

主控抽运被动调 Q 激光器和输出特性

曹宗英^{1,2} 朱少岚^{1*} 孙传东¹ 高存孝^{1,2}

(¹ 中科院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)
² 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 对脉冲抽运与增益预抽运的微腔 Cr⁴⁺:YAG/Nd:YAG 被动调 Q 激光器的稳定性进行了理论和实验研究。结果表明在抽运时抽运脉宽和重复率较大的情况下, 输出激光脉冲相对于抽运脉冲抖动范围明显加大。针对此情况, 采用压缩抽运脉宽和降低重复率的方法获得了波长为 1.06 μm、脉宽为 3.8 ns、单脉冲能量为 65 μJ、相对抽运脉冲的抖动范围小于 0.8 μs 的激光输出。同时分析了增益预抽运的优势和缺点。

关键词 激光器; 被动调 Q; 时间延时; 脉冲抽运; 增益预抽运

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s1.0004

Output Characteristic of Actively-Controllable Passively Q-Switched Laser

Cao Zongying^{1,2} Zhu Shaolan¹ Sun Chuandong¹ Gao Cunxiao^{1,2}

(¹ State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xian, Shaanxi 710119, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract The micro-cavity Cr⁴⁺:YAG/Nd:YAG passively Q-switched laser pumped by pulse-pump and pre-pump mechanism is investigated theoretically and experimentally. The experiments show that with large pulse width and high repetition rate of pump pulse, the dependent jitter scope of output laser pulse with pump pulse is increased. By reducing pump pulse width and repetition rate, the 1.06 μm laser with 3.8 ns pulse width and single pulse energy of 65 μJ is obtained. The dependent jitter scope of output laser pulse with pump pulse is lower than 0.8 μs. At the same time, the advantage and disadvantage of pre-pump mechanism is analyzed.

Key words lasers; passively Q-switched; time delay; pulse pump; prepumping

1 引 言

由于不需要高压、快速电光驱动器或射频调制器, 激光二极管(LD)抽运的微腔被动调 Q 激光器以其设计结构简单、体积小、价格低廉而且可靠性高的特点被广泛地应用于实现高重复率、窄脉冲宽度、高功率的激光脉冲序列输出, 在远程测量、三维成像、环境监测、医学等众多领域都有广泛的应用^[1]。近年来, 关于被动调 Q 激光器已经有很多研究报告^[2~8]。我们在实验中发现, 用脉冲光抽运时, 在抽运脉宽较宽的情况下, 输出脉冲相对于抽运脉冲的

抖动范围会增大, 同样抽运脉冲重复频率的增大也会使这种时间延时抖动加剧, 增益预抽运下的调 Q 激光器也会出现这种情况, 巩马理等^[9]对此有过报道, 认为在增益预抽运的情况下减小直流偏置分量可以减小这种抖动。

本文分析了以上情况出现的原因, 通过调节抽运占空比的方法使实验结果得到改善。实验表明在增益预抽运的情况下, 通过调节抽运脉冲的占空比可以使输出脉冲的时间延时抖动保持在 1 μs 以下。

基金项目: 国家自然科学基金(60777017)资助项目。

作者简介: 曹宗英(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事固体激光器方面的研究。E-mail: czying1982@163.com

导师简介: 孙传东(1966—), 男, 博士, 研究员, 主要从事瞬态场多维信息实时测量与激光技术应用等方面的研究。

E-mail: scd@opt.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: slzhu@opt.ac.cn

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,实验中使用的激光晶体 Nd:YAG 与饱和吸收体 Cr³⁺:YAG 以及 YAG 晶体压合在一起,两端面的平行度小于 10",晶体左端面镀有 808 nm 增透、1064 nm 全反膜,右端面则镀 808 nm 全反、1064 nm 部分反射膜,反射率为 60%,晶体整体长度为 24 mm。这种方法使晶体自身形成激光器谐振腔,不需要对激光晶体和可饱和吸收体调准直。使用自聚焦透镜对抽运光束聚焦。

