

doi: 10.3788/gzxb20144306.0614003

用于气体检测的近红外半导体激光器温控系统

黄渐强¹, 翟冰¹, 何启欣¹, 叶玮琳², 郑传涛¹, 王一丁¹

(1 吉林大学 电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点联合实验室吉林大学实验区, 长春 130012)

(2 汕头大学 工学院, 广东 汕头 515063)

摘 要: 为了降低软件设计复杂度并提高分布反馈激光器发光波长的控制准确度及稳定性, 设计了一种用于气体检测的半导体激光器温度控制系统, 它由数字信号处理器、温度设定电路、温度采集电路、模拟比例-积分-微分电路、半导体制冷器控制电路等模块构成. 利用该系统对用于水汽检测、中心波长为 1 860 nm 的可调谐分布反馈激光器做了驱动实验, 结果表明: 该系统的有效控温范围为 10 °C~50 °C, 控温准确度为 ± 0.05 °C, 温度稳定时间小于 60 s; 改变温控系统的驱动电流和设定温度, 测得的激光器工作波长呈现出良好的调谐特性; 连续 4 天测得的 4 条光谱曲线几乎重合, 表明该系统具有良好的稳定性.

关键词: 半导体激光器; 温度控制; 红外光谱学; 模拟比例-积分-微分控制

中图分类号: TH83

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)06-0614003-6

A Temperature Controller for Near-infrared Semiconductor Laser Used in Gas Detection

HUANG Jian-qiang¹, ZHAI Bing¹, HE Qi-xin¹, YE Wei-lin²,
ZHENG Chuan-tao¹, WANG Yi-ding¹

(1 *State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun, 130012, China*)

(2 *College of Engineering, Shantou University, Shantou, Guangdong 515063, China*)

Abstract: In order to decrease the design complexity of software and to enhance the control stability and accuracy of distributed feedback laser's emitting wavelength, a temperature controller for semiconductor laser used in gas detection was developed, which includes digital signal processor, temperature setting circuit, temperature sampling circuit, analog proportion-integration-differential circuit, thermal electric colling control circuit, etc. A wavelength-tunable distributed feedback laser centered at 1 860 nm used for humidity detection was driven using the proposed temperature controller. Experimental results indicate that, the control scale on temperature is 10 °C~50 °C, the accuracy is ± 0.05 °C, and the temperature-established time is less than 60 s; with different driving current and temperature supplied by the system, the operation wavelength of the laser shows good tuning characteristics; the four spectral curves from four days' measurements almost coincide with each other, demonstrating stable performances of the controller.

Key words: Semiconductor lasers; Temperature control; Infrared spectroscopy; Analog proportion-integration-differential control

OCIS Codes: 140.3070; 140.2020; 140.5960; 300.6340

基金项目: 国家自然科学基金 (Nos. 61307124, 61077074), 国家科技支撑计划项目 (No. 2013BAK06B04), 吉林省科技发展计划项目 (Nos. 20120707, 201101036), 长春市国际合作项目 (No. 11GH01) 资助, 汕头大学科研启动基金 (No. NTF12022), 汕头大学青年科研基金 (No. YR12005)

第一作者: 黄渐强 (1984-), 男, 博士研究生, 主要从事红外气体检测方面的研究. Email: huangjq11@mails.jlu.edu.cn

导师 (通讯作者): 郑传涛 (1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光电子器件与系统方面的研究. Email: zhengchuantao@jlu.edu.cn

收稿日期: 2013-12-24; **录用日期:** 2014-01-24

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

近年来,随着半导体材料及工艺的进步,分布反馈式(Distributed Feedback, DFB)半导体激光器^[1-4]性能得到大幅度提升,其线宽愈来愈窄,从而增强了对待测气体的选择性.借助于可调谐激光二极管光谱吸收法(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS),通过改变激光器中心工作波长,可有效扫过待测气体吸收峰,因此,除光声光谱法^[5, 6]和直接光谱吸收法^[7-9]外,基于DFB激光器的TDLAS方法成为检测水汽、甲烷、一氧化碳等气体的常见方法^[10-15].

