

腔长调控Nd:YVO₄纳秒固体紫外激光器的输出特性研究

徐吉祥

长江大学物理与光电工程学院, 湖北 荆州

收稿日期: 2026年5月29日; 录用日期: 2026年7月22日; 发布日期: 2026年7月30日

摘要

为探究谐振腔腔长对Nd:YVO₄纳秒激光器输出特性的影响, 本文分别搭建210 mm、224 mm、269 mm、359 mm四种不同腔长的激光谐振腔, 系统开展10~100 kHz重复频率(重频)范围内的激光输出实验, 深入分析腔长对激光器平均功率、脉冲宽度、单脉冲能量、光束质量及泵浦工作特性的调控规律。实验结果表明: 腔长显著改变激光器最优工作重频区间与输出性能, 随着腔长增大, 激光器峰值平均功率对应的最佳重复频率逐步向低频偏移, 短腔(210 mm, 224 mm)适配中高重频工作场景, 在60~70 kHz重频区间可维持稳定的功率输出与单脉冲能量; 长腔(269 mm, 359 mm)具备更强的腔内储能优势, 在30~40 kHz低重频下可获得更高的单脉冲能量, 其中269 mm腔长激光器综合输出性能最优, 在40 kHz重频下实现14.78 W的峰值输出功率, 单脉冲能量达0.36 mJ, 脉宽仅13.9 ns, 光束质量因子接近1.1, 束腰圆度可达96.3%。所有腔长工况下, 激光器脉宽均随重频升高呈单调展宽趋势, 单脉冲能量随重频提升持续衰减, 符合声光调Q激光器典型输出特性。泵浦电流测试结果显示, 谐振腔越短, 腔稳定工作区间越宽, 可承受更大泵浦电流, 最佳工作电流随腔长缩短向大电流方向偏移。光斑形貌测试表明, 各腔长在最优工况下均能实现高纯度基模高斯输出, 无明显模式畸变与像散, 谐振腔结构具备良好的工况适配鲁棒性。本研究明确了不同腔长激光器的最优工作区间与性能适配场景, 可为工业级纳秒脉冲全固态激光器的腔型优化、参数匹配及工程化应用提供实验依据与技术支持。

关键词

固体激光器, 腔长, Nd:YVO₄, 重复频率

Study on the Output Characteristics of Nd:YVO₄ Nanosecond Solid-State Ultraviolet Laser with Tunable Cavity Length

Jixiang Xu

College of Physics and Optoelectronic Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei

Abstract

In order to explore the influence of cavity length on the output characteristics of Nd : YVO₄ nanosecond laser, four kinds of laser resonators with different cavity lengths of 210 mm, 224 mm, 269 mm and 359 mm were built respectively. The laser output experiments in the range of 10-100 kHz repetition frequency (repetition frequency) were carried out systematically, and the regulation of cavity length on the average power, pulse width, single pulse energy, beam quality and pump working characteristics of the laser were analyzed in depth. The experimental results show that the cavity length significantly changes the optimal repetition frequency range and output performance of the laser. As the cavity length increases, the optimal repetition frequency corresponding to the peak average power of the laser gradually shifts to the low frequency. The short cavity (210 mm, 224 mm) is adapted to the medium and high repetition frequency working scene, and the stable power output and single pulse energy can be maintained in the repetition frequency range of 60-70 kHz. The long cavity (269 mm, 359 mm) has stronger intracavity energy storage advantages, and higher single pulse energy can be obtained at 30-40 kHz low repetition frequency. Among them, the 269 mm cavity length laser has the best comprehensive output performance. The peak output power of 14.78 W is achieved at 40 kHz repetition frequency. The single pulse energy is 0.36 mJ, the pulse width is only 13.9 ns, the beam quality factor is close to 1.1, and the beam waist roundness can reach 96.3 %. Under all cavity length conditions, the pulse width of the laser shows a monotonic broadening trend with the increase of the repetition frequency, and the single pulse energy continues to decay with the increase of the repetition frequency, which is consistent with the typical output characteristics of the acousto-optic Q-switched laser. The pump current test results show that the shorter the resonant cavity is, the wider the stable working range of the cavity is, and the larger the pump current can be withstand. The optimal working current shifts to the direction of large current with the shortening of the cavity length. The spot morphology test shows that each cavity length can achieve high-purity fundamental mode Gaussian output under optimal working conditions, without obvious mode distortion and astigmatism, and the resonant cavity structure has good working condition adaptation robustness. This study clarifies the optimal working range and performance adaptation scenarios of lasers with different cavity lengths, which can provide experimental basis and technical support for cavity optimization, parameter matching and engineering application of industrial nanosecond pulsed all-solid-state lasers.

