

半导体激光器温度控制电路设计及实验研究^{*}贺春贵^{1,2} 张玉钧¹ 刘国华^{1,2} 唐七星^{1,2} 鲁一冰^{1,2} 尤 坤¹ 何 莹¹ 刘文清¹

(1. 中国科学院环境光学与技术重点实验室 安徽光学精密机械研究所 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学 合肥 230026)

摘 要: DFB 可调谐二极管激光器是激光光谱测量系统中的最主要部件之一, 它的输出波长与辐射功率的稳定性决定测量系统的稳定性。影响 DFB 可调谐二极管激光器输出波长和输出功率的因素主要为激光器的注入电流和工作温度, 而工作温度对输出特性的影响更大。设计了激光器温度控制电路, 并实验分析了 PI 参数对温度控制稳定性的影响以及温度控制的短期稳定性; 将设计电路应用在 DFB 可调谐二极管激光器上进行激光器输出波长与输出功率的长期监测, 得到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。

关键词: 可调谐二极管激光器; 温度控制; 温度稳定性

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Design and experimental study on temperature control circuit of semiconductor laser

He Chungui^{1,2} Zhang Yujun¹ Liu Guohua^{1,2} Tang Qixing^{1,2} Lu Yibing^{1,2} You Kun¹ He Ying¹ Liu Wenqing¹

(1. Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,

the Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The DFB tunable diode Laser is one of the most important components in the laser spectrum measurement system. The main factors that affect the output wavelength and output power of DFB tunable diode laser are the injection current and operating temperature, and the latter has a bigger effect on the laser. This paper designed temperature control circuit for laser, and analyzed the influence of PI parameters on the temperature control stabilization and short term stability experimentally; the designed temperature control circuit is applied on DFB tunable diode laser for study of long-term monitoring in laser output wavelength and output power, and achieved that standard deviation of the laser output wavelength is 0.2×10^{-6} , the standard deviation of output power is 0.02 mW.

Keywords: tunable diode laser; temperature control; temperature stabilization

0 引 言

可调谐二极管激光器具有体积小、功耗低、量子效率高、窄线宽的优点, 且波长可随注入电流和温度可调, 因此广泛地应用在气体浓度测量光谱技术中^[1]。由于可调谐二极管激光器依靠载流子注入而工作, 并且对温度非常敏感, 有源区的温升会带来器件阈值电流的增加、激射波长的红移、影响器件寿命、PI 特性的劣化等。因此激光器的温度控制至关重要, 是整个系统正常稳定工作的先决条件^[2-3]。

黄渐强等研究了用于气体检测的近红外半导体激光器温控系统, 采用数字信号处理器为主控芯片和模拟比例-积

分-微分原理(PID), 得到控温的短期准确度为 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[4]; 曾利忠等介绍了一种高稳定低温漂半导体激光器的驱动系统, 采用单片温度控制器 MAX1978, 得到 80 min 内激光器输出波长漂移不超过 0.6 ppm^[5]; 周真等研究了小功率半导体激光器的驱动系统, 得到 140 min 内激光器输出功率稳定性优于 0.2%^[6]。本文采用精密温度控制芯片 WTC3243, 设计了温度控制电路, 实验分析了电路的 PI 参数与稳定性性能。将所设计电路应用在 DFB 可调谐二极管激光器(1 576 nm)中, 进行温度调谐特性研究以及输出波长与输出功率的长期稳定性研究。

收稿日期: 2017-01

* 基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFC0201003)项目资助

1 温度控制原理

激光器的工作温度通过温度传感器和热电制冷器 TEC 进行温度的反馈与调节。典型的温度控制系统主要有 3 个部分:温度传感器、TEC、温度控制器,如图 1 所示。传感器头连接到 TEC 的制冷面使激光器保持在特定的温度,同时也连接到温度控制器进行温度值的反馈;温度控制器输出加热制冷电流到 TEC;散热器连接到 TEC 以帮助散热。为获得最好的稳定性和准确度,温度传感器离 TEC 和激光器越近放置越好,并使用热导膏或热导胶来消除空气间隙。

