

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.06.006

高环境适应性全固态激光器

段丹阳¹, 董云升^{2*}, 张天舒^{1,2}, 吕立慧¹,
付毅宾², 高慧慧², 裴永康³

(1 安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230601;

2 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

3 中科环光技术有限公司, 安徽 合肥 230031)

摘要: 针对车载激光雷达对激光器光源的应用需求, 设计了一种高环境适应性、高重频的全固态激光器。设计上, 采用 $ABCD$ 传输矩阵理论对谐振腔进行计算和分析, 实现了激光介质内泵浦光和振荡光最佳的模式匹配; 实验上, 进行了谐振腔的胶水稳定性测试和局部温控测试, 从工艺上提高谐振腔的稳定性。通过测量激光器在高温、低温、振动等不同工况下的功率稳定性, 证明了激光器具有高环境适应性。该激光器基于风冷散热实现了整机在 -10°C 至 55°C 温度范围内和公路谱振动条件下的稳定工作。在泵浦功率为 8.31 W 、声光调 Q 模式下, 获得了脉宽为 7 ns 、重复频率为 4 kHz 、平均功率为 0.95 W 、单脉冲能量为 0.24 mJ 的 532 nm 绿光输出, 满足激光雷达车载的应用需求。

关键词: 激光技术; 模式匹配; 腔内倍频; 声光调 Q ; 宽温度范围

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2023)06-00858-10

High environmental adaptability all-solid-state laser

DUAN Danyang¹, DONG Yunsheng^{2*}, ZHANG Tianshu^{1,2}, LYU Lihui¹,
FU Yibin², GAO Huihui², PEI Yongkang³

(1 Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, China;

2 Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS,

Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3 Zhongke Optical Technology Co., LTD, Hefei 230031, China)

Abstract: An all-solid-state laser with high environment adaptability and high repetition frequency is designed to meet the application requirements of laser source for vehicle-mounted lidar. In terms of design, $ABCD$ transmission matrix theory is used to calculate and analyze the resonant cavity, thus realizing the best mode matching between the pumping light and the oscillating light in the laser medium. In the experiment, glue stability test and local temperature control test are carried out to improve the

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划 (202004i07020002)

作者简介: 段丹阳 (1996 -), 女, 安徽亳州人, 研究生, 主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: duan7354@163.com

导师简介: 张天舒 (1977 -), 吉林长春人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光雷达技术与红外光谱技术大气成分探测方面的研究。

E-mail: tszhang@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2021-10-08; 修改日期: 2021-11-23

*通信作者。E-mail: ysdong@aiofm.ac.cn

stability of the resonator. By measuring the power stability of the laser under different working conditions such as high temperature, low temperature and vibration, it is proved that the laser has high environmental adaptability. It is demonstrated that based on air-cooled heat dissipation, the laser can achieve stable operation of the whole machine in the temperature range from $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ and under the condition of road spectrum vibration. Under the pump power of 8.31 W and acousto-optic Q-switched mode, a 532 nm green light output with pulse width of 7 ns, repetition frequency of 4 kHz, average power of 0.95 W and single pulse energy of 0.24 mJ is obtained, meeting the application requirements of mobile lidar.

Key words: laser techniques; pattern matching; intracavity frequency doubling; acousto-optic Q modulation; wide temperature range

0 引言

全固态激光器因具有光束质量好、维护方便等优点而广泛应用于大气环境监测、激光光谱学、激光远程探测等相关领域^[1-6]。近年来,用于大气环境监测的车载激光雷达已成为研究热点之一。车载激光雷达主要工作在振动、温差较大的特殊环境中,为了提高探测精度,对其核心部件激光发射源提出了更高的要求,不仅要满足车载等各种复杂环境下对激光器的体积、重量、功率、重复频率等方面的要求,还要提高激光器的稳定性、可靠性和环境适用性。因此在满足一定功率的前提下,实现激光器在宽温度范围内和振动条件下的稳定工作有重要的意义,也是激光器能否实现工程转化并成功投入实际应用的一项重要指标。

