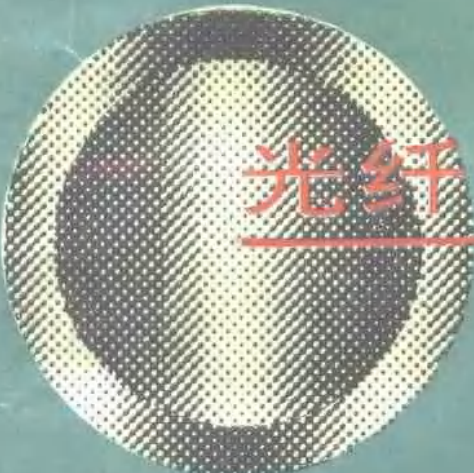


郭凤珍 于长泰 编著



光纤传感技术
与应用

浙江大学出版社

光纤传感技术与应用

郭凤珍 于长泰 编著

浙江大学出版社

(浙)新登字10号

内 容 提 要

本书系统地介绍了光纤传感技术的基本原理和应用。书中简述了与光纤传感技术有关的光纤基础理论；重点论述了光纤传感技术的工作原理，即光的强度、相位、偏振态、频率和波长调制技术；详细介绍了十六类有实用价值的光纤传感器。本书内容丰富、广泛、取材新颖，反映了国内外的最新研究成果。

本书可用作高等院校有关专业的大学生及研究生教材，也是从事传感技术及有关研究的广大科技人员的一本有用的参考书。

光 纤 传 感 技 术 与 应 用

郭凤珍 丁长泰 编著

责任编辑 张 明

浙江大学出版社出版

浙江省新华书店发行

浙江大学印刷厂印刷

开本850×1168 1/32 印张0.75 字数244千字

1992年6月第1版 1992年6月第1次印刷

印数0001—1500

ISBN 7-308-00979-3

TH·033

定价：3.25元

前 言

光纤传感技术是70年代后期迅速发展起来的一项新技术，它是纤维光学在非通信领域中的应用。光纤传感的基本原理是利用物理、化学和生物效应来调制光纤中光波的传输特性，经过信号解调后可以测量各种物理量、化学量和生物量的变化。光纤传感技术可以探测的物理量已有一百多种，它的优点是：应用范围广、灵敏度高、抗电磁干扰、绝缘性好、耐腐蚀、可挠曲、体积小、成本低，以及与光纤传输线路的兼容性好等。因此正受到世界各国广泛的重视，在军事、科技、工业过程控制、医疗测量等各个领域广泛应用，而且具有十分广阔的应用潜力和发展前景。

本书共分三章：第一章简要阐明光纤波导的导光原理及与光纤传感技术有关的重要特性，综合介绍了光纤传感技术的发展概况、光纤传感器的结构、特点和应用前景，是全书的基础。第二章论述了光纤传感器的工作原理：如光的强度、相位、频率、偏振态等调制技术，内容涉及到与传感技术有关的各种物理效应、变换元件及干涉测量等知识，是全书的重点。第三章按功能分类讲述了十六类在国民经济中有重要应用价值的光纤传感器，着重介绍了各种物理量的探测方法，并给出国内外报导的各种传感器实例，体现了本书的实用性。

光纤传感技术是一门多科性学科，涉及知识面很广，如纤维光学、光电器件、电磁学、流体力学、弹性力学以及电子线路和微机应用等等。所有这些课题已为许多专家学者成功地、详细地论述过。在本书的论述中从实用的角度出发，用易于理解的方式来阐述理论，重点放在理论的应用上。严格的理论证明、冗长的推导可以在上述各学科的教科书及书末给出的参考文献中查到。

为了保证全书内容重点突出，删去了光纤传感器用光源和光探测器部分的内容。

本书是在多年开设光电子学专业“光纤传感技术与应用”课程的基础上，补充近期发表的文献资料写成。其中郭凤珍副教授编写了前言及第一、二章，于长泰高级工程师编写了第三章。在全书的系统性、讲述方式、对一些问题的研究方法和参考资料的取舍上都反映了编者自己的见解。

浙江大学董太和教授和王明华教授审阅了全书文稿，并提出宝贵意见。在本书编写过程中，还得到了许多同志及有关单位的支持和帮助，在此一并致谢。

光纤传感技术是一个内容十分丰富并在迅速发展中的研究领域，尽管书中内容曾作过反复修改，由于编者学识水平所限，加之时间仓促，错误、不妥之处在所难免，诚望读者批评指正。

