光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20250604001

LD端面泵浦高功率窄脉冲激光器研究

黄振鸿[1]，蔡宏川[3]，王　磊[2]，李业秋[1]，崔建丰[1]，岱　钦[1*]

（1. 沈阳理工大学 理学院，沈阳 110159；2. 沈阳理工大学 机械学院，沈阳 110159；3. 抚东机械厂，辽宁 抚顺 113105）

摘　要： 设计了一种基于主振荡功率放大（MOPA）结构的激光二极管（LD）泵浦窄脉宽高功率固体激光器。主振荡级采用掺钕钒酸钇（Nd:YVO_4）晶体作为激光工作物质，结合磷酸钛氧铷电光调Q器件，分析了高重频激光脉宽特性，实现了主振荡级窄脉宽输出；功率放大级采用LD双端泵浦Nd:YVO_4晶体结构，通过建立三维热仿真模型，对比分析了LD单端泵浦和LD双端泵浦激光工作物质的热效应，并讨论了在双端泵浦条件下，LD泵浦光斑、激光工作物质长度等因素对功率放大级热效应的影响。在实验中优化激光器参数，主振荡功率放大后，当重复频率10 kHz时，得到了最大平均功率为22.01 W、脉冲宽度为4.33 ns的1 064 nm激光输出，对应的光-光转换效率为18.21%。

关键词： 激光器；热效应；窄脉宽；高重频；主振荡功率放大

中图分类号： TN248.1　**文章编号：** 1001－5868(2025)04－0680－07

Research on Laser Diode End-Pumped High-Power Narrow-Pulse Lasers

HUANG Zhenhong[1], CAI Hongchuan[3], WANG Lei[2], LI Yeqiu[1], CUI Jianfeng[1], DAI Qin[1]

(1. College of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, CHN; 2. College of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, CHN; 3. Fudong Machinery Factory, Fushun 113105, CHN)

Abstract: A laser diode (LD) pumped, narrow-pulse-width, high-power solid-state laser was designed using a master oscillator power amplifier (MOPA) configuration. The master oscillator stage utilizes a neodymium-doped yttrium orthovanadate (Nd:YVO_4) crystal as the laser gain medium in combination with a rubidium titanyl phosphate (RTP) electro-optic Q-switch. The pulse width characteristics at high repetition rates were analyzed, yielding narrow pulse width output from the master oscillator stage. The power amplifier stage employs a configuration that features LD dual-end pumping of the Nd:YVO_4 crystal. A three-dimensional thermal simulation model was established to comparatively analyze the thermal effects in the gain medium under LD single-end and dual-end pumping. The influence of LD pump spot size and gain medium length on thermal effects in the power amplifier stage under dual-end pumping was investigated. Following experimental optimization of the laser parameters, the MOPA system achieved a maximum average power of 22.01 W with a pulse width of 4.33 ns at a wavelength of 1 064 nm and a repetition frequency of 10 kHz. The corresponding optical-to-optical conversion efficiency was 18.21%.

Key words: laser device; thermal effect; narrow pulse width; high repetition rate; master oscillator power amplifier

收稿日期：2025－06－04.

基金项目：国家重点研发计划（2022YFB4601603）；2022年辽宁省“揭榜挂帅”科技计划重点项目；沈阳理工大学光选科研团队建设项目.