为了保证测量系统的稳定性和可靠性,稳定激光器的输出波长至关重要^[13, 15],为此,人们研究了多种温度控制系统或仪器.与模拟温控系统相比^[16-17],数字式温控系统硬件结构简单,但一般需采用复杂的数学算法来达到较高准确度.当系统工作负荷较大时,尤其是工作于对实时性要求严格的场合时,复杂算法的运算时间严重制约系统性能.现有的温度控制器(如美国Newport公司生产的350B温控仪^[18])体积较大且价格昂贵,无法集成在便携式气体检测系统中.研制出体积小、成本低、性能优越的温度控制器成为研制便携式气体检测系统的关键环节.

本文采用模拟比例-积分-微分(Proportion Integration Differential, PID)设计出一种板级温控系统,对其进行了温度控制实验和激光器光谱测试实验,并与商用温控仪器做了对比.

1 温度控制系统结构

图1为所设计温度控制系统的结构框图,包含DFB激光器(内置DFB激光二极管(DFB Laser Diode, DFBLD)、电阻温度检测器(Resistance Temperature Detectors, RTD)、半导体温度制冷器(Thermo Electric Cooler, TEC))、主控模块(Main Control Unit, MCU)、温度设置模块(Temperature Setting)、温度采集模块(Temperature Collection)、误差提取电路(Error Detector Circuit)、模拟PID控制模块、TEC控制模块等.系统主控芯片为32位浮点型数字信号处理器

(Digital Signal Processor, DSP, 型号:TMS320LF28335).采用数模转换器(Digital to Analog Converter, DAC, 型号:AD5541)输出的直流电压设置实际要求控制的温度值;利用桥式电路将激光器的热敏电阻转变为电压并利用模数转换器(Analog to Digital Converter, DAC, 型号:LTC1864)检测该电压以此监测激光器结温度的变化.根据封装在激光器内部热敏电阻的阻值,温度采集电路输出相应的电压信号,将该电压信号一路输入温度检测电路,用于处理器实时监测激光器温度值并输入显示单元,另一路输入误差提取电路,提取温度误差信号.温度误差信号分别输入比例放大电路、积分电路及微分电路处理,处理后的比例放大信号、积分信号及微分信号做相加处理后,送至TEC控制芯片.在DSP控制下,TEC控制芯片调节流过TEC的电流大小及方向,对其制冷或加热,从而控制激光器的工作温度.

2 系统关键模块设计

2.1 电源及抗干扰设计

为了保证温度控制的准确度,需要对系统工作电源进行滤波.各电源电压输入端口均并联接入电解电容和陶瓷电容,各集成芯片电源引脚也需并联陶瓷电容和聚丙烯电容来抑制电源纹波.ADC和DAC的基准稳压源为超低噪声、高精度度和低温度漂稳压器(型号:ADR435B),峰-峰值噪声电压为 $3.5 \mu\text{V}$,温度漂移是 $3 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$.该 5 V 电压分别经磁珠隔离后,一路为ADC和DAC提供基准电压,另一路为DAC和ADC转换器提供工作电压.

2.2 温度采集及误差输出电路设计

如图2所示,热敏电阻信号RTD与 R_1 、 R_2 和 R_3 构成桥路,同时利用仪表放大器(AD620)将温度信号转换为电压信号.该电压信号一路送入ADC,用于微控制器实时检测激光器的工作温度,对过温和欠温等状态做及时处理;另一路信号送入误差提取电路,其核心是单位增益差动放大器(型号:AD8276),它具有高共模抑制比和低温漂系数.

热敏电阻阻值RTD与仪表放大器输出电压的关系为

$$VT_{\text{sig}} = \left(1 + \frac{49.4\text{K}}{R_G}\right) \left(\frac{\text{RTD} \times V_{\text{REF}}}{\text{RTD} + R_3} - \frac{R_2 \times V_{\text{REF}}}{R_1 + R_2}\right) \quad (1)$$

式中 $R_G = 25 \text{ K}$, $R_1 = R_2 = 10 \text{ K}$, $R_3 = 5.1 \text{ K}$, $V_{\text{REF}} = 5 \text{ V}$,则 VT_{sig} 可近似表示为

$$VT_{\text{sig}} \approx 3 \times \left(\frac{\text{RTD}}{\text{RTD} + 5.1 \text{ K}} - 0.5\right) \times V_{\text{REF}} \quad (2)$$

