

多通道自校准砷化镓吸收式光纤温度监测系统

胡 昆^{1,2} 傅惠南¹ 罗星星^{1,2} 梅迎春¹ 董玉明^{2,3}

¹广东工业大学机电工程学院, 广东 广州 510006

²中国科学院深圳先进技术研究院, 广东 深圳 518055

³香港中文大学, 香港 沙田 999077

摘要 光纤温度传感器易受到光源驱动电流变化、光路弯曲、熔接损耗等强度变化因素影响,为解决光强度变化导致的测温偏差,系统采用定时更新原始入射光谱,实现光源波形自校准。光谱分析装置易受环境温度变化引起光谱漂移,为解决光谱漂移引起的测温偏差,系统采用波长锁定器定位特征波长,使用光谱漂移补偿的方法,实现光谱自校准。为实现多通道光纤测温,设计了光学复用系统。设计自校准验证实验验证系统自校准功能的有效性,实验结果表明,在系统使用环境发生变化时,自校准测温系统测量误差小于 ± 1 °C,因此设计的自校准测温系统能够抵抗光源光谱波形变化带来的误差,克服光谱分析装置受环境温度的干扰。

关键词 光纤光学; 温度测量; 自校准; 多通道; 砷化镓

中图分类号 TN304.91 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1105001

Multi-Channels Self-Calibrating Gallium Arsenide Absorption Fiber Optic Temperature Monitoring System

Hu Kun^{1,2} Fu Huinan¹ Luo Xingxing^{1,2} Mei Yingchun¹ Dong Yuming^{2,3}

¹*School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China*

²*Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen, Guangdong 518055, China*

³*The Chinese University of Hong Kong, Shatian, Hong Kong 999077, China*

Abstract Fiber optic temperature sensors are accessibly affected by the light source drive current changes, the optical path bending, the splice loss and other intensity variables. In order to solve the temperature deviation caused by the light intensity variations, the system regularly updates the original incident spectrum to realize self-calibration source waveform. The variation of ambient temperature causes the spectral drift of spectral analysis device which causes the deviation of temperature measurement. To solve this problem, the system uses wavelength locker to locate characteristic wavelength and uses spectral shift compensation method to achieve spectral self-calibration. The optical multiplexing system is designed to achieve multi-channel fiber optic temperature measurement. Self-calibration verification experiments are designed to verify the validity of the system self-calibration function. Experimental results show that the system self-calibrating temperature measurement deviation is less than ± 1 °C, when the environment changes. Therefore, the self-calibrating temperature measurement system can withstand the deviation of source spectral waveform changes, and make the spectrum analysis device overcome the interference of ambient temperature.

Key words fiber optics; temperature measurement; self-calibration; multi-channels; GaAs

OCIS codes 060.2300; 060.2370; 060.2330

收稿日期: 2015-06-01; 收到修改稿日期: 2015-06-26

基金项目: 深圳市重大产业公关项目基金(SY49502)

作者简介: 胡 昆(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: hklovesf@gmail.com

导师简介: 董玉明(1978—),男,博士,副研究员,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: ym.dong@siat.ac.cn

1 引言

温度是工业、医药、科学研究等多领域中最重要测量物理量之一。光纤温度传感器具有本身不带电、体积小、质量轻、易弯曲、抗电磁干扰、抗辐射等优点,特别适合在强电磁干扰环境、微波、射频、空间受限等恶劣环境下使用^[1-2]。目前光纤温度传感器主要是基于布里渊散射^[3-4]、拉曼散射^[5]、布拉格光纤光栅^[6]、单模-多模-单模(SMS)干涉^[7]、砷化镓吸收等原理的光纤温度传感器。基于布里渊散射、拉曼散射、布拉格光纤光栅3种光纤温度传感器主要适用于海底故障检测^[8]、混凝土裂变^[9]、隧道火灾探测^[10]等,但价格非常昂贵。砷化镓吸收式光纤温度传感器属于点式测温,主要用于测量几个特殊位置的温度。

