

文章编号:1001-5078(2024)07-1022-06

· 激光器技术 ·

大能量窄脉宽风冷 MOPA 激光器研究

李青松¹,高亦飞¹,汪立军¹,李朝阳²,李 晔¹,林 毅¹,王彤璐¹,韩 松¹,李松柏¹,陈海波¹
(1. 湖北华中长江光电科技有限公司,湖北 孝感 432012;2. 北京长城计量测试技术研究所,北京 100089)

摘要:研制了一种高功率激光二极管阵列(LDA)泵浦下的风冷大能量窄脉宽振荡放大(MOPA)激光器。振荡级采用端面泵浦Nd:YAG晶体、退压式电光调Q的方式,在重复频率25 Hz时,获得了78 mJ单脉冲能量,脉冲宽度5.59 ns,光束质量因子 $M^2 \approx 6.7$ 。激光放大级采用侧面泵浦Nd:YAG板条激光晶体双程放大的方式,在重复频率25 Hz时,获得了439 mJ单脉冲能量,脉冲宽度6.29 ns,峰值功率70.46 MW,光光转换效率为15.25%,光束质量因子 $M^2 \approx 8.8$,连续工作3 min,能量不稳定性小于5%。以脉冲串模式输出时,重复频率1 Hz,子脉冲数量10个,子脉冲间隔2 ms,脉冲包络能量为4.37 J。该激光器采用半导体热电制冷(TEC)配合强制风冷作为散热方式,省去了体积庞大的水冷系统,实现了高功率Nd:YAG激光器的小型化和无水冷化。

关键词:激光二极管阵列;Nd:YAG晶体;脉冲串;振荡放大

中图分类号:TN249;O436 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.07.003

Research on high energy narrow pulse width air-cooled MOPA laser

LI Qing-song¹,GAO Yi-fei¹,WANG Li-jun¹,LI Chao-yang²,LI Ye¹,
LIN Yi¹,WANG Tong-lu¹,HAN Song¹,LI Song-bai¹,CHEN Hai-bo¹

(1 Hubei Huazhong Changjiang Photoelectric Science and Technology Ltd, Xiaogan 432012, China;

2 Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100089, China)

Abstract: An air-cooled large energy narrow pulse width MOPA laser pump by a high power laser diode array (LDA) is developed. The end pump Nd:YAG crystal and decompress electro-optical Q-switching method are used in the oscillation stage and at the repetition rate of 25 Hz, 78 mJ single pulse energy, pulse width of 5.59 ns and beam quality factor of $M^2 \approx 6.7$ are obtained. The laser amplifying stage adopts side-pump zig-zag slab Nd:YAG crystal dual-pass amplification mode, and at the repetition frequency of 25 Hz, a single-pulse energy of 439 mJ with a pulse width of 6.29 ns and a peak power of 70.46 MW was obtained, with an optical conversion efficiency of 15.25%, a beam quality factor of $M^2 \approx 8.8$, and a continuous operation of 3 min with an energy instability of less than 5%. When output in burst mode, the repetition rate is 1 Hz, the number of sub-pulses is 10, the interval of pulses of 2 ms, and the pulse envelope energy of 4.37 J. The laser adopts semiconductor thermoelectric refrigeration (TEC) combined with forced air cool as the heat dissipation mode, eliminating the bulky water cooling system and realizing the miniaturization of high peak power Nd:YAG lasers and no water cooling.

