

引用格式: YANG Boda, XING Zhengquan, CHEN Donglin, et al. High-temperature LDAs Pulsedly Side-pumped Nd:YAG Laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(3):0314002

杨博达, 刑政权, 陈东林, 等. 高温 LDAs 侧面脉冲泵浦 Nd:YAG 激光器[J]. 光子学报, 2021, 50(3):0314002

高温 LDAs 侧面脉冲泵浦 Nd:YAG 激光器

杨博达¹, 刑政权², 陈东林², 李岩¹, 石琳琳¹, 徐英添¹, 金亮¹, 马晓辉¹

(1 长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 长春 130022)

(2 陆装沈阳军代局驻吉林地区军代室, 长春 130022)

摘要:设计了一台紧凑型高温激光二极管阵列侧面泵浦 Nd:YAG 脉冲激光器。通过半导体制冷器控制泵浦源工作温度在 60°C, 其发射中心波长为 808 nm, 谱线宽度为 4 nm。模拟了泵浦源在 40°C、50°C 和 60°C 条件下 60 s 内的温度场分布。实验所用激光增益介质为 Nd:YAG 晶体, 尺寸为 $\phi 5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 掺 Nd³⁺ 摩尔浓度为 1.0 at. %。采用磷酸二氘钾晶体作为电光调 Q 开关, 在泵浦源电脉宽 250 μs , 重复频率 20 Hz、1 Hz 条件下, 获得最大能量为 230 mJ、246 mJ 的单脉冲输出, 对应的脉冲宽度分别为 8.4 ns、7.8 ns。光束发散角约为 1.6 mrad。设计的 Nd:YAG 脉冲激光器总的电-光转换效率大于 4.6%。

关键词:高温激光二极管; Nd:YAG 晶体; 脉冲泵浦; 大能量

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215003.0314002

High-temperature LDAs Pulsedly Side-pumped Nd:YAG Laser

YANG Boda¹, XING Zhengquan², CHEN Donglin², LI Yan¹, SHI Linlin¹, XU Yingtian¹,
JIN Liang¹, MA Xiaohui¹

(1 National Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and
Technology, Changchun 130022, China)

(2 Army Representative Office of Shenyang Army Representative Bureau in Jilin Area, Changchun 130022, China)

Abstract: A compact pulse side-pumped Nd:YAG laser by high-temperature laser diode arrays was designed. The operating temperature of pumping source was controlled at 60°C by the semiconductor refrigerator, the emission center wavelength was 808nm, and the spectral line width was 4.12 nm. Dynamic temperature field distributions of the pumping source in 60s at 40°C、50°C and 60°C were simulated. Two $\phi 5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ Nd:YAG crystals with 1.0at.% Nd³⁺ doping concentration were used as the laser gain medium. The crystal of potassium dideuterium phosphate was used forelectro-optic Q-switching. With a pump source voltage pulse width of 250 μs and the repetition frequency of 20 Hz and 1 Hz, output pulsed energy of 230 mJ and 246 mJ were achieved corresponding to the pulse durations of 8.4 ns and 7.8 ns. The beam divergence was 1.6 mrad. The total electro-optical conversion efficiency of designed Nd:YAG Q-switchedlaser was greater than 4.6%.

Key words: High-temperature laser diode; Nd:YAG crystal; Pulse pumping; Large energy

OCIS Codes: 140.3290; 140.3530; 140.3538; 140.3580

0 引言

激光二极管阵列(Laser Diode Arrays, LDAs)泵浦的 Nd:YAG 脉冲激光器被广泛应用于激光雷达、激光

基金项目: 国家自然科学基金(Nos.61805023, 61804103)

第一作者: 杨博达(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高功率固体激光器。Email: 17863253084@163.com

通讯作者: 马晓辉(1965—), 男, 研究员, 博导, 主要研究方向为光电子技术及应用。Email: mxh@cust.edu.cn

收稿日期: 2020-10-07; 录用日期: 2020-11-20

<http://www.photon.ac.cn>

测距等应用领域^[1-3]。Nd:YAG 晶体具有较长的上能级寿命(230 μs)、优良的机械和光学特性,常被用作实现高峰值功率脉冲激光输出的增益介质^[4-7]。

