

## 重复频率连续可调谐的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 微片激光器

苏艳丽, 罗旭, 张学辉, 姜梦华, 惠勇凌, 雷 劼, 李 强

(北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124)

**摘 要:** 激光二极管泵浦的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 微片激光器因其高重复频率、短脉宽、高峰值功率等优点, 在光通信、激光雷达、遥感监测、非线性频率变换、激光微加工等领域有着重要应用, 然而目前 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 激光器脉冲输出稳定性较差, 而且重复频率调谐范围窄, 限制了其在气溶胶的荧光分析、测距以及空间光通信等领域中的广泛应用。实验中采用预泵浦方式, 在激光二极管泵浦的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 微片激光器中获得重复频率连续可调、稳定振荡的激光脉冲输出, 重复频率连续可调谐范围为 2~28 kHz, 其单脉冲能量的不稳定性优于±2.50%。其中, 在重复频率为 20 kHz 时, 获得脉冲宽度为 2.431 ns, 单脉冲能量 17.6 μJ, 消光比 252:1 的脉冲输出, 其幅度不稳定性约为 4.00%, 重复频率不稳定性约为 2.40%。此类宽频可调、稳定振荡的激光二极管泵浦的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 微片激光器有着广阔的应用前景。

**关键词:** 激光器; 被动调 Q; 预泵浦; Cr<sup>4+</sup>:YAG

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)02-0355-05

## Repetition rate continuously tunable microchip laser passively Q-switched by Cr<sup>4+</sup>:YAG

Su Yanli, Luo Xu, Zhang Xuehui, Jiang Menghua, Hui Yongling, Lei Hong, Li Qiang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Laser diode pumped microchip lasers passively Q-switched by Cr<sup>4+</sup>:YAG, with high repetition rate, short pulse width and high peak power, have important applications in optical communication, lidar, remote sensing, nonlinear frequency conversion, laser micro-processing and so on. However, in these lasers, the output stability is poor and the repetition rate of output laser cannot be changed widely. This will restrict the applications of these lasers in fluorescence analysis of aerosols or ranging, space optical communication. In the experiment, output pulses with continuously tunable repetition rate from 2 kHz to 28 kHz and stable oscillation were obtained in the laser diode pumped microchip laser passively Q-switched by Cr<sup>4+</sup>:YAG. In the stability of single pulse energy from 2 kHz to 28 kHz was less than ± 2.50%. Stable 2.431 ns pulse at 20 kHz with single pulse energy of 17.6 μJ and extinction ratio of 252:1 and with amplitude instability of 4.00% and frequency instability of 2.40% was obtained. This laser diode pumped microchip laser passively Q-switched by Cr<sup>4+</sup>:YAG with wide continuously tunable repetition rate and stable oscillation will have broad application prospects.

**Key words:** lasers; passively Q-switched; pre-pumping; Cr<sup>4+</sup>:YAG

收稿日期: 2013-06-10; 修订日期: 2013-07-25

作者简介: 苏艳丽(1987-), 女, 硕士, 主要从事全固态激光器方面的研究。Email: sunnysuzy@emails.bjut.edu.cn

## 0 引言

Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体具有吸收截面大、掺杂浓度高、饱和光强小、损伤阈值高、热导性能好、光化学性质稳定、无退化现象、寿命长、易实现高重频和高峰值功率输出等优点,从而被广泛应用在波长为 0.8~1.2 μm 的被动调 Q 激光器和锁模激光器中<sup>[1-4]</sup>。激光二极管泵浦的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 微片激光器因体积小、结构紧凑、高重复频率、短脉宽、高峰值功率等优点,在光通信、激光雷达、遥感监测、非线性频率变换、激光微加工等领域具有广阔的应用前景<sup>[5]</sup>。