*通信作者：岱　钦

0　引言

随着二极管泵浦固体激光器在工业加工、激光雷达、光学成像及国防等领域的深入应用，高功率、窄脉宽激光器展现出独特的优势，其研发及应用需求日益增长[1-8]。电光调 Q 技术通过电光晶体的快速偏振切换，周期性调控谐振腔损耗，从而实现高重复频率的脉冲输出，其窄脉宽特性源于短腔设计对光子寿命的压缩效应：短腔配合 Q 开关的快速损耗调制，促使储能介质的能量以更陡峭的脉冲前沿释放，进而显著降低脉冲宽度。2014 年，范灏然等[9]报道一种由波长锁定在 878.6 nm 的 LD 双端泵浦掺钕钒酸钇（Nd:YVO_4）声光调 Q 激光器，当重频为 500 kHz、晶体吸收功率 58 W 时，获得 26.1 W 的 1 064 nm 激光输出，光-光转换效率为 45%，脉宽为 44.2 ns。2017 年，董剑等[10]报道一种紧凑型激光 LD 侧面泵浦的高能量全固态 Nd:YAG 主振荡功率放大系统，主振荡器在 10 Hz 重复频率下获得最大脉冲能量为 350 mJ、脉宽为 9.7 ns 的激光输出，放大后得到了能量为 700 mJ、脉宽为 10 ns 的激光输出。2018 年，万玮华等[11]采用基于磷酸钛氧铷（RTP）电光调 Q 技术，设计出双构型 LD 端面泵浦激光器，在 1 kHz 重频下，通过优化泵浦结构分别实现高光束质量动态输出（0.75 mJ）与大能量输出（5.78 mJ），光-光转换效率均超 20%，将激光脉宽压缩至 5.76 ns。

本文设计了一种主振荡功率放大结构的高功率窄脉宽激光器。主振荡级采用 LD 端面泵浦 Nd:YVO_4 激光晶体和 RTP 电光 Q 开关组成短腔结构，功率放大级采用 LD 双端泵浦结构实现功率放大。模拟分析高重频激光输出脉宽特性，对比分析了 LD 单端及双端泵浦结构的激光工作物质的热效应，实验研究了不同重复频率条件下的激光输出特性。最终，当重复频率为 10 kHz 时，得到了最大平均功率为 22.01 W、脉冲宽度为 4.33 ns 的 1 064 nm 激光输出，对应的光-光转换效率为 18.21%。

1　理论分析

1.1　激光脉宽特性分析

在高重复频率电光调 Q 激光器中，激光脉冲最小脉宽的理论极限由增益介质储能特性、调 Q 开关响应时间及谐振腔增益损耗三重机制共同决定[12-13]。由激光速率方程模型，构建包含调 Q 脉冲峰值功率、能量及脉宽参数的解析关系为：

$$P_{po}=\left(\frac{\pi r_m^2 ch\nu_p N_t}{2n}\right)\left(\frac{\gamma_o}{\gamma}\right)\left[-\frac{\ln(1-\eta)}{\eta}-1-\ln\left(-\frac{\ln(1-\eta)}{\eta}\right)\right] \tag{1}$$

$$E_o=\eta N_0\pi r_m^2 lh\nu\gamma_o/2\gamma \tag{2}$$

$$t_w=S_p E_o/P_{po} \tag{3}$$

式中，反转粒子数密度 N_0 需结合泵浦速率、自发辐射寿命及腔损耗表示：

$$N_0=\frac{\left(P_{IN}/h\nu_p\pi r_m^2 l\right)\left[1-\exp\left(-t_p/\tau\right)\right]\tau}{\left[1-(1-\eta)\exp\left(-t_p/\tau\right)\right]} \tag{4}$$

通过公式（1）～（4）推导可得，电光调 Q 激光器的最小脉冲宽度表达式为：

$$t_{min}=\frac{8.1n\cdot h\upsilon_p\pi r_m^2 l\cdot\left[1-(1-\eta)\exp\left(-\frac{t_p}{\tau}\right)\right]}{P_{IN}\cdot\sigma c\cdot\left[1-\exp\left(-\frac{t_p}{\tau}\right)\right]\tau} \tag{5}$$

式中，N_t 为反转粒子数密度，n 为激光工作物质的折射率，η 为提取效率，γ_o 为输出耦合损耗常数，γ 为往返腔损耗常数，S_p 为表征脉冲形状的数字，E_o 为脉冲能量，P_{po} 为峰值功率，σ 为受激发射截面，c 为光速，P_{IN} 为吸收泵浦功率，h 为普朗克常数，υ_p 为泵浦光频率，r_m 为振荡光光斑半径，l 为谐振腔腔长，t_p 为调 Q 脉冲时间间隔，τ 为工作物质的自发弛豫时间。