由于半导体制冷器(Thermoelectric Cooler, TEC)制作技术成熟、体积小、调节精度高、控温效果明显,固体激光器采用 TEC 控制温度的方式得到广泛使用^[8-10]。2007 年,刘旭等^[11]报道了一台采用侧向半圆柱 LD 阵列与热沉交错分布的泵浦结构,角锥棱镜谐振腔选取低阶模激光输出的 Nd:YAG 激光器,实现单脉冲能量为 66.2 mJ,脉冲宽度为 6.056 ns,光束发散角为 0.6 mrad 的激光输出。2009 年,陈薪羽等^[12]采用 TEC 冷却双半圆型 LDAs 侧面交错抽运结构泵浦源,理论分析了侧泵晶体热焦距、腔长大小对平-平谐振腔的稳定性,选取了对称腔型来实现大能量、近似圆形基模光斑激光输出。在重复频率 20Hz、泵浦能量 1 200 mJ 下,获得了脉冲能量 151 mJ,脉宽为 8.48 ns 的激光输出,对应的光-光转化效率 12.6%,光束发散角小于 3 mrad。

高温 LDAs 泵浦 Nd:YAG 逐渐成为新的发展趋势,通过提高 LD 工作温度来降低温控系统制冷压力,优化传导冷却温控系统体积、重量和功耗。2016 年,刘旭等^[13]从减小温控系统的制冷压力、谐振腔稳定性方面考虑,设计了高温 LDAs 泵浦源、角锥棱镜谐振腔电光调 Q Nd:YAG 激光器。在重复频率为 50Hz 下,连续工作时间 6 min,激光脉冲能量 85.7 mJ,脉冲宽度 10.8 ns。2019 年,钟健麒等^[14]通过减小制冷系统体积使得激光器整体结构紧凑小型化,设计了一套紧凑型高温 LDAs 端面泵浦 Nd:YAG 激光器。在输出耦合镜 40%、重复频率为 20 Hz、泵浦脉宽为 250 μs 条件下,获得激光单脉冲能量 44.1mJ,脉冲宽度为 18.3 ns。相比高温 LDAs 泵浦,多波长泵浦可以在无温控系统下,在较宽温度范围($\Delta T \geq 30^\circ\text{C}$)工作,减小了激光器对电源的功耗。但是也存在着增益介质对泵浦光的吸收系数低、激光器输出能量波动大的问题。2018 年,彭超等^[15]报道了一台多波长 LDA 端面泵浦 Nd:YAG 脉冲激光器,温度为 25~55 $^\circ\text{C}$ 条件下,激光器输出能量波动范围为 37 mJ~74.4 mJ。

本文采用高温型 LD 模块作为泵浦源,通过 TEC 控制 LD 模块温度,在温度为 60 $^\circ\text{C}$ 时侧面交错泵浦 Nd:YAG 晶体,使用抗损伤阈值高、消光比高的磷酸二氘钾(Potassium Dideuterium Phosphate, DKDP)晶体电光调 Q。在泵浦电流 150 A,重复频率 20 Hz 下,获得了最大单脉冲能量 230 mJ、脉冲宽度 8.4 ns 的激光输出,发散角约为 1.6 mrad,对应的泵浦电脉冲宽度为 250 μs ,总电-光转换效率大于 4.6%。

1 实验装置

侧面脉冲泵浦 Nd:YAG 激光器的实验装置如图 1 所示,激光器由全反镜、LD 模块、PBS、1/4 波片、电光调 Q 晶体、输出耦合镜组成,谐振腔采用平行平面腔,腔长为 200 mm。其中,HR 为全反镜;PBS 为偏振分光棱镜;QWP 为 1/4 波片;EO 为电光调 Q 晶体;O.C 为输出耦合镜;E.M 为能量计;PD 为光电探测器。