然而,激光二极管泵浦的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 激光器的脉冲输出稳定性差,激发态吸收、Cr<sup>3+</sup>引起的光诱导衍生损耗以及模式间的竞争是导致输出脉冲不稳定的原因,极大限制了 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 微片激光器的应用<sup>[6-8]</sup>。有文献报道通过控制晶体的生长条件获得高质量晶体、在谐振腔内加入选模元件等措施来改善激光二极管泵浦的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 激光器的输出不稳定性<sup>[7-8]</sup>。之后,巩马理等人采用预抽运技术改善被动调 Q 激光器输出的不稳定性,并在 Cr<sup>4+</sup>,Nd<sup>3+</sup>:YAG 双掺自调 Q 晶体中得到了实验验证,激光脉冲的频率稳定性和幅度稳定性都有大幅度提高,其基本原理是:对泵浦源进行直流预抽运,使其输出的抽运光功率接近调 Q 激光器的阈值,目的是让每次 Q 开关打开前增益介质中的粒子反转数积累到相似的水平,当 LD 叠加快速阶跃的脉冲抽运时,由于预抽运提高了初始反转粒子数目的一致性,Q 开关开启时间不确定性降低,从而改善了输出调 Q 脉冲的稳定性<sup>[9]</sup>。漆云凤等人报道了在 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q Nd:YAG 陶瓷激光器中获得了脉宽为 16 ns、重复频率为 18.18 kHz、单脉冲能量为 3.4 μJ 的稳定调 Q 激光器输出<sup>[10]</sup>。Jieguang Miao 等人报道了在 Nd:YAG/Cr:YAG 扩散键合的激光器中获得重复频率为 16.3 kHz、脉宽为 6 ns、单脉冲能量为 38.5 μJ 的稳定脉冲输出<sup>[11]</sup>。Shidong Zhuang 等人报道了在 Nd:Gd<sub>0.63</sub>Y<sub>0.37</sub>VO<sub>4</sub>/Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 微片激光器中获得重复频率 7.86 kHz、脉宽 1.17 ns、单脉冲能量 39.5 μJ 的稳定脉冲输出<sup>[12]</sup>。

然而,目前在这些激光器中,输出脉冲的重复频率调谐范围窄,通常工作在一个固定的重复频率上,限制了其在气溶胶的荧光分析、测距以及空间光通

信等领域中的广泛应用<sup>[13]</sup>。J.P.Feve 等人通过预泵浦技术实现频率控制,但其重复频率仅在 10~1 kHz 范围内可控<sup>[14]</sup>。H.Lei 等人通过采用直接脉冲泵浦技术,通过控制脉冲占空比和激光二极管的温度,在 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q Nd:YAG 微片激光器中实现了重复频率 1~10 kHz 连续可控、稳定振荡的脉冲输出,当重复频率为 10 kHz 时,获得脉宽为 2 ns、单脉冲能量为 2.8 μJ 的脉冲输出<sup>[13]</sup>。

文中采用预泵浦方式,在激光二极管泵浦的 Cr<sup>4+</sup>:YAG 被动调 Q 微片激光器中获得重复频率连续可调、稳定振荡的激光脉冲输出,重复频率连续可调范围为 2~28 kHz,其单脉冲能量的稳定性优于 ±2.50%。其中,在重复频率为 20 kHz 时,获得脉冲宽度为 2.431 ns,单脉冲能量 17.6 μJ,消光比 252:1 的脉冲输出,其幅度不稳定性约为 4.00%,重复频率不稳定性约为 2.40%。

## 1 实验装置

实验装置示意图如图 1 所示。采用最大输出功率为 5 W、室温下中心波长为 806.5 nm、发光面积为 1×100 μm<sup>2</sup> 的单个激光二极管作为泵浦源。泵浦光由一对短焦距、直径为 4 mm 的透镜聚焦后入射到增益介质 Nd:YAG 中,进行端面泵浦。采用复合晶体 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 作为增益介质和被动调 Q 元件,温度由热电冷却器 TEC 控制,复合晶体一个端面镀 808 nmHT/1 064 nmHR 双色膜作为谐振腔的输入镜 M<sub>1</sub>,采用透过率为 50% @1 064 nm 的 M<sub>2</sub> 镜作为谐振腔的耦合输出镜 OC。复合晶体 Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>:YAG 尺寸为 2×2×8 mm<sup>3</sup>,其中增益介质 Nd:YAG 尺寸为 2×2×7 mm<sup>3</sup>,Nd<sup>3+</sup>离子掺杂浓度为 1.0%;被动调 Q 元件 Cr<sup>4+</sup>:YAG 尺寸为 2×2×1 mm<sup>3</sup>,复合晶体两部分之间经扩散键合成为一整体。

