



·强激光物理与技术·

# 100 kHz 高功率高光束质量纳秒激光振荡器\*

杨天利<sup>1,2,3</sup>, 杨 晶<sup>1,2,4</sup>, 周王哲<sup>1,2,3</sup>, 李雪鹏<sup>1,2,4</sup>, 王小军<sup>1,2,4</sup>, 彭钦军<sup>1,2,4</sup>

(1. 中国科学院理化技术研究所 固体激光重点实验室, 北京 100190; 2. 中国科学院理化技术研究所 功能晶体与激光技术重点实验室, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 齐鲁中科光物理与工程技术研究院, 济南 250000)

**摘 要:** 高功率、高重复频率纳秒脉冲激光广泛应用于激光切割、激光焊接等领域。随着激光重复频率的提升, 特别是高于 50 kHz 时, 单个周期有限的时间内难以积累足够的上能级粒子, 调 Q 脉冲的稳定性成为了激光器设计的难点。当前主要采用主振荡器的功率放大器(MOPA)方案, 直接振荡获得兼具高功率、高重复频率及高光束质量的纳秒脉冲激光还比较困难。通过对激光动力学过程的仿真模拟, 定量分析了高重复频率调 Q 过程中脉冲强度稳定性与泵浦速率的关系, 并利用负透镜使振荡器工作在具有较大基模体积的热近非稳区, 实现了 Nd:YAG 声光调 Q 激光振荡器在高重复频率、高功率、高光束质量三方面的均衡设计。首次利用侧泵模块实现了 100 kHz 高功率高光束质量纳秒脉冲激光的直接振荡产生, 脉冲强度的离散系数仅为 0.041, 激光输出功率超过 142 W, 脉冲宽度为 165 ns, 光束质量因子  $M^2$  为 1.5。

**关键词:** 激光振荡器; 高重复频率; 声光调 Q; 纳秒; 高光束质量

中图分类号: TN248.1

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230023

## 100 kHz high power high beam quality nanosecond laser oscillator

Yang Tianli<sup>1,2,3</sup>, Yang Jing<sup>1,2,4</sup>, Zhou Wangzhe<sup>1,2,3</sup>, Li Xuepeng<sup>1,2,4</sup>, Wang Xiaojun<sup>1,2,4</sup>, Peng Qinjun<sup>1,2,4</sup>

(1. Key Laboratory of Solid State Laser, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Key Laboratory of Function Crystal and Laser Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

4. Institute of Optical Physics and Engineering Technology, Qilu Zhongke, Ji'nan 250000, China)

**Abstract:** Nanosecond (ns) pulsed laser with high average power and high repetition rate is a potential solution for laser cutting, laser welding and many other processing applications. With the increase of pulse repetition rate, especially when it is higher than 50 kHz, it is difficult to accumulate enough upper state population in a limited time, and the stability of laser pulse becomes a challenge in the design of laser. The main oscillator power amplifier (MOPA) system is the main method currently used. It is difficult to obtain ns pulsed laser with high average power, high repetition rate and high beam quality through direct oscillation. In this paper, the quantitative relationship between the intensity stability of laser pulse and the pump rate is analyzed according to the simulation of high repetition rate Q-switched laser. Combined with the use of plane-concave lenses to make the cavity a thermal-near-unstable cavity with a large-volume fundamental mode, the balanced design of Nd:YAG acousto-optic (AO) Q-switched laser oscillator with high repetition rate, high power and high beam quality was realized. A direct oscillation of 100 kHz high power high beam quality ns pulsed laser by using side pumped module was realized for the first time, the discrete coefficient of pulse intensity was only 0.041, the output power exceeded 142 W, the pulse width was 165 ns, and the beam quality factor  $M^2$  was 1.5.

**Key words:** laser oscillator, high repetition rate, acousto-optic Q-switched, nanosecond, high beam quality

高功率、高光束质量是固体激光器发展的重要方向, 特别是高功率纳秒激光由于具有加工效率高、成本适中可控等优点, 在激光切割、激光焊接等工业领域有广泛的应用前景, 成为脉冲激光研究领域的一个研究重点<sup>[1-4]</sup>。

\* 收稿日期: 2023-02-13; 修订日期: 2023-05-09  
联系方式: 杨天利, yangtianli18@mails.ucas.ac.cn。  
通信作者: 杨 晶, yangjing@mail.ipc.ac.cn;  
王小军, wangxj@mail.ipc.ac.cn。