Keywords: laser diode array; Nd:YAG crystal; pulse train; MOPA

作者简介:李青松(1987-),男,博士,高级工程师,主要从事固体激光器及非线性频率转换技术的研究。E-mail: 344251052@qq.com

收稿日期:2023-12-19;修订日期:2024-01-10

1 引言

半导体泵浦固体激光器具有高峰值功率、体积小、寿命长等优点,广泛应用于激光测距、激光成像等技术领域,已成为固体激光器的研究重点^[1-3]。其中,脉冲串激光器独特的脉冲串激光测距体制和高速激光摄影成像等应用而备受关注,如:美国的“门警”光电预警系统,采用单脉冲能量 600 mJ 的脉冲串激光器,对 32 km 高度目标,测距距离可达 300 km^[4],中国兵器工业第 203 研究所对超高速目标的高速摄影等^[5-6]。近年来,由于水冷散热方式存在冷却系统庞大和泄露隐患等问题,半导体热电制冷和强制风冷组合的散热方式成为激光器小型化、便携化的技术主流^[7]。2016 年,董剑等报道了一种单脉冲能量 350 mJ、脉冲宽度 9.7 ns、重复频率 10 Hz、能量不稳定性小于 5% 的固体激光器。激光器对侧面泵浦激光棒和散热模块进行了一体化设计,以 TEC 温控的方式对系统进行了整体冷却^[8]。2019 年,熊波等报道了一种单脉冲能量 200 mJ、脉冲宽度 12 ns、重复频率 20 Hz、能量不稳定性小于 5% 的固体激光器。激光器由于采用端面泵浦和振荡放大(MOPA)的方式,整体热源集中在端面泵浦的 LDA 位置,通过对局部位置进行 TEC 温控,激光器实现了在 -40 ~ 55 °C 范围内的稳定输出^[9]。同年,刘学胜等报道了一种单脉冲能量 1.085 J、脉冲宽度 9.7 ns、重复频率 10 Hz、能量不稳定性小于 3% 的固体激光器。激光器采用侧面泵浦和 MOPA 的方式,对 LD 泵浦模块整体进行 TEC 温控,激光器实现了焦耳级的稳定输出^[10]。但在半导体强制风冷脉冲串激光器方面,国内外鲜有报道。主要是因为脉冲串内大能量将产生瞬间废热,常用的 LDA 无法实现有效散热,增加 LDA 的有效尺寸将会成倍的提升光学设计难度且降低激光器的输出特性。

本文研制了一种具有双模式输出的风冷大能量窄脉宽 MOPA 激光器。振荡级为 LDA 端面泵浦 Nd:YAG 晶体退压调 Q 的非稳腔激光器,激光器腔长为 135 mm,掺杂浓度 1.1% 的 $\phi 5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ Nd:YAG 激光棒和最大峰值功率 2.5 kW 的 LDA 用于振荡级,获得了单脉冲能量 78 mJ、脉冲宽度 5.59 ns、重复频率 25 Hz 的脉冲激光,激光器光束质量 $M^2 \approx 6.7$ 。放大级为侧面泵浦板条晶体双程放大激光器,掺杂浓度 1.1%、底角为 50° 的 8 mm × 8 mm × 133 mm Nd:YAG 板条晶体和最大峰值功率 11 kW 的 LDA 用

于放大级。常规模式下获得了单脉冲能量 439 mJ、脉冲宽度 6.29 ns、重复频率 25 Hz 的脉冲激光。同时,由于对 LDA 进行散热容差设计,激光器支持以脉冲串模式工作。脉冲串模式下,重复频率 1 Hz、子脉冲个数 10 个、子脉冲间隔 2 ms、脉冲包络能量为 4.37 J,平均子脉冲能量为 437 mJ。在正常模式和脉冲串模式下,激光器峰值功率均大于 70 MW。

2 理论分析

Degnan 推导出了脉冲激光器调 Q 过程中脉冲宽度、单脉冲能量与小信号增益的关系为^[11]:

$$E_{\text{out}} = \frac{Ah\nu L}{2\sigma\gamma}(z - 1 - \ln(z)) \quad (1)$$

$$t_p = \frac{t_r}{L} \left[\frac{\ln(z)}{z[1 - \alpha(1 - \ln(\alpha))]} \right] \quad (2)$$

其中, $z = 2g_0l/L$ 为无量纲变量函数, $\alpha = (z - 1)(z \ln(z))$ 。A 为光束截面积; $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 为普朗克常量; ν 为 1064 nm 波段的光子频率; σ 为受激发射截面; $\gamma = 1$ 为简并因子; g_0 为振荡级小信号增益系数; l 为晶体长度; L 为腔内固有损耗。从公式(1)、(2)中可以计算得出振荡级中单脉冲能量和脉冲宽度的对应关系:即,单脉冲能量为 97 mJ 时, z 值约为 34,此时激光器对应输出的脉冲宽度为 4.8 ns。

在激光放大器理论中,板条激光器单程激光脉冲放大器的输入能量 E_{in} 与输出能量 E_1 可表示为^[12]:

$$E_1 = E_s m A \cos(\gamma') f (2 - f) \ln \left(1 + \frac{\exp\left(\frac{E_{\text{in}}}{E_s m A \cos(\gamma') f (2 - f)}\right) - 1}{\exp(g'_0 l')} \right) \quad (3)$$