如图3,根据热敏电阻曲线可知,当激光器温度为 10°C 时, $\text{RTD} = 20.31 \text{ K}$, $VT_{\text{sig}} = 4.489 \text{ V}$;当激光器温度为 40°C 时, $\text{RTD} = 5.298 \text{ K}$, $VT_{\text{sig}} = 0.1428 \text{ V}$,满足设

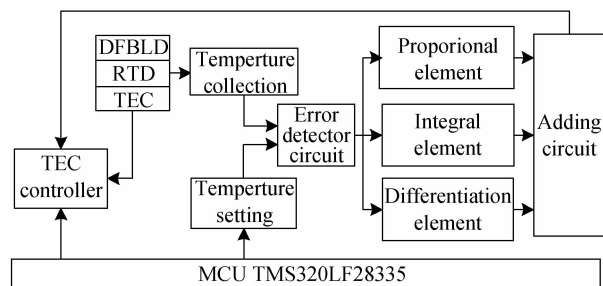


图1 半导体激光器温度控制器结构

Fig. 1 Structure of the temperature controller of semiconductor laser

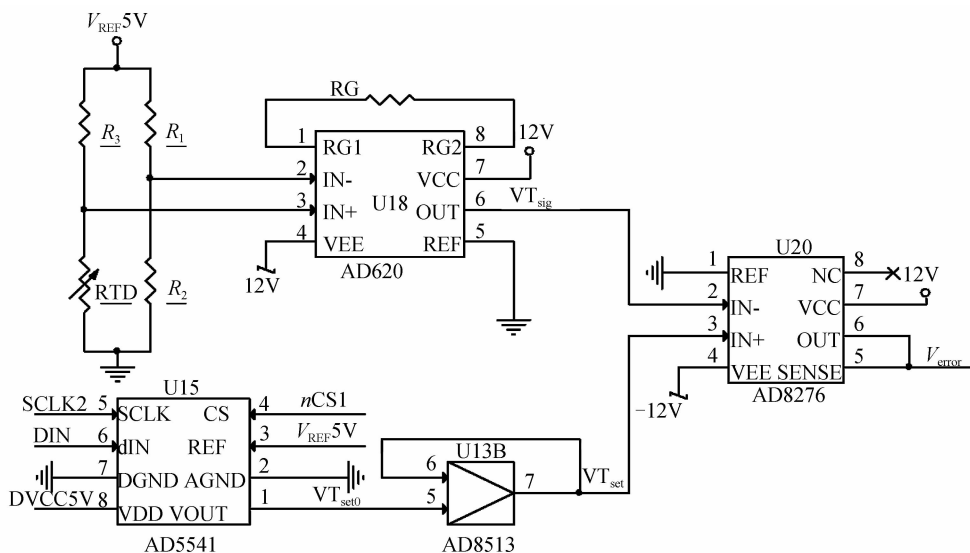


图 2 温度采集和差分电路
Fig. 2 Temperature sampling and differential circuit

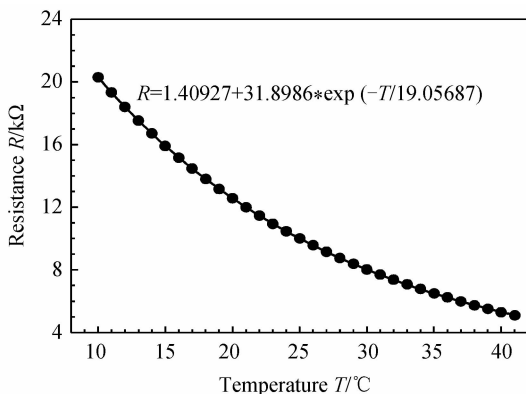


图 3 激光器热敏电阻阻值和工作温度的关系曲线
Fig. 3 Curve of thermal resistance versus operation temperature