泵浦源采用集泵浦、散热于一体的泵浦模块,每一个泵浦模块由一个 LD 阵列和 Nd:YAG 晶体以及钨

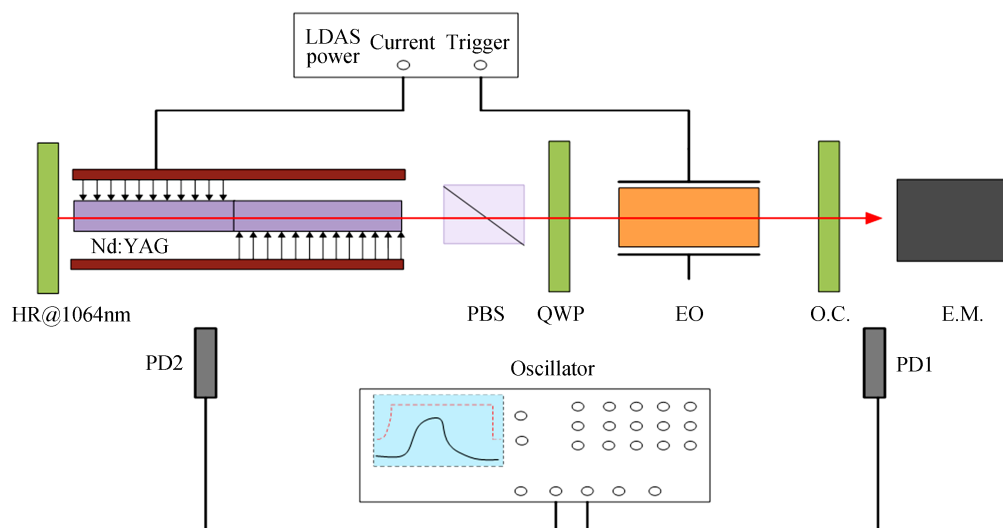


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 Experimental device

铜热沉组成,其由2个相同泵浦模块交错组成。LD阵列由20个Bar条呈半圆形状依次排列,每一个Bar条输出的最大峰值功率为100 W,一体化烧焊成型在钨铜热沉上。Nd:YAG晶体棒尺寸为 $\phi 5\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,掺Nd³⁺摩尔浓度为1.0at.%,晶体两端镀有1 064 nm波段增透膜。泵浦模块由一个外部电源驱动,驱动电源电压为95 V,电源泵浦频率在1~50 Hz可调,泵浦电脉宽在150~300 μs 可调。在泵浦模块下端,使用导热硅脂粘附了2个最大功率50 W的TEC(TEC-12809、TEC-13105)进行散热,调节精度为1 $^{\circ}\text{C}$ 。整个泵浦模块固定在铝制条梳散热器上面。

在腔内插入消光比为1:500的PBS用于产生线性偏振光,P光维持振荡和调Q,S光垂直P光振荡方向射出。腔内插入1/4波片和DKDP晶体,端面均镀有1.06 μm 增透膜。采用升压模式进行电光调Q。

1.1 泵浦源光谱测定

采用Ocean optics生产的HR 4000光谱仪在重复频率为20 Hz,电脉宽为250 μs ,泵浦电流为150A时,对泵浦源在不同温度下光谱数据测定,如图2(a)所示。当温度为40 $^{\circ}\text{C}$ 、50 $^{\circ}\text{C}$ 、60 $^{\circ}\text{C}$ 时,LDAs发射中心波长为802.58 nm、803.08 nm、806.82 nm。泵浦源工作温度上升引起LDAs中心波长发生红移。泵浦源温度在60 $^{\circ}\text{C}$ 下,测试LDAs不同工作电流下光谱线宽,如图2(b)所示。工作电流为50A时中心波长为802.7 nm,工作电流为150A时中心波长为806.82 nm,谱线宽度4.12 nm。由于所用激光温控电源的温控精度范围为 $\pm 3^{\circ}\text{C}$,考虑到谱线宽度4.12 nm,为和Nd:YAG晶体吸收峰(808 nm)匹配,泵浦源最佳工作温度应设在60 $^{\circ}\text{C}$,此时LDAs发射波长可基本覆盖Nd:YAG的主要吸收峰。

