

文章编号: 2095-4980(2023)10-1278-07

一种双通道小型荧光测温仪的设计与实现

肖宪伟, 金湘亮*, 杨 健, 肖 力

(湖南师范大学 物理与电子科学学院, 湖南 长沙 410081)

摘 要: 荧光光纤温度传感器利用光纤技术的远距离传输, 避开了恶劣的测温环境, 相较传统有源测温设备的接触式测量, 更适合在强电磁场、高压腐蚀等极端环境下的温度检测。针对传统的单通道电路读出结构易受外界干扰的弊端, 本文设计了一种双通道的小型实用的荧光测温系统。整个测温系统分为光路设计、电路设计和程序设计 3 个部分。采用两路通道差分相减的创新思想, 完全消除了直流分量且基本不含有随机噪声, 从而得到了单一光滑的荧光衰减信号。最后通过标定实验, 得到荧光寿命与温度之间的函数关系。实验结果表明, 在 10~130 °C 的温度范围内, 标准温度偏差为 0.5 °C, 基本满足强电磁场、高压腐蚀、微波热疗等一些恶劣环境下的测温需求。

关键词: 荧光测温; 双通道; 信号读出; 衰减曲线

中图分类号: TN82

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021315

Design and realization of a two-channel mini fluorescence thermometer

XIAO Xianwei, JIN Xiangliang*, YANG Jian, XIAO Li

(School of Electronic and Information Engineering, Hunan Normal University, Changsha Hunan 410081, China)

Abstract: Fluorescent optical fiber temperature sensor uses the long-distance transmission of optical fiber technology to avoid the harsh temperature measurement environment compared with the traditional active temperature measurement equipment in contact measurement. Aiming at the disadvantage that the traditional single channel circuit readout structure is vulnerable to external interference, a two-channel small and practical fluorescent temperature measuring device is realized. The whole system is divided into three parts: optical circuit design, circuit design and program design. The idea of two channel differential subtraction is adopted to completely eliminate the DC component and basically do not contain random noise, so as to obtain a single smooth fluorescence attenuation signal. And through the calibration experiment, the functional relationship between the fluorescence lifetime and the temperature is obtained. The experimental results show that the standard temperature deviation is 0.5 °C within the temperature range of 10 °C to 130 °C, basically meeting the temperature measurement requirements in some harsh environments such as high pressure corrosion and microwave medical.

Keywords: fluorescence temperature measurement; dual-channel; signal readout; attenuation curve

温度是日常生活中一项非常重要的参考量, 由于科学技术的不断进步, 人们对于工业生产和日常生活中的温度要求越来越高。传统的温度测量设备在许多特殊的测量环境中工作存在困难, 如温度被测点的环境相当恶劣, 高压、腐蚀、狭窄空间等。荧光测温技术利用光纤的远距离传输, 使传感器的光电器件脱离测温现场, 避开了恶劣的环境, 因此研究荧光型光纤温度传感器具有重要意义。荧光光纤测温技术实现的难点在于对其中微弱荧光信号进行检测放大。一般传感器输出的电流信号比较微弱, 传感器由于自身设计等原因带来的噪声, 放大器的固有噪声和外界的环境噪声等比所需要检测的信号幅度更大。因此, 需要寻找一种高增益的、抗随机

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2021-10-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62174052; 61827812); 湖湘高层次人才聚集工程资助项目(2019RS1037); 湖南省科技厅资助项目(2020GK2018; 2019GK4016; 2020RC1003)

*通信作者: 金湘亮 email:jinxl@hunnu.edu.cn

噪声和干扰能力强的荧光测温设备。

早在 1970 年, K T V Grattan 等第一个发现了稀土材料的荧光强度与温度之间存在一定的关系, 开启了荧光光纤测温技术的研究热潮^[1]。1984 年, T Bosselmann 等利用 $\text{Lu}(\text{Cr}_x\text{Al}_{1-x})_3(\text{BO}_3)_4$ 作为荧光探头材料的温度传感器^[2], 基于荧光寿命算法, 能够实现 273~343 K 范围内 0.04 K 标准偏差的温度测量。2012 年, H T Lam 等设计一种用于新生儿护理的非接触式荧光温度传感器, 通过测量荧光余辉寿命, 实现了在 20~80 °C 的高重复性实时温度测量^[3]。2015 年, L Rosso 等开发用于检测质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)的荧光型光纤温度传感器, 实现了室温到 100 °C, 响应时间低于 1 s 的温度测量^[4]。近些年来, 荧光光纤测量技术取得重大进展。荧光测温具有抗电磁干扰、体积小、动态响应性好、抗腐蚀、传输距离远、传输损耗低等优点, 除去日常生产生活中常用的温度监测、测量外, 其应用领域已经渐渐地扩展至医疗上的微波加热抗癌、变压器内部温度检测或变电站温度监控等特有或专有环境下的温度测量, 受到广大学者的重视及研究^[5-14]。

