

注：国家自然科学基金资助项目（编号：61177076）

中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（编号：2012-la-020）

摘要：文章从荧光测温技术类型、温敏荧光物质的类型、探头结构和荧光信号的检测四个方面，系统地讨论了光纤荧光温度传感器的沿革与低成本发展方向、关键技术、难点；分析提高温度测量精度的典型优化方案和各自的优缺点；明确当前光纤荧光温度传感器存在的问题、应用前景与新的研究方向。

关键词：温度传感器；光纤；荧光；寿命；

中图分类号：TP212.1 文献标识码：A 文章编号：1006-883X (2012) 11-0012-08

收稿日期：2012年9月16日

低成本的光纤荧光温度传感器

徐钰山 黎敏

武汉理工大学物理系，湖北武汉 430070

一、引言

光纤测温技术是20世纪70年代兴起的一门温度测量技术，相比于传统的电子式温度传感器，具有抗电磁干扰亦不产生电磁干扰、耐高温、抗腐蚀等独特优势，适合各种易燃易爆以及体积受限的恶劣环境，在工业生产中有着极为广泛的应用前景。

光纤荧光传感技术是基于材料的荧光效应和光纤传输的光学测量技术。伴随着数字化、在线测温要求的不断提高，半导体吸收型、F-P干涉型、光纤光栅（FBG）、分布式等新型光纤温度传感器不断推陈出新。光纤荧光温度传感器兼备光纤技术和荧光测温技术的优点，近年来在工业工程监控领域引起广泛关注。

光纤荧光传感技术自研究始就面临着光纤、光源、检测电路和制作工艺等方面问题。例如，国防科技大学对掺铒光纤荧光光源的研究初步解决了光源功率的需求^[1]；浙江大学的先期研究侧重荧光材料性能，证实了测温可行性，但应用性研究少^[2]；湖南大学基于荧光寿命的研究受限于数据采集和信噪比低，而在测

量精度上停滞不前^[3]。

随着研究推进，敏感单元直径从毫米量级向微米量级拓展，光纤探头制式从单光纤向光纤束进化。如何进一步提高精度、可靠性，摆脱进口依赖、降低成本，研制和开发满足特殊测温要求的荧光温度传感器，实现信号采集的数字化、集成化和自动化是今后的总体发展方向。

本文针对荧光温度传感器的三大测温类型，细化传感系统整体结构并给出低成本选择的依据；着重从精度、测温范围和系统稳定性等方面分析检测算法的优劣；最后总结了发展现状和方向，存在的问题及新领域的应用前景。

二、荧光温度传感器测温原理

荧光温度传感器的核心是荧光材料的选择。荧光材料在激励光照射下辐射出波长更长的可见光，即荧光^[4]；激励光消失后，荧光淬灭通常呈指数衰减，指数衰减的时间称为荧光寿命。荧光峰值强度和荧光寿

命都与温度 T 相关，检测荧光强度等信息可计算出温度。

荧光余辉强度与时间的关系式为：

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

其中： A —常系数；

t —余辉衰减时间；

$I_p(t)$ —荧光峰值强度，是温度 T 的函数；

$\tau(T)$ —荧光余辉衰减时间，即荧光寿命，也是温度 T 的函数。

典型的荧光特性曲线如图 1 所示^[5]。

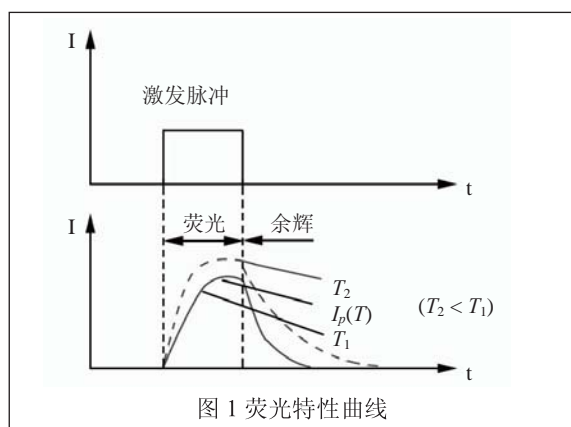


图 1 荧光特性曲线

荧光物质发光遵循斯托克斯定律，荧光强度与温度有唯一对应关系：

$$I(T) = (B + BAe^{-AE/kT})^{-1} \quad (2)$$

其中， $I(T)$ —荧光材料的荧光发射强度；

A, B, AE —常量；

T —荧光材料温度；

k —波尔兹曼常量。

自发跃迁过程完成后，通常认为荧光强度会衰减到激励光停止时荧光强度的 e^{-1} 倍，也就是粒子处于激发态的荧光寿命 $t = 1 / \sum A_{ji}$ 时：