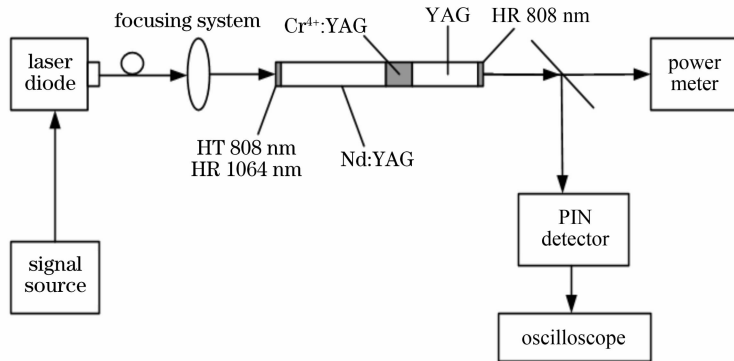


图 1 LD 抽运的微腔被动调 Q 激光器

Fig. 1 Schematic diagram of LD pumped Cr³⁺:YAG passively Q-switched micro-cavity laser

3 实验结果

3.1 脉冲抽运

图 2(a)中上方波形为抽运脉冲波形,其重复率为 2 kHz、脉宽为 200 μs、幅值为 3.25 W;下方波形为输出激光脉冲波形,输出激光脉冲频率同样为 2 kHz,且与抽运脉冲频率一一对应,实现对被动调 Q 的主动控制,脉冲宽度为 4.9 ns。图 2(b)为 10000 个脉冲叠加波形,可看出输出脉冲波形相当稳定,其幅值峰值抖动优于 5%。

在使用 LD 矩形波抽运的过程中,考虑到激光

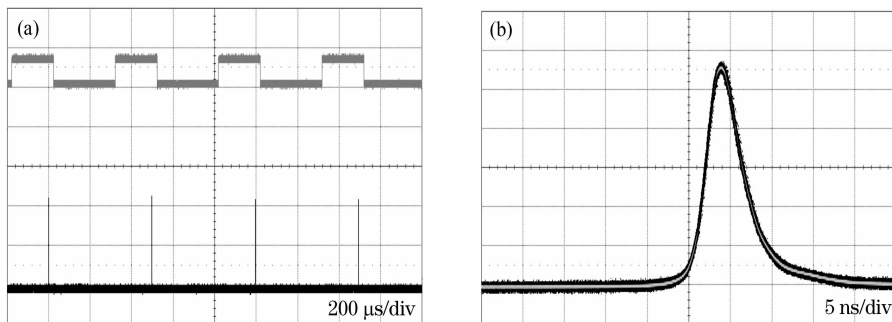


图 2 LD 重复率为 2 kHz,脉宽为 200 μs 时激光输出。(a)调 Q 脉冲序列,(b) 10000 次单脉冲叠加

Fig. 2 Laser output pumped by the LD with 2 kHz repetition rate, 200 μs pulse width. (a) Q-switched pulse trains, (b) overlap of 1000 single pulses

UM4500/50/20 LD 激光器与 PHILIPS PM57858 信号发生器配套使用,输出 0~5 W 波长为 807.8 nm 脉冲激光。信号发生器可产生频率在 1 Hz~125 MHz 范围内频率可调、占空比可调的方波脉冲控制 UM4500/50/20 LD 激光器输出相应频率和脉宽的 807.8 nm 抽运激光脉冲。使用 Gentec-eo 功率计、Lecroy 8600A 6 GHz 示波器和高速 PIN 光电二极管对输出激光参量进行测量。

晶体的上能级寿命为 230 μs,所以控制抽运脉宽在 50~220 μs 之间,重复率在 2~11 kHz 之间。在调 Q 激光器出光后,保持其中一个参量不变,改变另一个参量,发现以下现象:

1) 在相同的重复率下,抽运脉宽与输出脉冲相对于抽运脉冲的时间延时抖动范围成正比。图 3(a)所示的是重复率为 2 kHz 时,输出脉冲时间延时抖动范围与抽运脉宽的关系。抽运脉宽在 56~220 μs 之间变化。可以看出,当抽运脉宽为 220 μs 时,输出脉冲相对于抽运脉冲的时间延时抖动为 10 μs;而当抽运脉宽为 56 μs 时,输出脉冲时间延时抖动范

围仅为 $0.4 \mu\text{s}$ 。

2) 在相同的抽运脉宽下,抽运重复频率与输出激光脉冲时间延时抖动范围成正比。图 3(b)所示的是抽运脉宽为 $53 \mu\text{s}$ 时,输出单脉冲的相对抖动范围与抽运重复率之间的关系,抽运重复率在 $2 \sim$