随着应用所需纳秒激光的重复频率不断提升,特别是高于 50 kHz 时,高重复频率下脉冲强度的稳定性成为了脉冲激光的重要指标<sup>[5-7]</sup>。当前获得 50 kHz 以上高重复频率纳秒脉冲的主要激光材料是 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 等晶体,因其具有较大的受激发散截面和较短的上能级粒子寿命,适于高重复频率脉冲激光的产生,但由于钽酸盐类晶体的热机械性能较差,限制了泵浦功率的提升,从而难以通过直接振荡获得高功率输出,目前成果大多在几十 W 量级<sup>[8-13]</sup>。而对于固体激光领域常用的 Nd:YAG 晶体,由于其受激发射截面和上能级粒子寿命的影响,在百 kHz 量级极短的上能级粒子恢复时间内,想要积累足够的上能级粒子就需要很高的泵浦速率,但同时带来的强烈热效应会导致光束质量和输出功率稳定性的迅速恶化。2005 年,Omatsu 等人利用 Nd:YAG 陶瓷板条获得了 160 kHz、93 ns 的脉冲输出,但其平均功率只有 10 W,相应峰值功率仅 672 W<sup>[14]</sup>。2013 年,本团队利用 885 nm 激光二极管(LD)端面泵浦 Nd:YAG 晶体棒激光振荡器,获得了平均功率 53 W 的 100 kHz、112 ns 脉冲输出,峰值功率为 4.74 kW<sup>[15]</sup>。目前还未见通过直接振荡获得兼具强度稳定的百 kHz 量级高重复频率、百 W 以上高平均功率、高光束质量的“三高”纳秒脉冲激光的报道,常采用的主振荡器的功率放大器(MOPA)方案,由于结构复杂,体积庞大且价格昂贵,其使用范围受到限制。

本文对高重复频率调 Q 过程中脉冲强度稳定性与泵浦速率之间的关系进行了定量分析,设计了合适的激光增益模块,并通过谐振荡腔内元器件和谐振腔型的优化获得了大的基模体积,从而实现了声光调 Q 激光振荡器在高重复频率、高功率、高光束质量三个方面的均衡输出。本文首次利用 LD 侧泵 Nd:YAG 模块实现了平均功率超 142 W 的 100 kHz 纳秒脉冲激光的直接振荡产生,该输出功率下脉冲宽度为 165 ns,相应峰值功率为 8.6 kW,此时测得光束质量因子  $M^2$  为 1.5,输出脉冲强度的离散系数为 0.041。

## 1 实验设计

目前,已有一些工作对输出激光兼具高功率、高光束质量特点的纳秒脉冲固体激光振荡器进行讨论,主要通过增益介质尺寸和基模光斑占比等参数的优化来保证高功率、高光束质量输出。而随着应用所需纳秒激光的重复频率的不断提升,高重复频率下脉冲的强度稳定性成为激光振荡器设计的重点,但在目前的研究中,对此讨论较少。合适的增益介质是获得强度稳定的高重复频率纳秒脉冲的先决条件,拥有大受激发射截面和较短上能级粒子寿命的 Nd:YVO<sub>4</sub> 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 等晶体是目前主要选用的增益介质,但受限于钽酸盐类晶体较差的热机械性能,泵浦功率难以提升则难以通过直接振荡获得高功率输出,而常用于获得高功率激光的 Nd:YAG 晶体,其相对适中的受激发射截面和上能级粒子寿命意味着只有在很高的泵浦速率下才会获得强度稳定的高重复频率纳秒脉冲。综合考虑成本和技术难度,本文选用 Nd:YAG 为增益介质。高泵浦速率的 LD 侧泵激光增益模块是本文获得兼具强度稳定的高重复频率、高功率、高光束质量纳秒激光的前提,然而随着泵浦速率的提升,增益介质的热效应尤其是热透镜效应显著增强,激光器的光束质量快速恶化进而影响到激光功率的提取,此时需要关注谐振腔的设计,充分考虑热透镜效应对激光器工作状态的影响,可采用谐振腔内插入光束变换透镜等方法<sup>[2]</sup>,保证高功率、高光束质量纳秒激光的产生。但此类方法会导致腔内损耗增高,影响输出功率。考虑到脉冲强度稳定性、输出功率和光束质量三个参数之间的强耦合关联,均衡设计难度很大,相关成果往往只能兼顾其中两个参数。本文以谐振腔理论与激光动力学数值仿真为基础,通过对泵浦速率、输出耦合镜透射率、谐振腔内元器件以及谐振腔型四个元素的控制,辅之以实验验证,获得了兼具“三高”特性的纳秒脉冲输出。

本文采用时域空间脉冲强度的离散系数  $V_s$  对高重复频率调 Q 脉冲的强度稳定性进行评价

$$V_s = \frac{1}{\bar{I}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (I_i - \bar{I})^2}{k}} \quad (1)$$

式中:  $k$  为脉冲数目,  $I_i$  为每个脉冲的强度,  $\bar{I}$  为脉冲平均强度。离散系数  $V_s$  越接近于 0,说明脉冲强度越稳定。为了通过直接振荡获得强度稳定的 100 kHz 高重复频率纳秒脉冲激光,这里首先以掺杂原子分数为 0.6% 的 Nd:YAG 晶体为例,基于四能级系统的激光动力学方程,对连续泵浦下激光振荡器在 100 kHz 连续调 Q 模式时增益介质的上能级粒子数密度  $n$  和光子数密度  $\phi$  随时间的变化进行了仿真模拟,其方程如下<sup>[1]</sup>

