

基于高温LDAs泵浦Zigzag Nd:YAG大能量脉冲激光器

赵千喜 王鹤鹏 吴从正 李岩 邹永刚 徐英添 张崇

High-temperature LDAs-pumped Zigzag Nd:YAG high-energy pulse laser

ZHAO Qian-xi, WANG He-peng, WU Cong-zheng, LI Yan, ZOU Yong-gang, XU Ying-tian, ZHANG Chong

引用本文:

赵千喜, 王鹤鹏, 吴从正, 李岩, 邹永刚, 徐英添, 张崇. 基于高温LDAs泵浦Zigzag Nd:YAG大能量脉冲激光器[J]. *中国光学*, 2026, 19(3): 1-12. doi: 10.37188/CO.2025-0147

ZHAO Qian-xi, WANG He-peng, WU Cong-zheng, LI Yan, ZOU Yong-gang, XU Ying-tian, ZHANG Chong. High-temperature LDAs-pumped Zigzag Nd:YAG high-energy pulse laser[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(3): 1-12. doi: 10.37188/CO.2025-0147

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0147>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

同带泵浦的Tm:CYA调Q锁模激光器

Tm:CYA Q-switched mode-locked laser realized by tandem-pumping

中国光学 (中英文). 2024, 17(4): 764 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0162>

通道结构对半导体泵浦流动铷蒸气激光器特性影响

Influence of flow channel structure on characteristics of laser diode pumped flowing-gas rubidium vapor laser

中国光学 (中英文). 2024, 17(3): 617 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0174>

444.2 nm蓝光半导体泵浦掺镨氟化钇锂晶体连续351 mW输出275 nm紫外激光器

275 nm ultraviolet laser with 351 mW continuous-wave output in a Pr:YLF laser pumped by a blue laser diode at 444.2 nm

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 376 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2024-0024>

基于声光锁模全固态660 nm激光器

All-solid-state acousto-optic mode-locked laser operating at 660 nm

中国光学 (中英文). 2024, 17(1): 238 <https://doi.org/10.37188/CO.EN-2023-0013>

脉冲激光辐照背照式CMOS图像传感器损伤机理研究

Damage mechanism of back-illuminated CMOS image sensor irradiated by pulsed laser

中国光学 (中英文). 2025, 18(2): 256 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0139>

燃煤锅炉高温腐蚀气体激光在线监测设备研究

Research on laser online monitoring equipment for high-temperature corrosive gas in coal-fired boilers

中国光学 (中英文). 2024, 17(5): 1060 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0209>

文章编号 2097-1842(2026)03-0001-12

基于高温 LDAs 泵浦 Zigzag Nd:YAG 大能量脉冲激光器

赵千喜¹, 王鹤鹏¹, 吴从正¹, 李岩^{1*}, 邹永刚¹, 徐英添¹, 张崇²
(1. 长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130013;
2. 陆军装备部驻长春地区第一军事代表室, 吉林 长春 130033)

摘要:为满足特殊环境下激光系统对轻量化结构与高能量脉冲输出的双重需求, 本研究设计并实现了一种采用高温半导体激光器阵列(Laser Diode Arrays, LDAs)侧面泵浦 Zigzag Nd:YAG 晶体的无水冷高能脉冲激光系统。振荡光在晶体内呈现“Zigzag”路径以增加增益长度, LDAs 分别对两个晶体采用轴对称式泵浦, 以改善增益分布均匀性。通过隔热材料实现 Nd:YAG 晶体与 LDAs 的热隔离, 并分别采用半导体制冷器(Thermoelectric Cooler, TEC)与强制风冷对 Nd:YAG 晶体和 LDAs 进行独立温控, 确保热管理的稳定性与高效性。磷酸二氘钾晶体(Potassium Dideuterium Phosphate, DKDP)作为电光调 Q 晶体。在不使用水冷, 重复频率为 100 Hz(占空比为 2.5%)的条件下, 实现了 129.2 mJ 的脉冲激光输出, 脉冲宽度为 9.0 ns, 对应的光-光转换效率为 9.6%, 斜效率为 13.1%, 输出能量稳定性优于 2.26%, 并在 150 Hz 重复频率下取得了 87.6 mJ 的能量输出。该激光系统为激光测距、激光照射等领域提供了一种环境适应性强、结构紧凑的新型光源解决方案。

关键词: 半导体激光器阵列(140.2010); 侧面泵浦; Zigzag; 电光调 Q; 无水冷

中图分类号: TN242 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0147 CSTR: 32171.14.CO.2025-0147

High-temperature LDAs-pumped Zigzag Nd:YAG high-energy pulse laser

ZHAO Qian-xi¹, WANG He-peng¹, WU Cong-zheng¹, LI Yan^{1*}, ZOU Yong-gang¹,
XU Ying-tian¹, ZHANG Chong²

(1. National Key Laboratory of High-Power

Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130013, China;

2. The first Military Representative Office in Changchun of Army, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: liyan8281@cust.edu.cn

Abstract: To achieve simultaneous lightweight design and high-energy output under special environmental conditions, a compact, water-cooling-free high-energy pulsed laser system based on high-temperature laser diode array (LDAs) side-pumped zigzag Nd:YAG crystals is demonstrated for operation in demanding environments. The zigzag beam propagation increases the effective gain length, while symmetric LDAs pumping

收稿日期: 2025-11-21; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 吉林省中青年科技创业卓越人才项目 (No. 20220508138RC)

Supported by Outstanding Young and Middle-aged Talents Program for Technology Entrepreneurship of Jilin province (No. 20220508138RC)

of two Nd:YAG crystals improves gain uniformity. Thermal isolation between the crystals and LDAs is implemented, with independent temperature control achieved using thermoelectric coolers (TEC) for the Nd:YAG crystals and forced air cooling for the LDAs. A potassium dideuterium phosphate (DKDP) crystal is employed for electro-optic Q-switching. At a repetition rate of 100 Hz without water cooling, a maximum pulse energy of 129.2 mJ with a pulse duration of 9.0 ns is obtained, corresponding to an optical-to-optical efficiency of 9.6% and a slope efficiency of 13.1%, with energy stability better than 2.26%. An output energy of 87.6 mJ is achieved at 150 Hz. This system provides a compact and environmentally robust light source for laser ranging and illumination applications.