图 1 展示在重复频率为 10 kHz、腔长分别为 100，150，200 mm 条件下，脉冲宽度随泵浦功率的变化关系。可以看出，输出脉宽随腔长的缩短呈变窄趋势。

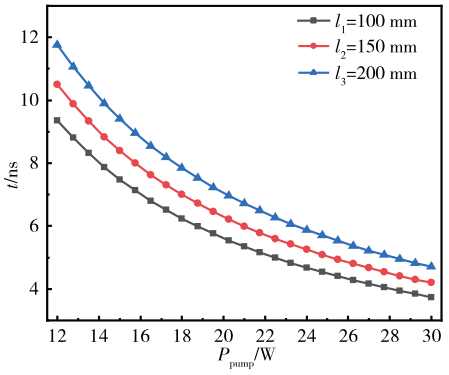


图 1　不同谐振腔长度条件下脉冲宽度与泵浦功率的关系

图 2 为不同重复频率条件下，脉宽随泵浦功率的变化情况，可以看出，输出脉宽随重复频率降低呈现变窄趋势。

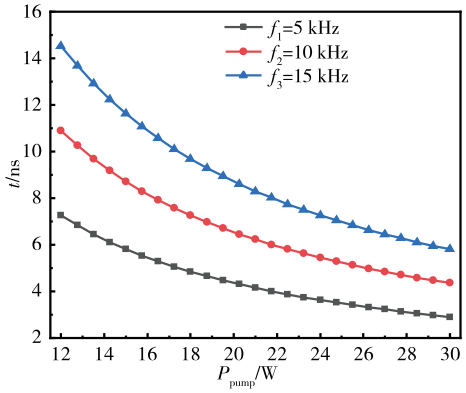


图2 不同重复频率条件下脉冲宽度与泵浦功率的关系

1.2 功率放大级热效应分析

1.2.1 端面泵浦热模型

采用有限元方法，构建了LD单端泵浦和LD双端泵下的三维热模型。泵浦过程的热传导方程[14]可表示为：

$$\frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T(x,y,z)}{\partial z^2}=\frac{-Q(x,y,z)}{K(T)} \tag{6}$$

Nd:YVO_4工作物质的热传导系数随边界温度而变化[15]，沿a/c轴热传导系数不同，可表示为：

$$K(T)=K_{m0}\frac{T_0}{T},\ m=a\ \text{or}\ c \tag{7}$$

光斑大小表示为：

$$\omega_p(z)=\omega_p^2\left(1+\left(\frac{(z-z_0)M_p^2\lambda_p}{n\pi\omega_p^2}\right)^2\right) \tag{8}$$

当单端泵浦光从$z=0$端面入射时，热源函数可表示为：

$$Q_1(x,y,z)=\frac{\eta_Q P_{abs}\alpha}{\pi\omega_p[1-\exp(-\alpha L)]}\exp(-\alpha z)\exp\left[-2\left\{\left(\frac{x-a/2}{\omega_p(z)}\right)^2+\left(\frac{y-b/2}{\omega_p(z)}\right)^2\right\}^2\right] \tag{9}$$

双端泵浦在$z=0$和$z=L$两端同时注入泵浦光，此时热源函数可表示为：

$$Q_2(x,y,z)=\frac{\eta_Q P_{abs}\alpha}{\pi\omega_p[1-\exp(-\alpha L)]}\times\{\exp(-\alpha z)+\exp[-\alpha(L-z)]\}\times\exp\left[-2\left\{\left(\frac{x-a/2}{\omega_p(z)}\right)^2+\left(\frac{y-b/2}{\omega_p(z)}\right)^2\right\}^2\right] \tag{10}$$

式中，K_{a0}=5.5 W/(m^{-1}·K^{-1})，K_{c0}=6.6 W/(m^{-1}·K^{-1})分别为a,c轴方向的热传导系数，α=2.5 mm^{-1}为激光工作物质的吸收系数；a,b,L分别为激光工作物质的宽度、高度、长度；P_{abs}为激光工作物质的吸收功率；ω_p为泵浦的光斑半径；η_Q为热转换系数；M_p^2为光束质量因子；λ_p为泵浦光的波长；n为折射率。

