

空间应用高光束质量小型化被动调Q激光器

王彬宇¹, 刘 斌¹, 王永志², 吴妙章², 周云申³, 刘 崇¹

(1. 浙江大学 光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 上海无线电设备研究所, 上海 201109;

3. 常州英诺激光科技有限公司, 江苏 常州 213164)

摘要: 为了实现航天应用的特定需求, 对空间激光器的激光单脉冲能量、脉冲宽度、光束质量等都有严格的技术指标要求。研究并设计了一种适用于空间的小型化高光束质量被动调Q激光器, 实现了工程样机。样机输出激光脉冲宽度约为5 ns, 峰值功率可达兆瓦, 激光光束质量因子 $M^2=1.01$, 单脉冲能量稳定性均方根(Root Mean Square, RMS)为1.53%。激光头体积为0.469 L, 质量为0.52 kg, 激光器样机实现了结构小型化。

关键词: 空间应用; 激光器; 小型化; 被动调Q; 高光束质量

中图分类号: TN 248.1

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.06.010

Miniaturized Passively Q-switched Laser with High Beam Quality for Space Applications

WANG Binyu¹, LIU Bin¹, WANG Yongzhi², WU Miaozhang², ZHOU Yunshen³, LIU Chong¹

(1. College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China;

2. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China;

3. Changzhou Inno Laser Technology Co., Ltd., Changzhou 213164, Jiangsu, China)

Abstract: In order to meet the specific requirements of aerospace applications, there are strict technical specifications for the laser single pulse energy, pulse width, and beam quality of the space laser. This paper studies and designs a miniaturized passively Q-switched laser with high beam quality suitable for space application, and realizes an engineering prototype. The output laser pulse width of the prototype is about 5 ns, which can reach megawatt level peak power. The laser beam quality factor(M^2) is 1.01, and the pulse energy stability root mean square (RMS) is 1.53%. The volume of the laser head is 0.469 L, while the mass is 0.520 kg. Therefore, the design of laser prototype has successfully achieved the miniaturization of its structure.

Key words: space application; laser; miniaturization; passively Q-switched; high beam quality

0 引言

激光探测是一种方向性好、抗干扰能力强的主动探测手段, 在空间探测领域中的应用越来越广泛。以星间通信为例, 空间卫星之间通过激光器发射脉冲激光, 接收器获取回波信号, 获得探测目标的速度、位置和轨迹特征等信息, 可用于

对目标卫星进行光电捕获和跟踪瞄准, 建立星间的通信链路^[1-3]。根据探测目标的类型和探测器的响应情况, 为了获得高探测信噪比, 激光器的脉冲宽度和峰值功率是设计中的重要技术指标。对于空间激光器, 在实现高精度目标探测的同时, 由于存在载荷及空间的严格限制、能源供给

收稿日期: 2021-03-10; **修回日期:** 2021-07-16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61905212); 国家自然科学基金(41775023); 浙江省重点研发计划(2020C1106); 浙江省市场监督管理局NQI项目(20200103); 常州市领军型创新人才引进培育项目(CQ20200019); 中国博士后科学基金(2018M640554); 上海航天科技创新基金(SAST2018-081)

作者简介: 王彬宇(1996—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为固体激光技术、大气海洋激光雷达技术。

通信作者: 刘 崇(1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高功率激光技术、脉冲单频激光技术、大气海洋激光雷达技术、光电检测技术与系统等。

的有限性,以及需要在卫星运行过程中实现信号收发等问题,除需满足激光脉冲宽度和峰值功率设计的基本技术指标外,还要考虑激光器的结构小型化、激光的光束质量、系统的功耗、系统的可靠性和鲁棒性等^[4]。