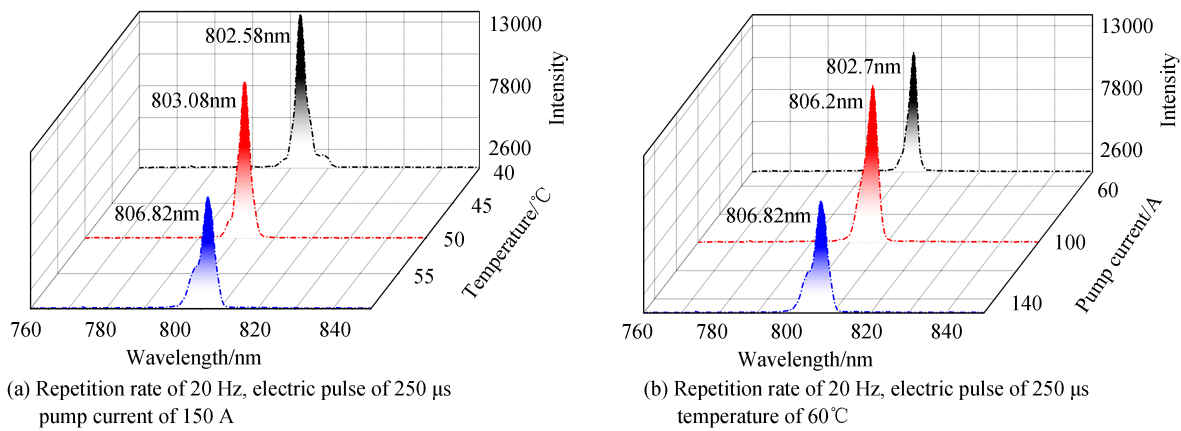


图2 实验所用LDAs光谱数据

Fig. 2 Spectrum data of LDAs used in the experiment

1.2 泵浦源热分析

利用模拟软件自带网格划分程序对泵浦源模型划分,其中LDAs、Nd:YAG晶体划分精度为0.2 μm ,铜热沉为2 μm ,时间计算步长Time等于1,环境温度为25 $^{\circ}\text{C}$ 。将表1相关材料参数带入模拟软件进行泵浦源在40 $^{\circ}\text{C}$ 、50 $^{\circ}\text{C}$ 、60 $^{\circ}\text{C}$ 下运行60 s后动态热学模拟温度变化,结果如图3所示。

表1 相关材料参数

Table 1 Related material parameters

Media name	Thermal conductivity/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Heat capacity/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
GaAs	55	5 330	325
Cu	38	8 900	24.4
Nd:YAG	14(25 $^{\circ}\text{C}$)10.5(100 $^{\circ}\text{C}$)	4 560	590

由图3可以看出,泵浦源初始温度为40 $^{\circ}\text{C}$ 、50 $^{\circ}\text{C}$ 、60 $^{\circ}\text{C}$ 时,经过60 s后泵浦源最大温差小于18 $^{\circ}\text{C}$,根据热量计算公式 $Q=cm\Delta T$,在比热容和物体质量相同时物体热量取决于温差大小。因此采用高温LDAs作为泵浦源可以有效减少Nd:YAG激光器的温控压力。