Keywords

Solid-State Laser, Cavity Length, Nd:YVO₄, Repetition Frequency

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着精密微加工、半导体刻蚀、生物医学成像及微电子元器件制造等高端领域不断发展,短波长纳秒紫外激光凭借光子能量高、热影响区域小、冷加工效果优异、加工精度高等突出优势,逐步成为超精细加工领域的核心激光光源[1]-[3]。相较于红外与可见光波段激光,紫外激光可有效避免加工材料产生热熔融与热溅射现象,能够实现脆性材料、高分子材料及精密电子元件的无损伤精细加工,市场应用需求与技术

研究价值日益凸显[4]-[7]。长期以来,国内外相关研究人员围绕全固态紫外脉冲激光器开展了大量理论分析与系统研制工作[8]-[11]。以往研究多以固定腔型 Nd:YVO₄ 红外基频激光系统为基础,通过腔内倍频或腔外非线性频率变换方式获取紫外激光输出,设计过程中以优化倍频转换效率、提升紫外平均输出功率与改善光束质量为主要研究目标[10] [12]-[14]。在系统架构搭建层面,大多沿用传统固定式谐振腔布局,确定腔体结构尺寸后仅对泵浦电流、声光调制频率、聚焦耦合位置等外部运行参数进行调试优化[15] [16];在性能探究层面,现有成果多集中于特定结构下紫外激光脉冲波形、光谱特性、光斑质量等静态输出参数测试,着重解决晶体热畸变抑制、非线性晶体相位匹配优化、腔内损耗控制等共性技术问题[17] [18]。

针对现有 Nd:YVO₄ 纳秒紫外固体激光器研究中结构调节性不足、重频功率特性研究体系不完善等问题,本文重点探究激光器的重频-功率-脉宽耦合特性,测试不同重频下输出功率与脉冲宽度的变化规律及内在机制;系统研究泵浦电流与输出功率的关联特性,揭示电流调控对激光输出稳定性和能量转换效率的影响;同时,对激光器输出光斑的质量进行表征与分析。通过本研究,旨在掌握 Nd:YVO₄ 纳秒紫外固体激光器的性能调控规律,建立完善的性能评价体系,为激光器的结构优化、参数调控及实际应用提供实验依据和理论支撑。

2. 实验装置及结果

2.1. 实验装置

图 1 为完成实验所需的实验装置图。实验装置中 LD 泵浦源的型号为 V2-65-885-400,即中心波长为 880 ± 0.5 nm, f_1 和 f_2 为 f_{20} 和 f_{40} (焦距为 20 mm 和 40 mm) 两个透镜组成的激光器耦合头。M1 为腔镜 (R1000), M2 和 M3 为转折镜 (HR), 倍频晶体选用 LBO 晶体, 二倍频 SHG 尺寸为 $3 \times 3 \times 8$ mm³, 三倍频 THG 尺寸为 $3 \times 3 \times 15$ mm³, 透光波段为 160~2600 nm, SHG 相位匹配范围为 551~2600 nm (TypeI) 和 790~2150 nm (TypeII), 走离角为 0.6° (TypeI) 和 0.12° (TypeII)。Q 开关采用声光调制方式, 工作频率范围在 0~100 kHz, 中心频率最大可以达到 80 MHz, 对波长为 1064 nm 的泵浦光的透过率大于 85%, 损伤阈值大于 1 GW/cm。

实验通过精准平移转折镜 M2 的三维调节位移台, 改变 M2 与固定光学元件 M1、M3 的光路间距, 从而精准调控谐振腔总腔长, M1、M3 镜片全程固定不动, 无角度与位移偏移, 保证谐振腔光路结构稳定性。本次实验最终调试得到四种精准谐振腔长度, 分别为 210 mm、224 mm、269 mm、359 mm, 所有腔长误差控制在 ± 0.5 mm 以内。位移台调节采用微米级精密校准, 每次调节后静置 10 min 消除机械应力, 同时校准光路准直度, 确保不同腔长工况下, 泵浦光耦合效率、晶体位置、Q 开关工作姿态完全一致, 仅保留腔长单一变量, 保障实验数据的有效性与对比性。本文所有输出功率、单脉冲能量、脉冲宽度实验数据, 均为激光器三倍频转化后的 355 nm 紫外激光参数, 而非 1064 nm 基频光、532 nm 倍频光参数, 明确实验测试波长基准。图 2、图 3、图 4 中不同腔长对应的重频-功率、重频-单脉冲能量、重频-脉宽特性曲线, 均在额定标准泵浦电流 10 A 的统一工况下测试完成, 全程保持泵浦电流恒定、室温 25℃、湿度 45% 的恒温恒湿实验环境, 消除电流、温度、环境扰动对实验结果的影响, 满足实验可复现要求。

