

doi: 10.3788/gzxb20164507.0706001

基于红蓝宝石光纤传感头的多通道光纤温度传感器

苏建加, 姜培培, 崔巍, 吴波, 沈永行

(浙江大学 光电科学与工程学院, 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要: 为了实现从室温到 1000℃ 范围内的多点温度实时测量, 基于红蓝宝石光纤传感探头, 研制了一种连续快速温度测量的多通道光纤温度传感器. 该系统结合了荧光测温 and 辐射测温原理, 可同时测量 8 个传感探头的温度随时间的变化信号. 提出基于面积平衡计算的数字迭代算法用来计算荧光寿命. 与快速傅里叶变换算法的仿真对比结果表明, 该算法计算速度快、抗噪声能力强、结果稳定性好、测量精度高. 对系统进行长期的温度和稳定性实验, 结果表明该系统具有较高的稳定性和测量精度, 测温范围从室温到 1000℃, 精度达 $\pm 1^\circ\text{C}$.

关键词: 光纤传感器; 温度测量; 红蓝宝石光纤; 辐射测温; 数字迭代算法

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0706001-6

Multi-probe Fiber Thermometer Based on Sapphire-ruby Fiber Sensing Head

SU Jian-jia, JIANG Pei-pei, CUI Wei, WU Bo, SHEN Yong-hang

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To measure the temperature range from room temperature to 1 000℃, a sapphire-ruby fiber-based multi-probe thermometer was proposed. The thermometer system combines fluorescence lifetime with radiation and, which can measure the temperature of 8 probes at the same time. A digital iteration algorithm based on area balance was presented to measure the fluorescence lifetime. Compared with the Fast Fourier Transformation algorithm through simulation, the proposed algorithm features robust, high efficiency, strong anti-noise and immune to background level. The temperature test and stability test of the system were studied for a long time, the results show that the system has high stability and accuracy, the measured temperature range from room temperature to 1 000℃, the accuracy can be $\pm 1^\circ\text{C}$.

Key words: Fiber optic sensors; Temperature measurement; Sapphire-ruby fibers; Radiation; Digital iteration algorithm

OCIS Codes: 060.2370; 170.3650; 260.2510; 280.6780

0 引言

光纤温度传感器是温度测量的重要技术手段, 具有抗电磁辐射干扰、测温范围大、测温精度高、可分布式测量等优点, 相关技术在近年来得到了快速发展. 目前光纤温度传感器系统主要有基于光纤法布里-珀罗干涉仪(Fiber Fabry - Pérot interferometer, FFPI)的光纤温度传感器^[1]、基于光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的光纤温度传感器^[2]、基于晶体或玻璃荧光温度特性的荧光测量光纤温度传感器^[3-4]、基于普

朗克黑体辐射原理的光纤温度传感器^[5]、基于喇曼散射效应的分布式光纤温度传感器^[6-7]等. 其中, 基于 FFPI 的光纤温度传感器适用于从室温到 1600℃ 高温的测量, 具有较高的测量灵敏度, 但是所涉技术是一种相对测量技术, 测量过程中需要特殊的温度标定参考基准. 利用 FBG 测温, 具有准分布检测的优点, 适合于多个传感器的复用, 但是, 对于利用石英光纤的 FBG, 其短时最高工作温度约为 1000℃, 长时间工作温度一般在 400℃ 以下, 虽然可以在蓝宝石光纤上制作 FBG 测量高温, 但蓝宝石光纤上的 FBG 带宽较大, 测温精

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61405174, 69407004, 59702007)资助

第一作者: 苏建加(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感技术. Email: sujianjia90@163.com

导师(通讯作者): 沈永行(1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤激光器、光纤传感器. Email: physyh@zju.edu.cn

收稿日期: 2015-12-16; 录用日期: 2016-01-26

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

度相对较低^[8-9]. 分布式喇曼光纤温度传感器是一种非点式传感器, 适合于长距离的分布式温度测量, 其所用光纤材料为石英光纤, 所测温度范围同样受到限制.