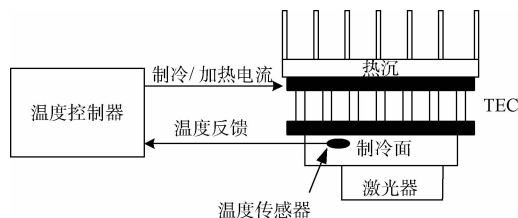


图 1 温度控制系统示意图

温度控制器是控制系统的核心元件。温度传感器的作用是反馈激光器的温度值(这里用的是 NTC 型热敏电阻)到温度控制器,其工作状态影响温度的测量效果^[7];半导体制冷器 TEC 利用帕尔贴效应,当通入不同方向的电流时,会根据电流的方向发生吸收或放出热量的反应,这个 TEC 电流由温度控制器提供^[8,9]。温度控制器的原理框图如图 2 所示,控制器将从激光器热敏电阻采集到的温度值与温度设定值进行误差计算,将这个误差信号送入自动控制技术 PI 控制单元^[10-11],产生控制量输送给 TEC 电流控制单元,最终输出动态变化的电流供给激光器的 TEC 进行相应的制冷制热工作。在这个闭环控制系统中,当外界温度或系统参数发生变化时,可以利用温度设定值与实际温度值的差量进行算法运算,进而修正控制量,达到消除偏差的目的^[12]。

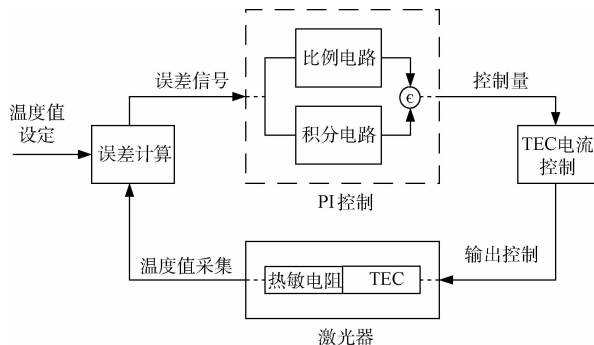


图 2 温度控制器的原理

温度值采集模块并不是直接采集温度,而是利用激光器热敏电阻的阻值随着温度而变化的特性,供给热敏电阻

恒定量的微小电流,称为偏置电流,则热敏电阻两端的电压值也会随着温度而变化,这样就实现了将温度信号转化为电压信号。热敏电阻两端的电压遵循欧姆定律:

$$V = I_{\text{BIAS}} \times R \quad (1)$$

V 即温度反馈电压 (V); I_{BIAS} 是控制器供给的偏置电流 (A),控制过程中是恒定的; R 为热敏电阻的阻值 (Ω)。因此,知道了热敏电阻温度与阻值的关系,就可以使温度值与电压值一一对应起来。用于热敏电阻的阻值-温度转化的最精确模型被称为 Steinhart-Hart 方程^[13],其有限次近似方程为:

$$\frac{1}{T} = A + B(\ln R) + C(\ln R)^3 \quad (2)$$

T 为温度,单位为 K ($1 K = 1 ^\circ C + 273.15$); R 为温度 T 时的电阻值,单位为 Ω ; A 、 B 、 C 是 Steinhart-Hart 系数,与热敏电阻的类型和工作温度范围有关; $\ln$ 为自然对数运算。将式(1)、(2)联系起来,得到电压值与温度的对应关系:

$$\frac{1}{T} = A + B\left(\ln \frac{V}{I_{\text{BIAS}}}\right) + C\left(\ln \frac{V}{I_{\text{BIAS}}}\right)^3 \quad (3)$$

2 温度控制电路设计

采用 WTC3243 为主芯片实现温度控制的功能。WTC3243 是一款精密的温度控制芯片,采用线性比例积分 (PI) 控制技术,独立地提供 TEC 加热和制冷电流,最大 TEC 电流为 $\pm 2.2 A$,短期 (1 h) 环境温度下温度稳定性为 $0.002 ^\circ C$,精度比较高,并且其外围电路并不复杂,如图 3 所示,使用合适的电阻可实现 TEC 电流、偏置电流等的设置,这里重点介绍温度设定电路和 TEC 开关保护电路的设计。

