网络首发：

标题：基于双共振自适应锁定的高功率355 nm激光器
作者：张志林,尹瑞玺,曹雪辰,秦际良,靳丕钰,卢华东
收稿日期：2026-03-03
录用日期：2026-03-24
DOI：10.3788/CJL260597

引用格式：
张志林,尹瑞玺,曹雪辰,秦际良,靳丕钰,卢华东. 基于双共振自适应锁定的高功率355 nm激光器[J].中国激光,2027,54(05):0501001.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别，请以正式出版文件为准！

您感兴趣的其他相关论文：

增材制造复杂异质金属材料的研究进展（特邀）
尤林峰 张晓龙 刘天舒 谭超林
苏州大学金属材料与先进制造学院，江苏 苏州 215000
中国激光,2026,53(8):0802303

激光定向能量沉积制备2195铝锂合金构件成形与组织性能研究
王晨 雷正龙 李旭东 张新瑞 李延康 赵宝
哈尔滨工业大学材料结构精密焊接与连接全国重点实验室，黑龙江 哈尔滨 150001
中国激光,2026,53(8):0802304

激光粉末床熔融成形TA15合金薄壁结构高温持久性能研究
王海韬 王源晨 陈玮 万宏远 张智博 宋竹满 张广平
中国科学技术大学材料科学与工程学院，辽宁 沈阳 110016
中国激光,2026,53(8):0802302

不同沉积顺序的TC4-TA15异质界面拉伸磨损性能分析
李鹏飞 王赛兰 李亮亮 吴嘉诚 沈毅鸣 刘丽萍
江苏大学机械工程学院，江苏 镇江 212013
中国激光,2026,53(8):0802301

实验实现频差9.2 GHz两束光在同一腔中的双共振与空间分离
马荣 李媛 冯景亮 张俊香
山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室， 山西 太原 030006
中国激光,2014,41(4):0418001

基于双共振自适应锁定的高功率 355 nm 激光器

张志林[1]，尹瑞玺[1]，曹雪辰[1]，秦际良[1,2*]，靳丕锖[1,2]，卢华东[1,2]
[1]山西大学光电研究所光量子技术与器件全国重点实验室，山西 太原 030006；
[2]山西大学极端光学协同创新中心，山西 太原 030006

摘 要 高功率单频连续波 355 nm 紫外激光在精密加工、科学研究等领域具有重要应用价值。本研究针对基于双共振和频技术的 355 nm 激光系统中存在的稳定性挑战，提出并实现了一种融合腔长快速锁定与晶体温度自适应匹配的协同控制方法。该系统通过偏振锁定技术实时反馈调节谐振腔腔长，实现 532 nm 激光的快速锁定；同时控制晶体温度动态补偿 1064 nm 激光的腔长匹配，从而实现双波长同步共振。实验结果表明，该系统可长期稳定输出功率高达 5 W 的单频 355 nm 激光，2 小时内功率波动小于±2.9%。系统具备实时失锁检测与自动恢复功能，有效抑制了环境温度漂移、机械振动等扰动引起的功率波动与失锁问题，显著提升了高功率连续波紫外激光器的长期运行稳定性与智能化水平。

关键词 355nm 紫外激光；双共振；自动锁定；温度自适应
中图分类号 TN248.1 **文献标志码** A

1 引 言

单频连续波 355 nm 紫外激光具有波长短[1]、易聚焦、能量集中、分辨率高等突出优势[2]，在工业制造、航空航天[3]、光刻技术、生物医疗[4]以及半导体器件等前沿领域具有重要的应用价值[5]。其中，利用 1064 nm 和 532 nm 两束基频光在谐振腔内实现双共振和频，是产生连续波 355 nm 紫外激光的关键技术路径。

自 20 世纪 90 年代以来，该技术路线逐步发展。1995 年，Kaneda 等人首次采用外腔双共振和频实现了连续波 355 nm 激光输出[6]。1997 年，该团队通过优化腔结构将输出功率提升至 660 mW[7]。此后，研究者们陆续提出了 LD 端面泵浦结合腔内倍频/和频、双激光器外腔合束和频等方案，但由于基频光功率、非线性转换效率及系统稳定性等因素限制，输出功率长期停留在百毫瓦量级[8-11]。2006 年，Aubert 等基于二极管泵浦与内腔三倍频技术，实现了 20 mW 低噪声单频连续波 355 nm 紫外输出[12]。2010 年，Jarrett 等基于 DPSS 侧面泵浦与内腔三倍频技术，实现了 200 mW 低噪声连续波 355 nm 紫外输出[13]。2020 年，Hsu 等人采用两块 PPLN 晶体级联结构，通过聚焦优化实现了大于 100 mW 的连续波 355 nm 紫外激光

基金项目：国家重点研发项目（2022YFC2204003）、国家自然科学基金(62405170、62575163)
通信作者：* qinjl@sxu.edu.cn；

输出[14]。2024 年，本课题组基于频率关联双波长泵浦源与色散补偿谐振腔，实现了 4.2 W 的 355 nm 激光输出，转换效率达 20.5%[15]。

然而，双共振系统在实际运行中仍然面临严峻的稳定性挑战：环境温度漂移、机械振动等因素易引起谐振腔失调，进而引起共振失锁并造成输出功率波动[16-17]。尤其在高功率下，晶体对 355 nm 激光的吸收会引发内部温度梯度，导致相位匹配温度发生漂移，从而改变谐振腔的有效腔长[18-20]。当热致腔长变化超出压电陶瓷（PZT）的调节范围时，将造成 532 nm 激光失锁，355 nm 激光也随之消失，晶体温度则快速回落，形成失锁—温降—难以复锁的恶性循环[21]。现有系统通常缺乏快速自主的失锁恢复机制，多依赖人工干预重新锁定[22-25]，难以满足高功率长期稳定运行的需求。

