

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.05.007

半导体激光器驱动电路设计及实验研究

高彦伟^{1*}, 张玉钧², 刘海秋¹, 马慧敏¹

(1 安徽农业大学信息与计算机学院, 安徽 合肥 230036;

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, 中国科学院环境光学与技术重点实验室,
安徽 合肥 230031)

摘要: 可调谐半导体激光器是可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)系统的重要器件之一, 激光器输出波长的稳定性直接决定系统测量的准确性和稳定性, 而注入电流和工作温度是激光器输出波长的主要控制因素。设计了激光器驱动控制电路, 并利用PID控制实现激光器工作温度的恒温控制, 不仅能提供高精度低噪声的注入电流, 而且对激光器有完备的安全保护功能。首先对注入电流和温度控制进行了短期测试分析, 随后将设计的电路应用于中心波长为1512 nm的激光器, 开展了测试分析, 对激光器的温度、电流调谐特性进行研究, 并对激光器输出波长的稳定性进行了短期和长期测试。结果发现激光器输出波长的标准偏差为0.0002, 满足TDLAS系统对激光器恒流恒温控制的要求, 表明该驱动控制电路实现了对半导体激光器的高精度驱动控制。

关键词: 光电子学; 可调谐半导体激光器; 电流驱动; TEC恒温控制

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-5461(2023)05-00684-10

Design and experiment of semiconductor laser drive control circuit

GAO Yanwei^{1*}, ZHANG Yujun², LIU Haiqiu¹, MA Huimin¹

(1 School of Information and Computer, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China;

2 Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Tunable semiconductor laser is one of the most important devices in tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) system. The stability of the laser output wavelength directly determines the accuracy and stability of system measurements, and the laser output wavelength is mainly controlled by the injection current and operating temperature. A laser drive control circuit is designed, and PID control is utilized to implement thermostatic control of the laser operating temperature. The circuit can not only provide high-precision and low noise injection current, but also have a complete safety protection function for the laser. Firstly, the short-term test and analysis of the injection current and temperature control are carried out. Then, the designed circuit is applied to a laser with a central wavelength of 1512 nm, the temperature and current tuning characteristics of the laser are experimentally

基金项目: 大气环境污染监测先进技术与装备国家工程实验室开放基金(2005DP173065-2019-07), 安徽省自然科学基金(2108085QD179)

作者简介: 高彦伟(1986-), 山东临朐人, 博士, 讲师, 主要从事TDLAS方面的研究。E-mail: ywgao@ahau.edu.cn

收稿日期: 2021-11-30; 修改日期: 2022-01-18

*通信作者。

test and analyzed, and the stability of the laser output wavelength is tested in both short-term and long-term. The standard deviation of the laser output wavelength is found to be 0.0002, which meets the requirements of TDLAS system for constant current and constant temperature control of laser, and indicates that the designed drive control circuit has realized the high-precision driving control of the semiconductor laser.

Key words: optoelectronics; tunable semiconductor laser; current drive; TEC temperature control

0 引言

可调谐半导体激光吸收光谱 (TDLAS) 气体传感器是气体分析、环境监测、工业过程控制、燃烧诊断等领域的主要分析仪器。可调谐半导体激光器作为 TDLAS 技术的核心光源, 其输出光功率和输出波长的稳定性直接决定了 TDLAS 传感器的性能, 可调谐半导体激光器驱动控制电路的设计尤为重要。

由于激光器驱动控制系统的重要性, 其研究受到广泛关注。Xiong 等^[1]研究了 TDLAS 气体浓度检测中 DFB 激光器驱动及温控电路设计, 温度控制精度可达 $\pm 0.015\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Xing 等^[2]研究了以单片机为控制核心, 利用集成温控模块驱动控制系统, 在 $10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内控制误差 $\leq 0.003\text{ }^{\circ}\text{C}$, 驱动电流误差 $< \pm 0.03\text{ mA}$ 。贺春贵等^[3]研究了基于集成温控模块的激光器温度控制电路, 激光器输出波长的标准偏差为 0.2×10^{-6} , 输出功率的标准偏差为 0.02 mW 。Li 等^[4]设计了基于 HALL-Libbrecht 电流源和 ADN8834 温控芯片的激光器驱动控制系统, 并进行了实际测量。国外对驱动控制系统的研究较早^[5,6], 商用的驱动控制系统也取得长足发展^[7,8]。