砷化镓吸收式光纤温度传感器^[11]本身属于强度变化类型温度传感器,光源电流变化引起的光源强度变化、传输光路的弯曲抖动等因素都会导致砷化镓光纤温度传感器的反射强度发生变化。为了解决上述问题,国内外的研究主要通过强度补偿和光谱解调技术来满足测温系统的准确度和稳定性。施清平^[12]使用软件补偿方法,但不能消除光源电流强度变化以及测温光路中环境干扰因素。李志全等^[13]使用单光源双光路补偿,但不能消除探测器和放大器的漂移。刘晔等^[14]研究了信号光源和参考光源的双光源波长补偿方案,但信号光源和参考光源受到驱动电流变化的干扰因素而无法消除。陈辉^[15]提出了双光源双光路补偿方案,但双光路中的路径并不是完全对称的,测量光路中的光经过传感器后必然存在一定的光功率损耗。而光谱解调是将测得的参量进行波长编码,实现波长位移信息转换为电信号,因此强度变化无需补偿,本文将采用光谱解调的方法进行处理。但光谱解调方法面临2大问题:1)环境温度的变化容易引起测量光谱的波长发生漂移,增大测温系统的测量误差。2)光源的发光光谱发生变化也会导致测量系统测量误差增大。陈霄^[16]基于CCD衍射技术建立的波长解调系统,将测温系统运用在了油浸式变压器绕组测温中,但其并未考虑CCD测量光谱随温度变化以及光源光谱随温度变化的影响。本文基于上述光谱解调问题,设计波形校准功能和光谱校准功能。

2 测温原理

砷化镓吸收式光纤温度测量技术是基于砷化镓晶体的吸收光谱随温度变化的特性来实现的^[17]。光通过半导体材料时,材料会吸收光子能量,当光子能量超过禁带宽度能量 $E_g(T)$ 时,传输光的波长发生变化: $\lambda_g(T) = hc/E_g(T)$,其中 $\lambda_g(T)$ 是吸收波长, h 是普朗克常数, c 是光速^[18]。在20~973 K范围内, $E_g(T)$ 与温度 T 的关系为: $E_g(T) = E_g(0) - \gamma T^2 / (\beta + T)$, $E_g(0)$ 为温度在0 K的禁带宽度能量, γ 和 β 是2个与材料相关的常数。对砷化镓晶体来说, $E_g(0) = 1.522 \text{ eV}$, $\gamma = 5.8 \times 10^{-4} \text{ eV/K}$, $\beta = 300 \text{ K}$ 。因此, $\lambda_g(T) = hc/[E_g(0) - \gamma T^2 / (\beta + T)]$,所以半导体吸收边缘的波长 $\lambda_g(T)$ 与温度 T 正相关,当温度升高时,半导体材料吸收边缘的波长向长波长方向移动^[19],如图1所示。运用光谱解调方法,从光谱信号中解调出温度值。

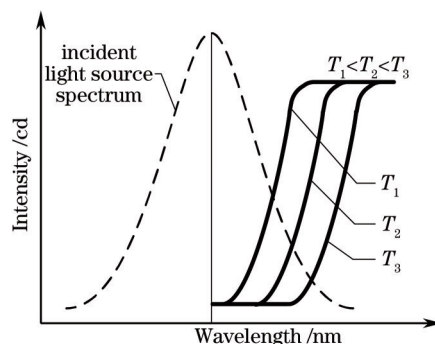


图1 测温原理示意图

Fig.1 Temperature measurement principle diagram

3 测温系统设计

3.1 系统组件

测温系统由主控单元、光源驱动单元、光源组、光学复用系统、传感器组、光谱分析装置组成,其中光学

复用系统包括7个2×2的光纤耦合器、1个1×2的光纤耦合器、2个1×7的光纤合束器、1个波长锁定装置和2个1×2光开关,系统框架结构如图2所示。

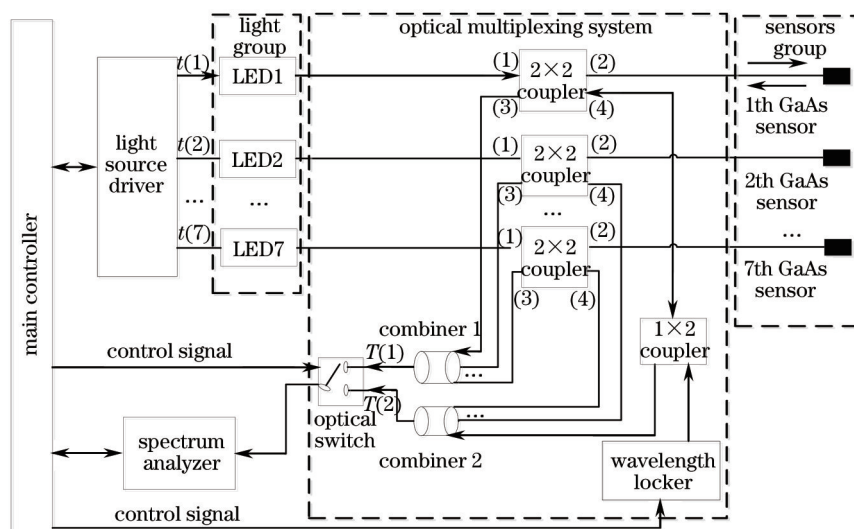


图2 测温系统框架结构图

Fig.2 Temperature measurement system framework

测温系统主控单元需要合理调用系统资源,包括控制光源驱动器、控制光开关转换时间、读取光谱仪输出数据并解调光谱、数据处理、显示输出、发出预警信号等操作。本测温系统选定采用基于TI公司生产的达芬奇系列OMAP-L138双核处理器作为核心处理单元。

