

用于 SERF 原子磁力仪的 DFB 激光器温度控制系统

陈 晨^{1,2}, 秦佳男^{1,2}, 张 雪^{1,2}, 林 君^{1,2}, 王言章^{1,2}

(1. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130061;

2. 吉林大学 地球信息探测仪器教育部重点实验室, 吉林 长春 130061)

摘 要: 由于分布反馈式(DFB)激光器的工作温度会影响其激光波长,降低无自旋交换弛豫(SERF)原子磁力仪的磁场测量灵敏度,以 TMS320LF2812 为核心控制器,采用数字比例-积分-微分(PID)控制技术,设计并研制了一种高精度、高稳定性 DFB 激光器温度控制系统。在硬件电路设计方面,由温度控制前向通路和温度采集后向通路组成,构成完整的闭环温度控制结构。软件设计中,采用 Ziegler-Nichols 工程整定方法,实现对 P 、 I 和 D 三个参数的整定。以中心波长为 852 nm 的 DFB 激光器为被控对象,利用该温度控制系统对其进行了温度控制实验。实验结果表明:系统的有效控温范围为 5~60 °C,控温精度为 ± 0.02 °C,稳定时间为 20 s。并且在长时间(220 min)测试中,DFB 激光器工作温度稳定性优于 7.9×10^{-4} (RMS),为其在 SERF 原子磁力仪的实用化方面提供了性能保障。

关键词: 分布反馈式激光器; 数字比例-积分-微分(PID)控制技术; Ziegler-Nichols 工程整定方法; 温度控制系统

中图分类号: TP271.5 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1205004

Temperature controller for DFB laser utilized in SERF atomic magnetometer

Chen Chen^{1,2}, Qin Jianan^{1,2}, Zhang Xue^{1,2}, Lin Jun^{1,2}, Wang Yanzhang^{1,2}

(1. College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. Key Laboratory for Geophysical Instrumentation of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130061, China)

Abstract: As the working temperature can affect emitting wavelength of distributed feedback (DFB) laser and reduce measurement sensitivity of magnetic field of Spin-Exchange-Relaxation-Free (SERF) atomic magnetometer, a DFB lasers' temperature controller with high-precision and high stability was designed and developed by using digital proportional-integral-differential (PID) control technology, which is based on TMS320LF2812 core controller. In terms of hardware design, the temperature controller consists of temperature control forward pathway and temperature acquisition backward pathway to form a complete closed-loop temperature control structure. In consideration of software design, the three parameters P , I

收稿日期: 2016-04-05; 修订日期: 2016-05-10

基金项目: 国家自然科学基金(61403160); 第 55 批中国博士后面上基金(2014M551194);

吉林省科技厅项目(20150414052GH, 20140520118JH);

地球信息探测仪器教育部重点实验室基本科研业务费(450060521038)

作者简介: 陈晨(1983-), 男, 副教授, 博士, 主要从事弱磁检测系统技术及应用方面的研究。Email: cchen@jlu.edu.cn

通讯作者: 王言章(1979-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事弱磁检测系统技术及应用方面的研究。Email: yanzhang@jlu.edu.cn

and D are determined by using Ziegler-Nichols engineering setting method. Using the aforementioned temperature controller, a temperature controlling test was performed on a DFB laser with a center wavelength at 852 nm. Experimental results indicate that, the control scale is 5–60 °C, the accuracy is ± 0.02 °C, and the control procedure is 20 s. Meanwhile, the stability of working temperature is better than 7.9×10^{-4} (RMS) during long term (220 min) running, which provides performance guarantee for SERF atomic magnetometer in practical application.