11 kHz 之间变化。可以看出,当抽运脉冲重复频率为 11 kHz 时,输出脉冲对于抽运脉冲的时间延时抖动为 $3.2 \mu\text{s}$;抽运重复率为 2 kHz 时,输出脉冲时间延时抖动范围仅为 $0.3 \mu\text{s}$ 。

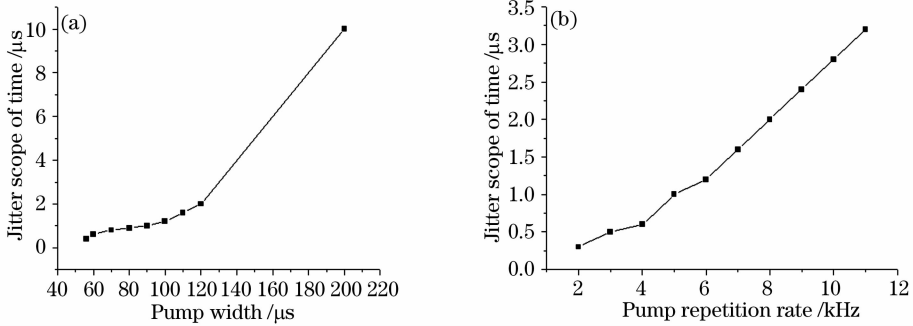


图 3 脉冲抽运下(a)抽运脉宽和(b)抽运重复率与脉冲时间延时抖动范围的关系

Fig. 3 Variation of (a) pump pulse width and (b) pump repetition rate with jitter scope of time delay by pulse pump

3.2 增益预抽运

增益预抽运^[10]的原理如图 4。增益预抽运是一个周期过程,每一个周期包含两个阶段。第一个阶段采用低于阈值的直流偏置分量 I_b 进行抽运,使激光晶体内部的反转粒子数尽可能地接近临界区域,这时 Q 开关不会打开,同时保证每一次激光器发出脉冲的初始条件保持一致。第二个阶段采用一个又窄又高的抽运脉冲分量 I_p 来抽运,使反转粒子数迅速超过临界区域,这时 Q 开关开启,形成激光脉冲。增益预抽运使调 Q 激光器产生脉冲前,增益介质中的反转粒子数保持稳定,从而在一定程度上减小了调 Q 开关开启时间的不确定度^[9~12],改善输出脉冲的稳定性。

图 5(a)是抽运脉宽为 $60 \mu\text{s}$,重复率为 $2 \sim 11 \text{ kHz}$ 时,输出脉冲时间延时抖动范围;图 5(b)是抽运重复率为 6 kHz ,脉宽为 $20 \sim 140 \mu\text{s}$ 时,输出脉冲延时抖动范围。可以看出在增益预抽运的情况下,当抽运脉冲的占空比较大时,调 Q 激光器输出

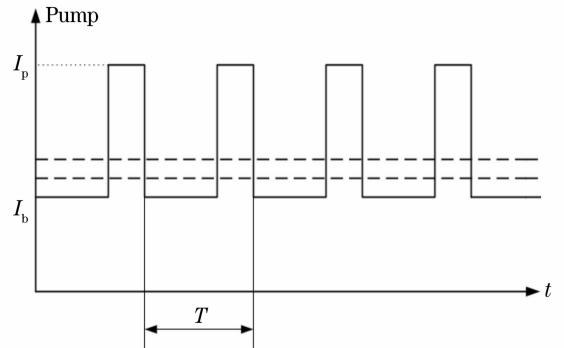


图 4 增益预抽运下抽运功率随时间的变化

Fig. 4 Variation of pump power with time by pre-pump pulse 脉冲的时间延时抖动范围很大,达到 $5 \mu\text{s}$ 以上。

所以,在增益预抽运情况下,只有在较小的占空比下才能获得相对抖动范围小于 $1 \mu\text{s}$ 的单脉冲。图 6 所示的是重复率为 $0.1 \sim 3 \text{ kHz}$ 、脉宽为 $15 \mu\text{s}$ 时脉冲时间延时抖动范围。可以看出,脉冲时间延时抖动范围基本在 $1 \mu\text{s}$ 之内。