$$I/I_0 = e^{-1} \quad (3)$$

其中， I —即时荧光强度；

I_0 — $t=0$ 时刻的荧光强度；

A_{ji} —自发跃迁几率。

自发跃迁引起的激发态粒子数变化是指数规律衰减的。此时的 t 表示粒子在 J 能级存在的平均时间，

也被称为是粒子处于激发态的荧光寿命 τ 。

光纤荧光温度传感系统结构主要由温敏荧光物质材料、荧光探头，激励光源、耦合器件和信号采集检测单元组成。

作为测温的核心部分是荧光寿命信号的判定和算法验证。理论上荧光衰减曲线为单调指数衰减函数，即：

$$I(t) = I_0 \exp(-t/\tau) \quad (4)$$

其中， I_0 —荧光衰减的初始强度。

忽略信号本底噪声和随机白噪声等干扰，从两点法、积分法、数据拟合法计算原理出发，采用合理的数学模型求解荧光寿命。

锁相检测的优点在于选定合适的时延比后，调制周期或频率正比于荧光寿命且比例系数可求，通过检测稳定输出的调制信号的周期或频率直接求解荧光寿命。

三、光纤荧光温度传感器主要测温类型

荧光光纤温度传感器的分类根据其工作原理，可分为传光型和传感型两种，根据荧光信号处理方式不同可分为荧光强度型、荧光强度比型和荧光寿命型三种，具体见表 1。下面根据信号处理方式的分类方法，介绍光纤荧光温度传感器主要测温类型。

表 1 荧光光纤温度传感器分类

分类标准	具体分类	含义	优缺点
工作机理	传光型	将光强、波长等信号作为测量信号	结构简单，抗干扰能力强，灵敏度较低
	传感型	利用物质本身物理性质随温度变化特性	灵敏度较高，但对应力较敏感，稳定性较差
荧光信号检测方式	荧光强度型	通过测量荧光的强度来获得温度值	技术上易实现，但受光源波动影响大，误差比较大
	荧光强度比型	通过测量荧光的强度比值来获得温度	强度比独立于激励光，但要有参考通道且电路复杂
	荧光寿命型	通过测量荧光衰减时间来获得温度	测量精确，稳定性好，灵敏度高

1、荧光强度型

强度型光纤温度传感器通过直接测量荧光发射强度随温度的变化实现测量。早期大多数荧光温度

测量系统基于荧光强度传感技术。1982年商业化Luxtron-1000^[6]系统从测量两条线的强度比来得到温度，光学系统十分复杂。强度型温度传感器最大的局限在于，为了补偿其他因素引起的温度变化和光源波动等，必须设计参考通道，导致成本过高、光学系统复杂。

2、荧光强度比型

荧光强度比技术根据荧光材料两个相邻的激发态能级的相对密度符合玻尔兹曼分布，且是温度的单调函数。钕掺杂的石英光纤在299~333 K的温度范围内温度分辨率为0.06 K^[7-8]。强度比方法测量结果与激励光源强度无关、数据分析简单，特别适用于掺杂光纤相关温度检测、对弯曲损失不敏感；缺点是须要有光强参考通道，电路设计较复杂且精度不高。

3、荧光寿命型

利用荧光寿命与温度的单调关系实现测温，不受其它外部条件如光纤损耗、光源强度波动和光耦合程度的影响，因此更有优势。目前用于荧光寿命测温的荧光材料有晶体材料（如红宝石用于高温）、掺稀土粉末、磷光体纳米颗粒等。高温传感器的测温可达773 K以上^[9]，磷光体纳米颗粒荧光衰减寿命大约在20ns左右^[10]。