根据工作物质与冷却系统的换热机制，设定激光工作物质的边界条件与初始条件为：

$$\left.\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial x}\right|_{x=\pm\frac{a}{2}}=\frac{h_c}{K_a(T)}\left[T_c-T\left(\pm\frac{a}{2},y,z\right)\right]$$
$$\left.\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial y}\right|_{y=\pm\frac{b}{2}}=\frac{h_c}{K_c(T)}\left[T_c-T\left(x,\pm\frac{b}{2},z\right)\right]$$
$$\left.\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial z}\right|_{z=\pm\frac{L}{2}}=\frac{h_a}{K_a(T)}\left[T_r-T\left(x,y,\pm\frac{L}{2}\right)\right] \tag{11}$$

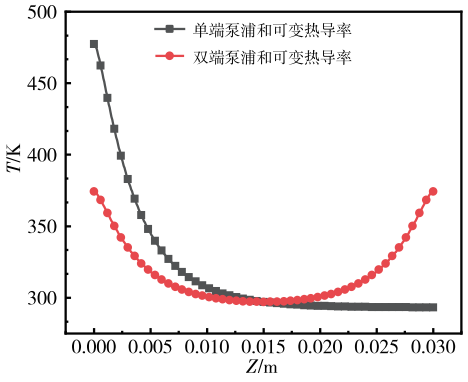
$$u(0,y,z)=T_0;\ u(a,y,z)=T_0$$
$$u(x,0,z)=T_0;\ u(x,b,z)=T_0 \tag{12}$$

式中，T_0为初始温度，T_r为环境温度，T_c为热沉温度；h_a为激光工作物质端面与空气对流传热系数，h_c为激光工作物质非端面表面的对流传热系数；$K_a(T)$为T时刻的a轴方向的热传导系数，$K_c(T)$为T时刻的c轴方向的热传导系数。

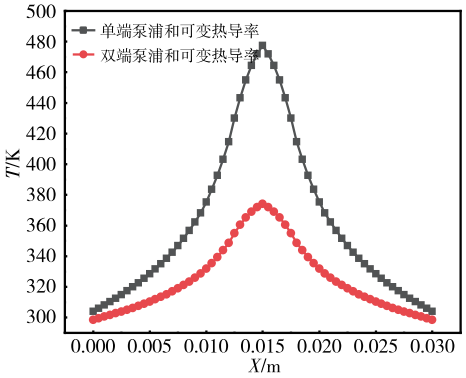
LD泵浦光斑中心位于激光工作物质端面中心，端面与空气进行自然对流散热。激光工作物质侧表面采用铟箔封装后固定于铜质热沉，热沉通过恒温循环水冷却，水温维持在293 K。

