

文章编号:1001-5078(2024)05-0679-06

· 激光器技术 ·

## 双波长 LD 泵浦 $\text{Nd}^{3+}$ :YAG 免温控被动 调 Q 激光器的研究

吴航, 窦飞飞, 陈南亦, 徐欢天, 杨炳德, 司光芙, 董潮涌  
(中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047)

**摘要:**传统的固体激光器体积、重量大, 功耗高, 限制了其在空间受限设备中的应用。被动调 Q 的 LD 泵浦免温控固体激光器省去了复杂的温度控制装置, 调 Q 机构简单, 能够满足复杂温度环境的特殊应用场景的小型化、低功耗要求。提出了基于双波长 LD 泵浦实现宽温度范围免温控阈值自适应的  $1.06 \mu\text{m}$  激光脉冲输出方法。基于  $\text{Nd}:\text{YAG}$  晶体设计了角锥棱镜谐振腔, 仿真分析了 LD 泵浦源到激光棒的面心距对热负载的影响, 并确定  $4 \text{ mm}$  的最佳面心距。数值分析了相同泵浦功率下  $-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$  温度范围内激光静态能量输出变化, 以及不同初始透过率的可饱和吸收体对激光阈值脉宽的影响。计算结果表明在  $-37 \text{ }^\circ\text{C} \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内, 阈值脉宽都在  $200 \mu\text{s}$  以下, 阈值脉宽最低点达到了  $29.4 \mu\text{s}$ 。构建主波实时探测的阈值自适应调节装置并搭建实验系统, 实验结果表明, 在温度范围为  $-35 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 阈值脉宽变化范围为  $40 \sim 180 \mu\text{s}$ 。采用激光腔体一体加工成型, 应用轻量化的铝合金材料, 实现工程化应用, 体积  $83.5 \text{ mm} \times 44 \text{ mm} \times 29.5 \text{ mm}$ , 重量约为  $230 \text{ g}$ 。在  $23.8\%$  初始透过率的饱和吸收体条件下实现单脉冲输出能量  $42 \text{ mJ}$ , 脉冲宽度  $5.2 \text{ ns}$ 。

**关键词:**被动调 Q;  $\text{Nd}:\text{YAG}$  激光器; 免温控; 双波长泵浦; 调 Q 阈值

中图分类号: TN248.1; O436 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.05.003

## Research on dual-wavelength diode-pumped passively Q-Switched $\text{Nd}^{3+}$ :YAG laser without temperature control

WU Hang, DOU Fei-fei, CHEN Nan-yi, XU Huan-tian, YANG Bing-de, SI Guang-fu, DONG Chao-yong  
(The 27th Research Institute of CETC, Zhengzhou 450047, China)

**Abstract:** Traditional solid-state solid-state lasers are large, heavy, and have high power consumption, limiting their use in space-constrained equipment. Diode-pumped Passively Q-Switched solid-state laser eliminate the need for complex temperature control devices, have a simple Q-tuning mechanism, and are able to meet the requirements of miniaturization and low power consumption for special application scenarios in complex temperature environment. An approach is proposed to realize a  $1.06 \mu\text{m}$  laser pulse output based on dual-wavelength LD pumping with a wide temperature range and temperature-free threshold adaption. The corner-cube resonator is designed based on  $\text{Nd}:\text{YAG}$  crystal, and the effect of the the face-center distance from LD to laser rod on the thermal load is analyzed through the numerical analysis, and the optimal face-centre distance of  $4 \text{ mm}$  is determined. The variation of laser static energy output in the temperature range of  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  to  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  with the same pump power, and influences of saturable absorber with different initial transmittance on threshold pulse width are analyzed through numerical simulation. Result shows that threshold pulse width under  $200 \mu\text{s}$  in the temperature range from  $-37 \text{ }^\circ\text{C}$  to  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , the lowest point reached  $29.4 \mu\text{s}$ . A threshold adaptive adjustment module is constructed with laser pulse real-time detection, and then the ex-

作者简介: 吴航, 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事固体激光器技术的研究。E-mail: 183307758@qq.com  
收稿日期: 2023-10-07

periment setup is established. The experimental results show that the threshold pulse width varies from 40  $\mu\text{s}$  to 180  $\mu\text{s}$  in the temperature range of  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Engineering application is realized through adopting the integrated molding process of laser cavity and the lightweight aluminum, the volume is  $83.5\text{ mm} \times 44\text{ mm} \times 29.5\text{ mm}$  and the weight is about 230 g. Single pulse output energy of 42 mJ is achieved under the condition of a saturated absorber with an initial transmittance of 23.8%, with a pulse width of 5.2 ns.

