

光纤传感物理及其应用

廖延彪

(清华大学电子工程系,北京 100084)

光纤传感器是近十年来迅速发展起来的一种新型传感器。它具有抗电磁干扰、电绝缘性好、灵敏度高、重量轻等一系列优点,因而具有广阔的应用前景。目前已有测量温度、压力、位移、电流、电压等多种物理量的光纤传感器问世。本文介绍了振幅(强度)调制、相位调制、偏振态调制等几类光纤传感器的物理原理、基本特性及其应用概况。

光导纤维利用光的完全内反射原理来导引光波。它基本上由两层媒质构成,内层为纤芯,外层为纤皮。纤芯的折射率比纤皮的稍大。当满足一定的人射条件时,光波就能沿纤芯向前传播。光纤最早在光学行业中只用于传光和传像。70年代初生产出低损光纤后,它又用于长距离通信。其后不久,人们发现:光波在光纤中传输时,表征光波的特征参量(振幅、相位、偏振态、波长等)会因外界因素(如温度、压力、电场、磁场等)对光纤的作用而发生变化,利用这类现象可将光纤用作传感元件来探测各种物理量。光纤传感是继光通信之后迅速发展起来的光纤技术的又一重要应用。

光纤传感由于具有抗电磁干扰、电绝缘性

膜¹⁾,其发射光谱中包含三基色成分,例如 ZnS-Pr, K 和 SrS-Pr, K 等,在其前面加上三基色滤光片阵列来实现彩色化。无论哪一种方案,都必须进行深入的研究和工艺的改进,提高电致发光薄膜的亮度。有专家估计,1992年以后,可以实现实用的交流电致发光薄膜全固体平板化的彩色电视机。

电致发光显示器以其全固体平板化的优点,已被广泛用于各个方面。特别是电致发光计算机终端显示器的问世,为电致发光的研究带来新的生机,并已实现了中规模的生产,正在形成新的产业。诚然,在彩色化和价格两个方面遇到液晶显示器件的挑战。只要突破这两个问题,全固体平板化的“挂壁”式彩色电视机将

好、耐腐蚀、安全可靠、灵敏度高、重量轻、体积小、可挠性好、对被测介质影响小、便于与计算机和光通信系统连网等许多优点,因而在电力、石油、化工、冶金等行业中具有广阔的应用前景,发展极为迅速。目前已有力、热、声、电、磁、核物理等各领域的光纤传感器近百种^[1-3]。举凡位移、速度、加速度、压力、液面、流量、振动、水声、温度、电压、电流、电场、磁场、核辐射等物理量都实现了不同性能的光纤传感。有的已有产品问世。新的传感原理及应用的发现,使传感用的特殊光纤以及专用器件不断出现,使许多光纤传感器的指标不断地(常常是大幅度地)提高。各工业发达国家均已对此进行研究,每年都有国际、国内的光纤传感学术会议召开。

进入人们的生活,用平板显示器件代替 CRT 的诱人前景即将成为现实。

- [1] 周连祥,电子科学技术, 18-7 (1988), 37.
- [2] 黄锡珉,物理, 19(1990), 301.
- [3] 范希武,物理, 19(1990), 240.
- [4] M. B. 福克等著,丁清秀等译,实用场致发光学,科学出版社,(1984), 185.
- [5] D. Curie, Luminescence in Crystals, London, Methuen & CO LTD, (1963), 237.
- [6] H. K. Hensich, Electroluminescence, Pergamon Press, (1962), 5.
- [7] 葛葆珪,电致发光原理及应用,测绘出版社,(1985), 145.

1) Zhong Guozhu et al., Society for International Display 88 Proceeding (1988) 287.