本文描述了一种双通道的小型荧光测温系统。利用硬件电路对荧光材料激发出的荧光信号进行无失真放大, 再利用软件算法提取出荧光寿命, 而荧光寿命是温度的单值函数, 最终实现测温。整个测温系统的总体结构分为 3 个部分, 分别为光路设计、电路设计以及软件程序设计。

1 系统光路设计

系统光路主要由透镜和滤光片组成, 如图 1 所示。

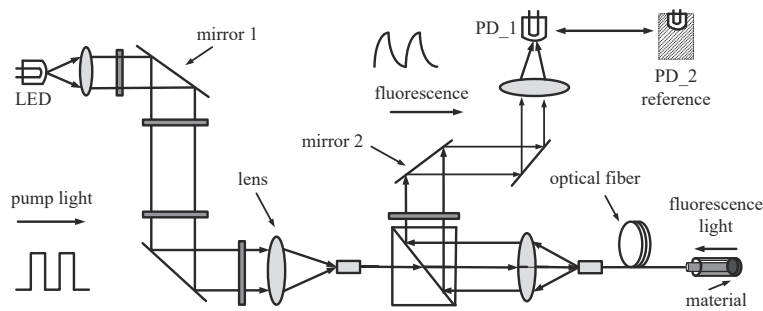


Fig.1 Optical path of the system
图 1 系统光路

光源发光二极管(Light Emitting Diode, LED)发出紫外光经光路系统到达荧光材料, 光能照射在荧光材料上, 荧光材料吸收能量, 内部发生电子能级的跃迁。当停止照射后, 荧光材料释放能量, 产生呈指数衰减的荧光信号。荧光信号经光纤传导到达光电管, 光电管将光信号转化成电信号再进行处理。荧光信号呈指数衰减, 满足以下关系:

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

式中: I 为荧光信号强度; t 为时间; τ 为荧光强度衰减至 I_0/e 所用的时间, 即荧光寿命。

激励光的波长选择 395 nm 的紫外光, 当处于紫外区时, 荧光效率较高, 光源能量更容易被吸收。荧光信号通过与激发源相同的光路返回透镜, 由于二者的波长不同, 利用滤光片将其分离, 再通过透镜将其汇聚在 PD_1 光电二极管(Pin Diode, PD)上。同时设置 PD_2 为参考, 利用黑色胶带将其密封, 使其处于黑暗环境中。

2 系统电路设计

硬件电路部分主要在于对荧光信号微弱小信号的读出采集, 一般利用运放将信号放大后再进行处理。由于荧光信号比较微弱, 故需要 2 次放大将其放大至合适的范围内, 再进行采集。传统的单通道的两级放大结构如图 2 所示。

电路的传递函数为:

$$U_{\text{out},1} = -I_{\text{in}} R_1 \quad (2)$$

$$U_{\text{out},2} = -\left(\frac{R_3}{R_2}\right) U_{\text{out},1} \quad (3)$$

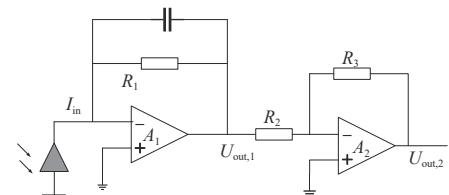


Fig.2 Traditional single-channel circuit readout structure
图 2 传统的单通道电路读出结构

式中: $U_{out,1}$ 为第一级放大后的电压值; I_{in} 为荧光信号转化后的光电流; R_1 为反馈电阻值, 其值等于第一级电路的放大倍数; $U_{out,2}$ 为次级放大后的电压值; R_3 和 R_2 为反向放大电路的分压电阻, 其比值等于放大倍数。