荧光测温技术利用某些特殊介质材料的荧光温度效应, 测温性能稳定, 精度较高, 但是在高温段荧光信号较弱, 背景辐射较强, 除了少数材料(如 Tm^{3+} : YAG)能够工作到 $1200^{\circ}C$ 的高温区间外^[10-11], 一般只能工作在温度低于 $500^{\circ}C$ 的范围内, 在高温段的测量需要其他技术加以配合; 与之相反, 辐射测温技术利用黑体的普朗克辐射原理, 通过检测物体的辐射光谱或辐射强度来检测所对应的温度, 在高温区具有较高灵敏度, 但是若采用可见或近红外波段的辐射光谱检测, 低温区信号较弱, 不适合在低于 $300^{\circ}C$ 的范围内工作.

为了实现从室温到超过 $1600^{\circ}C$ 温度区间的大范围的温度长期稳定测量, 本文作者沈永行等早在 1998 年提出了通过在蓝宝石光纤的端部直接生长一段红宝石光纤^[12], 并结合荧光测温技术和辐射测温技术实现宽波段温度测量的红蓝宝石光纤传感器系统^[13]. 在此后通过细致地考察红蓝宝石光纤在长时间高低温交替工作时的荧光性能稳定性, 发现在低于 $1400^{\circ}C$ 的环境中长期交替工作, 其荧光性能不会出现明显的变化, 适合于大范围长期稳定工作.

但是, 上述所研制的系统涉及的信号处理技术, 特别是荧光寿命检测技术都对应于单个光纤探头的光学信号处理, 采用一种具有较高测量精度的锁相检测电路检测误差信号, 根据误差信号由压控放大器改变调制信号的周期值来平衡测量荧光寿命值^[9, 14]. 该技术适用于仅有一组荧光衰减信号的单一传感探头荧光寿命检测, 并不适合多个传感探头信号的同时处理. 然而, 在航空航天领域中, 常需要测量多点的温度且要求设备体积小, 多通道传感器由于共用一套信号处理电路, 具有体积小、成本低等优点, 所以在航空航天领域具有较大优势.

本文提出并研制了八通道红蓝宝石光纤温度传感器, 能够结合荧光测温和辐射测温技术同时测量 8 个传感探头的温度随时间的变化信号. 为了实现多个通道荧光信号的实时检测, 提出了一种基于面积平衡计算的数字迭代算法, 可以同时处理多通道荧光衰减信号, 获得准确的荧光寿命测量值.

1 系统原理

研制的八通道红蓝宝石光纤温度传感器的结构如图 1. 包括红蓝宝石光纤传感头、光纤耦合器、荧光激励用的发光二极管(Light Emitting Diode, LED)和相应的驱动电路、将荧光和辐射信号分别转化为电信号的光电探测器、前置放大器和 A/D 转换器以及后端的信号解析单元. 红蓝宝石光纤如图 2, 其直径为 $850 \mu m$,

长度约为 $120 mm$, 其中掺铬离子部分的长度约为 $6 mm$, 由激光加热基座法(Laser Heated Pedestal Growth, LHPG)生长, 具体的生长过程见文献^[12].

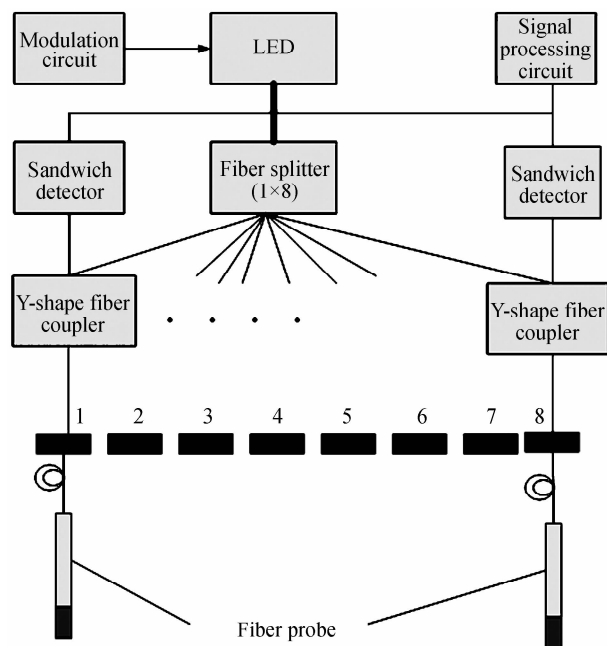


图 1 八路测温光纤传感器系统原理
Fig. 1 Schematic diagram of eight channel sapphire fiber thermometer