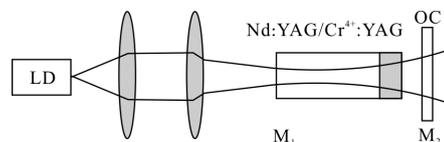


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experiment setup

实验中,通过信号发生器 DS345 加载泵浦脉冲信号,采用 Tektronix TDS1012B-SC 数字示波器进

行泵浦脉冲波形的测量。采用偏振分束镜 PBS 和 LPE-1B 功率计测量输出偏振方向及消光比,采用 Tektronix DPO 4 104B 数字存储示波器、InGaAs PIN 光电探测器进行输出脉冲波形、脉宽、重复频率及稳定性测量。

## 2 实验结果

实验中采用预泵浦技术改善输出脉冲的幅度稳定性和频率稳定性,在保证单次泵浦输出单脉冲的情况下,测量了不同预泵浦参数下输出脉冲稳定振荡时的重复频率连续调谐范围,结果如表 1 所示。

表 1 不同预泵浦参数下输出脉冲稳定振荡时的重复频率连续调谐范围

Tab.1 Tuning range of output repetition rate with different pre-pumping parameters

Pre-pumping current /A	Pulse pump current /A	Pump width / $\mu$ s	Tuning range /kHz
1.13	4.80	40	20-21
1.27	4.80	36	20-22
1.47	4.80	33	19.5-22
1.60	4.80	30	17.5-23.5
1.80	4.80	27	15-23.5
1.93	4.80	24	15-28
2.13	4.80	23	2-28

表 1 表明:在保证单次泵浦输出单脉冲的情况下,在不同的预泵浦参数下输出脉冲稳定振荡的重复频率连续调谐范围不同,通过对预泵浦参数进行优化,输出脉冲稳定振荡的重复频率连续调谐范围最大达到 2~28 kHz。

在保证单次泵浦输出单脉冲的情况下,为获得宽范围重复频率连续可调、稳定振荡的激光脉冲输出,最佳泵浦的具体条件如下:(1)脉冲泵浦电流越高,增益介质上能级的反转粒子数积累越快,从而减小 Q 开关开启时间和开关速度不确定性;同时考虑到脉冲泵浦电流受到实验中 LD 最大工作电流(5.0 A)和激光晶体损伤阈值的限制,因而选取脉冲泵浦电流为 4.80 A;(2)在优化脉冲泵浦电流为 4.80 A 的情况下,随着直流预泵浦电流逐渐增大并接近阈值,同时配合泵浦脉宽的调节,有利于扩展激光脉冲输

出重复频率连续调谐范围,因为直流预泵浦分量屏蔽了脉冲之间的相互干扰,减小了腔内剩余反转粒子数对 Q 开关时间的影响,直流分量越大,增益介质上能级积累的初始反转粒子数越多,不同泵浦频率下叠加脉冲泵浦电流时 Q 开关脉冲越容易建立;(3)实验中基于上述在增大直流预泵浦电流和脉冲泵浦电流的前提下,通过控制泵浦脉宽使泵浦光脉冲达到单次泵浦输出单脉冲。泵浦脉冲宽度小于 23  $\mu$ s 时,因作用时间短,在一个脉冲泵浦周期内总增益小于阈值,一个脉冲需要多个脉冲泵浦周期才可以产生;反之,泵浦脉冲宽度大于 23  $\mu$ s 时,一方面,在泵浦频率小于 2 kHz 时,激光介质上能级积累的初始反转粒子数增多,增益远高于阈值,则导致在下一个泵浦周期内产生多个脉冲发射,因此,输出激光的波动大,稳定性差;另一方面,在泵浦频率大于 28 kHz,随着泵浦脉宽的增加会导致泵浦脉冲的占空比增大,激光脉冲之间没有充足的驰豫时间使晶体和可饱和吸收体恢复初始状态,导致每次调 Q 前腔内剩余的粒子数不一致,进而影响高重频下输出脉冲的稳定性,因此在特定的泵浦条件下其稳定输出的重复频率连续调谐范围存在最大范围。