Key words: distributed feedback laser; digital proportional-integral-differential control technology; Ziegler-Nichols engineering setting method; temperature controlling system

0 引言

近些年,弱磁检测技术在空间探测、生物医疗(心磁、脑磁检测)、地球深部勘探等方面得以广泛应用,对磁力仪的磁场探测灵敏度指标要求也随之增加。基于量子光学与原子物理学的 SERF 原子磁力仪的磁场探测灵敏度可达到 fT 量级,具有广阔的应用前景。同时,由于 DFB 激光器具有高能量密度、窄输出线宽和强单色性等优点,使其非常适合成为 SERF 原子磁力仪的泵浦和检测光源^[1-4]。当 DFB 激光器工作温度增加时,其激光波长随之增加,产生红移现象。反之,产生蓝移现象。二者均会对 SERF 原子磁力仪的磁场探测灵敏度造成影响。所以,研制高精度、高稳定性 DFB 激光器温度控制器成为 SERF 原子磁力仪的核心技术之一^[5-7]。

国外某些厂商(如 Newport、Thorlabs 和 ILX Lightwave)均已商品化 DFB 激光器温度控制器^[8]。其温度控制范围为 -100~200 °C,控制精度为 ± 0.2 °C。虽然少量型号仪器的性能能够满足项目指标要求,但是价格昂贵,且体积庞大、集成度不高,无法集成在便携式 SERF 原子磁力仪中,不适合在野外复杂环境下应用。国内生产 DFB 激光器温度控制器厂商主要以上海远东仪表厂为代表^[8]。其温度控制范围为 -20~110 °C,控制精度为 ± 0.25 °C,温度控制精确度和稳定度均不高,也存在体积庞大、集成度不高的问题。

考虑到以上 DFB 激光器温度控制器的现状,结合实际项目指标的需求,采用数字 PID 控制技术,自主设计并研制了控温范围为 5~60 °C、控温精度为 ± 0.02 °C、工作温度稳定优于 7.9×10^{-4} (RMS) 的 DFB 激光器温度控制系统,具有实际应用价值。

1 硬件系统设计

1.1 系统概述

该 DFB 激光器温度控制系统的硬件部分由温度控制前向通路和温度采集后向通路组成,结合数字 PID 控制技术,如图 1 所示。

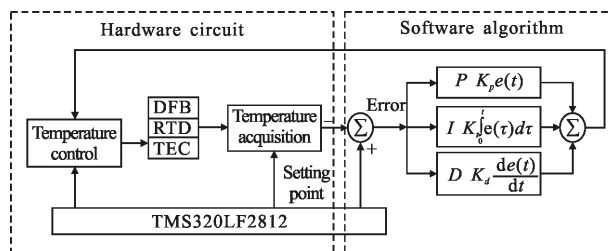


图 1 DFB 激光器温度控制系统结构

Fig.1 Structure of the temperature controller of DFB laser

DFB 激光器为蝶形封装,包括电阻温度检测器(RTD)和热电制冷器(TEC)。其中,RTD 与 DFB 激光器紧密连接,用于实时测量 DFB 激光器工作温度,TEC 放置在 DFB 激光器与热沉之间,用于调节其工作温度。该系统选用 32 位高速数字信号处理器—TMS320LF2812 为核心控制器,以数模转换器(DAC)和 TEC 控制模块组成温度控制前向通路,以惠更斯桥式放大电路和模数转换器(ADC)组成温度采集后向通路。

由于 RTD 能够检测 DFB 激光器工作温度,TMS320LF2812 可以通过以其为传感前端的温度采集后向通路,实时地探测 DFB 激光器工作温度。利用数字 PID 控制算法,通过温度控制前向通路控制 TEC 调节 DFB 激光器工作温度,最终使 DFB 激光

