是可饱和吸收体Cr:YAG,掺杂浓度为1at%,厚度为1 mm,两边都镀制了基频光的减反射膜,在1064 nm处的初始透过率为98%,Cr:YAG的吸收光谱如图3.从图中可以看出,Cr:YAG在

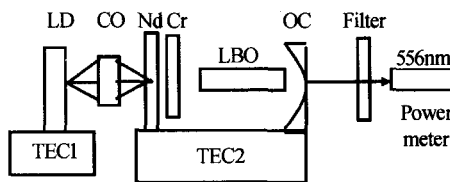


图2 556 nm脉冲激光器实验原理图

Fig. 2 The schematic diagram of pulse laser at 556 nm

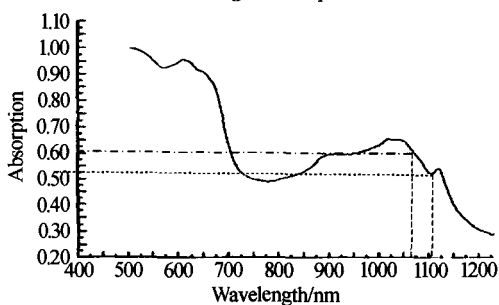


图3 Cr:YAG的吸收光谱

Fig. 3 The absorption spectrum of Cr:YAG

要抑制1064 nm的振荡,还要对1319 nm和946 nm这两条谱线进行抑制,同时只有采用内部损耗较小的倍频晶体才能获得低阈值、高效率的激光输出.通过计算得到谐振腔两腔镜薄膜对1064 nm的整体透过率大于80%,同时对1319 nm和946 nm的透过率大于60%,才可以获得1112 nm激光器的运转.

1064 nm和1112 nm处的吸收系数之分别为0.62和0.51,根据可饱和吸收体小信号透过率的表达式

$$T_0 = \exp(-n_0 \cdot \sigma_{gs} \cdot l_s) \quad (1)$$

通过简单计算得到Cr:YAG在1112 nm处的初始透过率约为98.4%. $T_0$ 表示Cr:YAG的初始透过率, $n_0$ 为基态的粒子数密度, $\sigma_{gs}$ 为基态的吸收截面, $l_s$ 为Cr:YAG的厚度.谐振腔由工作物质的左端面和输出镜一起构成,谐振腔长度约为24 mm.TEC<sub>1</sub>和TEC<sub>2</sub>分别是LD和激光谐振的温控制器.Filter是倍频光的滤光片,Power Meter是相干公司的Field Master-GS功率计.

## 3 实验结果

调整LBO和Cr:YAG位置直到倍频光输出到最佳状态,此时测量了倍频光的输出功率随泵浦功率的变化曲线如图4.从图4可以看出,倍频光的阈值约为800 mW,最大输出功率为51 mW,此时泵浦光到倍频光的转换效率为3.2%.此外,利用重庆四十四所制造的InGaAs快速PIN光电二极管(上升时间小于1 ns)和Lecroy 9361C双通道300 MHz示波器来测量和显示了倍频光脉冲的相关参数和波形,其结果如图5~7.

