

多通道半导体激光器温控系统

何启欣, 刘慧芳, 李 彬, 郑传涛*, 王一丁

集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林大学电子科学与工程学院, 吉林 长春 130012

摘要 研制了一种板级多通道半导体激光器温控系统, 将其应用于混合气体检测中可实现同时对多个半导体激光器温度的控制。该系统硬件上由多通道温度采集模块、数字信号处理器模块、半导体制冷器(TEC)和 TEC 控制模块组成。软件上采用时间片轮转调度算法和积分分离式数字比例积分微分算法, 实现了对多个半导体激光器温度的实时、精确控制。为了测试系统的性能, 利用该系统同时控制中心波长为 $1.65\ \mu\text{m}$ 和 $1.56\ \mu\text{m}$ 的可调谐分布反馈激光器的温度, 进行了温度控制实验并测试了两个激光器的发光光谱。实验结果表明, 该系统可以实现对两个激光器温度的同时控制, 温控精度为 $-0.011\sim 0.015\ ^\circ\text{C}$, 响应时间小于 3 s。对温控系统的工作稳定性进行了测试, 两个激光器连续工作 6 h, 其工作温度保持恒定。连续 10 h 测试两个激光器的输出光谱, 输出波长的峰值未出现偏移。该温控系统体积小、成本低、便于集成且稳定可靠, 在混合气体检测中有良好的应用前景。

关键词 激光器; 半导体激光器; 光电子学; 温度控制; 近红外

中图分类号 TN365 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.1114002

Multi-Channel Semiconductor Laser Temperature Control System

He Qixin, Liu Huifang, Li Bin, Zheng Chuantao, Wang Yiding

State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Jilin University Region, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130012, China

Abstract A semiconductor laser temperature control system with board-level multi-channel is developed to control the temperature of multiple semiconductor lasers simultaneously in the detection of mixed gas. The system consists of multi-channel temperature acquisition module, digital signal processor module, thermoelectric cooler (TEC) and TEC control modules. The round-robin scheduling algorithm and integration-separated digital proportional integral differential algorithm are used to precisely control the temperature of multiple semiconductor lasers in real time. Temperatures of both the wavelength-tunable distributed feedback lasers centered at $1.65\ \mu\text{m}$ and $1.56\ \mu\text{m}$ are controlled when we use the proposed system. The temperature control experiment is carried out, and the luminescent spectra of the two lasers are detected. Results show that the system can control the temperatures of the two lasers simultaneously. The accuracy of this system can reach $-0.011\sim 0.015\ ^\circ\text{C}$ and the response time is less than 3 s. The stability of the temperature controller is tested. The temperatures of the two lasers can stay stable after operation for 6 h, and the emitting peak wavelengths are stable in spectrum test for 10 h. For its tiny size, low cost, capability to be integrated, great stability as well as reliability, the temperature control system has great application prospect in mixed gas detection.

Key words lasers; semiconductor lasers; optoelectronics; temperature control; near-infrared

OCIS codes 140.3070; 130.0250; 140.2020; 140.5960

1 引 言

近些年来,随着科技的进步和工业的发展,人们对多组分混合气体检测和分析的要求不断提高。在众多

收稿日期: 2017-06-13; **收到修改稿日期:** 2017-07-05

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0700101, 2016YFC0303902)、国家自然科学基金(61627823, 61307124, 61775079)、吉林省科技发展计划(20140307014SF)、长春市科技发展计划(14KG022)