器的工作温度得以把控。同时，该系统能够对流过 TEC 的电流进行实时的监测并对加热或制冷电流进行限制,使 DFB 激光器和 TEC 免受损伤。

1.2 温度控制前向通路

温度控制前向通路由 DAC 和 TEC 控制模块组成,如图 2 所示。

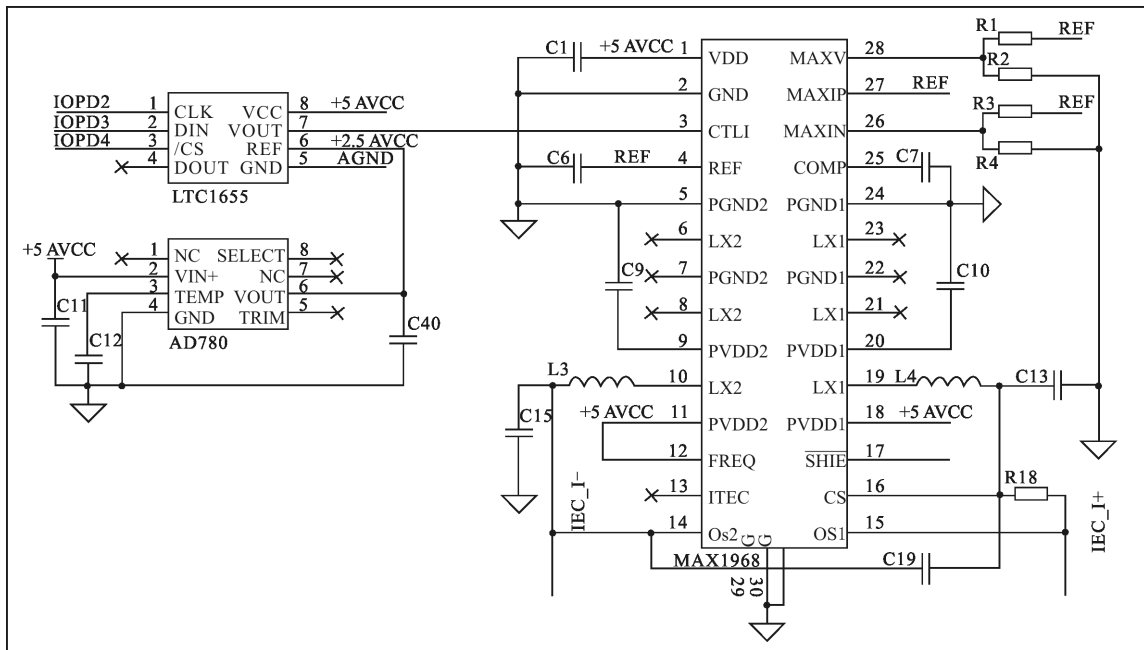


图 2 温度控制前向通路框图

Fig.2 Diagram of temperature control forward pathway

TEC 是利用半导体材料的“帕尔贴效应”制作而成的^[9]。当电流流过半导体材料时,两个不同材料的导体根据电流的不同方向会在接触表面分别吸收热量或释放热量。为了对 DFB 激光器的温度进行有效的控制,需要对 TEC 电流的方向和大小进行准确的控制。当 DFB 激光器工作温度超过预设温度时,采用 DCA 通过 TEC 对 DFB 激光器工作温度进行冷却处理。当 DFB 激光器工作温度低于预设温度

时,通过 TEC 对 DFB 激光器工作温度进行升温处理。流过 TEC 电流方向决定是加热处理还是致冷处理。流过 TEC 电流大小决定加热或致冷的速率。其中,DAC 选择为 16 位低功耗串行芯片-LTC1655,TEC 控制芯片选为专业集成控制芯片-MAX1968。