国际上,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于2003年发射的对地观测卫星(Ice, Cloud, and land Elevation Satellite, ICESat)上载荷了地球科学激光测高系统(Geoscience Laser Altimeter System, GLAS)星载激光器。该激光器首次采用了被动调Q技术产生脉冲激光,并在随后多个星载项目中使用了被动调Q技术,证明了被动调Q技术已经可以成熟地应用于空间激光器^[5-7]。在国内,中国科学院北京光电研究院于2017年研制了用于空间碎片探测的全固态Nd:YAG激光器,使用了种子激光器结合十级激光放大器的主振荡功率放大器(Master Oscillator Power-Amplifier, MOPA)结构,实现了3.31 J能量的激光输出^[8]。这种采用了多级放大结构的空间激光器体积大、功耗高、热效应严重,不便于实现结构小型化。

相较于主动调Q技术通过外加驱动模块实现输出激光的调制,被动调Q技术是通过谐振腔内可饱和吸收体对光强的调制来实现窄脉宽高功率的激光输出。对于空间星载环境,由于对载荷和体积需要严格限制,对电磁干扰和系统产热也需要严格控制,采用被动调Q技术无需额外添置驱动源,减小了系统的体积,消除了电磁干扰。被动调Q技术具有设计简单、成本低、系统紧凑的特点^[9],更易满足空间激光器低热量、低功耗、结构小型化的设计要求。因此,研制稳定工作、高功率、高光束质量被动调Q小型化激光器,对于空间激光载荷的研制具有重要的实际意义。本文设计了一种空间应用的基于1 064 nm波段的激光二极管(Laser Diode, LD)端面泵浦的被动调Q小型化全固态激光器,并实现了工程样机。工程样机激光头质量为0.52 kg,体积为0.469 L,激光脉冲峰值功率达到兆瓦,脉冲宽度为5.12 ns,光束质量因子为 $M^2=1.01$,脉冲能量稳定性均方根(Root Mean Square, RMS)为1.53%。

1 理论仿真

1.1 被动调Q激光器参数设计

空间应用激光器为了满足星间探测需求,其脉冲宽度和单脉冲能量是激光器设计的重要指标。对于LD泵浦的被动调Q激光器,根据被动调Q理论,结合激光速率方程,可通过计算反转粒子数的方法获得被动调Q激光器的单脉冲能量 E 和脉冲宽度 t_p 。结合被动调Q晶体的初始透过率 T_0 ,进一步推导 T_0 、 E 、 t_p 之间的关系以指导激光器设计^[10-13]。选用 Cr^{4+} :YAG为被动调Q晶体,仿真结果如图1所示,仿真计算所用的参数见表1。

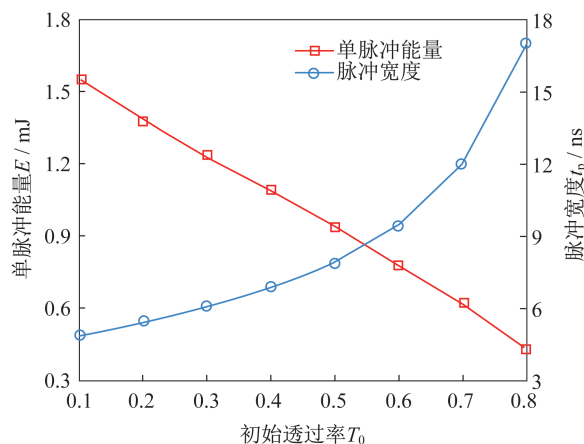


图1 激光器单脉冲能量与脉冲宽度随 Cr^{4+} :YAG初始透过率变化的关系

Fig.1 Relationship between the single pulse energy and the pulse width of the laser with the initial transmittance of Cr^{4+} :YAG

表1 被动调Q激光器仿真计算所用参数^[11]

Tab.1 Parameters used in the simulation calculation of passively Q-switched laser^[11]