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = W_p(N - n) - \frac{n}{\tau_f} - c\sigma_e\phi n \\ \frac{d\phi}{dt} = \frac{c\sigma_e\phi n}{L} - \frac{c\phi}{2L} [L_{in} - \ln(1 - T_{oc}) + \delta] \end{cases} \quad (2)$$

式中： $W_p = \frac{\eta P_{\text{pump}}}{h\nu_1 l S_{\text{pump}} N}$  为泵浦速率， $\eta$  为激光器总体效率，这里为 54%， $P_{\text{pump}}$  为泵浦功率， $h\nu_1$  为产生激光的光子能量即  $1.868 \times 10^{-19}$  J， $l$  为泵浦区长度， $S_{\text{pump}}$  为泵浦区截面积， $\tau_f$  为增益介质的荧光寿命，约为 230  $\mu\text{s}$ ， $\sigma_e$  为 Nd:YAG 晶体的受激发射截面，一般为  $6.5 \times 10^{-19}$   $\text{cm}^2$ ， $N$  为激光晶体内掺杂  $\text{Nd}^{3+}$  密度，即  $8.3 \times 10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$ ， $c$  为光速， $L$  为谐振腔长， $L_{\text{in}}$  为腔内损耗， $T_{\text{OC}}$  为输出耦合镜透射率， $\delta$  为声光 Q 开关损耗系数，在 0 到 1.2 之间随时间周期性变化。

仿真模拟结果显示，大的泵浦速率  $W_p$  和长的泵区长度  $l$  是获得强度稳定的 100 kHz 脉冲激光的必要条件。相应的，LD 侧泵模块的设计应向具有更高的泵浦功率  $P_{\text{pump}}$ 、更小的泵浦区截面积  $S_{\text{pump}}$  和更长的泵浦区长度  $l$  的方向发展。本文设计了三向 LD 侧泵 Nd:YAG 模块，模块的横截面如图 1 所示。模块选用直径为 3 mm、长度为 80 mm 的 Nd:YAG 晶体棒，其  $\text{Nd}^{3+}$  掺杂原子分数为 0.6%。泵浦源为连续泵浦，由 3 列 LD 线阵组成，每个线阵包括 4 个巴条。当单个侧泵模块的总泵浦功率约为 384 W 时，其短腔输出功率约为 131 W。

在高泵浦功率和小泵浦区截面积的影响下，增益介质的热效应尤其是热透镜效应非常显著，这会严重影响激光器的性能。此模块中 Nd:YAG 晶体棒的热焦距可以通过非对称平平腔法测量<sup>[16]</sup>，测量结果如图 2 所示。热焦距与 LD 泵浦功率成反比，例如，当泵浦功率为 300 W 时，测得的热焦距约 270 mm。基于棒状晶体在侧面泵浦下的热效应理论<sup>[1]</sup>，热透镜焦距的理论值计算公式为<sup>[17]</sup>

$$f = \frac{2K\pi r_0^2}{\eta_l P_{\text{pump}}} \left[ \frac{\delta n}{\delta T} - \frac{n_0^3 \alpha c_e''}{48(1-\nu)} + \frac{2(n_0-1)\alpha r_0}{l_0} \right]^{-1} \quad (3)$$

式中： $K$  为增益介质的热导率，即  $14.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ， $r_0$  为晶体棒半径， $\eta_l$  为泵浦光转化为热的比例，这里取 33%， $\frac{\delta n}{\delta T}$  为增益介质的折射率随温度变化率，即  $7.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ， $n_0$  为增益介质的折射率，即 1.82， $\alpha$  为增益介质的热膨胀系数，这里取  $7.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ， $c_e''$  为通过弹光系数计算的常数，这里取 0.17<sup>[17]</sup>， $\nu$  为增益介质的泊松比，即 0.3， $l_0$  为晶体棒的长度。图 2 中红线给出了根据式(3)得到的热透镜焦距随泵浦功率变化的拟合结果，实验测量数据与理论计算结果吻合良好。

以此侧泵 Nd:YAG 模块为基础，设计了 100 kHz 高功率高光束质量纳秒激光振荡器，其结构如图 3 所示。两个相同的 Nd:YAG 模块 SPM-1 和 SPM-2 串联的方案有效地提高了泵浦区长度。两个模块间插入一个  $90^\circ$  旋光晶体 QR 以补偿热致双折射。谐振腔采用对称设计，对称轴为旋光晶体中心。两个声光 Q 开关 Q1 和 Q2 由一个驱动器同步驱动，在模块两侧正交对称放置，以提高声光 Q 开关的关断能力并保证谐振腔的对称性。两个焦距为  $-100 \text{ mm}$  的平凹透镜 F1 和 F2 对称插入谐振腔，以扩大基模体积从而获得更高的光束质量。平面后腔镜 M1 镀有对 1064 nm 激光反射率为 99.8% 的高反射率膜。平面镜 M2 为输出耦合镜，镀有 1064 nm 激光部分透射膜。