2011年,华中科技大学的Tang^[7]在端面泵浦条件下采用水冷冷却得到重复频率为40 kHz、脉冲宽度为35 ns、平均功率为1.81 W的脉冲绿光输出;2014年,西安电子科技大学的Jiang^[8]采用声光调Q开关和KTP晶体实现了调Q绿光输出,输出绿光功率约为9 W,倍频效率为46.1%;2017年,中国科学院上海光学精密机械研究所的Lu等^[9]设计了一种采用双程放大结构输出单脉冲能量为2.1 mJ的激光器,其在 $20\sim 36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内激光输出能量抖动量为5%;2018年,厦门大学的Chen^[10]利用双折射滤波片,在激光二极管(LD)泵浦功率为1.7 W时通过腔内倍频获得了42 mW的稳定单频绿光,激光线宽为69 MHz;2019年,Singh等^[11]采用双泵浦增益模块和腔内倍频LBO晶体得到了重复频率为18 kHz、平均功率为260 W的高稳定性绿光,连续5 h功率波动为 $\pm 0.83\text{ W}$ 。

国内外对全固态绿光波段激光器的研究工作有很多,主要集中在平均输出功率、重复频率、转化效率、稳定性等方面,而在激光器宽温工作方面的研究较少。部分实现激光器宽温度范围工作的报道在实验时没有改变激光器整体所处的环境温度,只是改变了泵浦源的温度,而用于车载激光雷达的激光器必须要实现整机在宽的温度范围内和强振动环境下稳定工作。本文报道的激光器采用半导体制冷器(TEC)和风扇进行散热,激光器整机可在 $-10\sim 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度内和公路谱振动条件下稳定工作,且此激光器结构紧凑、可靠性高,适用于车载激光雷达特殊的工作环境中。

1 实验装置与分析设计

1.1 实验装置

使用LD端面泵浦的Nd:YAG晶体得到1064 nm红外光,再用LBO晶体进行腔内倍频得到532 nm可见

光波段绿光。实验采用Nd:YAG键合晶体,Nd的掺杂浓度(原子数分数)为0.6%,晶体尺寸为3 mm×3 mm×18 mm,键合Nd:YAG晶体未掺杂部分不吸收泵浦光,长度为2 mm,能有效降低端面的热透镜效应。同时用铝箔包裹激光晶体,保证晶体与热沉充分接触,从而增加晶体的散热^[12]。倍频晶体为I类相位匹配的LBO晶体,晶体尺寸为3 mm×3 mm×10 mm。LD、激光晶体、倍频晶体分别安装在各自的热沉上,再利用TEC控制温度。为了使激光器结构更加紧凑,谐振腔采用三镜折叠腔结构。与直行腔结构相比,折叠腔结构可以缩短激光器的长度,具有有效空间大、模参数调整灵活、在腔内倍频时易实现双向倍频单向输出、倍频转换效率高等优点,符合设计要求。腔内插入布氏片以改变偏振状态,提高倍频效率。激光器由LD模块、光束整形聚焦镜、声光调制器、折返镜、倍频晶体LBO及输出耦合镜等组成,实验装置如图1所示。其中,L1和L2为聚焦镜;S1和S2为棱镜对;AOM为声光调制器;BP为布氏片;M1为平面镜,表面镀有808 nm增透膜和1064 nm全反膜,作为激光器的后腔镜;M3为前腔镜,表面镀有532 nm全反膜和1064 nm全反膜;M2表面镀有1064 nm全反膜,耦合输出532 nm绿光。

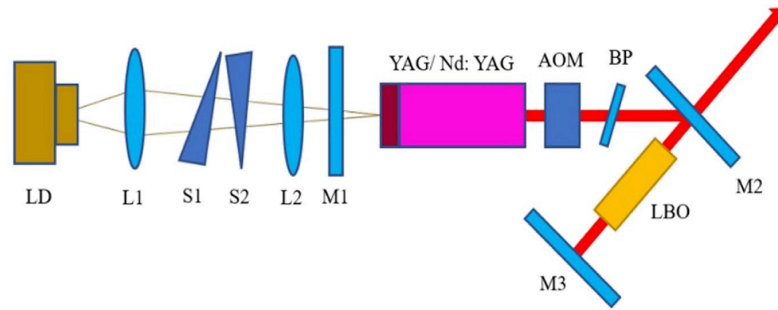


图1 LD泵浦Nd:YAG/LBO腔内倍频绿光激光器光路图

Fig. 1 Optical path diagram of LD pumped Nd:YAG/LBO intracavity frequency doubling green laser