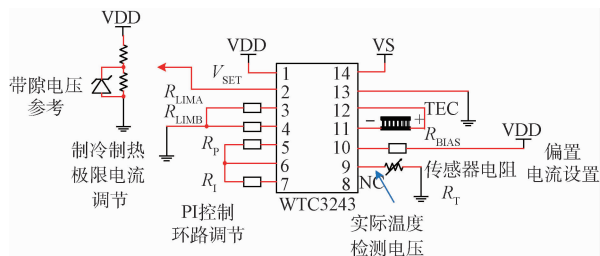


图 3 基于 WTC3243 的温度控制电路

2.1 温度设定电路

温度设定电路如图 4 所示,稳压二极管两端接入可调电阻 R_1 分压,一部分分压值经电压跟随电路隔离后送给主芯片相应的引脚,此设定电压又通过第二个电压跟随电路提供设定电压的监测,这样就不用理会分压电阻值的大小,能直接监测电压值的设置,可更为方便地设置温度。为降低工作电压波动和环境温度变化对设置点电压稳定性的影响,采用了电压基准芯片 LM4041 (U_2),输出稳压设置为 $2.5 V$,输出稳压电压 V_{out} 为:

$$V_{\text{out}} = V_{\text{ref}} \times \left(\frac{R_3}{R_2} + 1 \right) \quad (4)$$

V_{ref} 为 R_2 两端(即 LM4041 的稳压端 V-和反馈端 FB 之间)的电压,称为参考电压,与稳压端输出电压和温度均有关,公差为 6.2 mV,典型值为 1.233 V。

该芯片的温度稳定性为 100 ppm/°C,则引起的温漂为 100 ppm/°C × 2.5 V = 2.5 μ V/°C。限流电阻 R_1 的作用是限制 LM4041 的工作电流 I_z ,经计算分析, I_z 的范围为 0.125~12 mA,可通过式(5)估算得到 R_1 的取值范围约为 200 Ω ~3.3 k Ω :

$$I_z \approx \frac{VDD - V_{out}}{R_1} - \frac{V_{out}}{R_7} \quad (5)$$

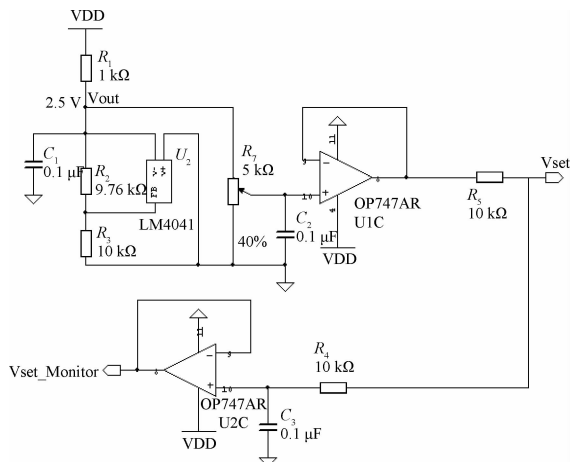


图4 温度设定电路

应用电压基准时,应注意防止外部电路与配线连接以避免基准性受到影响,这里选用精密放大器 OP747 形成电压跟随器,具有输入阻抗高、输出阻抗低的特点,具有隔离作用,使前、后级电路之间互不影响。由于电压跟随器为单位增益,OP747 失调电压温度偏移为 0.4 μ V/°C,因此引入的温度漂移为 0.4 μ V/°C。

由式(3)可得到温度值与设定电压 v_{set} 的关系为:

$$T = \frac{1}{A + B \ln\left(\frac{V_{set}}{I_{BIAS}}\right) + C \ln\left(\frac{V_{set}}{I_{BIAS}}\right)^3} - 273.15 \quad (6)$$

T 的单位为 °C,经实验研究,得到 A 、 B 、 C 的值分别为 1.109×10^3 、 2.373×10^4 、 7.53×10^8 ,则温度电压的对应曲线如图 5 所示。

2.2 TEC 保护电路

TEC 是一种易损并且较昂贵的器件,需要一个保护开关控制 TEC 的工作状态,电路设计如图 6 所示。保护开关电路由双通道比较器 LM393、NPN 型晶体管 2N3904 和单刀双掷开关 S_1 组成,LIMA、LIMB 分别为主芯片的 TEC 制冷制热电流输入端,VDD 和 R_5 、 R_3 、 R_2 为比较器提供上拉电阻并进行分压,U1A 的输出高电平为(V_B 为三极管基极电压):