Key words: laser diode arrays (140.2010); side-pumping; Zigzag; electro-optic Q-switching; without water cooling

1 引言

Nd:YAG 晶体因其具有优异的光学与机械性能,可在 1 μm 波段产生大能量脉冲激光 ($E \geq 100$ mJ) 而获得广泛应用^[1-3]。大能量脉冲激光器通常采用水冷散热或采用多级放大结构。2019 年,邹吉跃等报道了一种大信号无水冷 LD 侧泵 Nd:YAG 激光放大器,采用半导体制冷器 (TEC) 制冷与铜热沉风冷结构,在 10 Hz 重复频率下实现了 1050 mJ 脉冲输出,脉宽 10 ns,光束质量 $M^2 < 5$ ^[4]。2020 年,南京邮电大学丁健勇等人使用三级放大之字形板条激光系统在 200 Hz 重复频率下,获得了最大单脉冲能量 600 mJ 的激光输出,脉冲宽度为 9.3 ns^[5]。上述研究验证了大能量无水冷脉冲激光器的可行性。2023 年,吴健宏等以三向 LD 侧面泵浦 Tm:YAG 棒状晶体,借助水冷机将晶体与 LD 温度稳定在 12 $^{\circ}\text{C}$,并在低湿环境中实现 119 W、2.02 μm 连续激光输出,光-光效率为 19.6%,系统紧凑且无结霜,该工作验证了激光器在近室温条件下高平均功率运转的可靠性^[6]。目前,利用 Nd:YAG 行波放大技术并结合水冷,脉冲激光器可以实现稳定的大能量输出^[7-9]。

对于移动平台使用的激光系统,需要脉冲激光器具备小型化、轻量化和高可靠性,因此采用水冷散热方式及多级放大结构,这也限制了其使用范围。探索无需水冷直接输出高能脉冲激光系统成为当前研究的重要方向^[10-11]。2014 年,NASA 戈达德航天中心 D. Barry Coyle 团队采用无水冷 Nd:YAG 板条加渐变反射镜方案,在脉冲重复频率为 100 Hz 的情况下,实现最大输出能量为

114 mJ,脉冲宽度为 9.5 ns^[12]。2023 年,哈尔滨工业大学闫仁鹏等人使用五向侧面泵浦 Nd:YAG 电光调 Q 振荡器,对五向侧面泵浦模块的非高斯、非均匀泵浦分布进行了计算,解释了传统高斯近似理论的偏差来源,为无水冷 Zigzag 结构中的非均匀泵浦重叠效率计算提供了理论依据^[13]。2023 年,山东大学杨泽奇设计了一种无需水冷的半导体激光器阵列 (Laser Diode Arrays, LDAs) 侧面泵浦 Nd:YAG 模块,并对晶体内部热效应及应力分布进行了分析,在脉冲重复频率为 100 Hz 的情况下,实现了最大输出能量为 68 mJ,脉冲宽度为 31 ns^[14]。

对于小角度切割端面的晶体,使振荡光在晶体内呈“Zigzag”光路振荡放大,有效延长增益长度并提高储能密度,在水冷高能脉冲激光领域得到了大量应用^[15-17]。然而,现有研究中,将“Zigzag”光路 Nd:YAG 板条与无水冷设计相结合的高能脉冲激光系统报道仍相对较少,且已有的相关方案普遍存在重复频率偏低、脉冲能量不足、脉冲持续时间较长等挑战。针对这些问题,本文提出并实现了一种基于高温半导体激光器阵列泵浦的 Zigzag Nd:YAG 无水冷高能脉冲激光系统。通过对 Nd:YAG 晶体端面进行小角度切割,使腔内振荡光在增益介质中沿 Zigzag 光路多次反射传播,有效延长了增益光程并提升了能量提取效率;同时,采用上下轴对称侧面泵浦结构,改善晶体内部增益分布的均匀性。在热管理方面,通过构建泵浦源与增益介质相互独立的传导冷却体系,实现了高温 LDAs 稳定工作与 Nd:YAG 晶体温控的协同优化,从而在无需水冷条件下获得高能量、纳秒脉冲激光输出。实验结果验证了该

结构有望在 20 ~ 100 Hz 重复频率范围内实现高能量输出与良好稳定性,为特殊环境和移动平台应用中的无水冷高能脉冲激光器设计提供了一种有效的工程实现方案。

2 实验装置设计及分析

2.1 Nd:YAG 模块设计

为了构建紧凑型的 Nd:YAG 脉冲激光系统,本研究设计了一种采用 LDAs 进行侧面泵浦的 Nd:YAG 晶体模块化结构,其具体设计如图 1(彩图见期刊电子版)所示。

LDAs 由 6 根 bar 条组成,在工作温度为 50 °C 左右时,输出中心波长为 808 nm 脉冲宽度为 250 μ s 的泵浦光,在 100 Hz 重复频率(占空比为 2.5%)、驱动电压为 95 V、电流为 150 A 的条件下运行时,其最大单脉冲能量为 1350 mJ。为了提高 LDAs 的热扩散性能,将其固定在厚度为 6 mm 的铜制散热器上。同时,采用风量为 22.28 cfm

的散热风扇来调节 LDAs 的温度,使 LDAs 保持在 50 °C \pm 3 °C 的最佳工作温度。选用 Nd:YAG 晶体作为增益介质,晶体两端面镀有 1.06 μ m 波长的增透膜。在 Nd:YAG 晶体的 4 个侧面中,有 3 个侧面包裹了厚度为 0.5 mm 的铝箔,以提高晶体与铜的热沉接触面积。其结构如图 1(b)所示。L 形铜夹的下方采用半导体制冷器(Thermoelectric Cooler, TEC)对晶体温度进行控制。通过一对聚醚酰亚胺(Polyetherimide, PEI)将 LDAs 和 Nd:YAG 的热沉支撑件相连,同时对 LDAs 与 Nd:YAG 晶体的产热进行隔离,以确保整个结构的稳定性与导热的高效性。在紧邻 LDAs 与 Nd:YAG 晶体的热沉区域进行开孔处理,孔内嵌入阻值为 10 k Ω 的热敏电阻,以实现 LDAs 及 Nd:YAG 晶体工作温度的实时监测。为进一步提升输出能量并改善增益分布均匀性,实验中使用了两个相同的 Nd:YAG 模块,分别对晶体的上下两个面进行泵浦。

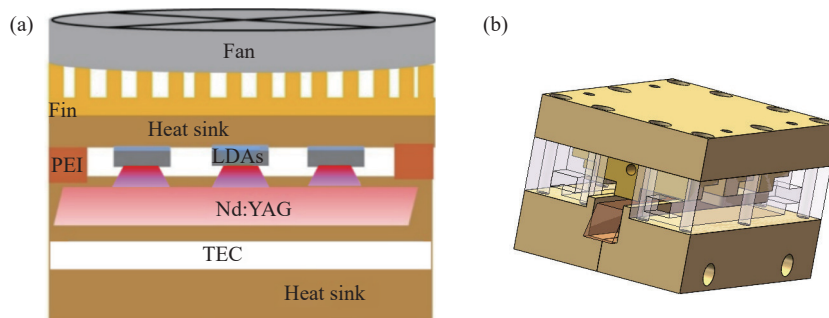


图 1 Nd:YAG 模块的(a)二维结构示意图及(b)三维结构示意图

Fig. 1 (a) Two-dimensional (b) three-dimensional structural schematic of Nd:YAG module

2.2 Nd:YAG 晶体设计

为了提高输出功率,需要设计 Nd:YAG 的吸收效率。吸收效率公式如式(1)所示:

$$\eta_{ab} = 1 - \exp(-\alpha h) \quad (1)$$

可见,晶体对泵浦光的吸收效率 η_{ab} 与吸收系数 α 和晶体厚度 h 有关。晶体的吸收系数 α 如式(2)所示:

$$\alpha = N_{Nd} \sigma_{ab} \quad (2)$$

其中, σ_{ab} 为 Nd:YAG 晶体的吸收截面。 N_{Nd} 为 Nd³⁺ 的浓度,为实现较大的脉冲能量输出,增益介质需具备较高的储能能力。因此,在 100 Hz 重复频率下,为实现泵浦吸收与热负载的均衡优化,