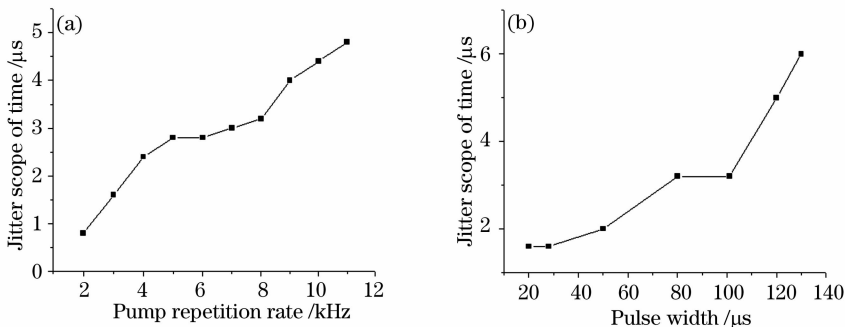


图 5 增益预抽运下(a)抽运脉宽和(b)抽运重复率与脉冲时间延时抖动范围的关系

Fig. 5 Variation of (a) pump pulse width and (b) pump repetition rate with time jitter scope by prepump

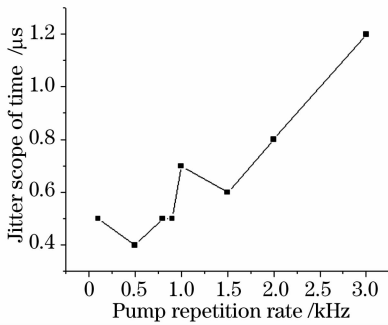


图 6 增益预抽运下重复率与脉冲时间延时抖动范围的关系

Fig. 6 Variation of pump repetition rate with time jitter scope by prepump

4 结果分析

4.1 抽运脉宽以及重复率对输出脉冲时间延时抖动范围的影响

在脉冲抽运的过程中出现这种输出脉冲的时间延时抖动主要原因是,在整个抽运过程中,某一个抽运周期,增益在较短时间内使饱和和吸收体漂白,使激光输出的时间提前;而在另一个抽运周期,由于输出脉冲幅值有一定的变化,导致前一次输出后上能级粒子数消耗较大,使得下一次增益需要较长时间的抽运积累才能漂白饱和吸收体,这样就造成脉冲输出延迟,这两种情况在抽运过程中交替反复发生,使得调 Q 激光脉冲不能始终保持相同的周期输出,有了一定的时间延时抖动范围。

这种情况在抽运脉宽较宽或抽运重复率加大时比较严重,除了上述原因之外,最重要的是因为整个抽运周期内占空比增大,使得在输出脉冲后剩余的反转粒子数在本次抽运周期结束而下一次抽运周期到来前没有完全消耗尽,这样使得每一次的脉冲输出的初始条件有很大不同,从而使输出脉冲时间延时抖动范围加大。

解决这种问题的办法是在保持抽运重复率不变的情况下,减小抽运脉冲宽度,或是保持抽运脉冲宽度不变,减小抽运脉冲的重复率。两种方法的目的都是在整个抽运周期内,使占空比减小,在下一个周期到来之前,上能级的粒子通过自发辐射已经消耗尽,所以每一次的脉冲输出初始条件基本相同,从而达到减小输出脉冲时间延时抖动范围的目的。

4.2 直流偏置分量对输出脉冲时间延时抖动的影响

增益预抽运的特殊抽运方式下,直流分量 I_b 在抽运时应当起到隔离作用,屏蔽脉冲之间的相互干扰,减小腔内剩余反转粒子数、饱和吸收体初始透射

率以及晶体热效应对 Q 开关时间的影响,使每次激光脉冲输出之前,粒子反转数积累达到基本相近水平。因此除上述原因之外,当 I_b 过高时,使增益介质内的反转粒子数始终保持在阈值以下某一个位置,不容易产生自发辐射,前一次调 Q 激光器脉冲输出后剩余的上能级粒子数不能被及时地消耗掉,所以增益预抽运时输出脉冲时间延时抖动范围增大。因此在增益预抽运时要注意优化参量,即直流分量的设定应当小于激光器的阈值。并且在保证输出能量和峰值功率的基础上,使抽运脉宽和重复频率较小。

5 结 论

本文针对 LD 抽运的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}/\text{Nd}:\text{YAG}$ 被动调 Q 激光器在脉冲抽运和增益预抽运下的分析研究得知,抽运脉冲占空比与调 Q 激光器输出脉冲的时间延时抖动成正比。所以通过压缩抽运周期内占空比的方法可以减小输出脉冲的时间延时抖动。