设计的温度要求. 由于 AD8276 内部集成温度特性相近的电阻, 故不需外置电路来完成减法电路的配置, 误差信号电压值为

$$V_{error} = VT_{set} - VT_{sig} \quad (3)$$

2.3 模拟 PID 电路设计

由于激光器工作环境温度差异很大, 散热条件亦不相同, 很难根据激光器工作环境及该环境下激光器的散热情况构建精确的数学模型进行理论分析. 当被控对象的精确模型难以得到时, 经典控制理论也难以得到定性分析结果, 因此, PID 控制器的电路结构及参量必须根据现场调试现象来确定. 无论系统构成复杂与否, PID 理论总是对系统误差进行比例放大、积分及微分运算、输出调节量来使误差量降到最低. 比例放大控制器的输出电压正比于输入信号电压. 积分控制器的输出电压是对输入信号的积分, 用于消除系统静态误差. 微分控制器的输出电压是对输入信号的微分, 反映的是信号的变化程度. 设计中采用位置式 PID 算法, 可表示为

$$u(k) = K_P \left\{ e(k) + \frac{T}{T_1} \sum_{i=1}^k e(i) + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (4)$$

式中 $e(i) = y(i) - r(i)$ 为第 i 次采样时输入的系统控制偏差值, T 为采样周期, T_1 为积分时间常量, T_D 为微分时间常量. 比例项 $K_P e(k)$ 、积分项 $TK_P/T_1 \sum_{i=0}^k e(i)$ 和微分项 $(T_D K_P/T) [e(k) - e(k-1)]$ 这三部分构成了位置式 PID 算法.

所设计的模拟 PID 电路如图 4, 采用模拟电路实现比例、积分和微分功能. 设计中, D_1 、 D_2 选取前向导

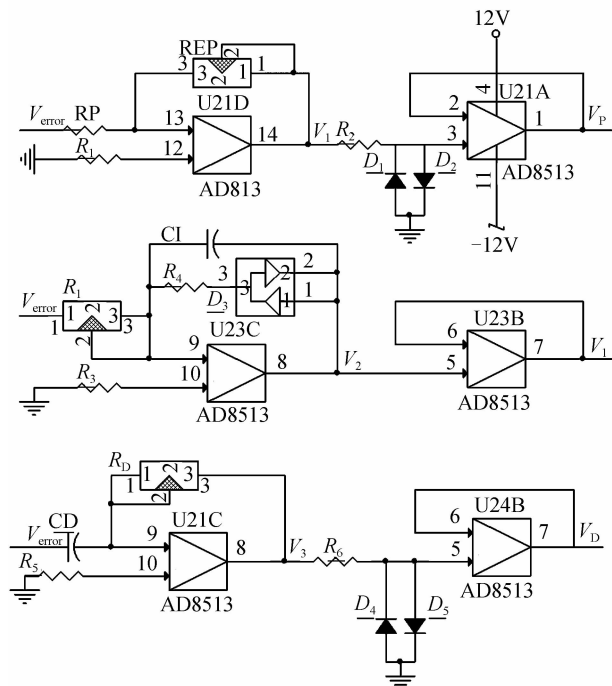


图 4 模拟 PID 控制电路
Fig. 4 Analog PID control circuit

通电压约为 0.8 V 硅二极管(型号:1N4148),它与电阻 R_2 完成对比例电压 V_1 的钳位。 D_3 (型号:BAT721S)内置一对背靠背二极管,前向导通电压约为 0.39 V。由于二极管电压电流呈 e 指数关系增长,二极管两端电压微弱变化导致流过二极管的电流急剧变化,当二极管的流过电流超过运放的输入电流时,过大的电流将烧毁运放的输入级,损害芯片功能,故串联电阻 R_1 限制流过二极管的激增电流,进而将积分器的输出电压 V_2 限制在 ± 0.4 V 范围内。 D_4 、 D_5 为导通电压 0.3 V 的锗二极管,它与电阻 R_6 完成对微分电压 V_3 的钳位。P、I、D 三个环节的输出电压为

$$V_P = \begin{cases} -\left(\frac{R_{fb}}{R_b}\right)V_{error} & |V_1| \leq 0.8V \\ \pm 0.8V & |V_1| > 0.8V \end{cases} \quad (5)$$

$$V_I = \begin{cases} -1/(R_1 C_1) \int V_{error} dt & |V_2| \leq 0.4V \\ \pm 0.4V & |V_2| > 0.4V \end{cases} \quad (6)$$

$$V_D = \begin{cases} -R_d C_d \frac{dV_{error}}{dt} & |V_3| \leq 0.3V \\ \pm 0.3V & |V_3| > 0.3V \end{cases} \quad (7)$$