由于实际中器件的不理想和外界环境的干扰, 导致在输出端 $U_{out,2}$ 处采集的荧光信号中混杂直流分量和随机噪声, 即信号中的非理想因素导致实际中的荧光衰减信号的表达式为:

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} + I_d + I_n \quad (4)$$

式中: I_d 为通道的直流分量; I_n 为随机噪声引起的噪声干扰。这些非理想因素的存在, 导致实际采集到的荧光信号衰减曲线往往有很大的干扰误差。如图 3 所示, 采集到的荧光信号样本数据, 生成的衰减曲线的线条很粗, 这是由于样本数据受噪声干扰, 存在上下跳跃误差。随机噪声的产生主要是由于电路中的一些本底噪声和环境干扰。同时数据衰减存在直流分量, 是由于光电管的暗电流、运放的输入偏置电流和失调电压等带来的。

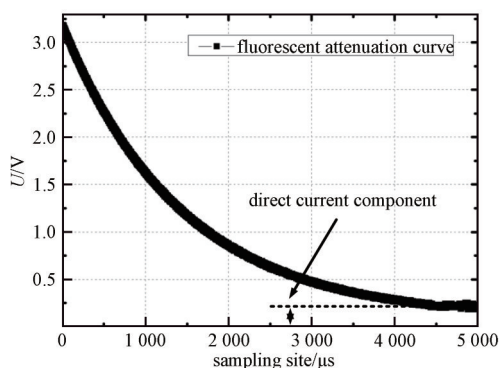


Fig.3 Sampling data of a single-channel structure
图 3 单通路结构的采样数据

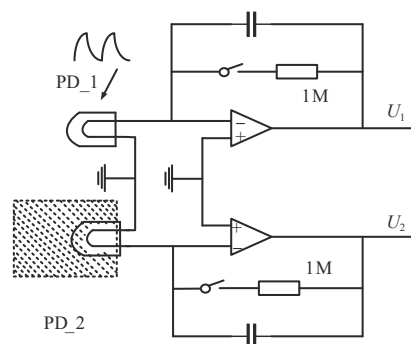


Fig.4 Front $I-U$ conversion circuit
图 4 双通道前置 $I-U$ 转换电路

为消除直流分量, 加强对随机噪声的抑制, 提出了一种双通路结构的信号读出方式, 如图 4 所示。利用一个黑暗条件下的光电管作参考通道, 主要采集通道中的随机噪声和光电管自身暗电流等非理想因素的影响, 再利用参考通道与荧光信号通道的仪表差分相减来消除电路中的非理想因素, 从而得到单一光滑的荧光衰减信号。光电管的暗电流、电路中的随机噪声等非理想因素大约为 2 nA, 经前置 $I-U$ 转换放大 10^6 倍, 得到 U_2 处的电压值为:

$$U_2 = 2 \text{ nA} \times 10^6 \Omega = 2 \text{ mV} \quad (5)$$

荧光信号转换为光电流后的初始强度大约为 40 nA, 故得到 U_1 处的电压值为:

$$U_1 = (40 + 2) \text{ nA} \times 10^6 \Omega = 42 \text{ mV} \quad (6)$$

整个信号读出电路采用两级放大, 次级为一个仪表放大器, 电路结构如图 5 所示。电路的消噪能力是利用次级仪表放大器的 2 次差分。根据电路中运放的虚短虚断, 在电阻 R_g 上形成荧光信号的第 1 次差分, R_g 上的电压为两路通道的输出电压差 ($U_1 - U_2$), 这一步消除了前置光电探测中的非理想因素, 包括光电管的暗电流、前置放大器中的随机噪声和运放的失调等。