LED光源与半导体激光器相比,具有不存在阈值特性、工作稳定、功耗很小、寿命长、成本低等优点。系统采用OSRAM公司生产的型号为SFH4881的近红外LED作为光源,中心波长为880 nm,驱动电流为200 mA,采用脉冲宽度调制(PWM)时序驱动。为满足大驱动电流,强度可调,光源驱动采用LT3085芯片。在本系统中,光源驱动单元在主控制单元输出的控制信号作用下时序驱动LED光源组,7个LED被时序点亮,在某一个确定的时刻,有且仅有一个LED灯被点亮。驱动电路如图3所示,GND为接地信号,A为芯片使能信号接口,PWM为芯片接收来自主控单元的PWM信号接口,LED为LED光源接口,NC为芯片管脚悬空。

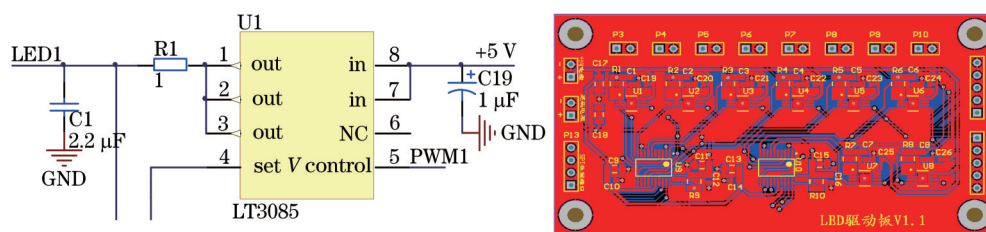


图3 LED驱动电路

Fig.3 LED drive circuit

光谱分析装置将光谱信息转换为数字信号,结构较其他模块复杂,其性能好坏将直接影响系统的测温性能。本系统采用Avantes公司生产的型号为Avaspec-ULS2048XL薄型背照式CCD光纤光谱仪,波长范围为200~1100 nm,灵敏度为 $46000 (\mu\text{W}\cdot\text{ms})^{-1}$,信噪比为450:1。

系统采用的温度传感器砷化镓厚度为100 μm,正面尺寸为158 μm×160 μm。使用1000倍放大镜测量结果如图4所示。

3.2 光谱分析自校准设计

光谱分析装置中的探测器CCD存在暗电流散粒噪声、复位噪声、放大器噪声,其中温度对暗电流噪声的影响最大^[20]。随着光谱仪使用时间的增加,光谱仪会出现波长漂移等问题,因此需要进行波长校准。在本系统中只使用一个通道即可对光谱仪进行校准。如图2所示,当系统运行 $\Delta T_1=24$ h后,主控单元输出控制信号让光开关接到通道T(1)端口,同时控制波长锁定装置发出特定波长为850 nm的光,特定波长光进入1×2光纤

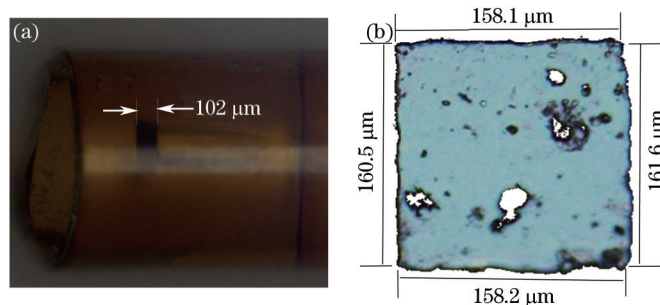


图4 光纤温度传感器的砷化镓尺寸

Fig.4 Size of GaAs in the optical fiber temperature sensor

耦合器后进入2×2光纤耦合器的接口(4),再从接口(3)进入光合束器1,然后被光谱分析装置解调出光谱信息提交给主控单元,主控单元调用特定算法解调出波长锁定装置发出的光谱。由于波长锁定装置锁定波长为850 nm,若主控单元解调出光谱分析装置测量的光谱峰值波长不是850 nm,则主控单元对光谱分析装置进行校准。波长锁定装置正常工作时发出的特征光波峰值波长为850 nm,任何测量都存在一定的误差,所以本系统设定允许测得的特征光波峰值波长误差为±0.5 nm。因此若此时主控单元解调出光谱分析装置测得的特征光波峰值波长不是850 nm±0.5 nm,则主控单元对光谱分析装置所测数据进行校准,校准流程图如图5所示。