按作用原理光纤传感器可分为传感型与传光型两大类。利用外界物理因素直接改变光纤中光波的特征参量,从而对外界因素进行计量和数据传输的,称为传感型(或功能型)光纤传感器。它具有“传”、“感”合一的特点,信息的获取和传输都在光纤之中。而传光型(或非功能型)光纤传感器,是指利用其它敏感元件测得的物理量,由光纤进行信息传输。其特点是既充分利用现有的传感器,又具有光纤传输的优点,便于推广应用。这两类光纤传感器都可再分成光强调制、相位调制、偏振调制以及波长调制等几种形式。

一、传感型光纤传感器

1. 光强调制型

改变光纤中光强的方法有:改变光纤的微弯状态,改变光纤对光波的吸收特性,以及改变光纤包层的折射率等。

利用微弯效应在早期就制成光纤位移传感器,如图 1(a) 所示。它是利用多模光纤在受到微弯曲时,一部分芯模能量会转化为包层模式能量这一原理,通过测量包层模式的能量变化来测量位移。当变形器因外界因素影响而产生位移时,光纤微弯程度不同,包层模式能量也随之变化。实验表明,该装置的灵敏度可达 $0.6 \mu\text{V}/\text{\AA}$,相当于最小可测位移 0.8\AA ,动态范围可望超过 110 dB 。这种传感器很容易推广用于测量压力和水声压等。

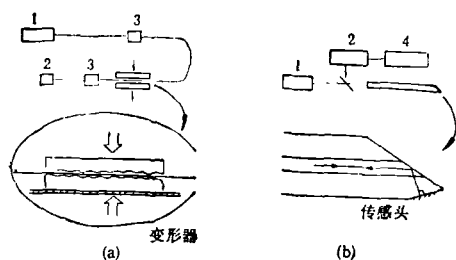


图 1 (a) 光纤微弯传感器原理图; (b) 光纤全内反射传感器原理图

1. 激光器; 2. 光探测器; 3. 去模器; 4. 显示器

光纤微弯传感器的结构简单,所用的光纤

和元器件容易得到,因此能较快地投入实用。例如,我国已研制成基于这种原理的光纤报警器。它的基本结构和工作原理是:光纤呈弯曲状被织于地毯中,当有人站在地毯上时,光纤弯曲状态加剧,引起光纤的光强变化,产生报警信号。研制这类传感器的关键在于确定变形器的最佳结构。由于实际的光纤的一致性较差,因此最佳结构一般是通过实验确定的。

图 1 (b) 是一种全内反射光纤传感器的原理图。它的光纤端面的角度被磨成恰好等于临界角。于是,从纤芯输入的光将从端面全反射,经反射镜再沿原路返回输出。当外界因素(折射率、浓度、温度等)改变光纤端面外媒质的折射率时,其全反射条件被破坏,因而输出光强下降。由此光强的变化即可探测出外界物理量的变化。这种传感器的优点是传感头结构简单、稳定。根据这一原理,我国已研制成传感头结构各异的光纤气-液二相流传感器、光纤液体浓度传感器、光纤折射率计等。

X 射线和 γ 射线等会使光纤材料的吸收损耗增加,从而使光纤的输出功率下降。利用这一特性可构成光纤辐射传感器。由于可使用较长的光纤,故灵敏度很高(为通常玻璃块型的 10^4 倍),线性范围也较大 (10^{-2} — 10^{-6} R)。它既可做成小巧的仪器,也可用于核电站等大范围的监测。与此类似的有光纤紫外光传感器。紫外光照射光纤会激发荧光,由荧光强弱来探测紫外光强等。这一类光纤传感器的关键是要制作特殊的光纤。

2. 相位调制型

根据传统的光学干涉仪的原理,将干涉光路改用光纤作为传输媒质,即可构成光纤干涉仪。再利用外界因素使光纤中光波相位发生变化,以探测各种物理量。这类光纤传感器的主要特点如下。

(1) 灵敏度高

光学中的干涉法是已知最灵敏的探测技术之一。在光纤干涉仪中,由于使用了数米甚至数百米以上的光纤,使它比普通的光学干涉仪更加灵敏,其超过同类传感器灵敏度的例子不

在少数。例如，用双臂光纤干涉仪构成的光纤水听器，当传感臂为 1 m 长的光纤时，其灵敏度就可达到目前最灵敏的压电陶瓷的传感器的水平。用它构成的磁传感器，可在常温下测量 10^{-9} G 的弱磁场。

