

光纤温度传感器的研究和应用

周广丽^{1,2}, 鄂书林¹, 邓文渊¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 分析了光纤温度传感器在温度探测中的优势, 综述了光纤温度传感器的发展现状和应用。分别介绍了分布式光纤温度传感器、光纤光栅温度传感器、干涉型光纤温度传感器、光纤荧光温度传感器和基于弯曲损耗的光纤温度传感器的工作原理和研究现状, 详细介绍了各种传感器的特点及各自的研究方向。

关键词: 光纤传感; 温度; 研究现状; 应用

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Development and application of optical fiber temperature sensor

ZHOU Guang-li^{1,2}, E Shu-lin¹, DENG Wen-yuan¹

(1. Modern applied optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: The specific advantage of optical fiber temperature sensors in detecting temperature is analyzed. Development status and application of optical fiber temperature sensors are broadly discussed. The operating principle and Development status of several typical optical fiber temperature sensors based on distributed, Bragg grating, interference, fluorescence and bending loss, respectively, are introduced. The characteristic and the future of the typical optical fiber temperature sensors are analyzed detailedly.

Key words: optical fiber sensor; temperature; development; application

1 引言

光纤测温是 20 世纪 70 年代发展起来的一门新兴测温技术, 与传统的温度传感器相比具有很多优点: 光波不产生电磁干扰, 也不怕电磁干扰, 易被各种光探测器接收, 可方便地进行光电或电光转换, 易与高度发展的现代电子装置和计算机相匹配, 光纤工作频率宽, 动态范围大, 是一种低损耗传输线, 光纤本身不带电, 体积小质量轻, 易弯曲, 抗辐射性能好, 特别适合于易燃、易爆、空间受严格限制及强电磁干扰等恶劣环境下使用。国外一些发达国家对光纤温度传感技术的应用研究已取得丰富成果, 不少光纤温度传感器系统已实用化, 成为替代传统温度传感器的商品。所有与温度相关的光学现象或特性, 本质上都可以用于温度测量, 基于此, 用于温度测量的现有光学

技术相当丰富。对于光纤温度传感器的研究占到将近所有光纤传感器研究的 20%。

光纤温度传感器的研究, 除对现有器件进行外场验证、完善和提高外, 目前有以下几个发展动向: 大力发展测量温度分布的测量技术, 即由对单个点的温度测量到对光纤沿线上温度分布, 以及大面积表面温度分布的测量; 开发包括测量温度在内的多功能的传感器; 研制大型传感器阵列, 实现全光学遥测。

2 几种光纤温度传感器的原理和研究现状

光纤温度传感器按其工作原理可分为功能型和传输型两种。功能型光纤温度传感器是利用光纤的各种特性(相位、偏振、强度等)随温度变换的特点, 进行温度测定。这类传感器尽管具有“传”、“感”合一的特点, 但也增加了增敏和去敏的困难。传输型光纤温度传感器的光纤只是起到光信号传输的作用, 以避免测温区域复杂的环境, 对待测对象的调制功能是靠其他物理性质的敏感元件来实现的。这类传感器由于存在

收稿日期: 2007-02-02。

基金项目: 应用光学国家重点实验室基金(O6133FQ064)资助。

作者简介: 周广丽(1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感(电子邮件: zhougl840227@126.com)。

光纤与传感头的光耦合问题,增加了系统的复杂性,且对机械振动之类的干扰较敏感。

下面介绍几种主要的光纤温度传感器的原理和研究现状。

2.1 分布式光纤温度传感器

分布式光纤测温系统是一种用于实时测量空间温度场分布的传感器系统。分布光纤传感器系统最早是在1981年由英国南安普敦大学提出的,1983年英国的Hartog用液体光纤的拉曼光谱效应进行了分布式光纤温度传感器原理性实验,1985年英国的Dakin在实验室用氩离子激光器作为光源进行了用石英光纤的拉曼光谱效应的分布光纤温度传感器测温实验,同年Hartog和Dakin分别独立地用半导体激光器作为光源,研制了分布光纤温度传感器实验装置。此后,分布光纤温度传感器得到了很大的发展,研究出了多种传感机理,有的还使用了特种光纤。

分布式光纤温度传感器是基于瑞利散射、布里渊散射、喇曼散射三种分布式温度传感器。分布式光纤传感器从最初提出的基于光时域散射(OTDR)的瑞利散射系统开始,经历了基于OTDR的喇曼散射系统和基于OTDR的布里渊散射系统,使得测温精度和范围大幅提高。光频域散射(OFDR)的提出也很早,但只有到了近期,伴随着喇曼散射和布里渊散射研究的深入,使OFDR和它们结合才显示出了它的优越性。基于OTDR和OFDR的分布式温度光纤传感器已经显示出了很大的优越性,所以基于OTDR和OFDR的分布式温度光纤传感器仍将是研究的热点,尤其是基于OFDR的新的分布式光纤传感器将是一个重要的发展方向。