郭凤珍 于长泰

1991年4月于浙江大学

2.3	偏振调制型光纤传感器	(94)
2.3.1	影响光波偏振状态的物理效应	(94)
2.3.2	光纤电流传感器	(105)
2.3.3	光纤中产生双折射的原因	(108)
2.3.4	双折射对光纤传感器的影响	(111)
2.3.5	光纤温度传感器	(116)
2.4	频率调制型光纤传感器	(117)
2.4.1	光学多普勒概念	(117)
2.4.2	光纤多普勒系统	(119)
2.5	波长分布(颜色调制)传感器	(122)
2.5.1	颜色探测技术	(122)
2.5.2	光纤颜色探头	(124)
3.	各种功能的光纤传感器	(129)
3.1	光纤温度传感器	(129)
3.1.1	半导体吸收型光纤温度传感器	(129)
3.1.2	光纤辐射高温传感器	(152)
3.1.3	光纤荧光温度传感器	(156)
3.1.4	光纤热色效应温度传感器	(158)
3.1.5	偏振态调制型光纤温度传感器	(160)
3.1.6	光纤液体温度传感器	(161)
3.1.7	相位调制型光纤温度传感器	(162)
3.2	光纤压力传感器	(163)
3.2.1	移动式光纤水听器	(163)
3.2.2	纹影或光栅传感器	(164)
3.2.3	偏振传感器	(165)
3.2.4	多模耦合波导声传感器	(166)
3.2.5	消温敏单光纤压力传感器	(171)
3.2.6	受激喇曼效应光纤压力传感器	(174)

3.3	光纤电流传感器	(177)
3.3.1	强度调制光纤电流传感器	(177)
3.3.2	相位调制光纤电流传感器	(179)
3.3.3	与电流传感器有关的几个问题	(180)
3.4	光纤电压电场传感器	(181)
3.4.1	偏振态调制型光纤电压传感器	(182)
3.4.2	聚偏二氟乙烯材料光纤电场传感器	(183)
3.5	光纤磁场传感器	(187)
3.5.1	光纤磁强计	(187)
3.5.2	磁致伸缩效应光纤磁场传感器	(190)
3.6	光纤流量、流速传感器	(197)
3.6.1	光纤涡流流量计	(197)
3.6.2	单模光纤涡流流量计	(200)
3.6.3	光纤多普勒速度计	(201)
3.7	光纤液位传感器	(203)
3.7.1	遮光式光纤液位传感器	(203)
3.7.2	单光纤液面传感器	(204)
3.7.3	棱镜式光纤液面传感器	(205)
3.7.4	表面反射式液位传感器	(209)
3.8	光纤位移传感器	(210)
3.8.1	天线型光纤位移传感器	(210)
3.8.2	光纤开关与计数系统	(213)
3.8.3	球透镜结构高灵敏度光纤位移传感器	(219)
3.8.4	光纤微弯位移传感器	(223)
3.9	光纤加速度传感器	(228)
3.9.1	马赫—泽德尔干涉型光纤加速度传感器	(228)
3.9.2	倾斜镜式光纤加速度传感器	(232)

3.10	光纤振动量传感器	(236)
3.11	光纤化学量传感器	(242)
3.11.1	光强调制型光纤气体传感器	(242)
3.11.2	相位调制型光纤气体传感器	(248)
3.11.3	光声谐振型气体传感器	(250)
3.12	光纤医用传感器	(252)
3.12.1	光纤 pH 值传感器	(252)
3.12.2	光纤血流计	(255)
3.12.3	光纤氧饱和度传感器	(258)
3.12.4	光纤体压计	(262)
3.12.5	光纤体温计	(263)
3.13	光纤色敏传感器	(263)
3.13.1	光纤色敏传感器的特点	(264)
3.13.2	光纤色敏传感器的稳定测色原理	(264)
3.13.3	光纤色敏传感器的结构	(265)
3.13.4	HCS2000 型光纤色敏传感器	(267)
3.14	光纤放射线传感器	(269)
3.14.1	光纤放射线传感器原理	(270)
3.14.2	光吸收型传感器实例	(272)
3.14.3	光纤辐射传感器	(275)
3.15	激光二极管传感器	(276)
3.15.1	二极管激光传感器工作原理	(278)
3.15.2	传感器结构类型	(279)
3.16	多路复用传感器阵列	(281)
3.16.1	时分多路复用 (TDM)	(283)
3.16.2	频分复用(FDM)	(285)
3.16.3	相干复用(COM)	(288)
3.16.4	波分复用(WDM).....	(289)
3.16.5	发展前景	(290)
参考文献		(291)