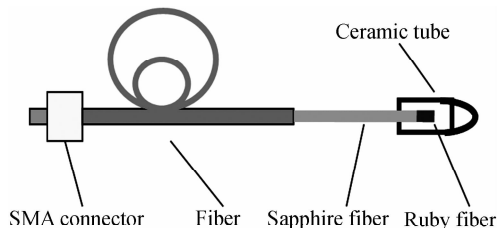


图 2 光纤探头结构
Fig. 2 The structure of fiber optics probe

首先, 调制驱动电路产生 $40 Hz$ 的方波信号调制 LED 的发光. LED 产生的中心波长在 $405 nm$ 、带宽约为 $10 nm$ 、功率约为 $200 mW$ 的紫光进入一个 1×8 的光纤多路分束器, 将紫光分为 8 部分. 这 8 部分紫光经由 Y 型光纤耦合器, 分别进入红蓝宝石光纤传感头. 红蓝宝石光纤端部的 $Cr^{3+}: Al_2O_3$ 晶体吸收 $400 nm$ 的紫光, 并产生波长为 $692 nm$ 和 $694 nm$ 的荧光, 所发出的荧光经红蓝宝石光纤和 Y 型光纤耦合器入射到 InGaAs/Si 复合型双色光电探测器, 并由其中的 Si 探测器探测. 此外, 红蓝宝石光纤外部配置一个高纯度的氧化铝陶瓷管(如图 2)在高温下该陶瓷管作为黑体腔产生相应的热辐射, 红蓝宝石光纤收集热辐射信号并藉由 Y 型光纤耦合器将热辐射信号传导到复合型双色光电探测器, 并由其中的 InGaAs 探测器探测. 复合型双色光电探测器的前段插入一个特殊镀制的双通带的窄带滤色片(中心波长分别是 $1550 nm$ 和 $700 nm$,

半高全宽为 50 nm),用以滤除通带外的荧光信号和热辐射信号以及其它杂散背景光.复合型双色光电探测器中的 Si 和 InGaAs 探测器分别将荧光信号和辐射信号转换为电信号并通过电流电压转换和信号放大,通过模数转换器转换成数字信号后,由现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)进行相应的荧光寿命和辐射信号计算,并最终给出八通道光纤传感探头对应的温度信号.

当激励光停止时,系统开始采集荧光信号.图 3 是系统中 FPGA 采集到的一组荧光信号,从图中可以看出荧光信号呈指数衰减.由于红蓝宝石材料的荧光寿命一般在几十 μs 到 3 ms 左右,考虑到计算精度,设定整个采样时间长度为 20.48 ms.

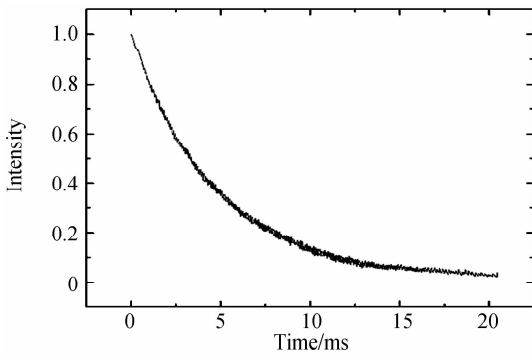


图 3 荧光衰减信号

Fig. 3 The fluorescence decay signal

2 荧光寿命检测算法

针对图 3 所示的实际采集的荧光衰减信号,需要准确地给出相应的荧光寿命.目前已有的荧光寿命测量方法主要有基于电子线路的锁相检测^[3,14]、数据拟合算法^[15-18](包括 Prony 方法、快速傅里叶变换、小波变换等)、时域法^[17,19](两点法和平衡积分法).一般地说,时域法比较简单,容易实现实时性,但是效果较差,测量精度低;数据拟合算法能够保证较高的精度,但是往往需要进行比较复杂的计算,因此对于运行速度不快的处理器或者在多通道的测温系统中很难保证实时性;相比于这两种数字处理算法,锁相检测技术完全靠硬件实现,能够保证很高的精度和实时性,但是在多通道测温系统中,需要多个调制的 LED 或激光二极管(Laser Diode, LD)光源以及多个相应的调制驱动电路,不利于系统的集成和体积的减小.