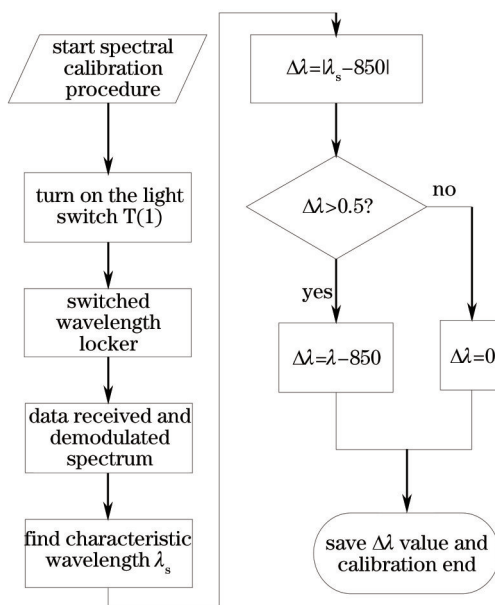


图5 光谱分析装置校准流程图

Fig.5 Spectrometer calibration flow chart

3.3 光源波形校准设计

影响LED输出功率变化的主要是驱动电流和光源LED所处的环境温度。如图2所示,LED发出的光一部分被2×2光纤耦合器耦合后从端口(4)输出再进入光合束器2;另一部分光被2×2的光纤耦合器耦合后,从端口(2)进入砷化镓光纤温度传感器中,并被反射回来。反射光再次进入2×2光纤耦合器,被耦合后从端口(3)输出再进入光合束器1。当测温系统开机运行时或者自开机运行后每间隔1 h(校准时间可以根据系统使用周围环境而定),即 $\Delta T_2=1$ h,主控单元自主执行光源校准程序。主控单元输出光源控制信号,点亮系统光源,同时控制1×2光开关接通T(2)接口。光源信号从2×2光纤耦合器的(1)口进入,被2×2光纤耦合器按照分光比为1:1进行分光,一部分从光纤耦合器的接口(4)输出,通过1×2光开关的T(2)接口进入光谱分析装置,经过光谱分析装置将光谱信息转换为数字信号后输出给主控系统。主控系统查找光源峰值 λ_{p1} 及其对应的强度值 I_{p1} ,将 λ_{p1} 及 I_{p1} 分别与内存中保存的上次的光源峰值 λ_p 及其强度值 I_p 比较。校准流程图如图6所示。