从荧光温度传感器的发展来看，荧光寿命型传感器不受光源和探测器老化以及光纤弯曲的影响，已成为科学研究与生产中该类型温度测量的主要方法之一。

四、光纤荧光温度传感系统的结构

1、温敏荧光物质材料

荧光材料决定了传感器的测温范围、灵敏度及稳定性。目前应用最多的无机荧光材料分为晶体和粉末状化合物两类，其中粉末状化合物多数是广泛用作电光源和荧光屏的稀土激活化合物。根据荧光材料又可将温度传感器分为晶体材料型和稀土材料型。

晶体荧光材料一般在高温环境下测

量精度和采集效率很高。蓝宝石光纤温度传感器从室温到1800°C全程测温^[11]，亚历山大晶体(BeAl₂O₄:Cr³⁺)从室温到973K以上^[12]。但同时也面临硬度高，加工困难，且价格昂贵。一般常温下选取稀土荧光材料，可混合于透光性良好的胶性物质中，方便粘接于光纤探头端面。

稀土荧光材料有许多优点：吸收能量的能力强，转换率高；发射光谱从紫外到红外，在可见光区有很强的发射能力；荧光寿命从毫秒到纳秒，跨越6个数量级；可承受大功率电子束、高能射线和强紫外光，不易受环境影响，非常适合作为敏感材料。已经报道的镧激活的铈、氧硫化钆类Y₂O₂S:Eu+Fe₂O₃，测温范围从室温到450°C，分辨率为0.5°C左右^[13]。

荧光材料普遍存在光衰现象，使用过程中发光强度是逐渐减弱，即发生了老化现象^[14]。稀土荧光材料作为敏感材料，存在稀土离子的共生现象，材料浓度对传感器特性有一定影响。

2、荧光探头结构

荧光探头在工业测温、生物、医学等领域也有着广泛的应用前景。主要应用于化学过程、电气设备高

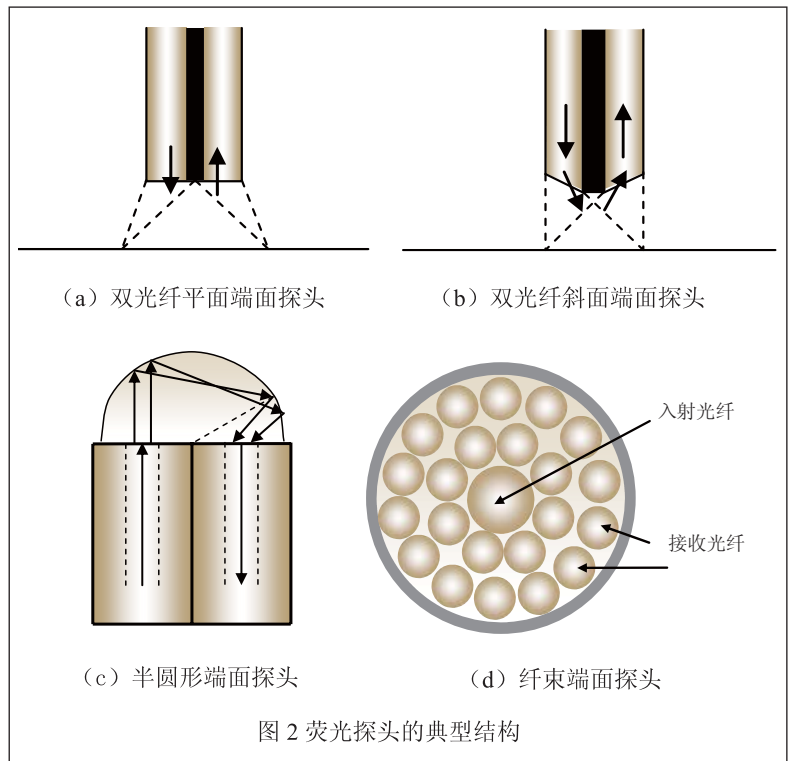


图2 荧光探头的典型结构

压仪器温度测量和生物医学领域电磁辐射下生理反应研究等。测温系统要有存放荧光材料并能高效接收荧光信号的传感探头。光纤数、尺寸、位置、荧光材料与光纤之间的空隙、材料的反射性等影响着探头接收信号性能的好坏^[15]。晶体荧光材料所需探头尺寸普遍大于稀土荧光材料。