然而, 大多数商用驱动控制系统虽然驱动电流、控温精度高, 但也存在体积大价格高, 操作复杂, 仅适合实验室应用, 难以实现在线监测、气体传感器小型化; 且在工业现场应用中, 激光器容易受到电流、电压浪涌^[9]等的损坏。这些问题限制了其实际应用。

本文针对现有驱动控制电路的不足, 设计了一种可调谐半导体激光器驱动控制电路, 具有驱动电流精度高、温漂低、温度控制稳定性高的特点, 能够适应工业测量环境, 便于集成小型化。

1 可调谐半导体激光器原理

激光器模块的原理框图如图 1 所示, 内部除了激光器(LD)外还集成了热敏电阻 R_{TH} 、半导体制冷器 (TEC)。热敏电阻实时监测激光器的温度, TEC 使激光器保持在特定的工作温度^[10,11]。激光器的输出波长、输出功率与注入电流、工作温度有关, 当注入电流超过发光阈值电流, 激光器开始输出光束, 激光波长与注入电流的大小成正比, 注入电流不能超过激光器电流限值, 否则激光器容易烧毁; 激光器依靠载流子的注入工作, p-n 结的温度改变会导致发光阈值电流的改变, 波长偏移, 影响激光器寿命, 激光器温度控制是激光器正常工作的前提。热敏电阻实时反馈激光器的温度, TEC 利用帕尔贴效应根据电流的大小和方向^[9], 吸收或者释放热量, 控制激光器的温度。驱动控制电路应保证激光器注入电流低噪声, 高精度, 且激光器的工作温度恒定, 以保证激光器的正常工作条件。

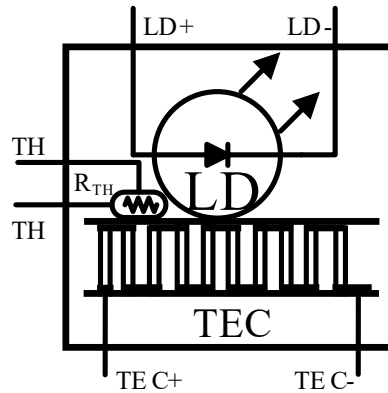


图1 激光器模块的原理框图

Fig. 1 Functional block diagram of laser

2 驱动控制电路设计

TDLAS 测量系统采用直接吸收方式或者波长调制工作模式, 在激光器直流中心电流的基础上叠加调制信号, 例如锯齿波或者正弦波, 激光器的输出波长范围覆盖气体的吸收线^[13,14], 可调谐半导体激光器输出波长受驱动电流和温度控制, 因此激光器驱动控制电路设计分为两部分: 一是电流驱动电路, 二是温度控制电路。

2.1 驱动电流电路设计

驱动电流电路对激光器具有完善的驱动和保护功能, 确保激光器注入电流的稳定性, 且有过流保护功能、软启动功能、静电保护功能。电路原理图如图2所示, 电路采用负反馈设计, 功率三极管Q为激光器提供驱动电流, 驱动电流流经高精度采样电阻 R_2 , 由运算放大器A2将电流转为电压, 电压与DAC输出的电流设定值 V_C 进行比较后调节功率三极管, 进而对三极管发射极电流, 即激光器驱动电流进行恒流控制。