式中, E_{in} 为输入能量密度; E_s 为增益介质的饱和能量密度; E_1 为输出能量密度; m 为级间扩束倍率; g'_0 为放大级小信号增益系数; l' 为增益介质长度; γ' 为板条内部之字形光路与水平方向的夹角,填充因子 f 为:

$$f = \frac{R}{2h \cos(\theta)} \cdot \frac{1}{\sin(\alpha) + \cos(\alpha) \tan(\arcsin(\frac{\sin(\theta)}{n_2}))} \quad (4)$$

其中, R 为入射光束直径; h 为板条厚度; θ 为激光与板条端面的入射角; α 为板条底角。同样的,板条激光器双程激光脉冲放大器输出能量 E_2 可表示为:

$$E_2 = E_s A \cos(\gamma) f (2 - f) \cdot \ln \left(1 + \frac{\exp\left(\frac{E_1}{E_s A \cos(\gamma) f (2 - f)}\right) - 1}{\exp((1 - \eta_1) g''_0 L)} \right) \quad (5)$$

其中,提取效率 $\eta_1 = (E_1 - E_{in})/g'_0 l E_s, g''_0 = (1 - \eta_1)g'_0$ 为第二程小信号增益系数。表1展示了计算所用参数。

表1 计算所用参数表

Tab.1 Table of parameters used in the calculation

振荡级	L	l/mm	A/mm^2	$h/(\text{J} \cdot \text{s}^{-1})$	γ
	0.05	135	19.6	6.626×10^{-34}	1
放大级	m	R/mm	h/mm	$\theta/(\text{^\circ})$	$\alpha/(\text{^\circ})$
	2	7	8	0	50

3 实验装置

实验装置如图1所示,LDA1峰值功率为2.5 kW,LDA2峰值功率为11 kW,中心波长为808 nm。LDA1尺寸为10 mm×27 mm,LDA2尺寸为7 mm×115 mm,各LDA均采用散热容差设计,即巴条间距由常用的0.35~0.4 mm提升为1.1 mm^[13],快轴发散角 $\theta_{\perp} = 5^\circ$,慢轴发散角 $\theta_{\parallel} = 10^\circ$,并以金属热沉配合TEC进行闭环温度控制。

振荡级通过双柱透镜对LDA1快轴和慢轴分别进行压缩至4.5 mm后耦合进入Nd:YAG晶体,Nd:YAG晶体尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,掺杂浓度1.1%,PBS消光比为1000:1,谐振腔长度为135 mm,输出镜透过率为55%,采用短腔法和RTP晶体退压式调Q的方式对脉冲宽度进行压缩、凹凸非稳腔和高斯镜的方式对光束质量进行约束,谐振腔G参数为1.14,高斯镜为二阶镀膜,有效镀膜尺寸为5 mm。放大级采用LDA2对Nd:YAG板条晶体进行侧面泵浦,Nd:YAG板条晶体掺杂为1.1%,底角为 50° ,晶体尺寸为8 mm×8 mm×133 mm,两通光面镀1064 nm增透膜,泵浦面镀808 nm增透膜,晶体后放置四分之一波片和1064 nm全反镜。其中,四分之一波片用于对高重频大能量情况下激光晶体的热退偏情况进行退偏补偿。同时,振荡级和放大级间设有反向光隔离器和扩束镜组,扩束倍率为2倍。