使用的 Nd:YAG 晶体掺杂浓度为 0.8 at.%。

根据 YAG 的化学式 Y₃Al₅O₁₂, Y³⁺ 的浓度可表示为 $N_Y = 3\rho_{YAG}N_A/M_{YAG}$, 其中 YAG 的密度 $\rho_{YAG}=4.56$ g/cm³, 相对分子质量 $M_{YAG}=593.6$ g/mol, N_A 为阿伏伽德罗常数。

$$N_{Nd} = \frac{3\rho_{YAG}N_A D}{M_{YAG}} \quad (3)$$

当掺杂率为 $D=0.8$ at.% 时, Nd³⁺ 的浓度为 $N_{Nd}=1.1 \times 10^{20}$ cm⁻³。已知受激吸收截面 $\sigma_{ab}=6.7 \times 10^{-20}$ cm², 不同厚度下 Nd:YAG 晶体对泵浦光的吸收效率如图 2(a)(彩图见期刊电子版)所示: 在晶体厚度 $h=6$ mm 时, 掺杂率为 0.8 at.% 的 Nd:YAG 晶体的吸收效率可达 98.7%, 当晶体厚度大于 6 mm

时,增加晶体厚度对泵浦的吸收效果提升有限。

因此,设计的晶体厚度为 6 mm。

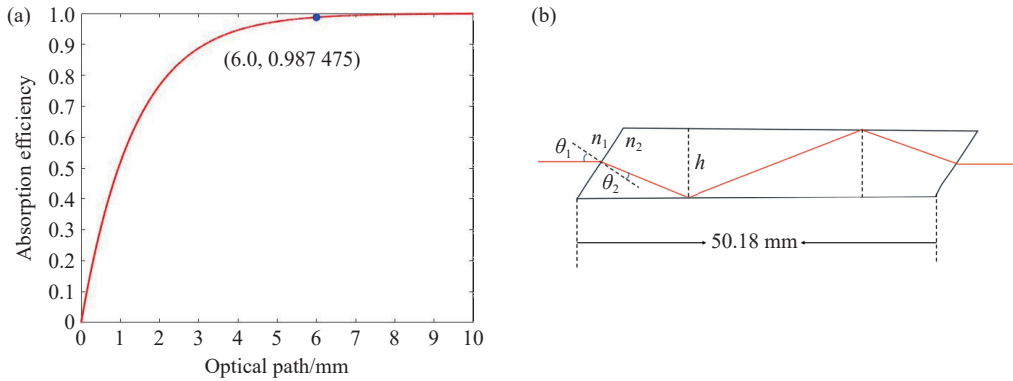


图 2 (a) 不同厚度下晶体的吸收效率; (b) 晶体内“Zigzag”光路示意图

Fig. 2 (a) Absorption efficiency of the crystal at different thicknesses; (b) “Zigzag” optical path in the crystal

在本实验中,晶体端面切割成角度 θ 为 61.2° ,尺寸为 $6\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 50.18\text{ mm}$ 。腔内激光由晶体端面水平进入晶体,在晶体内呈现“Zigzag”光路,并水平出射。根据介质折射率公式可知,腔内激光在晶体内传播距离如图 2(b)(彩图见期刊电子版)所示。腔内激光在晶体内经过的几何长度 $L_{\text{opt}} = 2h / \cos(\theta_1 - \theta_2)$ 。其中 θ_1 和 θ_2 分别为腔内激光进入晶体的入射角和折射角。

2.3 晶体增益分布仿真

激光晶体中的增益分布与腔内振荡模场的空间耦合效率是决定激光器输出性能的关键参数之一,因此,为实现增益分布与基模高斯光束重叠,通常需对泵浦光束参数进行设计,使其在激光介质内形成近似高斯分布的增益轮廓,以满足模式匹配条件并优化激光器性能^[18]。为了获取晶体的增益分布,首先使用 Matlab 对侧面泵浦的 Nd:YAG 的吸收过程进行模拟。每个模块由 3 个 LDAs 对晶体进行泵浦,单个 LDAs 的峰值输出功率为 900 W, LDAs 的发光面尺寸为 $5\text{ mm}\times 10\text{ mm}$, LDAs 距离工作物质 1 mm,分别在两个在晶体的上下表面对晶体进行泵浦。利用公式(1)对每个 Nd:YAG 微元吸收泵浦光强度数值进行计算,得到单个晶体泵浦光的吸收强度分布图。

LDAs 在单个晶体的一侧进行泵浦,图 3(a)(彩图见期刊电子版)呈现了晶体在 X-Y 截面($Z=27.5\text{ mm}$)的吸收强度分布特征,光强随着穿透深度遵循比尔-朗伯定律(Beer-Lambert Law)呈指数衰减,单个晶体截面强度分布呈现由泵浦面逐渐向非泵浦面减弱的吸收强度分布。图 3(b)

(彩图见期刊电子版)展示了 LDAs 沿晶体侧面排布时,晶体上表面和 Y-Z 横截面($x=0$)的吸收强度分布特征,可见,增益分布呈现出与 LDAs 周期性排布,在靠近 LDAs 注入面的区域吸收较高,故选用为 6 mm 厚的 Nd:YAG 晶体。

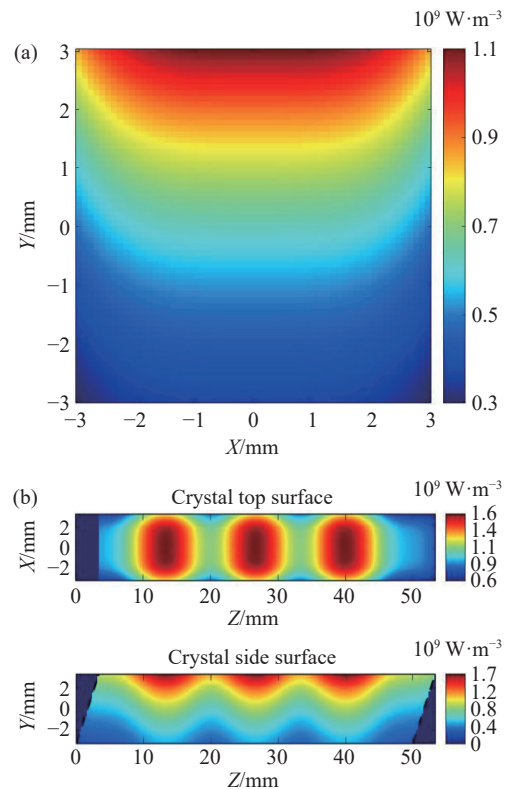


图 3 单个 Nd:YAG 上强度分布. (a) 晶体截面($Z=27.5\text{ mm}$) (b) 晶体上表面($Y=3\text{ mm}$)、侧面($X=0\text{ mm}$) on single Nd:YAG.