1.2.2 LD单端和双端泵浦方式对激光工作物质温度分布的影响

图3为在总泵浦功率相同条件下，LD单端和双端泵浦热效应对比图。



(a) Nd:YVO_4沿光轴方向温度分布曲线



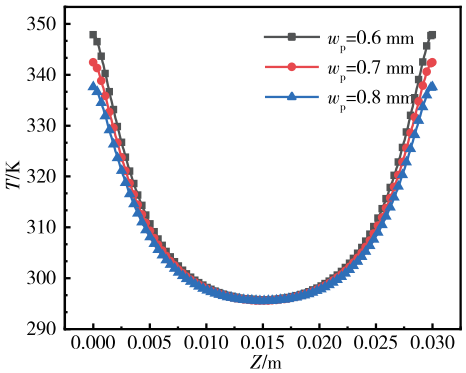
（b）Nd:YVO_4端面垂直光轴方向温度分布曲线

图 3　LD 单端和双端泵浦热效应对比图

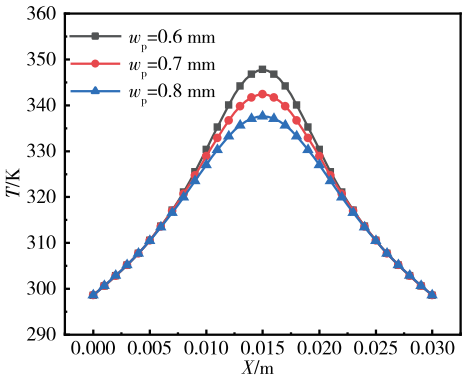
可以看出，无论是光轴方向还是垂直于光轴方向，LD 双端泵浦 Nd:YVO_4激光工作物质温度梯度相对较小。因此，采用 LD 双端泵浦方式，与 LD 单端泵浦方式相比较，Nd:YVO_4激光工作物质温度梯度得到明显改善。

1.2.3　LD 光斑半径对激光工作物质温度分布的影响

模拟分析了泵浦 LD 光斑半径对激光工作物质温度分布的影响如图 4 所示。



（a）Nd:YVO_4沿光轴方向温度分布曲线



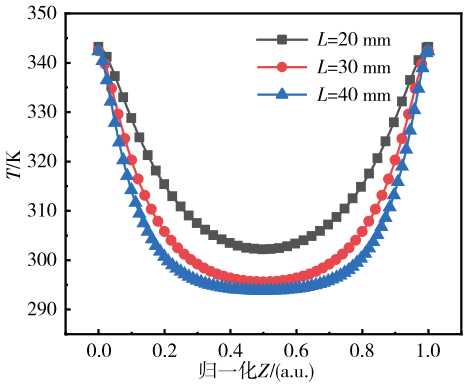
（b）Nd:YVO_4端面垂直光轴方向温度分布曲线

图 4　激光工作物质温度分布随泵浦 LD 光斑半径变化曲线

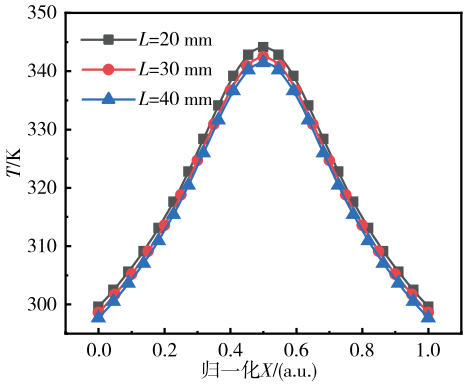
可以看出，随着泵浦 LD 光斑半径的增大，激光工作物质光轴方向和垂直于光轴方向的温度梯度变小。这是由于大尺寸光斑分散了泵浦能量的空间密度，减少了局部热积累。然而，泵浦 LD 光斑半径过大，会影响激光器泵浦阈值和输出功率。因此，需要综合考虑热效应和激光输出参数等因素，优化 LD 光斑半径。

1.2.4　激光工作物质长度对温度分布的影响

图 5 展示了激光工作物质长度 L 对其热分布影响情况的模拟分析结果。



（a）Nd:YVO_4沿光轴方向温度分布曲线



（b）Nd:YVO_4端面垂直光轴方向温度分布曲线

图 5　激光工作物质温度分布随 Nd:YVO_4长度的变化曲线

可以看出，随着激光工作物质长度的增加，Nd:YVO_4内部的温度梯度增大。然而，激光工作物质过长会加剧重吸收效应，导致泵浦阈值升高[16]。需综合考虑输出功率、效率及热透镜效应等因素，在抑制热透镜效应的同时保证激光输出性能稳定。

2　实验装置

激光器采用主振荡功率放大（MOPA）结构，其光路结构如图 6 所示。主振荡级以中心波长

878.6 nm、最大输出功率30 W的光纤耦合LD作为泵浦源。泵浦光经M1(f=20 mm平凸透镜)和M2(f=60 mm平凸透镜)进行聚焦准直。泵浦光被聚焦于尺寸为3 mm×3 mm×30 mm、掺杂浓度(原子数分数)为0.2%的Nd:YVO_4激光工作物质。Q开关采用3 mm×3 mm×14 mm的RTP晶体,其高电光系数与高损伤阈值特性可有效支持高重频工作模式。谐振腔输出镜M6透过率为80%,腔长为150 mm。功率放大级采用对称式双端放大结构。使用中心波长为878.6 nm、最大功率为60 W的LD模块作为放大级泵浦源。主振荡级输出的种子光经M7和M10反射后,注入到功率放大级Nd:YVO_4工作物质,实现功率放大。