(2) 灵活多样

由于探头由光纤本身构成，故其几何形状可按使用要求设计成各种不同形式。

(3) 传感对象广泛

不论何种物理量，只要能对干涉仪中的光程产生影响，即可用于传感。目前，利用各种类型的光纤干涉仪，已研制成功测量压力(包括水声)、温度、加速度、电流、磁场和检测液体成分、气体成分等多种物理量的光纤传感器。而且，同一种干涉仪，常常可对多种物理量进行传感。

(4) 需特种光纤

在光纤干涉仪中，为获得干涉效应，应使同一模式的光相叠加，为此要用单模光纤。采用多模光纤虽也可得到一定的干涉图样，但性能下降很多，信号检测也很困难。为获得最佳干涉效应，两相干光的振动方向必须一致。因此，在各种光纤干涉仪中最好采用“高双折射”单模光纤。研究表明，光纤的材料，尤其是护套和外包层的材料对光纤干涉仪的灵敏度影响极大。因此，为了使光纤干涉仪对被测物理量进行“增敏”，对非被测物理量进行“去敏”，需对单模光纤进行特殊处理，以满足测量不同物理量的要求。

目前已研制成 Mach-Zehnder 光纤干涉仪、Michelson 光纤干涉仪、Sagnac 光纤干涉仪、Fabry-Perot 光纤干涉仪、环形腔光纤干涉仪等，并且都已用于光纤传感。下面简述其结构原理。利用一个光纤定向耦合器即可构成一个光纤 Michelson 干涉仪[图 2(a)]，利用两个光纤定向耦合器则可构成 Mach-Zehnder 光纤干涉仪[图 2(b)]^[2,3]。这两种都是双光束干涉仪。两光纤之一为参考臂，另一为传感臂。外界因素温度、压力等可直接引起干涉仪中的传感臂光纤的长度 l (对应于光纤的弹性变形)和

物理

折射率 n (对应于光纤的弹光效应) 发生变化，从而引起光纤中光波相位相应改变。对于一般的单模光纤，单位压力和温度改变所引起的相对相位变化之值分别为 10^{-12} rad/dyn/cm² 和 10^2 rad/°C·m。把磁致伸缩材料或压电材料固定在传感臂上，则可利用它们对光纤引起的应力变化来测量弱磁场或电压(电场)；在传感臂上镀上金属薄膜，则可利用电流的热效应来测量电流。利用类似原理还可构成很多测量其他物理量的光纤传感器。

Fabry-Perot 光纤干涉仪只由一根单模光纤构成^[4]。制作办法有二：一是在一根两端磨光的单模光纤的端面处贴上高反射率的反射镜；二是在光纤两抛光端面上直接镀高反射膜。这样，光波在光纤内来回反射形成多光束干涉，原理和一般的 Fabry-Perot 干涉仪一样。特点是：精细度高 (>100)，光谱分辨率高 (10^8 — 10^9)，因腔长可从数米扩展到上百米，调整精度低，适于作传感器(无需参考臂)。与此类似，利用单模光纤耦合器尚可构成环形腔光纤干涉仪[图 2(c)]^[5]。这是光纤问世后的一种新型干涉仪。激光从 a 端输入后，大部分 (90% 以上) 从 c 端输出，经过光纤又回到耦合器的输入端 b；小部分从 d 端输出。从 b 端输入的光又分成两部分：大部分经 c 端又回到 b 端，小部分从 d 端输出，如此多次往返，在 d 端形成一透射光叠加而成的多光束干涉，其输出峰是亮背景下的暗峰。目前这种环形腔的最高精细度已达