1.2 分析设计

保持泵浦源的输出稳定,降低谐振腔的热透镜效应可在一定程度上实现端泵结构激光器的宽温运行效果^[13]。Nd:YAG激光晶体的吸收带范围为790~810 nm,泵浦源选择波长为808 nm的LD,其激光发射谱很窄,与激光晶体的吸收带能实现较好的匹配。LD发射中心波长随工作环境温度变化会发生温漂,约为0.28 nm/°C。采用TEC对LD进行精密温控,调节精度为0.1 °C,在工作环境温度变化时保持泵浦光的输出稳定。LD端面泵浦热透镜焦距与泵浦平均功率的关系可表示为

$$f = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{\eta P_{in} (dn/dT)} \frac{1}{1 - \exp(-\alpha L)}, \quad (1)$$

式中: dn/dT 为热光系数, K_c 为激光晶体的热导率, α 为增益介质对泵浦光的吸收系数, P_{in} 为泵浦光功率, L 为增益介质的长度, ω_p 为泵浦光束半径, η 为增益介质内转化为热所耗散的功率占吸收泵浦功率的比例。

用软件模拟得到LD端面泵浦热透镜焦距和泵浦平均功率的关系,如图2所示。由图可知,热透镜焦距随着泵浦功率的增加先迅速减小再缓慢减小,减少泵浦功率可以降低热透镜效应,获得光束质量较好的激光输出,但是脉冲能量也随之降低,因此要选择合适的泵浦功率。本研究感兴趣的泵浦功率范围为0~9 W,当泵浦功率为9 W时,对应激光晶体的热透镜焦距在200 mm左右,当泵浦功率在±1 W左右波动时,焦距变化的范围不超过50 mm。

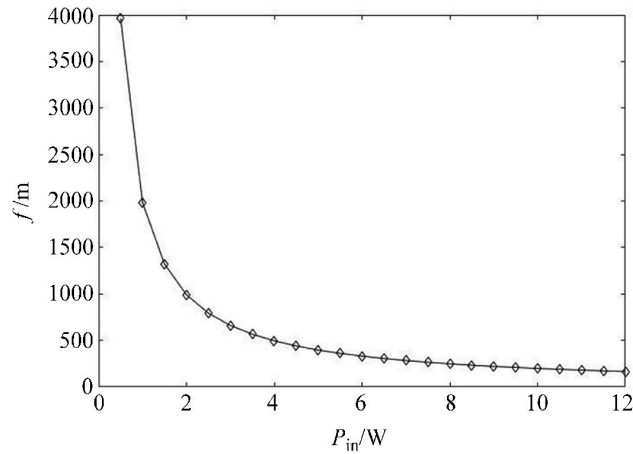


图2 热透镜焦距随泵浦功率的变化

Fig. 2 Focal length of the thermal lens versus pump power

采用傍轴近似, 通过 $ABCD$ 传输矩阵理论对谐振腔进行计算和分析。在端面泵浦时, 激光晶体可看作一个焦距为 f 的热透镜, 假设热透镜中心在激光晶体的中心^[14], 以激光晶体为参考面, 激光在腔内往返一次的传输矩阵可表示为

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_4/n_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_6 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\
 &\begin{bmatrix} 1 & L_7/n_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_8 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_7/n_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_6 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_5 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \\
 &\begin{bmatrix} 1 & L_4/n_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

图3给出了模拟得到的增益介质内光斑半径与光焦度的关系, 由图可知, 在进行谐振腔设计时选择曲线最平稳点对应的光焦度, 在谐振腔的热透镜焦距发生一定变化时, 仍然可以保持谐振腔对焦距和对准的扰动不灵敏, 此折叠腔可允许的热透镜焦距的变化范围为 $125 \text{ mm} \sim \infty$ 。在这个范围内, 热透镜效应产生的球差较少, 激光晶体内模体积对热聚焦扰动不灵敏, 即一定的泵浦功率扰动不会影响激光器的正常工作^[15]。