土耳其Gunes Yilmaz研制出10km、温度分辨率为1、空间分辨率为1.22m的分布式光纤温度传感器。在国内,中国计量学院、重庆大学、浙江大学等单位根据应用的需要,先后开展了分布式光纤温度传感器的研究。中国计量学院1997年研制了一种用于煤矿、隧道温度自动报警的分布式光纤温度传感器系统,该系统光纤长为2km,测温范围为-50~150,测温精度为2,温度分辨率为0.1;2005年设计制造出31km远程分布式光纤温度传感器,测温范围0~100,温度测量不确定度为2,温度分辨率为0.1,测量时间为432s,空间分辨率为4m。

2.2 光纤光栅温度传感器

光纤光栅温度传感技术主要研究Bragg光纤传感技术。根据Bragg光纤光栅反射波长会随温度的变化

而产生“波长移位”的原理制成光纤光栅温度传感器。1978年,加拿大渥太华通信研究中心的K.O.Hill等人首先发现掺锗石英光纤的光敏效应,采用注入法制成世界上第一只光纤光栅(FBG),1989年,Morey首次报导将其用于传感。

英国T. Allsop利用椭圆纤芯突变型光纤研制出温度分辨率为0.9、曲率分辨率为0.05的长周期光纤光栅曲率温度传感器。意大利A. Iadicco利用非均匀的稀疏布拉格光纤光栅(ThFBGs)同时测量折射率和温度,该传感器的温度分辨率为0.1,在折射率1.45、1.33附近的折射率分辨率分别为 10^{-5} 、 10^{-4} 。中科院上海光机所利用光纤光栅的金属槽封装技术将光纤光栅温度传感器的灵敏度提高到0.02;哈尔滨工业大学把光纤光栅粘贴在金属半管上,使其分辨率达到0.04;黑龙江大学光纤技术研究所提出了一种光纤光栅(FBG)的Ti合金片封装工艺,使温度灵敏度达到0.05。

2.3 光纤荧光温度传感器

光纤荧光温度传感器是目前研究比较活跃的新型温度传感器。荧光测温的工作机理是建立在光致发光这一基本物理现象上。所谓光致发光是一种光发射现象,就是当材料由于受紫外、可见光或红外区的光激发,所产生的发光现象。出射的荧光参数与温度有一一对应关系,通过检测其荧光强度或荧光寿命来得到所需的温度的。强度型荧光光纤传感器受光纤的微弯曲、耦合、散射、背反射影响,造成强度扰动,很难达到高精度;荧光寿命型传感器可以避免上述缺点,因此是采用的主要模式,荧光寿命的测量是测温系统的关键。

美国密西西比州立大学用一种商用的环氧胶做温度指示(含有多环芳烃化合物:PAHs),PAHs在用紫外光激发时发荧光,荧光的强度随环氧胶周围温度的升高而减小,该传感器可监测20~100范围内的温度。日本东洋大学根据Tb:SO₂和Tb:YAG的光致发光(PL)谱与温度有关,将其制成光纤温度传感器。在300~1200K的温度下,Tb:SO₂的PL峰值在540nm时的光强随温度的升高单调减小,Tb:YAG晶体的PL谱的形状随温度变化。韩国汉城大学发现10cm长的Yb³⁺、Er³⁺双掺杂光纤在915nm处,两荧光强度的比值在20~300间与温度成指数关系。这种双掺杂系统对于测量苛刻环境的温度非常有用。清华大学电子工程系利用半导体GaAs材料对光的吸收随温度变化的原理,研制出测温范围:0~150;分辨率:0.5的光

周广丽,等:光纤温度传感器的研究和应用

纤温度传感器。燕山大学设计了一种利用荧光波分和时分多路传输技术,通过检测红宝石晶体的荧光强度实现温度测量的系统,该系统的测温范围:30 ~ 160 ;分辨率:0.5 。海南大学用激光加热基座法生长出端部掺 Cr 的蓝宝石荧光光纤传感头,该传感器的测温范围:20 ~450 ;分辨率:1 。中北大学用一种镀有陶瓷薄膜的蓝宝石光纤作为传感器的瞬态高温测试系统,该系统的测温范围:1200 ~2000 ,分辨率:1 。

2.4 干涉型光纤温度传感器

干涉型光纤温度传感器是一种相位调制型光纤传感器。它是利用温度改变 Mach-Zehnder 干涉仪、Fabry-Perot 干涉仪、Sagnac 干涉仪等一些干涉仪的干涉条纹来外界测量温度。