为此，本文提出并实现了一种融合腔长自动锁定与晶体温度自适应匹配的双共振协同控制方法，该方法具备实时失锁检测与自动恢复功能，可在失锁后迅速重建双共振状态。并基于该方法，研制了一套全固态单频 355 nm 紫外激光自动锁定系统，实现了 5 W 长期稳定输出，为高功率连续波紫外激光的可靠运行提供了有效的技术途径。

2 355 nm 单频紫外激光器的双共振自适应锁定系统设计

实验所设计的 355 nm 单频紫外激光器双共振锁定系统的光路图如图 1 所示。采用自主研发的 1064 nm/532 nm 激光器作为泵浦源激光器，其中 1064 nm、532 nm 激光功率均为 11w、偏振方向均为 p 偏，输出激光入射至四镜环形和频腔，该和频腔由两个平面镜（M2、M3）与两个曲率半径 100 mm 的平凹镜（M4、M5）构成。M2 在 1064 nm、532 nm 波长处均镀部分反射膜，反射率均为 90%；M3、M4 在 1064 nm 与 532 nm 处镀高反膜，其中 M3 安装于压电陶瓷（PZT）上，用于腔长的调节；M6 在 1064 nm、532 nm 处镀高透膜，在 355 nm 处镀高反膜，作为 355 nm 紫外激光的输出端。分别在和频腔内 M4 与 M5 之间放置和频晶体 LBO1，切割角度为$\theta = 90°$，$\varphi = 37°$，M2 与 M3 之间放置热光系数对不同波长存在差异的 LBO2 晶体，切割角度为$\theta = 90°$，$\varphi = 11.3°$。其中，和频晶体 LBO1 用于 532 nm 和 1064 nm 光和频产生 355 nm 光，而共振晶体 LBO2 用于补偿腔内 1064 nm 和 532 nm 光的色散差实现色散补偿。

和频腔中经 M2 输出的 532 nm 激光，通过四分之一玻片（QWP）在偏振分束器（PBS）上分成两束，分别入射至差分探测器（BHD）的两个探测通道，所探测到的信号经内部减法运算后输出误差信号，由 ADC3 进行采集后用于锁定。与此同时，532 nm 与 1064 nm 激

光经腔镜 M10 透射后分路传输，其中 532 nm 激光入射至光电探测器 PD1，1064 nm 激光经 M11 反射后入射至光电探测器 PD2；

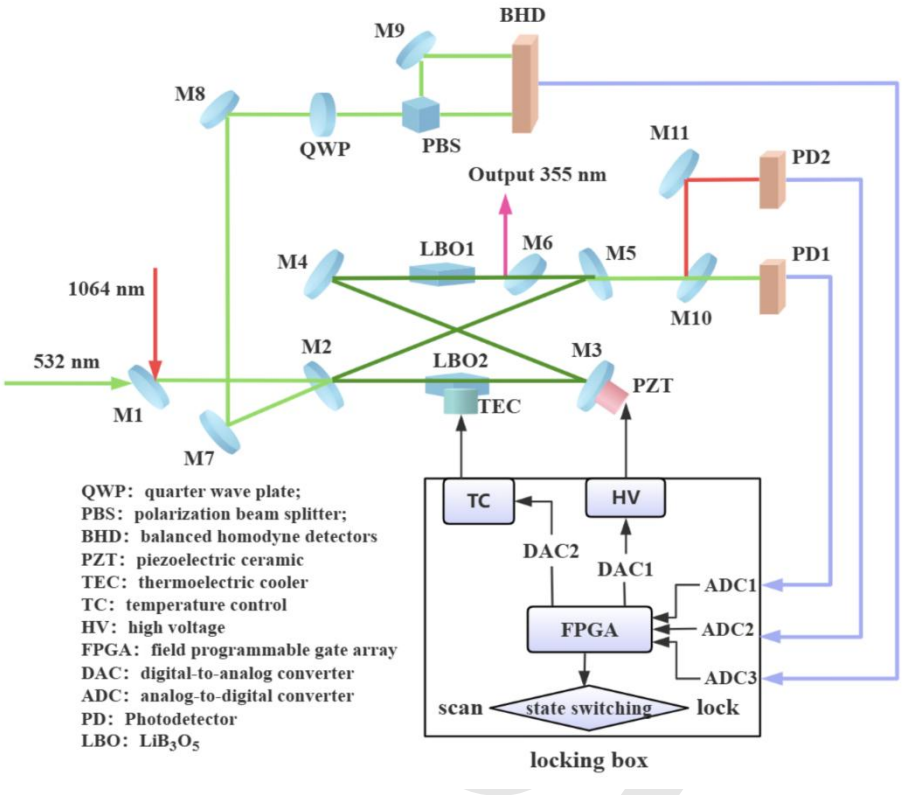

图 1 双共振锁定系统实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of the dual-resonance locking system

基于上述实验装置，首先将 LBO1 晶体设定为最佳匹配温度，因为如果改变其温度就会极大地影响和频效率，而为了获得稳定的 355 nm 紫外激光输出，需要实现 1064 nm、532 nm 光双共振。其次，由于光在谐振腔内穿过了晶体、空气、分光镜产生了色散，使得 1064 nm、532 nm 光间存在色散，所以需要通过调控 LBO2 晶体温度来补偿色散，而为了实现双共振，LBO2 的色散补偿范围必须大于一个 532nm 光的自由光谱区。由于 532 nm 波长比 1064 nm 波长短，且在腔内高功率谐振时具有一定的热透镜效应，因此 532 nm 激光锁定需要相对较快的反馈系统；另一方面，由于我们采用的是双波长激光器，532 nm 激光完全由部分 1064 nm 激光倍频得到，两波长激光的频率关联极强，因此在 532 nm 激光完成快反馈锁定后，1064 nm 激光仅用慢反馈也可实现良好锁定。此外，光在谐振腔内穿过了晶体、空气、分光镜产生了色散，因此锁定 1064 nm 光需进行色散补偿，而为了使 LBO2 实现色散补偿，其范围必须大于一个 532nm 光的自由光谱区。基于上述分析，本系统采用无调制的偏振锁定方法，通过 PZT 调控腔长，快速将谐振腔的腔长锁定在 532 nm 激光的共振频率处；随后通过调控 LBO2