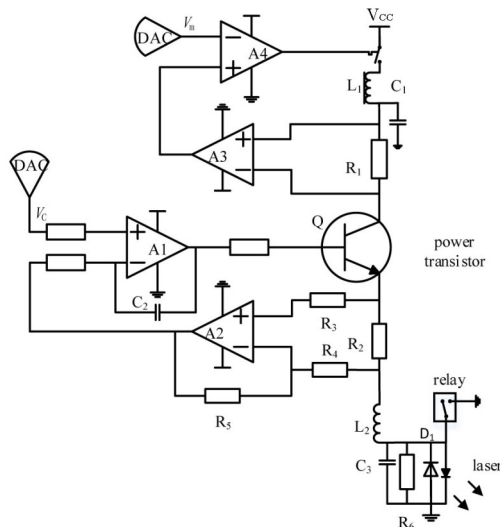


图2 驱动电流电路原理图

Fig. 2 Schematic diagram of driving current circuit

取 $R_3 = R_4$, 则激光器电流 I_D 为

$$I_D = \frac{V_C}{R_2} A. \quad (1)$$

可以看出, 激光器注入电流只与 V_C 、采样电阻 R_2 、增益 A ($A = R_5/R_4$) 有关, 在 R_2 与 A 确定的情况下, I_D 只受 V_C 控制, 便于外加扫描、调制信号, 且实现恒流驱动。注入电流的稳定性主要受采样电阻和运算放大器的性能影响, 采样电阻采用高精度金属膜电阻, 误差 $< 0.1\%$, 温度系数 < 50 ppm/K, 采样电阻阻值根据所需电流大小选取。运算放大器选用高精度低噪声, 低偏置电流, 低失调电压的型号, 同时还要考虑仪器小型化、低功耗的要求, 结合供电电压进行合理选择, 本研究选取的运算放大器型号为 AD8628ARZ。贴片电感 L_2 滤除高频噪声, 进一步增强注入电流的稳定性。

可调谐半导体激光器工作时, 如果正向电流增大, 会导致 p-n 结温度升高, 影响输出波长的稳定性, 甚至造成激光器烧毁, 因此为保证激光器长期正常工作, 驱动电路必须有电流限制功能, 如图 2 所示, 采样电阻 R_1 和运算放大器 A3 实现限流功能, 功率三极管集电极电流 I_C 流经 R_1 , 经过运算放大器 A3 转为电压, 电压与 DAC 输出的电流限值 V_m 进行比较, 进而控制供电电源 V_{CC} 的通断, 根据三极管特性, 集电极电流 I_C 略大于发射极电流 I_E , 当流经 R_1 的电流 I_C 超过限值时, 及时切断 V_{CC} , 使得 I_E 小于限值, 确保激光器的安全。

供电电源 V_{CC} 在上电和断电的瞬间, 会有电涌和电压振荡产生, 可能会损坏激光器, 在 V_{CC} 处增加了软启动设计, 电感 L_1 和电容 C_1 组成 LC 滤波器实现软启动, 并可以有效抑制电压的瞬态波动。通过选择电感电容的值设置合适的软启动时间。

继电器、电容 C_3 、电阻 R_6 与肖特基二极管 D_1 组成激光器静电保护电路, 继电器的常闭端接地, 正常工作时二极管 D_1 截止, 继电器接常开端, 断电状态时激光器短路接地, 当静电放电时二极管导通, 防止反向电流流经激光器, C_3 与 R_6 组成滤波电路抑制重新上电时激光器两端电压的突变。

2.2 温度控制电路设计

可调谐半导体激光器的输出波长, 输出光功率, 阈值电流等参数均会随温度变化而改变, 激光器在正常工作时, 会产生热量导致温度变化, 环境温度的改变也会影响激光器的工作条件, 需要对激光器的温度进行精确控制。

采用 MAX1978 用于激光器 TEC 的驱动芯片, MAX1978 采用单电源供电, 非常适合传感器小型化需求, 且内部集成了功率 MOSFET, 减少了外围电路的复杂性, 最大输出电流为 ± 3 A, 双极性电流保证温度控制无“死区”, 无低负载电流时的非线性问题, 温度稳定度最大为 $0.001\text{ }^\circ\text{C}$, 与其他 TEC 控制器相比, MAX1978 内部集成了斩波稳定仪表放大器, 高精度积分放大器用于 PID 控制, 大大减少了外接元器件的数量和复杂度, 增加了稳定性。通过外接电阻设置 TEC 最大电流与最大电压, 根据选用的激光器进行合理的设置。基于 MAX1978 的温度控制电路如图 3 所示。

R_4 与 R_5 设定 TEC 两端电压的最大值, R_6 与 R_7 设定 TEC 电流的最大值, REF 为 MAX1978 内部的 1.5 V 参考电压。