**Keywords:** passively Q-Switched; Nd : YAG lasers; temperature-free control; dual-wavelength pumping; Q-switched threshold value

## 1 引言

传统固体激光器能够产生高能量和高峰值功率脉冲激光,但由于其泵浦效率较低,需要庞大的水冷散热系统,这就增加了激光器的体积、重量和功耗,限制了激光器的应用范围。随着激光器向着航空航天、智能制造、精密测量等领域的发展,激光器工作温度范围不断拓宽,环境温度对激光器的影响也越来越大,传统水冷及风冷激光器在激光测距、激光雷达等便携设备中的应用严重受限,因此,全固态激光器的小型化、轻量化与免温控成为重要的发展趋势。

二极管泵浦固体激光器(Diode Pumped Solid-State Laser, DPL)具有电光效率高、产生废热少等优势<sup>[1]</sup>,相比传统激光器体积小、重量轻。这归功于泵浦源激光二极管(Laser Diode, LD)发射谱线窄,与 Nd : YAG 晶体的吸收谱有更好的匹配度<sup>[2]</sup>。然而,LD 的发射波长具有温漂特性,即发射中心波长会随温度变化产生蓝移或红移,从而降低泵浦效率,造成激光器输出能量不稳定。采用 TEC 闭环温控可以解决这个问题,但温控电路和温控执行机构削弱了 DPL 体积小、重量轻的优点。双波长泵浦免温控技术是通过利用 Nd : YAG 晶体的两个典型吸收峰,扩展 LD 泵浦谱线数量,使其在高低温环境下仍能与 Nd : YAG 吸收谱实现较好匹配,达到免温控运转的目的。从而省去复杂的温度控制电路、温度控制执行结构,减小体积重量、降低 DPL 运行功耗。

激光调 Q 技术能够窄化脉冲、提高峰值功率。目前多种成熟的调 Q 技术如电光调 Q<sup>[3]</sup>,机械调 Q,声光调 Q 和饱和吸收体调 Q<sup>[4-5]</sup>已被广泛应用,前三种可以精确控制 Q 开关时间,为主动调 Q,其具有机电结构复杂、体积重量大、可靠性低等缺点。饱和吸收体调 Q 则是被动 Q 开关,开关时间与饱和吸收体的自身特性相关,这种开关结构紧凑、不存在电干扰、成本低、调试简单,能够实现激光器的小型化<sup>[6-11]</sup>。

本文针对双波长 LD 泵浦的全温度范围免温控阈值自适应 1.06  $\mu\text{m}$  被动调 Q 激光器展开研究,仿

真分析了温度对激光静态能量的影响,以及不同初始透过率的可饱和吸收体对激光阈值脉宽的影响。以 Nd : YAG 晶体作为增益介质,构建了全反角锥的谐振腔系统,仿真分析了 LD 泵浦源到激光增益介质中心的面心距对热负载的影响,并确定 4 mm 的最佳面心距。基于主波实时探测搭建了阈值脉宽自适应调节的实验系统,在  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$  ~  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内阈值脉宽变化范围为 40 ~ 180  $\mu\text{s}$ 。该方法能够实现  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ~  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  宽温度范围的 1.06  $\mu\text{m}$  稳定激光脉冲输出,对于复杂温度环境的特殊应用场景的小型化、低功耗要求提供了解决思路。