作者简介: 何启欣(1992—),男,博士研究生,主要从事红外气体检测方面的研究。E-mail: heqixinn@163.com

导师简介: 王一丁(1956—),男,硕士,教授,博士生导师,主要从事红外光电子学方面的研究。E-mail: ydwang@jlu.edu.cn

* **通信联系人.** E-mail: zhengchuantao@jlu.edu.cn

检测方法中,基于光学原理的检测方法受到人们的广泛关注,其中可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术逐渐发展成为一种灵敏度高、可监测大气中绝大多数痕量气体成分的可靠技术,在混合气体检测中有着广泛的应用前景^[1-3]。目前,在基于 TDLAS 技术的混合气体检测中,光学复用结构主要分为单光源复用结构和多光源复用结构两种。单光源复用结构根据不同气体相近的气体吸收谱线,利用一个激光器并通过波长扫描的方法检测多种气体。由于单个激光器的光谱覆盖范围窄,限制了检测气体的种类,且待测气体的吸收谱线容易受到其他气体吸收谱线的干扰,因此单光源复用结构的应用范围较窄。多光源复用结构正成为混合气体检测的主流结构。根据所测气体种类的不同,多光源复用结构需要多个激光器,每个激光器的输出中心波长对应一种气体的吸收峰。由于激光器输出波长的稳定性对于检测系统而言至关重要,而激光器工作温度的变化会导致输出波长不稳定,因此研制出低成本、高性能的多通道温度控制器成为研制混合气体检测系统的关键环节^[4-6]。本文研制了一种板级多通道半导体激光器温控系统。硬件上以数字信号处理(DSP)芯片 TMS320F28335 为控制核心,通过集成在激光器内部的半导体制冷器(TEC)和 TEC 控制芯片 MAX1968 实现对温度的控制;软件上运用时间片轮转调度算法,该算法可使多个激光器的温控任务实时有序地进行,通过积分分离数字比例积分微分(PID)算法对各激光器的温度进行精密控制。与本课题组之前研制的温控系统相比,该系统实现了多通道温度控制并且响应时间大幅缩短,精度和稳定性也有了显著提高^[7-8]。与目前市场上的商用激光器温度控制仪相比,该系统体积小、成本低,且利于便携式气体检测系统的小型化集成,在混合气体检测中有较好的应用前景。

2 硬件设计

图 1 为设计的温度控制系统结构框图,它以 TMS320F28335 为控制核心,采用 MAX1968 作为 TEC 驱动芯片,包括主控模块、多通道温度采集模块、TEC 和 TEC 控制模块。系统通过多通道温度采集模块完成多个激光器温度信息的采集,以 TEC、TEC 控制模块实现对每个激光器温度的控制,构成了完整的闭环温度控制结构。对于温度采集通道 1 而言,温度采集模块利用集成在激光器内部负温度系数的热敏电阻 R_{TD} 采集该激光器的工作温度,桥式电路将热敏电阻值转换为电压信号,模数转换器将电压信号转换为数字信号,并将数字信号输入 DSP 进行处理。DSP 将采集到的电压信号经过计算后换算成温度,并将换算得到的温度与设定温度一起通过数字 PID 算法进行处理,将处理后得到的数字信号输入数模转换器,数模转换器输出一个模拟控制电压,用于控制 MAX1968 产生相应的 TEC 驱动电流,进而控制激光器的工作温度。激光器制冷或加热取决于 TEC 驱动电流的方向,电流大小会影响激光器制冷或加热的速度。其他温度采集通道的工作流程与通道 1 相同,各个通道激光器温度的采集与控制由时间片轮转调度算法调控,以保证各个激光器的温度控制有序进行。

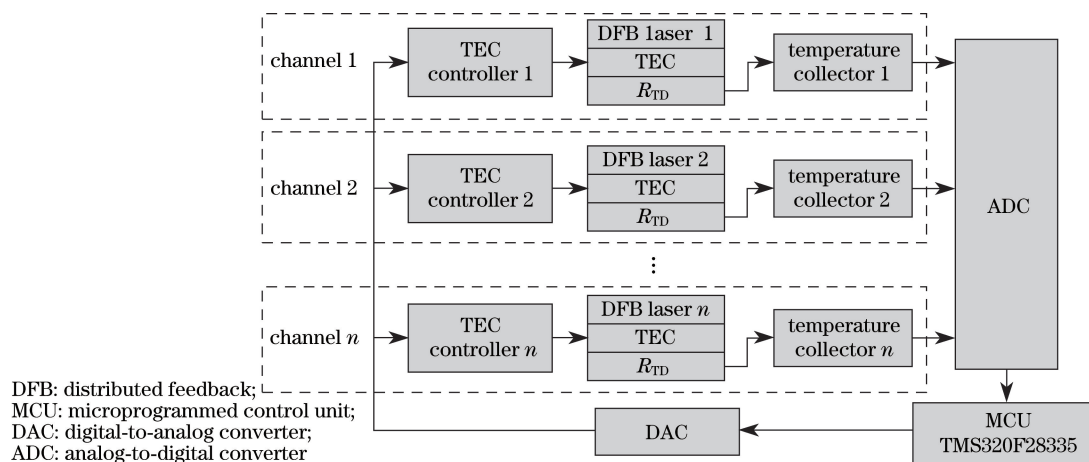


图 1 多通道半导体激光器温度控制器结构框图

Fig. 1 Structural diagram of multi-channel semiconductor laser temperature controller

