

## LD 泵浦 Nd:YAG 1.06 $\mu\text{m}$ 脉冲串激光及放大研究

段加林<sup>1</sup>, 李旭东<sup>2</sup>, 武文涛<sup>2</sup>, 林森<sup>2</sup>, 樊荣伟<sup>2</sup>, 董志伟<sup>2</sup>, 周志刚<sup>2</sup>, 陈德应<sup>2</sup>

(1. 中国空间技术研究院 载人航天总体部, 北京 100094;

2. 哈尔滨工业大学 可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 近年来随着光电技术应用需求的增长, 诸如平面激光诱导荧光技术、激光探测和激光加工等越来越多的领域展现出对高重频大能量的脉冲激光的需求。然而受激光器平均功率的限制, 传统的连续脉冲模式的脉冲激光器难以实现高重频和大能量的兼顾输出。文中研究了一种 LD 泵浦 Nd:YAG 1.06  $\mu\text{m}$  脉冲串激光器及其放大系统。采用长脉冲泵浦、腔内调制和 MOPA 放大技术, 实现了一段时间内激光器的高重频和大能量的兼顾输出。在调 Q 重频分别为 10、50、100 kHz 时, 脉冲串能量分别达到 170.4、211.8、220.3 mJ, 每串内分别包含 2 个、12 个、25 个脉冲, 单脉冲能量分别为 85.2、17.7、8.8 mJ。

**关键词:** 脉冲串; 平面激光诱导荧光; 激光放大; 高重频; 高能量

**中图分类号:** TN212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0105003

## Research on LD pumped 1.06 $\mu\text{m}$ burst-mode laser and the amplification systems

Duan Jialin<sup>1</sup>, Li Xudong<sup>2</sup>, Wu Wentao<sup>2</sup>, Lin Sen<sup>2</sup>, Fan Rongwei<sup>2</sup>, Dong Zhiwei<sup>2</sup>,  
Zhou Zhigang<sup>2</sup>, Chen Deying<sup>2</sup>

(1. Institute of Manned Space System Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** In recent years, with the increasing demand for optoelectronic technology applications, more and more fields such as Plane Laser Induced Fluorescence, laser detection and laser processing have shown the demand for high-repetition-rate and high-energy pulsed lasers. However, due to the limitation of average power, it is difficult for the conventional continuous pulsed lasers to achieve pulsed laser output with high repetition rate and high energy. In this paper, an LD-pumped 1.06  $\mu\text{m}$  Nd:YAG burst-mode laser and its amplification system were studied and demonstrated. By employing long pump duration, burst-mode technique, and MOPA amplification scheme, the laser output with high repetition rate and high energy was obtained in the burst duration. After dual-stage amplification, the burst energy reached 170.4, 211.8, and 220.3 mJ at Q-switching repetition rate of 10, 50, and 100 kHz, containing 2, 12 and 25 pulses in one pump duration, respectively. The single pulse energy reached 85.2, 17.7, and 8.8 mJ, respectively.

**Key words:** burst mode; PLIF; laser amplifiers; high repetition rate; high energy

收稿日期: 2018-08-11; 修订日期: 2018-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(61505042)

作者简介: 段加林(1984-), 男, 工程师, 博士, 主要从事电子信息工程方面的研究。Email: 85452680@qq.com

导师简介: 李旭东(1980-), 男, 副研究员, 博士生导师, 主要从事固体激光技术方面的研究。Email: kevin2025@163.com

## 0 引言

近年来随着激光技术在民用和国防上扮演着越来越重要的角色,诸如平面激光诱导荧光(Plane Laser Induced Fluorescence, PLIF)成像、激光探测和激光加工等越来越多的领域展现出对高重复大能量脉冲激光的需求<sup>[1-11]</sup>。然而,常规的重频工作模式的脉冲激光受平均功率的限制,难以兼顾实现高重复频率和大单脉冲能量输出,这直接限制了相关应用的发展。