增益预抽运的优势在于减小了调 Q 开关开启时间的不确定度,改善输出脉冲的稳定性。但是直流偏置分量设定得过高会使输出脉冲的时间延时抖动加剧,在这种情况下,要通过压缩抽运周期内占空比以及优化预抽运参量的方法来获得高功率、窄脉冲、稳定的激光输出。

参 考 文 献

- 1 J. J. Zayhowski. Passively Q-switched microchip lasers and applications[J]. *Rev. Laser Engng.*, 1998, **26**(12): 841~846
- 2 Zhou Shouhuan, Lee K K, Chen Y C. Monolithic self-Q-switched $\text{Cr}:\text{Nd}:\text{YAG}$ laser[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(2): 511~512
- 3 Li hiquan, Shou Shouhuan, Wang Pei *et al.*. Self-Q-switched diode-end pumped $\text{Cr},\text{Nd}:\text{YAG}$ laser with polarized output[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(3): 203~204
- 4 Chen Jun, Ge Jianhong, Hong Zhi *et al.*. LD pumped $\text{Cr}^{4+}, \text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ self Q-switched laser[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2000, **12**(1): 1~4
陈 军,葛剑虹,洪 治等. LD 抽运的 $\text{Cr}^{4+}, \text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 自调 Q 激光器研究[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(1): 1~4
- 5 Wang Mingwei, Xing Qirong, Wang Qingyue *et al.*. Experimental study on a CW $\text{Nd}:\text{YAG}$ laser Q-switched by $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ absorber[J]. *Chin. J. Lasers*, 1998, **25**(10): 872~876
王明伟,邢岐荣,王清月等. CW $\text{Nd}:\text{YAG}$ 激光器中 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 被动调 Q 的实验研究[J]. *中国激光*, 1998, **25**(10): 872~876
- 6 Ou Pan, Yan Ping, Gong Mali *et al.*. LD-pumped passively Q-switched $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ microchip laser and its stability[J]. *Acta Optical 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 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 微晶片激光器及其稳定性[J]. *光学学报*, 2002, **22**(12): 1465~1469
- 7 Rao Haibo, Liao Yun, Cheng Jianbo *et al.*. Laser diode pumped passively Q-switched monolithic microchip laser based on liquid phase epitaxy[J]. *Acta Optical Sinica*, 2007, **27**(1): 90~93

- 饶海波, 廖 云, 成建波等. 外延单片式激光二极管抽运被动调 Q 微激光器[J]. 光学学报, 2007, **27**(1): 90~93
- 8 Liang Tian, Ding Zheng, Qi Wenzong. Numerical simulations of upconversion effects in passively Q-switched solid-state lasers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(6): 791~796
- 梁 田, 丁 征, 齐文宗. 被动调 Q 固体激光器上转换效应的数值模拟[J]. 中国激光, 2007, **34**(6): 796~796
- 9 Gong Mali, Yan Ping, Xie Tao *et al.*. Study of pre-pumping mechanism for passively Q-switched laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(7): 585~589
- 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 Wang Weiyu, Gong Mali, Liu Zhanxin *et al.*. Stability of passively Q-switched solid-state lasers and pre-pumping mechanism[J]. *Laser & Infrared*, 2000, **30**(2): 74~77
- 王为宇, 巩马理, 刘占兴等. 被动调 Q 固体激光器的稳定性及增益预抽运技术[J]. 激光与红外, 2000, **30**(2): 74~77
- 11 Hong Zhi, Chen Jun, Ge Jianhong. Self Q-switched controllable output of LD pumped Cr⁴⁺, Nd³⁺ codoped YAG laser using pre-pumping method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(10): 913~916
- 洪 治, 陈 军, 葛剑虹. 用预抽运技术实现 Cr⁴⁺, Nd³⁺ 双掺 YAG 激光器自调 Q 可控输出[J]. 光子学报, 2000, **29**(10): 913~916
- 12 Yang Yubing, Wen Jianguo, Wang Shiyu *et al.*. Study on parameter of pre-pumping technology of DPL passively Q-switched[J]. *Laser J.*, 2005, **26**(5): 15~17
- 杨昱冰, 文建国, 王石语等. 被动调 Q DPL 激光器预抽运技术的参量研究[J]. 激光杂志, 2005, **26**(5): 15~17