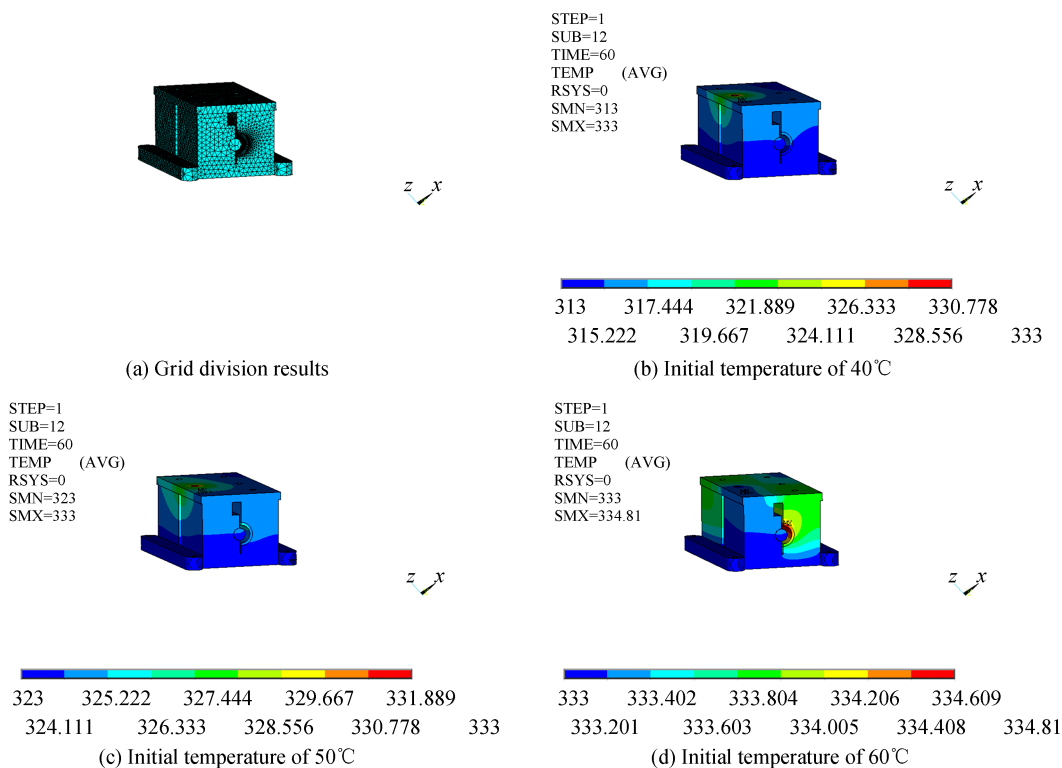


图3 LDAs泵浦源动态热学模拟计算
Fig.3 Dynamic thermal simulation of LDAs

2 实验结果与讨论

为避免在高功率泵浦下,激光晶体达到增益饱和状态,造成激光输出功率降低。所以,选择透过率为60%和70%的输出镜进行实验探究。使用Newport公司生产的818E-10-25L焦热电能探测器,在温度60°C下对激光器进行自由振荡实验,结果如图4所示。随着泵浦电流的增加,激光输出能量线性增加,未出现增益饱和,激光器处于稳定工作状态。

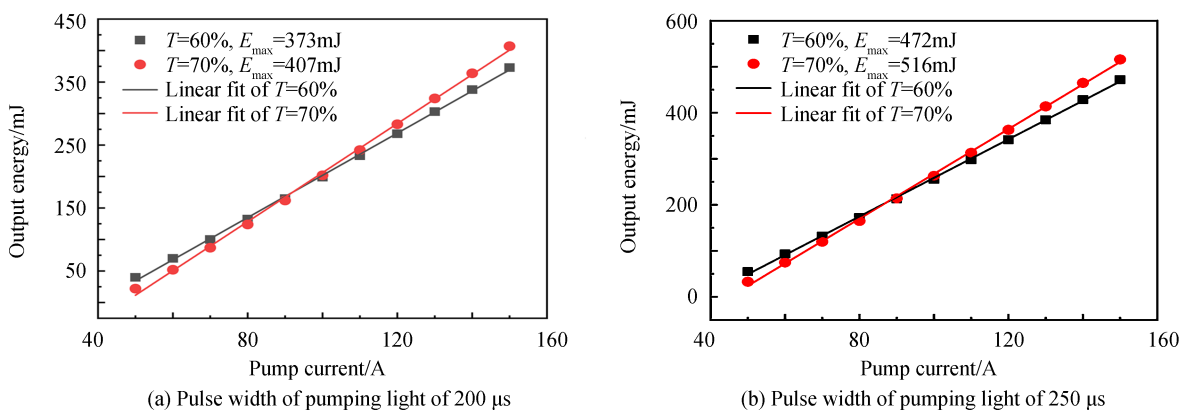


图4 侧面泵浦激光晶体输出特性
Fig. 4 Output characteristics of side pumped laser crystal

在重复频率为20 Hz,脉冲宽度200 μs,输出镜透过率为60%和70%时,激光器最大输出能量分别为373 mJ和407 mJ。在脉冲宽度250 μs时,输出能量分别为472 mJ和516 mJ。

为获得较高的激光转换效率,泵浦光的电脉宽应略大于Nd:YAG晶体的上能级寿命(230 μs)。输出镜在T=70%比T=60%的输出激光能量高,这是由于谐振腔内光子密度较高。