“脉冲串”激光是一种让脉冲激光间断式输出的工作模式。在脉冲串持续时间内,激光器输出脉冲激光,脉冲串持续时间结束后停止输出直到下一个周期开始。这种技术可以一定程度上解决传统的连续重频工作模式的半导体泵浦固体激光器的输出限制,在较短的时间内实现兼顾高重频和大能量的脉冲输出<sup>[12-13]</sup>。配合 MOPA 放大结构可进一步提高输出脉冲的能量,从而在一定程度上满足实用需求。2013 年 9 月,美国 University of Wisconsin-Madison 的 W.C. Young 等人搭建的激光系统,采用 3 个双通灯泵放大模块和 3 个单通灯泵放大模块,将高重频(5~250 kHz)Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器产生的脉冲能量放大到 2 J/串,子脉冲重频 250 kHz<sup>[14]</sup>。同年, Mikhail N. Slipchenko 等人展示了一种 LD 泵浦准连续脉冲串激光器,采用商用的重频 100 kHz 的 Yb 光纤激光器作为脉冲源,用 1 个带宽 1 MHz 的电光调制器实现激光脉冲选取,选取的种子光单脉冲能量 10 μJ,然后通过 2 个双通的 LD 放大模块进行能量预放,最后通过 1 个双通的 LD 放大模块将脉冲能量在 30 ms 泵浦时间内放大到 120 mJ<sup>[12]</sup>。2014 年 11 月,美国 Spectral Energies 的 Sukesh Roy 等人采用 2 个单通和 2 个双通的 LD 泵浦模块、2 个单通和 2 个双通的灯泵模块对脉冲串激光进行放大,获得了脉冲串能量达 110 J,子脉冲重频为 10 kHz~1 MHz,子脉冲个数 100~10 000 个可调,子脉冲宽度达 100 ps,单个子脉冲能量达 650 mJ,该激光可用于实时测量 NO 或 CO 分子的碰撞寿命,以及应用于 PLIF 实验<sup>[15]</sup>。

声光调 Q 是一种适合于产生高重频脉冲的主动调 Q 技术,相比于电光调 Q,其在高重频状态下不会受到压电振铃效应的影响,同时也没有对偏振状态

的要求,非常适合于振荡级高重频脉冲激光的产生。另外,随着电光晶体技术的发展,虽然利用 BBO 晶体、RTP 晶体也可实现高达几十千赫兹的重复频率,但由于其半波电压高(BBO 半波电压 46 kV, RTP 半波电压 8 kV)、价格昂贵、高性能电光器件国外禁运等原因,也限制了高重频电光调 Q 技术的发展。

文中开展了 LD 泵浦 1.06 μm 声光调 Q 脉冲串式 Nd:YAG 激光器的研究工作。利用腔内调制实现脉冲串激光的灵活选取,并对输出的脉冲串激光进行了放大研究,实现了泵浦时间范围内高重复频率与大单脉冲能量兼得的激光输出。

## 1 实验装置

实验方案如图 1 所示。其中 M1 和 M2 为平面镜。M1 镀有 1 064 nm 的高反射膜, M2 镀有 1 064 nm 透过率为 45% 的膜, M1 和 M2 构成振荡级谐振腔。振荡级采用 808 nm LD 泵浦的 Nd:YAG 作为激光介质,掺杂浓度为 1.1 % at.%, 晶体棒直径 3 mm, 长度 75 mm。LD 的泵浦脉宽 250 μs。声光调 Q 开关用于产生每个脉冲串中的高重频子脉冲。DG535 和 DG645 为脉冲延时器,用于控制泵浦 LD 和声光 Q 开关的工作时序。