激光器热敏电阻 R_{TH} 与电阻 R_8 组成电阻分压网络, 热敏电阻分压经过电压跟随器 OP 后, 得到了与热敏电阻实际温度呈正比的电压信号 V_{TH} 输入 MAX1978 的 FB- 引脚, DAC 产生温度设定电压 V_{TS} 输入 FB+ 引脚, 分压电路与 DAC 采用同一个参考电压 REF, 减少参考电压波动对温度稳定性的影响。电压信号 V_{TH} 与 V_{TS} 通过内嵌斩波稳定仪表放大器构成 50 倍的差分放大器, 得到误差电压 DIFOUT 用于 PID 运算, 电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 , 电容 C_1 、 C_2 、 C_3 与内嵌积分放大器组成模拟 PID 控制器, PID 控制器输出控制信号再连接到引脚 CTLI, 控制 TEC 电流的大小。

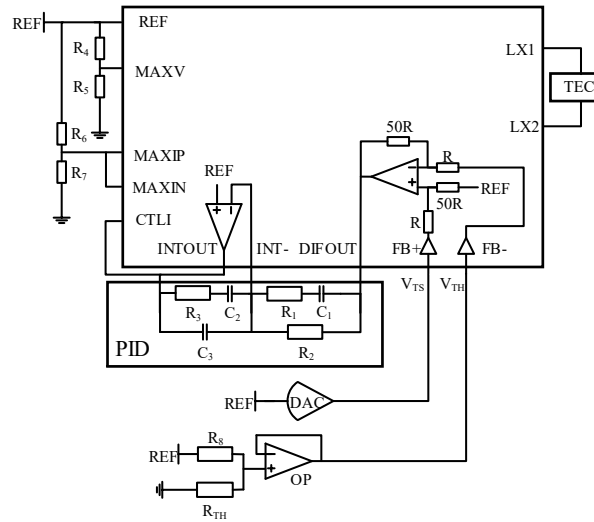


图3 温度控制电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of temperature control circuit

在相同的TEC输入电流条件下,可调谐半导体激光器TEC模块的加热能力要强于其制冷能力,TEC模块可以近似为一个二极点系统,第一个极点为20 mHz,第二个极点为1 Hz,两个极点间的相位差会导致振荡发生,PID控制器可以为TEC模块提供足够的相位裕量,保证系统的稳定性,提高动态响应时间,减小过冲。PID控制器电路如图所示,其中 R_1 用于增加 C_1 支路的阻抗, C_3 用于相位补偿,减少环路的高频噪声,提高控制环路的稳定性。经分析计算可得PID电路的传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{(1 + s R_3 C_2)[1 + s(R_1 + R_2)C_1]}{s R_2(C_2 + C_3)(1 + s R_1 C_1)(1 + s R_3 \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3})} \quad (2)$$

根据此传递函数,PID控制器为TEC模块增加了两个零点,两个极点:

R_3, C_2 增加一个零点,提高PID回路的增益,并将TEC系统的第一个极点频率推高至70 mHz,第一个零点频率 $f_{z1} = 1/(2\pi R_3 C_2)$, $f_{z1} = 70$ mHz,取 $C_2 = 10$ uF,求得 $R_3 = 227$ k Ω ,取 $R_3 = 240$ k Ω 。

R_2, C_1 增加第二个零点,提高相位裕量,抵消TEC第二极点的相位偏移,以2 Hz为单位增益交越频率, R_2, C_1 零点频率 $f_{z2} = \frac{1}{2\pi(R_1 + R_2)C_1} \approx \frac{1}{2\pi R_2 C_1}$ (选择 $R_2 \gg R_1$)。取 f_{z2} 为交越频率的0.2倍, $f_{z2} = 0.4$ Hz, $C_1 = 0.47$ uF,求得 $R_2 = 847$ k Ω ,取 $R_2 = 1$ M Ω 。

R_1, C_1 增加一个极点,极点频率 $f_{p1} = 1/(2\pi R_1 C_1)$,取 f_{p1} 为单位增益交越频率的5倍, $f_{p1} = 10$ Hz, $C_1 = 0.47$ uF,计算得 $R_1 = 33.8$ k Ω ,取 $R_1 = 30$ k Ω ,以提供足够的相位裕量。