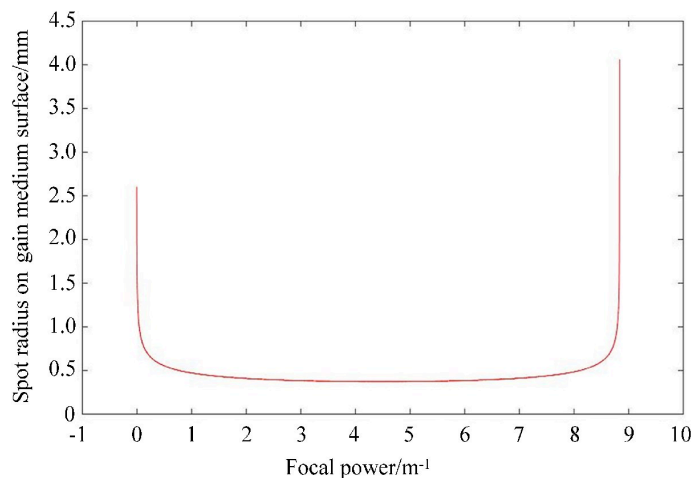


图3 增益介质的光斑半径与光焦度关系

Fig. 3 Relationship between spot radius and focal value of gain medium

当激光晶体内的泵浦光与振荡光达到最佳的模式匹配时可以有效降低谐振腔的热透镜效应。模式匹配从频域和空间两个方面来讨论: 频域上的匹配即泵浦源的发射峰与激光晶体的吸收峰尽可能匹配, 从而达到在光谱上充分吸收泵浦光的目的; 空间上的匹配是指泵浦光斑半径与振荡光斑半径存在一个最佳比例。一般来说, 当振荡光斑略小于泵浦光斑时有利于提高泵浦光的利用率并缓解工作物质的热透镜效应, 通过设计使其达到最佳比例, 从而充分吸收泵浦光能量^[16]。由图3可知, 当光焦度为 5 m^{-1} 时, 其所对应的激光晶体端面上的光斑半径符合要求, 此时光斑半径为 0.35 mm 。当激光晶体内振荡光斑半径与泵浦光斑半径达到最佳的模式匹配时, 可以得到理想的泵浦光斑半径为 0.44 mm 。

泵浦源采用西安炬光科技的最大输出功率为 10 W 的 808 nm 单管半导体激光器。快轴发散角为 30° , 慢轴发散角为 8° , 出射光斑为 $120\text{ }\mu\text{m} \times 230\text{ }\mu\text{m}$ 的类矩形。采用耦合透镜组对泵浦光进行整形准直, 耦合透镜组由棱镜对和两个聚焦镜组成, 通过耦合透镜组将泵浦光聚焦为圆形光斑并通过激光晶体的中心。用ZEMAX光学仿真软件对耦合透镜组进行仿真设计, 使得泵浦在晶体端面处的光斑半径为 0.44 mm 。用ZEMAX模拟的光束传播示意图如图4所示。

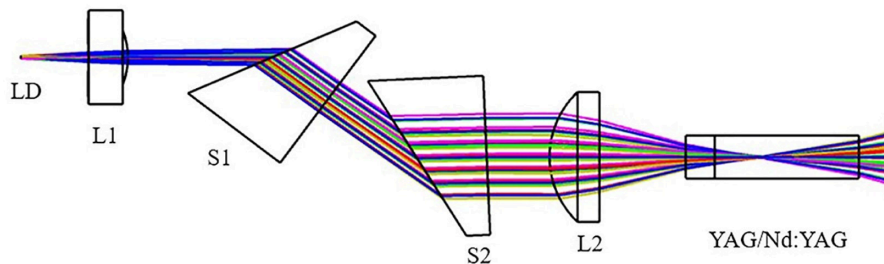


图4 光线传播示意图

Fig. 4 Diagram of light propagation

2 工艺测试试验

为了提高谐振腔的稳定性, 最终满足激光器高环境适应性的要求, 在工艺方面分别进行了谐振腔的胶水稳定性测试和局部温控测试试验, 并用ANSYS软件中的热分析模块对组件进行了热仿真模拟。

2.1 谐振腔稳定性测试

为了使激光器满足高低温和振动的应用需求, 进行了谐振腔的工艺测试。通过定量测试前腔镜和后腔镜之间的相对位置变化, 来验证胶水及镜片固定方式是否满足实验要求。具体实验为: 在一段距离上分别固定前腔镜和后腔镜, 记录点胶固化后镜片相对差值, 在进行高低温测试后再次记录读数。由读数结果可知, 谐振腔前后腔镜水平相对变化 $12''$, 俯仰相对变化 $10''$ 。测试结果显示胶水形变影响在可控范围内, 此胶水及镜片固定方式满足实验要求。