2.1 温度采集电路设计

半导体激光器中集成的热敏电阻阻值随温度的变化而变化,根据热敏电阻表,可以拟合得到热敏电阻阻

值与温度之间的关系式。测量温度时将热敏电阻接入电桥电路,从而将温度变化引起的热敏电阻阻值变化转换为电压的变化。如图 2 所示,在温度采集通道 1 中,由电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 及封装在激光器内部的热敏电阻 R_{TD} 组成电桥。通过电桥得到的电压信号需要经过放大。系统选用仪表放大器 AD620,它具有高精度、低失调电压、温度漂移较小的特点,放大倍数可以通过外部电阻进行设置。经过放大后,AD620 的输出电压 V_{out} 可以表示为

$$V_{out} = \left(1 + \frac{49.4}{R_4}\right) \left(\frac{R_{TD}V_{IN}}{R_{TD} + R_1} - \frac{R_3V_{IN}}{R_2 + R_3}\right), \quad (1)$$

式中 V_{IN} 为电桥电路的输入电压, $V_{IN} = +5 \text{ V}$ 。放大后的电压信号经过 16 位模数转换器 LTC1864 转换为数字信号,并将数字信号输入到 DSP 中进行进一步计算。

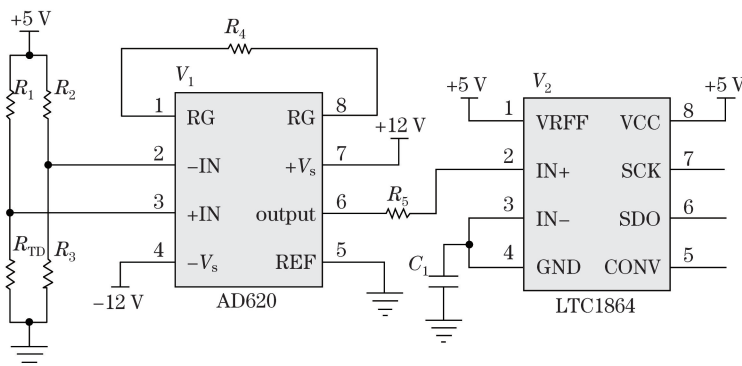


图 2 温度采集通道 1 电路原理图

Fig. 2 Circuit principle diagram of temperature collection channel 1

由于连接热敏电阻与电桥的导线电阻值会随环境温度的变化而变化,若只在一个桥臂上连接导线,当环境温度变化时,导线电阻值的变化将与热敏电阻阻值的变化相叠加,从而产生附加误差。为了提高温控系统的精度,温度采集电路采用了三线制电桥。三线制电桥在热敏电阻的一端连接两根引线,另一端连接一根引线,这样可以消除引线电阻漂移的影响,测量精度高于两线制电桥。

在混合气体检测中,不同气体具有不同的吸收峰,因此需要根据被检测气体的种类选择半导体激光器的型号。由于不同型号激光器内部封装的热敏电阻阻值不尽相同,因此需要采用多个电桥采集不同激光器的温度。根据激光器内部热敏电阻阻值的大小选择合适的电桥电阻及 AD620 的放大倍数,进而选择合适的控温范围。

2.2 半导体致冷器驱动电路

TEC 是利用 Peltier 进行制冷或加热的半导体器件。当直流电流通过集成在激光器内部的 TEC 模块时,会出现一端吸热一端放热的现象,热量从一端流向另一端。通过改变电流的方向可改变热流的方向,使激光器加热或制冷,实现对激光器温度的精确控制。选用 TEC 控制芯片 MAX1968,采用单电源供电,能够提供 $\pm 3 \text{ A}$ 双极性输出。当外加电压大于内置的 1.5 V 基准电压时,TEC 电流正向流动,可实现对激光器的加热;反之,TEC 电流反向流动,可实现对激光器的制冷。系统将采集到的温度值与设定温度值通过 PID 算法进行计算,得到的计算结果用来控制数模转换器 LTC1655 输出一个控制电压,从而控制 MAX1968。MAX1968 采用强散热型薄的缩小型小尺寸封装 (TSSOP-EP),工作温度范围为 $-40 \sim 85 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由于 MAX1968 的输出电流较大,使用时应注意散热,否则会影响其正常工作。系统测试使用的每个 DFB 激光器内部都集成了一个 TEC 模块,需要使用多个 MAX1968 来控制。

