

· 光电器件与材料 ·

基于光纤的温度传感器

雷飞鹏, 宁提纲, 周倩, 毕重颖, 曹毅, 王惠

(北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要: 简单介绍了光纤温度传感器的原理及分类, 并分别介绍了光纤 Fabry-perot 干涉型温度传感器、半导体吸收型光纤温度传感器、光纤光栅温度传感器的工作原理及最近几年来的研究现状, 阐述了各种温度传感器的机理、实验装置和研究结果, 最后对其进行了对比分析。

关键词: 光纤; 温度传感器; 光纤 Fabry-perot 干涉型; 半导体吸收型; 光纤光栅

中图分类号: TP212.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)05-0039-04

Optical Fiber Temperature Sensor

LEI Fei-peng; NING Ti-gang; ZHOU Qian; BI Chong-ying; CAO Yi; WANG Hui

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The principle and classification of the optical fiber temperature sensor are briefly introduced. The operating principle and development status of three typical optical fiber temperature sensors based on Fabry-Perot interference, Semiconductor absorption and Bragg grating are introduced, respectively. Moreover, the specific mechanism, experimented devices and research results are presented and compared.

Key words: optical fiber; temperature sensors; fabry-perot interference; semiconductor absorption; bragg grating

温度传感器是基于一个基本的物理量“温度”, 自然界中的一切过程无不与“温度”密切相关。从伽利略发明温度计开始, 人们开始利用温度进行测量。温度传感器是最早开发、应用最广的一类传感器。但真正把温度变成电信号的传感器是由德国物理学家赛贝发明的, 就是后来的热电偶传感器。50 年以后, 德国人西门子发明了铂电阻温度计。在半导体技术的支持下, 本世纪相继开发了包含半导体热电偶传感器在内的多种温度传感器。与之相应, 根据波与物质的相互作用规律, 相继开发了声学温度传感器、红外传感器和微波传感器。而光纤自 20 世纪 70 年代问世以来, 随着激光技术的发展, 从理论和实践上都已证明光纤具有一系列的优越性, 光纤在传感技术领域中的应用也日益受到广泛重视, 随着科学技术

的发展, 涌现了许许多多的光纤温度传感器, 并且可以预料, 在新技术革命的浪潮中, 光纤温度传感器必将得到广泛的应用, 并发挥出更多的作用。

1 光纤温度传感器的原理

光纤温度传感器的基本工作原理是将来自光源的光经过光纤送入调制器, 待测参数温度与进入调制区的光相互作用后, 导致光的光学性质(如光的强度、波长、频率、相位等)发生变化, 称为被调制的信号光。再经过光纤送入光探测器, 经解调后, 获得被测参数。

光纤温度传感器种类很多^[1], 但概括起来按其工作原理可分为功能型和传输型两种。功能型光纤

收稿日期: 2010-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(60827002); 教育部博士点基金(20090009110002)。

作者简介: 雷飞鹏(1985-), 男, 湖南人, 主要研究方向为光栅传感。

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比较敏感.

2 光纤温度传感器的研究现状

目前已研制成多种光纤温度传感器.下面介绍几种主要的光纤温度传感器的研究现状,其中有代表性的有光纤 Fabry - perot 干涉型温度传感器、半导体吸收型光纤温度传感器、光纤光栅温度传感器三种.

2.1 光纤 Fabry - perot 干涉型温度传感器

此传感器的依据是利用温度改变 Fabry - perot 干涉仪的干涉条纹来测量外界温度.在现有报道的光纤法珀温度传感器中,主要采用 2 种技术方案,其一是采用外径大于 125 nm 的玻璃毛细管封装,由 2 个光纤的端面构成光纤法珀腔并采用胶封的方式固定于温度敏感材料中^[2-3],另外一种最近发展起来的技术是采用 MEMS 工艺制作光纤法珀腔^[4].但是这两种方案工艺都比较复杂,一致性难以保证,并且胶的老化和蠕变对于传感器的性能影响较大.为了解决该问题,张文涛等人^[5]提出了一种新型金属封装的光纤法珀温度传感器,其结构如图 1 所示.