荧光光纤探头根据不同的荧光信号考虑利用不同类型探头来实现荧光信号的高效采集。荧光探头的典型结构有单光纤探头、双光纤探头、半圆形探头以及光纤束探头等，如图2所示。

单纤探头激发和接收荧光信号利用一根光纤，该探头端面为平端面，但平面探头反射系数高，对光源及系统会造成一定的影响。图2(a)为双光纤平面端面探头，该探头将激发光与荧光信号分开传输，特别是端面加滤光片后可以有效获取荧光信号。图2(b)所示双光纤斜面端面探头与图2(a)所示探头相比有较高的荧光采集率，但该双光纤探头不能对涂敷于探头上的荧光材料完全激励，激发的荧光不均匀，从而不能获得更多的荧光。图2(c)半圆形探头平行光内经反射后不再是平行光。该探头类似于积分球原理，色散程度较大，荧光信号不强，制作较繁琐。图2(d)光纤束探头，中间为入射光纤，周围环绕均为接收光纤，适当增大环绕光纤圈数可以使得荧光采集效率有所提高，发射与接收光纤互不干扰。

3、激励光源

不同的荧光材料的荧光激发和发射波长不同，需要不同的激发光源。通常作为温度传感系统激发光源有紫外汞灯、脉冲氙灯、半导体激光器(LD)和发光二极管(LED)等^[16]。

氙灯有很高的发光强度，早期的荧光温度传感器多采用氙灯，但是其寿命、成本和体积都无法与LED相提并论^[17]。LED体积小、重量轻、功耗低、输出线性好，寿命长，成本低等诸多优点，可以在很宽的光谱范围内根据材料特性对光源进行调制。根据荧光材料在特定波长范围的发射光谱来选择相应发射光谱的LED是目前简单易行的一种光源选择方法。

4、荧光信号的采集与检测

(1) 传输光纤及光电器件耦合

光纤传输是以光纤为硬件设备传输模拟信号和数字信号。光纤传输中最主要的因素是光纤中能量的损耗，也被称为光纤损耗，主要来自光纤的本征吸收、杂质吸收和各类散射损耗。光电器件的耦合主要包括：

光源与光纤的耦合：直接耦合是把一根平端的光纤直接靠近光源发光面，耦合效率低。透镜耦合是间接耦合，依赖于不同特性的光源和光纤之间的耦合，并且相应提高其耦合效率。

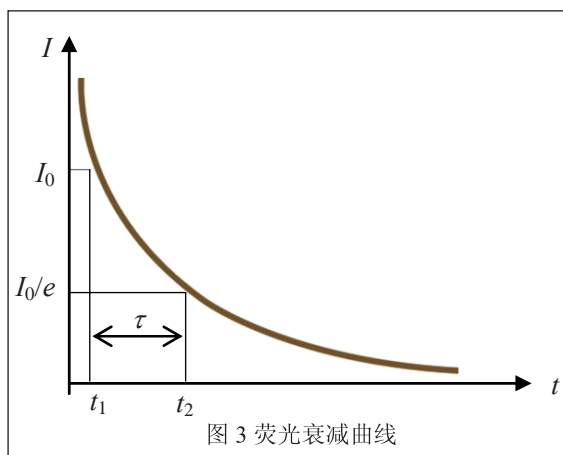
光纤与荧光材料的耦合：一种是敏感材料粘接到光纤的端部或敏感材料掺杂到光纤中，另一种是敏感材料涂敷到被测物体表面，将激励光和荧光耦合进光纤。稀土材料一般采用直接耦合方式，最大程度获取荧光信号。

(2) 微弱荧光信号检测技术

荧光信号非常微弱，为提高系统信噪比必须采用微弱信号检测处理技术。弱信号检测的光电技术主要有两类：高灵敏度的光电探测器与弱电流放大电路的有效结合，抑制噪声以提高信噪比；利用光源调制和锁相技术在噪声中提取有效信息。

锁相放大器抑制噪声的基本原理是利用信号周期性和噪声随机性的差别，通过互相关运算直接滤掉非同频信号，只对被测信号和参考信号同频同相的噪声分量有反映，去除噪声，改善检测信噪比。它对采样频率要求高，增加信号采样周期可以有效提高选频特性^[18]。