3 软件设计

3.1 多通道温度控制的实现

为了实现多通道温度控制,系统采用了时间片轮转调度算法。时间片轮转调度算法是实现多任务调度的一种常用算法,在这种算法中,系统将所有的任务按顺序排成一个队列,每次调度时把中央处理器(CPU)分配给队首的任务,令其执行一个时间片,构成微观上轮流运行、宏观上并行执行的多任务效果^[9]。系统在很短的检测周期内,利用时间片轮转调度算法并使用多路温度检测通道轮流对多个激光器温度进行检测,传

输温度数据,并对传输的数据进行处理,进而控制该激光器的温度。

系统软件流程中首先根据激光器的数量将控制系统划分为若干个温控单元,每个温控单元包括一个半导体激光器、一路温度采集模块和一个 TEC 驱动模块。为了实现多通道温度控制,根据系统时钟将 CPU 运行时间划分成若干时间片(时隙),由系统调度程序将这些时隙分配给每一个温控单元使用,每一个温控单元在其时隙内独占 CPU 资源并进行数据采集、数据传输、数据处理等任务。各温控单元通过系统调度程序轮流交替执行任务,一个温控单元执行任务完毕后立即返回任务调度程序,由调度程序决定下一温控单元任务的执行。每一个温控单元都设有温控使能开关,如果禁止,该单元将不进行温控,每一单元的温度和 PID 参数可单独设定,通过修改写入的值,达到合适的温度控制。系统使用 DSP 内部的定时器产生精确的时间片;以定时器中断服务程序作为调度主程序,在定时器中断服务程序中设置一个变量,由该变量的值作为各个温控单元是否执行任务的依据^[10]。在时间片轮转调度算法中时间片长度的选取要合适,如果太短会导致过多的进程切换,从而降低 CPU 的效率;选取的时间片长度太长会造成温度控制响应时间延长,影响系统的灵敏度和稳定性。为了兼顾两方面的情况,经过合理的折衷,将时间片长度设为 50 ms。

3.2 温控算法

目前,温度控制网络的组成形式有数字方法和模拟方法两种。模拟方法通过电子元件组成比例、积分和微分电路,电路复杂且参数调节困难;数字 PID 算法调节分辨率高、灵活性强、参数调整方便,具有比模拟 PID 更低的功耗,广泛应用于激光器的温控系统中^[11]。在传统的数字 PID 控制过程中,只要系统存在偏差,积分的作用就会继续,当偏差较大时会出现积分饱和现象,使系统产生超调现象,对系统的稳定性和精确度产生很大影响^[12-14]。为了改善这一现象,系统采用了积分分离式数字 PID 算法。积分分离控制的思想是:当被控量与设定值的偏差较大时,取消积分作用,以提高系统的稳定性并减小超调量;当偏差较小时,引入积分作用,消除静态误差,以提高系统的控制精度。这样控制系统既保持了积分的作用,又减小了超调量,大大改善了控制性能。积分分离式 PID 算法可表示为

$$P(k) = K_p E(k) + K_i \sum_{j=0}^k E(j) + K_d [E(k) - E(k-1)], \quad (2)$$

$$K_i = \begin{cases} 0, & |E(k)| \geq E_0 \\ K_0, & |E(k)| < E_0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $E(k)$ 为第 k 次采样时输入的系统偏差值; $P(k)$ 为第 k 次采样时 PID 的输出值; E_0 为误差门限值; K_0 为设置的积分系数,为一个常数; K_p 、 K_i 和 K_d 分别为 PID 控制器的比例系数、积分系数和微分系数。 K_p 、 K_i 和 K_d 的大小是影响系统响应时间、稳定度及灵敏度的重要因素,选取合适的 PID 参数对系统的设计而言非常重要^[15]。系统采用临界比例带法整定 PID 参数,具体步骤为:去除积分和微分的作用,只用比例调节控制系统,即令积分时间无穷大,微分时间为零;系统开启后逐渐减小比例作用,直到系统出现等幅振荡,记录此时的比例系数 K_c ,得到振荡周期 T ;根据 K_c 和 T ,通过临界比例带法参数整定经验公式(表 1)计算 K_p 、 K_i 和 K_d ,即 $K_i = K_p T / T_i$, $K_d = K_p T / T_d$ (T_i 和 T_d 分别为积分时间和微分时间)。表 1 中 P 和 PI 分别为比例调节和比例积分调节。由于每个温度控制通道的电路参数不尽相同,因此每个通道的 PID 参数需要单独整定。