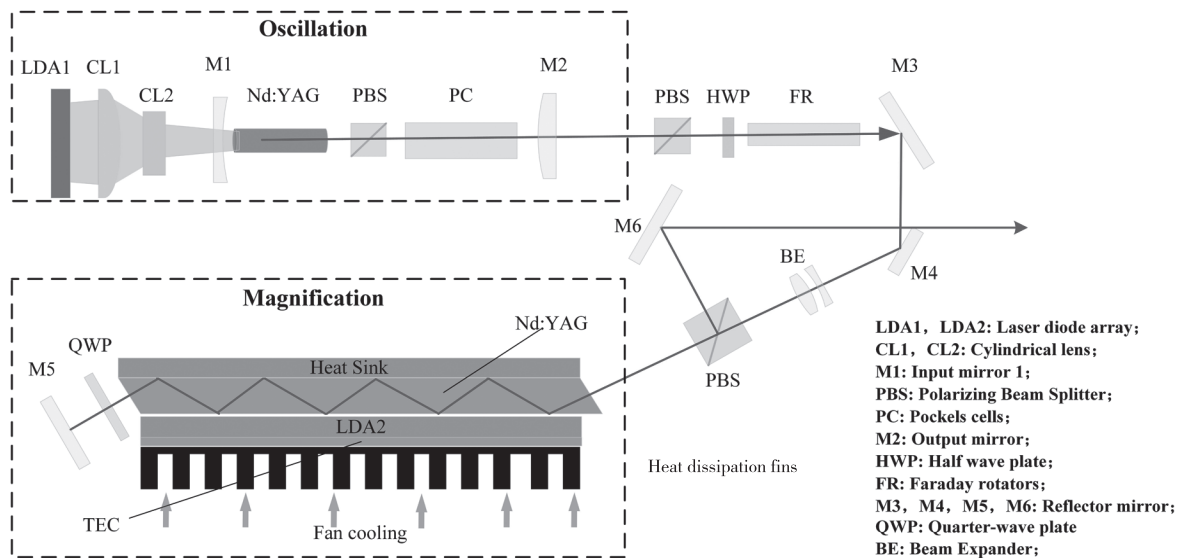


图1 激光实验装置图

Fig.1 Schematic diagram of laser experimental device

4 实验结果及分析

设置LDA1和LDA2的泵浦时间为220 μs ,RTP晶压为2600 V,重复频率为25 Hz,采用Ophir公司的PE100BF-DIF-C能量计对振荡级进行测试,实际输出能量随泵浦电流的测试结果如图2所示。

当LDA1泵浦电流为125 A,泵浦电压为40 V时,最大输出能量为78 mJ,光光转换效率为14.5%。实测激光出口光斑尺寸为4.5 mm,采用焦距为3.5 m的反射式平行光管对此时激光发散角进行套孔法测试^[14],发散角为2 mrad,对应光束质

量 $M^2 \approx 6.7$ 。其中,振荡级泵浦电流为110 A~125 A时,出现增益饱和现象,对此时的激光晶体进行自激振荡测试,发现激光晶体出现了一定程度的自激振荡,即超出有效增益范围的能量以自激形式进行自我耗散^[15]。同时,脉冲宽度测试值和理论计算值存在一定误差,主要原因是腔内损耗 L 大于理论值,引起小信号增益系数降低,最终出现脉冲宽度测试值大于理论计算值。为保证激光器长时间工作的热稳定性,控制振荡级输出能量为70 mJ,脉冲宽度为5.59 ns。

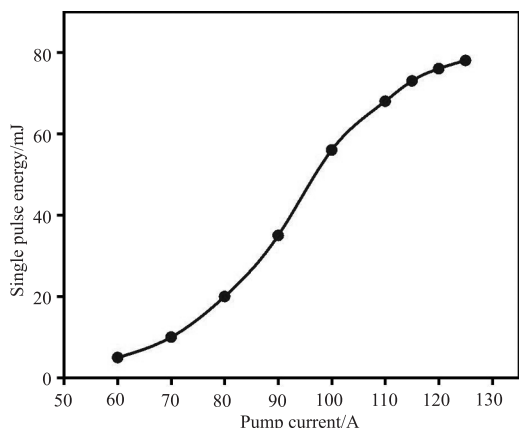
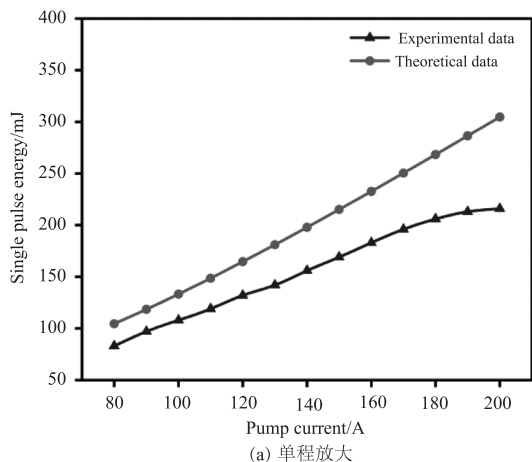