五、荧光寿命判定与检测算法



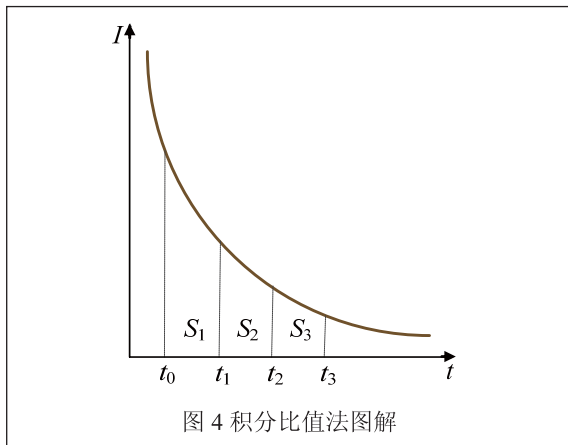
1、两点法

两点法是早期荧光强度型光纤荧光温度传感器采用的一种方法^[19]。如图3所示，在激励脉冲终止后，取荧光指数衰落曲线上两个特定强度值，激励脉冲终止时间 t_1 ，衰落信号的强度值为 I_0 。当衰落信号达到第二个值 I_0/e 时，时间为 t_2 。 t_1 和 t_2 的间隔就是指数衰落信号的时间常数 τ ，以此可以测量荧光寿命。两点法所用元器件费用低，探测器在防止激励光泄漏方面设计要求也不高。缺点是只测量两个特定荧光衰落信号值而未充分利用整个衰落过程，因而测量精度有限。

2、积分法

为了获得更高的精度出现了基于衰减荧光信号在不同区间的积分计算。当衰减荧光降低到低于某一设定值时开始进行测量。该信号在两个固定延迟时间 t_1 和 t_2 内被积分，然后这两个积分值 A 和 B 被采样。积分噪声和直流偏移也以相同的固定间隔采样，用 C 和 D 表示，分别等价于 A 和 B 中的噪声和偏移。因此荧光寿命可以根据下式得到：

$$\frac{A-C}{B-D} = \frac{1-e^{-t_1/\tau}}{1-e^{-t_2/\tau}} \quad (5)$$



另一种类似的方法是积分面积比值法。积分面积比值法的基本思想描述为：以某一时间 t_0 为时间起点，对曲线进行三次积分，从时间 t_2 积分至时间 t_3 ，使得其积分面积等于 t_1 至 t_2 的积分面积。如图4的面积 S_1 、 S_2 和 S_3 所示。

对面积 S_1 积分可得如下数学表达式：

$$S_1 = \int_0^{t_1} [I_0 \exp(-\frac{t}{\tau}) + I_d + I_n] dt$$

$$= I_0 \tau [\exp(-\frac{t_1}{\tau}) - \exp(-\frac{t_0}{\tau})] + I_d (t_1 - t_0) \quad (6)$$

同理得到 S_2 和 S_3 的表达式。

令： $t_3 - t_2 = t_2 - t_1 = t_1 - t_0 = \Delta t$ ，得：

$$\frac{(S_1 - S_2)}{(S_2 - S_3)} = \frac{\exp(-\frac{t_0}{\tau}) [1 + \exp(-\frac{2\Delta t}{\tau}) - 2\exp(-\frac{\Delta t}{\tau})]}{\exp(-\frac{t_1}{\tau}) [1 + \exp(-\frac{2\Delta t}{\tau}) - 2\exp(-\frac{\Delta t}{\tau})]} = \exp(\frac{\Delta t}{\tau}) = B \quad (7)$$

最终得： $\tau = \frac{\Delta t}{\ln B}$ (8)

该系统对变化缓慢的背景光电信号都相当敏感，因此在进行平衡积分之前，应尽可能地消去信号中的直流分量。它的测量动态范围要比相应的两点测量系统窄得多^[20]。

3、数据拟合法

荧光寿命数据拟合法主要有 Levenberg-Marquardt (L-M) 方法、Prony 方法、对数拟合 (log-fit) 方法、FFT (快速傅里叶变换) 法和加权对数拟合法等。