参数	数值
光子能量 $h\nu/\text{J}$	1.86×10^{-19}
增益介质受激发射截面 σ/m^2	2.8×10^{-23}
被动调Q可饱和吸收体基态吸收截面 σ_{gs}/m^2	7×10^{-22}
激发态吸收截面 σ_{es}/m^2	2×10^{-22}
增益介质长度 l/mm	10
光速 $c/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	3×10^8
谐振腔光学长度 d/mm	122
增益介质表面的泵浦光斑面积 A/m^2	2.83×10^{-7}
可饱和吸收体的残余吸收与谐振腔的耗散损耗 δ	0.1

根据图 1 的结果分析,随着 Cr^{4+} :YAG 初始透过率的增大,被动调 Q 激光器的输出单脉冲能量逐渐减小,脉冲宽度逐渐增加。根据设计需要,激光器谐振腔输出的单脉冲能量应大于 1.00 mJ,脉冲宽度为 5.00 ns 左右。由仿真结果,选取 Cr^{4+} :YAG 初始透过率为 20%,输出镜反射率为 30% 时,能获得单脉冲能量 1.38 mJ、脉冲宽度 5.44 ns 的激光输出,可以实现设计需要。

1.2 激光晶体热稳定性仿真

在空间应用环境下,激光器的稳定性是制约其性能发挥的关键因素。激光增益介质作为受激辐射产生激光的关键元件,在激光器设计过程中需要重点考虑其热稳定性。考虑到空间应用载荷、体积和功耗的限制要求,本文采用了紫铜热沉结合铜膜包裹增益介质进行传导冷却的方法,为增益介质散热^[14]。该方法不需要引入外界制冷设备,降低了系统的体积和功耗。增益介质选用 Nd:YAG 激光晶体,用于进行晶体热稳定性仿真所设计的机械结构建模,如图 2 所示。

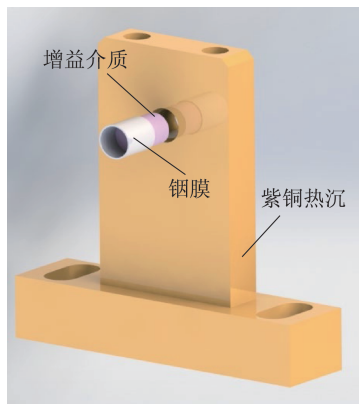


图 2 激光晶体热稳定性分析结构建模

Fig.2 Structural modeling for the thermal stability analysis of the laser crystals

激光晶体的产热主要来源于激光泵浦。在仿真中选用了 100 W 峰值功率、230 μs 泵浦脉冲宽度、10 Hz 重复频率下工作的脉冲泵浦条件作为热源。选取了不同的环境温度,仿真激光晶体的温度分布情况以评估其热稳定性^[11],仿真结果如图 3 所示。

图 3 给出了在实验室温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,以及改变环境温度激光晶体由中心到边缘的温度变化情况。

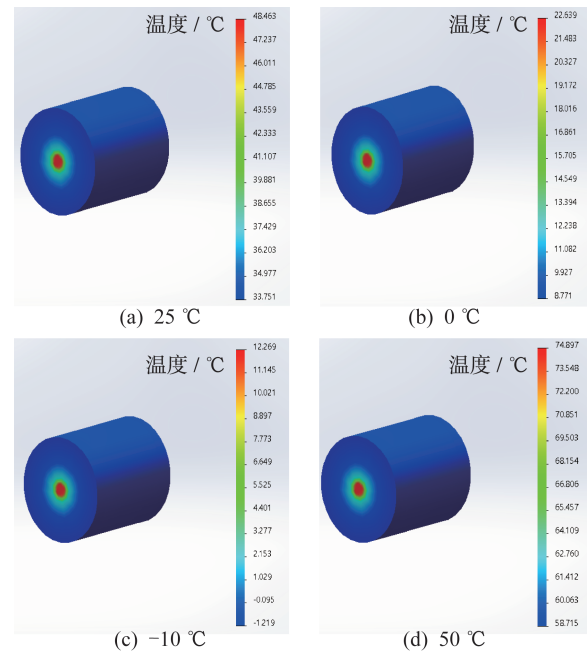


图 3 不同环境温度下激光晶体热稳定性仿真结果

Fig.3 Simulation results of the thermal stability of the laser crystals at different ambient temperatures