针对多通道的荧光测温系统,提出了一种基于面积平衡计算的新型数字迭代算法.该算法在原理上借鉴了基于硬件电路的荧光寿命锁相检测技术,假定荧光寿命值作为初始迭代值,将整个荧光衰减曲线按比例分成三个不同时间长度的部分,分别计算三部分荧光曲线所对应的面积,并计算面积的平衡差.如果面积

的平衡差不为零,则相应地增加或减少三个时间区间的长度,重复计算过程,直至面积的平衡差为零,此时确定的时间长度正比于荧光寿命值.因为该算法仅涉及简单的加、减法,且迭代收敛速度很快(4096 个数据一般不超过 12 次迭代),因此计算速度非常快,同时具有很高的测量精度和重复性,适合于信噪比较差的荧光信号应用.

荧光寿命曲线 $I(t)$ 为

$$I(t) = Ae^{-t/\tau} + B \quad (1)$$

式中, τ 代表表示荧光寿命,是需要测量的数据, A 是常量,表示荧光信号的强度大小, B 代表本底信号,可以作为常量考虑.

对于按周期 T 、占空比 50% 进行调制的 LED 激励信号,光纤探头所产生的荧光衰减区长度为 $T/2$.将整个荧光衰减过程(时长为 $T/2$)分成三段考虑,分别针对这三段的荧光信号做积分处理,计算得到面积的平衡差,即

$$y = \int_0^{T/16} I(t) dt - \int_{T/16}^{5T/16} I(t) dt + \int_{5T/16}^{T/2} I(t) dt = A \int_0^{T/16} e^{-t/\tau} dt - A \int_{T/16}^{5T/16} e^{-t/\tau} dt + A \int_{5T/16}^{T/2} e^{-t/\tau} dt = A\tau (-2e^{-T/16\tau} + 1 + 2e^{-5T/16\tau} - e^{-T/2\tau}) \quad (2)$$

分析式(2)可以发现, $T=9.75\tau$ 时, $y=0$,因此可以通过调整 T 的长度,使得 y 值逐渐接近于 0.当 y 值稳定于 0 值时,荧光寿命值 $\tau=T/9.75$.这个过程是基于硬件电路的锁相检测电路的原理所在.从式(2)可以看出,该算法在原理上与本底信号 B 和荧光强度值 A 无关.

对于多通道的数字采集信号,由于各个通道光纤传感探头所对应的温度不同,荧光寿命也各不相同,因此难以适用同一个调制周期,逐渐调整 T 的技术方法将难以应用.因此,采用固定周期 T_0 的调制信号,实时采集一次荧光衰减信号,并设定一个与荧光寿命相对应的衰减区长度 $T/2(T/2 \leq T_0/2)$,计算相应的平衡面积差 y .如 y 不等于 0,则按二分法逐渐调整 $T/2$ 的大小,直至 $y=0$.此时,根据 T 的值,有 $\tau=T/9.75$.

图 4 给出了平衡面积差数字迭代算法的工作原理,图中整个横坐标区间长度为 $T_0/2$.首先设定 $T/2 = T_0/4$,计算 y 值,此时 $y > 0$;然后,设定 $T/2 = (T_0/4 + T_0/8)$,重新计算 y 值,根据此时 y 值的符号,可以进一步确定下一次的 T 值;如此继续,将得到一个合适的 T 值,使得 y 趋于 0.

实际系统中,荧光信号采样点数为 4 096,采样间隔为 5 μs .可以利用二分法快速迭代计算出 τ .

经过分析,可得出该算法的计算量为 $N \log_2(N)$ 次加法,可以采用整数加法运算;而快速傅里叶变换

(Fast Fourier Transform, FFT)算法需要 $N\log_2(N)$ 次蝶形运算. 对于嵌入式设备而言, 加法比乘法快很多倍, 因此, 本算法可以大幅度地提高运算速度, 并满足多通道实时测量计算的要求.