1.3 温度采集后向通路

温度采集后向通路由惠更斯桥式放大电路和 ADC 组成,如图 3 所示。

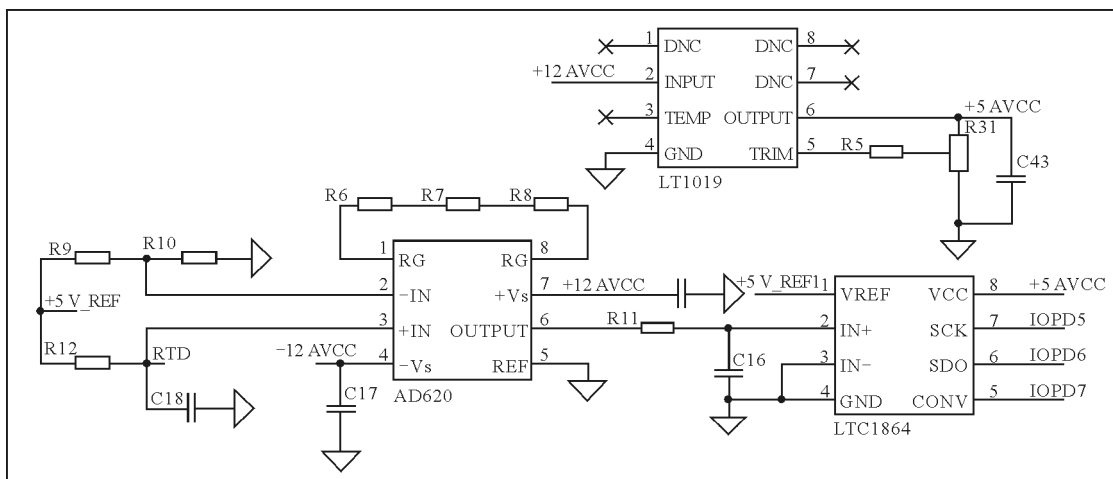


图 3 温度采集后向通路框图

Fig.3 Diagram of temperature acquisition backward pathway

电阻 R9、R10 和 R12 与负温度系数 RTD 组成惠更斯电桥，该桥式电路与专用仪表放大器共同构成温度检测电路。TMS320LF2812 通过 ADC 将温度模拟量转换为数字量，对 DFB 激光器工作温度进行实时监控，将实时工作温度与预设温度进行比对和误差计算，做出调整，最终实现对 DFB 激光器工作温度的控制。为了达到较高的检测精度，桥式电路中的电阻 R9、R10 和 R12 选择具有相同温度漂移系数的精密电阻，来减小外部温度变化对模拟电路控制精度的影响。选取输入噪声低、温漂系数低的专业仪表放大器—AD620，抑制了因放大器引入噪声的影响。ADC 选用 16 位低功耗串行芯片—LTC1864，提高温度采集后向通路的检测精度。

2 数字 PID 控制技术

2.1 数字 PID 算法

虽然模拟 PID 算法响应速度快，但是 P 、 I 和 D 控制参数为固定值，很难做出改变，给实际 P 、 I 和 D 参数调节带来困难。随着集成芯片技术的发展，涌现大量的数字信号处理芯片，使其成为数字 PID 控制系统的核心。数字 PID 算法是将模拟 PID 在时间轴上进行离散量化后，然后采用 P 、 I 和 D 控制环节将实际值和预设值进行偏差运算，进而对系统输出值进行调整，使系统输出呈现阻尼式衰减震荡，最终趋近于预设值，表达形式如下：

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i) + \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (1)$$

式中： $e(k)$ 为第 k 个时间点，预设值与系统响应的偏差值； T 为控制系统的采样时间； T_i 为控制系统的积分时间； T_d 为控制系统的微分时间。

2.2 Ziegler–Nichols 工程整定方法

实际中，由于被控系统结构复杂，数学模型逼真度不高，与真实系统存在较大差异，往往采用工程整定方法，即不需要建立结构复杂的数学模型，采用经验公式，实现对控制参数 P 、 I 和 D 的确定。该系统采用 Ziegler–Nichols 工程整定方法，经验参数如表 1 所示。

实现过程如下：

(1) 对系统进行初始化，消除公式(1)中的积分项和差分项，即令 I 和 D 为零，只存在比例项。

表 1 Ziegler–Nichols 工程整定方法经验参数

Tab.1 Empirical parameters of Ziegler–Nichols engineering setting method

Regulator	$\delta/\%$	T_I/min	T_D/min
P	$2\delta_{pr}$		
PI	$2.2\delta_{pr}$	$0.85T_{pr}$	
PID	$1.67\delta_{pr}$	$0.5T_{pr}$	$0.125T_{pr}$