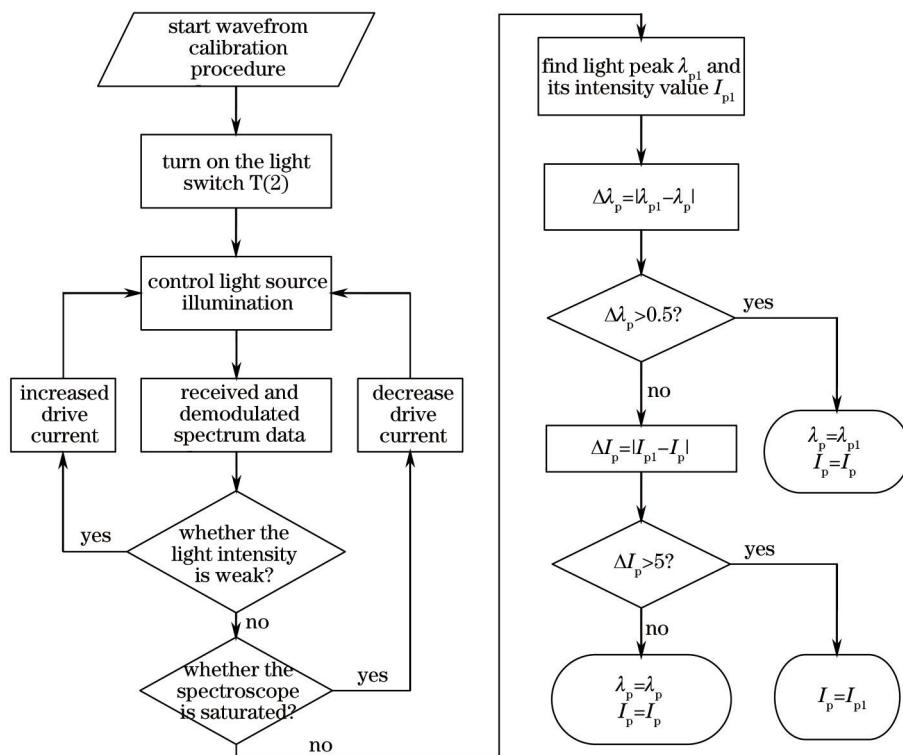


图 6 光源波形校准流程图

Fig.6 Light source waveform calibration flow chart

3.4 系统整体设计

为保证测温系统开机正常工作,测温系统在开机运行后首先对测温系统所有模块进行自检。先后完成

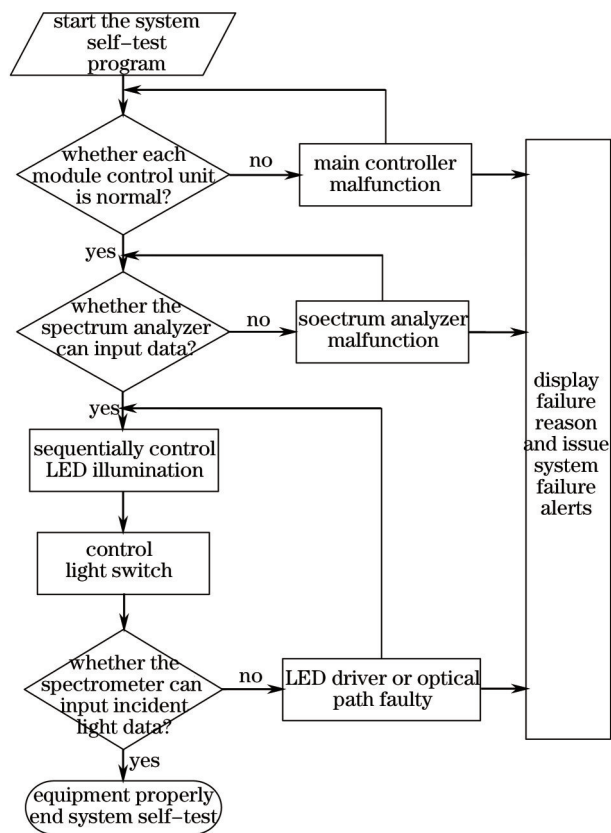


图 7 系统自检流程图

Fig.7 System self-test flow chart

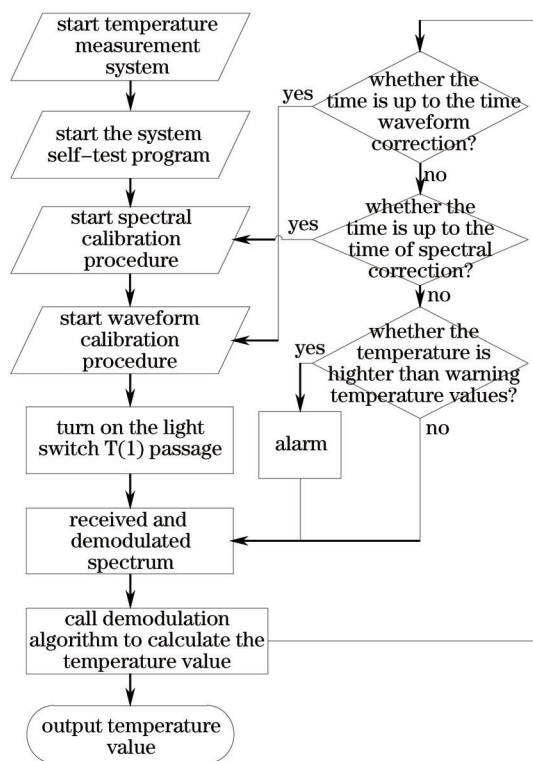


图 8 多通道测温系统运行流程图

Fig.8 Multi-channel temperature measurement system operation flowchart

对主控系统、光谱分析装置、LED光源组及其驱动的测试。若有故障将引起警报并显示故障原因,直到系统故障警报解除后,才能进行温度测量。系统自检流程图如图7所示。

系统在开机运行后按照如下流程:1)调用系统自检程序,排除系统组件故障;2)调用光谱校准程序,确保光谱测量准确;3)调用波形校准程序,校准光源光谱;4)进入光谱测量主程序,测量并解调光谱信息,计算并输出温度值,判断是否到达光谱校准时间或者波形校准时间,若到达预设校准时间,则调用对应的校准程序。判断测量值是否大于预设温度值,高于则发出报警信号。系统运行流程图如图8所示。