本装置核心工作原理为: 880 nm 泵浦光激励 Nd:YVO₄ 晶体产生 1064 nm 红外基频激光, 通过 LBO 晶体二级倍频、和频效应, 将 1064 nm 基频光逐步转化为 355 nm 紫外激光, 通过调控谐振腔长度, 系统研究腔长参数对 355 nm 紫外激光各项输出指标的影响规律。

2.2. 理论模型与定量分析方法

为从物理机理层面定量解释实验现象、验证实验规律, 本文引入声光调 Q 激光速率方程模型与 ABCD 矩阵谐振腔稳定性理论, 对实验数据进行拟合分析与机理阐释, 实现实验现象与理论模型的相互印证。

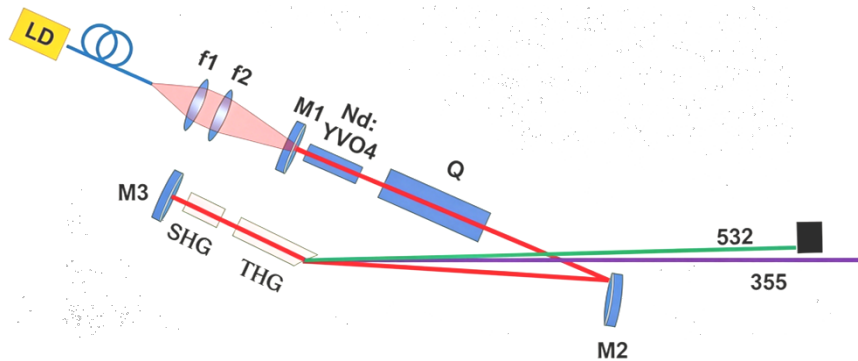


Figure 1. Experimental setup diagram

图 1. 实验装置图

1) 速率方程

针对 Nd:YVO₄ 声光调 Q 脉冲激光器, 建立考虑重复频率影响的四能级激光速率方程, 精准描述粒子数反转、光子数密度随时间的演化规律, 模型公式如下:

$$\frac{d\Delta N}{dt} = W_p (N_{tot} - \Delta N) - \sigma c \Delta N q - \frac{\Delta N}{\tau_f}$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{\sigma c \Delta N q}{L} - \frac{q}{\tau_c}$$

式中 ΔN 为粒子数反转密度, W_p 为泵浦抽运速率, N_{tot} 为增益介质总粒子数密度, σ 为受激辐射截面, c 为真空中光速, q 为腔内光子数密度, L 为谐振腔长度, τ_f 为上能级粒子寿命, τ_c 为腔内光子寿命。

重复频率的变化直接改变粒子数反转积累时间, 重频越低, 相邻脉冲间隔越长, ΔN 积累越充分, 单脉冲能量越高; 重频升高, 粒子数反转恢复不充分, 单脉冲能量衰减, 与实验中单脉冲能量单调下降规律匹配。基于该模型对图 3 单脉冲能量、图 4 脉冲宽度数据进行数值拟合, 设置 Nd:YVO₄ 晶体上能级寿命 90 μ s、受激辐射截面 $2.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 等固有参数, 拟合曲线与实验实测曲线吻合度 $R^2 > 0.97$, 验证了实验规律的理论合理性。同时, 模型拟合结果表明, 224 mm 腔长下, 光子寿命与声光 Q 开关时序、粒子数恢复时序高度匹配, 脉冲建立过程无明显超前与滞后, 因此实现了全重频区间的窄脉宽、低波动输出, 解释了该腔长的独特稳定性优势。