(2) 调整比例系数 P ，待系统输出为等幅振荡时，此时的比例系数为临界比例带参数 δ_{pr} ，震荡周期为 T_{pr} ，如图 4 所示。

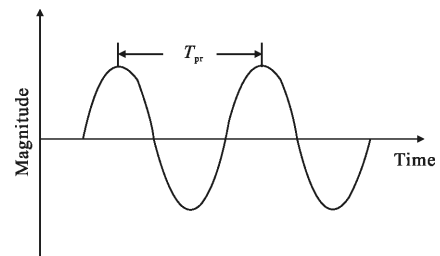


图 4 系统等幅振荡响应曲线

Fig.4 System response curve with persistent magnitude oscillation

(3) 采用如表 1 所示的经验参数，计算控制系统 P 、 I 和 D 三个参数。

3 温度控制系统性能测试

以中心波长为 852 nm 的 DFB 激光器为被控对象，在室温(25 ℃)条件下，采用该温度控制系统，对其进行了温度控制性能测试。图 5 为 DFB 温度控制系统实物图。

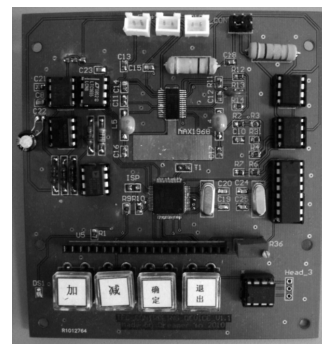


图 5 温度控制系统实物图

Fig.5 Picture of temperature controller system

该 DFB 激光器内部集成热电制冷器 TEC 和负温度系数的 RTD 热敏电阻，为蝶形封装^[10–12]。温度控制系统通过双绞线与 DFB 激光器相连。同时，该温

度控制系统还集成串行接口,可与计算机进行通信。

3.1 Ziegler-Nichols 工程整定方法实验

实验中,令积分环节和微分环节为零,调节比例环节的参数 P 进行 DFB 激光器温度控制实验。目的是为了寻找纯比例控制系统临界过程的参数。预设目标温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 令积分环节和微分环节为零,逐渐调节比例环节参数 P 。当 P 为 75 时($K_p=75$),DFB 激光器工作温度曲线出现等幅振荡情况,处于临界状态,如图 6 所示。

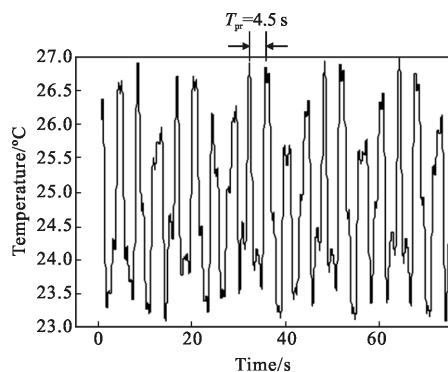


图 6 工作温度等幅振荡曲线

Fig.6 Curve of working temperature with persistent magnitude oscillation

从图 6 可以得出: 振荡周期 $T_{pr}=4.5\text{ s}$, 则 $\delta_{pr}=1/K_p=0.0133$ 。由表格 1 可得: $\delta=1.67 \cdot \delta_{pr}=0.0223$, $T_I=0.5 \cdot T_{pr}=2.25\text{ s}$, $T_D=0.125 \cdot T_{pr}=0.5625\text{ s}$ 。令控制系统采样时间为 1 s , 则 $K_p=1/\delta=44.84$, $K_I=K_p \cdot T/T_I=19.93$, $K_D=K_p \cdot T_D/T=25.22$ 。

3.2 温度控制范围实验

为了满足项目指标要求,温度控制系统能够实现 $5\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度控制范围。其中,预设目标温度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 DFB 激光器温度控制曲线如图 7 和图 8 所示。