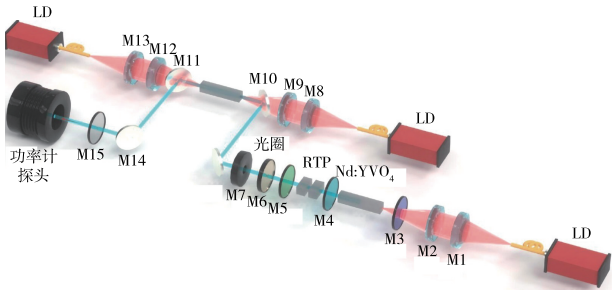
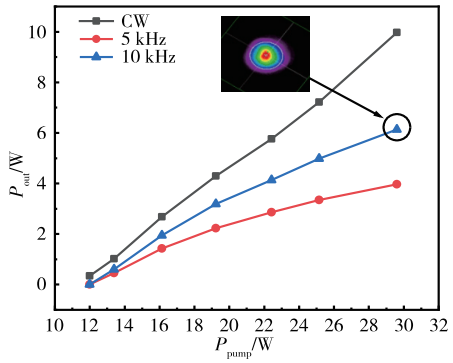


图6 实验装置示意图

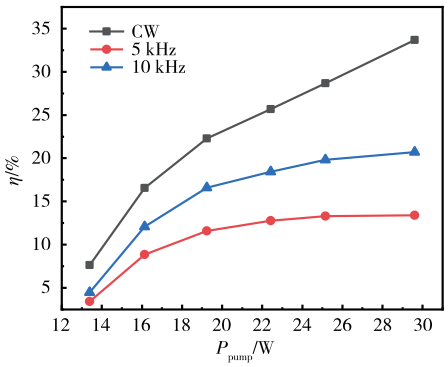
3 实验结果

3.1 主振荡级激光输出特性

使用功率计(Coherent PM150-50)测量主振荡级在连续(CW)以及重复频率为5 kHz和10 kHz条件下的输出功率,结果如图7所示。主振荡级种子光在CW,5 kHz和10 kHz重频条件下的最大输出功率分别为9.98 W,3.97 W,6.13 W,最高光-光转换效率分别为33.69%,13.41%,20.7%。较高重复频率可有效降低因调Q开关动作引起的能量损耗占比,从而提升主振荡级种子光的平均输出功率。



(a) 主振荡级激光输出功率曲线



(b) 主振荡级光-光转换效率曲线

图7 主振荡级激光输出特性曲线

使用示波器(泰克TDS 3032Bx)及光电探测器(DET10A/M)测量重复频率为5 kHz和10 kHz条件下主振荡级种子光脉冲宽度,结果如图8所示。随着泵浦功率的增大,主振荡级输出激光脉宽不断压窄,重频为10 kHz运转条件下对应的最小脉宽为4.86 ns。