4 自校准实验

4.1 实验原理及设备

采用光源、恒温加热装置、温度校准装置、光学复用系统、调温炉、光谱分析装置等设备构成自校准验证实验平台,实验原理如图9所示。

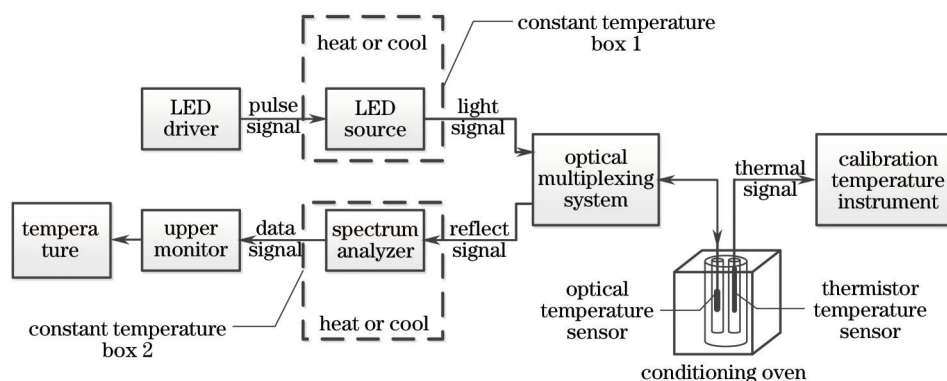


图9 自校准实验原理示意图

Fig.9 Self-calibration experimental schematic diagram

4.1.1 实验原理

(1) 光谱仪自校准实验

光谱分析装置的CCD探测器对温度很敏感,因此在改变光谱分析装置所处环境温度会引起测量光谱的波长发生漂移。因本系统有且仅有第一通道具有光谱自校准功能,故本实验使用第一通道在不同的环境温度下重复多次校准实验。如图9所示,保证系统光源正常发光,设置恒温箱1的温度为20℃。

然后分别调节恒温箱2的温度,使光谱分析装置所处的环境温度为20,30,40,50℃。每次恒温箱2的温度调节完成后,分别改变调温炉的温度,测量传感器所处预设温度为50,100,150,200℃的实际温度值。

(2) 光源强度校准实验

波形校准分为光源强度校准和波长校准。光源强度校准:只改变驱动电流的大小,测量并分析光源强度变化对测温系统的影响,验证光源强度自校准功能的有效性。如图9所示,将恒温箱1和恒温箱2温度设置为20℃,模拟光源驱动电流发生变化,调节1~4通道电流强度值分别为100,140,170,200mA。每次电流调节完成后,分别改变调温炉的温度,测量传感器所处预设温度为50,100,150,200℃的实际温度值。

(3) 光源波长校准实验

只改变光源所处温度,测量并分析光源波长变化对测温系统的影响,验证光源波长自校准功能的有效性。如图9所示,设置恒温箱2温度为20℃,且使LED正常发光。分别调节恒温箱1的温度为20,30,40,50℃。每次调节完恒温箱1的温度后,分别改变调温炉的温度,测量传感器所处预设温度为50,100,150,200℃的实际温度值。

完成上述3个无自校准功能测量实验后,分别启用自校准功能重复测量一次上述实验,以此来判断系统自校准功能的实用性。

4.1.2 部分实验设备

(1) 加热装置

加热装置需要满足使用操作简便、加热稳定、加热速度快、精度高。选用美国Fluke公司生产的现场计

量炉 9143。加热量程为 33~350 ℃,显示精度为±0.2 ℃,分辨率为±0.01 ℃,稳定性为±0.02 ℃,轴向一致性为±0.1 ℃以内。

(2) 温度校准装置

为更好地验证传感器探头所处的环境温度,实验中需要测量其标准温度。综合考虑后,选择 Fluke 公司生产的型号为 1552A 的校准温度计,误差小于±0.003 ℃,不稳定性小于±0.01 ℃。

4.2 实验结果

光谱自校准验证实验测量误差对比如图 10 所示。从图中可以看出有光谱自校准功能时(实线),系统测量误差为±0.5 ℃,无光谱自校准功能时(虚线),系统测量误差超过±1 ℃。

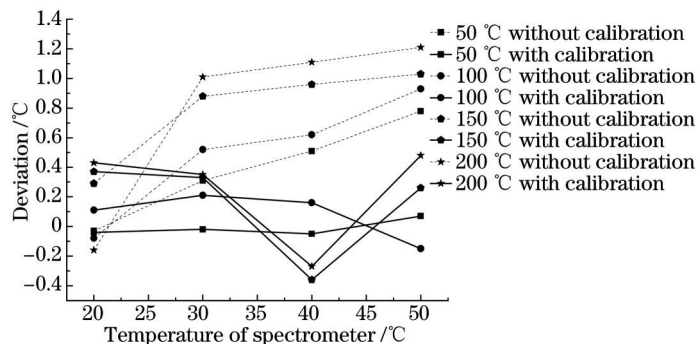


图 10 有无光谱自校准功能测量误差对比图

Fig.10 Measurement deviation comparison chart with or without spectrum self-calibration