Fig. 3 Intensity distributions (a) Crystal cross-section ($Z=27.5\text{ mm}$); (b) Crystal top surface ($Y=3\text{ mm}$) and side face ($X=0\text{ mm}$)

由此可以得到 Nd:YAG 晶体内每个点吸收的能量 $W_{\text{abs}}(x, y, z)$, 其中 x, y, z 为晶体内的空间坐标, 反转粒子数密度 $\Delta n(x, y, z)$ 及小信号增益系数 $g_0(x, y, z)$ 可由公式(4)和(5)表示^[19]

$$\Delta n(x, y, z) = \frac{W_{\text{abs}}(x, y, z) \cdot \tau \cdot \eta_Q}{h \cdot \nu_p}, \quad (4)$$

$$g_0(x, y, z) = \sigma_{\text{em}} \cdot \Delta n(x, y, z), \quad (5)$$

其中, 为 Nd:YAG 上能级荧光寿命, $\tau=230 \mu\text{s}$, 量子效率 $\eta_Q=0.85$, 普朗克常量 $h=6.626\text{e}^{-34}$, 泵浦光频率为 $\nu_p = c/\lambda_p$, 受激发射截面 $\sigma_{\text{em}}=2.8 \times 10^{-19} \text{cm}^2$; 光速 $c=3 \times 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 泵浦光波长 $\lambda_p=808 \text{nm}$, 使用 Matlab 得到晶体内小信号增益分布图, 如图 4(彩图见期刊电子版)所示

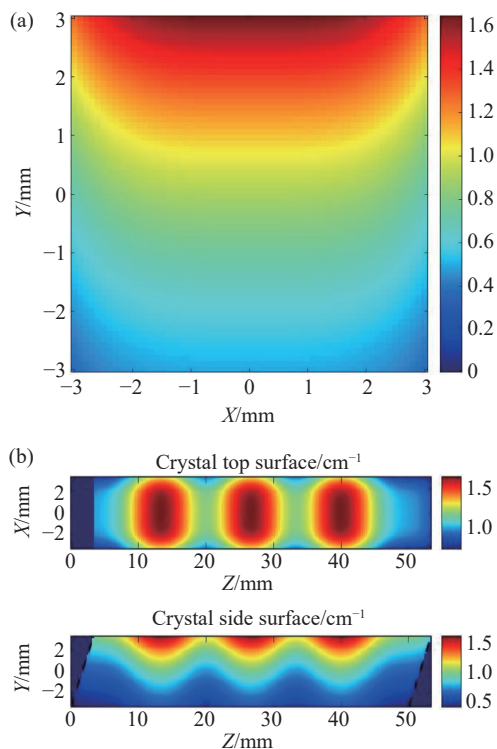


图4 单个 Nd:YAG 上小信号分布 (a) 晶体截面 ($Z=27.5 \text{mm}$); (b) 晶体上表面 ($Y=3 \text{mm}$)、侧面 ($X=0 \text{mm}$)

Fig. 4 Single Nd:YAG small-signal gain distribution (a) Crystal cross-section ($Z=27.5 \text{mm}$); (b) Crystal top surface ($Y=3 \text{mm}$) and side face ($X=0 \text{mm}$)

图 4(a) 呈现了晶体中心位置在横截面(X-Y 平面)上的小信号增益分布。由于泵浦光在单个晶体的一侧垂直入射, 晶体内泵浦光强沿泵浦光传播方向逐渐减小, 导致增益分布呈现出泵浦面

小信号增益较高, 沿泵浦光传播方向逐渐减小的趋势。

图 4(b) 展示了 LDAs 沿晶体侧面排布时, 晶体上表面($Y=3 \text{mm}$)和 Y-Z 横截面($X=0$)的小信号增益分布特征。可见, 其数值梯度的分布趋势与吸收强度分布高度一致, 验证了 0.8 at.% 掺杂浓度下 Nd:YAG 晶体内小信号增益分布的物理模型仿真得到晶体内的小信号增益最大值为 1.63cm^{-1} , 平均值为 0.62cm^{-1} 。

2.4 Nd:YAG 模块热分析

为了评估模块热管理的性能, 将 Solidworks 建立的模型导入 Ansys 软件, 对 Nd:YAG 晶体和夹具进行热模拟。 η_h 代表热转换效率, 其由量子效率 η_Q 和斯托克斯系数 η_s 共同决定, 如式(6)所示^[14]:

$$\eta_h = 1 - \eta_Q \eta_s, \quad (6)$$

$$P_h = \eta_h P_{\text{ab}}, \quad (7)$$

式中, 斯托克斯系数 η_s 为 0.76。量子效率为激光发射光子数与入射光子数之比, 斯托克斯效率代表激光发射的光子能量与泵浦的光子能量的比值。由公式(6)可知 $\eta_h=35\%$ 。则晶体中产生闷热功率由式(7)可知: 泵浦光在晶体内单次吸收率可达 98.5%, 100 Hz 重复频率下 LDAs 最大功率输出时, Nd:YAG 系数泵浦光的平均功率 P_{ab} 为 133.0 W。实验中, 选用了一对最大总制冷功率可达 100 W 的 TECs。设置环境温度为 22°C , 通过模拟得到的晶体与散热器的温度分布情况如图 5(彩图见期刊电子版)所示。

图 5(a) 显示了泵浦过程中晶体棒表面的温度分布。可见, 晶体棒内的最大温差为 9.9°C , 最高温度 44.8°C 出现在未与散热器接触且直接被照射的位置, 最低温度为 34.9°C 。在晶体棒底部, 由于与散热器充分接触且距离被泵浦光照射的位置较远, 故温度较低。图 5(b) 展示了同一时刻与晶体接触的散热模块上温度分布, 与 Nd:YAG 晶体接触区域因热流密集达到温度峰值 35.5°C , 两侧由于热量可更有效地向激光器外壳传导并散热, 温度相对更低。由于铜的热导率高, 散热模块内的温度分布更加均匀, 散热模块内部最大温差仅为 1.9°C , 能够对晶体进行高效散热。

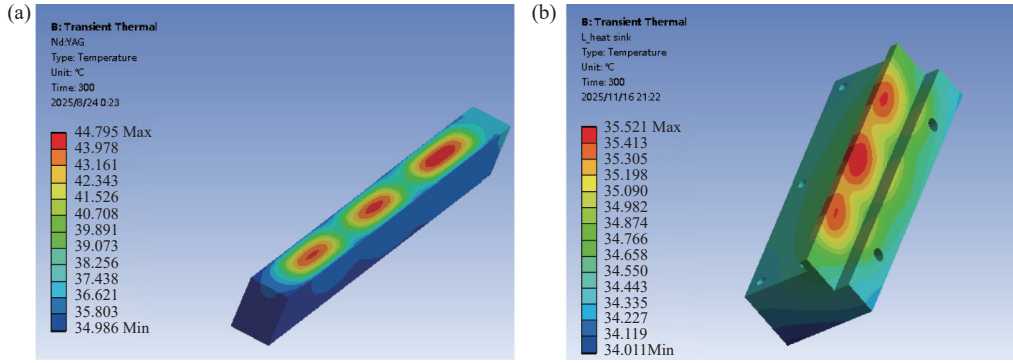


图 5 (a)晶体表面及(b)“L”形散热模块的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of (a) crystal surface and (b) “L”-shaped heat dissipation module

2.5 谐振腔设计以及参数选择

在侧面泵浦的 Nd:YAG 四能级系统中, 振荡器的最佳输出耦合率 T_{opt} 可由式(8)表示^[20]:

$$T_{opt} = \left(\sqrt{\frac{2g_{so}l}{L}} - 1 \right) L, \quad (8)$$

其中,

$$g_{so} = \frac{\eta_Q \eta_S \eta_B \eta_a P_{ab}}{I_s V}, \quad (9)$$

式中具体数值见表 1^[21]。依据公式(9)计算得到的平均小信号增益 g_{so} 为 0.603 cm^{-1} 。这一结果也与 Matlab 得到的小信号增益结果相符。基于上述参数的综合分析, 确定系统的最佳输出耦合比 $T_{opt}=64.4\%$ 。在实际中, 采用了一种透射率为 60% 的梯度反射镜, 以实现输出耦合比的精确调控。