2.2 局部温控测试试验

在激光器腔内采用TEC制冷技术对LD、激光晶体、倍频晶体进行精确温控, 以满足应用需求。合理的TEC选型才能提高激光器的温控效果, 从而提高谐振腔的稳定性。激光晶体的发热量 Q 约为 5.1 W , 工作温度为 $-10\sim 55^\circ\text{C}$ 。考虑到制冷效率和工作环境温度, 选择制冷量为 15 W 的TEC对晶体进行温控。对LD的发热量和控温LD的TEC散热功率进行计算, 选择制冷量为 100 W 的TEC对LD进行温控。激光器实验中的主要热源是LD, 用相同发热量的电阻模拟LD进行局部温控测试实验。将TEC冷面温度设置为热源

的工作温度, 选取热沉面和翅片上的多个测试点测试其温度。LD 工作温度控制在 25 °C, 当环境温度为 55 °C 时, TEC 热面 (与翅片接触面) 温度约为 63.5 °C; 当环境温度为 -10 °C 时, TEC 热面 (与翅片接触面) 温度约为 0 °C。实验数据说明热量可及时耗散, 热源可正常工作, TEC 选型满足要求。

为了验证实验数据的合理及准确性, 使用 ANSYS 软件的热分析模块对组件进行了热仿真模拟, 结果如图 5 所示, 由图可知, 在环境温度为高温 55 °C 时, 热沉面和翅片上温度与实验中测试点温度匹配, TEC 温控精确, 选型合适。

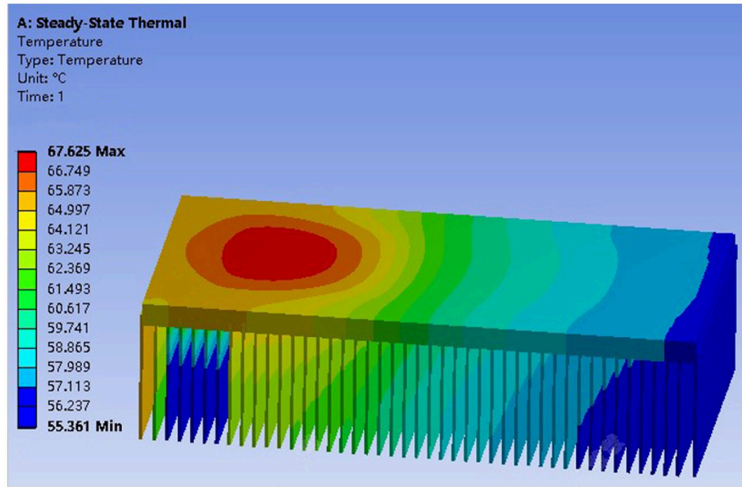


图 5 环境温度 55 °C 时热仿真模拟图

Fig. 5 Thermal simulation diagram at ambient temperature of 55 °C

3 实验结果及分析

实验中改变泵浦电流, 在室温环境下 (25 °C) 测量不同电流下激光器的输出功率, 如图 6 所示。由图 6 可见: 输出功率随泵浦电流的增加而增加, 在输入电流为 9 A、泵浦功率为 8.31 W 时, 获得了平均功率为 0.95 W 的 532 nm 脉冲输出。在 9 A 电流下对激光器进行了一周连续功率测量, 结果显示输出功率可以保持很好的稳定性, 功率波动低于 5 %。其中, 激光器连续 2 h 的输出功率如图 7 所示。