光谱自校准验证实验测量误差对比如图 11 所示。从图中可以看出,在电流强度减小的情况下,测温系统启用波形自校准功能时(实线),测得的温度误差在±0.7 ℃以内,不启用自校准功能时(虚线),电流强度减弱后测量高温区所得误差超过±1 ℃。

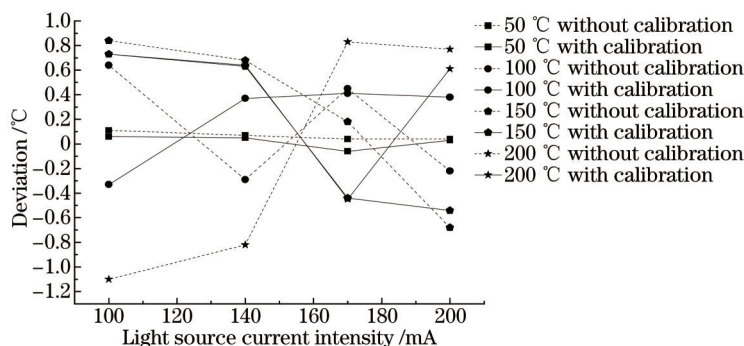


图 11 有无光强自校准功能测量误差对比图

Fig.11 Measurement deviation comparison chart with or without light-intensity self-calibration

波长自校准验证实验测量误差对比如图 12 所示。从图中可以看出,在入射光源波长都有变化时,具有波形自校准功能的测温系统(实线)测量误差小于±0.5 ℃,无波形自校准功能(虚线)测温系统误差明显增大,

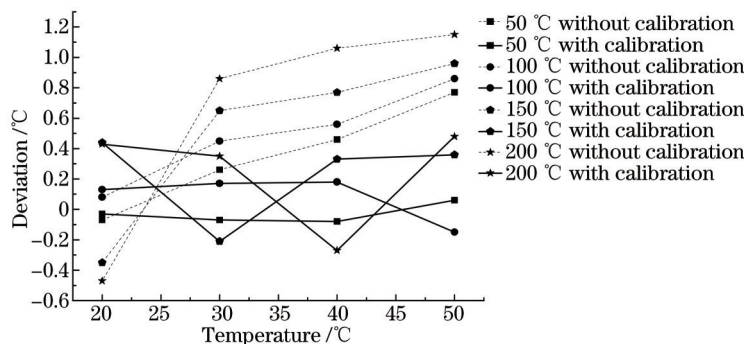


图 12 有无波形自校准功能测量误差对比图

Fig.12 Measurement deviation comparison chart with or without wavelength self-calibration

误差超过 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

5 结 论

设计了多通道砷化镓吸收式自校准光纤测温系统,有效地解决了光源驱动电流强度波动引起光源强度变化、温度引起光源发光光谱波形变化导致对检测温度的影响,解决了光谱分析装置易受环境温度变化引起的光谱漂移问题。主要包括:

- 1) 利用波长锁定器特征波长,检测和判断不同温度下光谱分析装置的光谱漂移,并进行光谱仪自校准;
- 2) 基于检测光源发光光谱的中心波长和幅值,判断光源发光光谱的变化,并进行光源强度校准和波长校准。