R_3, C_3 增加第二个极点,极点频率 $f_{p2} = 1/(2\pi R_3 \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3}) \approx 1/(2\pi R_3 C_3)$ (选择 $C_2 \gg C_3$)。取 f_{p2} 为 f_{p1} 的3倍, $f_{p2} = 30$ Hz, $R_3 = 240$ k Ω ,计算得 $C_3 = 0.022$ uF。

3 实验测试与分析

为了验证上述的驱动控制电路能否驱动激光器正常工作,以中心波长为1512 nm的激光器为测试对象进行实验验证与分析。

3.1 驱动电流电路测试

首先进行驱动电流电路性能的测试, 测试电路输出电流, 即激光器注入电流的波动大小, 激光器在连续工作模式下, 固定其温度为 25 °C, 设定驱动电路输出电流为 10.4 mA, 测试 24 h 内电路输出电流的稳定性, 每 20 min 测量一次, 测量结果如图 4 所示。测试结果表明电流波动的标准偏差为 0.00511 mA, 用电流值的最大波动值与平均值的比值表示稳定度 γ_I ^[11] 为

$$\gamma_I(\%) = \frac{\Delta I}{\bar{I}} \times 100\% = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{\bar{I}} \times 100\% \quad (3)$$

得到稳定度 γ_I 为 0.15 %, 结果表明此处的驱动电流电路输出电流精度高, 连续 24 h 稳定工作时电路输出电流稳定, 波动小, 稳定度为 10^{-3} 量级, 能够精确控制激光器注入电流。

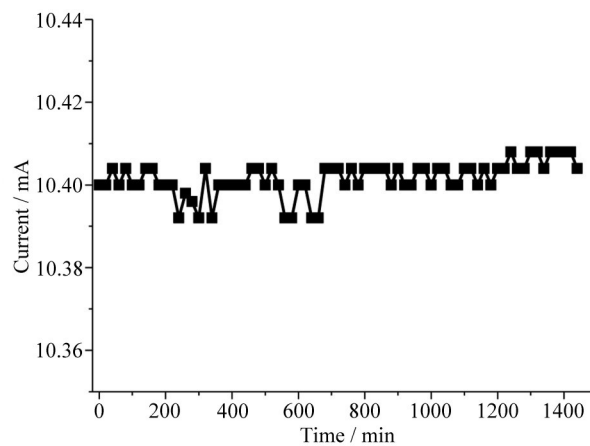


图 4 注入电流稳定性测试结果

Fig. 4 Test results of injection current stability

3.2 温度控制电路测试

测试温度控制电路对激光器控温的稳定性, 在室温环境下, 激光器在连续工作模式下, 设定激光器的工作温度与注入电流, 测试 24 h 内激光器温度的稳定性, 每 20 min 测量一次, 测试结果如图 5 所示。

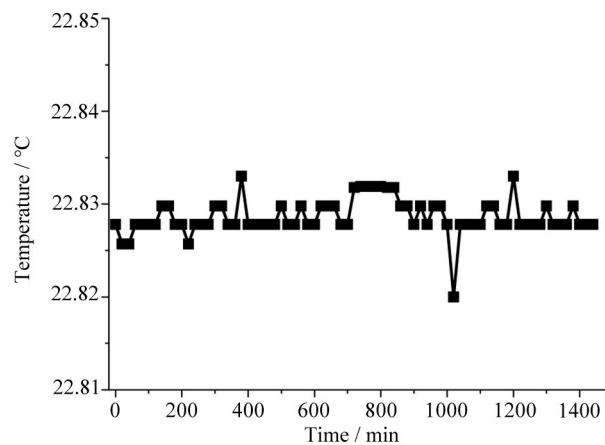


图 5 工作温度稳定性测试结果

Fig. 5 Test results of operating temperature stability

由于实验测量时间范围为 24 h, 环境温度的变化范围为 2~15 °C, 激光器工作温度受环境温度的影响出

现波动,但温度控制电路利用PID控制,可以实现温度的恒定,温度波动的标准偏差为 $0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大温差为 $0.00437\text{ }^{\circ}\text{C}$,用电流值的最大波动值与平均值的比值表示稳定度 γ_T 为

$$\gamma_T(\%) = \frac{\Delta T}{\bar{T}} \times 100\% = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{\bar{T}} \times 100\%, \quad (4)$$