通过优化预泵浦参数,在直流偏置泵浦电流为 2.13 A、脉冲泵浦电流为 4.80 A、泵浦脉宽为 23  $\mu$ s 时,测得不同重复频率下单脉冲能量,如图 2 所示,当重复频率在 2~28 kHz 连续调谐时,单脉冲能量的稳定性优于  $\pm 2.50\%$ 。

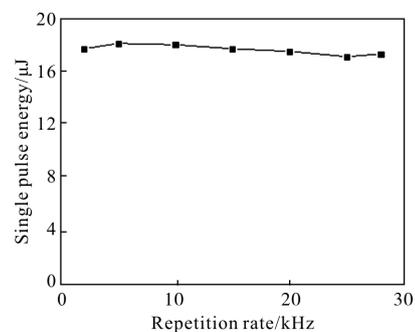


图 2 不同重复频率下的单脉冲能量

Fig.2 Single pulse energy versus repetition rate

在上述优化后的泵浦参数下,在泵浦频率为 20 kHz 的情况下,测得消光比最高为 252:1,脉冲始终可以维持单次泵浦输出单线偏振脉冲的状态,如图 3 所示。该泵浦条件下,输出脉冲波形的幅度稳定

性和频率稳定性如图 4 所示。

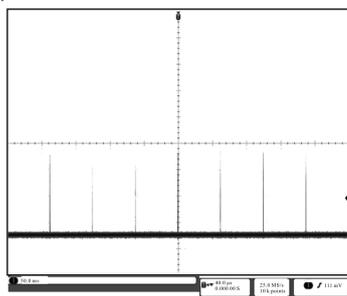


图 3 1064 nm 输出的脉冲序列波形(重复频率为 20 kHz)

Fig.3 Pulse train of 1064 nm pulses with repetition rate of 20 kHz

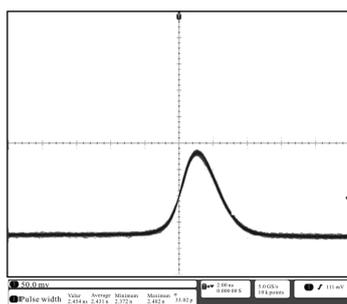


图 4 1064 nm 输出脉冲的稳定度

Fig.4 Stability of 1064 nm output pulses

通过测量泵浦脉冲波形的时间弥散范围,得到输出脉冲相对于泵浦脉冲的频率不稳定性为  $1.2 \mu\text{s}/50 \mu\text{s}=2.40\%$ 。由图 4 得到,通过预泵浦技术,当泵浦频率为 20 kHz 时,脉冲宽度为 2.431 ns,单脉冲能量  $17.6 \mu\text{J}$ ,输出脉冲的幅度稳定度高,其幅度不稳定性约为 4.00%。

### 3 结论

文中采用预泵浦方式,同时提高输出调 Q 脉冲稳定性和重复频率连续调谐范围。通过实验研究不同预泵浦参数,在激光二极管泵浦的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q 微片激光器中获得重复频率连续可调、稳定振荡的激光脉冲输出,重复频率连续可调范围为 2~28 kHz,其单脉冲能量的不稳定性优于  $\pm 2.50\%$ ,该结果比目前报道的采用直接脉冲泵浦技术,通过控制脉冲占空比和激光二极管的温度在  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q Nd:YAG 微片激光器中所获得的重复频率 1~10 kHz 连续可控的范围宽,此类宽频可调、稳定振荡的激光二极管泵浦的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q 微片激光器在气溶胶的荧光分析、测距以及空间光通信