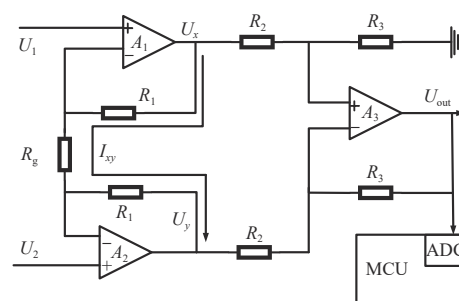


Fig.5 Secondary instrument amplification circuit
图 5 次级仪表放大电路

$$I_{xy} = \frac{(U_1 - U_2)}{R_g} \quad (7)$$

电阻 R_g 将差分后的荧光信号电压再一次转换成电流, 往上经运放 A_1 同向放大, 往下经运放 A_2 反向放大, 在运放 A_3 上形成荧光信号的第 2 次差分并对 $(U_x - U_y)$ 的差值放大 (R_3/R_2) 倍, 这一步消除了仪表放大器中运放的失调电压等干扰因素。

$$U_x = (U_1 - U_2) \left(1 + R_1/R_g \right) \quad (8)$$

$$U_y = (U_1 - U_2) \left(-R_1/R_g \right) \quad (9)$$

$$U_{out} = (U_x - U_y)(R_3/R_2)$$

(10)

式中： U_x 为荧光信号通道第一级放大后的电压值； U_y 为无光的参考通道第一级放大后的电压值； U_{out} 为2个通道进行差分仪表放大后得到的电压值。

令 $R_3=3R_2$ ， $R_1=12R_g$ ；整个电路的传通函数为：

$$U_{out} = 75(U_1 - U_2)$$

(11)

利用双通道的电路结构，可以极大地抑制通道中的随机噪声的干扰。并完全消除直流分量的影响，采集到的荧光信号衰减曲线如图 6 所示。

整个硬件电路的印制电路板(Printed Circuit Board，PCB)设计如图 7 所示。

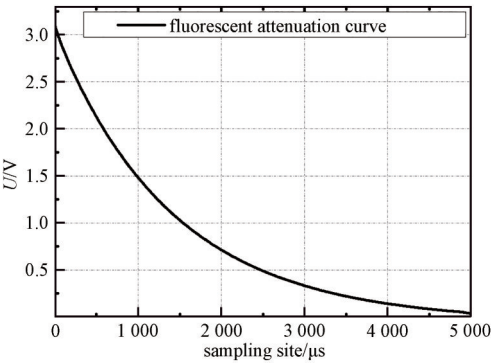


Fig.6 Sampling data of dual-channel structure
图 6 双通路结构的采样数据

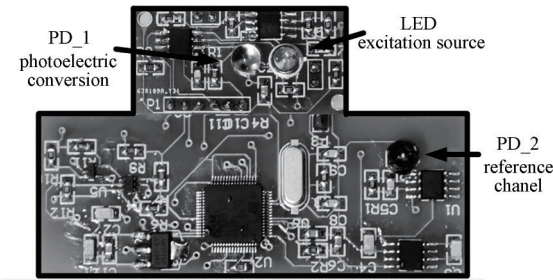


Fig.7 Circuit board of the hardware part of the system
图 7 系统硬件部分电路板

3 系统程序设计

利用硬件电路对荧光信号进行放大读出后，需采用主控芯片多点控制单元(Micro Control Unit，MCU)的模拟数字转换器(Analog-to-Digital Converter，ADC)模块对信号进行采集。为保证信号有足够大的衰减空间，提高测温精确度，将荧光信号初始电压值锁定在 3.1 V 进行衰减，然后通过定时器触发 ADC 采样，确保每个采样点时间间隔的一致性；再通过直接存储器访问(Direct Memory Access，DMA)用作数据传输，将采集到的样本数据存储起来。系统软件部分流程如图 8 所示。