$$V_H = VDD - \frac{R_5}{R_3 // R_2 + R_5} \cdot (VDD - V_B) \quad (7)$$

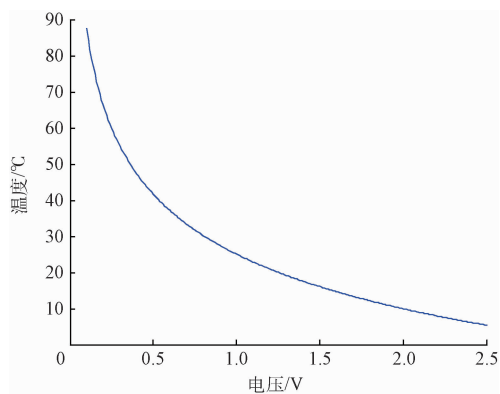


图5 电压值与温度值的关系

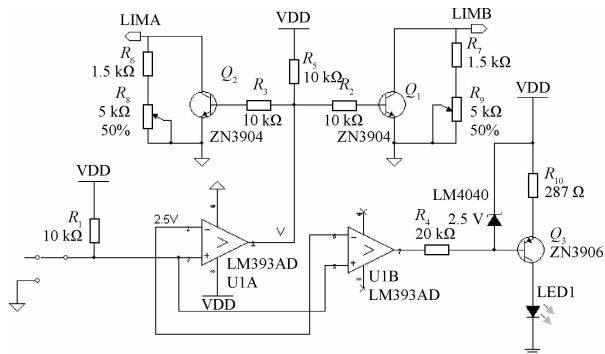


图6 开关保护电路

对开关接地瞬间进行分析,开关悬空未接地时,LM393 输出高电平,Q1 和 Q2 饱和导通,这时 LIMA 和 LIMB 端相当于与地短接,TEC 不工作;当开关接地时,LM393 输出低电平,Q1 和 Q2 截止,TEC 开始正常工作。此外,基准电压源 LM4040、PNP 型晶体管 2N2906 和发光二极管 LED 组成了指示电路,正常工作时 LED 发光。

3 实验研究

3.1 P、I 参数研究

比例积分控制(PI 控制)是温度自动控制系统中重要的算法控制模块,它的输入为温度设定点与热敏电阻实际温度反馈值的误差。比例电路在合适的增益时本质上是稳定的,但是不能处理系统达到稳态时的零误差情况。而积分电路可以弥补这个不足,降低了过零点的误差,即稳态时的误差,由于它的输出是过去误差的函数,因此可以在稳态时产生有限的输出控制信号^[14-15]。控制输出信号 $y(t)$ 可表示为:

$$y(t) = Pe(t) + \frac{1}{I} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (8)$$

式中: P 为比例增益, $e(t)$ 为输入误差信号, I 为积分时间。对积分时间为 $I=4.5$ s 时,比例增益 P 对温度控制的影响进行了实验研究,如图 7 所示,分别得到了 $P=5$ 、 $P=20$ 和

$P=50$ 时的实验现象。由图可知,当 $P=5$,温度控制的过调比较大,达到稳定的时间比较长; $P=20$ 和 $P=50$ 时,温度控制的过调和稳定时间都比较小。理论研究表明, P 参数也不能过大,否则会产生系统振荡,使控温特性变差^[15]。

对比例增益 $P=20$ 时,积分时间 I 对温度控制的影响也进行了实验研究,如图 8 所示,分别得到了 $I=0.8\text{ s}$, $I=3\text{ s}$ 和 $I=4.5\text{ s}$ 时的实验现象。与 P 对温度控制的影响类似,当 $I=0.8\text{ s}$ 时,温度控制的过调比较大,达到稳定的时间比较长;而 $I=3\text{ s}$ 和 $I=4.5\text{ s}$ 时,温度控制的特性比较好。 I 参数同样存在可能引起振荡的问题,当出现振荡时,应适当地降低 P 或增大 I ^[15]。

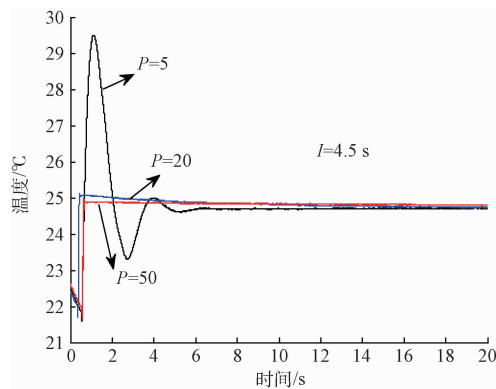


图 7 $I=4.5\text{ s}$ 时不同 P 下的温控

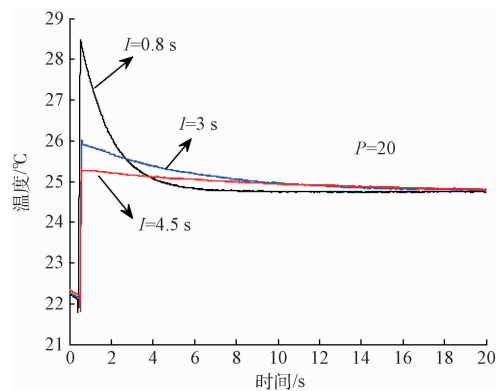


图 8 $P=20$ 时不同 I 下的温控

图 9 给出了在 $P=20$, $I=3\text{ s}$ 时不同温度下达到设定温度 25 °C 的温度控制时间曲线,由图可知,在几秒钟的时间内温度达到稳定且过调量很小,说明此参数是比较合理的。