表 1 临界比例带法参数整定经验公式

Table 1 Empirical formula of critical proportional band parameter tuning method

Regulation type	Parameter		
	K_p/K_c	T_i/P_c	T_d/P_c
P	0.50		
PI	0.45	0.85	
PID	0.65	0.50	0.12

4 实验与结果分析

研制的多通道半导体激光器温控系统实物图如图 3 所示。利用该系统对中国科学院半导体研究所研制的中心波长分别为 1.65 μm 和 1.56 μm 的 DFB 激光器(LD1 和 LD2)进行温控实验和光谱测试。两个 DFB 激光器

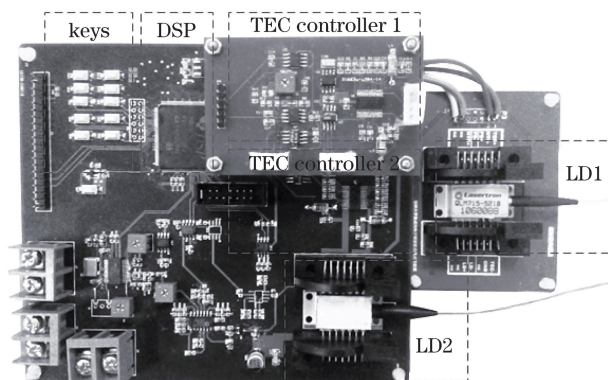


图 3 多通道半导体激光器温度控制系统实物图

Fig. 3 Physical picture of multi-channel semiconductor laser temperature control system

均采用蝶形封装,内部集成了热敏电阻和 TEC 控制模块。采用 +5 V 和 ± 12 V 线性电源为温控板供电,通过按键改变两个激光器的温度,激光器的工作温度由温度采集电路实时采集,通过串口将温度传输至上位机。

4.1 双路激光器温度控制实验

实验采用 60 mA 的直流电流驱动两个 DFB 激光器,LD1 的发射中心波长在 $1.654 \mu\text{m}$ 附近,典型工作温度为 25°C ,门限电流为 17.23 mA,输出电流为 60 mA 时功率为 5.34 mW;LD2 的发射中心波长在 $1.56 \mu\text{m}$ 附近,典型的工作温度为 45°C ,门限电流为 21.8 mA,输出电流为 60 mA 时功率为 2.6 mW。通过选择电桥的电阻值将 LD1 的温控范围设为 $20\sim 40^\circ\text{C}$,将 LD2 的温控范围设为 $35\sim 55^\circ\text{C}$ 。程序中初始状态下将 LD1 和 LD2 的工作温度分别设定为 29°C 和 44°C ,待工作温度稳定后通过按键将它们的设定温度分别改变为 30°C 和 45°C 。同时,采用 16 位 ADC LTC1864 以 2 Hz 的频率采样热敏电阻两端电压值,经过计算后得到对应的激光器温度值,并由串口输出,记录激光器工作温度的变化过程。设定 LD1 的初始工作温度为 29°C ,在第 7 s 按下按键使 LD1 的温度增加 1°C ,经过 3 s 后 LD1 的温度稳定在 30°C ,实验结果如图 4(a) 所示。同样,在第 1 s 按下按键使 LD2 的温度增加 1°C ,经过 3 s 后 LD2 的温度稳定在 45°C ,实验结果如图 4(b) 所示。从图中可以看出,LD1,LD2 两个温控通道的响应时间都为 3 s,在温度控制过程中没有出现反复的热振荡。