得到稳定度 γ_T 为 0.057% ,结果表明本文的温度控制电路控温精度高,连续24小时稳定工作时温度稳定性达到 10^{-5} 量级,能够实现激光器温度控制功能。

3.3 调谐特性测试

调节激光器控制器的驱动电流,保持其驱动电流稳定在 15 mA ,工作温度范围设定为 $20\sim 27.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,每改变 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,待激光器输出波长稳定后,利用波长计测量激光器的输出波长如图6(a)图所示,由图中可见,激光器的输出波长与温度成线性关系,线性系数为 0.99992 ,激光器的温度调谐特性约为 $0.05611\text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ 。

调节激光器控制器的温度控制,使半导体激光器工作温度稳定在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $29\text{ }^{\circ}\text{C}$,改变激光器注入电流,调节范围为 $10\sim 37\text{ mA}$,每改变 5 mA 利用波长计测量激光器的输出波长,如图6(b)图所示,同激光器温度调谐特性一样,激光器的输出波长与驱动电流成线性关系,激光器的电流调谐特性约为 $0.02202\text{ nm}/\text{mA}$ ($29\text{ }^{\circ}\text{C}$), $0.02182\text{ nm}/\text{mA}$ ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)。激光器温度、电流调谐特性值的测试结果与激光器的出厂测试报告相一致。

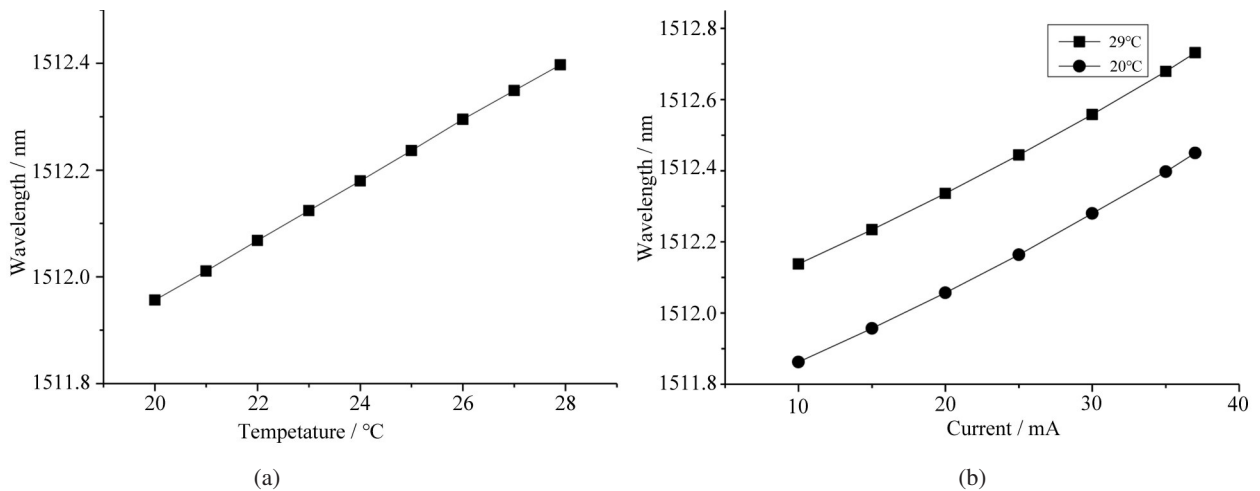


图6 (a) 激光器温度调谐特性图; (b) 激光器电流调谐特性图

Fig. 6 (a) Laser temperature tuning characteristic; (b) Laser current tuning characteristic

3.4 短期、长期稳定性测试

固定激光器注入电流为 15 mA ,工作温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,每隔 2 min 记录一次激光器输出波长,连续测量30个波长值, 1 h 的短期测量结果如图7所示,测量结果的标准偏差为 0.0002 。

固定激光器注入电流为 15 mA ,工作温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,激光器工作温度以及注入电流的两周测试结果如图8所示,根据测试结果工作温度的标准偏差为 $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$,注入电流的标准偏差为 0.015 mA ,而 24 h 工作温度的标准偏差为 $0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$,注入电流的标准偏差为 0.00511 mA ,主要原因为长期测试结果为每天取一组测试值,测试样本较少导致的标准偏差与短期测试结果有较大差距。但输出波长的长期、短期测试结果表明,设计的激光器驱动控制电路的长期与短期性能一致性较好,重复性高。