## 2 双波长 LD 泵浦阈值脉宽仿真分析

### 2.1 激光谐振腔设计与分析

激光工作物质选取工程上成熟的 Nd : YAG 晶体棒<sup>[12]</sup>,典型的激光输出波长为 1.064  $\mu\text{m}$ ,棒的两端垂直于棒轴线,并镀有 1.064  $\mu\text{m}$  增透膜。晶体棒中 Nd 离子的参杂浓度决定了它的吸收系数,可以通过评估吸收系数来优化参杂浓度。吸收系数决定了增益介质对泵浦光的吸收效率,吸收效率高,则储能效果好,但会造成不均匀的增益分布;吸收效率低,则储能效果差,易对泵浦光造成损耗。综合考虑增益分布和吸收效率,选用晶体棒 Nd 离子的参杂浓度为 1.0%。选择尺寸  $\Phi 4.0\text{ mm} \times 45\text{ mm}$  的 Nd : YAG 晶体棒,图 1 为激光器原理示意图。

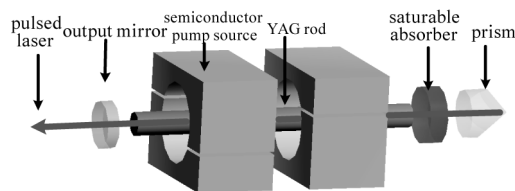


图 1 激光器原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of laser device

设计采用角锥棱镜为全返腔镜,其出射光与入射光总是反向平行,利用其自身特性,实现谐振腔的自准,降低激光输出对腔镜失调的敏感性,在宽温度变化的过程中和外界冲击、振动中,激光器仍然能够

以很小能量变化稳定工作。

DPL 的泵浦几何结构是决定光束质量的重要因素,设计采用大功率侧面泵浦的泵浦方式,围绕 YAG 棒轴采用环形交错泵浦结构,对 LD 面心距(发光面到激光棒中心)进行精确计算和仿真。图 2 是环形泵浦的泵浦分布和面心距对激光棒热负载的影响。

图 2(a)、(b)、(c)、(d)分别是靶条到激光棒表面的距离为 3.0 mm、3.5 mm、4.0 mm、4.5 mm 的情况下,棒轴向截面的热负载分布。棒的热聚集随靶条到棒表面的距离的减小急剧上升,中心温度升高,且表面的热分布不均匀,导致棒的热应力变大,热透镜效应也会明显变大。大量的热聚集会导致光斑模式的恶化、光斑强度分布不均匀,面心距太远会导致泵浦效率下降,综合考虑的情况下,面心距设置为 4 mm,能够得到高质量的光束输出。

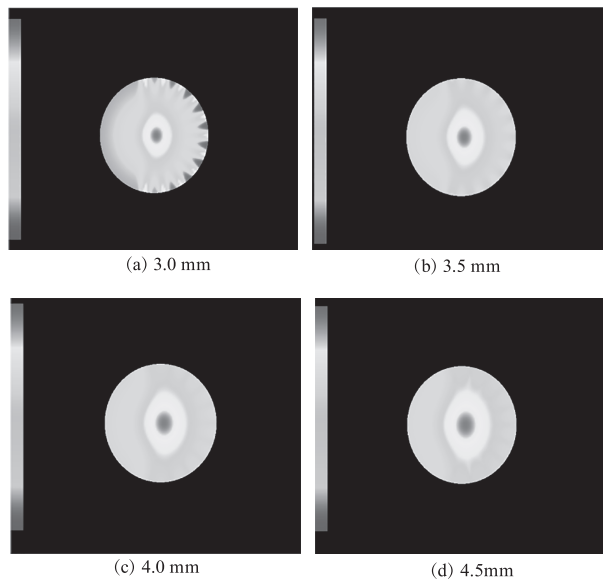


图 2 不同面心距条件下的棒热负载截面图

Fig. 2 Two-dimensional thermal load cross section of the rod under different face-center distance