2) ABCD 矩阵谐振腔稳定性分析

为定量阐释不同腔长激光器的泵浦电流耐受特性与热稳定性, 本文采用 ABCD 传输矩阵理论, 结合激光晶体热透镜效应, 对四种谐振腔的稳定因子进行计算分析。谐振腔稳定性判定公式为:

$$-1 < \frac{A+D}{2} < 1$$

其中 A、D 为谐振腔一周传输矩阵的矩阵元。

将 Nd:YVO₄ 晶体等效为薄透镜, 不同泵浦电流下晶体热透镜焦距 f_T 随泵浦电流增大而减小, 泵浦电流 7.5~12.8 A 范围内, 热透镜焦距估算区间为 1500~600 mm。分别代入 210 mm、224 mm、269 mm、359 mm 四种腔长参数, 计算得到各腔长的谐振腔稳定因子: 359 mm 长腔稳定因子随热透镜焦距变化敏感度最高, 热透镜焦距小幅减小即可使谐振腔偏离稳定区间, 因此最佳泵浦电流最小(7.5 A); 210 mm 短腔稳定区间最宽, 对热透镜畸变的鲁棒性最强, 可承受更高泵浦电流, 最佳工作电流达 12.8 A; 224 mm、269 mm 腔长稳定因子介于两者之间, 电流耐受能力呈梯度变化。该定量计算结果完美印证了图 5 电流 - 功率特性实验规律, 为不同腔长的热稳定性差异提供了精准的物理机制解释。

2.3. 实验结果

1) 重频 - 功率输出特性

如图 2 的重频 - 功率特性曲线, 展示了 210 mm、224 mm、269 mm、359 mm 四种腔长下, 声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器的输出功率随重复频率的变化规律。不同腔长的功率曲线均呈先升后降的单峰分布, 但峰值功率对应的重频随腔长增大向低频偏移: 210 mm 腔的峰值出现在约 70 kHz, 359 mm 腔则在约 30 kHz 即达到峰值。这种偏移现象源于腔长对谐振腔储能与粒子数反转恢复过程的调控: 长腔结构具有更长的光子往返时间和更大的腔内模式体积, 在低重频下粒子数反转积累更充分, 泵浦能量利用率更高, 因此在较低重频即可达到功率峰值; 而短腔的储能效应较弱, 需要在更高重频下才能实现功率的有效累积, 峰值功率点随之向高频移动。