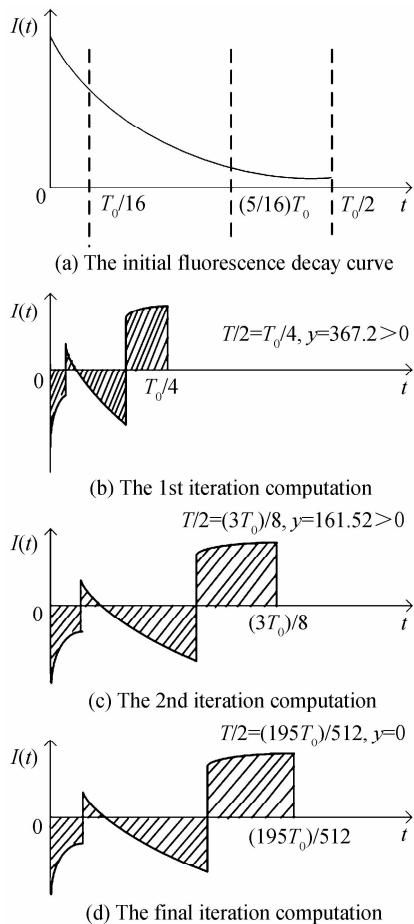


图 4 荧光信号拟合示意图 (荧光寿命 = 3.2 ms, 温度为 25℃)
Fig. 4 The iteration process to determine the fluorescence lifetime of a ruby probe under working temperature of 25℃ at which fluorescence lifetime should be 3.2 ms

从本算法的计算原理, 很容易发现在无噪声时的计算精度接近于采样时间精度. 对于 $5\mu\text{s}$ 的采样间隔, 计算精度约为 $5\mu\text{s}$. 在不同幅度白噪声存在的情况下, 进一步比较了本算法与 FFT 算法的计算精度. 此时, 荧光信号可以表示为

$$f(t) = Ae^{-t/\tau} + B + \delta \quad (3)$$

式中 δ 表示高斯白噪声.

利用两种算法各自进行 500 次荧光寿命计算, 噪声与信号比值范围为 0 到 2.5%, 统计不同信噪比情况下荧光寿命的标准偏差, 采样点数分别为 1 024 点、2 048 点以及 4 096 点, 采样长度为 20.48 ms. 其结果如图 5, 采样点越少、噪声越大则荧光寿命标准偏差也越大. 对于采样间隔 $5\mu\text{s}$ (对应于采样点数 4 096 点)、噪声信号比为 2.5%, 荧光寿命的标准偏差约为 $13\mu\text{s}$.

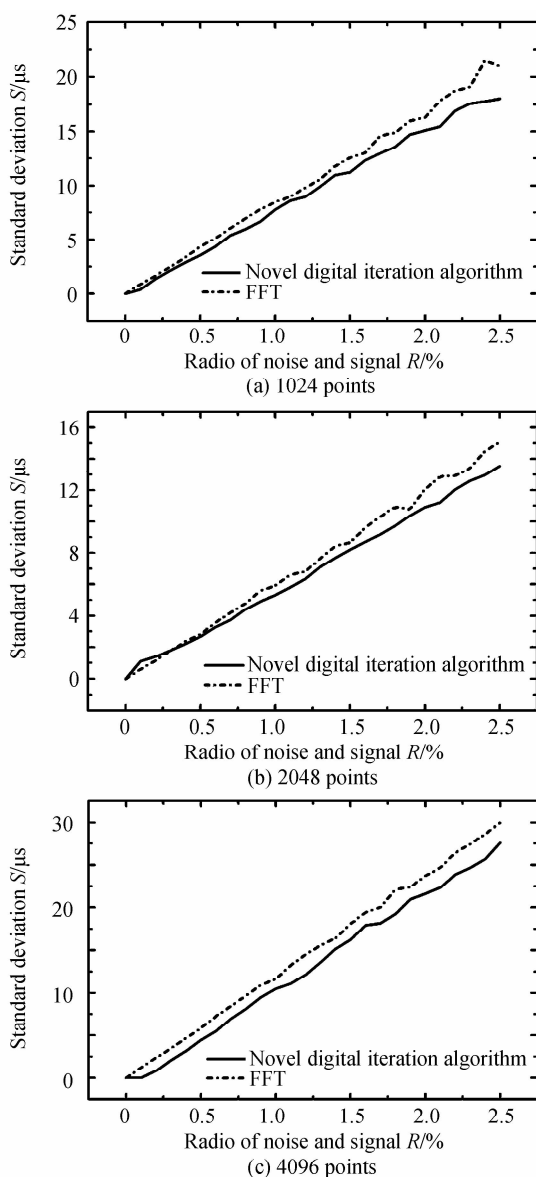


图 5 噪声存在情况下 FFT 算法与数字迭代算法的标准偏差比较

Fig. 5 The comparison of simulated standard error between the proposed digital iteration algorithm and the FFT algorithm under noisy signal condition

3 实验结果及其分析

所研制的光纤温度传感器结合了荧光测温 and 辐射测温技术, 其中辐射测温工作在 350℃ 以上的温度区间, 以确保有较强的辐射强度以及较高的信噪比. 而荧光测温工作在 400℃ 以下, 保证所测的荧光信号具有较强的信噪比. 350℃ 和 400℃ 之间为交叠区, 可用于两种方法的交叉标定.