晶体温度，使 1064 nm 激光同时在谐振腔内保持共振。在此基础上，基于 LBO1 晶体内的非线性和频效应，最终实现 355 nm 紫外激光输出。

为了进一步实现双共振的自动锁定，本研究提出了一种基于偏振自动锁定和温度自适应协同调控的双共振自动锁定控制方法。该控制系统分为扫描档与锁定档两种运行模式，扫描档主要由 14 位的数模转换器（DAC1）输出三角波扫描信号，通过 PZT 对谐振腔腔长进行扫描，可用于观测谐振腔模式和误差信号，如图 2 所示。其中曲线（i）为输出的三角波扫描信号，曲线（iii）为 BHD 测量的误差信号，曲线（iv）和曲线（ii）分别为 532 nm 和 1064 nm 透射输出信号。初始阶段切换至扫描档，为确保两波长激光在腔长调节范围内均存在可锁定点，需调节高压放大器增益，保障腔长扫描范围大于 1064 nm 激光波长，即扫描范围内能观测到两个 1064 nm 激光透射峰。随后，调节 LBO2 晶体温度，实时观察 1064 nm、532 nm 激光的透射峰状态，待 1064 nm 光与 532 nm 光透射峰接近重合时，可以切换至锁定档进行锁定，具体自动锁定过程与方法如下。

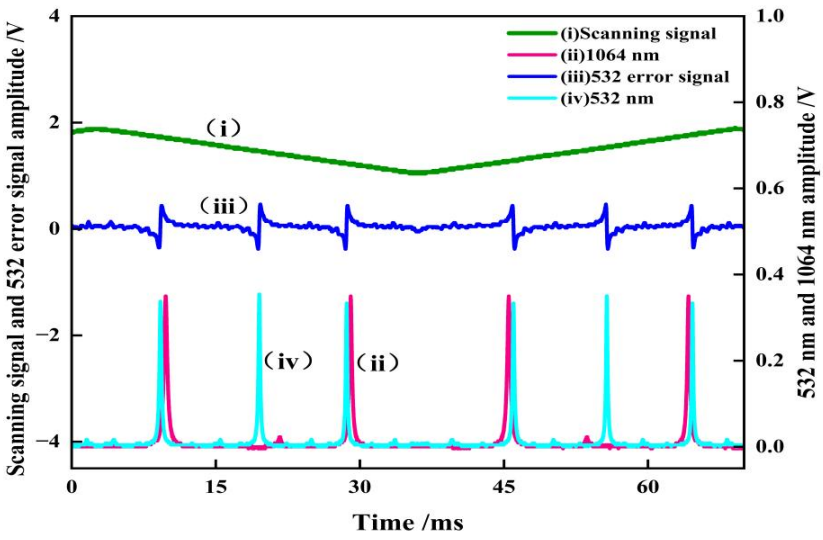

图 2 扫描档状态观测

Fig. 2 Scan mode state observation

首先对 532 nm 激光进行自动锁定，需要对误差信号的锁定基准和方向进行自动识别。在锁定档位下，系统通过 DAC1 输出从 0 到 16383 范围线性递增且时长约 0.1s 的单次输出信号，同时通过模数转换器 ADC1、ADC2、ADC3 分别实时记录 532 nm、1064 nm 激光的幅度和 532 nm 激光误差信号。通过比较幅度值大小，识别出两波长峰值并获得 532 nm 峰值对应的误差信号值，该值即为锁定基准值。同时，再根据基准附近的误差信号值随 DAC1 输出递增的单调性判断误差信号方向，若误差信号呈递增趋势，定义为：

$$\varepsilon(t) = Setpoint - V_{\text{adc3}}(t) \quad (1)$$

反之，则$\varepsilon(t)$取反，式中$V_{\text{adc3}}(t)$为误差信号当前 16 次采集的均值；*Setpoint* 为锁定基准值；$\varepsilon(t)$为误差偏差量。通过上述方法，即可完成误差信号锁定基准和方向的自动识别。

由于 1064 nm 波长是 532 nm 波长的两倍，因此在 1064 nm 激光的一个自由光谱区内，532 nm 激光存在两个共振点，其中一个共振点附近可同时满足 1064 nm 激光的共振条件，另一个共振点附近则无法实现 1064 nm 激光共振，所以需对锁定位置进行自动识别。鉴于扫描档时已通过调节温度使两波长透射峰相近，故可直接选取与两波长峰值所对应 DAC1 输出值相近的 532 nm 模式进行锁定。单次扫描完成后，DAC1 输出值将直接跳转至该 532 nm 模式峰值对应的数值，以此完成自动锁定位置的识别和跳转。跳转完成后，开始执行比例积分控制（PI）算法，其输出值经式（2）迭代计算得到。

$$\begin{aligned} I(t) &= \varepsilon(t) + 0.98*I(t_1) \\ V_{pi} &= P\times(\varepsilon(t) + \mathrm{k}I(t)) \end{aligned} \quad (2)$$

式中：$I(t)$为当前误差积分值；$I(t_1)$为前一时刻误差积分值；$\varepsilon(t)$为式（1）所得的误差偏差量；P为比例系数；k 为积分系数。P值大小根据误差信号在单次扫描时的斜率自动确定，k 值大小则根据扫描时误差信号的峰峰值自动确定。获得 PI 输出值后，将V_{pi}与前一时刻 DAC1 输出值$V_{d1}(t_1)$相加，得到 DAC1 的当前输出值$V_{d1}(t)$，如此循环迭代持续输出 DAC1，即可实现 532 nm 激光的自动锁定。

当 DAC1 输出到达最大值或最小值，或因外界振动导致系统失锁时，系统将通过识别 532 nm 激光的当前幅度值$V_{adc1}(t)$判断是否失锁，若该幅度值连续多次处于最小值，则判断为失锁状态；反之，则视为未失锁状态。在未失锁状态下，系统通过 PI 控制能迅速恢复到锁定状态。在敲击实验平台引入振动时，系统虽受扰动但仍处于未失锁状态，如图 3（b）所示，待振动消失后，可迅速恢复到锁定状态，如图 3（a）所示。如果系统失锁，将自动启动单次扫描流程完成重新锁定，从而实现系统的自恢复锁定功能。