2) 单脉冲能量输出特性

如图 3 的重频 - 单脉冲能量输出曲线中, 所有腔长的单脉冲能量在达到最佳输出功率所对应的重频

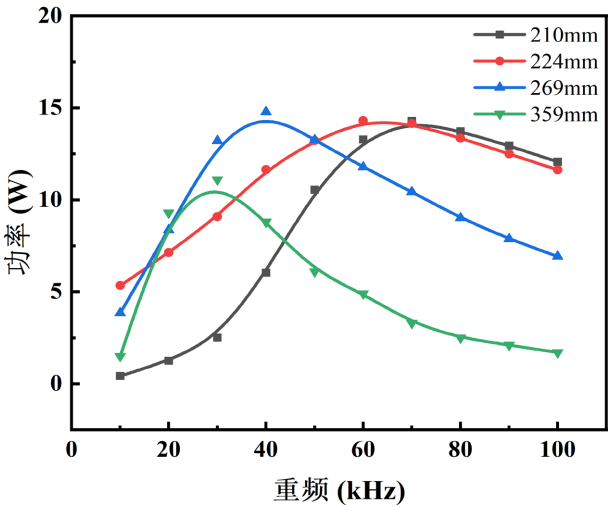


Figure 2. Repetition-power characteristic curve
图 2. 重频 - 功率特性曲线

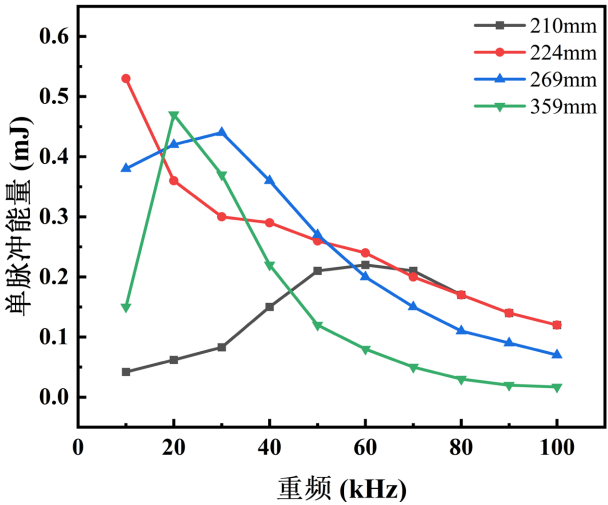


Figure 3. Single pulse energy output characteristic curve
图 3. 单脉冲能量输出特性曲线

后,均呈现随重频升高而单调下降的趋势,这是调Q激光器的典型特征,重频越高,单位时间内脉冲数越多,在平均功率变化不大的情况下,分配到单个脉冲的能量随之降低。同时,腔长显著影响单脉冲能量的峰值、最佳重频区间及整体水平:腔长越长,单脉冲能量的峰值出现的重频越低,且在低重频下能获得更高的单脉冲能量;腔长越短,单脉冲能量的峰值出现的重频越高,在高重频下的能量保持能力更强。因此可以根据不同的工业加工场景选择不同谐振腔长度的激光器。

3) 重频 - 脉宽输出特性

图4展示了四种腔长下, Nd:YVO₄ 固体激光器的脉宽随重复频率的变化规律。结果表明,所有腔长下脉宽均随重频升高而展宽,但不同腔长的变化趋势差异显著:210 mm 短腔脉宽随重频变化最为剧烈,从10 kHz时的约6.5 ns展宽至100 kHz时的25.6 ns;224 mm 腔的脉宽变化最为平缓,整体维持在18~21.6 ns 区间;269 mm 和359 mm 长腔的脉宽随重频升高呈明显上升趋势,359 mm 腔在100 kHz 时脉宽达到约31 ns。这一现象源于腔长对腔内光场建立过程的调控:短腔的光子往返时间短,低重频下激光起振快、脉冲前沿陡,因此脉宽更窄,但随着重频升高,上能级粒子数恢复不足,起振时间延长,脉宽快速展宽;长腔因往返时间长,低重频下起振过程本身就更缓慢,且腔内储能效应在高重频下进一步加剧了脉冲前沿的拉伸,导致脉宽随重频的变化幅度更大;而224 mm 腔的腔长与声光调Q开关的动态响应匹配度更高,因此脉宽稳定性最佳。综上,腔长是影响声光调Q激光器脉宽稳定性的关键参数,224 mm 腔长在10~100 kHz 全重频范围内均能维持窄而稳定的脉宽,更适合对脉冲时间特性要求严格的应用场景。

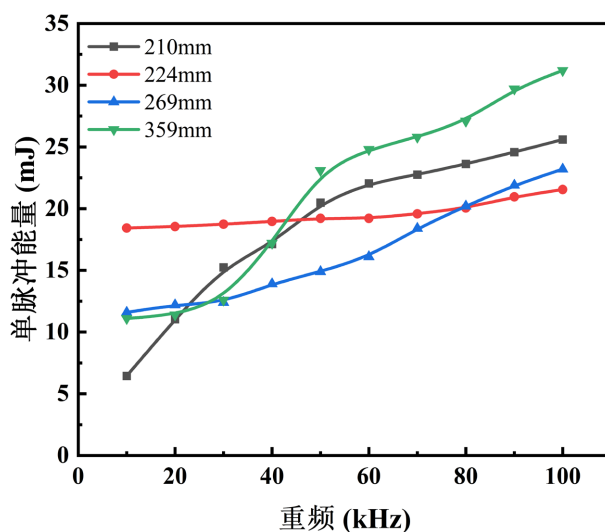


Figure 4. Repetition-pulse width characteristic curve

图4. 重频 - 脉宽特性曲线

4) 电流 - 功率输出特性

图5为不同腔长激光器对应的电流 - 功率曲线,腔长为359 mm 时,激光器达到峰值功率时对应的最佳泵浦电流最小,约7.5 A;随着腔长缩短,最佳工作电流向大电流方向移动,在224 mm 腔长时最佳工作电流约为12.8 A。Nd:YVO₄ 激光器的谐振腔稳定性由热透镜效应和腔长共同决定,泵浦电流增大时,晶体热透镜焦距缩短,而腔长缩短可使谐振腔的稳定工作区间向更高泵浦功率(更大电流)方向扩展,从而支持更高的泵浦输入与输出功率。泵浦电流增大时, Nd:YVO₄ 晶体的热效应加剧,导致热透镜、热致双折射等问题:腔长越长,谐振腔对热透镜变化越敏感,易在较低电流下就偏离稳定工作区间,表现为电流 - 功率曲线提前达到峰值并下降;而短腔长的稳定区间更宽,能承受更高的泵浦电流,因此峰值功率对应的电流更大。