## 2.2 双波长泵浦的仿真分析

图 3 是 YAG 增益介质的吸收谱<sup>[13]</sup>,可以看出 Nd:YAG 增益介质的典型吸收峰为 796 nm 和 808 nm。通常 LD 的温漂系数为 0.28 nm/°C,装备工作温度范围通常为 -40 ~ 60 °C,温变范围可达 100 °C,可以得到 LD 的波长变化范围为 100 °C × 0.28 nm/°C = 28 nm。选取常温 25 °C 下 796 nm 和 808 nm 两种波长,高温 60 °C 时 796 nm 波段泵浦光漂移至 806 nm,仍处于 YAG 晶体的较强吸收带内,低温 -40 °C 时,808 nm 波段泵浦光波长漂移至 790 nm 左右,被动调 Q 的优势是可以在 YAG 上能级寿命的最

长泵浦时间内,通过调节泵浦脉冲的宽度来调节泵浦能量,进而实现在全温度范围内的稳定激光输出,激光晶体对泵浦光的吸收率为:

$$A_{bs}(\lambda) = 1 - \exp(-\alpha_1 L_1 - \alpha_2 L_2) \quad (1)$$

其中, $\alpha$  为波长吸收系数,其取值如图 3 所示; $L$  为晶体吸收长度。

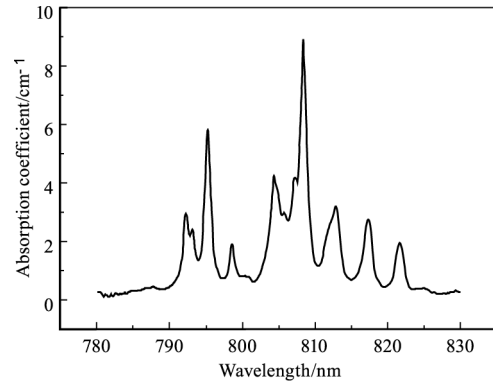


图 3 Nd:YAG 增益介质的吸收谱线

Fig. 3 Absorption lines of Nd:YAG laser gain medium

按照上述谐振腔的设计,则吸收长度为 4 mm,选取的两种波长的泵浦源功率各为 1500 W,将泵浦脉冲宽度设置为 150 μs,则每种波长的单脉冲泵浦能量为:1500 W × 150 μs = 225 mJ,两种波长的泵浦总能量为 450 mJ,根据工程经验,YAG 的光光效率取 15%,根据公式(1)计算,全温度范围内的激光静态单脉冲输出能量如图 4 所示。图中可以得到静态激光能量波动较强,在 -40 °C、-14 °C、1 °C 存在低点,静态能量在 30 mJ 以下,其余温度点能量相对较强,最高处静态能量达到了 137.6 mJ。

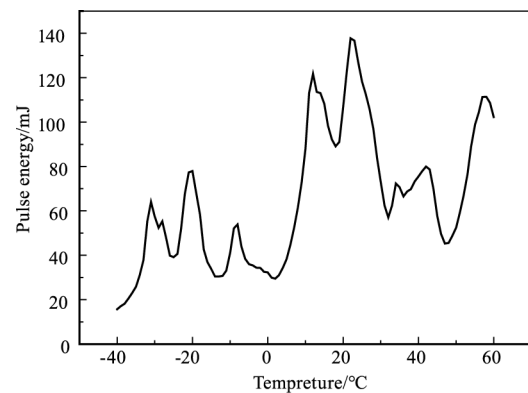


图 4 不同温度下激光静态输出能量的计算结果

Fig. 4 Numerical results of static output energy of pulse laser under different temperature

Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体用作被动 Q 关,主要是利用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体的非线性吸收特性,即对 1.06 μm 激光波长的可饱和吸收特性,因此也将其称作可饱和吸收体。初始状态,腔内的自发荧光相对较弱,

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体呈不饱和状态,随着继续抽运,饱和后的  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  晶体对激光透明,调 Q 打开,形成短脉冲激光输出。在 LD 泵浦功率确定的情况下,达到激光阈值的泵浦脉冲宽度称之为阈值脉宽。可饱和吸收体初始透过率为:

$$T_0 = \exp(-n_0 \sigma_{gs} l_s) \quad (2)$$

其中,  $l_s$  为可饱和吸收体厚度;  $n_0$  为基能态粒子密度。选取 38% 初始透过率  $\Phi 4$  mm 的可饱和吸收体,饱和能量密度为  $E_s = hv/\sigma_{gs}$ ,各参数取值如表 1 所示:

表 1 数值仿真参数设置

Tab. 1 Parameters of the numerical simulation

Parameter	Value
Planck constant $h/(\text{J} \cdot \text{s}^{-1})$	$6.626 \times 10^{-34}$
Photon frequency at 1064 nm $\nu/\text{s}^{-1}$	$2.82 \times 10^{14}$
Absorption cross section at ground state of $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ $\sigma_{gs}/\text{m}^2$	$8.7 \times 10^{-22}$
Diameter of saturated absorber $D/\text{mm}$	$\Phi 4$

得到选取的可饱和吸收体的饱和能量为 27 mJ。所以阈值脉宽随温度变化的计算结果如图 5 所示,在  $-37 \sim 60$  °C 范围内,阈值脉宽都维持在 200  $\mu\text{s}$  以下,最高处为  $-40$  °C,阈值脉宽达到了 252.3  $\mu\text{s}$ 。图中可以得到,在  $-40 \sim 60$  °C 温度范围阈值脉宽的变化与静态能量变化成互补关系,在静态能量低的温度点,阈值相对较高,在静态能量高的温度点,阈值相对较低,符合理论预期,同时从阈值脉宽随温度的波动来看,与静态能量随温度的波动呈互补关系,最低点的阈值脉宽达到了 29.4  $\mu\text{s}$ 。

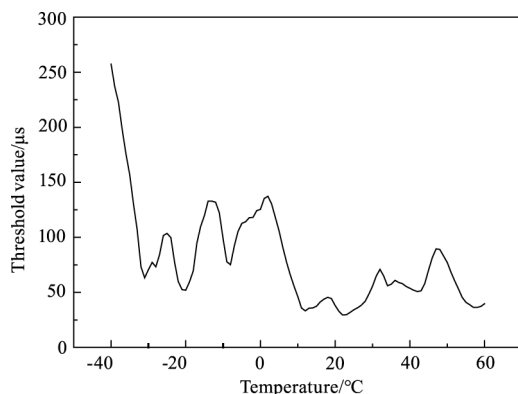


图 5 阈值脉宽随温度变化的计算结果

Fig. 5 Numerical results of threshold pulse width under different temperature

不考虑 ESA 的条件下,饱和吸收体的理想透过率  $T_i$  可表示为:

$$T_i = \frac{E_s}{E} \ln[1 + (e^{\frac{E}{E_s}} - 1)T_0] \quad (3)$$

当  $E \ll E_s$  和  $E \gg E_s$  时,可简化为  $T_i = T_0$  和  $T_i = 1$ 。根据式(3),得到常温下不同初始透过率的可饱和吸收体阈值脉宽的变化曲线,如图 6 所示。随着可饱和吸收体初始透过率的降低,阈值脉宽逐渐升高,在 24% 初始透过率时阈值脉宽达到了 79.8  $\mu\text{s}$ ,由于饱和吸收体的初始透过率变低,可以得到更大的能量存储,所以也会得到更高能量的激光脉冲输出。

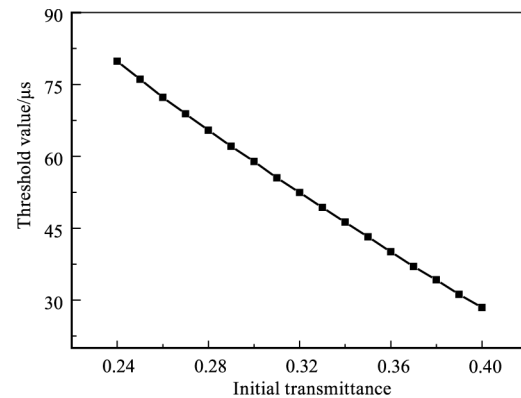


图 6 阈值脉宽随不同初始透过率的计算结果

Fig. 6 Numerical results of threshold pulse width under different initial transmittance