采用临界比例法完成对电路参数的整定。电路的调节步骤为:1)选择激光器的环境温度为 10°C ;2)仅选择比例环节进行控制,调节比例系数,直到误差信号出现反复震荡为止;3)加入积分环节,反复调节积分系数,直到误差信号值最小;4)加入微分环节,进一步减小误差。将激光器的环境温度设置在 50°C ,重复上述步骤,比例系数取两者的最值,积分系数和微分系数取二者均值。仔细调节,直到积分系数和微分系数系统满足要求。

2.4 半导体制冷器(TEC)驱动电路设计

TEC 采用材料的珀尔帖效应研制,当直流电经过两种半导体材料组成的回路时,两个导体的接触面会根据电流流向的不同分别释放热能、吸收热能。本文利用 TEC 控制芯片(型号:MAX1968)实现对 DFB 激光器的恒温控制,它内置 1.5 V 基准电压源,当外加电压大于基准电压时,TEC 电流正向流动,实现对激光器的加热;当外加电压小于基准电压时,TEC 电流反向流动,实现对激光器的制冷。加热制冷的效果取决于流过电流的大小及材料的珀耳帖系数。MAX1968 的最大电流驱动能力是 ± 3 A,控制端口的输入电压范围为 ± 1.5 V。

3 实验与结果分析

3.1 实验测试装置

对系统软件和硬件集成后,所研制的半导体激光器温度控制器如图 5。利用该系统,对中国科学院半导体研究所研制的中心波长为 $1.862 \mu\text{m}$ 的 DFB 激光器(用于水汽检测)做了温度控制实验,激光器实物如图

5。实验中,一方面,利用光谱仪测量激光器的输出光谱,另一方面,DSP 将实时采集到的温度信息传递给 PC 机,以此检测激光器的工作温度。

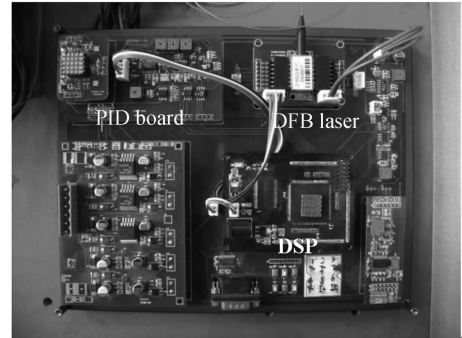


图 5 研制的温度控制系统和 $1.862 \mu\text{m}$ DFB 激光器
Fig. 5 The developed board-level temperature controller and $1.862 \mu\text{m}$ DFB laser

3.2 温度控制实验

实验中设定激光器的目标温度为 20°C ,实验室初始环境温度为 25°C 。在零时刻启动控温过程后,实验测得的激光器实时工作温度如图 6(a)。可以看到,激光器的实际温度可达到所设定的理论值,温度波动范围为 $(0.05 \sim +0.05)^\circ\text{C}$ 。由图 6(b)可知,从启动控温开始到温度最终达到稳定状态所需的时间约为 1 min。