表 1 计算使用的各种参数值

Tab. 1 Various parameters and their values used for calculation

参数	数值	意义
η_Q	0.85	量子效率
η_S	0.76	斯托克斯系数
η_B	0.95	光束重叠效率
η_a	0.987	泵浦吸收效率
P_{ab}	5 400 W	总峰值功率
V	1.8 cm^3	增益介质体积
I_s	2900 W/cm^2	饱和光强
L	0.05	腔内损耗
l	8 cm	Nd:YAG有效泵浦长度

已知 $T_{opt}=60\%$, 由式(10)计算所得往返放大因子 M 为 1.26。

$$T_{opt} = 1 - \frac{1}{M^4}. \quad (10)$$

$$R_1 = \frac{2ML_R}{M-1}, \quad (11)$$

$$R_1 = -R_2. \quad (12)$$

式(11)中, L_R 表示谐振腔的总长度, 约为 250 mm, R_1 和 R_2 分别表示反射镜和输出耦合器的理论最佳曲率半径。考虑到激光运行过程中发生的热透镜效应, 最终选择了反射镜的曲率半径 $R_1=2000 \text{ mm}$, 输出耦合器的曲率半径 $R_2=-2000 \text{ mm}$ 。

使用 ABCD 矩阵计算了在两种激光晶体的不同热透镜焦距下激光光束的稳定性。由于温度梯度引起的热透镜效应可近似看作焦距为 f 的薄透镜, 位于每一个晶体的中间。简化的激光谐振腔结构布局如图 6(彩图见期刊电子版)所示。

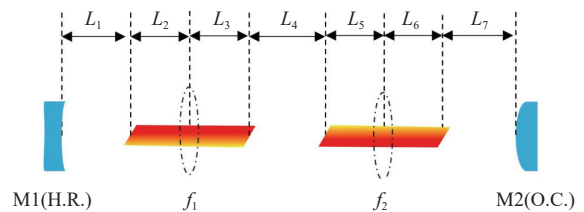


图 6 简化的激光谐振腔结构布局图

Fig. 6 Simplified laser resonator structure layout diagram

由激光在晶体内的传播特性可知, 腔内激光在晶体内经过的几何长度 $L_{opt} = 2h / \cos(\theta_1 - \theta_2)$ 。激光在晶体 2, 3, 5, 6 每一段经过的几何光程均为 L_{opt} 。其中 θ_1 和 θ_2 分别是腔内激光从端面入射的入射角度和折射角度, L_1, L_4, L_7 为激光在空气

中传播的距离。

利用自由空间光线传输矩阵对腔内激光稳定性进行计算。其中^[22]: 光线在谐振腔内往返一周的总传输矩阵 M 可表示为: $M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$, 常见的光学元件可由以下传输矩阵进行标识:

曲率半径为 R 的球面镜反射: $M_L = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R & 1 \end{pmatrix}$;

$$M = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_7 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_{opt} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \dots$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_{opt} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_4 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_{opt} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \dots$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_{opt} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -2/R_1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

在设计谐振腔中, $M1$ 是曲率半径为 2000 mm 的球面平凹反射镜, $M2$ 是曲率半径为 -2000 mm 的凸面镜。腔的稳定性参数表示是不变的, 如下:

$$\frac{(A+D)}{2} \leq 1 \quad (14)$$

模拟得到谐振腔稳定性与热透镜效应关系如图 7(彩图见期刊电子版)所示。

图 7 呈现了在不同热透镜焦距下激光光束稳定性的分析结果。可知, 当两个晶体内的热透镜焦距 f_1 和 f_2 均大于 200 mm 时, 激光谐振腔能够满足稳定性条件 $|(A+D)/2| < 1$ 。随着热透镜效应的增强, 晶体的等效热透镜焦距减小, 谐振腔逐渐趋向非稳腔结构。上述计算结果表明, 所设计的激光系统能够有效保障稳定的能量输出。

实验装置如图 8, 全反射镜(High Resolution,

折射率为 n 的介质中传输距离 d : $M_L = \begin{pmatrix} 1 & d/n \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$; 等效热透镜 f : $M_f = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix}$; 在两侧介质折射率分别为 n_1 和 n_2 的平面折射: $M_D = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_1/n_2 \end{pmatrix}$ 。空气的折射率为 1, 谐振腔的传输不考虑反射镜单程传播时, 由 ABCD 表示为:

H.R.)曲率半径为 2000 mm, 其表面镀有 1.06 μm 波段的高反射膜层。耦合输出镜(Output Coupler, O.C.)采用曲率半径为 -2000 mm, 透过率为 60% 的凸面镜。

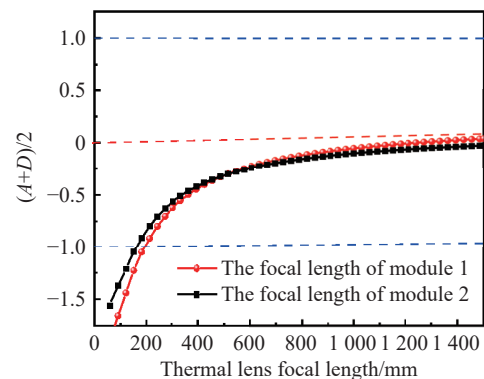


图 7 稳定性与热透镜效应之间的关系

Fig. 7 Relationship between stability and thermal lensing

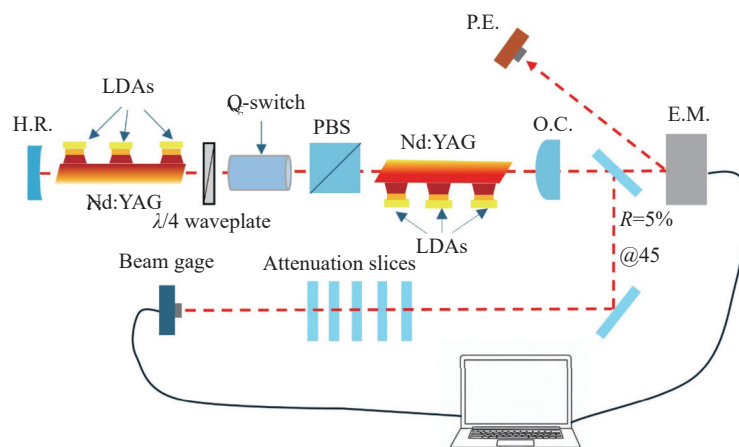


图 8 Nd:YAG 激光器脉冲实验装置

Fig. 8 Experimental setup of an electro-optic Q-switched Nd: YAG laser

腔内插入一个偏振分束器 (Polarizing Beam Splitter, PBS), 用于实现偏振激光输出。谐振腔内置四分之一波片与电光调 Q 晶体。电光调 Q 晶体选用磷酸二氘钾 (Potassium Dideuterium Phosphate, DKDP), 采用升压式调 Q 技术, 在晶体两端施加 2600 V 半波电压, 实现大能量纳秒脉冲输出。泵浦模块使用 6 组 LDAs 阵列分别对两个板条上下两个端面进行泵浦, 每组 LDAs 阵列由