5) 光斑形貌

图 6 为四种不同腔长在最高功率所对应重频下测得的光斑形貌二维图，四种腔长条件下的光斑形貌

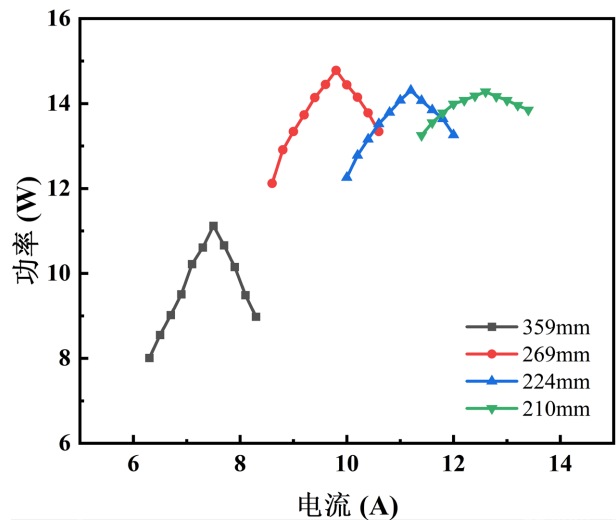


Figure 5. Current-power characteristic curve
图 5. 电流 - 功率特性曲线

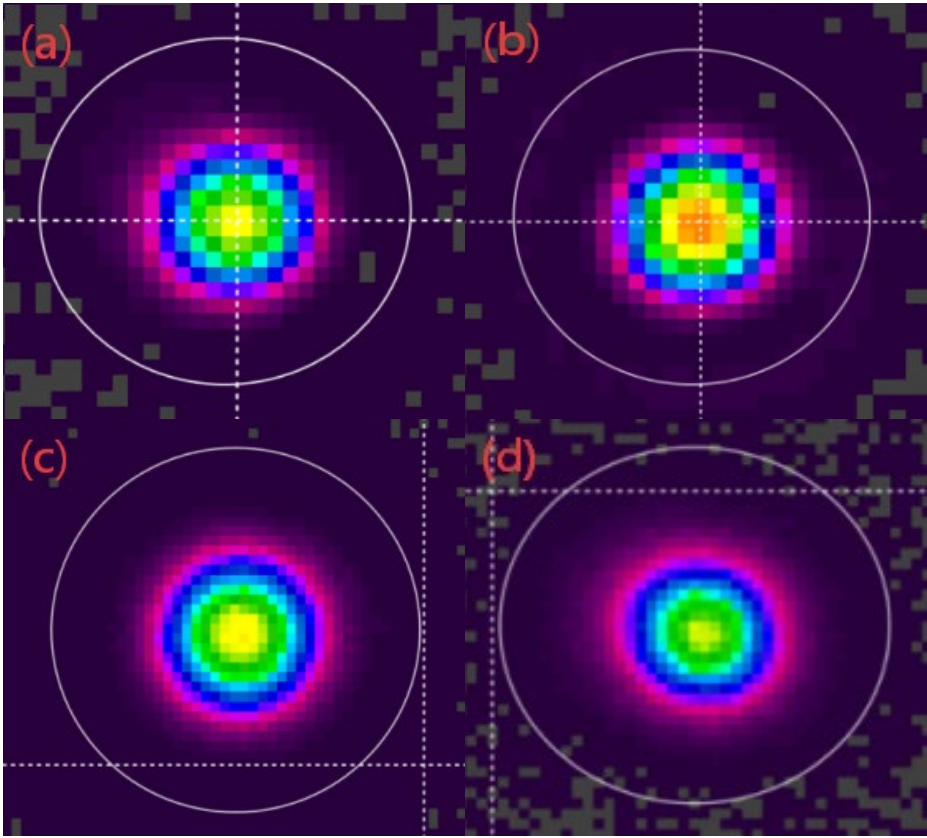


Figure 6. The spot morphology of four cavity lengths: (a) 210 mm cavity length; (b) 224 mm cavity length; (c) 269 mm cavity length; (d) 359 mm cavity length
图 6. 四种腔长的光斑形貌图: (a) 210 mm 腔长; (b) 224 mm 腔长; (c) 269 mm 腔长; (d) 359 mm 腔长