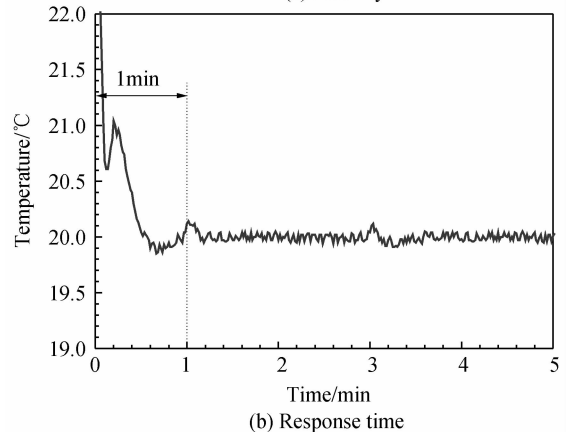
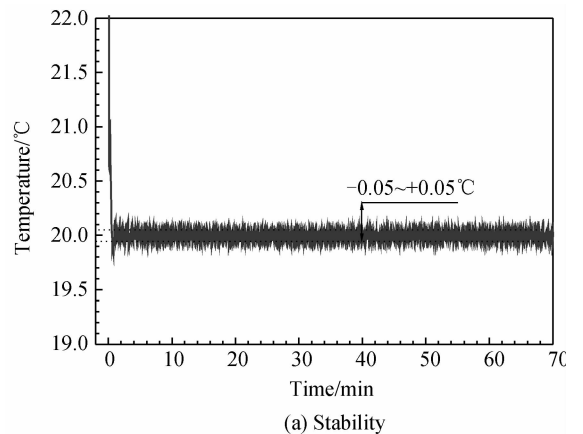


图 6 温度控制器稳定性和响应时间
Fig. 6 Stability and response time of the developed temperature controller

3.3 光谱测试

固定激光器的驱动电流为 50 mA,利用温度控制器使激光器工作在不同温度下(20~30 ℃),同时测量激光器的输出光谱,如图 7(a).由图可知,随着温度的增加,激光器峰值输出波长也随之增大.在 60 和 70 mA 的工作电流下,观察到同样的实验现象,如图 7(b)和 7(c).

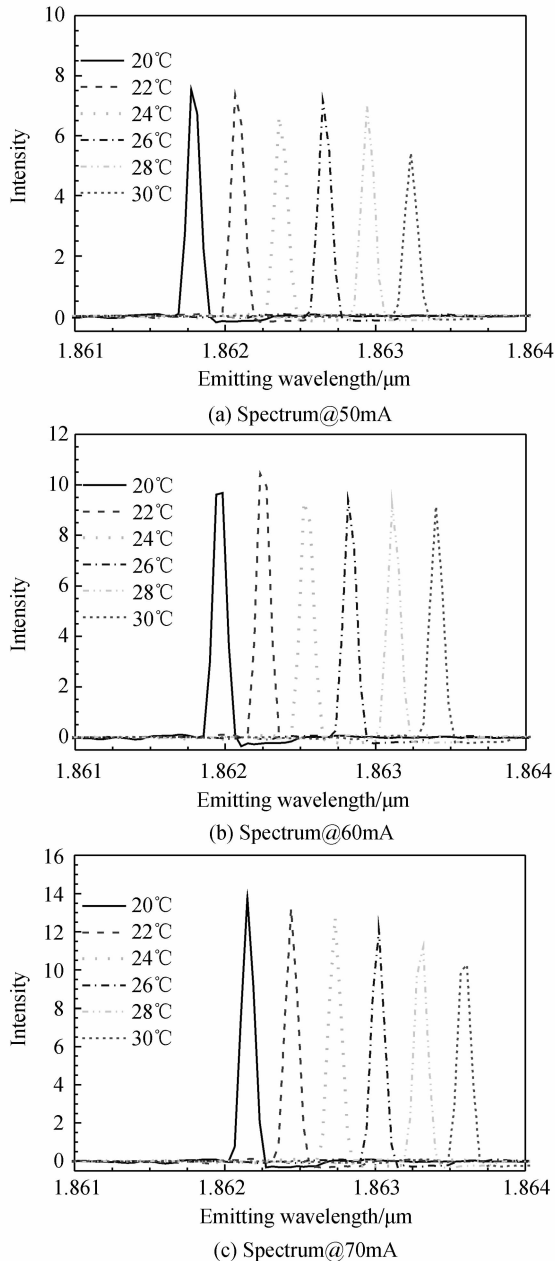


图 7 不同温度下激光器的输出光谱
Fig. 7 Emitting spectrum of the laser measured under different operation temperatures

另一方面,固定激光器的工作温度,逐渐增大其驱动电流,同时利用光谱仪测量激光器的输出谱,如图

8.可见在不同温度下,随着驱动电流的增加,激光器峰值发射波长与工作电流呈良好的线性关系.说明所研制的模拟 PID 温度控制器具有较好的性能.