6 个 bar 组成, 最终设计的谐振腔腔长为 280 mm。

3 实验结果与分析

采用光谱仪 (Ocean HR000) 对不同频率下泵浦光的光谱及 LDAs 最大泵浦电流 (150A) 对应的温度进行测试, 实验结果如图 9 (彩图见期刊电子版) 所示。

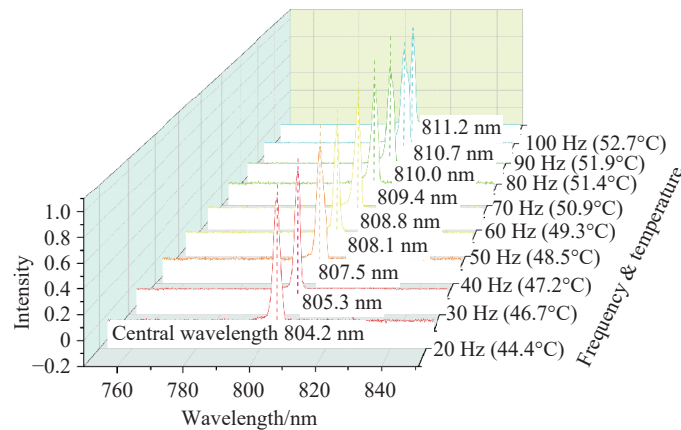


图 9 不同频率下 LDAs 的输出光谱和工作温度

Fig. 9 Output spectrum and operating temperature of LDAs at different frequencies

由图 9 结果可知, 在 20 Hz 时激光器稳定工作温度为 44.4 °C, 中心波长为 804.2 nm, 此时晶体对泵浦光的吸收效果较差, 随着泵浦频率的增加, LDAs 稳定工作温度也逐渐升高, 泵浦光波长出现红移, 在 50 Hz~80 Hz 时, LDAs 温度接近 50 °C, 泵浦光中心波长接近 808.8 nm。随着 LDAs 工作频率持续升高, LDAs 温度也持续升高, 中心波长的红移继续随之增大, 导致对 Nd:YAG 晶体泵浦效率降低。

实验过程中分别在不同频率下对激光器输出的单脉冲能量和脉宽进行测试。脉冲激光的能量通过能量计 (PE50BF, Ophir) 进行检测, 脉冲宽度则通过 InGaAs 光电探测器 (DET08CFC/M, Thorlabs, 5 GHz) 和示波器 (DSOX3034A, Keysight, 350MHz) 进行测试。实验结果如图 10 (彩图见期刊电子版) 所示。

实验结果显示, 随着泵浦能量的增加, 激光器的能量输呈现线性增长的趋势, 而脉冲宽度则逐渐缩短。这一现象主要由于腔内激光能量增大, 工作物质上能级粒子数累计速度提高, 进而使得激光脉冲的形成更快, 输出激光的脉宽

缩短。

设置电流脉冲宽度为 250 μ s, 在不同脉冲重复频率下, 调节泵浦电流 (60A~150A), 测量不同电流下的脉冲能量和脉冲宽度。在 20 Hz 时最大输出能量为 131.3 mJ, 脉冲宽度为 8.4 ns; 50 Hz 时最大输出能量为 145.7 mJ, 脉冲宽度为 8.0 ns; 75 Hz 时最大输出能量为 133.0 mJ, 脉冲宽度为 7.8 ns; 在 100 Hz 时最大输出能量为 129.2 mJ, 脉冲宽度为 9.0 ns。值得注意的是, 20 Hz 时的能量输出低于 50 Hz 时的能量输出, 这与 LDAs 的发射波长特性有关, 20 Hz 重复频率下, LDAs 输出波长未匹配 Nd:YAG 晶体的吸收峰, 吸收效率降低导致能量输出较低。当脉冲重复频率增加到 50 Hz 时, LDAs 的发热功率可以达到 50 °C, 其发射波长能够更好地匹配 Nd:YAG 晶体的吸收峰, 热积累优化了波长匹配, 从而可以在较高脉冲重复频率下实现更优越的能量输出。然而, 当脉冲重复频率进一步提高到 100 Hz 时, 尽管采用了 TEC 进行制冷, 晶体内部的温度仍然显著升高, 从而导致激光器输出性能降低。

图 11(a) (彩图见期刊电子版) 为 100 Hz 重复

频率下输出的单脉冲波形, 对应脉冲宽度为 9.0 ns, 实验中, 分别记录了 X、Y 两正交方向的实测束腰半径, 图 11(b)(彩图见期刊电子版) 实验光束沿传播轴 (Z=0~600 mm) 的束腰半径的变化及拟合曲线, X 方向、Y 方向远场半发散角实

测值分别为 1.6 mrad、3.4 mrad, 对应的光束质量分别为 $M_x^2=4.2$, $M_y^2=6.1$ 。由于泵浦方式为上下式泵浦, 导致实验中得到的输出光斑呈现长条形, Y 方向的发散角比 X 方向的更大, 且与腔内增益分布计算结果基本相符。

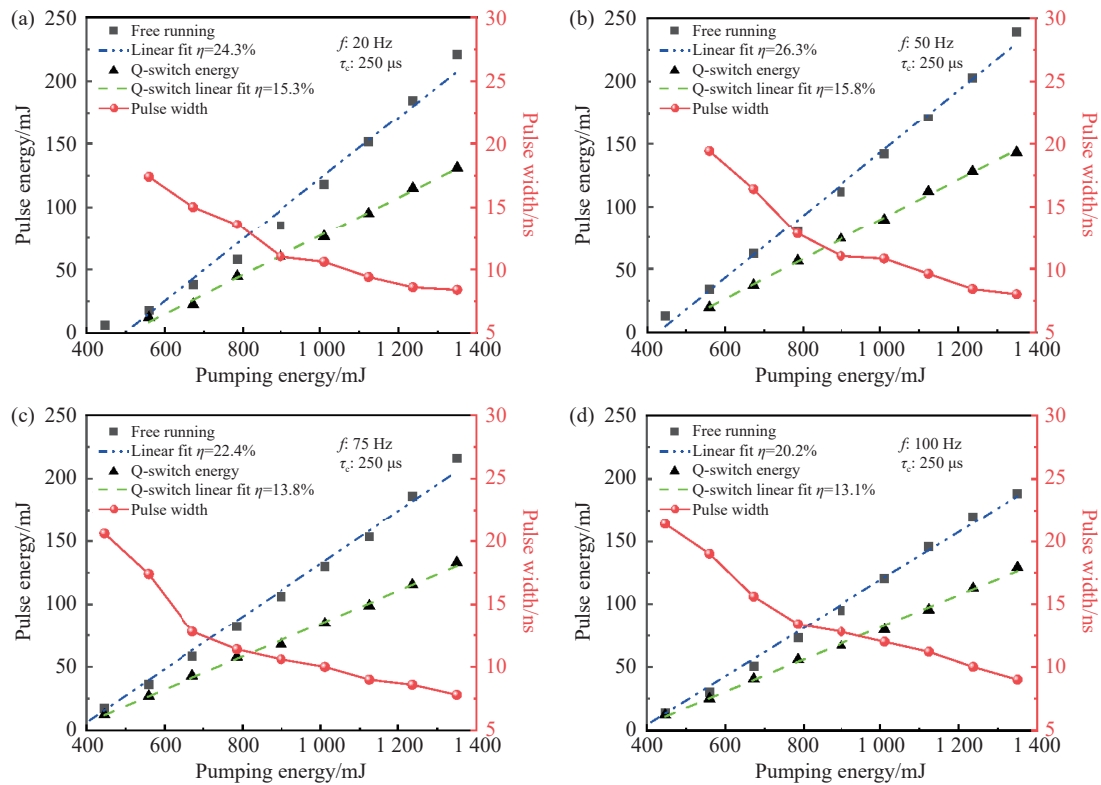


图 10 不同重复频率下输出能量随泵浦能量变化关系。(a)20 Hz; (b)50 Hz; (c)75 Hz; (d)100 Hz;