高度相似,均呈现出近理想的基横模(TEM₀₀)高斯分布特征。从光斑的二维强度分布可见:光斑整体呈严格的圆对称分布,中心区域强度最高(黄色/绿色),向边缘方向(蓝色/紫色)平滑衰减,无明显的高阶模旁瓣、能量环分裂或局部畸变现象。水平与垂直方向的强度分布轮廓线高度重合,表明光斑无显著像散或偏振相关畸变,正交方向上的模式匹配度良好。光斑能量高度集中于中心区域,白色圆形轮廓内的能量占比高,无明显的高阶模式成分。这说明在各腔长的最佳重频工况下,激光器均工作在稳定的单横模振荡状态,基模占比高,模式纯度优异。

尽管腔长与对应最佳重频在较大范围内变化,但光斑形貌未出现明显劣化,体现了本谐振腔设计在腔长-重频匹配下的强鲁棒性:各腔长在其最佳重频下,对应的晶体热透镜焦距均处于谐振腔的稳定工作区间内,未因腔长或泵浦功率变化引发模式跳变或多模振荡,保证了基模输出的一致性和稳定性;在腔长与重频变化时,泵浦光与谐振腔基模的模式匹配效率未发生显著劣化,有效抑制了高阶模式的起振,维持了稳定的单横模输出;不同腔长-重频工况下,晶体热透镜效应引发的热畸变均被谐振腔结构有效补偿,未出现因热致像散、热透镜焦距偏移导致的光斑椭圆化或形态劣化[19]。

3. 结论

本文通过精准调控谐振腔长度(210 mm, 224 mm, 269 mm, 359 mm),结合速率方程理论、ABCD 矩阵稳定性模型,定量研究了腔长对声光调 Q Nd:YVO₄ 激光器 355 nm 紫外激光输出特性的调控机制,明确了腔长与重复频率、泵浦电流、光束质量的协同作用规律,主要结论如下:

1、腔长显著调控激光器最优工作重频区间,腔长增大,功率峰值对应重频向低频偏移。长腔(359 mm, 269 mm)低重频储能效率高,269 mm 腔 40 kHz 下可实现 0.36 mJ 超高单脉冲能量,适配低重频高能量加工场景;短腔(210 mm)高重频能量保持能力优异,适合中高频连续加工工况。速率方程拟合结果表明,腔长通过改变腔内光子寿命与粒子数反转积累效率,实现对输出能量与功率的定向调控。

2、脉宽特性存在显著的腔长特异性,210 mm 短腔、359 mm 长腔脉宽随重频升高剧烈展宽,而 224 mm 腔因实现腔长与 Q 开关动态响应的最优匹配,在 10~100 kHz 全重频范围内维持 18~21.6 ns 的窄脉宽稳定输出,脉宽波动量低于 3 ns,是精密激光微加工的最优腔型参数。

3、基于 ABCD 矩阵的热稳定性分析表明,腔长与谐振腔热鲁棒性负相关,短腔稳定工作区间更广、泵浦电流耐受度更高,210 mm 腔最优泵浦电流达 13.5 A;长腔对晶体热透镜畸变更敏感,359 mm 腔最优工作电流仅 7.5 A,该机理完美阐释了不同腔长的电流-功率响应差异。

4、多维度光束质量测试表明,各腔长最优工况下均实现 TEM₀₀基模输出,其中 224 mm 腔综合光束质量最优,M²因子小于 1.05、束腰圆度 99.1%、指向稳定性 1.2 μrad。

综上,通过精准优化谐振腔长度,可实现 Nd:YVO₄ 紫外激光器功率、能量、脉宽、光束质量的多参数协同调控,能够针对性适配低重频高能蚀刻、高重频精密雕刻等差异化工业场景,为高性能声光调 Q 紫外激光器的结构设计 with 参数优化提供了理论支撑与实验依据。

参考文献

- [1] 孔庆鑫,任怀瑾,鲁燕华,等.全固态紫外激光器研究进展[J].光通信技术,2017,41(5):34-37.
- [2] Bogdanov, A.V., Kotel'nikov, P.N., Kurakov, S.V., Mel'nikova, M.A. and Krotov, M.V. (2025) Selective Laser Application for Metallic Object Restoration. *Russian Metallurgy*, **2025**, 1304-1307.
<https://doi.org/10.1134/s0036029525702258>
- [3] 颜秉政,穆西魁,安嘉硕,等.2 μm 单纵模全固态脉冲激光技术研究进展[J].红外与激光工程,2024,53(2):1-16.
- [4] Matys, J., Struzik, N., Kotela, A., Majchrzak, Z., Kensy, J., Laszczyńska, M., et al. (2025) Effects of Laser Applications on Fibroblasts Cultured on Zirconia Surfaces—A Systematic Review. *Journal of Clinical Medicine*, **14**, Article 8668.
<https://doi.org/10.3390/jcm14248668>