由图 3 可见,越靠近泵浦光斑中心的温度越高。在不同环境温度下,计算激光晶体中心到边缘的温度差,如图 4 所示。

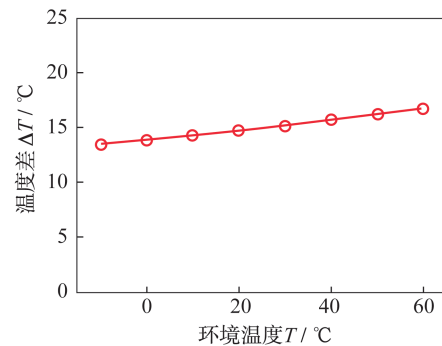


图 4 激光晶体中心到边缘温度差随环境温度变化的结果

Fig.4 Results of the temperature difference from the center to the edge of the laser crystal at different environmental temperatures

由图 4 可知,在模拟的泵浦条件和冷却散热设计下,当环境温度由 -10.0 $^{\circ}\text{C}$ 升至 60.0 $^{\circ}\text{C}$ 时,激光晶体中心到边缘温度差由 13.5 $^{\circ}\text{C}$ 升至 16.7 $^{\circ}\text{C}$,温度差的增幅为 3.2 $^{\circ}\text{C}$ 。在本文第 3 章测试分析中,将评估环境温度变化导致的晶体温度差变化对输出激光稳定性的影响。

2 样机设计

2.1 整机结构

空间应用高光束质量小型化被动调Q激光器工程样机结构如图5所示。根据设计需要,采用一级激光振荡器加一级晶体放大器的结构。激光振荡器和晶体放大器均采用了西安炬光公司生产的光纤耦合输出LD进行端面泵浦,泵浦光中心波长 (808 ± 3) nm,使用热电冷却器(Thermo Electric Cooler, TEC)对泵浦源进行温度控制,通过改变LD的温度来调节泵浦光的波长。泵浦光由芯径为 $400\text{ }\mu\text{m}$ 、数值孔径为0.22 NA的多模光纤导入耦合系统准直聚焦,经过内表面镀1 064 nm高反膜层的后腔镜,耦合入掺杂浓度约为1%的Nd:YAG增益介质,Nd:YAG长度为10 mm,端面直径为3 mm,

使用钢膜包裹后置于金属紫铜热沉中。根据1.1节的仿真与计算结果,选用初始透过率为20%的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 可饱和吸收体实现调Q,输出镜内表面镀膜反射率为30%,外表面镀1 064 nm减反膜。激光器谐振腔采用了两面腔镜均为平面反射镜的平行平面腔,这种谐振腔较为充分地利用了增益介质体积,光束方向性好,易于设计和实现^[11,15]。谐振腔内部使用了3个人射角(Angle of Incidence, AOI)为 45° 的1 064 nm高反镜,对振荡激光进行光路折转。这种“折转式”的光路设计有效地利用了空间,光路更加紧凑,不改变平行平面腔的光学性质。放大级为基于Nd:YAG增益介质的激光放大器,由激光振荡器输出的1 064 nm信号光经由激光放大器放大,通过窗口镜输出放大后的脉冲激光。