理论上荧光衰减曲线为单调指数衰减函数，即：

$$f(t) = A \exp(-t/\tau) + B + m(t) \quad (9)$$

其中， A —荧光衰减的初始强度；

B —信号本底噪声；

$m(t)$ —信号中的随机白噪声。

L-M、Prony 和 log-fit 三种方法是对各个衰减曲线的选定部分数字化，采用线性最小二乘法曲线拟合法，得到最佳单调指数拟合曲线。其中，L-M 方法采用递归算法技术，虽精度高，但耗时长、稳定性差，不适合在实际系统中应用；Prony 方法适合于双指数模型计算。

FFT 拟合法是根据荧光信号可近似看成是单调指数衰减信号的特点，首先对信号进行傅里叶变换，然后从变换后的非零次频谱项中计算出荧光寿命^[21]。

加权对数拟合法的出现是因为普通对数拟合方法取对数使原本在整个函数区间均匀的噪声影响变得不等权，其偏差与 L-M 方法接近，但简明有效，程序简单，精度高又弥补了 L-M 方法耗时长而且由于数据偶然误差造成的不收敛现象。

4、相位锁定法 (Lock-In)

对激励光进行正弦或方波调制，荧光信号也呈正弦或方波变化，但相位上滞后于激励信号。只要设法使荧光滞后相位 φ 保持为常数，即锁定相位，通过测量调制信号的周期或者频率，荧光寿命便可由相移 φ 的测量求出。将荧光寿命直接转换为信号周期，在很宽的连续变化的荧光寿命测量范围内保持高分辨率。图 5 为一个单参考正弦波信号的荧光寿命锁相检测结构示意图^[22]。

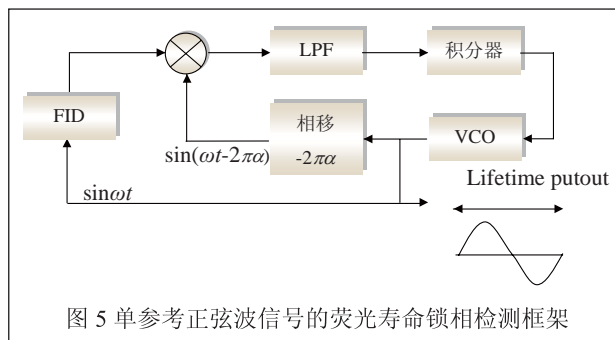


图 5 单参考正弦波信号的荧光寿命锁相检测框架

在相位锁定法检测中方波信号更具优点。首先，方波信号携带更多的激励光功率，输入信噪比可得到显著提高；其次，方波信号调制激励光源方案简单，利用普通的压控振荡器即可产生理想的方波信号。

在利用方波脉冲调制的双参考信号锁相过程中，方波脉冲周期性地调制激励光发射，受激发出的荧光信号随激励光变化。来自两个压控振荡器的输出参考信号与该荧光信号混合，通过低通滤波器 (LPF) 并从混合信号的最后积分中消除激励光泄露成份，这个混合信号用来控制压控振荡器 (VCO) 的振荡频率，最后使压控振荡器趋于一个稳定的频率输出，通过测量这个稳定的频率来获得荧光寿命，其原理结构如图 6 所示。

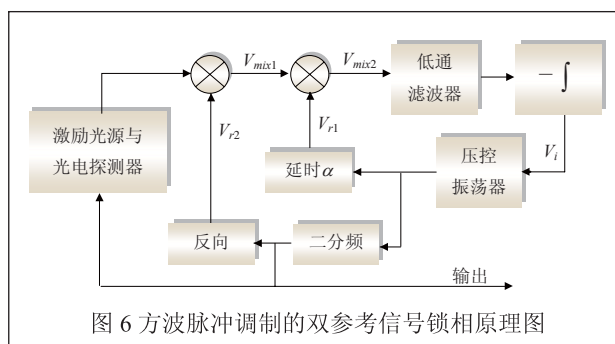


图 6 方波脉冲调制的双参考信号锁相原理图

相位锁定法需要在激励阶段测量荧光，很小部分的激励光泄露都将严重降低系统的性能，过量的激励光泄露可以导致系统失败。要阻止泄露，采用两个来自压控振荡器 (VCO) 输出的参考信号与连续的荧光信号混合，并从混合信号的最后积分中消除激励光泄露成分，该混合信号用于控制 VCO 的振荡频率。近年来提出的采用希尔伯特变换的相敏检测方法^[23]，不需采用低通滤波器便消除二次谐波，对激励光的泄露起到一定的抑制作用。