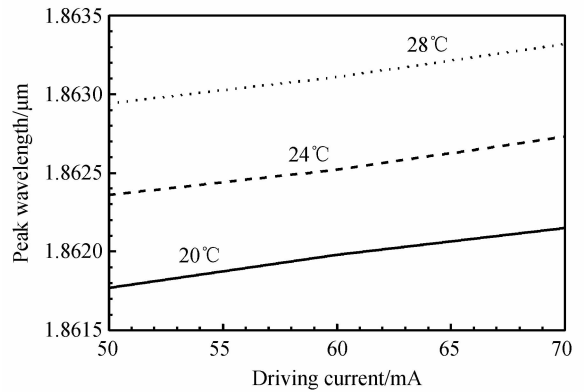


图 8 不同温度下,激光器峰值输出波长与驱动电流的关系
Fig. 8 Curves of peak wavelength versus driving current under different operation temperatures

3.4 稳定性

在气体检测中,为了提高检测的准确度和可靠性,需要确保激光器发光光谱的稳定性,这取决于激光器温度控制系统.利用所研制的系统,连续四天测量了同一个激光器的输出光谱,如图 9,其中激光器工作温度设定为 24 ℃、驱动电流设定为 60 mA.可以看到,测试得到的四条光谱曲线几乎重合,这说明该温度控制系统具有良好的稳定性.

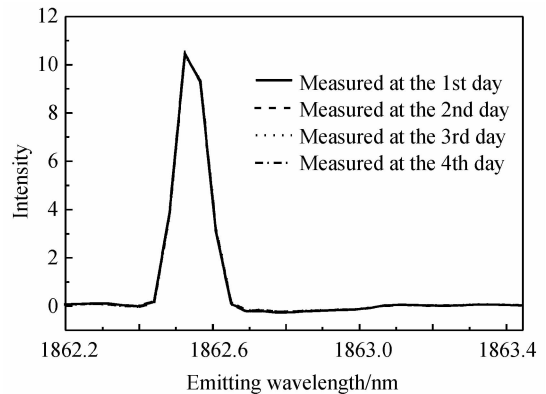


图 9 DFB 激光器发光光谱的稳定性测试曲线
Fig. 9 Measured stability of emitting spectrum of DFB laser

3.5 与商用温度控制器的性能对比

将所研制的温度控制器和美国 Newport 公司生产的商用温度控制器(350B)^[18]进行对比:二者同时设定激光器的工作温度为 24 ℃.在驱动电流分别为 50 mA 和 60 mA 情况下,测得激光器的发光谱如图 10.虽然二者的发光强度稍有不同(也可能是由于测试条件变动引起),但发光峰位是完全重合的.这表明,所研制的温度控制器的性能已达到商用仪器指标.

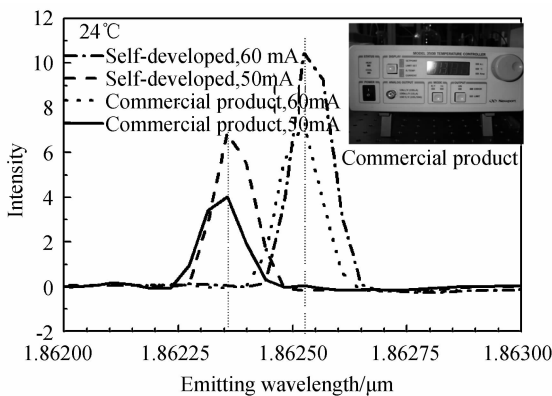


图 10 与商用锁相放大器的性能对比

Fig. 10 Performance comparison between our self-developed temperature controller and the commercial product

4 结论

本文设计了一种基于模拟 PID 并用于气体检测的半导体激光器温度控制系统。该温度控制系统的温度控制范围为 $10^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ ，温度控制的准确度为 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ ，系统的稳定时间小于 60 s。利用所研制的温度控制系统对波长为 1 860 nm 附近的可调谐 DFB 激光器做了光谱测试实验。当激光器驱动电流一定时，改变激光器工作温度可有效调谐激光器工作波长；当激光器工作温度一定时，测得的激光器峰值波长与驱动电流呈良好的线性关系；与商用温度控制器性能的对比结果表明，该温控系统具有可比拟的性能。