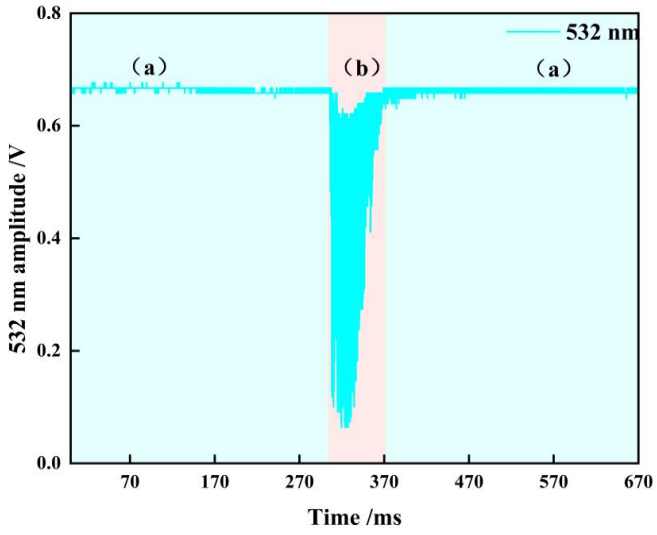

图 3 振动引起的快速自恢复锁定

Fig. 3 Fast self-recovering locking against vibration

当 532 nm 激光完成锁定后，系统开始执行基于温度自适应匹配的 1064 nm 激光锁定。首先通过 ADC2 采集 1064 nm 激光的当前幅度值 $V_{\mathrm{adc2}}(t)$，将其与 1064 nm 激光的峰值 V_{p2} 做差值运算，得到实时幅度偏差量 $\gamma(t)=V_{p2}-V_{adc2}(t)$，根据偏差量的大小，设定输出温度变化量 Ts，如式（3）所示。

$$Ts=\begin{cases} 0.5\ ^{\circ}C & \gamma(t)\geq V_{p2}/2 \\ 0.2\ ^{\circ}C & V_{p2}/2>\gamma(t)\geq V_{p2}/4 \\ 0.08\ ^{\circ}C & V_{p2}/4>\gamma(t)\geq V_{p2}/8 \\ 0.03\ ^{\circ}C & V_{p2}/8>\gamma(t)\geq V_{p2}/16 \\ 0^{\circ}C & \gamma(t)<V_{p2}/16 \end{cases} \tag{3}$$

式中 Ts 的各项值，均根据系统的控温速度优化所得，然后通过 DAC2 输出控制 LBO2 晶体温度 $T(t)=T(t_1)+\Delta T$，其中 $T(t_1)$ 为前一时刻温度输出值，$\Delta T=Ts$。由于晶体温度具有响应慢、热惯性大的特性，为了兼顾温度控制的速度与稳定性，经过实际测试验证，从温度控制信号输出到能够明显检测到晶体温度发生变化有 8s 左右延迟，所以系统需在温度输出后等待 8 s，再进行下一时刻幅度值 $V_{\mathrm{adc2}}(t)$ 采集。采集完成后，计算出当前幅度偏差 $\gamma(t)$，并与前一时刻幅度偏差 $\gamma(t_1)$ 进行比较，若 $\gamma(t)>\gamma(t_1)$，则令 $\Delta T=-Ts$；若 $\gamma(t)<\gamma(t_1)$，则令 $\Delta T=Ts$。随后根据公式 $T(t)=T(t_1)+\Delta T$ 更新当前温度输出值，并通过 DAC2 对晶体温度进行相应调节。如此循环迭代，系统可自动控制调节 LBO2 晶体温度，使 1064 nm 激