5、几种方法优缺点及对比分析

根据计算精度、测温范围、系统稳定性和耗时对比分析，两点法、积分面积比值法以及 FFT 法比较适合单指数荧光衰减模型，积分面积比值法结果精确度最高。L-M 法因为算法复杂在实际应用中只作为一种精度的对比方法；Prony 算法适合双指数模型的计算，信噪比远低于 1.0% 时，准确度最高^[24]。表 2 对几种

表 2 荧光温度检测方法对比

	两点法	积分面积 比值法	数据拟合法	频域法
测量精度	低	高	L-M 仅作为对比方法 Prony 适合双指数模型	与积分 方法结合
测温范围	大	小	较大	大
系统稳定性	好	较差	好	好
耗时	短	长	L-M 最长, FFT 最短	短

检测方法特点进行了总结。

在实际的荧光光纤温度传感器信号处理单元，一般基于荧光寿命的单指数衰减模型，将积分面积比值法融入频域法的积分单元中，根据相位锁定法完成荧光寿命的直接检测。

六、光纤荧光温度传感器未来的发展

从上世纪 80 年代开始国外光纤荧光传感器研究不断升温，测温范围和灵敏度逐步提高，2012 年美国马里兰大学巴尔的摩分校报道了一种高分辨率 ($\pm 0.13^\circ\text{C}$)、非接触式荧光光纤温度传感器。国内研究自上世纪 80 年代末开始，截止 2012 年初已出现实用化产品，中科院西光所已具备测温范围 $-50\sim 500^\circ\text{C}$ ，最高分辨率 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 的荧光光纤传感器小批量供货能

力。

数十年的研究表明, 荧光材料和激励光源的选择、敏感单元结构、荧光信号的采集和微弱荧光信号的检测算法是决定光纤荧光传感器性能的关键。针对这些问题的不同解决方案和实现商业应用目标, 决定了光纤荧光传感器的未来发展主要集中在:

1、进入商业化运作和实用化应用阶段。在传感单元寿命, 可靠性和稳定性, 以及生产工艺成本方面的表现决定其是否能够分享其他光纤温度传感器市场。

2、各类荧光寿命的检测方法推陈出新, 响应时间和检测精度不断提高, 促进了光纤荧光传感系统向数字化、集成化和小型化方向发展。

目前, 光纤荧光温度传感器技术仍然存在阻碍其实用化的几大工程问题:

- 1、荧光材料的老化和光衰;
- 2、荧光的激励和采集效率不足;
- 3、使用特种光纤, 导致使用范围受限和成本增加;
- 4、算法对数据采集设备高度依赖。

近年来, SPR 以及纳米量子点在金属表面的荧光增强效应的研究, 提示了新的荧光增强方法和提高荧光耦合效率的可能性, 也为进一步提升传感器的灵敏度和降低成本带来新的希望。基于荧光寿命的温度测量手段在生命科学、远程控制、电力监测、化工制造等特殊领域有着广阔的应用与发展前景。可以预计, 荧光光纤温度传感器技术将成为光纤温度传感器家族重要的一员。

参考文献

[1] 郭小东, 乔学光, 贾振安等. 高功率宽带掺铒超荧光光源[J]. 光电工程 .2004,31(9):18-21.

[2] 张友俊. 荧光光纤温度传感器原理性实验系统的研制[J]. 传感器技术 .1997,16(2):7-8.

[3] 周艳明. 一种基于紫外激发荧光寿命测量的光纤温度计[J]. 自动化博览 .2003,(10):40-42.

[4] Smith.T.V, Smith.D.B. Fiber optical temperature sensor using a Y2O2S:Eu theragraphic phosphor [A]. Proc.SPIE on Fiber Optic and Laser Sensors XI[C]. 1993 , 2070: 456-463.

[5] 贾婷. 基于荧光寿命的光纤荧光测温系统的优化设计 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.