在输出镜透过率为70%、电脉宽250 μs下,对Nd:YAG激光器在谐振腔长(200 mm、220 mm、250 mm、300 mm)下激光输出特性进行了实验研究,如图5所示。在同一泵浦电流下,激光器最高输出能量随谐振腔缩短而增加。这主要是由于减小谐振腔长度降低了衍射损耗,从而使激光输出能量增加。在谐振腔L=200 mm,泵浦电流150 A,激光器最高输出能量516 mJ。

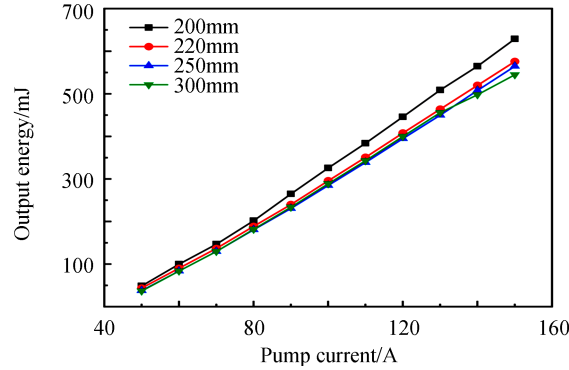


图5 不同腔长的输出特性

Fig.5 Output characteristics of different cavity lengths

依次将PBS、1/4波片、电光Q开关放置在光路并调节到共轴,测试了输出镜透过率为60%、70%在不同重复频率下的调Q激光输出特性,如图6所示。

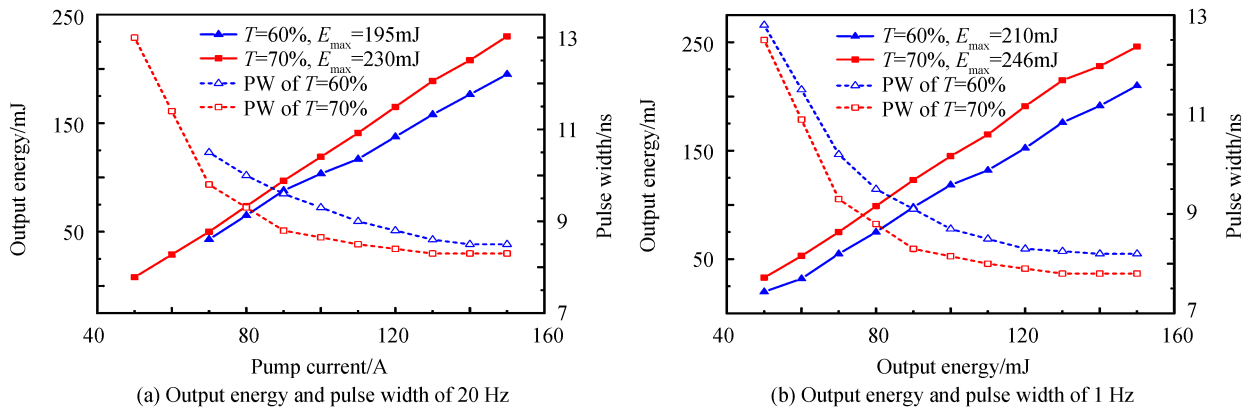


图6 侧面泵浦Nd:YAG调Q结果

Fig. 6 Q-switch results of side pumped Nd: YAG

随着泵浦电流增加,调Q激光输出脉冲能量线性增加,脉宽逐渐变窄。泵浦电流150 A,重复频率为20 Hz,输出镜为60%、70%的激光器调Q激光输出最大能量分别为195 mJ、230 mJ,对应的脉冲宽度分别为8.5 ns、8.4 ns。重复频率为1 Hz,最大激光输出能量为210 mJ、246 mJ,脉冲宽度为8.2 ns、7.8 ns。调Q时,脉冲激光输出能量随着重复频率的降低而升高,这是因为在低重复频率下加载到Nd:YAG晶体上平均功率较低,从而导致晶体热负荷小。重复频率不变,随着泵浦能量增加,激光晶体内部反转粒子数增多,Q开关打开后,可以在最短的时间内消耗完反转粒子数。

对Nd:YAG激光器激光输出能量稳定特性进行了实验探究,在泵浦电流150 A,重复频率为20 Hz,时间为3 min,通过818E-10-25L焦热能量探测器读取的数据显示在3 min内Nd:YAG激光器输出能量基本保持在200 mJ以上,稳定性小于4%,电-光转换效率大于4.6%。如图7所示。随着激光器长时间工作,泵浦源温度上升引起LDAs发射峰逐渐往长波方向移动,与Nd:YAG晶体的吸收峰匹配度降低,以此造成激光器输出能量下降。