为了获得高光束质量激光输出，谐振腔内各元件间距需要进行优化。优化基于高斯光束在振荡器中的传输矩阵，计算时，晶体棒简化为具有可变焦距的薄透镜。由于该谐振腔采用对称设计，两个 Nd:YAG 晶体棒中产生的基

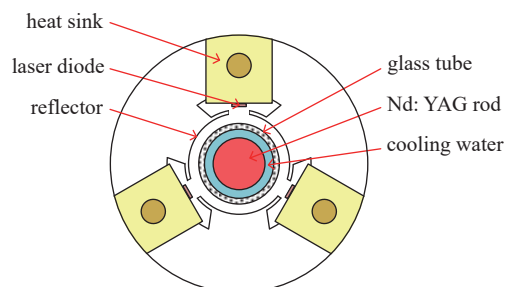


Fig. 1 Cross section of LD side-pumped Nd:YAG module  
图 1 LD 侧泵 Nd:YAG 模块横截面示意图

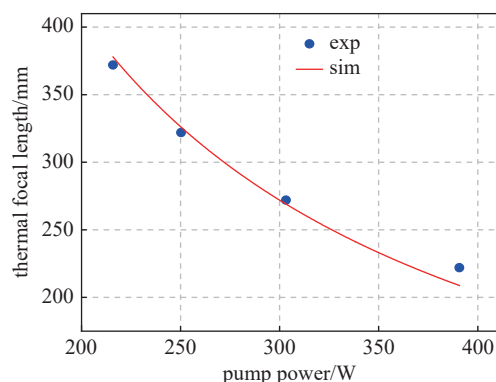


Fig. 2 Thermal lens focal length versus the pump power for a single LD side-pumped Nd:YAG module

图 2 单个 LD 侧泵 Nd:YAG 模块的热透镜焦距与泵浦功率的关系

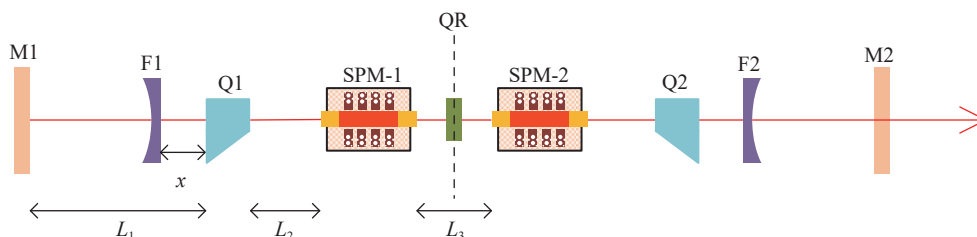


Fig. 3 Schematic of the Q-switched LD side-pumped Nd:YAG oscillator

图 3 LD 侧泵 Nd:YAG 调 Q 激光振荡器示意图

模光斑的直径是相同的。实验中,振荡器常被设计在热近非稳区工作<sup>[18]</sup>,因为此时具有较大的基模尺寸,一般地,当基模光斑直径与晶体棒直径之比达到1/2~2/3时,即可以获得高光束质量激光输出<sup>[19]</sup>。图4展示了晶体棒中基模光斑直径随热焦距变化的典型模拟结果。由图4可知,单个侧泵模块的热透镜焦距范围在253~294 mm时,振荡器为稳定状态,而热透镜焦距范围在245~253 mm时,振荡器为热近非稳状态。根据图2中热透镜焦距与泵浦功率的关系,振荡器工作状态随泵浦功率的增加而向左移动,稳定状态对应的LD泵浦功率区间为277~318 W,热近非稳状态对应的LD泵浦功率区间为318~328 W。谐振腔设计时,为保证振荡器的紧凑性,腔内各元件间距离应尽量减小,但受到高光束质量要求的限制,基模光斑直径与晶体棒直径之比应在2/3左右,综合考虑后,谐振腔光学长度为920 mm,腔镜M1和M2与左右两个Q开关的距离 $L_1=150$  mm,两个Q开关与左右两个模块的距离 $L_2=60$  mm,两个模块的间距 $L_3=58$  mm,平凹透镜与Q开关的距离 $x$ 为90 mm。本设计中,激光振荡器在热近非稳区工作的基模光斑直径约2.1 mm,基模光斑直径与晶体棒直径之比约为0.7。