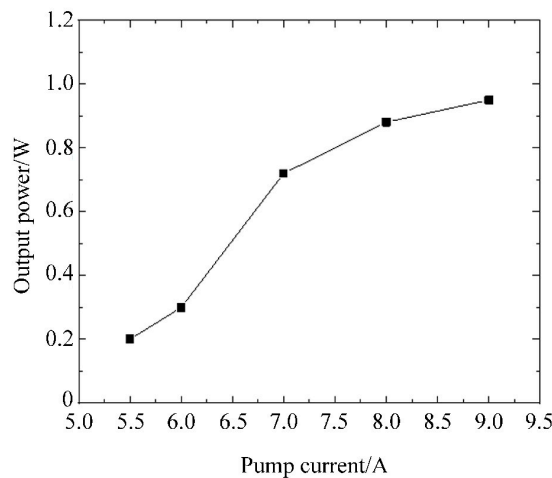


图 6 输出功率随泵浦电流变化

Fig. 6 Output power versus pump current

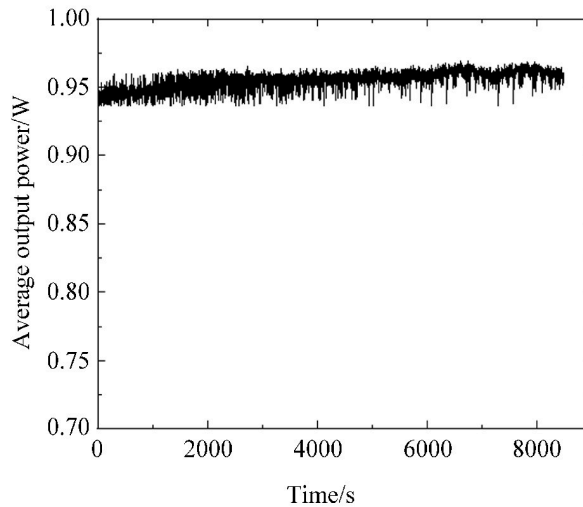


图7 9 A 电流下激光输出功率变化

Fig. 7 Variation of laser output power under 9 A current

图8为输出激光的中心波长图, 如图所示, 输出的532 nm激光中心波长为532.24 nm, 测量得到激光的脉冲宽度为7 ns, 频率为4 kHz。对输出的绿光光斑进行测量得到X轴的发散角为1.758 mrad, Y轴的发散角为1.418 mrad。用BeamSquared M^2 分析仪测量激光光束质量, 测量得到激光光束质量因子在x、y方向分别为1.375、1.312, 如图9所示, 内图为分析仪探测得到光束近场光斑强度分布情况, 由图可知, 光束质量很高, 近场光斑为圆形, 对称性很好。

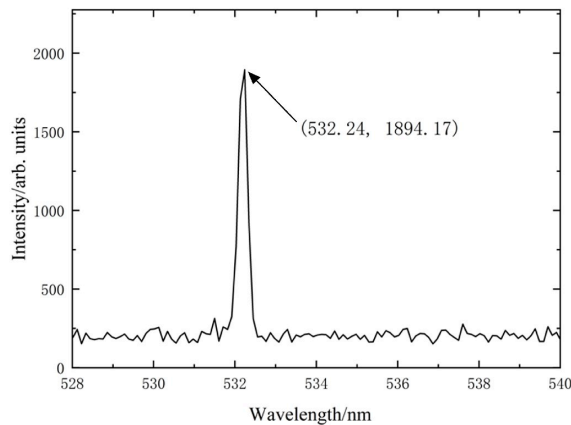


图8 输出激光的中心波长图

Fig. 8 Central wavelength diagram of output laser

本研究报道的激光器是把整个激光器放在高温、低温环境下进行测试。首先在激光器断电状态下对其进行高低温储存, 在断电状态下, 激光器测试前后的输出功率保持稳定且无波动。接着测试激光器在出光状态下的稳定性, 同样在-10、35、45、55 °C环境温度下分别进行了2 h的恒温稳定性测试并记录测试数据。测试前后检查激光器的工作情况, 各个温度测试点下532 nm激光输出功率变化曲线如图10所示, 内图为功率局部放大图。由图可知, 单温度测试点下激光器输出功率波动低于1%, 整体功率波动低于5%。同时, LD、激光晶体、倍频晶体、底板的温度也均控制稳定, 放置一段时间后再次进行功率测量, 激光器输出功率回升到初始值。因此, 激光器实现了整机在-10~55 °C温度范围内稳定工作。