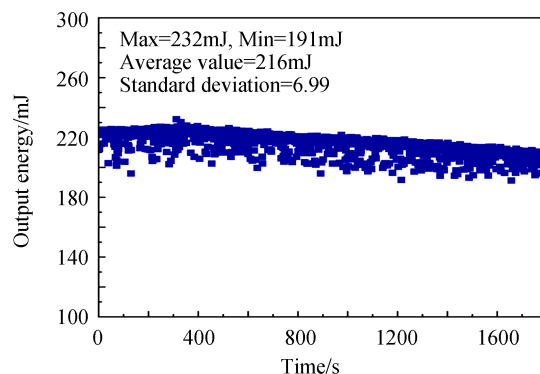


图7 激光输出能量稳定图

Fig.7 Stability diagram of laser output energy

采用上转换荧光片检测光斑形状,如图8所示。将光斑能量近似认为成高斯分布,当采用刀片^[16-18]在 x 和 y 轴分别遮挡6%至94%能量时,对应的长度即为光斑在这一方向的直径。在输出镜后100 mm处测得激光光斑直径为5.8 mm,在1 000 mm处激光光斑直径为7.2 mm,故发散角约为1.6 mrad。



图8 激光器输出光斑

Fig.8 Laser output spot

3 结论

设计了一台高温型LDAs侧面脉冲泵浦Nd:YAG激光器。通过比较泵浦源在不同温度条件下发射谱线中心,确定泵浦源最佳工作温度为60℃。模拟了泵浦源动态热学。通过对比不同实验参数,得到了谐振腔最佳工作状态。在泵浦电流150 A、泵浦电脉冲宽度250 μ s、重复频率20 Hz、1 Hz条件下,实现了最大单脉冲能量为230 mJ、246 mJ,脉冲宽度为8.4 ns、7.8 ns的1 064 nm激光输出。激光器腔长200 mm,光束发散角约为1.6 mrad。整体电-光转化效率大于4.6%。高温LDAs侧面泵浦Nd:YAG激光器可以获得稳定的调Q激光输出,采用高温型LDAs可以有效降低温控系统的制冷压力,缩小制冷系统体积使得激光器整体更加紧凑,是实现激光器大能量、小型化的可行方案,同时也为研究种子源大能量输出的同行提供一些实验依据。

参考文献

- [1] HONG Guanglie, LI Jiatang, WANG Jianyu, et al. Advance of ground based differential absorption lidar at 0.94 μ m[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(12): 77-84.
洪光烈,李嘉唐,王建宇,等. 0.94 μ m差分吸收激光雷达地基工作的进展[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(12): 77-84.
- [2] SUN Yubo, XIONG Lingling, ZHANG Pu, et al. Optical design of laser diode beam-homogenizing system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(12): 142-147.
孙玉博,熊玲玲,张普,等. 半导体激光器光束匀化系统的光学设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(12): 142-147.
- [3] LI Gingzhao, CHEN Zhenqiang, ZHU Siqi. Passively Q-switched laser with a Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG composite