光逐步达到共振状态，完成温度自适应匹配锁定，整个锁定过程的流程图如图 4 所示。

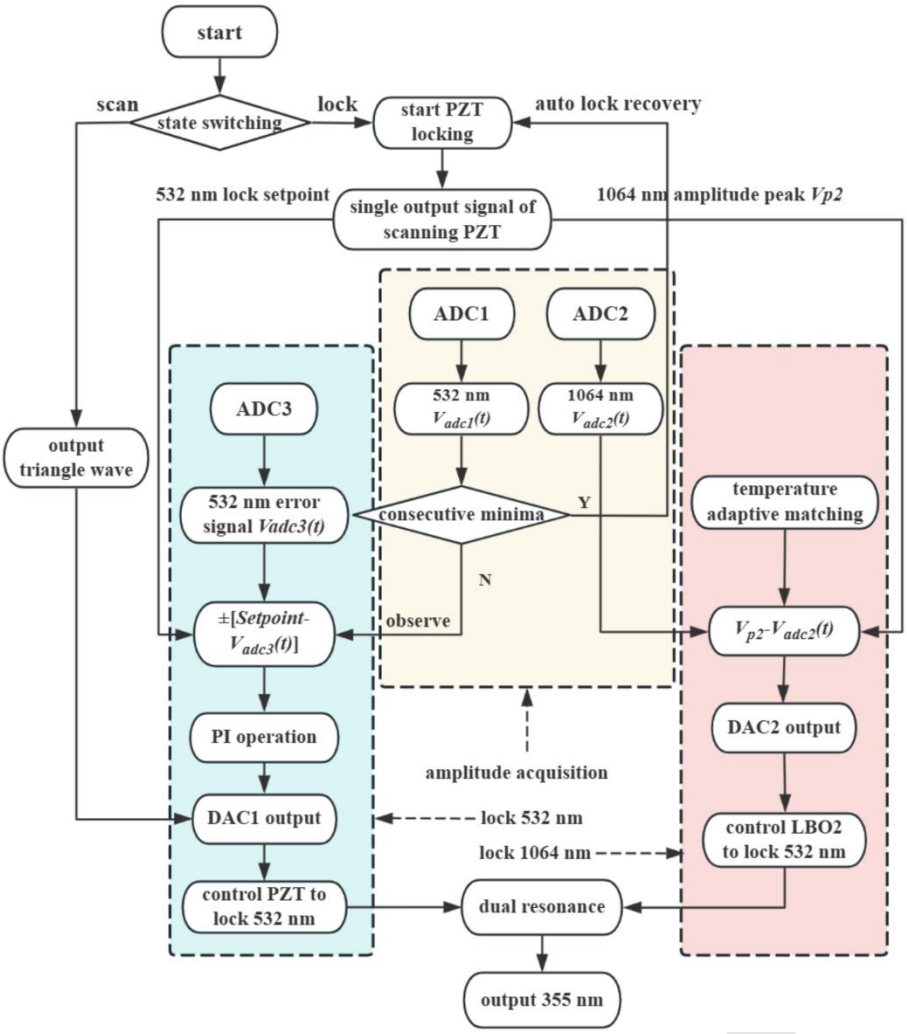

图 4 锁定控制程序逻辑流程图

Fig. 4 Lock control program logic flowchart

然而，随着 1064 nm 激光逐步达到共振状态，和频产生的 355 nm 激光功率逐渐增加，会使输出的 532 nm 和 1064 nm 激光功率降低，使$V_{\mathrm{adc2}}(t)$小于幅值基准值V_{p2}，导致温度波动较大。为此，当系统达到稳定状态后，将重新统计 20 次$V_{\mathrm{adc2}}(t)$的最大值作为幅值基准值V_{p2}，这一机制能有效降低稳定状态下的温度波动。此外，由于该方法具有温度自动修正的作用，也解决了晶体因吸收 355 nm 激光导致匹配温度漂移而引起的温度失配问题。为了展示温度自适应匹配变化过程，从温度锁定开始，记录了 200s 内晶体的实际温度，其变化趋势如图 5 所示。

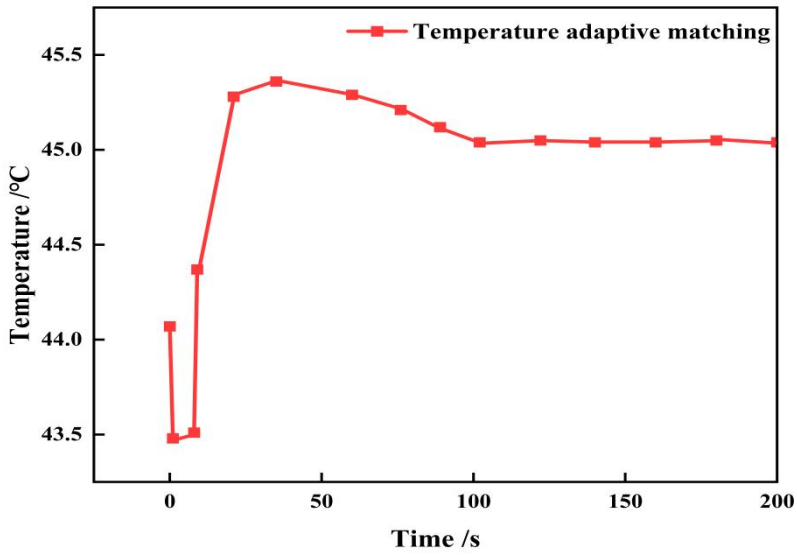

图 5 温度自适应匹配过程变化

Fig. 5 Temperature adaptive matching process variation

3 实验结果与分析

为了验证该自动锁定系统能否解决因腔内元件或环境温度漂移引起的双共振失锁问题，我们基于设计的双共振全固态单频连续波 355 nm 激光器及其自动锁定系统进行了测试。实验首先从锁定启动阶段开始，测试了和频腔腔长与输出激光状态的变化。由于探测器 PD1 和 PD2 的幅度值分别和输出的 532 nm、1064 nm 激光功率线性相关，因此通过示波器监测 PD1 和 PD2 两基频光功率的相对变化，同时利用光功率计测量 355 nm 激光的输出功率及其稳定性。而腔长主要由 DAC1 的输出信号控制，因此可通过分析 DAC1 的输出信号判断腔长变化。

实验中，使用光电探测器测量的 DAC1 输出信号如图 6（a）中曲线（i）所示，532 nm 和 1064 nm 激光功率变化曲线如图 6（a）中曲线（ii）和曲线（iii）所示，使用功率计测量的 355 nm 激光输出功率如图 6（b）中曲线（iv）所示。系统从 0s 时刻启动自动锁定，在 0.1s 内完成 532 nm 激光共振锁定，并开始温度自适应匹配以锁定 1064 nm 激光。从图 6 中 t1 区域内可以看出，随着温度自适应匹配的进行，1064 nm 激光逐步达到共振状态，输出的 355 nm 激光功率逐渐增加，消耗了部分 532 nm 和 1064 nm 激光功率，使两基频光功率逐渐降低，并在 t1-t2 区域内达到稳定。同时，由于产生的 355 nm 激光功率较高，LBO 晶体吸收部分 355 nm 激光使得晶体中心温度明显增加，导致腔内光程变长。此时，532 nm 自动锁定系统通过 PZT 调节腔长，可有效补偿晶体的热致光程变化。然而，该热致光程变化范围

较大，如图 6（a）中的 i 曲线变化所示，开始锁定后有三个明显阶跃式跳变，每一次跳变就意味着一个 532 nm 波长，即可达至少 3 个 532 nm 激光波长，而腔长的可调范围不足 2 个波长长度，因此必然超出可调腔长范围而引发失锁。失锁后不产生 355 nm 激光，导致晶体温度快速回落，若在温度回落后重新进行锁定又将带来相同的问题。而本自动锁定系统，具有快速恢复锁定的功能，能在 0.1s 内重新完成自动锁定，从而有效解决失锁导致晶体温度突变的问题，保障系统稳定运行。