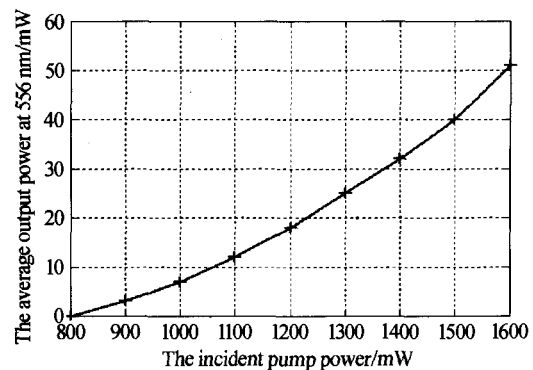


图4 黄光的输出功率随输入功率的变化曲线

Fig. 4 The output power at the 556nm versus the pump power

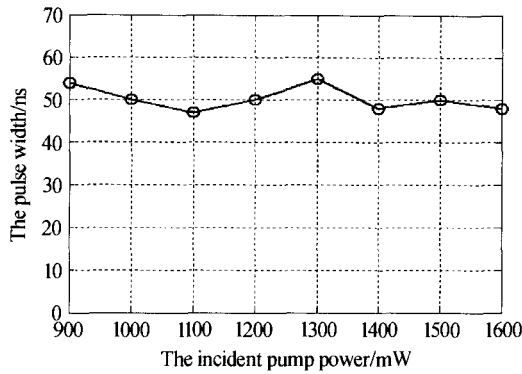


图5 脉冲宽度随泵浦功率的变化曲线

Fig. 5 The pulse width versus the pump power

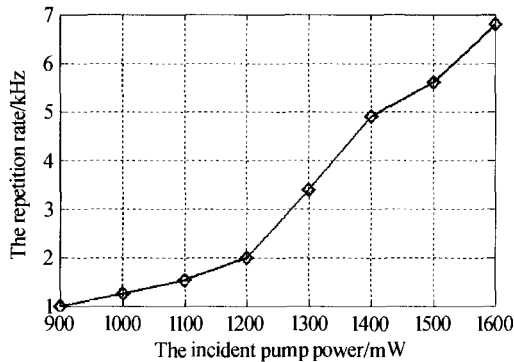


图6 脉冲的重复频率随泵浦功率的变化

Fig. 6 The repetition rate versus the pump power

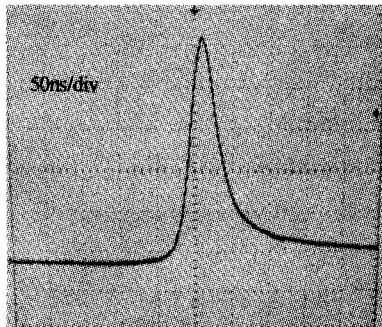


图7 典型的脉冲波形

Fig. 7 The typical profile of SHG pulse

从图5,6中可以看出,输出光的脉宽随泵浦功率增大变化很小,可以近似为常数,而输出光的重复频率随泵浦功率的增加而增加,如果泵浦功率继续增大,脉冲的重复频率还有继续增大的趋势.该现象可以定性理解为:当泵浦功率增大的时候,激光晶体中的小信号增益也变大,腔内光子数增加的速度也加快,可饱和吸收体的漂白时间相应缩短,导致在更短的时间内建立了激光脉冲.泵浦功率增大导致平均输出功率也变大,按照可饱和吸收体在除去泵浦功率变化以外其他条件不改变的前提下,脉冲宽度和峰值功率也保持不变的特性,所以平均功率增大的实质是单位时间内激光器发射的脉冲个数——重复频率增加.图7中给出了单个脉冲波形图,脉冲波形比较好,脉冲宽度大约为50 ns.

## 4 结论

采用连续激光二极管泵浦 Nd:YAG,利用可饱和吸收体 Cr:YAG 被动调 Q 以及 LBO 腔内倍频,获得了结构紧凑、效率高、重复频率高的全固态黄光激光器.在 1.6 W 的泵浦功率下,获得了平均功率为 51 mW,脉冲宽度 48 ns,重复频率 8.9 kHz 的调 Q 脉冲黄光输出,峰值功率高达 119 W,为脉冲黄光激光器在医疗等方面的应用提供了更大的空间.由于倍频晶体没有镀制基频光的增透膜,在一定程度上增大了腔内损耗,从而导致倍频光的输出效率降低.在将来的实验中,会选用插入损耗小的倍频晶体,从而获得更高的光光转换效率.同时,这一实验的成功为进一步研究 Nd:YAG 增益较小的其它谱线,获得高效基频光和倍频光输出提供了很好的借鉴.同时,因为 Cr:YAG 的小信号透过率的选取没有经过优化,在进一步的工作当中,将根据 1.112  $\mu\text{m}$  这条谱线的激光参数作为优化条件,获得更高峰值和效率的调 Q 黄光输出.