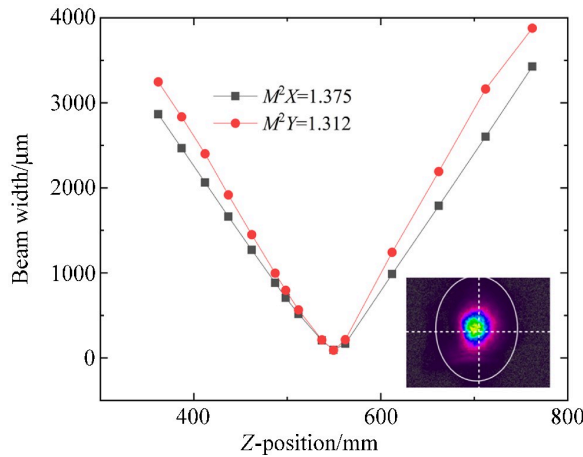


图9 输出光束质量和近场光斑

Fig. 9 Output beam quality and near-field beam profile of laser oscillator

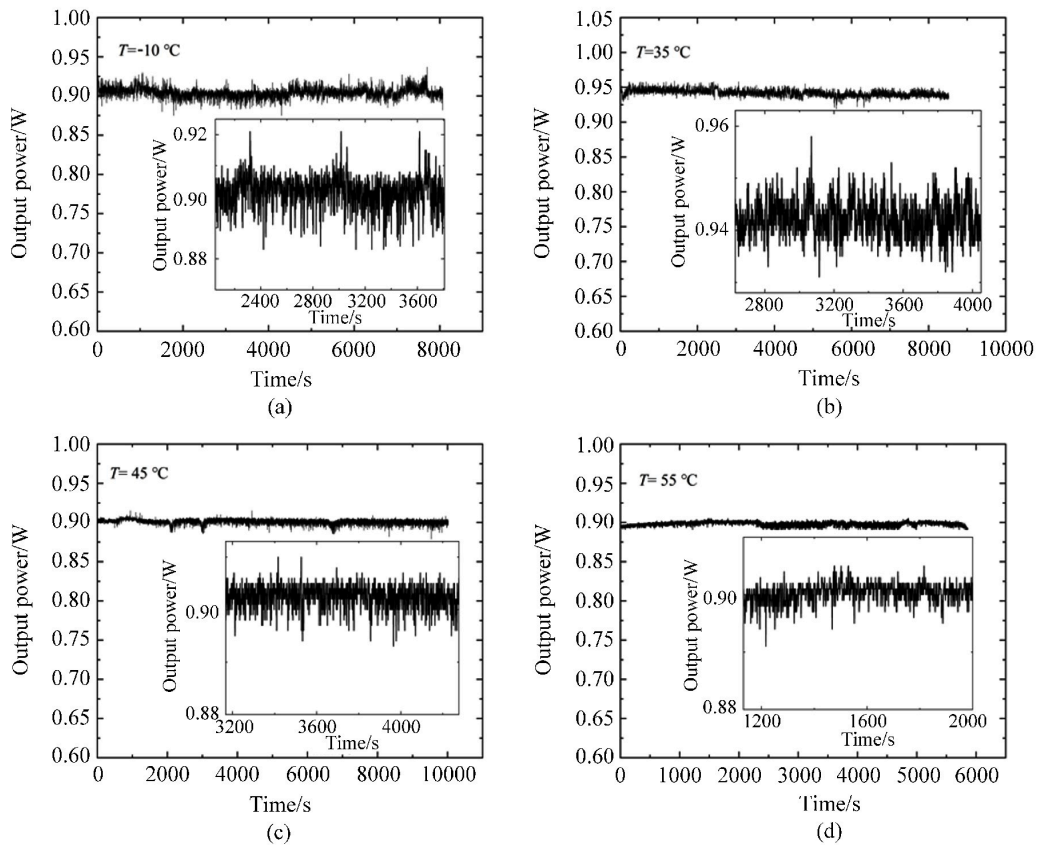


图 10 不同温度测试点下输出功率稳定性曲线。(a) -10 °C; (b) 35 °C; (c) 45 °C; (d) 55 °C

Fig. 10 Output power stability curve at different temperature test points. (a) -10 °C; (b) 35 °C; (c) 45 °C; (d) 55 °C

最后在振动实验台上对激光器进行了定频振动和扫频振动测试。定频振动测试在 100 Hz 频率下分别进行垂直定频、水平定频和纵向定频测试各 30 min; 扫频振动测试频率设置为在 10~200 Hz 之间变化, 进行了垂直扫频、水平扫频、纵向扫频三组测试各 30 min, 振动测试总测试时间为 3 h。测试结束后, 进行了连续 8 h 的激光功率测量, 激光器平均功率无变化, 8 h 功率波动低于 1%, 保持稳定输出。测试结果显示激光器符合公路谱的振动标准 (GB/T4857.23), 满足车载激光雷达对激光光源的需求。

4 结 论

设计了一台高重频、紧凑、高环境适应性的LD端面泵浦Nd:YAG全固态激光器。在泵浦电流为9 A、风冷散热条件下,得到了重复频率为4 kHz、单脉冲能量为0.24 mJ、平均功率为0.95 W、脉冲宽度为7 ns的532 nm激光输出。实验测得光束质量因子在 x 、 y 方向分别为1.375、1.312,光-光转化效率为11.4%。测量了激光器在高低温和振动条件下的工作情况,并给出了详细的测试结果说明。激光器在室温环境下输出功率为0.95 W,在测试点高温45 °C、55 °C和低温-10 °C下,输出功率略有波动,但仍然可以保持很好的稳定性,并且在放置一段时间后,激光器输出功率回升到初始值。激光器运转可靠,实现了稳定工作在-10~55 °C范围内和公路谱振动条件下,满足车载雷达特殊的工作环境需求,为激光雷达进行大气环境监测提供了稳定可靠的激光光源。