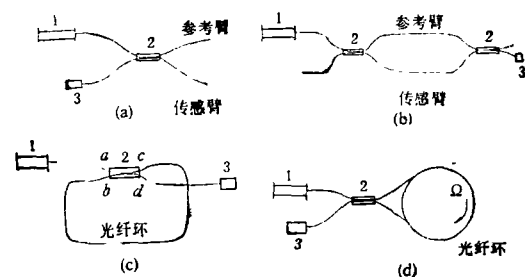


图 2 (a) Michelson 光纤干涉仪；(b) Mach-Zehnder 光纤干涉仪；(c) 环形腔光纤干涉仪；(d) Sagnac 光纤干涉仪

1. 激光器； 2. 光纤定向耦合器； 3. 光探测器

沿同一光纤绕成的光纤圈反向传播的两光波, 在外界因素作用下产生不同的相位变化, 通过干涉效应进行检测。这就是 Sagnac 光纤干涉仪的基本原理^[6], 图 2 (d) 是其原理图。它的最典型的应用就是制作转动传感器, 即光纤陀螺。由于它没有活动部件, 没有非线性效应和低转速时激光陀螺的闭锁区, 因而非常有希望制成高性能低成本的器件。当环形光路相对于惯性空间有一转动 Ω 时 (设 Ω 垂直于环路平面), 则对于顺、逆时针传播的光, 将产生一非互易的光程差。当环形光路由 N 圈单模光纤组成时, 对应于顺、逆时针光, 两光束的相位差为 $\Delta\phi = 8\pi NA\Omega/\lambda c$, 式中 A 是环形光路的面积, c 和 λ 分别为真空中光速和波长。由此可见, 用光纤干涉仪构成转动传感器的主要优点在于可利用增加光纤的圈数 N 来大大提高测量灵敏度。应用光纤陀螺仪测量的基本难点是, 对其元件、部件和系统的要求极为苛刻。例如, 为了检测出 10^{-2} 度/h 的转速, 用长度为 1 km 的光纤绕成直径为 10 cm 的线圈时, 由 Sagnac 效应产生的相移 $\Delta\phi$ 为 10^{-7} rad (对于 $\lambda = 1 \mu\text{m}$ 的光波)。而经 1 km 长光纤后的相移为 6×10^9 rad, 因此相对相移为 $\Delta\phi/\phi \sim 10^{-17}$, 由此可见所需检测精度之高。为了提高 Sagnac 光纤干涉仪的检测精度, 除了应使其两光束的光路相同, 模式及偏振态也均相同外, 尚应减小以下寄生效应的影响: 直接动态效应 (由于作用于光纤上的温度、机械应力等而引起的相移), 反射及瑞利背向散射 (各端面的反射光和光纤中的瑞利背向散射在光探测器上产生光噪声), 法拉第效应 (包括地磁在内的外磁场在光纤中引起的磁光效应), 光克尔效应 (由光场引起的光纤折射率的变化)。而影响检测精度的最后限制则是光子噪声。光纤陀螺是相位调制型光纤传感器中技术上要求最高者。相对于不同的低转速精度和比例因子稳定性, 光纤陀螺可能具有各种用途。从目前实验室研制的水平来看, 已可满足导弹稳态、车辆导航和钻井的要求, 但是离战术武器和飞机导航的要求, 尚有一

段距离。

3. 偏振态调制型

外界因素使光纤中光波的偏振态发生变化。检测这种变化的光纤传感器属于偏振态调制型。最典型的例子是测量大电流用的光纤电流传感器^[7]。其基本原理是利用光纤材料的法拉第效应, 即光纤处于磁场中, 磁场使在光纤中传播的偏振光发生偏振面旋转, 其旋转角度 θ 与磁场强度 H 、磁场中光纤的长度 L 成正比, 即 $\theta = VHL$, 式中 V 是光纤材料的 Verdet 常数。由于长直载流导线在周围空间产生的磁场为 $H = I/2\pi R$, 因此只要测量 θ, L, R 等值就可由 $\theta = VLI/2\pi R$ 求出导线中的电流 I 。图 3 是其装置简图。从激光器 1 发出的激光经起偏器 2、聚光透镜 3 耦合到单模光束 4 中去; 5 是高压载流导线, 通过其中的电流为 I , 绕在导线上的光纤产生磁光效应, 使通过光纤的偏振光产生一角度为 θ 的偏振面的旋转; 出射光由透镜 3 耦合到偏振棱镜 6; 7 为光电接收器; 8 为信号处理系统。

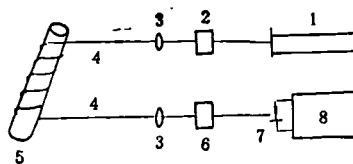


图3 光纤电流传感器原理图

这种测电流方法的优点是: 测量范围大, 灵敏度高, 是被动型的, 且与高压线无电接触, 使输出、输入端实现了电绝缘。但是, 目前用于实际测量还有困难, 主要是光纤的固有双折射以及外界因素 (温度、压力、振动等) 产生的附加双折射会引起测量误差。这种电流传感器可测 $10^2 \sim 10^3$ A 的电流, 误差为 0.5—3%。