3.2 温度控制电路稳定性测试

由于激光器注入电流会改变激光器有源区的温升,因此测试了注入电流为 200 Hz 正弦波情况下,温度控制电路的稳定性,结果如图 10 所示,1 s 内的标准差为 0.004 °C 。

温度控制电路得到激光器热敏电阻两端的电压信号,送给温度监测模块,其电压信号对应着实际的温度值,同时

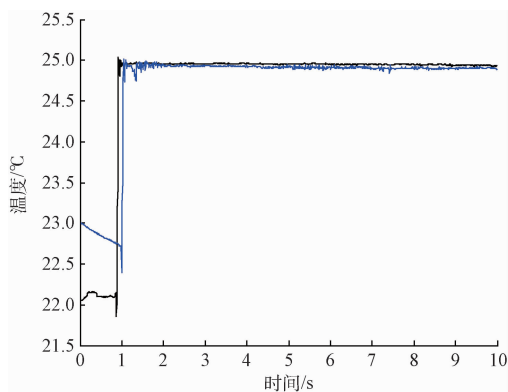


图 9 温度控制的稳定时间

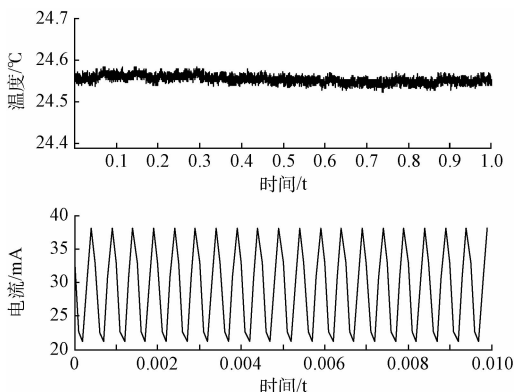


图 10 激光器驱动电流对温度控制的影响

温度设定电路也提供设定温度监测,获得这些电压信息,便可反演出温度。为测试温度控制的准确性,在室温环境下,对二极管激光器进行恒温恒电流驱动,测量设定温度、实际温度相应电压值,每 10 min 测一次,并根据式(6)将温度信息的电压值转化为温度值,由此得到了设定温度与实际温度的波动曲线如图 11 所示,其误差曲线图如图 12 所示。

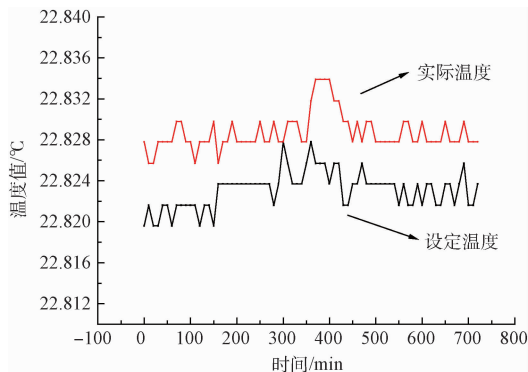


图 11 实际温度与设定温度的监测

由于实验测量是从早上 9:00 到晚上 9:00 在室温下进行的,环境温度的变化范围为 $-1\sim 12\text{ °C}$,图 11 中温度的变化趋势表明温度的控制不可避免地受外界环境的影响,

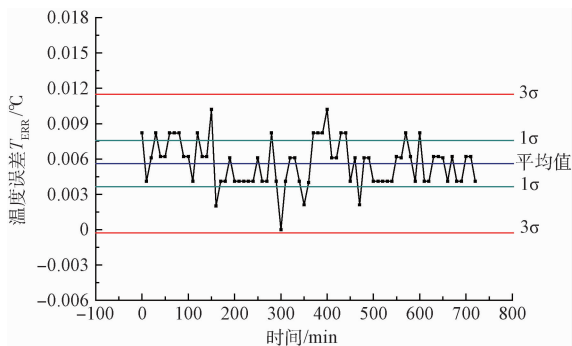


图 12 实际温度与设定温度的误差

且实际温度与设定温度有一定的误差 $T_{ERR} = T_{ACT} - T_{SET}$ ，这里用误差值的稳定性来衡量温度的准确度。如图 12 所示，温度值误差的标准偏差为 $0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，根据 3σ 准则，得到温度的准确度为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ (12 小时)。