参考文献:

- [1] Yang B D, Xing Z Q, Chen D L, *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.
- [2] Zhou X Y, Wang J S, Liang X, *et al.* 126 W high-stability acousto-optical Q-switched 532 nm laser based on LiB₃O₅ crystal intracavity frequency-doubling [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 051401.
周旭阳, 王劲松, 梁旭, 等. 基于LiB₃O₅晶体腔内倍频的126 W高稳定性532 nm声光调Q激光器 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 051401.
- [3] Kornev A F, Balmashnov R V, Viktorov E A, *et al.* High-energy high-power near-diffraction-limited 1064 and 532 nm picosecond Nd:YAG laser [J]. *Electronics Letters*, 2020, 56(7): 339-342.
- [4] Song C, Li D, Yang H, *et al.* High efficiency high beam quality 1064 nm and 532 nm dual-wavelength laser switched by a quartz crystal [J]. *Optics Communications*, 2021, 478: 126378.
- [5] Liu Y Q. *Study on Output Characteristics and Thermal Effect of End-pumped Nd:YAG Pulsed Laser* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.
刘宇乾. 端面泵浦Nd:YAG脉冲激光器输出特性与热效应研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- [6] Cheng Y, Zhang Z, Hua D X, *et al.* Research progress of NO₂ differential absorption lidar technology [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2021, 38(5): 580-592.
成远, 张振, 华灯鑫, 等. NO₂差分吸收激光雷达技术研究进展 [J]. 量子电子学报, 2021, 38(5): 580-592.
- [7] Tang X X. *Study on LD End-pumped All-solid 532 nm Pulse Laser* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
汤泉雄. LD端面泵浦全固态532 nm脉冲激光器的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [8] Jiang Z J. *LD Side Pumped Active Q-Switching and Passive Mode-locking Laser* [D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
姜照军. LD侧面泵浦主动调Q及被动锁模激光器 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [9] Lu S W, Meng J, Zhao X Q, *et al.* Temperature insensitive Nd:GdVO₄ laser with high peak power and narrow pulse width [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0401009.
鲁绍文, 孟洁, 赵学强, 等. 高峰值功率窄脉宽宽温Nd:GdVO₄激光器 [J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401009.

- [10] Chen S. *Experimental Study on Miniaturized All-solid-state Single-frequency Green/Blue Laser* [D]. Xiamen: Xiamen University, 2018.
陈硕. 小型化全固态单频绿/蓝光激光器实验研究 [D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- [11] Singh A, Sharma S K, Mukhopadhyay P K, *et al.* 260 W of average green beam generation by intracavity frequency-doubled acousto-optic Q-Switched Nd: YAG laser [J]. *Journal of Optics*, 2019, 48(4): 512-519.
- [12] Gong L Y. *Study on LD End-pumped Multi-segment Bonded Tm: YAG Solid-state Laser* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
龚亮宇. LD端面抽运多段键合Tm: YAG固体激光器研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [13] Bai J R, Liu Y, Zhong C Y, *et al.* Narrow pulse width lasers operating over wide range of low temperature [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0101004.
白家荣, 刘源, 钟朝阳, 等. 可低温工作的窄脉冲宽温激光器 [J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0101004.
- [14] Peng Q Q, Yang F, Liu J, *et al.* Diode-pumped Nd: YVO₄ 1.34 μm laser and its thermal lens effect [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, 23(1): 42-45.
彭倩倩, 杨峰, 刘杰, 等. LD抽运Nd: YVO₄ 1.34 μm激光器及其热效应研究 [J]. 量子电子学报, 2006, 23(1): 42-45.
- [15] Chen S. *Study on the Influence of Thermal Lens Effect on the Dynamic Stabilization Region of Resonator* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
陈思. 激光晶体热透镜效应对谐振腔动力稳定区影响研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.
- [16] Zhao S Y. *Study on All-solid-state High Power 946 nm Nd: YAG Laser and 473 nm Watt Laser* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
赵士勇. 全固态高功率946 nm Nd: YAG激光器及瓦级473 nm激光器的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2004.