利用速率方程(2)对上述激光振荡器进行了激光动力学仿真,其中,泵浦区截面积 $S_{\text{pump}}$ 为7.07 mm<sup>2</sup>, $l$ 为两个模块的泵浦区长度之和,即88 mm, $L$ 为谐振腔的光学长度920 mm。选用不同透射率 $T_{\text{oc}}$ 的输出耦合镜时,该振荡器所获调Q脉冲的脉冲强度的离散系数 $V_s$ 随泵浦速率变化的典型数值计算结果如图5所示。由于只有当 $V_s$ 接近于0时,该振荡器才具有强度稳定的高重复频率纳秒脉冲输出以在实际应用中使用,因此应尽可能选择 $V_s$ 接近于0的谐振腔设计。从图5可以看出,对于100 kHz高重复频率调Q,不同输出耦合镜下调Q脉冲强度稳定性与两个模块的总泵浦功率之间显示出相似的相关性。对于透射率为20%的输出耦合镜,泵浦速率从35.58 s<sup>-1</sup>增加至36.37 s<sup>-1</sup>时,即总泵浦功率从623 W增加至638 W, $V_s$ 快速减小,当总泵浦速率超过36.37 s<sup>-1</sup>后, $V_s$ 接近于0;对于透射率为30%的输出耦合镜, $V_s$ 快速减小的泵浦速率区间变为36.21~37.36 s<sup>-1</sup>;而对于透射率为40%的输出耦合镜,该区间为36.58~38.44 s<sup>-1</sup>。随着输出耦合镜透射率的增加,获得强度稳定的100 kHz调Q脉冲所需要的泵浦速率提高,当输出耦合镜透射率为50%时,泵浦速率增加至38.54 s<sup>-1</sup>即泵浦功率增加至680 W达到稳区边界时, $V_s$ 在0.5附近;而对于60%及更高透射率的输出耦合镜,稳区边界的 $V_s$ 仍在1附近,这意味着选用更高透射率的输出耦合镜无法获得强度稳定的100 kHz调Q脉冲。泵浦速率较低时,单个调Q周期内无法获得足够的上能级粒子,虽然腔内损耗以100 kHz的频率周期性变化,但并不是每个调Q周期内都有激光脉冲产生,脉冲强度的稳定性较差,重复频率的一致性难以保证<sup>[15]</sup>。随着泵浦速率的增加,能够产生脉冲的调Q周期增多,只有当泵浦速率增加到一定值时,才会有强度稳定的高重复频率纳秒脉冲输出。而输出耦合镜透射率的增大,意味着腔内光子寿命的降低,这就导致获得足够上能级粒子以获得强度稳定的高重复频率纳秒脉冲所需的泵浦速率增加。

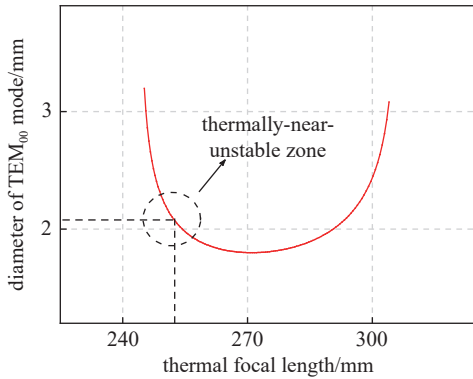


Fig. 4 Diameter of the fundamental mode versus the thermal focal length  
图4 基模光斑直径与热焦距的关系

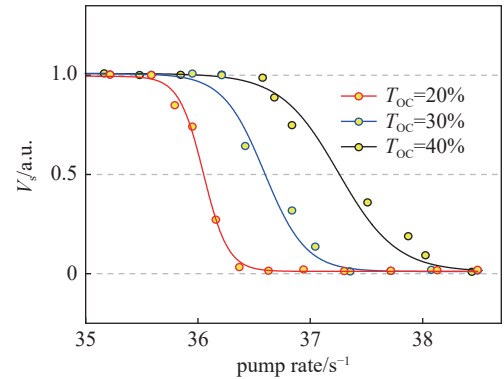


Fig. 5 Laser dynamic simulation results of the discrete coefficient  $V_s$  versus the pump rate  
图5 泵浦速率与调Q脉冲强度的离散系数 $V_s$ 的关系的激光动力学仿真模拟结果

图5还显示出,在相同的泵浦速率下,较低透射率的输出耦合镜更易获得强度稳定的脉冲激光,这是由低透射率下腔内光子寿命较长导致的。但在低透射率下,振荡器的输出功率受到限制,输出功率可表示为<sup>[1]</sup>

$$P_{\text{out}} = A \frac{1 - R_{\text{oc}}}{1 + R_{\text{oc}}} I_s \left( \frac{2W_p l \tau_f \sigma_e N}{L_{\text{in}} - \ln R_{\text{oc}}} - 1 \right) \quad (4)$$

式中: $A$ 为晶体截面积, $R_{\text{oc}}$ 为输出耦合镜反射率, $I_s$ 为饱和光强,即1.25 kW/cm<sup>2</sup>。根据式(4),在构成稳定谐振腔的