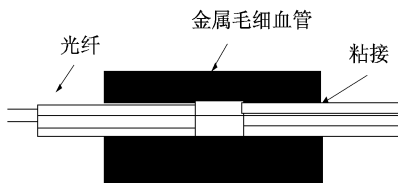


图 1 光纤法珀温度传感器结构图

该传感器采用温度敏感金属材料作为法珀腔的腔体,利用高精度位移机构将光纤两端插入金属毛细管中形成低精细度的光纤法珀腔.光纤在金属管的两端通过胶粘的方式固定.当外界温度发生变化时将直接导致金属毛细管的热膨胀,带动插入金属管内的光纤移动,从而引起光纤法珀腔的腔长变化.采用这种方案,避免了胶直接作用于光纤法珀腔

腔体上,消除了由于涂胶不均引起的应力不均匀现象,简化了封装工艺.同时,金属毛细管的长度即为该温度传感器的标距,它将决定传感器的灵敏度.该传感器的核心结构为光纤法珀干涉腔(F-P腔).在使用低相干光源时,由于低相干光源都具有一定的光谱宽度,因此可看成是多个波长, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$,的迭加.光入射到 F-P 腔后,不断地在 F-P 腔的 2 个端面之间进行反射和透射,形成多光束干涉.在文中所研究的端面反射率很低,反射光的干涉可看成双光束干涉,当 F-P 腔的腔长是传输光半波长的整数倍时,反射光强最大.通过对峰值波长移动量的测量即可得到待测温度的变化情况,该传感器具有灵敏度与传感器的标距成正比特性,可以通过改变标距的方法方便地调整传感器的灵敏度.同时,该传感器制作工艺简单、性能稳定、具有很高的实用价值,但是此传感器所适用的温度并不高.

柯涛等人^[6]通过在单模光纤 SMF28e 后有轴心偏移地熔接一段特种光子晶体光纤(MM-HNA-5)制作了一种全光纤微型法-珀(F-P)干涉仪,原理如图 2 所示.

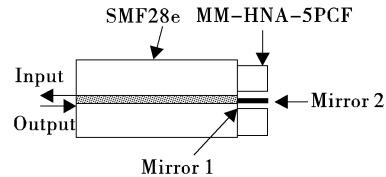


图 2 微型光纤 F-P 干涉仪原理图

SMF28e 的纤芯直径为 $8.2 \mu\text{m}$,模场直径约为 $10.4 \mu\text{m}$,大于 MM-HNA-5 中间的纤芯,SMF28e 纤芯的部分区域将处于 MM-HNA-5 光纤的扇形孔中,与其内的空气相接触,由于空气与 SMF28e 纤芯材料(纯 SiO_2)的折射率不同,所以此界面形成 F-P 干涉仪的第一个面,部分入射光将被此面反射回 SMF28e;另一部分入射光(由于 SMF28e 的纤芯和 MM-HNA-5 都是纯 SiO_2 材料,两者熔接面的反射率很小,可以近似认为没有形成反射面)会耦合进入 MM-HNA-5 中心实芯部分继续向前传播,在 MM-HNA-5 中心实芯部分的尾端发生反射(尾端与外界空气相接触处存在折射率差,形成的 F-P 干涉仪的第二个面),由这两束反射光形成干涉.实验表明,这种传感器可以用于 1200°C 的高温测量,且得到当干涉腔长为 3.46 mm 时,其光程差灵敏度约为 $103 \text{ nm}/^\circ\text{C}$.这种结构简单、稳定性好、体积小、灵敏度高、测量范围广的光纤 F-P 干涉微

型温度传感器在国防和工业领域将具有极大的潜在应用价值.

虽然上面介绍的 2 种传感器在各方面均取得了很大的进步,但各自也有不足,新型金属封装的光纤法珀温度传感器其适用的温度不高且结构复杂,而全光纤微型法-珀(F-P)干涉仪制作工艺复杂.

2.2 半导体吸收型光纤温度传感器

半导体吸收型光纤温度传感器是利用半导体材料的吸收光谱随温度变化而变化的特性实现的.光通过半导体材料时,材料会吸收一部分光子能量,当光子能量超过半导体禁带宽度能量 $E_g(T)$ 时,传输光的波长发生变化,由于禁带宽度随温度的变化而变化,因此半导体材料吸收的波长会随温度而变化,同时进入半导体材料的光强将发生变化.当温度变化时进入半导体材料的光强将发生变化,如果检测出穿过半导体材料的光强,即可得出对应的温度量.

许忠保等人^[7]利用半导体光吸收原理设计了一种可在高压、强电磁干扰环境下应用的温度传感器.图 3 所示是系统的工作原理图.