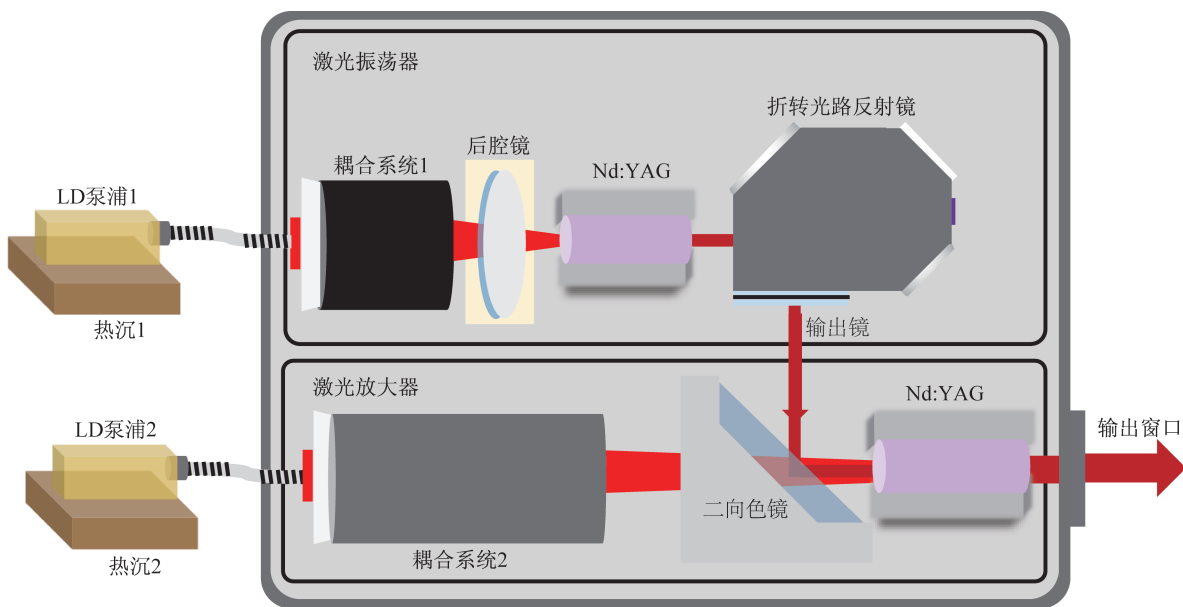


图5 激光器工程样机设计结构

Fig.5 Design of the laser engineering prototype structure

2.2 泵浦耦合系统与放大器

小型化被动调Q激光器的振荡级和放大级均采用了LD端面泵浦的方式。相对于侧面泵浦,端面泵浦的泵浦光能够聚焦到与谐振腔同轴的增益介质当中,在增益介质中产生较高的泵浦功率密度^[11]。使用光纤耦合方式传输泵浦光可将泵浦源外置以减小激光头尺寸。通过实验,泵浦耦合光学系统采用了非球面匹配透镜组,如图6所示。

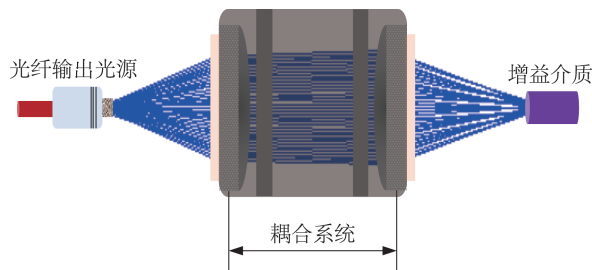


图6 泵浦光耦合系统光学设计

Fig.6 Optical design of the pump coupling system

泵浦光由多模光纤输出后成一定角度发散,经耦合系统准直并聚焦于增益介质内部。对于端面泵浦激光器,决定激光器效率和输出功率的1个重要因素是泵浦光和振荡光的空间重叠情况。当聚焦泵浦光斑和光学谐振腔振荡基模光斑实现模式匹配时,泵浦光可以得到充分利用,谐振腔具有最大的输出效率^[11]。

在图5所示的Nd:YAG激光放大器中,振荡级输出的信号光经由二向色镜反射进入放大级增益介质,二向色镜透射面镀808 nm减反膜,反射面镀808 nm增透膜、1 064 nm高反膜。与振荡级类似,泵浦光经耦合系统准直并聚焦进入掺杂浓度约为1%Nd:YAG增益介质。通过微调耦合透镜组和增益介质的相对位置,可以实现泵浦光斑直径和信号光斑直径的匹配。经过Nd:YAG激光放大器,信号光实现了峰值功率提升,这种主振荡功率放大的MOPA结构能够保持振荡级输出激光良好的时频域特性和光束质量^[16-17]。