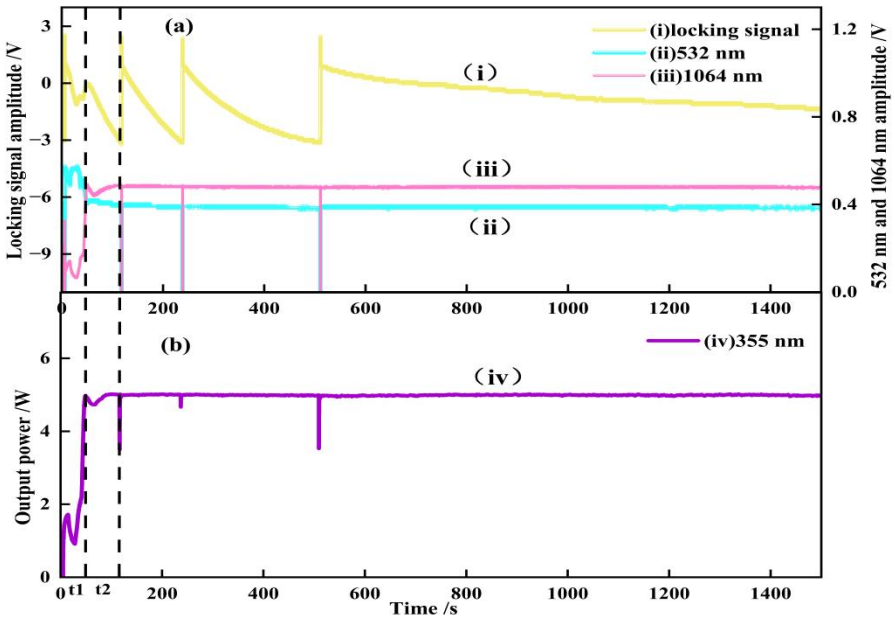

图 6 温度自适应锁定过程变化

Fig. 6 Temperature adaptive locking process variation

当系统稳定运行后，测量 2 小时内 355 nm 激光输出功率的稳定性，结果如图 7 所示。数据显示，2 小时内输出激光平均功率为 5.0 W，功率波动为±2.9%，无明显功率漂移或突变，表明双共振自适应锁定系统具备良好的长期运行稳定性。

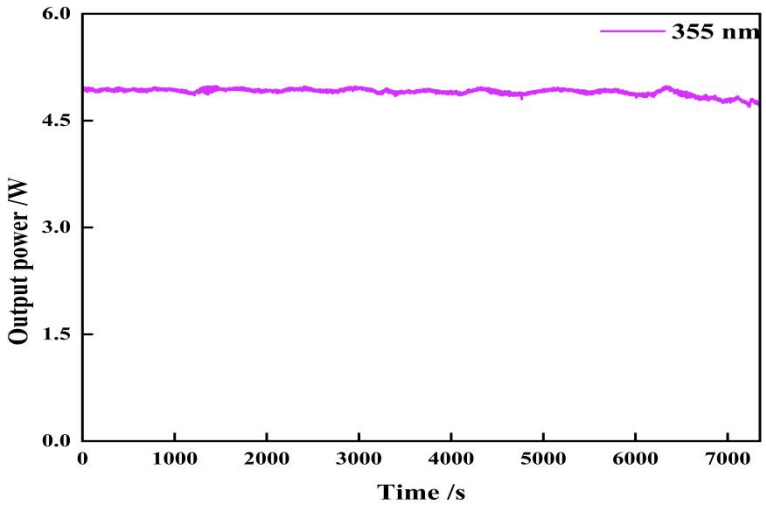

图 7 355nm 输出功率

Fig. 7 355 nm output powe

4 结　论

本文针对全固态单频连续波 355 nm 紫外激光双共振锁定系统长期稳定性不足、失锁恢复依赖人工干预等关键问题，提出了一种融合腔长快速锁定与晶体温度自适应匹配的协同控制方法，并基于 FPGA 开发平台完成了系统构建与实验验证。研究结果表明，所提出的控制方法能够实现 532 nm 与 1064 nm 基频光的快速、同步共振锁定，并有效抑制由晶体热效应、环境温度波动及机械振动引起的腔长失配。本文所设计的激光器锁定系统能稳定输出功率高达 5 W 的单频连续波 355 nm 激光，2 小时内功率稳定度优于±2.9%。尤为重要的是，系统具备失锁自动检测与快速恢复能力，可在 0.1 s 内完成重新锁定，克服了传统系统中因热致腔长变化超出调节范围而导致的持续失锁问题。该工作为高功率连续波紫外激光器的稳定运行提供了一种可靠的技术解决方案，显著提升了系统的智能化程度和长期工作可靠性，在工业制造、科学仪器等领域具有较好的应用前景。

参考文献

[1] Lanterne A, Manuel S, Paviet-Salomon B, et al. Implanted selective emitter solar cells by laser thermal annealing[C]//Proceedings of Ion Implantation Technology 2012, 2012. Melville: AIP, 2012, 1496: 131-134.

[2] Feng Q Y, Zu X T, Wang B Y, et al. First-principles study of metallic impurities induced 355 nm UV laser absorption in fused silica[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 2906-2914.

[3] 李玉瑶,王菲,焦正超,等. 高效率LD端面抽运准连续355 nm激光器[J]. 发光学报, 2014, 35(3): 332-336.
Li Y Y, Wang F, Jiao Z C, et al. High Efficiency LD End-Pumped Quasi-Continuous Wave 355 nm Laser[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(3): 332-336.

[4] Wang J, Chung J L, Schuele G, et al. Safety of cornea and iris in ocular surgery with 355-nm lasers[J]. Journal of Biomedical Optics, 2015, 20(9): 095005.

[5] 唐娟,廖健宏,蒙红云,等. 紫外激光器及其在激光加工中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(8): 52-56.
Tang J, Liao J H, Meng H Y, et al. Ultraviolet Lasers and Their Applications in Laser Processing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(8): 52-56.