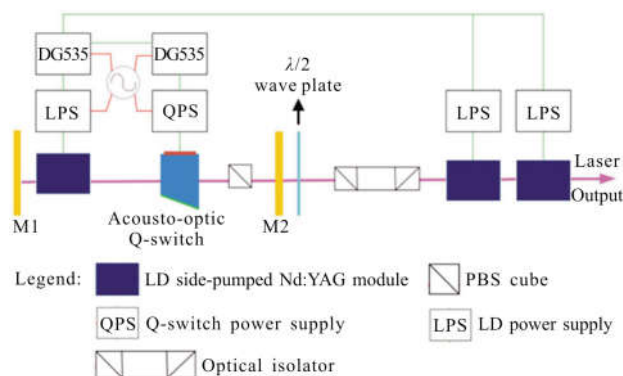


图 1 激光器装置示意图

Fig.1 Layout of the experimental setup

MOPA 结构采用两级放大,均采用 LD 侧泵 Nd:YAG 模块作为放大器, Nd:YAG 晶体掺杂浓度 0.6% at.%,直径 5 mm,长度 75 mm。为防止放大级的光反馈对振荡级造成损坏,在系统中加入了隔离组件。激光器输出脉冲波形利用示波器(型号 Tek 7104,带宽 1 GHz)和光电探测器(型号 DET10A,带宽

350 MHz, 上升时间 1 ns)进行观测。

## 2 实验结果和讨论

### 2.1 振荡级脉冲串激光输出实验

在脉冲串重频  $f_A=20$  Hz, LD 泵浦宽度  $\tau_1=250$   $\mu$ s, 调 Q 频率 10 kHz 的参数下, 不同透过率下激光输出能量随 LD 电流变化的关系如图 2 所示。从结果可以看出, 从能量输出最大的角度出发, 输出镜最佳透过率选用 45%。以下实验均使用透过率 45% 的输出耦合镜。

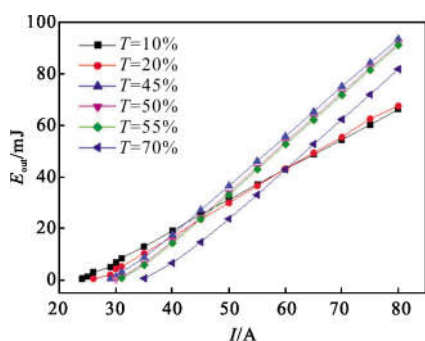


图 2 不同透过率下输出脉冲串能量随电流变化曲线

Fig.2 Burst energy versus pump current under different output transmittance

图 3 展示了脉冲串重频  $f_A=20$  Hz, LD 泵浦宽度  $\tau_1=500$   $\mu$ s, 泵浦电流  $I=60$  A 时, 不同调 Q 重频下的脉冲波形。在调 Q 重频  $f_B$  分别为 10、20、30、40、50 kHz 的条件下, 每个脉冲串内得到的子脉冲个数分别为 5、10、15、20、24 个。由图可以看出在调 Q 重频比较低时, 脉冲串内子脉冲的功率稳定性很好, 随着调 Q 重频逐渐变大, 由于泵浦速率无法保证每个子脉冲得到足够大的增益, 使得脉冲稳定性降低。单脉冲波形如图 3(f)所示。

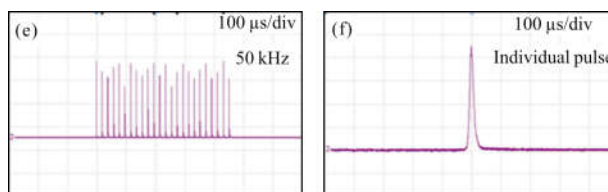
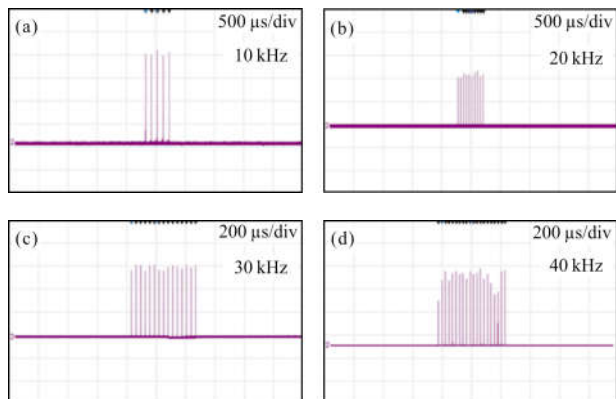