图2 振荡级输出激光单脉冲能量随泵浦电流变化曲线

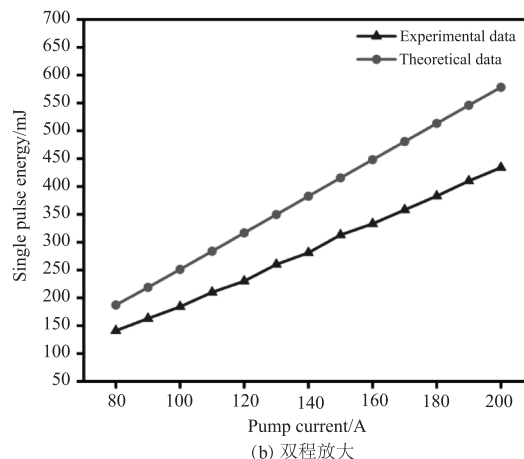
Fig. 2 The single pulse energy of the output laser of the master oscillation changes with the pump current

振荡级激光经隔离器、反射镜、扩束镜组后入射到放大级,采用能量计对单程和双程放大后单脉冲能量随泵浦电流的变化进行测试,测试结果如图3所示。当LDA2泵浦电流为200 A,电压为110 V时,单程放大最大能量为205 mJ,双程放大最大能量为439 mJ,光光转换效率为15.25%,实测单脉冲能量如图4(a)所示,采用套孔法测试双程放大后的光束质量 $M^2 = 8.8$ 。对比振荡级光束质量 $M^2 = 6.7$,经放大后光束质量产生一定程度的劣化,主要是因为放大过程中不仅横模中心位置被放大,其边模位置也被有效放大,且放大后的能量强度已高于 $1/e^2$ 的能量阈值,从而在测量时被计入为有效能量,继而造成光束质量变差的现象。

经放大后的能量实测值和式(1)、(3)计算的理论值相比较低,主要因为振荡级的信号光扩束后并未完全充满放大级的板条晶体进行理论中完全放大,即实际填充比低于式(4)的理论计算值($f = 0.61$),从而出现实测值低于理论值的现象。



(a) 单程放大



(b) 双程放大

图3 放大输出脉冲能量测量值与理论值随泵浦电流变化曲线
Fig. 3 Amplification output pulse energy experimental and theoretical data change curve with pump current



(a) 25 Hz能量实测图

(b) 脉冲串包络能量实测图

图4 激光输出能量实测图

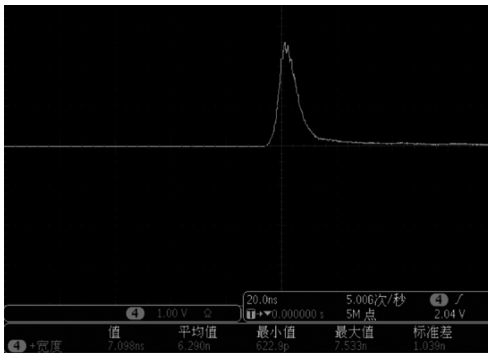
Fig. 4 The test diagram of laser output energy

同时,使用thorlabs公司的DET10A2光电探测器测试双程放大后的脉冲宽度为6.29 ns(参考多次取样后的平均值),如图5(a)所示。可以发现,激光经放大后,脉冲宽度产生了约为0.64 ns的展宽,主要是因为采用FWHM(半峰全宽)的测试方法是针对脉冲的半峰值宽度进行测试,由于放大级增益较强,对振荡级脉冲的上升沿和下降沿均进行了有效增益,进而增大了FWHM的实测值^[16]。

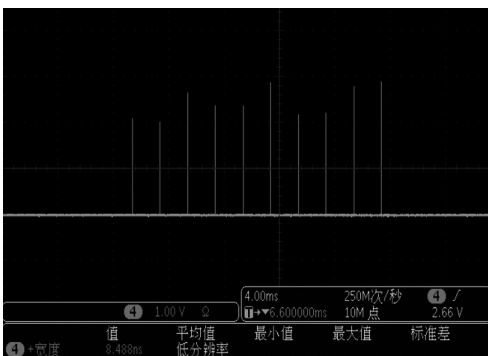
在25 Hz状态下,使激光器连续工作4500次(3 min),对激光能量波动进行测试,激光器输出能量稳定性优于5%,如图6所示。