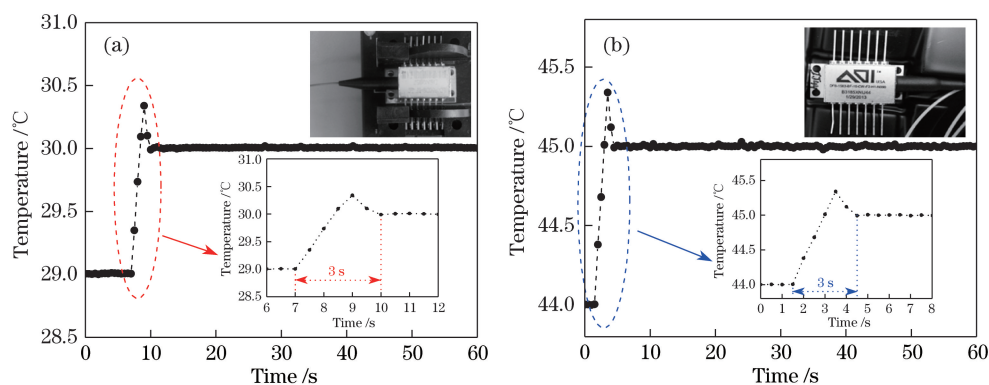


图 4 温度控制实验结果。(a) LD1; (b) LD2

Fig. 4 Temperature control experimental results. (a) LD1; (b) LD2

4.2 稳定性和误差

在气体检测过程中,激光器工作温度波动引起的中心波长偏移会极大地影响检测系统的性能,因此保持激光器工作温度的长期稳定性非常重要^[16]。将 LD1 的工作温度设置为 30°C ,LD2 的工作温度设置为 45°C ,保持两个激光器的工作电流恒定为 60 mA,在 6 h 内测得激光器的温度稳定性如图 5 所示。由图可见,在 6 h 的测试时间内,LD1 的温度波动范围为 $-0.006\sim 0.014^\circ\text{C}$,LD2 的温度波动范围为 $-0.011\sim 0.015^\circ\text{C}$ 。

4.3 光谱测试

将两个激光器的工作电流设置为 60 mA,通过温控系统同时控制两个激光器的温度,将 LD1 的温度以步进

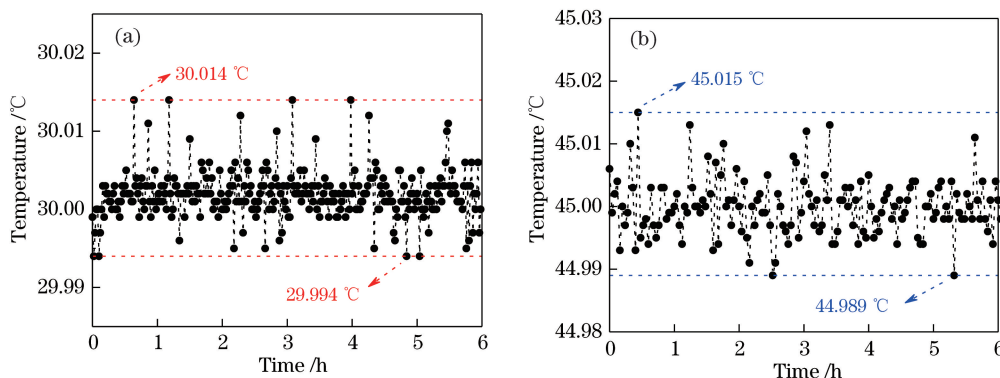


图 5 激光器温控稳定性测试结果。(a) LD1 在 30 °C 时的稳定性;(b) LD2 在 45 °C 时的稳定性

Fig. 5 Stability test results of laser temperature control. (a) Stability of LD1 at 30 °C ; (b) stability of LD2 at 45 °C

量为 1 °C 在 28~32 °C 区间内进行调整,将 LD2 的温度以步进量为 1 °C 在 41~45 °C 区间内进行调整。待温度稳定后采用傅里叶红外光谱仪(NICOLET6700FTIR 型, ThermoScientific 公司, 美国)分别测试两个激光器的光谱,实验结果如图 6(a)、(b)所示。结果表明,随着温度的升高,激光器输出波长的峰值增加,LD1 和 LD2 的波长温度系数分别为 0.93 nm/°C 和 1.05 nm/°C。测量激光器光谱时,由于入射光束角度没有很好地对准光谱仪,图中所测光谱根部出现反冲幅度,然而,这并不会对激光器出光光束质量的分析和判断产生影响。