图 3 不同调 Q 重频下的输出波形 (脉冲串重频  $f_A=20$  Hz, 脉冲串宽度  $\tau_1=500$   $\mu$ s, 泵浦电流  $I=60$  A)

Fig.3 Output waveform profiles under different Q-switching repetition rate (burst frequency, burst duration, and pump current fixed at 20 Hz, 500  $\mu$ s, and 60 A, respectively)

图 4 展示了在 LD 重频  $f_A=20$  Hz, 泵浦电流  $I=60$  A,  $\tau_1=500$   $\mu$ s 的情况下, 单脉冲宽度随调 Q 重频的变化关系。可以看到单脉冲宽度随着调 Q 重频的升高而增加。图 5 展示了在 LD 泵浦宽度  $\tau_1=500$   $\mu$ s, LD 工作电流  $I=70$  A 的情况下, 不同泵浦重频的脉冲串输出能量随调 Q 重频的变化关系。脉冲串输出能量随着调 Q 重频的升高而增大。泵浦重频对脉冲串能量也有影响, 主要原因可能是不同泵浦重频下, 激光器产生的热效应不同。重频越高, 激光器的热效应会相对严重一些, 从而导致脉冲串能量降低。

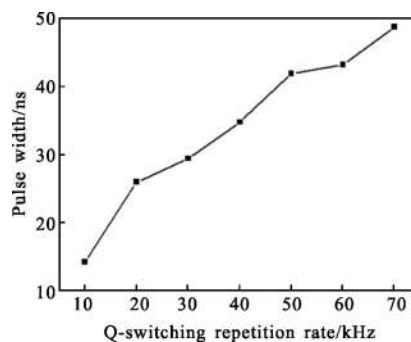


图 4 单脉冲宽度随调 Q 重频的变化情况

Fig.4 Pulse width versus Q-switching repetition rate

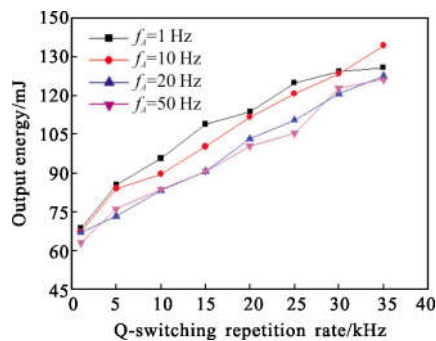


图 5 脉冲串输出能量随调 Q 重频变化情况

Fig.5 Burst energy versus Q-switching repetition rate

### 2.2 脉冲串激光放大实验

为了方便描述,下面论述激光振荡级,第一放大级,第二放大级时所有参数分别用下标“0”、“1”、“2”表示。如  $I_1$  指一级放大的泵浦电流,  $E_1$  指一级放大的输出能量。放大实验中 LD 模块的泵浦重复频率设置为  $f_A=20$  Hz, 泵浦脉宽  $\tau_1=250$   $\mu$ s。在振荡级电流  $I_0=80$  A, 调 Q 重频  $f_B$  分别为 10、50、100 kHz 时, 分别测定了输出能量随一级放大模块注入泵浦电流的变化关系, 具体如图 6 所示。

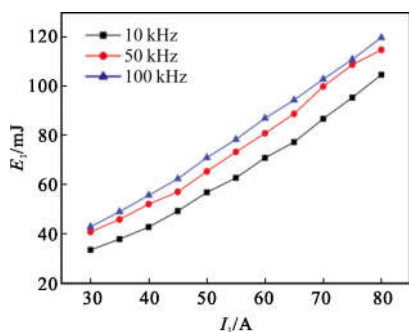


图 6 一级放大脉冲串能量随放大模块泵浦电流变化关系

Fig.6 Burst energy versus pump current for the output of amplifier stage one

在振荡级和放大级电流  $I_0$  和  $I_1$  都为 80 A 时, 经测试调 Q 重频为 10、50、100 kHz 时对应的第一级放大输出脉冲串能量分别为 104.6、114.7、119.7 mJ。将其注入第二级放大中, 二级放大后的脉冲串能量随二级放大模块的泵浦电流变化如图 7 所示。

