

光纤温度传感器

何去奢

(中国科学院新疆物理研究所)

光导纤维(简称“光纤”)是以 SiO_2 为主要原料制作的高度透明的玻璃丝。它以高折射率的玻璃丝为芯,外面套有低折射率的玻璃包层。光纤的芯径从几微米以至几百微米。光由光纤一端入射,凡入射角小于临界角的光在纤芯和包层的界面,经多次全反射后传至另一端,从而实现光纤通信。自从 1954 年荷兰 Van Hell^[1] 发表有关梯度折射率光纤定向传导方面的论文以来,光纤通信得到了迅速的发展,而光纤进入传感器这个领域则是 1976 年^[2] 以后的事。然而光纤传感器以其体积小、重量轻、灵敏度高、抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀、多功能以及能方便地与光纤通信技术组成遥测网等一系列优越性能,从而成为近代传感器技术中的一名新秀,使古老的传感技术面临着一次变革。

一、光纤温度传感器的基本类型

1. 分类

光纤温度传感器按光纤在传感器中所起的作用可分为功能型和非功能型两种基本类型。

功能型(亦称传感型):它是采用光纤感温,并利用光纤中光的强度、位相、偏振或波长^[3] 随外界温度的变化而变化的特性,对温度进行测定。在这类传感器中,光纤即为传输元件,也为感温元件。

非功能型(亦称传光型):在这类传感器中,光纤仅作为传光媒介,而用其他感温材料如半导体、液晶、陶瓷等作为感温元件。下面对上述两个基本类型的光纤温度传感器逐一加以介绍。

2. 功能型光纤温度传感器

(1) 干涉型光纤温度传感器

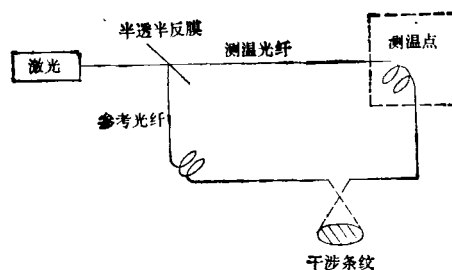


图1 干涉型光纤温度传感器原理图

基本原理如图 1 所示,激光器发出的光分成两束,送入两根性能长度完全相同的光纤。由于温度的影响,测温臂光纤的长度和折射率均发生了变化,导致光程发生变化,从而使位相发生变化。分析表明^[4,5],位相变化 $\Delta\phi$ 遵从下述规律:

$$\Delta\phi/L \cdot \Delta T = K_0 \cdot n \cdot \alpha + K_0 \cdot \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right),$$

式中 L 为光纤长度, n 为折射率, K_0 为常数, α 为光纤线长系数。

对于石英纤维,当入射波长 $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$, $\Delta\phi/L \cdot \Delta T = 107 \text{rad}/^\circ\text{C} \cdot \text{M}$, 比一般测温方法的灵敏度高几个量级。由于这种传感器的相位记录用马赫-钱德尔(Mach-Zehnder)干涉仪的原理,故称 Mach-Zehnder 型光纤温度传感器。当然相移记录也可以采用迈克耳孙^[6,7]干涉仪、法布里-珀罗^[8]干涉仪,但基本原理完全一样。

(2) 光强调制型光纤温度传感器^[9-11]

基本原理如图 2 所示。由于光纤的折射率与温度有关,当温度发生变化时,纤芯与包层的折射率 n_1, n_2 变化程度不同,使得光纤的数值孔径 $N_A = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 随之变化,导致光纤传输性能发生变化,光强亦随之变化。因而光强成

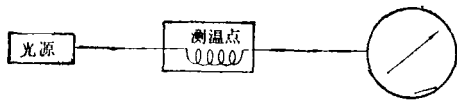


图2 光强调制型光纤温度传感器原理图

为温度的函数,测得光强,温度即可确定。光源一般用光电二极管或半导体激光器,而接收器大都使用 Ge 或 Si 光电雪崩二极管;美国的 M. Gottlib 等人对这一类传感器的理论进行了详细的分析,详见文献[12]。