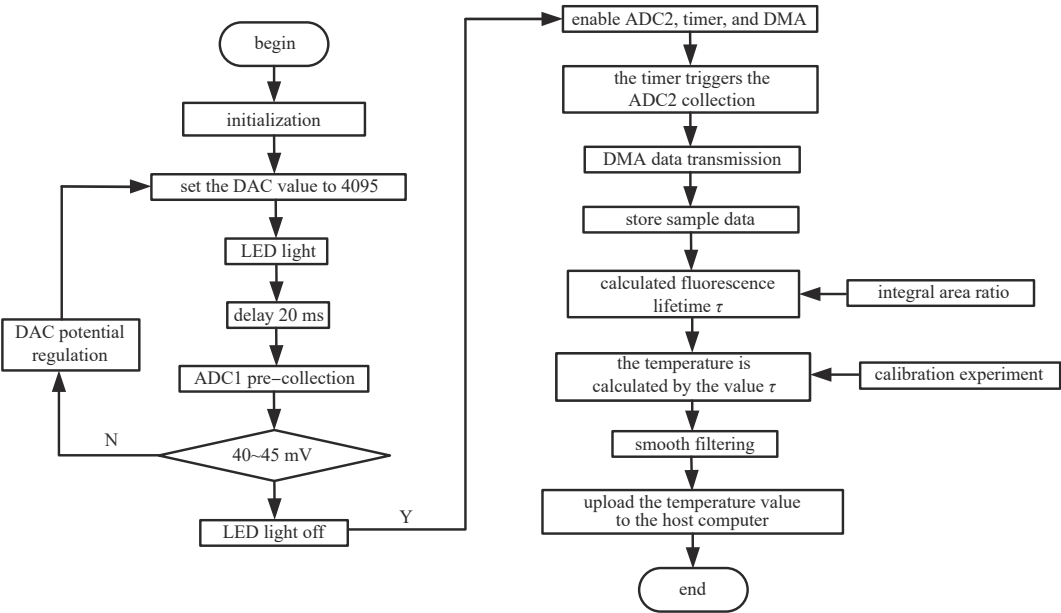


Fig.8 Flow chart of the system software part
图 8 系统软件部分流程图

为保证提取出的荧光寿命值更加精确, 荧光信号从初始电位开始, 其衰减范围越大越好。同时 MCU 采集的模拟电压范围的最大宽度为 0~3.3 V, 因此为留有一定余量, 保证精确, 将荧光信号初始电压范围锁定在 3.1 V 进行衰减。为保证初始电位恒定, 需要利用 MCU 对光源的亮度进行调节, 保证反馈回的荧光信号初始强度恒定, 避免荧光强度等外界因素对温度的求解造成干扰。即需要利用 MCU 的数字模拟转换器 (Digital to Analog Converter, DAC) 模块输出一个可调节的模拟电压值来调节光源亮度, 电压值变换范围为 0~3.3 V。

4 实验测试与讨论

为得到荧光寿命与温度之间的函数关系, 需要进行标定实验, 将荧光光纤探头完全浸浴在油浴锅中, 如图 9 所示, 油浴锅为巩义市予华仪器公司生产的一种集热式恒温加热磁力搅拌器, 温度调节范围为 0~150 °C。从 10 °C 开始升温至 130 °C, 得到不同温度下的荧光信号衰减曲线。

在采集到荧光信号衰减曲线的基础上, 利用积分面积比值法求得荧光寿命 τ 值, 过程如图 10 所示。

由于荧光信号呈类指数衰减, 其解析表达式为:

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (12)$$

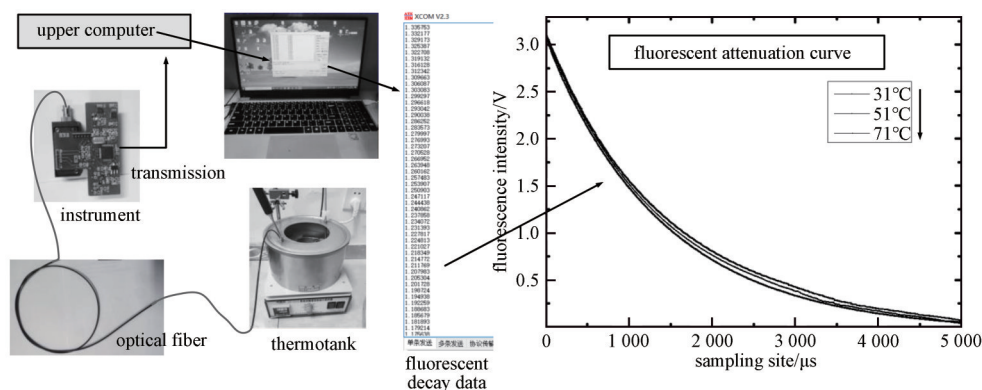


Fig.9 Calibration experiment one

图9 标定实验一

积分面积比值法提取荧光寿命的处理思想是: 把拟处理的荧光余辉曲线按等时长 ΔT 分成 3 段, 以 t_1 为时间起点, 对曲线进行 3 次积分, 如式 (13) 所示:

$$\begin{cases} S_1 = \int_{t_1}^{t_2} I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} dt \\ S_2 = \int_{t_2}^{t_3} I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} dt \\ S_3 = \int_{t_3}^{t_4} I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} dt \end{cases} \quad (13)$$