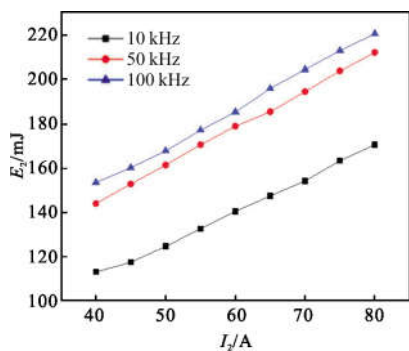


图 7 二级放大脉冲串能量随放大模块泵浦电流变化关系

Fig.7 Burst energy versus pump current for the output of amplifier stage two

经过二级放大, 在  $f_B=10$  kHz 时获得了脉冲串能量为 170.4 mJ, 每串中包含 2 个子脉冲, 每个脉冲单脉冲能量达 85.2 mJ, 峰值功率 6.09 MW。50 kHz 获

得的脉冲串能量为 211.8 mJ, 每串中包含 12 个子脉冲, 子脉冲单脉冲能量达 17.7 mJ, 峰值功率 1.04 MW。100 kHz 时获得的脉冲串能量为 220.3 mJ, 每串中包含 25 个子脉冲, 子脉冲单脉冲能量达 8.8 mJ, 峰值功率 0.46 MW。

为了描述脉冲串内子脉冲能量的稳定性, 引入统计学中的变异系数, 其定义为一组数据标准差和平均值的比值。变异系数越大则表明稳定性越低。根据实验数据计算得振荡级、一级放大、二级放大输出脉冲串内子脉冲强度值变异系数分别为  $CV_0=36.09\%$ ,  $CV_1=14.41\%$ ,  $CV_2=5.78\%$ 。图 8 可以看到随着放大的过程, 由于增益饱和的作用, 脉冲的能量稳定性明显提高。

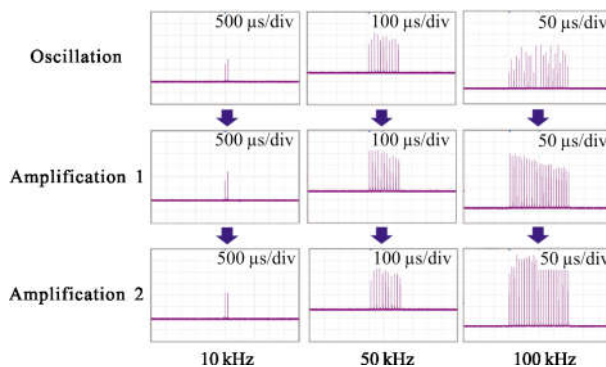


图 8 不同重频下的脉冲稳定性

Fig.8 Pulse stability under different repetition rate

### 3 结论

文中研究了一种基于腔内调制的 LD 泵浦 1.06  $\mu$ m 脉冲串激光器及其放大系统。通过脉冲串技术和 MOPA 技术实现了在一定时间内激光器的高重频和大能量兼顾的脉冲激光输出; 同时通过改变 LD 泵浦重频、泵浦宽度和声光调 Q 的重复频率, 可实现脉冲串内子脉冲个数的灵活选取。经过两级放大, 在调 Q 重频分别为 10、50、100 kHz 时, 脉冲串能量分别为 170.4、211.8、220.3 mJ, 单脉冲能量分别为 85.2、17.7、8.8 mJ。脉冲能量稳定性随着放大的过程而提高。这种脉冲串式的高重频大能量 1.06  $\mu$ m 激光器在高速 PLIF 系统、激光探测和激光加工等领域有着较大的应用潜力, 也适合倍频后产生高重频高能量绿光作为染料激光器的泵浦源。