(3) 辐射型光纤温度传感器

根据普朗克定律,任何一个温度高于绝对零度的物体,均要向外辐射一定波长的光,其波长随温度的升高向短波方向移动,强度也随温度的升高而增加。分析表明^[13],当辐射波长介于 $\lambda_0 - \lambda$ 之间时,物体表面向外辐射的光能密度 P 为

$$P = \int_{\lambda_0}^{\lambda} \epsilon_{(\lambda,T)} \frac{C_1}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) \right]^{-1} d\lambda,$$

式中 T 为温度, C_1, C_2 为常数。由此可见,对一定波长的辐射,其辐射的光能密度是温度的函数,并随温度的升高而升高,高温时,其强度变化显著,从而容易检测。如图3所示,当光纤端部温度与物体温度一致时,光纤端部辐射的光沿光纤传出,其强度随温度的变化而变化,用探测器测定辐射光的强度即可测得温度。此法简单可靠,不用光源,宜作为大型机电设备内部温度的测量和电炉的控温、测温,测温范围从室温至 1000℃,精度为 1%。

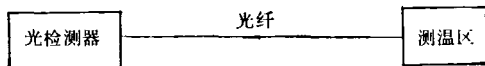


图3 辐射型光纤温度传感器原理图

(4) 偏振型光纤温度传感器^[14]

如图4所示,由 He-Ne 激光器发出的光束经起偏器和 $\lambda/4$ 波片变为圆偏振光(起偏器的通光方向与 $\lambda/4$ 波片的快慢轴的夹角为 $\pi/4$,否则为椭圆偏振光)。对高双折射单模光纤的两个正交偏振态进行均匀激励,由于它们的相移不同,输出光的合成偏振态可在左旋圆偏

物理

振光 $0-45^\circ$,线偏振光,右旋圆偏振光 $0-135^\circ$ 之间变化。如果只检测 45° 线偏振分量的输出,则强度为

$$I = \frac{I_0}{2} (1 + \cos \phi),$$

式中 ϕ 为外界因素。为了抵消光源强度变化的影响,用 Wallaston 棱镜同时检测 $45^\circ(I_1)$ 和 $135^\circ(I_2)$ 的输出,经电子线路处理,可得

$$\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \cos \phi,$$

式中 ϕ 为外界因素。

实验结果表明,用应力双折射光纤进行温度检测时,其灵敏度达 $2.5 \text{ rad}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}$ 。

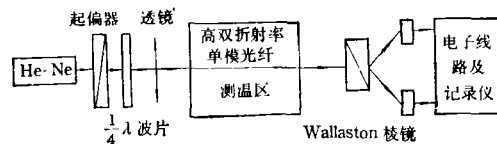


图4 偏振型光纤温度传感器原理图

以上是功能型光纤温度传感器的典型例子,还可列出许多例子,但均不外乎是光强调制、位相调制、偏振态调制、波长调制^[14]等四种形式。

3. 非功能型光纤温度传感器

(1) 半导体光纤温度传感器^[15]

它是用多模光纤作为导光媒质,用 GaAs, CaTe 或 InGaAsP 等化合物半导体材料做灵敏元件(如图5所示)。

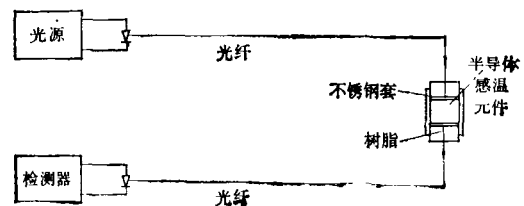


图5 半导体光纤温度传感器原理图

在室温附近,绝大多数半导体的能带间隙都随温度 T 的升高而线性地减小。因此,半导体光吸收边相应的波长 $\lambda_g(T)$ 随 T 的增加而向长波方向移动。当我们选用的光源的辐射光谱 $\lambda_g(T)$ 与所用的半导体的吸收边相一致时,