2.3 机械设计

工程样机的光学元件固紧采用了紫外固化胶粘合的方式,以减小元件内部应力。光学谐振腔腔镜使用了销钉螺柱固紧,装调中不使用弹性调节机构,可调机构通过旋转顶丝实现结构微调,提升了工程样机的系统稳定性。对激光增益介质侧面抛光,减小和导热材料之间的空隙,激光晶体的散热和夹持结构采用了1.2节的设计方法。除对增益介质进行专门热效应控制外,系统的机械固定件选用了热导率较高的硬铝材料进行导热、散热。工程样机在多处进行了整体模块化设计,减少了零件数量,实现了系统集成化。工程样机设计了封装外壳,对外壳、光学机械固定和夹持件进行表面发黑处理,防止外部环境对激光器内部光路和机械结构产生干扰。

3 测试分析

测量得到激光头的外形尺寸为108 mm×101 mm×43 mm,计算得到激光头体积为0.469 L,质量为0.52 kg,含泵浦源质量为1.35 kg。使用能量计分别测量激光单脉冲能量和能量稳定性,使用高速PIN光电二极管结合数字示波器测量激光脉冲宽度。

通过调节LD的重复频率,可以实现激光器重复频率的调节,根据设计要求,实现脉冲重复频率10~100 Hz的调节。在LD输出功率100 W、脉冲宽度230 μs、重复频率10 Hz的测试条件下,测得激光振荡器输出的激光单脉冲能量1.25 mJ,脉冲宽度5.12 ns,与第1.1节理论仿真与计算结果基本吻合。经过放大后的激光单脉冲能量可达到5.16 mJ,计算得到激光峰值功率1.01 MW。激光单脉冲能量稳定性RMS 1.53%。激光单脉冲能量稳定性的测试结果和测试条件如图7所示。

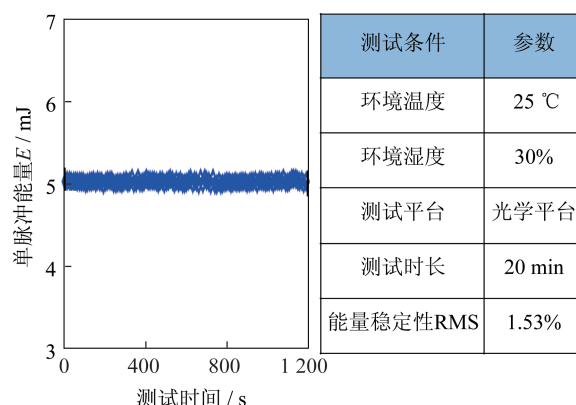


图7 激光单脉冲能量稳定性实测结果及测试条件

Fig.7 Experimental results and test conditions of the laser single pulse energy stability

使用光束质量分析仪测量近场激光输出光斑直径,通过曲线拟合计算得到 x 、 y 方向的光束质量因子分别为 $M_x^2=1.01$, $M_y^2=1.01$,激光束腰半径约为180 μm。光束质量因子测试如图8所示。

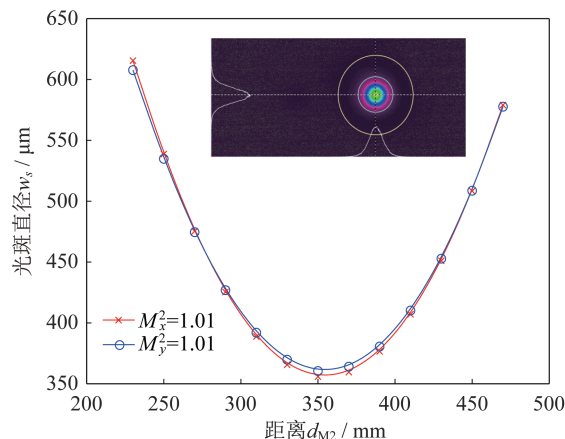


图8 激光光束质量因子测试结果与近场激光光斑

Fig.8 Experimental results of the laser beam quality factor and near-field laser spot