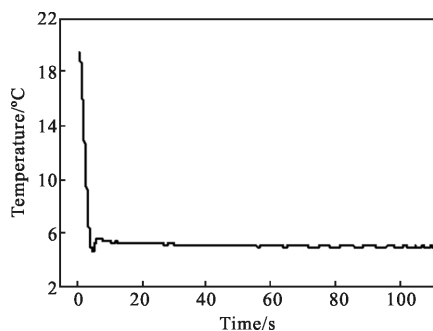


图 7 目标温度 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度控制曲线

Fig.7 Temperature control curve when target temperature is $5\text{ }^{\circ}\text{C}$

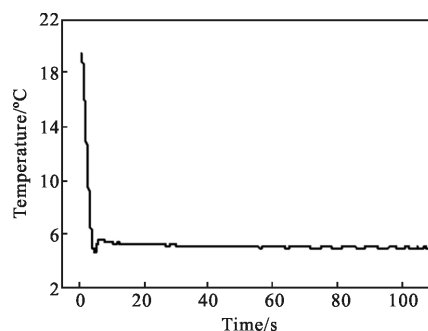


图 8 目标温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度控制曲线

Fig.8 Temperature control curve when target temperature is $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

实验表明,当 DFB 激光器工作温度为 $5\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,工作温度稳定,温度控制系统性能良好。由于 TEC 功率有限,当目标温度超出此温度范围时,温度控制曲线会出现较大波动,温度控制性能下降。

3.3 温度控制精度实验

将 $K_p=44.84$ 、 $K_I=19.93$ 、 $K_D=25.22$ 带入数字 PID 控制算法,对 DFB 激光器温度控制进行了实验,预设目标温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度控制曲线如图 9 所示。

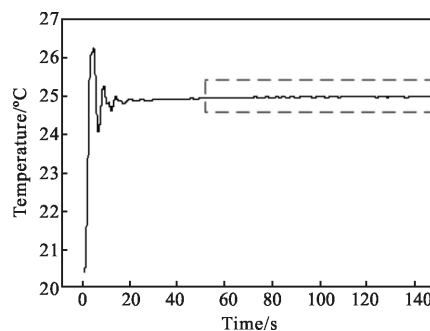


图 9 温度控制曲线

Fig.9 Temperature control curve

如图 9 所示,DFB 激光器的工作温度经过初始超调和阻尼式衰减振荡后,在 20 s 时进入稳定状态。其中,对 DFB 激光器稳定状态(虚线方框)进行放大,得到如图 10 所示的温度曲线。

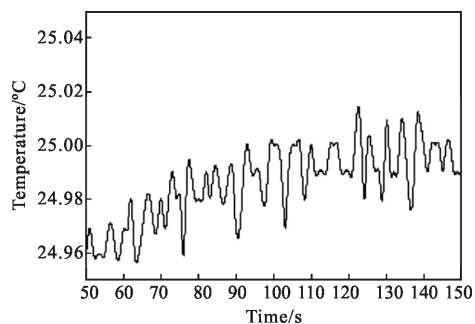


图 10 温度控制曲线放大图

Fig.10 Enlarged view of temperature control curve

从图 10 可知温度控制系统运行 100 s 后, 温度的控制精度优于 $\pm 0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3.4 温度控制稳定度实验

实验中, 对 DFB 激光器温度控制系统的稳定性进行了测试。预设目标温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在 220 min 的时间内, 每隔一秒记录一次 DFB 激光器的工作温度, 测试曲线如图 11 所示。

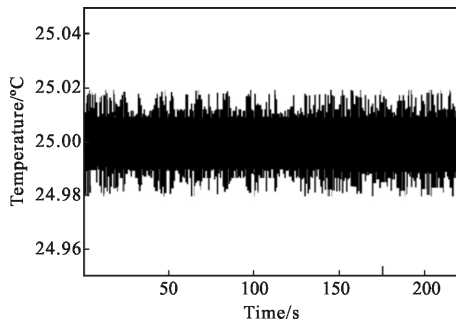


图 11 长期稳定性测试结果

Fig.11 Long term stability test result

从图中可以发现: 温度控制曲线在整个时间段内稳定。温度均值为 $25.000435\text{ }^{\circ}\text{C}$, 工作温度最大偏差为 $0.019823\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度控制长期稳定度优于 $7.9 \times 10^{-4}(\text{RMS})$ 。