通过该半导体的光强随温度的升高而减小, 该类传感器是用发光二极管作为光源, 以雪崩光电二极管作为接收器。日本 Mitsubishi 电气公司研制的此类温度传感器的使用范围为-10—300℃, 精度为±1℃, 响应时间为2s。

(2) 液晶光纤温度传感器^[16]

基本原理如图6所示。在向列相(MBBA)和胆基(cholesterlelate)双元液晶混合物中, 光的振动方向会随光前进方向发生旋转, 旋转的空间周期长度随温度而变。当激光通过偏振器进入液晶区时, 其振动方向将发生变化; 经反射镜反射后再一次通过液晶区时, 旋转角加倍, 通过偏振器返回的光的功率将是温度的函数。

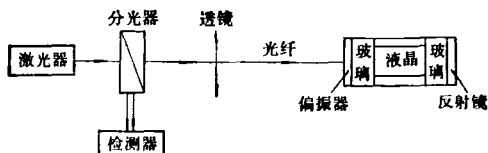


图6 液晶光纤温度传感器原理图

此种装置灵敏度很高, 当温度变化0.06℃时, 输出改变10%, 但其温区很窄。

(3) 荧光光纤温度传感器^[17]

其原理是一些荧光材料在恒定光源的照射下, 所产生的荧光的强度或波长随温度的变化而变化。例如一些半导体荧光材料, 其禁带宽度随温度的增加而减小, 因此它所发出的荧光随温度的升高而向长波方向移动, 其强度随温度的升高而增加。这种传感器是用半导体激光器作恒定光源, 以光纤为传输介质, 以雪崩光电二极管为接收器, 所用的荧光体的组分为(Cd_{0.9}, Eu_{0.01})₂O₇S。

这类温度传感器可用于医学和其他科学技

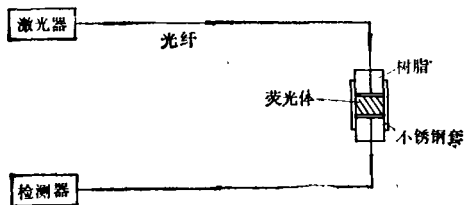


图7 荧光光纤温度传感器原理图

术领域, 进行高精度的温度测量, 测温范围为0—200℃, 精度为±0.5℃。

(4) 陶瓷光纤温度传感器^[18]

陶瓷材料LiTaO₃, LiNbO₃等单晶体, 是具有双折射率的晶体, 其折射率随温度的变化而变化。如图8所示, 以发光二极管为光源,

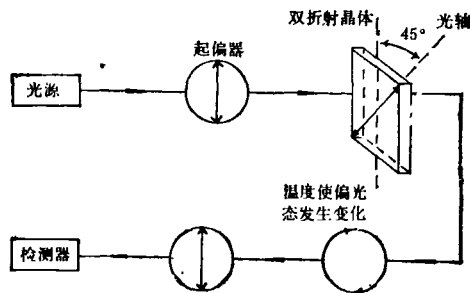


图8 陶瓷光纤温度传感器原理图

光经起偏器后成为偏振光, 并通过LiTaO₃晶体薄膜, 这时, 其正常光与异常光的配比随折射率的变化而变化, 亦即输出强度随温度的变化而变化。在一定温区, 光强的变化与温度变化成正比, 即

$$\Delta P \propto \Delta T.$$

日本中央研究所用此原理制成的温度传感器的温区为-20—120℃, 精度为±0.1℃, 反应时间为0.5s。

二、国外研究概况

光纤温度传感器进入传感器这个领域的时间很短, 1977年才发表第一篇光纤温度传感器的论文。由于它具有独特的优点和广泛的应用前景, 各工业发达国家均投入相当大的人力和物力进行开发研究工作。例如美国把光纤传感器列为军备改进计划重点之一; 美国海军研究局和国家标准局均制定了发展光纤传感器的计划, 从事研究和开发的单位有几十个。日本计划投资180亿日元, 研制温度、压力、液面、流量、振动、位移等光纤传感器, 提供给工业、航天、航海等部门应用, 以解决强电磁干扰等恶劣

(下转第202页)