英国的 Samer K. Abi Kaed Bey 用长周期光纤光栅做成 Mach-Zehnder 干涉型光纤温度传感器,其温度分辨率为 0.7 。燕山大学研制出基于白光干涉的 Fabry-Perot 光纤温度传感器,其测温范围为-40 ~ 100 ,分辨率为 0.01 。哈尔滨工程大学研制出数字式 Mach-Zehnder 干涉型光纤传感器,其测温范围为 35 ~80 ,压力、温度、位移分辨率分别为 0.03kPa、0.07 、2.5 μm 。

2.5 基于弯曲损耗的光纤温度传感器

基于弯曲损耗的光纤温度传感器利用硅纤芯和塑料包层折射率差随温度变化引起光纤孔径的变化、光纤的突然弯曲引起的局部孔径的变化的原理测量温度。

乌克兰采用 EBOC (English-Bickford Optics Company) 生产的多模阶跃塑料包层硅纤芯光纤 HCN-H, 已做出基于弯曲损耗的光纤温度传感器,其测温范围-30 ~70 ,灵敏度达到 0.5 。法国研究出测温范围-20 ~60 ,灵敏度为 0.2 的基于弯曲损耗的光纤温度传感器。国内主要是对光纤的弯曲损耗与入射波长、弯曲半径、弯曲角度、弯曲长度、光纤参量和温度等的关系做了一些研究。实验装置图如图 1 所示。

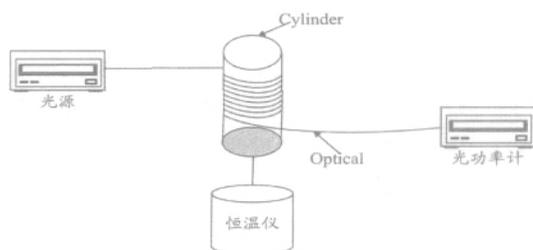


图 1 基于弯曲损耗的光纤温度传感器的实验装置图

3 几种光纤温度传感器的特点及各自的研究方向

分布式光纤温度传感器、光纤光栅温度传感器、干涉型光纤温度传感器、光纤荧光温度传感器和基于弯曲损耗的光纤温度传感器分别具有独特的优点和一定的不足,因此它们的研究方向不同。

(1) 分布式光纤温度传感器具有其他温度传感器不可比拟的优点。它能够连续测量光纤沿线所在处的温度,测量距离在几千米范围,空间定位精度达到米的数量级,能够进行不间断的自动测量,特别适用于需要大范围多点测量的直用场合。

目前对分布式光纤温度传感器研究的重点:实现单根光纤上多个物理参数或化学参数的同时测量;提高信号接收和处理系统的检测能力,提高系统的空间分辨率和测量不确定度;提高测量系统的测量范围,减少测量时间;基于二维或多维的分布式光纤温度传感器网络。

(2) 光纤光栅温度传感器除了具有普通光纤温度传感器的许多优点外,还有一些明显优于其它光纤温度传感器的方面。其中最重要的就是它的传感信号为波长调制。这一传感机制的好处在于:测量信号不受光源起伏、光纤弯曲损耗、连接损耗和探测器老化等因素的影响;避免了一般干涉型传感器中相位测量的不清晰和对固有参考点的需要;能方便地使用波分复用技术在一根光纤中串接多个布喇格光栅进行分布式测量;很容易埋入材料中对其内部的温度进行高分辨率和大范围地测量。

尽管光纤光栅温度传感器有很多优点,但在应用中还需考虑很多因素:波长微小位移的检测;宽光谱、高功率光源的获得;光检测器波长分辨率的提高;交叉敏感的消除;光纤光栅的封装;光纤光栅的可靠性;光纤光栅的寿命。

(3) 光纤荧光温度传感器于其它光纤温度传感器相比有自己独特的优点:由于荧光寿命与温度的关系从本质上是内在的,与光的强度无关,这样就可以制成自较准的光纤温度传感器,而一般的基于光强度检测的光纤温度传感器(如辐射型)则因为系统的光传输特性往往与传输光纤和光纤耦合器等相关而需经常校准;测量范围广,特别在高温情况下多用光纤荧光温度传感器。

目前国外的研究主要围绕着荧光源的选择,主要为下面几个方面:蓝宝石和红宝石发光、稀土发光及半导体吸收。

(4) 干涉型光纤温度传感器的温度分辨率高;动态响应宽;结构灵巧。研究干涉型光纤温度传感器的主要工作放在减小噪声干扰和信号解调上。

(5) 基于弯曲损耗的光纤温度传感器具有结构简单、体积小、成本低、测量方便不需要解调等优点。但是它还存在着很多的不足:测量精度低;由于它是强度调制型光纤传感器,光源的稳定性对其影响很大;使用寿命短等缺点。在今后的研究中主要从光纤的选择、测量条件的提高等方面开展工作。