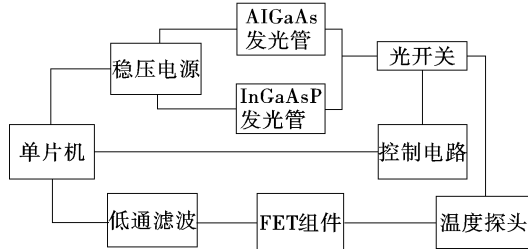


图 3 系统的工作原理图

由发光管稳压电源驱动 AlGaAs, InGaAsP 两发光二极管发光,控制电路控制光开关分时接收来自信号光源(AlGaAs)与参考光源(InGaAsP)发出的光束,探头中的 GaAs 材料对光有吸收作用,透射光强与温度有关.首先是让测量光通过,然后是参考光通过,经过的路径和前面完全一样,只是由于探头中的 GaAs 材料对它来说是完全透明的.两光束通过光纤传输后经 PIN 光电二极管把参考光束和信号光束转变为电信号,经前置放大、滤波后,通过 A/D 接口到单片机,经除法运算和数据处理后输出显示.光探头是由半导体材料 GaAs 制作,其厚度约 $100\ \mu\text{m}$,两边抛光,镀增透膜,探头与光纤芯的连接如图 4 所示.

实验证明,此传感器其温度测量范围在 $-10\sim 120\ ^\circ\text{C}$,精确度可达 $1\ ^\circ\text{C}$,响应时间 22 s,特别适合

超长距离和恶劣环境下的应用.

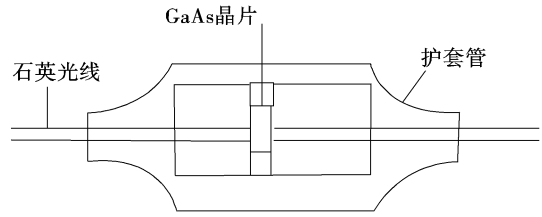


图 4 传感头结构图

张英等人^[8]基于半导体 GaAs 对近红外光的吸收波峰值随温度升高向长波长移动从而引起透射率随温度变化而变化这一特性设计了一种单光路的半导体吸收式光纤温度传感器.测温系统原理图如图 5 所示.

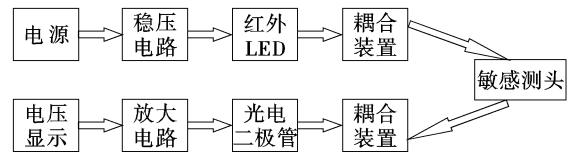


图 5 传感器实验原理图

用 7805 稳压器搭建稳压电路驱动红外发光二极管(LED),使 LED 获得稳定的输出功率,经耦合装置将 LED 光源部分耦合进入光纤,经敏感测头的光能量携带温度信号通过耦合装置耦合到硅光电三极管,采用集成运放 LM324 进行电压放大处理,最后进行标定.敏感测头如图 6 所示.

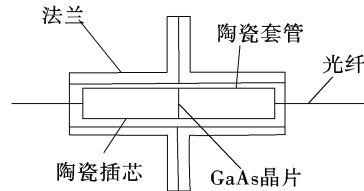


图 6 敏感测头结构

采用经研磨并抛光厚度达 $200\ \mu\text{m}$,面积约 $2\ \text{mm}\times 2\ \text{mm}$ 的 GaAs 片,将其垂直置于直径为 $2.49\ \text{mm}$ 的陶瓷套管中.将 GaAs 片粘在一边的陶瓷插芯端面,将光纤对准并固定.实验证明:该单光路光纤温度传感器的测量精度可达到 $\pm 1\ ^\circ\text{C}$,响应时间在 20 s 之内,有良好的长期稳定性、重复性;在 $20\sim 70\ ^\circ\text{C}$ 具有良好的线性,在这个范围内对某些环境下(如石油工业、电力工业)可得到广泛应用.根据传感头内的各部分材料特性,以及光纤的热稳定性,这种传感器可在 $-10\sim 300\ ^\circ\text{C}$ 内正常工作.

由此可见,上面 2 种传感器后者比前者在响应时间及适用温度范围方面均有提高,但前者适合超长距离使用.总的来说,虽然这两种传感器性能还不

是最佳,但相比以前的一些传感器而言已有了很大的提高,取得了不错的效果。

2.3 光纤光栅温度传感器

光纤光栅温度传感器的工作原理是当光纤光栅所处环境的温度发生变化时,光栅的周期或纤芯折射率将发生变化,从而使发射光的波长发生变化,通过测量温度变化前后反射光波长的变化,就可以获得温度的变化情况。