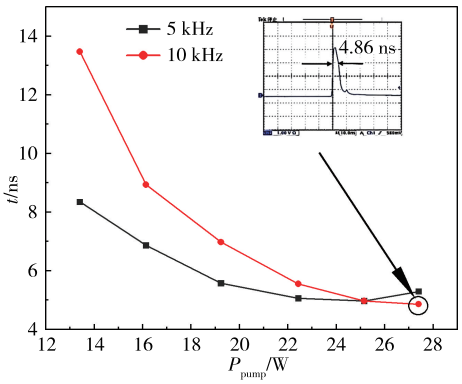


图8 主振荡级输出脉冲宽度随泵浦功率变化曲线

3.2 放大级激光输出特性

主振荡级在CW,5 kHz,10 kHz重频条件下,当种子光功率分别为7.3 W,3.56 W,5.24 W时,功率放大级输出功率与放大级泵浦功率关系如图9所示。连续运转条件下主振荡级经功率放大后最高输出功率达到31.87 W,对应的提取效率为25.9%。而在重复频率为5 kHz和10 kHz的主振荡级经功率放大后分别获得了最高14.50 W和22.01 W的1 064 nm激光输出,对应的提取效率分别为17.7%和11.5%。使用示波器(泰克TDS 3032Bx)及光电探测器(DET10A/M)测量功率放大级脉宽。图10为实测的10 kHz重频条件下,经功率放大级后输出的脉宽为4.33 ns激光脉冲波形图。

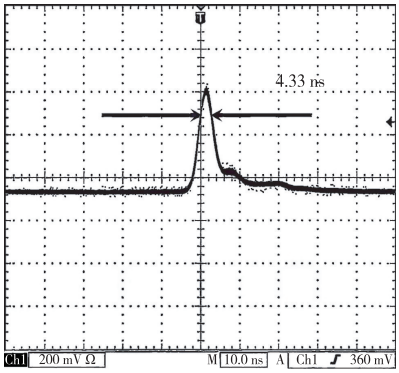
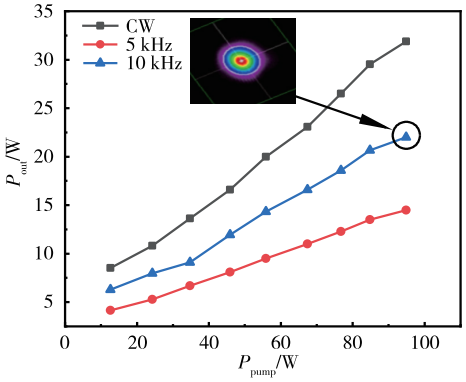
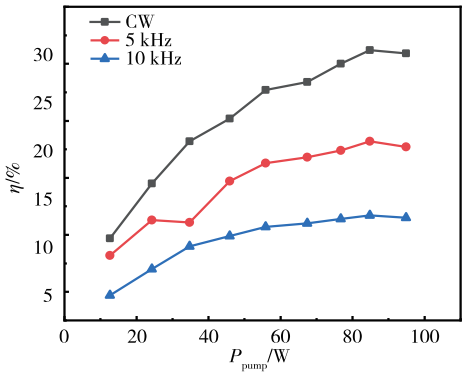


图 10　10 kHz 重频条件下功率放大级脉宽图



（a）功率放大级激光输出功率曲线



（b）功率放大级光-光转换效率曲线

图 9　功率放大级激光输出特性曲线

4　结论

本文研究并设计了 LD 泵浦的窄脉宽高功率固体激光器。所设计激光器采用主振荡功率放大（MOPA）结构，主振荡级采用掺钕钒酸钇晶体作为激光工作物质，结合磷酸钛氧铷电光调 Q 器件，实现了主振荡级窄脉宽输出。功率放大级采用 LD 双端泵浦 Nd:YVO_4 晶体结构，对比分析了 LD 单端泵浦和双端泵浦激光工作物质的热效应，讨论了 LD 双端泵浦条件下，LD 泵浦光斑、激光工作物质长度等对功率放大级热效应的影响。当重复频率为 10 kHz 时，得到最大平均功率为 22.01 W、脉冲宽度为 4.33 ns 的 1 064 nm 激光输出，光-光转换效率为 18.21%。

参考文献：

[1] Fujita E, Mashiko Y, Asaya S, et al. High power narrow-linewidth linearly-polarized 1 610 nm Er: Yb all-fiber MOPA [J]. Optics Express, 2016, 24(23): 26255-26260.

[2] Maleki A, Kavosh Tehrani M, Saghafifar H, et al. A compact diode-pumped pulsed Nd: YAG slab laser based on a master oscillator power amplifier configuration [J]. Laser Physics, 2016, 26(2): 025003.