由于增益介质的存在,泵浦光在增益介质中受激辐射产生激光的过程中存在量子亏损,在增益介质中会产生热透镜效应,导致输出激光光束质量恶化^[18]。热透镜效应的严重程度通过增益介质的热透镜焦距 f 反映, f 由增益介质的固有性质和导致热透镜效应的泵浦参数决定。对于端面泵浦结构的激光器, f 可表示为^[11]

$$f = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_H (dn/dT)} \left(\frac{1}{1 - \exp(-\alpha_p l)} \right) \quad (1)$$

式中: K_c 为增益介质热导率; ω_p 为泵浦光斑半径; P_H 为产热的泵浦功率; dn/dT 为增益介质热光系数; α_p 为增益介质吸收系数; l 为增益介质长度。

测试过程中进行热透镜焦距计算使用的参数见表 2。增益介质选用 Nd:YAG 激光晶体,在实验室温度 25 °C 条件下,计算得到激光晶体的热透镜焦距约为 5 899 mm^[11,19]。根据 1.2 节的仿真结果,随着外界环境温度的改变,将会改变激光晶体中心到边缘的温度差,影响其热透镜焦距。环境温度导致激光晶体热透镜焦距变化的情况如图 9 所示。

表 2 谐振腔热透镜焦距计算参数^[11]

Tab.2 Parameters used to calculate the focal length of the resonator thermal lens^[11]

参数	数值
$\omega_p/\mu\text{m}$	300
P_H/W	1
l/mm	10
α_p/cm^{-1}	4.1
$(dn/dT)/\text{K}^{-1}$	7.3×10^{-6}
$K_c/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K})$	0.14(20 °C)

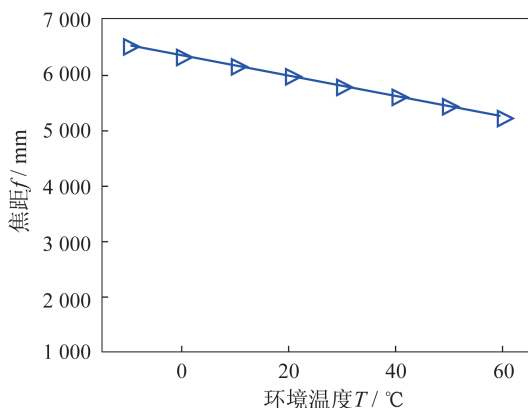


图 9 激光晶体热透镜焦距随环境温度变化的结果

Fig.9 Focal length of the laser crystal thermal lens with the environment temperature

根据图 9 的计算结果,当外界环境温度由实验室温度 25 °C 升高至 60 °C 时,晶体的热透镜焦距由约 5 899 mm 缩短至约 5 244 mm;当温度从 25 °C 降低至 -10 °C 时,热透镜焦距由约 5 899 mm 增加至约 6 525 mm。在这个变化范围内,激光晶体的热透镜焦距远大于激光晶体长度和谐振腔的光学长度,热透镜效应可以忽略不计,环境温度的变化对激光晶体的热稳定性没有产生明显的影响。由于激光器工作在低重复频率状态,振荡级和放大级的泵浦能量较低,被动调 Q 激光器的整机热效应很小,获得了近高斯型的输出激光光束质量。同时,被动调 Q 本身无需外加激励源实现谐振腔损耗调制,低热效应也使激光器无需进行水冷或风冷,整机功耗低,适合在空间环境下工作。激光器的各项输出特性参数满足设计的技术指标要求。