同时,由于LDA1和LDA2采用散热容差设计,激光器支持以脉冲串模式工作,以脉冲串模式输出时,重复频率为1 Hz,单脉冲包络内含有10个子脉冲,子脉冲间隔为2 ms,实测单脉冲串包络能量为4.37 J,能量包络内能量不稳定性优于5%,子脉冲

间能量不稳定性优于 15%，实测脉冲包络图如图 5 (b) 所示。由于激光器光路在内部需经过多次折转、反射，且脉冲串模式下激光电源中的电容堆尺寸较大，最终系统体积约为 550 mm × 250 mm × 150 mm，总重量为 25 kg (含电源)，整个系统可满足 -40℃ ~ +55℃ 环境下的长时间稳定工作，具有较高的工程化水平。



(a) 放大级激光脉冲宽度测试图



(b) 脉冲串包络测试图

图 5 激光脉冲输出波形

Fig. 5 Profile of the laser pulse output

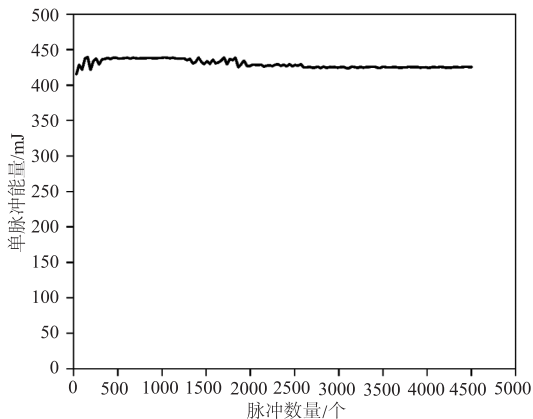


图 6 4500 次 (3 min) 能量波动曲线

Fig. 6 Energy fluctuation curve at 4500 times (3 min)

5 结 论

报道了一台 TEC 冷却高功率激光二极管阵列 (LDA) 泵浦下的风冷大能量窄脉宽 MOPA 激光器。

在重频频率 25 Hz 时，获得了 439 mJ 单脉冲能量，脉冲宽度 6.29 ns，峰值功率 70.46 MW，光光转换效率为 15.25%，能量不稳定性小于 5%。同时，由于激光器泵浦源部分的散热容差设计，激光器支持以脉冲串模式输出，重复频率 1 Hz，子脉冲数量 10 个，子脉冲间隔 2 ms，脉冲包络能量 4 J，子脉冲能量 437 mJ。该激光器采用半导体热电制冷 (TEC) 配合强制风冷作为散热方式，省去了体积庞大的水冷系统，实现了高功率 Nd:YAG 激光器的小型化和无水冷却化，为同行研究无水冷却高能量激光放大技术提供了一定的技术参考。

参 考 文 献:

- [1] Dong Bin, Liu Lei, Liu Yang, et al. Compact and high power nanosecond laser source for space debris detecting [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(8): 953 - 958. (in Chinese)
董彬, 刘磊, 刘洋, 等. 用于空间探测的结构紧凑高功率纳秒激光脉冲光源 [J]. *激光与红外*, 2020, 50(8): 953 - 958.
- [2] Hu Weiwei, Li Yongliang, Gu Xiaokun, et al. Remote laser ranging technology and its development [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(3): 273 - 281. (in Chinese)
胡伟伟, 李永亮, 顾小琨, 等. 远程激光测距技术及其进展 [J]. *激光与红外*, 2019, 49(3): 273 - 281.
- [3] Liu Qi, Meng Junqing, Zu Jifeng, et al. High repetition frequency narrow pulse electro-optically Q-switched laser for space applications [J]. *Chinese J Lasers*, 2017, 44(6): 0601005. (in Chinese)
刘琪, 孟俊清, 祖继锋, 等. 适于空间应用的高重复频率窄脉宽电光调 Q 激光器 [J]. *中国激光*, 2017, 44(6): 0601005.
- [4] Zhong Yuanshan, Li Songshan. Study of multi-pulsed laser ranging technology [J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(9): 797 - 799. (in Chinese)
钟声远, 李松山. 脉冲串激光测距技术研究 [J]. *激光与红外*, 2006, 36(9): 797 - 799.
- [5] Wang Rui, Sun Weiping, Li Hongbing. Application of laser high-speed photography based on area-array CCD to ballistic test [J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2009, 29(5): 197 - 199. (in Chinese)
王瑞, 孙卫平, 李红兵. 基于面阵 CCD 的激光高速摄影技术在弹道测试中的应用 [J]. *弹箭与制导学报*, 2009, 29(5): 197 - 199.
- [6] Li Heng, Jia Yangyu, Qiao Mingjun, et al. The application