[3] Mousavi N S, Parvin P, Ilchi-Ghazaani M. Modeling of a Q-switched master oscillator power amplifier fiber laser and gain saturation properties [J]. Laser Physics, 2020, 30(8): 085101.

[4] Pérez-Serrano A, Vilera M, Javaloyes J, et al. Wavelength jumps and multimode instabilities in integrated master oscillator power amplifiers at 1.5 μm: experiments and theory[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(6): 1500909.

[5] Tang R X, Duan C L. 10-Hz, 702-mJ, subnanosecond Nd: YAG MOPA laser system[J]. Optical Engineering, 2021, 60(11): 116108.

[6] 陶汝茂，周　朴，王小林，等. 高功率全光纤结构主振荡功率放大器中模式不稳定现象的实验研究[J]. 物理学报，2014，63(8)：275-280.
Tao Rumao, Zhou Pu, Wang Xiaolin, et al. Experimental study on mode instability in high power all-fiber master oscillator power amplifer fiber lasers[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(8): 275-280.

[7] 王浩淼，贺钰雯，李　弋，等. MOPA 半导体激光器的偏振控制研究[J]. 红外与毫米波学报，2024，43(6)：762-767.
Wang Haomiao, He Yuwen, Li Yi, et al. Research on polarization control of MOPA semiconductor laser[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2024, 43(6): 762-767.

[8] 王　雄，周　朴，王小林，等. 百瓦级全光纤结构单频掺铥主振荡功率放大器[J]. 强激光与粒子束，2014，26(2)：7-8.
Wang Xiong, Zhou Pu, Wang Xiaolin, et al. 100-W-level monolithic single frequency Tm-doped fiber MOPA[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(2): 7-8.

[9] 范灏然，于永吉，朱　贺，等. 500 kHz 波长锁定 878.6 nm LD 双端泵浦 Nd: YVO_4 声光调 Q 激光器[J]. 红外与激光工程，2018，47(6)：48-54.
Fan Haoran, Yu Yongji, Zhu He, et al. 500 kHz A-O Q-switched Nd: YVO_4 laser pumped by dual-end wave-locked 878.6 nm laser diode [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(6): 48-54.

[10] 董　剑，刘学胜，司汉英，等. 700 mJ 紧凑型激光二极管抽

运Nd：YAG主振荡功率放大系统[J]. 中国激光，2018，45(5)：28-33.
Dong Jian, Liu Xuesheng, Si Hanying, et al. 700 mJ compact Nd: YAG master-oscillator power amplification system pumped by laser diode[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 28-33.

[11] 万玮华，郝培育，滕云鹏，等. RTP电光调Q的窄脉宽激光器[J]. 光学技术，2018，44(3)：371-375.
Wan Weihua, Hao Peiyu, Teng Yunpeng, et al. Narrow pulse width laser with RTP electro-optic modulator Q[J]. Optical Technique, 2018, 44(3): 371-375.

[12] Zayhowski J J, Dill Iii C. Diode-pumped microchip lasers electro-optically Q switched at high pulse repetition rates[J]. Optics Letters, 1992, 17(17): 1201-1203.

[13] Zayhowski J J, Kelley P L. Optimization of Q-switched lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27(9): 2220-2225.

[14] Elahi P, Morshedi S. The double-end-pumped cubic Nd: YVO_4 laser: temperature distribution and thermal stress[J]. Pramana, 2010, 74(1): 67-74.

[15] Shen Y, Gong M, Ji E, et al. Spatial dynamic thermal iteration model for 888 nm end-pumped Nd: YVO_4 solid-state laser oscillators and amplifiers[J]. Optics Communications, 2017, 383: 430-440.

[16] 赵本瑞. 高功率Ho：YAG MOPA及长波红外OPO激光系统研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2019.
Zhao Benrui. Study on high power Ho: YAG MOPA and long wave infrared OPO laser system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

作者简介：

黄振鸿(1998—)，男，福建省莆田市人，硕士研究生，主要研究方向为固体激光技术；

岱　钦(1977—)，男，内蒙古自治区通辽市人，博士，教授，主要研究方向为固体激光技术。