光纤偏振干涉仪是利用单根高双折射单模光纤中两正交偏振模式在外界因素影响下, 其传播速度的差值随之变化, 由此而进行传感。实验表明, 用应力双折射光纤进行温度传感时, 其灵敏度约为 $25 \text{ rad}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}$, 它虽比 Mach-Zehnder 光纤干涉仪的灵敏度低很多 (大约 1:50),

但是其仪器装置要简单得多,且其压力灵敏度仅为 M-Z 光纤干涉仪的 1/7300,因此有较强的压力去敏作用。目前,它可用于 0—400℃ 范围的温度测量。

二、传光型光纤传感器

在传光型光纤传感器中,光纤只是传光元件,不作敏感元件。它虽然失去了“传”、“感”合一的优点,还增加了“感”和“传”之间的接口,但是它可以充分利用已有的敏感元件和光纤传输技术,而且光纤本身还具有电绝缘、不怕电磁干扰等优点。在二光纤之间加入不同的敏感元件,就可对不同类型的物理量进行传感,因而它最容易实用化,从而受到人们的重视。例如当要求信号的传输不受强电磁干扰或者传输线本身电绝缘时,用这种传感器就非常合适。与前相似,这类传感器也分为光强、相位、偏振态以及波长调制等几种类型。

光强调制的办法一般有调制透射光强、反射光强以及全内反射光强等几种形式。图4(a)是光栅传感器的原理图。当两光栅作相对移动时,通过双光栅的光强亦随之发生变化,从而可探测外界物理量的变化。这种传感器最早被用来探测声场的变化。我国用类似的原理已研制成一套测量高压开关行程的装置,可对高压开

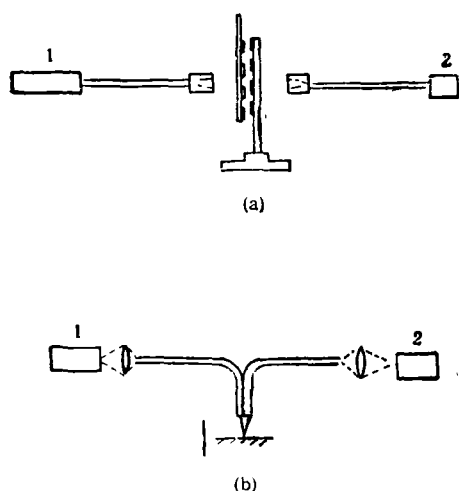


图4 光强调制型光纤传感器

关进行在线测量。

最早用光纤进行线性运动位移检测的是调制反射光强的光纤传感器,其原理如图4(b)所示。其反射光强将随物体距光纤探头端面距离不同而变化。实际应用中可采用不同的光纤束结构,如光纤粗细不同、根数不同、排列方式不同等。一般均采用大数值孔径粗光纤,以提高光强的耦合效率。这种结构的位移传感器能在 $1-10^{-3}$ mm 范围内进行高速、实时的检测。它具有非接触、探头小、频响高、线性好、结构简单等特点。不足之处是线性范围较小。

传统的各类干涉仪若改用光纤传光即可成为相位调制传光型光纤传感器。例如,利用任何一对高反射面构成的 F-P 干涉仪,用光纤传光即可构成一台 F-P 光纤干涉仪。其特点是传感头体积小,结构简单,可用于远距离或在狭窄空间等难以检测到的地方,去测量声波、机械振动、位移、温度等参量。再如,瑞利干涉仪采用光纤传光后就成为瑞利光纤干涉仪,可由于恶劣环境下测量气体或液体折射率的变化。