## 参考文献:

- [1] Ni Xuxiang, Hu Kai. Research on multi-pulse train cross-correlation technology in remote laser ranging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1112005. (in Chinese)  
倪旭翔, 胡凯. 脉冲串互相关方法在远程激光测距中的应用[J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1112005.
- [2] Zhong Shengyuan, Li Songshan. Study of multi-pulsed laser ranging technology [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(b09): 797-799.  
钟声远, 李松山. 脉冲串激光测距技术研究 [J]. *红外与激光*, 2006, 36(b09): 797-799. (in Chinese)
- [3] Jiang N. Development of high-repetition rate CH PLIF imaging in turbulent nonpremixed flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(1): 767-774.
- [4] Jiang N. NO PLIF imaging in the CUBRC 48-inch shock tunnel [J]. *Research Article*, 2012, 53: 1637-1646.
- [5] Gattass R R, Cerami L R, Mazur E. Micromachining of bulk glass with bursts of femtosecond laser pulses at variable repetition rates[J]. *Optics Express*, 2006, 14(12): 5279-5284.
- [6] Chen Shanshan, Zhang He, Xu Xiaobin. Modeling and simulation of acquisition for ground target by pulsed laser circular-viewing detection[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(2): 0206001. (in Chinese)  
陈杉杉, 张合, 徐孝彬. 脉冲激光周向探测地面目标捕获建模与仿真[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(2): 0206001.
- [7] Zhang Jian, Yu Yongji, Jiang Chengyao, et al. Experiment comparison of acousto-optical Q-switching and RTP electro-optical Q-switching of high repetition frequency Nd: YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0205002. (in Chinese)  
张健, 于永吉, 姜承尧, 等. 高重频 Nd:YVO<sub>4</sub> 声光调 Q 与 RTP 电光调 Q 激光器实验对比分析[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2): 0205002.
- [8] Liu Qiuyu, Chen Yafeng, Wang Jie, et al. Effects of wavelength shift and energy fluctuation on inversion of NO<sub>2</sub> differential absorption lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(2): 253-260. (in Chinese)  
刘秋武, 陈亚峰, 王杰, 等. 差分吸收 NO<sub>2</sub> 激光雷达波长漂移和能量波动对浓度反演的影响 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(2): 253-260.
- [9] Zhao Zhilong, Wu Jin, Wang Haitao, et al. Experimental demonstration of differential synthetic aperture lidar imaging at very low return level [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(2): 276-283. (in Chinese)  
赵志龙, 吴谨, 王海涛, 等. 微弱回波条件下差分合成孔径激光雷达成像实验演示 [J]. *光学精密工程*, 2018, 26(2): 276-283.
- [10] An Haixia, Deng Kun, Bi Zhiyue. Miniaturization and lightweight technology of high-power laser equipment [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 321-330. (in Chinese)  
安海霞, 邓坤, 闭治跃. 高功率激光装备小型化轻量化技术[J]. *中国光学*, 2017, 10(3): 321-330.
- [11] Ouyang Aiguo, Zhang Yu, Cheng Mengjie, et al. Determination of the content of ethanol in ethanol gasoline using mid-infrared spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(6): 752-759. (in Chinese)  
欧阳爱国, 张宇, 程梦杰, 等. 中红外光谱技术对乙醇汽油乙醇含量的检测[J]. *中国光学*, 2017, 10(6): 752-759.
- [12] Slipchenko M N, Miller J D, Roy S, et al. All-diode-pumped quasi-continuous burst-mode laser for extended high-speed planar imaging [J]. *Opt Express*, 2013, 21(1): 681-689.
- [13] Wu Wentao, Li Xudong, Yan Renpeng, et al. 100 kHz, 3.1 ns, 1.89 J cavity-dumped burst-mode Nd:YAG MOPA laser [J]. *Opt Express*, 2017, 25(22): 26875-26884.
- [14] Young W C, Morton L A, Parkea E, et al. High-repetition-rate pulse-burst laser for Thomson scattering on the MST reversed-field pinch [J]. *IOP Science*, doi:10.1088/1748-0221/8/11/C11013.
- [15] Roy S, Miller J D, Slipchenko M N. 100-ps-pulse-duration, 100-J burst-mode laser for kHz-MHz flow diagnostics[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(22): 6462-6465.