### 3 双波长 LD 泵浦阈值脉宽自适应调节的实验结果与分析

LD 泵浦功率不变的条件下,泵浦能量与放电时间成正比,由于外界环境温度影响,LD 泵浦波长的漂移,导致泵浦效率下降,在泵浦光偏离 YAG 吸收峰的温度点可以通过增大 LD 泵浦的放电时间来提高泵浦能量,所以阈值脉宽就会相应的增大。通过激光器内置的主波探测装置,检测到主波的同时,泵浦光放电停止,实现泵浦脉宽的自适应调节,保证了全温度范围内泵浦脉宽都能够达到阈值脉宽,从而实现 1.06  $\mu\text{m}$  脉冲激光的稳定输出,同时能够避免过高的泵浦能量导致的双脉冲或多脉冲输出,这在激光测距和激光雷达应用中是要避免出现的,图 7 是泵浦脉宽自适应调节原理图。

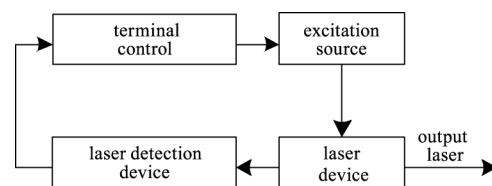


图 7 自适应调节原理图

Fig. 7 Principle diagram of adaptive control

单次脉冲发射过程为:终端控制输出控制信号,激励源收到控制信号后发射电脉冲,LD 泵浦源工作,发射激光振荡所需泵浦光,激光工作物质吸收泵浦光,下能级粒子开始跃迁,泵浦源持续抽运,一旦达到激光阈值脉宽,则激光器输出 1.06 μm 脉冲激光,同时主波探测装置收到激光信号转换成电信号,经放大后送至终端控制,终端控制接收到主波信号,发射泵浦光停止信号,激励源停止工作,等待下次发射信号。

### 3.1 激光器的实现与测试

激光器结构采用腔体一体加工成型、高温应力时效、光学装调表面高精度研磨、非调节光学结构等技术手段实现稳定的谐振腔结构,保证其在温变和振动环境中高稳定性,无轴向、侧向形变。针对该腔镜安装平面、晶体安装面采用高精度的研磨技术处理,保证温变环境的稳定性。激光器结构设计如图 8 所示,采用轻量化的铝合金材料设计,体积 83.5 mm × 44 mm × 29.5 mm,重量约为 230 g。选取掺杂浓度为 1 % 的 Nd:YAG 晶体,尺寸为 Φ 4 mm × 45 mm,可饱和吸收体采用 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体<sup>[14]</sup>,通光孔径为 Φ 4 mm,激光器实物图和光斑图如图 9 所示。

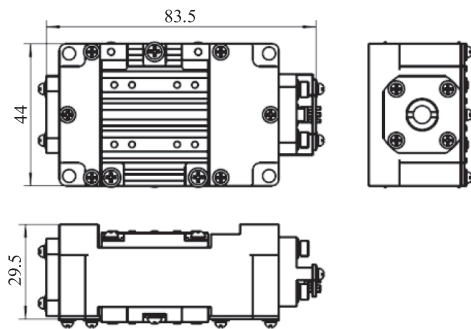


图 8 激光器结构设计图

Fig. 8 Engineering drawing of laser

### 3.2 激光阈值脉宽变化实验研究

当泵浦功率为 3000 W,饱和吸收体的初始透过率为 38 % 的时候, -35 ~ 60 °C 温度范围内阈值变化情况如图 10 所示,实验结果显示,低温下阈值偏高,阈值在 80 ~ 180 μs,常温阈值最低,在 40 ~ 80 μs,其变化趋势与仿真数据基本一致,在 25 °C 时阈值为 40 μs,在 -35 °C 是阈值最高达到了 180 μs,接近 Cr<sup>4+</sup>:YAG 晶体的激发态能级寿命,可以通过增大了 LD 泵浦源的驱动电流来增大泵浦的功率,从而实现全温度范围的稳定激光脉冲输出。