参考文献

- [1] CHEN Gang, ZHANG Fang-zheng, PAN Shi-long. An investigation on the multi-signal direct modulation of a reconstruction-equivalent-chirp distributed feedback laser diode [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(9): 1-7.
陈刚, 张方正, 潘时龙. 一种新型分布反馈半导体激光器的多信号直调性能研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(9): 1-7.
- [2] WANG Na, WANG An-bang, ZHANG Ming-jiang, et al. Gault location for WDM-PON by using a tunable chaotic fabry-perot laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1279-1286.
王娜, 王安帮, 张明江, 等. 利用可调谐的混沌 Faber-Perot 激光器实现波分复用无源光网络的断点检测[J]. *光子学报*, 2012, **41**(11): 1279-1286.
- [3] LIU Ying-ying, PAN Wei, JIANG Ning, et al. Properties of isochronal chaos synchronization of semiconductor lasers with multiple mutual time-delayed couplings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(9): 1023-1027.
刘莹莹, 潘伟, 江宁, 等. 多延时互耦合半导体激光器的实时混沌同步特性[J]. *光子学报*, 2012, **41**(9): 1023-1027.
- [4] CHEN Dong, ZHANG Bo-kun, 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.
- [5] KOSKINEN V, FONSEN J, KAUPPINEN J, et al. Extremely sensitive trace gas analysis with modern photoacoustic spectroscopy [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2006, **42**(2): 239-242.
- [6] ZENINARI V, GROSSEL A, JOLY L, et al. Photoacoustic spectroscopy for trace gas detection with cryogenic and room temperature continuous-wave quantum cascade lasers [J]. *Central European Journal of Physics*, 2010, **8**(2): 194-201.
- [7] ZHANG Yu, GAO Wen-zhu, SONG Zhen-yu, et al. Design of a novel gas sensor structure based on mid-infrared absorption spectrum [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, **147**(1): 5-9.
- [8] ZHENG Chuan-tao, YE Wei-lin, LI Guo-lin, et al. Performance enhancement of a 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.
- [9] YE Wei-lin, ZHENG Chuan-tao, YU Xin, et al. Design and performances of a mid-infrared CH_4 detection device with novel three-channel-based LS-FTF self-adaptive denoising structure [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, **155**(1): 37-45.
- [10] WANG Ren-bao, FENG Hong-yan. Laser absorption spectrometer methane detection system based on digital signal processor [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2010, **21**(1): 38-41.
王仁宝, 冯红艳. 基于数字信号处理器的激光光谱瓦斯监测系统[J]. *光电子·激光*, 2010, **21**(1): 38-41.
- [11] MARTIN P A. Near-infrared diode laser spectroscopy in chemical process and environmental air monitoring [J]. *Chemical Society Review*, 2002, **31**(4): 201-210.
- [12] WILLER U, SARAJI M, KHORSANDI A. Near-and mid-infrared laser monitoring of industrial processes, environment and security applications [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, **44**(7): 699-710.
- [13] DURRY G, LI J 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**: 339-351.
- [14] ZHANG Zhi-rong, DONG Feng-zhong, WU Bian, et al. In-suit measurement of HF gas in industrial situation based on TDLAS technology [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, **22**(11): 1691-1694.
张志荣, 董凤忠, 吴边, 等. 基于 TDLAS 技术的工业环境中 HF 气体在线监测[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(11): 1691-1694.
- [15] PENG Z, DING Y, CHE L, et al. Calibration-free wavelength modulated TDLAS under high absorbance conditions [J]. *Optics Express*, 2011, **19**: 23104-23100.
- [16] WANG Zhuo, MIN Kun-long, BAI Xue-bing, 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.
- [17] HUO Jia-hao, LI Hong-zuo. Design of temperature control circuit for semiconductor laser [J]. *Modern Electronics Technique*, 2013, **36**(20): 153-156.
霍佳皓, 李洪祚. 半导体激光器温度控制电路设计[J]. *现代电子技术*, 2013, **36**(20): 153-156.
- [18] <http://www.newport.com/350B-Series-Laser-Diode-Thermoelectric-Temperatur/358814/1033/info.aspx>.