- of match serial-pulse laser to high resolution CCD Camera [J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2013, 33(4): 189 – 191. (in Chinese)
- 李衡, 贾养育, 乔明军, 等. 序列脉冲激光器与数字化相机的匹配应用[J]. *弹箭与制导学报*, 2013, 33(4): 189 – 191.
- [7] Gao Guangbo, Ren Shilong, Li Dong, et al. Quasi base-membrane pure air cooled laser diode pumped Nd:YAG laser[J]. *Optical Instruments*, 2013(2): 79 – 85. (in Chinese)
- 高光波, 任士龙, 李栋, 等. 准基模纯风冷激光二极管泵浦 Nd:YAG 激光器[J]. *光学仪器*, 2013(2): 79 – 85.
- [8] Dogn Jian, Liu Xuesheng, Si Hanying, et al. 350 mJ LD side-pumped Q-switched Nd:YAG laser without water cooling[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(11): 1101005. (in Chinese)
- 董剑, 刘学胜, 司汉英, 等. 350mJ LD 侧面抽运 Nd:YAG 无水冷却 Q 激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1101005.
- [9] Xiong Bo, Wei Xiaoyu, Yu Cailiang, et al. Research on 200 mJ semiconductor end-pumped MOPA Laser [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(3): 489 – 492. (in Chinese)
- 熊波, 魏晓羽, 郁彩亮, 等. 200 mJ 半导体端面泵浦 MOPA 激光器研究 [J]. *应用光学*, 2019, 40(3): 489 – 492.
- [10] Liu Xuesheng, Yang Song, Si Hanying, et al. High beam quality water-free pulsed Nd:YAG laser with output energy 1 J [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(12): 1523 – 1530. (in Chinese)
- 刘学胜, 杨松, 司汉英, 等. 1J 高光束质量免水冷脉冲 Nd:YAG 激光器 [J]. *发光学报*, 2019, 40(12): 1523 – 1530.
- [11] Walter Koechner. Solid-state laser engineering Solid-state laser engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002: 411. (in Chinese)
- W. 克希耐尔. 固体激光工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 411.
- [12] Wang J L, Yin L, Shi X C. Theoretical analysis of amplification performance of space-based lasers with different pump configurations [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(6): 591 – 594.
- [13] Wang Peifeng. Study on high-power diode end-pumped all-solid-state laser [D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences, 2011: 37. (in Chinese)
- 王培峰. 大功率半导体激光器端面泵浦全固态激光器研究 [D]. 长春: 中国科学院, 2011: 37.
- [14] Xing Jichuan, Luo Xiaohong, Song Yan. Engineering study on the auto-measurement of divergence angle of the laser beam with the variable diaphragms [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2795 – 2798. (in Chinese)
- 邢冀川, 罗小红, 宋艳. 全自动可变光阑测量激光发散角的工程化研究 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2795 – 2798.
- [15] Ding Lei, Zhao Runchang, Liang Yue, et al. Research of the techniques of restraining the self-oscillations in the preamplifier system of high power laser facility [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(4): 326 – 328. (in Chinese)
- 丁磊, 赵润昌, 梁越, 等. 高功率激光装置预放大系统自激振荡抑制技术研究 [J]. *激光与红外*, 2007, 37(4): 326 – 328.
- [16] Yu Zhenzhen, Zhong Chaoyang, Wang Mingjian, et al. Hundreds-nanosecond pulse-width single-frequency high-energy 1064 nm laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2024, 51(6): 0601006. (in Chinese)
- 于真真, 钟朝阳, 王明建, 等. 百纳秒脉宽单频大能量 1064 nm 激光器 [J]. *中国激光*, 2024, 51(6): 0601006.