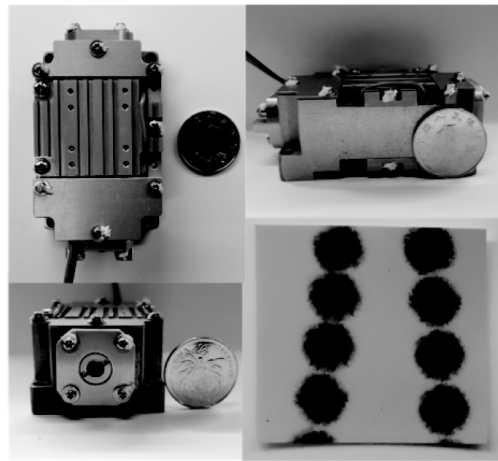


图 9 激光器的实物图和光斑图

Fig. 9 Physical photograph and laser spot of laser

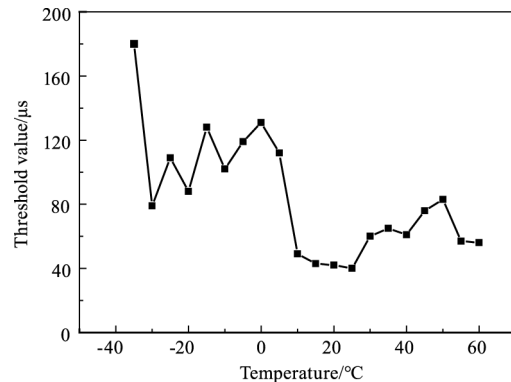


图 10 -35 ~ 60 °C 温度范围阈值脉宽随温度的变化

Fig. 10 Threshold pulse width versus temperature from -35 to 60 °C

基于上述的系统参数,实验研究了几种不同初始透过率的饱和吸收体常温下的阈值脉宽变化情况和输出脉冲能量变化情况,如图 11 所示,随着初始透过率的增加,激光的阈值脉宽变小,同时激光的输出脉冲能量也在降低,与理论结果基本一致,23.8 % 初始透过率的饱和吸收体可以实现单脉冲输出能量 42 mJ,脉冲宽度 5.2 ns,峰值功率可达 8.07 MW。

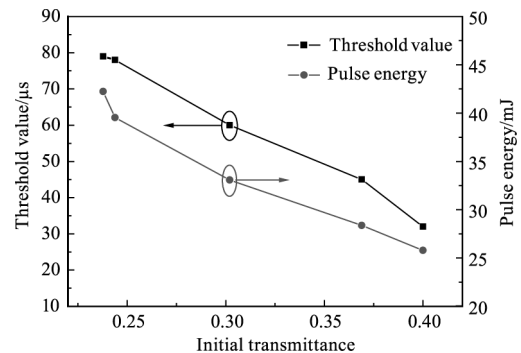


图 11 脉冲阈值和单脉冲能量随初始透过率的变化

Fig. 11 Threshold pulse width and pulse energy versus initial transmittance

## 4 结 论

针对双波长 LD 泵浦宽温度范围免温控阈值自适应调节的 1.06  $\mu\text{m}$  激光脉冲输出进行研究。设计了全反角锥的谐振腔系统,仿真分析了泵浦源到激光增益介质的面心距对热负载的影响,并确定 4 mm 的最佳面心距。数值分析了相同泵浦功率下  $-40 \sim 60$   $^{\circ}\text{C}$  温度范围内激光静态能量输出变化,以及  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 晶体调 Q 下的激光阈值脉宽变化,结果显示阈值脉宽与静态能量随温度的变化曲线呈互补关系,3000 W 泵浦功率,38 % 透过率饱和吸收体条件下阈值脉宽最低点达到了 29.4  $\mu\text{s}$ 。基于主波实时探测构建阈值自适应调节的实验系统,实验测得宽温度范围下阈值脉宽变化范围在 40 ~ 180  $\mu\text{s}$ 。该方法对于双波长 LD 泵浦的被动调 Q 激光器的设计具有参考意义,能够实现宽温度范围的 1.06  $\mu\text{m}$  稳定激光脉冲输出,对于复杂环境等特殊应用场景的小型化、低功耗要求提供了解决方法。