Fig. 10 Output energy varies with pump energy at different repetition rates. (a) 20 Hz; (b) 50 Hz; (c) 75 Hz; (d) 100 Hz

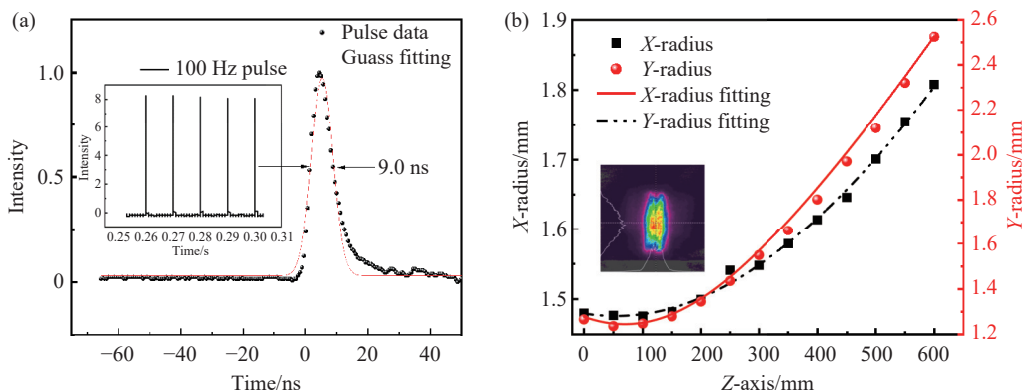


图 11 (a)100 Hz 单个脉冲波形; (b)最大能量输出时光斑及束腰半径变化

Fig. 11 (a) Single-pulse waveform at 100 Hz; (b) changes in the spot size and beam waist radius at maximum energy output

实验发现在 50 Hz 时激光器输出性能较好。为了探究激光器最佳的工作频率及晶体温度, 在测试激光器输出稳定时, 对 50 Hz 附近的激光器

频率进行了补测, 并记录了不同重复频率下, Nd:YAG 和 LDAs 的温度。图 12(彩图见期刊电子版) 分别为 Nd:YAG 激光器在脉冲重复频率分

别为 20 Hz、50 Hz、60 Hz、75 Hz 和 100 Hz 时，连续工作 300 s 时激光器的输出能量稳定性以及

晶体和 LDAs 的温度。

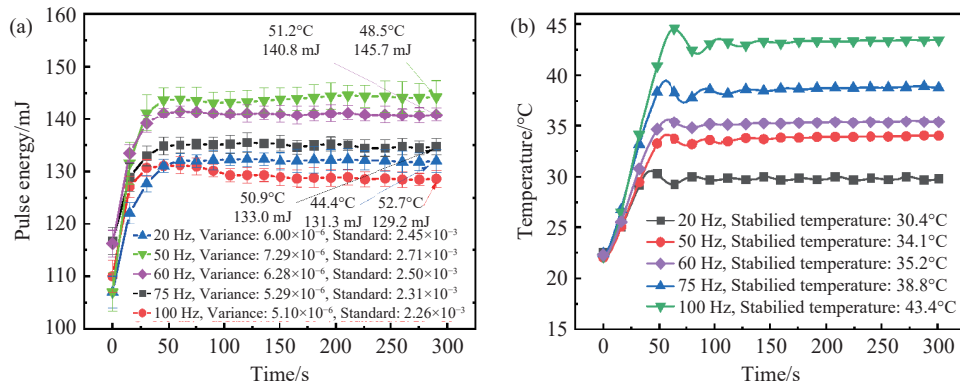


图 12 (a) 能量稳定性及 LDAs 稳定时的温度; (b) Nd:YAG 测试温度变化曲线

Fig. 12 (a) Power stability and steady-state temperature of LDAs; (b) Nd:YAG temperature test curve

在 20 Hz、50 Hz、60 Hz、75 Hz、100 Hz 重复频率下分别测试 3 组数据, 得到激光输出能量在 0~300 s 内的动态变化情况, 如图 12(a) 所示。可见, 在激光器启动初期, 由于初始温度较低, 泵浦光的波长未能与 Nd:YAG 晶体在 808 nm 的吸收峰相匹配, 导致晶体对泵浦光的吸收效率相对较低。随着激光器运行时间的延长, 温度逐渐升高, LDAs 的输出光波长逐渐趋近于 808 nm, 激光器输出能量呈现逐渐上升并趋于稳定的变化趋势。而在 100 Hz 的脉冲重复频率下, 使用均方根 (Root Mean Square, RMS) 对激光器输出稳定性进行表示, 其能量稳定性优于 2.26%。实验结果显示, 当激光器泵浦频率为 50 Hz 时, 激光器的输出能量最大, 此时 Nd:YAG 温度为 34.1 °C, LDAs

温度为 48.5 °C, 当频率继续升高, 由于 LDAs 产热导致泵浦光中心波长发生红移, 此外, 由于 Nd:YAG 的热透镜效应, 导致激光器的输出性能下降, 因此在后续实验中, 计划对 Nd:YAG 产热面的热沉结构进行优化并加装散热风扇来帮助 TEC 更好地散热, 从而使激光器工作在最佳状态。

为了探究输出频率对激光器输出性能的影响, 对不同频率下激光器的输出性能进行探究。在泵浦光脉冲宽度为 250 μ s, 泵浦电流为 150 A 的条件下, 测试了泵浦频率从 50 Hz 到 150 Hz 的激光器的输出特性, 以及不同频率下激光器输出单脉冲能量和脉宽, 结果如图 13(彩图见期刊电子版) 所示。

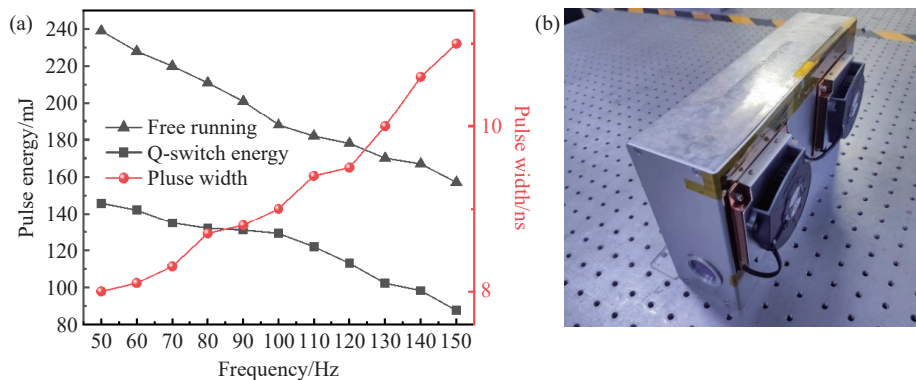


图 13 (a) 输出能量与脉冲重复频率的关系; (b) 激光器实物图

Fig. 13 (a) Relationship between output energy and pulse repetition frequency. (b) Photo of the complete laser