泵浦功率区间内,输出耦合镜的最佳透射率约为 60%,但由上文分析可知,此透射率下无法获得强度稳定的 100 kHz 调 Q 脉冲。若选用透射率为 40% 的输出耦合镜,由图 5 可知,工作在热近非稳区即泵浦速率为  $36.26\sim 37.30\text{ s}^{-1}$  时,  $V_3$  仍然始终大于 0.45,调 Q 脉冲强度仍然不够稳定。因此,为保证脉冲强度的稳定性,以下实验中选用透射率为 30% 的输出耦合镜。

## 2 实验结果与讨论

使用功率计(FL600A-LP2-65, Ophir Inc.)对该激光振荡器的输出功率进行了测量,结果如图 6 所示,在 669 W 的泵浦功率下获得了最高 142.3 W 的平均功率输出,该输出功率为前报道的重复频率为百 kHz 量级的纳秒脉冲固体激光振荡器输出功率的 2.6 倍以上<sup>[14-15]</sup>,此时光-光效率为 21.27%。实验中对最大功率下的功率稳定性进行了监测,结果显示在图 6 左上部的插图中,240 s 内功率波动低于  $\pm 0.5\%$ ,表明此振荡器可以稳定输出激光。

利用光电探头(DET10N/M, Thorlabs Inc.)和示波器(SDS1204X-E, SIGLENT Inc.)对不同泵浦功率下的脉冲序列进行了测量,并基于速率方程(2)对不同泵浦功率下的脉冲序列进行了数值计算,计算选用参数与实验保持一致,典型结果如图 7 所示。图中蓝色线条表示测量结果,红色线条表示数值计算结果。当泵浦功率为 669 W,即泵浦速率为  $37.98\text{ s}^{-1}$ 、输出功率为 142.3 W 时的典型脉冲序列如图 7(a)所示,测量与计算结果在脉冲时间间隔和脉冲强度稳定性方面均显示出良好的一致性,输出脉冲时间间隔为  $10\text{ }\mu\text{s}$ ,脉冲重复频率为 100 kHz。实验测得单脉冲宽度为 165 ns,如图 7(a)右上部的插图所示。测量结果中,脉冲强度的离散系数为 0.041,数值计算结果中,离散系数为 0.030,测量值与理论值符合较好。而在 629.5 W 泵浦功率即  $35.92\text{ s}^{-1}$  泵浦速率下脉冲序列的典型测量与计算结果如图 7(b)所示,实验和计算结果在脉冲时间间隔和脉冲强度方面的趋势基本符合,均显示出较差的稳定性。测量结果中,脉冲强度的离散系数为 0.963,计算的离散系数为 0.886,表明测量值与理论值基本一致。脉冲强度的不稳定是因为在较低的泵浦下,以 100 kHz 的频率对腔内损耗进行周期性调制时,单个调 Q 周期即  $10\text{ }\mu\text{s}$  内上能级粒子积累不足,使输出脉冲的时间间隔大于  $10\text{ }\mu\text{s}$ ,这会导致在某一调 Q 周期内直至 Q 开关关断时仍未有足够的反转粒子,此周期无法获得脉冲输出,如图 7(b)中的第 4 组,未跃迁至下能级的上能级粒子再经过一个调 Q 周期的积累后,在下一周期会导致输出脉冲强度的显著升高,如图 7(b)中的第 5 组脉冲,这就造成了低泵浦功率下调 Q 脉冲强度的稳定性较差。

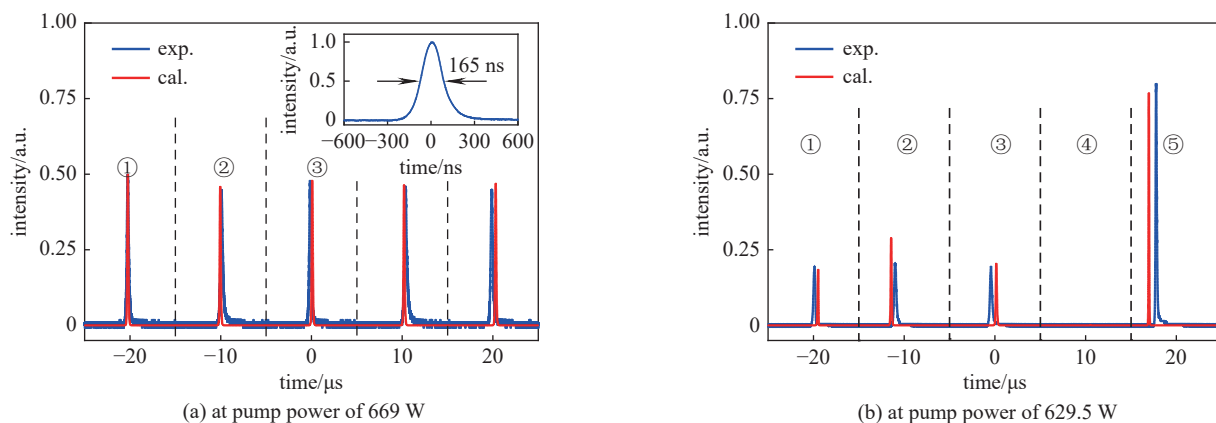


Fig. 7 Typical experimental measurement (blue) and numerical calculation (red) results of pulse train at pump powers of 669 W and 629.5 W