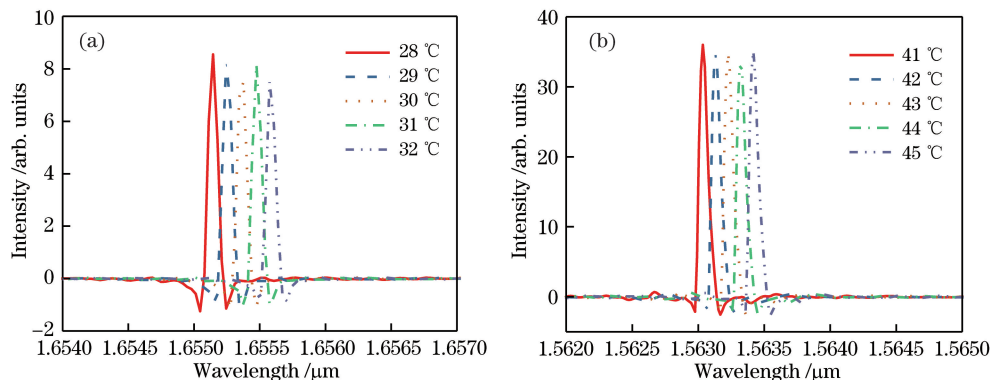


图 6 恒电流不同温度下激光器的输出光谱。(a) LD1; (b) LD2

Fig. 6 Output spectra of lasers with fixed current and various temperatures. (a) LD1; (b) LD2

为了测试温控系统的稳定性,将 LD1 的电流设置为 60 mA,温度设置为 30 °C;将 LD2 的电流设置为 60 mA,温度设置为 45 °C。保持两个激光器持续工作,每隔 2 h 测一次激光器的光谱,得到 5 组光谱,如图 7 所示。测试结果表明,得到的 5 条光谱曲线几乎重合,这说明在该温度控制系统的控制下,两个激光器的温度保持恒定,系统具有良好的稳定性。