3.5 DFB 激光器光谱测试实验

随着工作温度的变化, DFB 激光器的输出波长也随之改变。在实验中, 选择中心波长为 852 nm 的 DFB 激光器进行光谱测试实验, 采用傅里叶红外光谱仪(分辨率为 0.125 cm^{-1}) 测量 DFB 激光器的发射光谱。其具体实验步骤如下所述: (1) 设定激光器的工作电流为 40 mA , 控制 DFB 激光器分别在 $39\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $42\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下工作。此时, 分别测量 DFB 激光器输出的光谱, 测量结果如图 12(a) 所示。由图 12(a) 可知, DFB 激光器输出中心波长随着工作温度的增加随之增大。(2) 设定 DFB 激光器的工作电

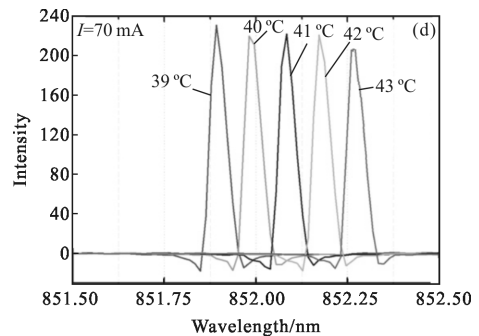
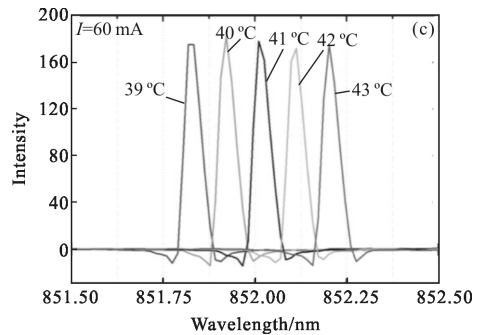
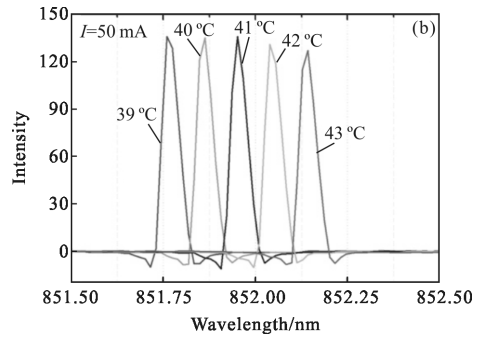
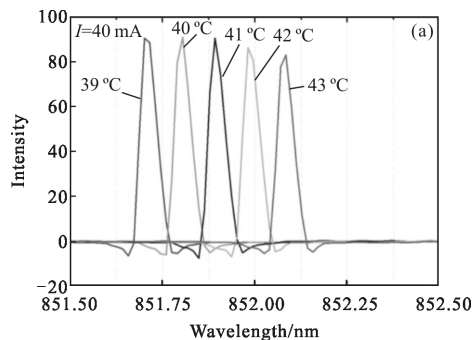


图 12 不同工作温度下 DFB 激光器的输出光谱

Fig.12 Output spectrum of DFB laser at different working temperatures

流分别为 50 mA 、 60 mA 和 70 mA , 重复上述步骤, 利用傅里叶红外光谱仪对 DFB 激光器输出的光谱进行测量, 测量结果如图 12(b)、12(c)、12(d) 所示。由图可知, 随着 DFB 激光器工作温度的增加, 其激光器输出中心波长随之增大。

在实际应用中, 为了能够控制 DFB 激光器激光波长, 利用上述光谱测试实验数据, 建立了 DFB 激光器激光波长与注入电流和工作温度的图谱, 如图 13 所示。