[6] Kaneda Y, Kubota S. Continuous-wave 355-nm laser source based on doubly resonant sum-frequency mixing in an external resonator[J]. Optics Letters, 1995, 20(15): 1641-1643.

[7] Kaneda Y, Kubota S. Theoretical treatment, simulation, and experiments of doubly resonant sum-frequency mixing in an external resonator[J]. Applied Optics, 1997, 36(7): 1766-1772.

[8] 申高,檀慧明,刘飞. 全固态355 nm连续紫外激光器的优化设计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 731-735.
Shen G, Tan H M, Liu F. Optimal Design of All-Solid-State 355 nm Continuous Wave Ultraviolet Laser[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(5): 731-735.

[9] 吕彦飞,张喜和,姚治海,等. 激光二极管抽运全固态355 nm连续波紫外激光器[J]. 中国激光, 2007, 34(8): 0802001.
Lyu Y F, Zhang X H, Yao Z H, et al. Laser Diode Pumped All-Solid-State 355 nm Continuous Wave Ultraviolet Laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(8): 0802001.

[10] 赵欣,杨建军,张力钎,等. 单腔双光梳技术[J]. 中国激光, 2022, 49(19): 1901003.
Zhao X, Yang J J, Zhang L Q, et al. Single-Cavity Dual-Optical-Comb Technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 1901003.

[11] 田明,王菲,车英. 双波长腔外同步和频355 nm准连续全固态激光器[J]. 激光技术, 2014, 38(6): 804-806.
Tian M, Wang F, Che Y. Dual-Wavelength Extracavity Synchronous Sum-Frequency 355 nm Quasi-Continuous Wave All-Solid-State Laser[J]. Laser Technology, 2014, 38(6): 804-806.

[12] Aubert N , Georges T , Chauzat C ,et al.Diode-pumped low noise CW 355-nm intra-cavity tripled laser up to 20 mW[C]//Conference on Solid State Lasers and Amplifiers.Oxxius SA, 4 rue Louis de Broglie, F-22300 Lannion, France, 2006.DOI:10.1117/12.662990.

[13] Jarrett S M , Clarkson W A , Hodgson N ,et al.A 200 mW, CW, 355 nm laser based on DPSS side pumped, internally frequency tripled technology[J].Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2010, 7578:19.DOI:10.1117/12.854939.

[14]Hsu C S , Lai J Y , Wu D Y ,et al.High-efficiency single-pass >100mW continuous-wave UV-355nm generation by focusing optimization of 1064nm cascaded third harmonic generation in periodically poled lithium niobate crystals[J]. 2020.DOI:10.1117/12.2545450.

[15]Jiao W, Wang Y D, Yin R X, et al. High-power single-frequency continuous-wave 355 nm UV laser via a frequency-correlated dual-wavelength laser[J]. Optics Letters, 2024, 49(14): 4014-4017.

[16]Kitano H, Matsui T, Sato K, et al. Efficient 355-nm generation in CsB_3O_5 crystal[J]. Optics Letters, 2003, 28(4): 263-265.

[17]Rakhman A, Notcutt M, Liu Y. Power enhancement of burst-mode ultraviolet pulses using a doubly resonant optical cavity[J]. Optics Letters, 2015, 40(23): 5562-5565.

[18]Ojala T, Pietikainen M, Maenpaa T. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(7): 971-987.

[19]Feng Y J, Wang X J, Ke W W, et al. Numerical analysis to four-wave mixing induced spectral broadening in high power fiber lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9255: 92550Q.

[20]Liu X, Shen X J, Diao D M, et al. Temperature-insensitive sum frequency generation of 355-nm ultraviolet laser radiation in LiB3O5 by compensating thermally induced phase mismatch[J]. Applied Optics, 2018, 57(5): 1134-1139.

[21]Janitz E, Ruf M, Fontana Y, et al. High mechanical bandwidth fiber-coupled Fabry-Perot cavity[J]. Optics Express, 2017, 25(17): 20932-20943..

[22]Mäusezahl M, Munkes F, Löw R. Tutorial on laser locking techniques and the manufacturing of vapor cells for spectroscopy[J]. New Journal of Physics, 2024, 26(1): 013001.

[23]Zhang J, Wang L, Li Y, et al. 355nm laser generation based on $Na_3La_9O_3(BO_3)_8$ crystal[J]. Optics Express, 2012, 20(15): 16490-16493.

[24]郭学石, 丘丰豪, 李文奇, 李小英. 光量子信息中相位锁定控制技术的进展（特邀）[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(11): 1127013.
Xueshi Guo, Fenghao Qiu, Wenqi Li, Xiaoying Li. Progress of Phase-Locked Control Techniques in Optical Quantum Information (Invited)[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62(11): 1127013.

[25]孙根莱, 唐骁康, 王勇杰, 杨海锟, 周勇壮, 沈咏, 邹宏新. 386 nm高功率连续激光产生（特邀）[J]. 光学学报, 2025, 45(20): 2027028.
Genlai Sun, Xiaokang Tang, Yongjie Wang, Haikun Yang, Yongzhuang Zhou, Yong Shen, Hongxin Zou. Generation of High-Power Continuous-Wave Laser at 386 nm (Invited)[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(20): 2027028.