FBG 温度传感器增敏的原理是利用 FBG 对温度和应变同时敏感的特性,通过合理的结构设计,把 FBG 和高热膨胀系数材料封装在一起,当被测温度变化时,通过高热膨胀系数材料的形变向 FBG 施加一个应变,使得 FBG 的返回波长变化量加大。基于此原则的方法大体上分为两种:

(1) J. L. Cruz 等^[9]提出直接将 FBG 粘贴在高热膨胀系数材料上,当温度升高时,高膨胀系数材料直接拉动 FBG,使 FBG 的应变加大,返回中心波长的变化量增加。然而,这种增敏方式有明显的缺点:增敏效果受到材料的热膨胀系数制约、分辨率有限、而且伴有啁啾的负面效应。

(2) Jaehoon Jung 等^[10]提出通过采用双金属结构的方法实现温度增敏,效果明显。温度变化时,双金属结构把 2 种热膨胀系数不同的金属的长度变化量的差转化成 FBG 长度的变化量,从而提高 FBG 的温度灵敏度。可是,他们没有对该类型的 FBG 温度传感器的结构和精度作进一步研究,限制了它的应用范围。

基于上面所提到的 2 个缺点,李阔^[11]等人利用光纤光栅对温度和应变同时敏感的特性,设计制作了一款双金属光纤光栅温度传感器,在地震前兆观测时能满足地温观测的精度要求。双金属的温度增敏原理如图 7 所示。

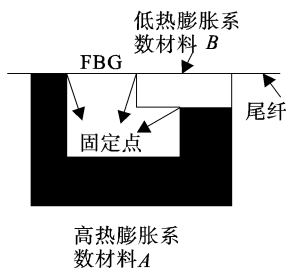


图 7 传感器结构示意图

当温度变化时,材料 A 和材料 B 长度均变化,且 A 长度的变化量比 B 长度的变化量大得多,A、

B 长度的变化量的差值直接传递给了 FBG。当 FBG 的应变发生变化时,其返回波长会随之发生变化。FBG 的应变越大,返回波长变化量也就越大。因此,可以通过调整 A 和 B 的长度和选用不同热膨胀系数的材料来控制 FBG 的应变,从而实现高分辨率和高精度的温度测量。实验证明:该传感器的精度达到 $\pm 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,获得了现今光纤光栅温度传感器最高的分辨率 $0.0014\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{pm}$,再稍微扩展下还能利用这个原理,设计制作一款灵敏度系数可调的高灵敏度光纤光栅温度传感器^[12],并通过调整高灵敏度光纤光栅温度传感器的灵敏度改变其量程。

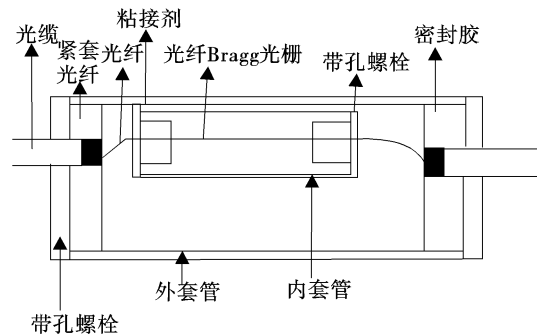


图 8 双管式光纤光栅温度传感器结构示意图

由静等人^[13]设计了一种对外加应力应变不敏感的双管式光纤光栅温度传感器。图 8 为双管式光纤 Bragg 光栅温度传感器的结构示意图。其中,外套管隔离了外加应力应变向内管的作用,避免了外力通过内管传递给光纤 Bragg 光栅。同时,由于内、外管均是热传导性能良好的金属材料(比如:铜),故温度仍能通过外管和内管传递给光纤 Bragg 光栅,从而使得 Bragg 波长响应温度变化而产生移位。根据测温实验数据得到光纤光栅温度传感器的各项静态性能指标,光纤光栅温度传感系统灵敏度为 $9.8\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,分辨率为 $0.102\text{ }^{\circ}\text{C}$,线性度为 99.88% ,重复性误差 1.55% 。

上面介绍的 2 种传感器各有特色,双金属光纤光栅温度传感器能达到非常高的分辨率,能用于地震前兆的观测,而且稍微改变下还能制作出灵敏度系数可调的高灵敏度光纤光栅温度传感器,而后者能实现消除外加应力应变的影响,保障在实际应用中温度测量的系统精度。

3 结束语

光纤温度传感器自问世以来,主要应用于电力

(下转第 50 页)