等领域中有着广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] Ding Zheng, Yi Xuebin, Liang Tian, et al. LD pumped thermally bonded YAG passively Q-switched lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 464-466. (in Chinese)  
丁征, 衣学斌, 梁田, 等. LD 泵浦的 YAG 热键合调 Q 激光器[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 464-466.
- [2] Ren Deming, Bai Yan, Zhao Weijiang, et al. Experiment on Q-switched and active mode-locking Nd:YAG picoseconds' laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 885-888. (in Chinese)  
任德明, 白岩, 赵卫疆, 等. 调 Q 主动锁模 Nd:YAG 皮秒激光器实验[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(4): 885-888.
- [3] Wang Chao, Jin Guangyong, Liang Wei, et al.  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  passive Q-switched miniature laser without water cool [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36 (S1): 67-70. (in Chinese)  
王超, 金光勇, 梁伟, 等.  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q 小型无水冷却激光器[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S1): 67-70.
- [4] Wang Y, Gong M, Yan P, et al. Stable polarization short pulse passively Q-switched monolithic microchip laser with [110] cut  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ [J]. *Laser Phys Lett*, 2009, 6(11): 788-790.
- [5] Marziyeh Erfani Jazi, Mahdi Dehghan Baghi, Morteza Hajimahmodzadeh, et al. Pulsed Nd:YAG passive Q-switched laser using  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  crystal [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(3): 522-527.
- [6] Yehoshua Kalisky, Leonid Kravchik, Kokta Milan R. Performance of diode-end-pumped  $\text{Cr}^{4+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$  self-Q-switched and Nd:YAG/ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  diffusion bonded lasers[J]. *Optical Materials*, 2004, 24(4): 607-614.
- [7] Chen Wei, Xu Jun, Yang Xiangchun, et al. Passive Q switching for CW Nd:YAG Laser by Using  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  [J]. *Chinese J Lasers*, 1998, 25(1): 7-11. (in Chinese)  
陈伟, 徐军, 杨香春, 等.  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q 连续 Nd:YAG 激光的稳定性[J]. 中国激光, 1998, 25(1): 7-11.
- [8] Ding Yanhua, Ouyang Bin, Xu Jun, et al. Stability and power improvement in passive Q switching of CW Nd:YAG laser using  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  [J]. *Chinese J Lasers*, 1997, 24 (3): 197-201. (in Chinese)  
丁彦华, 欧阳斌, 徐军, 等. 连续 Nd:YAG 激光器中  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  被动调 Q 的稳定性和功率的提高 [J]. 中国激光,

- 1997, 24(3): 197-201.
- [9] Gong Mali, Yan Ping, Xie Tao, et al. Study of pre-pumping mechanism for passively Q-switched lasers [J]. *Chinese J Lasers*, 2003, 30(7): 585-589. (in Chinese)  
巩马理, 闫平, 谢韬, 等. 被动 Q 开关激光器的预抽运技术[J]. 中国激光, 2003, 30(7): 585-589.
- [10] Qi Yunfeng, Lou Qihong, Zhang Yinghua, et al. Study on Ti:Sapphire end-pumped Nd:YAG ceramic laser passively Q-switched by Cr<sup>3+</sup>:YAG [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(11): 1449-1454. (in Chinese)  
漆云凤, 楼祺洪, 张影华, 等. Cr<sup>3+</sup>:YAG 被动调 Q Nd:YAG 陶瓷激光器的研究 [J]. 中国激光, 2005, 32(11): 1449-1454.
- [11] Miao Jieguang, Wang Baoshan, Peng Jiyang, et al. Efficient diode-pumped passively Q-switched laser with Nd:YAG/Cr:YAG composite crystal [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(1): 137-141.
- [12] Zhuang Shidong, Yu Haohai, Wang Zhengping, et al. Passively Q-switched Nd:Gd<sub>0.63</sub>Y<sub>0.37</sub>VO<sub>4</sub>/Cr<sup>3+</sup>:YAG microchip laser [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2011, 318(1): 691-694.
- [13] Lei H, Gong M, Ping Y, et al. Repetition rate continuously controllable passively Q-switched Nd:YAG bonded microchip laser [J]. *Laser PhysLett*, 2007, 4(8): 572-575.
- [14] Jean-Philippe Fève, Nicolas Landru, Olivier Pacaud. Triggering passively Q-switched microlasers [C]//Advanced Solid-State Photonics (ASSP), OSA Trends in Optics and Photonics, 2005, 98: 373-378.