- crystal[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(1):55-61.
- 李景照,陈振强,朱思祁.基于Yb:YAG/Cr³⁺:YAG/YAG键合晶体的被动调Q激光器[J].光学精密工程,2018,26(1):55-61.
- [4] XIE Shiyong, WANG Jiuwang, SUN Yong, et al. VCSEL end-pumped high-energy Q-switched Nd:YAG laser[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(3): 558-564.
- 谢仕永,王久旺,孙勇,等.垂直腔面发射激光端面泵浦的高能量调Q Nd:YAG激光[J].光学精密工程,2020,28(3):558-564.
- [5] LIU Yuqian, ZHANG He, JIN Liang, et al. Compact quasi continuous pumped Nd:YAG Q-switched solid laser[J]. China Optics, 2019, 12(2):413-424.
- 刘宇乾,张贺,金亮,等.紧凑型准连续泵浦调Q Nd:YAG激光器[J].中国光学,2019,12(2):413-424.
- [6] ZHANG Lei, CHEN Shaowu, ZHAO Haichuan, et al. Multi-spectral temperature measuring system based on photoelectric detection[J]. Chinese Optics, 2019, 12(2): 289-293.
- 张磊,陈绍武,赵海川,等.基于光电探测的多光谱测温装置[J].中国光学,2019,12(2):289-293.
- [7] PENG Chao, LIU Xuesheng, SI Hanying, et al. Multi-color laser diode array end-pump Nd:YAG pulsed laser[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(2):162-168.
- 彭超,刘学胜,司汉英,等.多波长半导体激光阵列端泵Nd:YAG脉冲激光器[J].发光学报,2018,39(2):162-168.
- [8] ZHAO Hu, YAN Xinjie, DENG Mingfa, et al. All solid-state large energy Nd:YAG laser with electro-optical Q-switched pulse sequence.[J].Laser & Infrared, 2016,46(7):819-822.
- 赵虎,延新杰,邓明发,等.大能量电光调Q脉冲序列输出全固态Nd:YAG激光器[J].激光与红外,2016,46(7):819-822.
- [9] FENG Jiang, CHEN Guo, LUOXu, et al. Solid state laser with high peak power and narrow line width[J]. Laser & Infrared, 2019,49(6):702-705.
- 冯江,陈国,罗旭,等.高峰值功率窄线宽固体激光器技术[J].激光与红外,2019,49(6):702-705.
- [10] LING Ming, WU Zhichao, TAN Xuechun, et al. LD side-pumped Nd:YAG Q-switched laser without water cooling[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007(S1):20-23.
- 凌铭,武志超,谭雪春,等.LD侧面泵浦Nd:YAG无水冷调Q脉冲激光器[J].红外与激光工程,2007(S1):20-23.
- [11] LIU Xu, WANG Xiaobing, CHWNG Yong, et al. Design of diode pumped all solid state laser for SLA[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007(6):794-880.
- 刘旭,王小兵,程勇,等.星载激光测高的半导体泵浦全固化激光器设计[J].红外与激光工程,2007(6):794-880.
- [12] CHEN Xinyu, JIN Guangyong, YU Yongji. Electro-optic q-switched of double LDA alternate symmetric side-pumped Nd:YAG laser[J]. Acta Optica Sinica. 2009,29(11): 3098-3102.
- 陈薪羽,金光勇,于永吉,等.双激光二极管阵列侧面交错抽运的电光调Q Nd:YAG激光器[J].光学学报,2009,29(11):3098-3102.
- [13] LIU Xu, CHENG Yong, WAN Qiang, et al. High temperature laser diode pumped all-solid-state laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7):34-39.
- 刘旭,程勇,万强,谭朝勇,等.高温激光二极管抽运全固态激光器[J].中国激光,2016,43(7):34-39.
- [14] ZHONG Jianqi, QU Yachen, ZHANG Xiaojing, et al. High-temperature LDAs pumped compact Nd:YAG Laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2019,48(12):62-69.
- 钟健麒,曲雅臣,张晓静,等.高温LDAs泵浦紧凑型Nd:YAG激光器[J].光子学报,2019,48(12):62-69.
- [15] PENG Chao, LIU Xuesheng, SI Hanying, et al. Multi-color laser diode array end-pump Nd:YAG pulsed laser[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(2):162-168.
- 彭超,刘学胜,司汉英,等.多波长半导体激光阵列端泵Nd:YAG脉冲激光器[J].发光学报,2018,39(2):162-168.
- [16] KOECHNER W. Solid state laser engineering[M]. SUN W, JIANG Y W, CHENG G X, et al. Transl. Beijing: Science Press, 2002:411-418.
- W.克希耐尔.固体激光工程[M].孙文,江泽文,程国祥,译.北京:科学出版社,2002:411-418.
- [17] 周炳坤,等.激光原理[M].北京:国防工业出版社,2014.11:33-38.
- [18] XIONG Xiaohua. Design of experiment for measuring gaussian beam spot size using knife edge[J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology, 2000, (3):73-75.
- 熊小华.刀口法测量高斯光束腰斑大小实验设计[J].南昌航空工业学院学报,2000,(3):73-75.