3.3 输出波长和功率的长期监测

进行了激光器输出波长与输出功率的长期稳定性实验研究，设置工作电流为 48 mA ，工作温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，测量结果如图 13、14 所示，图 13 给出了输出波长和功率的监测波形，可得到输出波长的标准偏差为 0.2 ppm ，输出功率的标准偏差为 0.02 mW ，这表明激光器输出波长和功率的长期稳定性比较好；图 14 给出了实际温度测量的波形，标准偏差为 $0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，可见温度的长期温度性还是比较好的。

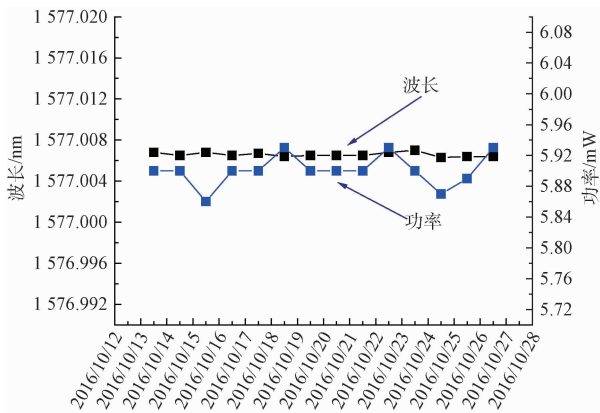


图 13 输出波长和功率的长期监测结果

4 结论

可调谐二极管激光器是 TDLAS 光谱测量技术的重要组成部分，温度对其输出波长和功率具有明显的影响，因此采用注入电流调谐激光器输出时，激光器工作温度的稳定性控制变得尤其重要。本文研究了温度控制原理，采用精密温度控制芯片实现温度精密控制的功能，分析了电路的控制性能，实验研究了 PI 参数对温度控制的影响和温度控制的准确性，得到了误差在 3σ 准则下的稳定性为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$

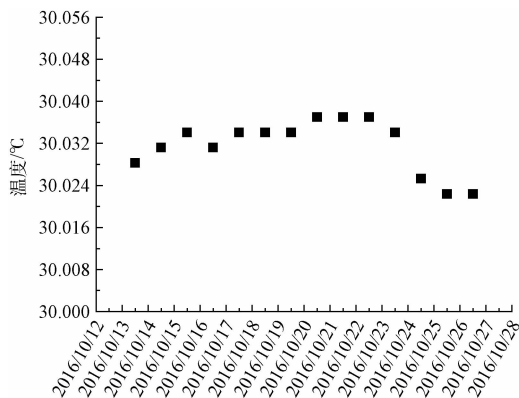


图 14 实际温度的长期监测结果

(12 小时)。将温度控制电路应用在可调谐二极管激光器 (1576 nm) 上，进行了恒温恒流下激光器输出波长与功率的长期稳定性实验，得到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 。

参考文献

- [1] XIA H, DONG F ZH, WU B, et al. Sensitive absorption measurements of hydrogen sulfide at $1.578\text{ }\mu\text{m}$ using wavelength modulation spectroscopy [J]. Chinese Physics B, 2015, 24(3):180-184.
- [2] 于望竹. 半导体激光器驱动电源的研制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010:7-8,14-19.
- [3] RAY A, BANDYOPADHYAY A, DE S, et al. A simple scanning semiconductor diode laser source and its application in wavelength modulation spectroscopy around 825 nm [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(2):359-367.
- [4] 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):614003-614003.
- [5] 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.
- [6] 周真, 齐忠亮, 秦勇. 小功率半导体激光器的驱动方法设计 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10):2689-2693.
- [7] 徐立新, 谢建斌, 杨智伟, 等. 微细热电偶的制作与时间常数标定方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(7):1023-1028.
- [8] 候庆志. 面向原子传感器的半导体激光器系统设计 [D]. 太原: 中北大学, 2014:33-35.
- [9] 陈从颜, 王延夺, 王伟. 基于复合帕尔贴模块热触觉再现装置研究 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11):2521-2527.

(下转第 41 页)