4 光纤温度传感器的应用

光纤温度传感自问世以来,主要应用于电力系统、建筑、化工、航空航天、医疗以至海洋开发等领域,并已取得了大量可靠的应用实绩。

(1) 光纤温度传感器在电力系统有着重要的应用。电力电缆的表面温度及电缆密集区域的温度监测监控;高压配电装置内易发热部位的监测;发电厂、变电站的环境温度检测及火灾报警系统;各种大、中型发电机、变压器、电动机的温度分布测量、热动保护以及故障诊断;火力发电厂的加热系统、蒸汽管道、输油管道的温度和故障点检测;地热电站和户内封闭式变电站的设备温度监测等等。

(2) 光纤温度传感特别是光纤光栅温度传感器很容易埋入材料中对其内部的温度进行高分辨率和大范围地测量,因而被广泛的应用于建筑、桥梁上。美国、英国、日本、加拿大和德国等一些发达国家早就开展了桥梁安全监测的研究,并在主要大桥上都安装了桥梁安全监测预警系统,用来监测桥梁的应变、温度、加速度、位移等关键安全指标。1999年夏,美国新墨西哥 Las Cruces 10 号州际高速公路的一座钢结构桥梁上安装了 120 个光纤光栅温度传感器,创造了单座桥梁上使用该类传感器最多的记录。

(3) 航空航天业是一个使用传感器密集的地方,一架飞行器为了监测压力、温度、振动、燃料液位、起落架状态、机翼和方向舵的位置等,所需要使用的传感器超过 100 个,因此传感器的尺寸和重量变得非常重要。光纤传感器从尺寸小和重量轻的优点来讲,几乎没有其他传感器可以与之相比。

(4) 传感器的小尺寸在医学应用中是非常有意义的,光纤光栅传感器是现今能够做到最小的传感器。光纤光栅传感器能够通过最小限度的侵害方式对人体组织功能进行内部测量,提供有关温度、压力和声波场的精确局部信息。光纤光栅传感器对人体组织的

损害非常小,足以避免对正常医疗过程的干扰。

(5) 光纤光栅传感器因其抗电磁干扰、耐高温、长期稳定并且抗高辐射非常适合用于井下传感,挪威的 Optoplan 正在开发用于永久井下测量的光纤光栅温度和压力传感器。

5 结束语

光纤温度传感器是一种新型的温度传感器,它具有抗电磁干扰、耐高压、耐腐蚀、防爆防燃、体积小、重量轻等优点,其中几种主要的光纤温度传感器:分布式光纤温度传感器、光纤光栅温度传感器、干涉型光纤温度传感器、光纤荧光温度传感器和基于弯曲损耗的光纤温度传感器更有着自己独特的优点。它将在航空航天、远程控制、化学、生物化学、医疗、安全保险、电力工业等特殊环境下测温有着广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] HARTOG A H.A distributed temperature sensor based on liquid-core optical fibers[J].Lightwave Teehnol,1983,(1):498-509.
- [2] HARTOG A H.Distributed temperature sensor in solid-core fibers[J].Electron Lett,1985,(21):1061.
- [3] ROGERS A J.Distributed optical-fiber sensors for the measurement of pressure, strain and temperature[J].Phys Report,1988,169(2):118-119.
- [4] DAKIN J P,PRATT D J.Temperature distribution measurement using raman ratio thermometry [J].SPIE Fiber Optic and Laser Sensors,1985,566:249-256.
- [5] GUNES Y,SAIT E K.A distributed optical fiber sensor for temperature detection in power cables[J].Sensors and Actuators A:Physical,2006,125(2):148-155.
- [6] 张在宣,郭宁,余向东,等.分布式光纤温度传感器(DFTS)系统[J].工业计量,1999,(1):420-422.
- [7] 张艺,张在宣,金仁洙.远程分布式光纤温度传感器系统的设计和制造[J].光电工程,2005,32(4):45-48.
- [8] HILL K O,FUJII Y,JOHNSON D Y,et al.Photosensitivity in optical fiber waveguides:Application to reflection filter fabrication [J].Appl Phy Lett,1978,32(1):647-649.
- [9] MOREY W W,MELTZ G,GLENN W H.Fiber optic Bragg grating sensors[J].SPIE,1989,1169:98-107.
- [10] ALLSOP T, FLOREANI F, WEBB D J,et al.The Bending and Temperature characteristics of Long Period Gratings written in Elliptical Core Step-Index fibre[J].SPIE,2005,5855:711-714.
- [11] IADICICCO A, CAMPOPIANO S, CUTOLO A,et al.Simultaneous Measurements of Refractive Index and Temperature by Non-Uniform Thinned Fiber Bragg Gratings[J].SPIE,2005,5855:479-482.
- [12] 詹亚歌,蔡海文,向世清,等.高分辨率光纤光栅温度传感器的研究[J].中国激光,2005,32(1):83-86.

(版面原因,参考文献 13~26 略)