## 参考文献

- 1 郑权,陈颖新,赵岭,等.可饱和吸收体 Cr:YAG 做被动调 Q 元件时的选模作用.光子学报,2002,31(5):550~552  
Zheng Q, Chen Y X, Zhao L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(5):550~552
- 2 王军营,郑权,薛庆华,等.LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO 临界相位匹配腔内倍频瓦级绿光激光器.光子学报,2003,32(10):1011~1014  
Wang J Y, Zheng Q, Xue Q H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(10):1011~1014
- 3 高兰兰,檀慧明.利用复合 Nd:YAG 实现 600 mW 高效紧凑型蓝光激光器.光子学报,2004,33(1):9~11  
Gao L L, Tan H M. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(1):9~11
- 4 Yankov P. Cr:YAG Q-switching of Nd:host laser oscillators. *J Phys D*, 1994, 27(6):1118~1120
- 5 Wang Jiaxian, Zhang Wenzhen. Investigation of Cr:YAG passive mode locking in a pulsed Nd:YAG laser. *Optics & Laser Technology*, 1998, 30(5):303~305
- 6 Shimony Y, Burshtein Z, Baranga BenAmar. Repetitive Q-switching of a cw Nd:YAG laser using Cr:YAG saturable absorber. *IEEE J Q E*, 1996, 32(2):305~310
- 7 王春,胡文涛,陈少和.LD 端面泵浦 Cr:YAG 被动调 Q 的 Nd:YLF 激光器.量子电子学报,1999,14(2):359~362  
Wang C, Hu W T, Chen S H. *Quantum and Electronics*, 1999, 14(2):359~362
- 8 Bai Y, Wu N, Zhang J. Passively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub>

- laser with a Cr : YAG crystal saturable absorber. *Appl Opt*, 1997, **36**(12): 2468~2472
- 9 Li C, Song J, Shen D, *et al.* Diode-pumped passively Q-switched Nd : GdVO<sub>4</sub> lasers operating at 1.06 μm wavelength. *Appl Phys B Laser and Optics*, 2000, **70**(4): 471~474
- 10 Zheng Quan, Zhao Ling. LBO intracavity frequency doubled, Cr : YAG passively Q-switched Nd : YAG green laser. *Optics & Laser Technology*, 2002, **34**(3): 239~241
- 11 Wang Chunwei, Weng Yilung, Huang Piling, *et al.* Passively Q-switched quasi three level laser and its intracavity frequency doubling. *Appl Opt*, 2002, **41**(6): 1075~1081
- 12 Singh S, Smith R G, Van Uiter L G. Stimulated-emission cross section and fluoresced quantum efficiency of Nd<sup>3+</sup> in yttrium aluminum garnet at room temperature. *Phys Rev B*, 1974, **10**(9): 2566~2572
- 13 Koechner W. Solid-State Laser Engineering. Beijing: Science Press, 2002. 45

## LD Pumped Cr : YAG Passively Q-switched 556nm Yellow Laser

Jia Fuqiang<sup>1,2</sup>, Zheng Quan<sup>1</sup>, Xue Qinghua<sup>1,2</sup>, Bu Yikun<sup>1,2</sup>, Qian Longsheng<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130022

<sup>2</sup> The Graduated School of Chinese Academe of Science, Beijing 100018

Received date: 2004-07-26

**Abstract** 1.112 μm laser transition of Nd : YAG was obtained by restrained the stronger stimulated laser transitions through cavity coating design. A LD pumped, LBO intracavity frequency doubled and Cr : YAG passively Q-switched laser at 556 nm were reported. At the incident pump power of 1.6 W, the laser produced pulses of 48 ns duration at 556 nm, with a repetition rate of 8.9 kHz, meanwhile the average output power was 51 mW and the highest yellow peak power was about 119 W.

**Keywords** LD pumped; Passively Q-switched; Yellow laser; 556nm



**Jia Fuqiang** was born in 1980 in Chongqing, and graduated from Changchun University of Technology and Science in 1998. Since then, he has been a graduate student in Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences. He is mainly engaged in the DPSSL and nonlinear frequency conversion.