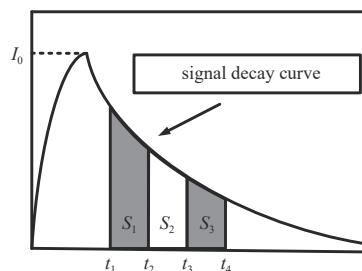


Fig.10 Calculating the fluorescence lifetime
图 10 积分面积比值法求荧光寿命

时长 ΔT 为积分的积分宽度, 可得荧光寿命的表达式为:

$$\tau = \frac{\Delta T}{\ln \left(\frac{(S_1 - S_2) / (S_2 - S_3)}{1} \right)} \quad (14)$$

在计算提取出荧光寿命后, 为得到荧光寿命与温度之间的函数关系, 需再次进行标定实验。将每一个温度点的荧光寿命值与标准温度之间进行映射, 求解出函数关系式, 如图 11 所示。

从图 11 可以看出, 荧光寿命与温度之间有明显的函数关系, 对数据点进行多项式拟合, 拟合的阶数越高, 求得的解析式的函数关系就越接近于真实值, 同时为兼顾复杂度, 采用三阶多项式进行拟合得到解析表达式为:

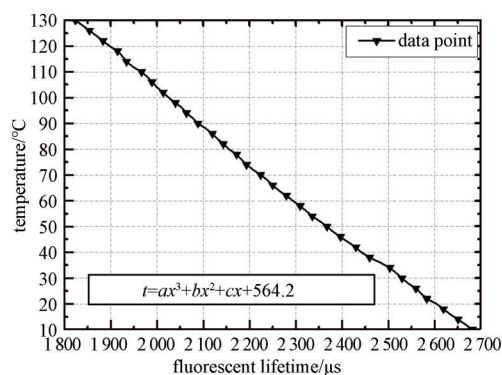


Fig.11 Calibration experiment two
图 11 标定实验二

$$T = (-1.471 \times 10^{-10})\tau^3 + (3.588 \times 10^{-5})\tau^2 - 0.3013\tau + 564.2 \quad (15)$$

在得到荧光寿命与温度的函数关系后，基本完成了整个系统的测温功能。然后与标准的温度进行比对，以恒定温度 23.66 °C 为例，重复测温实验，观察温度点的测温偏差如表 1 所示。

表 1 重复温度点测试误差数据

Table 1 Error data of repeat temperature point test

number of measurement	the measured temperature/°C	the standard temperature/°C
0	23.533	23.66
1	23.668	23.66
2	23.730	23.66
3	23.634	23.66
4	23.661	23.66
5	23.794	23.66
6	23.743	23.66
7	23.597	23.66
8	23.679	23.66
9	23.652	23.66

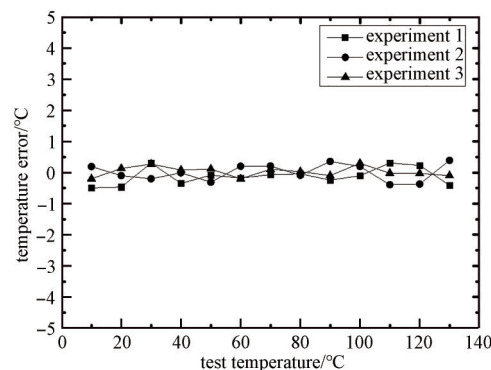


Fig.12 Overall deviation of system temperature measurement

图 12 系统整体精确度

温度的变化通过调节恒温油浴锅实现。对 10~130 °C 范围内的系统测温精确度进行比对，在整个温度范围内共进行了 3 次反复测量，如图 12 所示，发现最高温度偏差 0.5 °C。

5 结论

本文描述了一种双通道的荧光型光纤测温系统，利用一个黑暗条件下的光电管做参考通道，主要采集通道中的随机噪声和光电管自身暗电流等非理想因素的影响，再利用有光通路和参考通路的差分相减来消除电路中的非理想因素。相比于传统电路结构，完全消除了直流分量，并大大增强了抗随机噪声干扰的能力，从而得到了单一光滑的荧光衰减信号。整个测温系统设计分为光路、电路和程序 3 个部分。完成了从 10~130 °C 范围内的测温，测温精确度 0.5 °C，基本满足了日常生产和一些特殊领域类的测温要求，在一些电磁干扰较强、生物化学、医疗设施等领域具有潜在的应用价值。