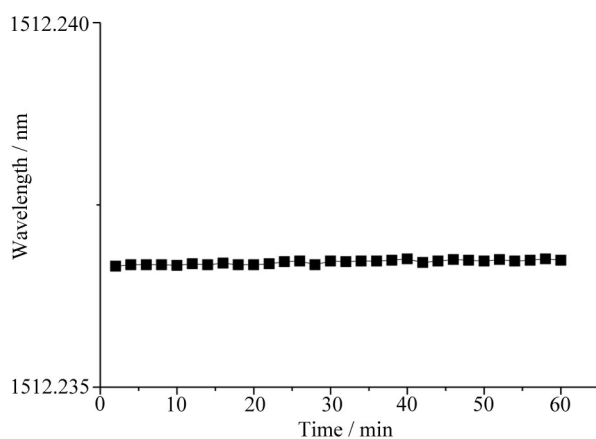


图 7 激光器输出波长短期测试结果

Fig. 7 Short term test results of laser output wavelength

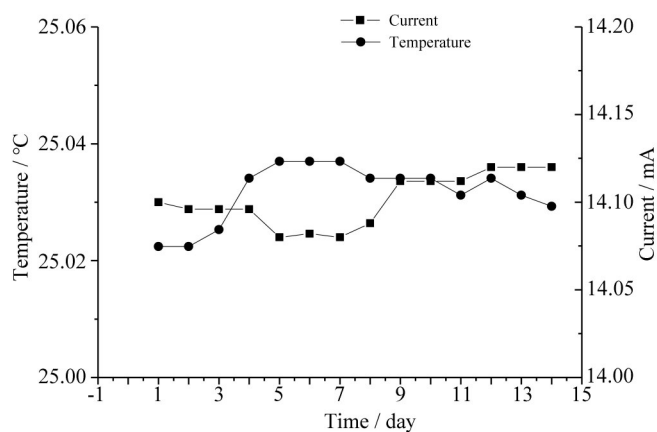


图 8 激光器工作温度与注入电流的测试结果

Fig. 8 Test results of laser operating temperature and injection current

连续监测两周激光器的输出波长, 实验结果如图 9 所示。根据测量结果得到输出波长的标准偏差为 0.000211, 实验结果表明激光器输出波长稳定性满足 TDLAS 仪器长期工作需求。

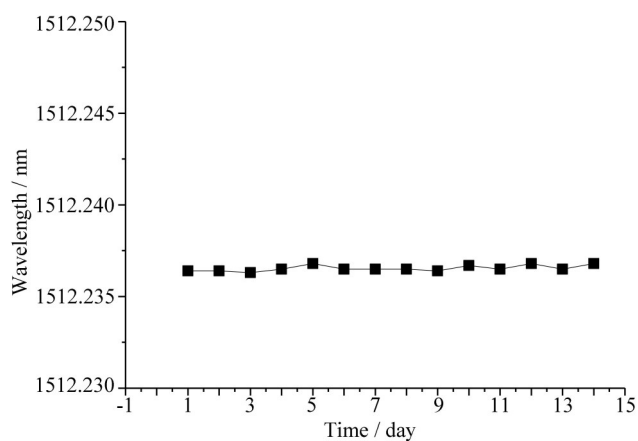


图 9 激光器输出波长测试结果

Fig. 9 Test results of laser output wavelength

4 结 论

设计了一款高精度高稳定性的半导体激光器驱动控制电路, 便于实现仪器小型化。电路为激光器提供高精度低噪声的注入电流, 且对激光器有完备的安全保护功能; 利用PID控制实现激光器工作温度的恒温控制。测试结果表明, 输出波长的标准偏差为0.0002, 对激光器的温度电流调谐特性进行了测试, 测试结果与激光器出厂测试报告一致。测试结果表明该驱动控制电路性能良好, 满足了TDLAS系统激光器电源的应用需求。

参考文献:

- [1] Xiong J H, Bu X Z, Yang H Q, *et al.* Design of DFB laser drive and temperature control circuit in TDLAS gas concentration detection [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(9): 161-165.
熊佳慧, 卜雄洙, 杨昊青, 等. TDLAS 气体浓度检测中 DFB 激光器驱动及温控电路设计 [J]. 电子测量技术, 2020, 43(9): 161-165.
- [2] Xing S X, Pan Z Y, Wang R, *et al.* Design of high precision semiconductor laser drive control system [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(17): 174-180.
邢素霞, 潘子妍, 王睿, 等. 高精度半导体激光器驱动控制系统设计 [J]. 电子测量技术, 2020, 43(17): 174-180.
- [3] He C G, Zhang Y J, Liu G H, *et al.* Design and experimental study on temperature control circuit of semiconductor laser [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2017, 40(8): 27-31, 41.
贺春贵, 张玉钧, 刘国华, 等. 半导体激光器温度控制电路设计及实验研究 [J]. 电子测量技术, 2017, 40(8): 27-31, 41.
- [4] Li N, Qiu X B, Wei Y B, *et al.* A portable low-power integrated current and temperature laser controller for high-sensitivity gas sensor applications [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(10): 103103.
- [5] Libbrecht K G, Hall J L. A low-noise high-speed diode laser current controller [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1993, 64(8): 2133-2135.
- [6] Erickson C J, Van Zijl M, Doermann G, *et al.* An ultrahigh stability, low-noise laser current driver with digital control [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, 79(7): 073107.
- [7] Tian Y L, Li C S, Zhang Z Y. High-stability power for semiconductor lasers [J]. *Applied Laser*, 2020, 40(4): 740-744.
田亚玲, 李创社, 张朝阳. 高稳定度半导体激光器电源 [J]. 应用激光, 2020, 40(4): 740-744.
- [8] Cong M L, Li L, Cui Y S, *et al.* Design of high stability digital control driving system for semiconductor laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1629-1636.
丛梦龙, 李黎, 崔艳松, 等. 控制半导体激光器的高稳定度数字化驱动电源的设计 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1629-1636.
- [9] Zeng L Z, Lu Y H, Kan R F, *et al.* Electronic design of a high-stable low-drift diode laser driver [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2014, 31(5): 569-575.
曾利忠, 陆亦怀, 阚瑞峰, 等. 高稳定低温漂半导体激光器驱动的电子学设计 [J]. 量子电子学报, 2014, 31(5): 569-575.
- [10] Zhang K F. *Design of VCSEL Laser Drive Circuit and Laser Frequency Stabilization for Atomic Optics* [D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
张开放. 面向原子光学器件的 VCSEL 激光器驱动电路设计及激光稳频 [D]. 太原: 中北大学, 2020.

- [11] Zhong X L, Wang J, Luo Y H, *et al.* Research on power control system of semiconductor laser with active temperature [J]. *Applied Laser*, 2021, 41(3): 608-613.
钟绪浪, 王瑾, 罗又辉, 等. 主动控温半导体激光器电源系统研究 [J]. *应用激光*, 2021, 41(3): 608-613.
- [12] Hou Y, Huang K J, Yu G Y, *et al.* Development on high precision CO₂ isotope measurement system based on infrared TDLAS technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(4): 20200083.
侯月, 黄克谨, 于冠一, 等. 基于红外 TDLAS 技术的高精度 CO₂ 同位素检测系统的研制 [J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(4): 20200083.
- [13] Xing K M, Yang K, Zhang L, *et al.* Simultaneous detection of CO and CO₂ in cigarette mainstream smoke based on TDLAS technology [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2017, 34(1): 81-87.
邢昆明, 杨柯, 张龙, 等. 基于 TDLAS 技术同时检测卷烟主流烟气中的 CO 和 CO₂ [J]. *量子电子学报*, 2017, 34(1): 81-87.
- [14] Tian C, Zou L C, Ruan B, *et al.* Optimization method research on low NO concentration detection by mid-infrared TDLAS based on EMD [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2021, 38(5): 661-668.
田川, 邹丽昌, 阮斌, 等. 基于 EMD 的中红外 TDLAS 检测低浓度 NO 优化方法研究 [J]. *量子电子学报*, 2021, 38(5): 661-668.