图 6(a) 是测量得到的温度与荧光寿命的关系. 实际工作时, 可以利用测量得到的荧光寿命值, 查表得到对应的温度值. 图 6(b) 是辐射强度与温度的对应关系, 同样地, 可以利用该曲线查表得到温度值.

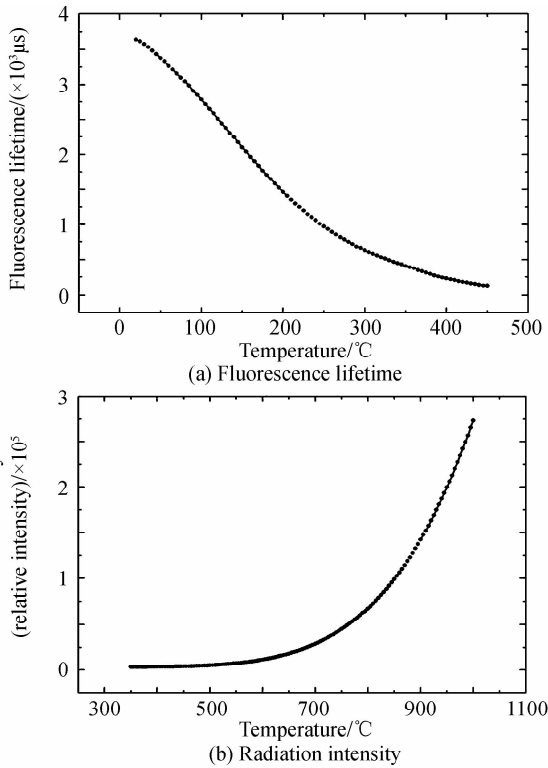


图6 红蓝宝石探头荧光寿命及辐射强度与温度的关系
Fig. 6 Temperature dependence of the fluorescence lifetime and the radiation intensity of the Sapphire-ruby probe

为了考察所研制系统的长期工作稳定性,将红蓝宝石光纤传感探头放置于管式高温炉中,分别记录传感器在不同温度点测量的温度变化.图7给出了温度分别为23℃、97℃、234℃、355℃和779℃时传感器的测试结果,可以看出,在各温度区间,温度测量精度均优于±1℃.

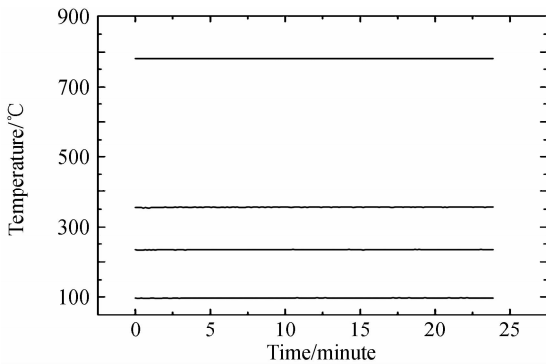


图7 红蓝宝石光纤传感器稳定性测试结果
Fig. 7 The stability test results of the sapphire fiber thermometer

4 结论

基于红蓝宝石光纤传感头,应用荧光测温 and 辐射测温原理,研制了一个八通道的高性能光纤温度传感系统,其测温范围覆盖室温到1 000℃,精度优于±1℃.所研制系统适用于各种恶劣环境条件下的温度测

量.在系统研制中,为了实现多通道荧光信号的实时、快速、准确处理,提出了一种基于面积平衡计算的数字迭代算法,可以准确地获得相应的荧光寿命值.该算法具有计算速度快、测量精度高、稳定性好、不受本底信号影响、抗噪声性能强的特点,能够保证整个光纤温度传感系统的实时性和测温精度要求.该算法也可应用于常规的指数拟合,特别适用于嵌入式设备中实现指数拟合算法处理,具有一定的应用前景.