[6] K.T.V Grattan, Z.Y. Zhang. Fiber optic fluorescence

thermometry[M]. London: Chapman&Hall, 1995:1-200.

[7]J.Castrellon-Urbe, G. Paez, M. Strojnnik. Radiometric analysis of a fiber optic temperature sensor[A]. SPIE[C],2002, (4486): 164-169.

[8] J.Castrellon, G. Paez, M. Strojnnik. Remote temperature sensor employing erbium-doped silica fiber[J]. Infrared Physics &Technology, 2002,(43): 219-222.

[9]K.T.V Grattan, A.W. Palmer. Development of high-temperature fiber-optic thermometer probe using fluorescence decay[J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62(5):1210-1213.

[10]S.W. Allison, G.T. Gillies. Nanoscale thermometry via the fluorescence of YAG: Ce phosphor particles: measurements from 7 to 77°C [J]. Nanotechnology, 2003, (14): 859-863.

[11] 沈永行. 从室温到 1800°C 全程测温的蓝宝石单晶光纤温度传感器 [J]. 光子学报, 2000,20(1):30-32.

[12]Z.Y Zhang, K.T.V Grattan, A.W. Palmer. Fiber-optic high-temperature sensor based on the lifetime of alexandrite[J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 63(8): 3869-3873.

[13] 王冬生, 王桂梅, 王玉田等. 基于稀土荧光材料的光纤温度传感器 [J]. 仪器仪表学报, 2007. 28(4): 123-127.

[14] 王振华. 稀土节能灯中的荧光粉光衰问题 [J]. 稀土 .1998, 19(2):54-60.

[15] 包玉龙, 赵志, 傅永军. 基于稀土掺杂光纤荧光强度比的温度传感 [J]. 光纤与电缆及其应用技术 .2010,(5):1-4.

[16] G. Keiser. Optical fiber communication[M]. Boston: Mc Graw Hill,2000:125-140.

[17] 王冬生. 荧光光纤温度传感器的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2005.

[18] 赵玲, 田小建. 基于自动频率跟踪的虚拟数字锁相放大器 [J]. 吉林大学学报(信息科学版) .2012,30(1):5-11.

[19] 胡春海, 邹晓红, 王玉田. 荧光光纤温度传感器用于高压设备温度在线监测的研究 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2004,(5):53-54.

[20] 高璐. 基于 DSP 的荧光处理系统的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.

[21]Yu Tian Wang, Xiao Xu Bo, Jin Zhao. Optical fiber temperature measurement technique based on fluorescence mechanism[J].Applied Mechanics and Materials.2010,44-47:854.

[22] 胡俏丽. 基于荧光机理的光纤温度测量系统的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2010.

[23] 王玉田, 刘俊田, 蓝娟. 基于希尔伯特变换的荧光光纤温度传感器研究 [J]. 传感器与微系统 .2009,28(5):25-27.

[24] Zhang Z Y, Grattan K T V, Hu Y L, et al. Prony' s method for exponential lifetime estimations in fluorescence based thermometers[J]. Rev Sci Instruments,1996,67(7):2590 ~ 2594

Low-cost fiber-optic fluorescence temperature sensors

XU Yu-shan, LI Min

*(Department of Physics, Wu Han University Of Technology,
WuHan 430070, China)*

Abstract: From four aspects of fluorescence temperature measurement technologies, measuring technologies, sensitive materials, probe structures, and signal detection methods, the evolution and low cost development direction, key technologies and difficult points of fiber-optic fluorescence temperature sensors are discussed. The typical optimization schemes to increase the temperature measuring precision and their merits and demerits are analyzed. The existence questions and new R &D

directions of the fiber optic fluorescence temperature sensors at present are presented.

Keywords: temperature sensor; fiber optic sensor; fluorescence; lifetime

作者简介

徐钰山，武汉理工大学物理系硕士研究生，主要研究方向为光纤传感技术。

通讯地址：湖北省武汉市洪山区武汉理工大学南湖校区物理楼 邮编：430070

E-mail: xys_5211986@163.com。

黎敏，武汉理工大学物理系，教授，博士后，主要研究方向：光纤光学、光纤传感及光电检测。