可以看出, 当 DFB 激光器的工作温度恒定时, 其输出中心波长与工作电流呈稳定的线性关系。当 DFB 激光器的工作电流恒定时, 改变激光器的工作

温度能够有效地调谐 DFB 激光器的中心波长。根据实验数据,得到 DFB 激光器两个重要的参数:电流调谐系数和温度调谐系数。数据表明:DFB 激光器的电流调谐系数为 0.06 nm/mA, 温度调谐系数为 0.08 nm/°C。

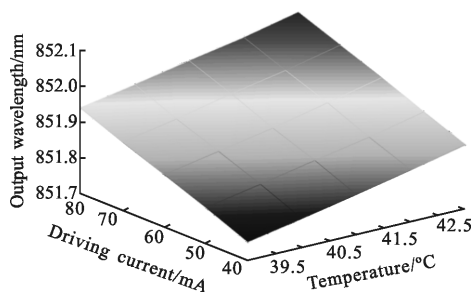


图 13 DFB 激光器发射波长图谱

Fig.13 Spectrum map of DFB laser emitting wavelength

4 结论

文中以 TMS320LF2812 为核心控制器,采用数字 PID 控制技术,设计并研制了一种高精度、高稳定性 DFB 激光器温度控制系统。硬件方面,采用温度控制前向通路和温度采集后向通路构成了 DFB 激光器温度控制系统。软件方面,采用 Ziegler-Nichols 工程整定方法对控制参数 P 、 I 和 D 进行确定,克服了数学模型表达复杂系统逼真度不高的问题。对中心波长为 852 nm 的 DFB 激光器进行了温度控制测试,系统的有效控温范围为 5~60 °C,控温精度为 ± 0.02 °C,稳定时间为 20s。并且在长时间(220 min)运行中,工作温度稳定(优于 7.9×10^{-4} (RMS)),为 DFB 激光器在弱磁检测领域的实用化提供了性能保障。

参考文献:

- [1] Shan Xiaonan, Liu Yun, Cao Junsheng. 808 nm kW-output high-efficiency diode laser sources [J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(2): 452-456. (in Chinese)
- [2] 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.(in Chinese)
- [3] Xia Jinbao, Liu Zhaojun, Zhang Sasa, et al. Design of semiconductor laser quick temperature control system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 1991-1995. (in Chinese)
- [4] Li Jianglan, Shi Yunbo, Zhao Pengfei, et al. High precision thermostat system with TEC for laser diode[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1745-1748. (in Chinese)
- [5] Chen Chen, Newcomb Robert W, Wang Yiding. A trace methane gas sensor using mid-infrared quantum cascaded laser at 7.5 μm [J]. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 2013, 113(4): 491-501.
- [6] Zou Wendong, Ye Qin, Xie Haihe, et al. LD temperature control based on TMS320F2812 [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 642-645. (in Chinese)
- [7] Chen Chen, Wang Biao, Li Chunguang, et al. A trace gas sensor using mid-infrared quantum cascaded laser at 4.8 μm to detect carbon monoxide [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(3): 838-842. (in Chinese)
- [8] Tian Xiaojian, Shang Zuguo, Gao Bo, et al. Control system for 980 nm high stability laser pump source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(4): 982-987. (in Chinese)
- [9] Cong Menglong, Li Li, Cui Yansong, et al. Design of high stability digital control driving system for semiconductor laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18 (7): 1629-1636. (in Chinese)
- [10] Tong Cunzhu, Wang Lijie, Tian Sicong, et al. Study on Bragg reflection waveguide diode laser [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3):480-498.
- [11] Tian Zhenhua, Sun Chenglin, Cao Junsheng, et al. Junction temperature measurement of high power diode lasers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(6): 1244-1249. (in Chinese)
- [12] Fu Xihong. Diode-pumped all-solid-state sum-frequency mixing laser at 608.1 nm [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 794-799. (in Chinese)