参 考 文 献

- 1 Kazuo Kyuma, Shuichi Tai, Takao Sawad, *et al.*. Fiber-optic instrument for temperature measurement[J]. IEEE J Quantum Elect, 1982, 18(4): 676-679.
- 2 Dong Yuming. Research of Spontaneous Brillouin Scattering Distributed Optical Fiber Sensing Technology and Its Application[D]. Nanjing: Nanjing University, 2007: 2-11.
董玉明. 自发布里渊散射分布式光纤传感技术及其应用研究[D]. 南京: 南京大学, 2007: 2-11.
- 3 Zhang Xuping, Lu Yuangang, Wang Feng, *et al.*. Development of fully distributed fiber sensor based on Brillouin scattering[J]. Photonic Sensors, 2011, 1(1): 54-61.
- 4 Dong Yuming, Zhang Xuping, Lu Yuangang, *et al.*. Cross sensitivity of Brillouin scattering distributed fiber sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(2): 197-201.
董玉明, 张旭苹, 路元刚, 等. 布里渊散射光纤传感器的交叉敏感问题[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 197-201.
- 5 Ahangrani M, Gogolla T. Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated temperature Raman remote sensing[J]. IEEE J Lightwave Technol, 1999, 17(8): 1379-1391.
- 6 Wang Yongjun, Liu Hongchao, Zhang Jingtao, *et al.*. Interrogation technology for high-speed and high-resolution fiber Bragg grating sensing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205003.
王拥军, 刘永超, 张靖涛, 等. 高分辨率光纤布拉格光栅传感系统的解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205003.
- 7 Huang Zejia, Li Qiang, Xu Yaqin, *et al.*. Research on temperature sensing characteristics based on modular interference of single-mode-multimode-single-mode fiber[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0605001.
黄泽钡, 李 强, 徐雅芹, 等. 基于单模-多模-单模光纤模间干涉的温度传感特性研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0605001.
- 8 Chen Yong, Yin Chengqun, Lü Anqiang, *et al.*. A novel approach to optical fiber composite submarine cable fault detection and diagnosis[J]. Study on Optical Communications, 2014, (3): 56-59.
陈 永, 尹成群, 吕安强, 等. 光纤复合海底电缆故障检测与诊断方法[J]. 光通信研究, 2014, (3): 56-59.
- 9 Jiang Shuai. Corrosion-Induced Cover Crack Monitoring and Prediction in Reinforced Concrete Based on BOTDA[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 13-18.
姜 帅. 基于 BOTDA 的钢筋混凝土锈裂全过程监测及预测模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 13-18.
- 10 Wang Zhengfang. Study on Fiber Bragg Grating Sensing Theory and Key Technology for Bridges and Tunnels Engineering Safety Monitoring[D]. Jinan: Shandong University, 2014: 2-15.
王正方. 桥隧工程安全监测的光纤光栅传感理论及关键技术的研究[D]. 济南: 山东大学, 2014: 2-15.
- 11 Liao Tianjun, Lin Bihong, Yang Zhimin. Temperature monitoring for concentrated photovoltaic power system based on optical fiber temperature sensor[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 050602.
廖天军, 林比宏, 杨智敏. 基于光纤温度传感器监测的聚光光伏发电系统[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(5): 050602.
- 12 Shi Qingping. Research on Practicability of Optic Fiber Temperature Sensors[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007: 21-31.
施清平. 光纤温度传感器实用化若干关键问题的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007: 21-31.
- 13 Li Zhiqian, Wang Zhibin, Wu Fei, *et al.*. Study on semiconductor temperature sensor with single light source[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2003, 16(1): 44-46.
李志全, 王志斌, 吴 飞, 等. 一种单光源半导体温度传感器的研究[J]. 传感技术学报, 2003, 16(1): 44-46.
- 14 Liu Ye, Zhang Yun, Wang Caitang, *et al.*. Study on optical fiber temperature sensor using two-wavelength light sources[J]. Journal

- of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(4): 335-338.
刘 晔, 张 赞, 王采堂, 等. 双波长光纤温度传感器的研究[J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(4): 335-338.
- 15 Chen Hui. Study on Optical Fiber Temperature Sensing System Based on Semiconductor Absorption[D]. Hebei: North China Electric Power University, 2010: 22-26.
陈 辉. 半导体吸收式光纤温度传感系统研究[D]. 河北: 华北电力大学, 2010: 22-26.
- 16 Chen Xiao. Study on Multi-Parameters on-Line Detecting of Oil-Immerse Power Transformer Condition Based on Optical Fiber Sensing Technology[D]. Jinan: Shandong University, 2012: 55-60.
陈 霄. 基于光纤传感技术的油浸式电力变压器状态多参量在线检测研究[D]. 济南: 山东大学, 2012: 55-60.
- 17 Christensen D A, Vaguine V A. A fiber optic temperature sensor using wavelength-dependent detection[C]. SPIE, 1987, 838: 252-256.
- 18 Zhao Junliang, Guan Rongfeng, Zhao Hongtu. Study of GaAs optical fiber temperature sensor[C]. SPIE, 2000, 4223: 87-91.
- 19 Dong Yuming, Jiao Guohua, Lu Yuanfu, *et al.*. Low cost multi-channels gallium arsenide absorption-based fiber optic temperature sensing system[C]. SPIE, 2013, 9044: 904413.
- 20 Li Zhenggang. Miniature Spectrometer with Low Noise, High Dynamic Research[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2010: 72-80.
李正刚. 微小型光谱仪低噪声大动态范围方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2010: 72-80.

栏目编辑: 王晓琰