High-Power 355 nm Laser Based on Dual-Resonance Adaptive Locking

Zhang Zhilin[1], Yin Ruixi[1], Cao Xuechen[1]，Qin Jiliang[1,2*]，Jin Pixian[1,2]，Lu Huadong[1,2]

[1] *State Key Laboratory of Quantum Optics Technologies and Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China*;

[2] *Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China*

Abstract

Objective High-power single-frequency continuous-wave 355 nm ultraviolet lasers have important application value in various fields such as precision machining, lithography, and biomedicine. The use of dual-resonance sum-frequency of two fundamental wavelength lasers, namely 1064 nm and 532 nm, in a resonant cavity is the key technical approach to generate high-power continuous-wave 355 nm ultraviolet lasers. However, dual-resonance systems still face severe stability challenges in practical operation: external factors including environmental temperature drift and mechanical vibration are prone to cause resonator misalignment, which further leads to resonance unlocking and subsequent output power fluctuations. Especially under high-power operating conditions, the absorption of 355 nm laser by the crystal will induce an internal temperature gradient, resulting in the drift of phase matching temperature and thus changing the effective cavity length of the resonant cavity. When the thermally induced change in cavity length exceeds the adjustment range of the piezoelectric ceramic (PZT), it will cause the unlocking of the 532 nm laser, and the 355 nm laser will also disappear accordingly. Meanwhile, the crystal temperature drops rapidly, forming a vicious cycle of unlocking-temperature drop-difficult re-locking. Existing systems usually lack a fast and autonomous unlocking recovery mechanism and mostly rely on manual intervention for re-locking, which makes it difficult to meet the requirements of long-term stable operation under high-power conditions. Based on these problems, this study aims to solve the stability and unlocking recovery issues of dual-resonance systems, improve the autonomous operation capability of the system, and finally achieve the long-term stable output of high-power single-frequency continuous-wave 355 nm ultraviolet lasers.

Methods In this study, a dual-resonance cooperative control method is proposed and implemented, which combines cavity length automatic locking and crystal temperature adaptive matching. Based on this method, an all-solid-state single-frequency 355 nm ultraviolet laser dual-resonance automatic locking system is developed (Fig. 1). In this locking system, the resonant cavity length is adjusted by DAC1 output controlling the PZT, and the temperature of the LBO2 crystal is controlled by DAC2 output. The amplitudes of the 532 nm and 1064 nm lasers, as well as the error signal of the 532 nm laser, are recorded in real time by the analog-to-digital converters ADC1, ADC2, and ADC3, respectively.The system operates in two modes: scanning mode and locking mode. In scanning mode, a triangular wave scanning signal is output from DAC1 to scan the resonant cavity length via the PZT, so as to observe the cavity modes and error signal for control (Fig. 2). When switched to locking mode, a single linearly increasing signal is first output from DAC1 to automatically identify the locking reference and direction of the error signal, as well as the locking position of the 532 nm laser. Dual resonance is achieved through two modules: the 532 nm laser automatic locking module and the 1064 nm laser temperature adaptive locking module (Fig. 4).In the 532 nm laser automatic locking module, the DAC1 output is continuously updated through iterative PI algorithm calculations, enabling automatic locking of the 532 nm laser. The proportional P and integral I parameters in the algorithm are automatically determined from experimentally measured signals. Notably, the system can judge whether loss of locking occurs by identifying the current amplitude of the 532 nm laser and quickly restore the locked state (Fig. 3).Once the 532 nm laser is successfully locked, the system initiates the 1064 nm laser locking procedure based on temperature adaptive matching. First, the current amplitude of the 1064 nm laser is acquired by ADC2, and the real-time amplitude deviation is obtained by calculating the difference between this value and the peak amplitude of the 1064 nm laser. The temperature variation to be output is then set according to the magnitude of the deviation, and the temperature of the LBO2 crystal is controlled via DAC2 output, gradually driving the 1064 nm laser into resonance and completing temperature adaptive matching locking.This method also provides automatic temperature correction, which solves the problem of temperature mismatch caused by the drift of the matching temperature due to crystal absorption of the 355 nm laser (Fig. 5).

Results and Discussions Experimental results show that the developed system starts automatic locking at 0s, completes the resonance locking of the 532 nm laser within 0.1s, and immediately starts temperature adaptive matching to lock the 1064 nm laser. With the progress of the temperature adaptive matching process, the 1064 nm laser gradually reaches the resonance state, which enables the dual resonance of the 1064 nm laser and the 532 nm laser in the cavity, and the output power of the 355 nm laser increases gradually. At the same time, the automatic locking system is also equipped with a fast unlocking recovery function, which can re-complete the automatic locking within 0.1s. This function effectively solves the problem of sudden crystal temperature change caused by unlocking and ensures the long-term stable operation of the system (Fig.6). After the system operates stably, the measured data show that the average output power of the 355 nm laser within 2 hours is 5.0 W, with a power fluctuation of 2.9% (Fig.7), and there is no obvious power drift or sudden change. These experimental results fully indicate that the dual-resonance adaptive locking system has good long-term operation stability, which can meet the practical application requirements.

Conclusions This paper provides a reliable technical solution for the stable operation of high-power 355 nm continuous-wave ultraviolet lasers, which significantly improves the intelligent control level and long-term working reliability of the system. The designed dual-resonance adaptive locking system successfully solves the problems of poor long-term stability of traditional systems and continuous unlocking caused by thermally induced cavity length change exceeding the adjustment range, and realizes the stable output of 5 W-level single-frequency continuous-wave 355 nm laser. This research provides important technical support for the practical application of high-power continuous-wave 355 nm ultraviolet lasers and has broad good application prospects in fields such as industrial manufacturing and scientific instruments.

Key words 355 nm ultraviolet laser; dual resonance; automatic locking; temperature adaptive

作者简介：

张志林（2000—），女，硕士研究生，主要从事全固态激光技术及光电子技术方面的研究。E-mail：zzl081903@163.com

导师简介：

秦际良（1990—），男，博士研究生，讲师，硕士生导师，主要从事全固态激光技术、光电子技术、量子光学方面的研究。E-mail：qinjl@sxu.edu.cn

创新点说明：

（1）自主研发可适配高功率全固态单频连续波355 nm紫外激光器的自动锁定系统，有效提高355 nm紫外激光器的长期稳定性。

（2）提出了一种融合腔长快速锁定与晶体温度自适应匹配的协同控制方法，实现了532 nm与1064 nm基频光的快速、同步共振锁定，并有效抑制由晶体热效应、环境温度波动及机械振动引起的腔长失配。能稳定输出功率高达5 W的单频连续波355 nm激光，2小时内功率稳定度优于±2.9%。

（3）设计失锁自动检测与快速恢复机制，可在0.1 s内完成重新锁定，克服了传统系统中因热致腔长变化超出调节范围而导致的持续失锁问题。