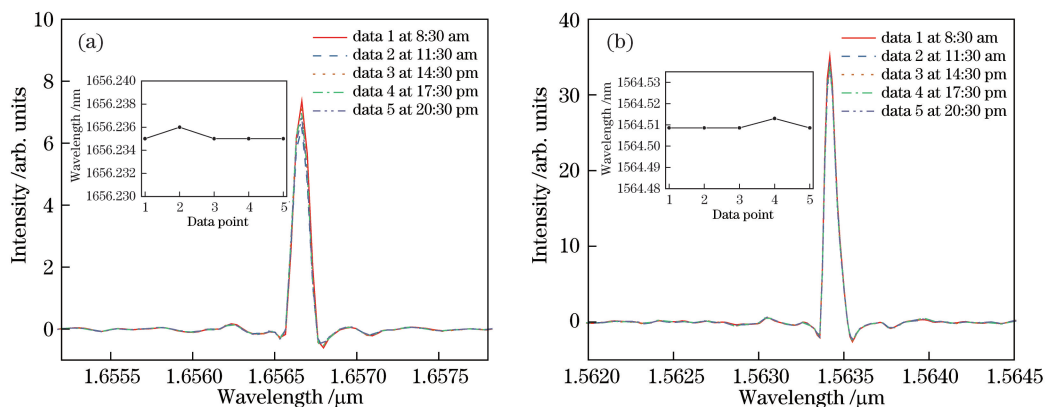


图 7 DFB 激光器发光光谱的稳定性测试。(a) LD1; (b) LD2

Fig. 7 Stability test of emitting spectrum of DFB laser. (a) LD1; (b) LD2

5 结 论

以实现混合气体检测为出发点设计了一种基于 DSP 的多通道半导体激光器温控系统;通过三线制电桥降低了环境温度变化对温控系统的影响;通过积分分离式数字 PID 控制算法在较短的响应时间内实现了对激光器温度的高精度控制;通过时间片轮转调度算法实现了对两个激光器温度的实时控制。用该系统对两个 DFB 激光器进行了温控实验并测试了激光器的光谱。实验结果表明,所研制的温控系统能够同时控制多个激光器的温度,温控范围符合实验要求。温控精度为 $-0.011\sim 0.015\text{ }^{\circ}\text{C}$,响应时间小于 3 s 且长时间稳定运行。通过增加温控单元的数目,该系统可以实现对 3 个乃至更多激光器温度的实时控制,这对于混合气体的检测有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Liu Bin, Tong Minming, Wang Jingjing, *et al.* Detection of multi-component mixed gas based on infrared absorption technology[J]. Safety in Coal Mine, 2011, 42(3): 5-8.
刘彬, 童敏明, 王晶晶, 等. 基于红外吸收技术的多组分混合气体检测的研究[J]. 煤矿安全, 2011, 42(3): 5-8.
- [2] Durry G, Lij S, Vinogradov I, *et al.* Near infrared diode laser spectroscopy of C_2H_2 , H_2O , CO_2 and their isotopologues and the application to TDLAS, a tunable diode laser spectrometer for the martian PHOBOS-GRUNT space mission[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2010, 99(1): 339-351.
- [3] Tu Xinghua, Liu Wenqing, Zhang Yujun, *et al.* 1.58 μm band of CO and CO_2 second harmonic detection with tunable diode laser absorption spectroscopy study[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(7): 1190-1194.
涂兴华, 刘文清, 张玉钧, 等. CO 和 CO_2 的 1.58 μm 波段可调谐二极管激光吸收光谱的二次谐波检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(7): 1190-1194.
- [4] Zheng C T, Ye W L, Li G L, *et al.* Performance enhancement of mid-infrared CH_4 , detection sensor by optimizing an asymmetric ellipsoid gas-cell and reducing voltage-fluctuation: Theory, design and experiment[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 160(1): 389-398.
- [5] Thompson A, Northern H, Williams B. Simultaneous detection of CO_2 and CO in engine exhaust using multi-mode absorption spectroscopy, MUMAS[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2014, 198: 309-315.
- [6] Dang Jingmin, Fu Li, Yan Zihui, *et al.* A review of mixed gas detection system based on infrared spectroscopic technique[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(10): 2851-2857.
党敬民, 付丽, 闫紫微, 等. 基于红外光谱技术的混合气体检测系统概述[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10): 2851-2857.
- [7] Chen Chen, Dang Jingmin, Huang Jianqiang, *et al.* DFB laser temperature control system with high stability and strong robustness[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2013, 43(4): 1004-1010.
陈晨, 党敬民, 黄渐强, 等. 高稳定强稳健性 DFB 激光器温度控制系统[J]. 吉林大学学报(工学版), 2013, 43(4): 1004-1010.
- [8] Li Bin, He Qixin, Fu Yang, *et al.* Development of near infrared distributed feedback laser temperature control system for CO detection[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s2): s214002.
李彬, 何启欣, 付洋, 等. 用于 CO 气体检测的近红外分布式反馈激光器温控系统[J]. 光学学报, 2014, 34(s2): s214002.
- [9] Lu Ning, Zhou Wei. Realization and application of time slice circular scheduling in C8051F020[J]. Modern Electronic Technique, 2005, 5: 26-27.
陆宁, 周伟. 时间片轮转调度在微控制器 C8051F020 中的实现及应用[J]. 现代电子技术, 2005, 5: 26-27.
- [10] Chen Dong, Zhang Bokun, Hu Xie, *et al.* Reaserch on the high resolution trace gas detection based on the difference-frequency mid-infrared spectrometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(6): 678-683.
陈东, 张伯昆, 胡燮, 等. 基于差频中红外激光的痕量气体高分辨光谱检测研究[J]. 光子学报, 2012, 41(6): 678-683.
- [11] Wang Zhuo, Min Kunlong, Bai Xuebing, *et al.* Temperature control of semiconductor laser in gas sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(6): 43-46.
王琢, 闵昆龙, 白雪冰, 等. 气体传感器中半导体激光器的温度控制[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(6): 43-46.
- [12] Scherer J J, Paul J B, Jost H J, *et al.* Mid-IR difference frequency laser-based sensors for ambient CH_4 , CO, and N_2O monitoring[J]. Applied Physics B, 2013, 110(2): 271-277.

- [13] Liu Jingwang, Du Zhenhui, Li Jinyi, *et al.*. Analytical model for the tuning characteristics of static, dynamic, and transient behaviors in temperature and injection current of DFB laser diodes[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(7): 074213.
刘景旺, 杜振辉, 李金义, 等. DFB 激光二极管电流-温度调谐特性的解析模型[J]. *物理学报*, 2011, 60(7): 074213.
- [14] Yuan Song, Kan Ruifeng, He Yabo, *et al.*. Laser temperature compensation used in tunable diode-laser absorption spectroscopy[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0515002.
袁松, 阚瑞峰, 何亚伯, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱中激光器温度补偿[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0515002.
- [15] Huang Jianqiang, Zhai Bing, He Qixin, *et al.*. A temperature controller for near-infrared semiconductor laser used in gas detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(6): 614003.
黄渐强, 翟冰, 何启欣, 等. 用于气体检测的近红外半导体激光器温控系统[J]. *光子学报*, 2014, 43(6): 614003.
- [16] Yao Lu, Liu Wenqing, Liu Jianguo, *et al.*. Research on open-path detection for atmospheric trace gas CO based on TDLAS[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0215003.
姚路, 刘文清, 刘建国, 等. 基于 TDLAS 的长光程环境大气痕量 CO 监测方法研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0215003.