率为 40%。

6 结 论

着重分析和讨论了激光二极管和单模保偏光纤耦合的问题,计算出了耦合效率并与实际耦合效率作了比较,设计出了实验方法,得出了结论。

将非傍轴激光二极管远场模型用于计算透镜与单模光纤的耦合效率,获得了与实验一致的结果,结果表明,单透镜耦合系统的耦合效率相差不多。因此仅用于光纤耦合的情形,使用单个大数值孔径即可,这样可减少费用又易于调整。结果还表明,对于大多数折射率波导形激光二极管,光波像散对耦合效率影响不大。对于要求较高的场合,可用一弱柱面镜修正光波像散。由于器件的一致性不好,柱面镜的曲率半径须由实验确定。要获得较大的耦合效率,必须使用“合成棱镜对”对光场形状进行矫正。

文中给出的处理方法不仅对于激光二极管-光纤耦合系统的计算有实用价值,也可用于光存贮、光

加工、泵浦固体激光器等场合对焦距场分布的分析和计算。

参考文献

- 1 李保红,刘雪峰,黄得修.锥形光纤微透镜耦合特性[J]. 半导体光电,1996,17(2):121-125.
- 2 Marcuse D. Loss analysis of a single-mode fiber splices[J]. Syst. Tech. J., 1977, 56(5): 703-718.
- 3 Stamnes J J, Spjelkavik B, Pedersen H M. Evaluation of diffraction integrals using local phase and amplitude approximation[J]. Opt. Act, 1983, 30(2): 207-220.
- 4 曾小东,詹玉书,于常青.半导体激光器光波准直特性研究[J]. 光学学报, 1999, 19(3): 295-298.
- 5 沈柯. 激光原理[M]. 北京:北京工学院出版社, 1986, 455-464.
- 6 Nemoto S. Experimental evaluation of a new wxpression for the far field of a diode laser beam[J]. Appl. Opt., 1994, 33(27): 6387-6395.
- 7 Kogelnik H. Coupling and conversion coefficients for optical mo-des[C]. Micro-wave Research Institute Symposia Series. New York, 1994, 14: 133.

(上接第 42 页)

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。它的应用是一个方兴未艾的领域,有着非常广阔的发展前景,迄今为止,国内外已经有不少相关研究,虽然在灵敏度、测量范围、分辨率等方面均有了很大的发展,但是相信随着研究的深入,根据具体的应用目的,会有越来越多的精度更高、结构更简单、成本更低、更实用的方案提出,更进一步促进温度传感器的发展。

参考文献

- [1] 陈艳,王海燕,张朋,等.简述光纤温度传感器的原理及应用[J]. 技术与应用, 2008, 14: 23-27.
- [2] KIST R. The fiber Fabry-Perot and its application as a fiber-optic sensor element[J]. SPIE. Fiber Optic Sensors, 1985, 585: 126-133.
- [3] MURPHY K A, GUNTHER M F, MAY R G, et al. EFPI sensor manufacturing and applications [J]. SPIE, 1996, 2721: 476-482.
- [4] WILLSHIRE A J, NIEWCZAS P, MCDONALD J R. An ar-rayed waveguide grating based multiplexer and interrogator for Fabry-perot sensors[J]. IEEE sensors Jour-

nal, 2005, 5: 964-969.

- [5] 张文涛,戴静云,孙宝臣.一种新型金属封装的光纤法珀温度传感器[J]. 微纳电子技术, 2007, 7/8: 207-209.
- [6] 柯涛,朱涛,饶云江,等.全光纤微型法珀干涉式高温传感器[J]. 红外与激光工程, 2010, 39: 106-109.
- [7] 许忠保,叶虎年,叶梅.半导体吸收式光纤温度传感器[J]. 光电技术应用, 2004, 25: 62-64.
- [8] 张英,王海容,蒋庄德.半导体吸收式光纤温度传感器的研究[J]. 压电与声光, 2007, 29: 389-391.
- [9] Cruz J L, Dong L, Reekie L. Improved thermal sensitivity of fibre Bragg gratings using a polymer overlayer [J]. Electronics Letters, 1996, 32: 385-387.
- [10] Jung J, Nam H, Lee B, et al. Fiber Bragg grating temperature sensor with controllable sensitivity[J]. Applied optics, 1999, 38: 2752-2755.
- [11] 李阔,周振安,刘爱春.基于光纤光栅的高精度测温传感器研究[J]. 地球物理学进展, 2008, 23: 1222-1225.
- [12] 李阔,周振安.一种灵敏度系数可调的光纤光栅温度传感器[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29: 144-147.
- [13] 由静,张晨.双管式光纤 Bragg 光栅温度传感器[J]. 大坝与安全, 2009, 3: 28-30.