## 参考文献:

- [1] Liu Xu, Wei Jingsong, Tan Chaoyong, et al. Theoretical analysis of multi-wavelength temperature-free-control pump source of laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5):0505004. (in Chinese)  
刘旭,魏靖松,谭朝勇,等.激光器免温控泵浦源的多波长选择理论[J].*红外与激光工程*, 2016, 45(5):0505004.
- [2] Huang Tao, Wang Keqiang, Luo Xu, et al. No-temperature-controlled multi-wavelength LD pumped square rod-shaped Nd:YAG solid-state laser[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(1):49-53. (in Chinese)  
黄涛,王克强,罗旭,等.无温控多波长 LD 泵浦方棒状 Nd:YAG 固体激光器[J].*激光与红外*, 2020, 50(1):49-53.
- [3] Giesen A, Hugel H, Voss A, et al. Scalable concept for diode-pumped high-power-solid-state lasers [J]. *Appl. Phys*, 1994, B 58:363-372.
- [4] Chen Weibiao, Takeuchi N. Diode pumped,  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG passively Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2002, A29(5):385-388. (in Chinese)  
陈卫标, Takeuchi N. LD 抽运的  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 被动调 Q Nd:YAG 激光器[J].*中国激光*, 2002, A29(5):385-388.
- [5] Dong J, Shirakawa A, Takaichi K, et al. All-ceramic passively Q-switched Yb:YAG/ $\text{Cr}^{4+}$ :YAG microchip laser [J]. *Electronics Letters*, 2006, 42(20):1154-1155.
- [6] Sakai H, Kan H, Taira T. > 1 MW peak power single-mode high-brightness passively Q-switched  $\text{Nd}^{3+}$ :YAG microchip laser [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(24):19891-19899.
- [7] Hayashi S, Shibuya T, Sakai H, et al. Tunability enhancement of a terahertz-wave parametric generator pumped by a microchip Nd:YAG laser [J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(15):2899-2902.
- [8] Tsunekane M, Inohara T, Ando A, et al. High peak power, passively Q-switched micro laser for ignition of engines [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2010, 46(2):277-284.
- [9] Pavel N, Tsunekane M, Taira T, et al. Composite, all-ceramics, high-peak power Nd:YAG/ $\text{Cr}$ :YAG monolithic micro-laser with multiple-beam output for engine ignition [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(10):9378-9384.
- [10] Lin Hongxi, Li Linqin, Xu Yingchao. Influence of output mirror transmissivity on the output characteristics of  $\text{Cr}$ :YAG passively Q-switched laser [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(1):37-40. (in Chinese)  
林洪沂,李霖钦,许英.输出镜透过率对  $\text{Cr}$ :YAG 被动调 Q 激光器的影响 [J].*激光与红外*, 2015, 45(1):37-40.
- [11] Bai Qingshan. Study on pulse output characteristics of  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG passively Q-switched laser [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(7):831-834. (in Chinese)  
白青山.  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 被动调 Q 激光器脉冲输出特性研究 [J].*激光与红外*, 2019, 49(7):831-834.
- [12] Wang Pengfei, Feng Jiang, Li Qiang, et al. Diode pumped  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG passively Q-switched miniature solid stated laser [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(11):1087-1089. (in Chinese)  
王鹏飞,冯江,李强,等.小型被动调 Q 二极管泵浦固体激光器 [J].*激光与红外*, 2008, 38(11):1087-1089.
- [13] Zhou Zhihao. Study on multi wavelength pumped Nd:YAG laser [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2023:21-23. (in Chinese)  
周志豪.多波长泵浦 Nd:YAG 激光器研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2023:21-23.
- [14] Yang Chengwei, Chen Qiansong, Xiong Ke, et al. Recent developments on  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG passively Q-switched lasers [J]. *Laser & Infrared*, 2003, 33(1):21-24. (in Chinese)  
杨成伟,陈千颂,熊轲,等.  $\text{Cr}^{4+}$ :YAG 被动调 Q 激光器进展 [J].*激光与红外*, 2003, 33(1):21-24.