参考文献：

- [1] GRATTAN K T V, ZHANG Z Y. Fiber optic fluorescence thermometry[C]// LAKOWICZ J R. Topics in Fluorescence Spectroscopy. Boston, MA: Springer, 1994: 335–376. doi:10.1007/0-306-47060-8_11.
- [2] BOSSELMANN T, REULE A, SCHRODER J. Fiber-optic temperature sensor using fluorescence decay time[C]// The 2nd International Conference on Optical Fiber Sensors. Stuttgart, Germany: SPIE, 1984: 151–154. doi:10.1117/12.945072.
- [3] LAM H T, KOSTOV Y, TOLOSA L, et al. A high-resolution non-contact fluorescence-based temperature sensor for neonatal care[J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(3): 035104. doi:10.1088/0957-0233/23/3/035104.
- [4] BOHNENBERGER T, MATOVIC J, SCHMID U. Thin catalyst layers based on carbon nanotubes for PEM-fuel cell applications[J]. Proceedings of SPIE, 2011(8066): 80660C. doi:10.1117/12.886868.
- [5] IQBAL M, SEADAWY A R, KHALIL O H, et al. Propagation of long internal waves in density stratified ocean for the (2+1)-dimensional nonlinear Nizhnik-Novikov-Vesselov dynamical equation[J]. Results in Physics, 2020(16): 102838. doi:10.1016/j.rinp.2019.102838.
- [6] RODENAS J A, GARELLO R. Detection and location of internal waves in ocean SAR images by means of wavelet decomposition analysis[C]// 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Lincoln, NE, USA: IEEE, 1996: 1953–1955. doi:10.1109/IGARSS.1996.516853.
- [7] JIA Danping, MENG Lingzhi, LIN Song, et al. The signal processing based on average and curve fit technique for optic-fiber fluorescent temperature measurement system in hyperthermia clinical[C]// 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering. Yichang, Hubei, China: IEEE, 2011: 5110–5113. doi:10.1109/ICECENG.2011.6057200.
- [8] SIAÏ A, HARO-GONZÁLEZ P, HORCHANI NAIFER K, et al. Optical temperature sensing of Er³⁺/Yb³⁺ doped LaGdO₃ based on fluorescence intensity ratio and lifetime thermometry[J]. Optical Materials, 2018(76): 34–41. doi:10.1016/j.optmat.2017.12.018.
- [9] ZHANG Zhiyi, GRATTAN K T V, PALMER A W. A novel signal processing scheme for a fluorescence based fiber-optic temperature sensor[J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62(7): 1735–1742. doi:10.1063/1.1142414.

- [10] REULE A, SCHRODER J. Fluorescence decay temperature sensor with optimized signal processing[C]// 1986 International Symposium/Innsbruck. Innsbruck, Austria:SPIE, 1986:52–58. doi:10.1117/12.938524.
- [11] ZHAO Yong, CHEN Maoqing, LYU Riqing, et al. Small and practical optical fiber fluorescence temperature sensor[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(10):2406–2411. doi:10.1109/TIM.2016.2575241.
- [12] SUN Weimin, ZHANG Jianzhong, YU Lei, et al. Measurement of decay time based on FFT[J]. Optics & Laser Technology, 2004, 36(4):323–326. doi:10.1016/j.optlastec.2003.09.020.
- [13] 李明. 一种长基线阵列地面单站无源定位方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19(4):569–572. (LI Ming. Passive location method to long baseline antenna array[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021, 19(4):569–572.) doi:10.11805/TKYDA2021184.
- [14] LIU Duan, NGO N Q, TJIN S C, et al. A dual-wavelength fiber laser sensor system for measurement of temperature and strain[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(15):1148–1150. doi:10.1109/lpt.2007.901128.

作者简介:

肖宪伟(1998–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为信号处理与嵌入式系统 .email:344876190@qq.com.

金湘亮(1974–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新型传感器与混合集成电路设计.

杨 健(1996–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为单光子雪崩二极管的设计.

肖 力(1996–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为忆阻器电路模型研究.