参考文献

[1] DUAN D W, RAO Y J, WEN W P, *et al.* In-line all-fibre Fabry-Perot interferometer high temperature sensor formed by large lateral offset splicing[J]. *Electronics Letters*, 2011, **47**(6): 401-403.

[2] YANG Run-guang, BAO Hua-long, ZHANG Shu-qin, *et al.* Simultaneous measurement of tilt angle and temperature with pendulum-based fiber Bragg grating sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, **15**(11): 6381-6384.

[3] GRATTAN K T V, PALMER A W, ZHANG Z. Development of a high - temperature fiber - optic thermometer probe using fluorescent decay[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1991, **62**(5): 1210-1213.

[4] WANG Dong-sheng, PAN Wei-wei. Sapphire optic fiber thermometer for high temperature in tundish [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(4): 614-617.

王冬生, 潘玮玮. 一种测量高温中间包的蓝宝石光纤温度计[J]. *光子学报*, 2010, **39**(4): 614-617.

[5] DEWITT D P N, NUTTER G D. Theory and practice of radiation thermometry [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 2007, **186**(99): 221 - 238.

[6] BOLOGNINI G, PARK J, SOTO M A, *et al.* Analysis of distributed temperature sensing based on Raman scattering using OTDR coding and discrete Raman amplification [J]. *Measurement Science and Technology*, 2007, **18**(10): 3211.

[7] TANG Yu-quan, SUN Miao, LI Jun, *et al.* Temperature calibration of distributed optical fiber temperature sensor based on raman scattering[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(5): 0506006.

汤玉泉, 孙苗, 李俊, 等. 基于喇曼散射的分布式光纤温度传感器的温度修正[J]. *光子学报*, 2015, **44**(5): 0506006.

[8] GROBNIC D, MIHAILOV S J, SMELSER C W, *et al.* Sapphire fiber Bragg grating sensor made using femtosecond laser radiation for ultrahigh temperature applications [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(11): 2505-2507.

[9] MIHAILOV S J, DAN G, SMELSER C W. High-temperature multi-parameter sensor based on sapphire fiber Bragg gratings. [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(16): 2810-2.

[10] SHEN Yong-hang, ZHAO Wei-zhong, HE Jing-lei, *et al.* Fluorescence decay characteristic of Tm-doped YAG crystal fiber for sensor applications, investigated from room temperature to 1400 °C [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, **3**(4): 507-512.

[11] SHEN Yong-hang, CHEN Shu-ying, ZHAO Wei-zhong, *et al.* Growth characteristics and potential applications in optical sensors of composite Cr⁴⁺: yttrium-aluminum-garnet (YAG)-Nd³⁺: YAG crystal fiber [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, **74**: 1187-1191.

[12] SHEN Yong-hang, WANG Yan-gi, TONG Li-min, *et al.* Novel sapphire fiber thermometer using fluorescent decay

- [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1998, **71**(1): 70-73.
- [13] SHEN Yong-hang, TONG Li-min, WANG Yan-gi, *et al.* Sapphire-fiber thermometer ranging from 20 to 1800 °C[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(7): 1139-1143.
- [14] GRATTAN K T V, ZHANG Z Y. Fiber optic fluorescence thermometry [M]. Springer Science & Business Media, 1995.
- [15] ZHANG Z, GRATTAN K T V, HU Y, *et al.* Prony's method for exponential lifetime estimations in fluorescence - based thermometers[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1996, **67**(7): 2590-2594.
- [16] SUN Wei-min, ZHANG Jian-zhong, YU Lei, *et al.* Measurement of decay time based on FFT[J]. *Optics & Laser Technology*, 2004, **36**(4): 323-326.
- [17] ROSSO L, FERNICOLA V C. Time-and frequency-domain analyses of fluorescence lifetime for temperature sensing[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, **77**(3): 034901.
- [18] WU Jin-ling. Fluorescence fiber temperature sensor based on wavelet transform[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1149-1152.
武金玲. 基于小波变换技术的荧光光纤温度传感器研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(5):1149-1152.
- [19] HU Chun-hai. Study on theory and experiment of optical fiber fluorescence temperature sensor [D]. Yanshan University, 2003.
胡春海. 光纤荧光温度传感器理论和实验研究[D]. 燕山大学, 2003.