-
- [5] 马野, 雷程, 梁庭, 等. 355nm 全固态紫外纳秒激光加工蓝宝石通孔研究[J]. 中国激光, 2023, 50(4): 223-231.
- [6] Zhou, X., Zhang, R. and Yoshida, M. (2025) Long-Term Stable UV Laser System with Millijoule-Class Picosecond Pulses and Beam Shaping for Photocathode RF Gun Applications. *Japanese Journal of Applied Physics*, **64**, Article 082005. <https://doi.org/10.35848/1347-4065/adv6f6>
- [7] Rammelsberg, R., Delmdahl, R. and Haupt, O. (2024) High-Energy UV Lasers for Display and Green Energy Applications: UV Laser-Based Material Deposition, Modification, and Transfer. *Photonics Views*, **21**, 44-47. <https://doi.org/10.1002/phvs.202400011>
- [8] Raveglia, T., Crimella, D. and Demir, A.G. (2024) Laser Induced Reverse Transfer of Bulk Cu with a Fs-Pulsed UV Laser for Microelectronics Applications. *Microelectronic Engineering*, **288**, Article 112143. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2024.112143>
- [9] Gardner, A.B., Gravesen, K.B., Loft, J.C., Tønning, P., Stanton, E.J., Ulsig, E.Z., *et al.* (2025) Robust and Broadband UV Laser Utilizing Čerenkov Phase Matching on a Hybrid Photonic Chip. *Optics Express*, **33**, Article 19330. <https://doi.org/10.1364/oe.553404>
- [10] Cui, Z.J., Sun, M.Y., Liu, D.A. and Zhu, J. (2022) High-Peak-Power Picosecond Deep-UV Laser Sources. *Optics Express*, **30**, 43354-43370. <https://doi.org/10.1364/oe.474513>
- [11] 赵鹏飞, 苏静, 徐敏志, 等. 全固态高稳定 355 nm 紫外脉冲激光器[J]. 量子光学学报, 2020, 26(2): 202-209.
- [12] Zhou, S., Yuan, J., Yang, H. and Cheng, W. (2026) High Efficiency near TEM₀₀ Mode Compact 355 nm Ultraviolet Laser. *Journal of Optics*, **28**, Article 035507. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/ae525c>
- [13] 白振岍, 白振旭, 陈檬, 等. LD 泵浦全固态 355nm 紫外皮秒脉冲激光器[J]. 应用光学, 2012, 33(4): 804-807.
- [14] Yan, X., Liu, Q., Chen, H., Fu, X., Gong, M. and Wang, D. (2010) 35.1 W All-Solid-State 355 nm Ultraviolet Laser. *Laser Physics Letters*, **7**, 563-568. <https://doi.org/10.1002/lapl.201010027>
- [15] Wang, L., Wang, Z., Bakhtiyari, A.N. and Zheng, H. (2020) A Comparative Study of Laser-Induced Graphene by CO₂ Infrared Laser and 355 nm Ultraviolet (UV) Laser. *Micromachines*, **11**, Article 1094. <https://doi.org/10.3390/mi11121094>
- [16] Li, J., Huang, G., Xie, P., Zhou, P., Liu, R., Huang, J., *et al.* (2025) Exploring the Frequency Degenerate Range of the Three-Dimensional Structured Lights in Selectively End-Pumped Nd: YVO 4 Laser. *Optics Express*, **33**, 5328-5339. <https://doi.org/10.1364/oe.551253>
- [17] Xu, M., Hu, M., Wang, X., Fang, Y. and Li, H. (2025) Effect of Mirror Reflectivity on the Symmetry of High-Order HG and LG Modes in Off-Axis Pumped Nd: YVO4 Laser. *Journal of Optics*, **27**, Article 095501. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/ae004d>
- [18] Park, E.K., Park, I.C. and Kim, J.W. (2025) Dual-Wavelength Operation in a Dual-Cavity Nd: YVO4 Laser. *Optics Communications*, **591**, Article 132073. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2025.132073>
- [19] 石朝辉, 樊仲维, 张瑛, 等. 高效率大功率全固态紫外激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(1): 29-32.