利用光纤作为光信号的传输元件,再加上一个受外界因素调制从而改变光波偏振特性的敏感元件,就可构成许多十分小巧、简单、可靠的光纤传感器。其主要特点是抗电磁干扰,耐腐蚀,并且可进行远距离探测。例如,由电光晶体、偏振器和波片,可构成一个测量电压和电场的探头。再加上光纤传光,就构成了光纤电压(电场)传感器。这种传感器已有商品。电压测量范围视所用晶体材料而变,测量误差为 1—2%。若把电光晶体换成磁光材料,就构成光纤磁场(电流)传感器,可测 10^2-10^6 A 的交直流大电流。换成弹光材料,则构成光纤振动(声)、压力或加速度传感器。我国用这种压力传感器构成的油罐油位计已在现场试用,用于测量 0—12 m 油位高度。

三、发展趋势及课题

1. 商品化

欲使光纤传感器在市场上有竞争力,就应

具有广阔前景的热等离子体处理

陈 熙

(清华大学工程力学系,北京 100084)

本文概述了热等离子体的基本概念、产生方法以及它在材料处理中的应用。热等离子体处理 (thermal plasma processing) 已经并将继续产生巨大的经济效益。对有关的基本过程缺乏深入的了解已成为该领域进一步发展的主要障碍,因而近来已成为快速增长的研究领域。本文最后部分列举了若干有待深入研究的基本问题,并评论了某些最近的研究进展。

50, 60 年代,热等离子体的主要技术应用是模拟空间飞行器进入大气层时遇到的高温环境,进行飞行器热防护材料的烧蚀试验。这方面的应用目前仍在继续,并为此研制了功率高

提高其抗干扰能力和长期稳定性,简化器件结构,降低成本。

2. 集成化

全光纤化或光纤与光集成器件相结合,是光纤传感器的发展方向,是解决系统稳定性的重要途径。为此目前人们正在研究光纤激光器(利用掺杂光纤构成的激光器),光纤分光、合光器件,光纤偏振器件,光纤调制器件,光纤复用器件以及光集成元件等。

3. 网络化

利用光纤传感器和光纤网络系统构成的光纤传感网络系统,可用于多点和多参量的测量以及遥测系统。这是目前光纤传感发展的主要方向之一。现已有光纤水声传感器阵列和位置传感器阵列问世。利用拉曼散射和光时域反射技术构成的分布式光纤温度传感器的研究已有结果发表。为此应研究光纤复用技术和多点、多参量的测量技术。

4 特殊光纤

随着光纤传感技术的进一步发展,对传感用光纤的要求也愈来愈多样化。目前正在研制或已投入生产的特殊光纤有:偏振保持光纤(高双折射光纤、低双折射光纤、高双折射旋光光纤、低双折射旋光光纤等),掺杂光纤,增敏光纤(例如

达 60 MW 的电弧加热器(美国的 Ames 研究中心)^[1]。不过,现在热等离子体研究与开发的重点已经转向材料的热等离子体处理。近年来,这方面的研究与发展进展迅速,并已在工业

对磁场增敏,对力增敏,对紫外辐射增敏等),去敏光纤(例如对温度去敏、对压力去敏、对辐射去敏等)。此外,与增敏和去敏有关的光纤被覆技术也日益受到人们的重视。

5. 新型传感机理和方案的研究

综上所述,利用外界因素对光纤中光波参量的调制作用,可以构成许多形式多样、功能各异的光纤传感器,以满足不同的需要。例如,最近引起各国专家注意的光纤智能系统,就是利用埋在复合材料中的光纤来监控复合材料的成型过程;利用埋在飞机零部件(例如机翼)中的光纤,可以实时监测这些零部件的飞行状态等。由此可见,这方面还有大量的研究工作有待进行。

- [1] 廖延彪、范崇澄,中国激光, 11 (1984), 513.
- [2] T. G. Giallorenzi et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-18 (1982), 626.
- [3] B. Culshaw, *Optical Fibre Sensing and Signal Processing*, Peter Peregrinus Ltd., (1984).
- [4] T. Yoshino et al., *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-18 (1982), 1624.
- [5] 彭江得等,清华大学学报, 28, (增3期) (1988), 70.
- [6] R. A. Borgh and H. J. Shaw, *J. Lightwave Technology*, LT-2, (1984), 91.
- [7] 范崇澄、廖延彪,北京光学, No. 3(1982), 17.