4 结束语

本文研究并设计实现了一种空间应用高光束质量小型化被动调 Q 激光器的工程样机。根据空间应用特点,脉冲激光产生方式实现了低功耗与低电磁干扰,光路结构进行了紧凑化设计,实现了整机的结构小型化,散热实现了无水冷、无风冷,机械设计提升了系统稳定性。工程样机获得了超过兆瓦级的峰值功率, $M^2=1.01$ 近高斯型光束质量的激光输出,输出激光脉冲能量稳定性 RMS 为 1.53%,工程样机能够初步满足空间应用激光器的设计需求。该项研究为未来实体研制空间应用卫星载荷激光器,实现激光器的小型化和高光束质量,提供了一定的研究基础与设计参考。

参考文献

- [1] OPROMOLLA R, FASANO G, RUFINO G, et al. Spaceborne LIDAR-based system for pose determination of uncooperative targets [C]// Metrology for Aerospace. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 265-270.
- [2] 王卫兵,王挺峰,郭劲.星载光电捕获跟踪瞄准控制技术分析[J].中国光学,2014,7(6):879-888.
- [3] SUI C, WANG Q, ZHANG S, et al. Study of target tracking techniques based on non-scanning imaging lidar [C]// International Conference on Optical Instruments and Technology. San Francisco, USA: SPIE, 2015: 96220.

- [4] 刘琪,孟俊清,祖继锋,等.适于空间应用的高重复频率窄脉冲电光调Q激光器[J].中国激光,2017,44(6):43-48.
- [5] 卢乃锰,闵敏,董立新,等.星载大气探测激光雷达发展与展望[J].遥感学报,2016,20(1):1-10.
- [6] 颜凡江,郑永超,陶宇亮.星载激光测距系统中激光器技术分析及发展展望[J].航天返回与遥感,2012,33(4):70-77.
- [7] 王玉诏,郑永超.星载大气探测激光雷达技术与应用[J].上海航天,2020,37(5):125-134.
- [8] 樊仲维,邱基斯,唐熊忻,等.用于空间碎片探测的百赫兹 3.31 J 高光束质量全固态 Nd: YAG 激光器[J].物理学报,2017,66(5):115-120.
- [9] MORRIS J A, POLLOCK C R. Passive Q switching of a diode-pumped Nd: YAG laser with a saturable absorber[J]. Optics Letters, 1990, 15(8): 440-442.
- [10] DONG J. Numerical modeling of CW-pumped repetitively passively Q-switched Yb: YAG lasers with Cr: YAG as saturable absorber [J]. Optics Communications, 2003, 226(1): 337-344.
- [11] KOECHNER W. Solid-state laser engineering [M]. Berlin:Springer, 2006.
- [12] BURSHTEN Z, BLAU P, KALISKY Y, et al. Excited-state absorption studies of Cr^{4+} ions in several garnet host crystals [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(2): 292-299.
- [13] CHEN Y F, LAN Y P, CHANG H L. Analytical model for design criteria of passively Q-switched lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(3): 462-468.
- [14] LEISHER P O, GLEBOV A L, BAKER E H, et al. ICESat-2 laser Nd: YVO4 amplifier [C]// Components and Packaging for Laser Systems IV. San Francisco, USA: SPIE, 2018: 105130X.
- [15] SALEH B E A, TEICH M C, SLUSHER R E. Fundamentals of photonics [M]. Bellingham: Spie Org, 1992.
- [16] LIU B, LIU C, SHEN L F, et al. Beam quality management by periodic reproduction of wavefront aberrations in end-pumped Nd: YVO4 laser amplifiers [J]. Optics Express, 2016, 24(8): 8988-8996.
- [17] XIANG Z, WANG D, PAN S Q, et al. Beam quality improvement by gain guiding effect in end-pumped Nd: YVO4 laser amplifiers [J]. Optics Express, 2011, 19(21): 21060-21073.
- [18] 刘斌.高光束质量高峰值功率固体激光放大技术研究[D].杭州:浙江大学,2018.
- [19] 齐兵,李隆,白冰,等.LD 侧面泵浦变热传导系数 Nd: YAG 晶体温场特性研究[J].激光杂志,2015,36(9):13-16.