由图 13(a) 可知, 随着脉冲重复频率由 50 Hz 增至 150 Hz, 调 Q 输出能量由 145 mJ 降至 87 mJ。

能量衰减主要可归因于随泵浦频率提高引起的 Nd:YAG 晶体温度升高——晶体温升增强了热透

镜效应,改变了腔内光场分布,降低了能量提取效率。同时,温升还加剧了热退偏(thermal depolarization),使电光调Q的调制效率下降,从而导致脉冲宽度变宽并进一步降低输出能量。综上,泵浦频率升高引起的热效应是导致激光器整体输出性能下降的主要原因。装调后激光器实物图如图13(b)所示。

4 结 论

本文研究了 LDAs 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器。通过设计晶体端面切角,计算了晶体对泵浦光的吸收与增益。采用 Ansys 与 Solidworks 软件计算了晶体的温度场分布。通过采用 TEC 加铜散热器加风扇的复合传导冷却,设计了大能量

Nd:YAG 激光器。在无水冷条件下实现 129.2 mJ 的脉冲激光输出,脉冲宽度为 9.0 ns,对应的重复频率为 100 Hz。其斜率效率为 13.1%,能量稳定性优于 2.26%。实测远场 X 和 Y 发散角分别为 1.6 mrad 和 3.4 mrad,光束质量分别为 $M_x^2=4.2$, $M_y^2=6.1$ 。当重复频率上升至 150 Hz 时,由于晶体温度升高,激光器输出能量降低至 87.6 mJ,脉冲宽度为 11 ns。

综上所述,设计的“Zigzag”光路 Nd:YAG 激光系统在无需水冷、结构紧凑的前提下,兼顾了高脉冲能量、高重复频率与良好稳定性,可用于激光测距、激光照射等领域。下一步工作将通过优化晶体切角、泵浦均匀性和热管理策略,进一步提升输出能量与光束质量,并拓展其在移动平台中的应用。

参考文献:

- [1] GRIGORE O V, PAVEL N. Laser ignition of hydrogen/air mixtures in a constant-volume combustion chamber using a pulse-burst Nd: YAG/Cr⁴⁺: YAG laser spark plug[J]. *Optics Express*, 2024, 32(17): 30344-30359.
- [2] QI Y X, ZHANG S S, YE ZH B, *et al.*. Multi-mode stable, high peak power Nd: YAG laser device for laser cleaning[J]. *Applied Optics*, 2024, 63(12): 3277-3282.
- [3] CHEN S B, LI J L, UEDA K I. Pulsed azimuthally polarized beam from passively Q-switched rotating Nd: YAG disk laser[J]. *Applied Physics Express*, 2021, 14(4): 042001.
- [4] 邹吉跃, 刘学胜, 徐爱东, 等. 大信号无水冷 LD 侧泵 Nd:YAG 激光放大器[J]. *发光学报*, 2019, 40(7): 885-890.
ZOU J Y, LIU X SH, XU A D, *et al.*. Large signal LD side-pumped Nd: YAG laser amplifier without water-cooler[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(7): 885-890. (in Chinese).
- [5] DING J Y, YU G L, FANG CH Q, *et al.*. High beam quality of nanosecond Nd: YAG slab laser system with SBS-PCM[J]. *Optics Communications*, 2020, 475: 126273.
- [6] 吴健宏, 杜仕峰, 高昀, 等. 紧凑高效型百瓦级 2 μm 棒状 Tm:YAG 激光器[J]. *发光学报*, 2023, 44(11): 2027-2032.
WU J H, DU SH F, GAO Y, *et al.*. Compact and efficient hundred-watt level 2 μm rod Tm:YAG laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2023, 44(11): 2027-2032. (in Chinese).
- [7] RAZA K, KHAN H A, KHAN S D, *et al.*. An all-diode pumped 1.28-Joule, 200-picosecond Nd: YAG laser amplifier at 10 Hz[J]. *Optics Communications*, 2025, 577: 131413.
- [8] 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.
LIU X SH, YANG S, SI H Y, *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).
- [9] YAHIA V, KAUSAS A, TSUJI A, *et al.*. Joule-class sub-nanosecond pulses produced by end-pumped direct bonded YAG/sapphire modular amplifier[J]. *Optics Express*, 2024, 32(8): 14377-14393.
- [10] CHEN S B, UEDA K I. Room temperature high-power TEM₀₀ mode beam from bulk solid-state laser without water cooling[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 181: 111630.
- [11] LI ZH Y, WANG SH Y, GUO ZH, *et al.*. 100 mJ pulse operation in thermal lens Q-switching Nd: YAG MOPA[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 182: 112113.
- [12] COYLE D B, STYSLEY P R, POULIOS D, *et al.*. High efficiency, 100 mJ per pulse, Nd: YAG oscillator optimized for space-based earth and planetary remote sensing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 63: 13-18.
- [13] YAN R P, XU H B, LI X D. Computation and verification of spatial rate equations for an electro-optically Q-switched laser-diode side-pumped Nd: YAG laser[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(9): 5410.

- [14] YANG Z Q, CONG ZH H, MENG J, *et al.*. Compact LD side-pumped Nd: YAG oscillator at 100 Hz without water-cooling[J]. *Optics Communications*, 2023, 541: 129552.
- [15] FU X, LIU Q, YAN X, *et al.*. High power composite Nd: YAG/YAG zigzag dual-slab laser oscillator[J]. *Laser Physics*, 2011, 21(1): 48-51.
- [16] YANG H L, MENG J Q, MA X H, *et al.*. Compact and high-energy diode-side-pumped Q-switched Nd: YAG slab laser system for space application[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(12): 121406.
- [17] CHEN X M, LU Y H, HU H, *et al.*. Narrow-linewidth, quasi-continuous-wave ASE source based on a multiple-pass Nd: YAG zigzag slab amplifier configuration[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5602-5068.
- [18] WANG W, FU CH, HU ZH Y, *et al.*. Segment side-pumped Q-switched Nd: YAG laser[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(11): 1765-1770.
- [19] KOECHNER W. *Solid-State Laser Engineering*[M]. 5th ed. Springer, 2013. (查阅网上资料, 未找到本条文献出版地, 请确认).
- [20] LI CH Y, LU CH Q, LI CH, *et al.*. Compact conductively cooled electro-optical Q-switched Nd: YAG laser[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(11): 116115.
- [21] KOECHNER W. Laser amplifier[M]//KOECHNER W. *Solid-State Laser Engineering*. New York: Springer, 2006: 156-209.
- [22] DUPRAZ K, CASSOU K, MARTENS A, *et al.*. The ABCD matrices for reflection and refraction for any incident angle and surface[J]. *Optics Communications*, 2019, 443: 172-176.

作者简介:



李岩(1982—),男,吉林长春人,博士,助理研究员。2016年毕业于北京理工大学光电学院,同年入职长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室。主要从事高功率固体激光器及光电检测方向研究。E-mail: liyan8281@cust.edu.cn