图 7 泵浦功率为 669 W 和 629.5 W 时脉冲序列的典型实验测量(蓝色)与数值计算(红色)结果

在最大功率输出下,对光束质量因子  $M^2$  进行了测量。测量结果如图 8 所示,水平方向  $M_x^2=1.27$ ,垂直方向  $M_y^2=1.74$ ,相应的平均光束质量因子为 1.5。图 8 中上部插图为光束的远场强度分布,表明激光脉冲为近高斯光束。水平和垂直方向光束质量的差异可能是两个 Nd:YAG 模块经使用后退化导致的谐振腔不完全对称导致的。在此工

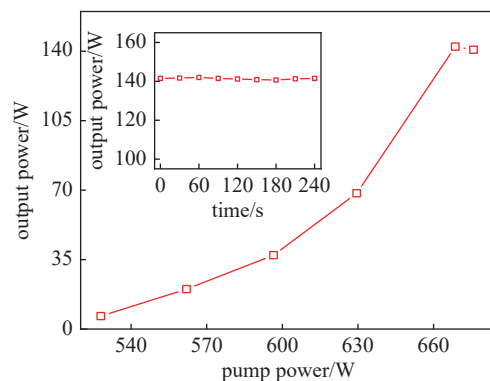


Fig. 6 Average output power versus pump power after optimization

图 6 优化后输出功率随泵浦功率变化曲线

作的基础上,本团队通过两级功率放大获得了平均功率超过 1 kW 的纳秒脉冲激光输出,水平方向和垂直方向光束质量因子分别为  $M_x^2=8.20$ ,  $M_y^2=8.30$ <sup>[20]</sup>。

### 3 结论

为了满足实际应用中对高功率、高光束质量、强度稳定的高重复频率纳秒脉冲激光的需求,本文以谐振腔理论与激光动力学数值仿真为基础,通过对泵浦速率、输出耦合镜透射率、谐振腔内元器件以及谐振腔型进行控制,优化设计了 100 kHz 高功率高光束质量纳秒脉冲激光振荡器,获得了平均功率超过 142 W、脉冲宽度 165 ns 的脉冲激光输出。就我们所知,该结果为同类器件重复频率在百 kHz 量级的纳秒脉冲固体激光直接振荡产生的最高输出功率,可极大地简化后续放大的压力并保证系统的紧凑性。实验所得激光输出的脉冲强度的离散系数为 0.041,与理论模拟结果符合较好。此时,测得的平均光束质量因子  $M^2$  为 1.5,表明输出激光束有较高光束质量。以此光源为基础,经功率放大可以获得平均功率千瓦以上的高功率 100 kHz 纳秒脉冲激光,并有望在激光切割、激光焊接等工业领域拥有较好的应用前景。

**致谢** 感谢中国科学院物理研究所崔大复研究员在文章修改过程中给予的建议。

### 参考文献:

- [1] Koehler W. Solid-state laser engineering[M]. New York: Springer, 2006: 35-37, 54-61, 119-125, 188-190, 442-445, 488-493, 515-522.
- [2] 李雪鹏, 杨晶, 筵兴伟, 等. 百瓦级近衍射极限VCSEL泵浦激光器[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34: 081004. (Li Xuepeng, Yang Jing, Yan Xingwei, et al. Hundred-watt level VCSEL-pumped laser with near diffraction limit beam quality[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34: 081004)
- [3] Kalichevsky-Dong M T, Ge Wenping, Hawkins T W, et al. 4.8 mJ pulse energy directly from single-mode Q-switched ytterbium fiber lasers[J]. Optics Express, 2021, 29: 30384.
- [4] Zhang Shubao, Guo Lin, Li Menglong, et al. High-power near diffraction-limited 1064-nm Nd: YAG rod laser and second harmonic generation by intracavity-frequency-doubling[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(7): 45-48.
- [5] Honea E C, Beach R J, Mitchell S C, et al. Dual-rod Yb: YAG laser for high-power and high-brightness applications[C]//Advanced Solid State Lasers 2000. Davos, Switzerland: Optica Publishing Group, 2000: MA6.
- [6] Stolzenburg C, Giesen A, Butze F, et al. Cavity-dumped intracavity-frequency-doubled Yb: YAG thin disk laser at 100 kHz repetition rate[C]//Advanced Solid State Photonics 2007. Vancouver, Canada: Optica Publishing Group, 2007: TuC4.
- [7] Fu Xing, Liu Q, Yan Xianghe, et al. 120 W high repetition rate Nd: YVO<sub>4</sub> MOPA laser with a Nd: YAG cavity-dumped seed laser[J]. Applied Physics B, 2009, 95(1): 63-67.
- [8] 余锦, 张雪, 刘洋, 等. LD泵浦高功率高斜效率Nd: YVO<sub>4</sub>声光调Q激光器[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(2): 285-289. (Yu Jin, Zhang Xue, Liu Yang, et al. Laser diode end-pumped acousto-optical Q-switched Nd: YVO<sub>4</sub> laser with high power and high slope efficiency[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(2): 285-289)
- [9] Wang Zijian, Jin Guangyong, Yu Yongji, et al. High repetition-rate and short pulse-width 1064nm laser in a composite crystal device[C]//Proceedings of SPIE 9295, International Symposium on Optoelectronic Technology and Application 2014: Laser Materials Processing and Micro/Nano Technologies. 2014: 92950L.
- [10] Zhang Wenqi, Shen Yijie, Meng Yuan, et al. Quasi-single-crystal-fiber acousto-optic Q-switched tandem dual Nd: YVO<sub>4</sub> thin rods laser[J]. Applied Optics, 2017, 56(27): 7512-7517.
- [11] Li Xudong, Yu Xin, Chen Fei, et al. Power scaling of directly dual-end-pumped Nd: GdVO<sub>4</sub> laser using grown-together composite crystal[J]. Optics Express, 2010, 18(7): 7407-7014.
- [12] Yu Xinghuo, Wang Cheng, Ma Yufei, et al. Performance improvement of high repetition rate electro-optical cavity-dumped Nd: GdVO<sub>4</sub> laser[J]. Applied Physics B, 2012, 106(2): 309-313.
- [13] 石朝辉, 张晶, 牛岗, 等. 高重复双端泵浦全固态Nd: YVO<sub>4</sub>声光调Q激光器[J]. 激光与红外, 2006, 36(8): 635-638. (Shi Zhaohui, Zhang Jing, Niu Gang, et al. High repetition rate AO Q-switching of double end pumped Nd: YVO<sub>4</sub> all-solid-state laser[J]. Laser & Infrared, 2006, 36(8): 635-638)
- [14] Omatsu T, Isogami T, Minassian A, et al. >100kHz Q-switched operation in transversely diode-pumped ceramic Nd<sup>3+</sup>: YAG laser in bounce geometry[J]. Optics Communications, 2005, 249(4/6): 531-537.
- [15] Liu Ke, Li Fangqin, Xu H Y, et al. High-power high-efficiency acousto-optically Q-switched rod Nd: YAG laser with 885nm diode laser pumping[J]. Optics

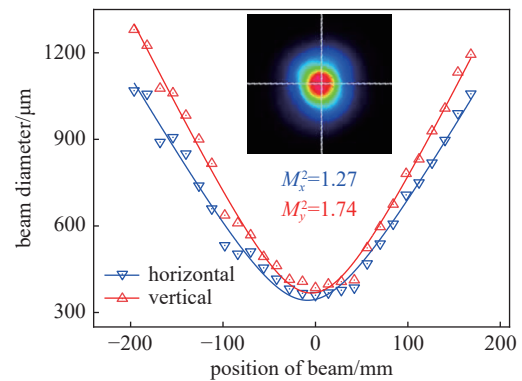


Fig. 8  $M^2$  measurement result after optimization.

Inset is the beam far-field intensity profile

图 8 优化后的  $M^2$  测量结果, 插图为远场光斑

[Communications](#), 2013, 286: 291-294.

- [16] 耿爱丛, 赵慈, 薄勇, 等. 一种测量二极管侧面抽运固体激光器热焦距的方法[J]. [物理学报](#), 2008, 57(11): 6987-6991. (Geng Aicong, Zhao Ci, Bo Yong, et al. A method for measuring thermal focal length of LD-side-pumped laser crystal[J]. [Acta Physica Sinica](#), 2008, 57(11): 6987-6991)
- [17] 郭亚丁. 高功率全固态激光器技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020: 44-48. (Guo Yading. Research on high-power solid state laser[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020: 44-48)
- [18] Feng Yan, Bi Yong, Xu Zuyan, et al. Thermally near-unstable cavity design for solid state lasers[C]//Proceedings of SPIE 4969, Laser Resonators and Beam Control VI. 2003: 227-232.
- [19] 吕百达. 激光光学: 光束描述、传输变换与光腔技术物理[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2003: 361. (Lv Baida. Laser optics: beam characterization, propagation and transformation, resonator technology and physics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003: 361)
- [20] Yang Tianli, Yang Jing, Zhou Wangzhe, et al. Kilowatt-level 100 kHz nanosecond pulsed laser amplifier via a 205-watt seeding[C]//Proceedings of SPIE 12459, Sixth International Symposium on Laser Interaction with Matter. 2022: 1245915.