1 光纤传感器基础

本章简要介绍光纤波导的原理及其特性。目的在于让读者对光纤中重要的光学现象，特别是关于传感系统中光纤的应用有基本的了解。对于光纤的传输特性，在传感技术中的要求与其在PTT（邮政、电报电话）工业中应用中是不同的：在PTT应用中不希望的（如损耗），在传感技术中恰恰是可以利用的。在光纤传感技术中，为了获得所期望的灵敏度，可以将光纤“增敏”或者“去敏”，就是说，如果只是采用通讯用普通光纤，那么光纤传感器性能将受到限制。根据传感技术的需要，选用新的材料、设计特殊结构的专用光纤，是光纤传感技术发展中的一个基础课题。

1.1 传感器与光纤

传感器的概念并不陌生，人的眼睛就是一种传感器。人步行时，要用眼睛观察道路状况，由大脑作出判断并控制着步行的方向和行动，这样才能保证安全行走。在人类有目的指向的行为中，关于目标的识别和判断都是必不可少的。在工程技术中控制和测量的关系也是如此：要实现准确的自动控制，必须从工程对象那里得到信息，在其基础上作出准确的判断。微型计算机的发展不仅带来了计测技术本身的高度发展，同时也促进了高可靠性自动控制机器的发展与普及。无论是计测还是控制，其最重要的部分都是作为来自待测目标的信息入口的传感器。随着对于计测和控制方面的要求越来越高，相应的实现各种目的传感器的研制开发都迅速展开。

所谓传感器，就是能将待测对象的状态变换成为可处理信号的器件或装置。一般说来，传感器所需要具备的条件有以下几项：

A、优良的变换功能

- 1° 动态范围广；
- 2° 单纯的变换关系；
- 3° 探测信号的信噪比(S/N)要高；
- 4° 重复性能好；
- 5° 时间稳定性好。

B、探测信号的质量好

- 1° 便于进行信号处理（规范化）；
- 2° 便于信号传送（匹配性、损耗小等）。

C、与待测目标间的匹配性能好

- 1° 不干扰目标的状态；
- 2° 可以充分承受目标的环境；
- 3° 抗干扰性好，探测信号不受环境干扰。

D、总体要求

小型、轻便、故障率低、特性涨落误差小、价格便宜等。

实际上，能够完全符合上述条件的传感器是比较少的。一般情况下要根据实际的需要作出取舍。比如：对于电子类传感器，即把对象状态转变成电信号形式加以探测的传感器来说，A、B两项条件较易满足。不同的传感器，有其不同侧重的要求，以后各章中将具体介绍。

至于光纤传感器，可以这样定义：一种用来检测光在光纤中传播时，因光纤的全部或部分环节所在环境（物理量或化学量或生物量等）的变化带来的光传输特性改变的装置。

光纤传感器与传统的各类传感器相比，有独特的优点。光纤本身用作基本传感器，具有高灵敏度，抗电磁干扰，耐腐蚀、防

爆及不干扰被测场等特点；光纤作为传感信号的传送系统，与传统的金属线路相比，具有抗电磁场和地球环流的干扰、可靠性高、安全及可长距离传送等优点；并且便于与计算机连接、与光纤传输系统组成遥测网络；加之光纤传感器结构简单、体积小、重量轻，因此，有着广泛的应用潜力。

1.2 光纤的基础

开发某种目的新型光纤传感器时，首先要掌握关于光纤本身的基础知识，理想的光导纤维可看作轴对称介质波导，它的传输规律可用光线理论和波动理论加以描述。

1.2.1 光纤的导波原理(光线理论)

典型的光纤构造如图 1-1 所示，分为两部分：对光的传送起着决定作用的芯和折射率比芯部略低的包层。此外，为提高光纤的强度，通常还有被复层，实际应用中，往往把若干光纤集束制成光缆使用。

关于光纤传输特性的解析，标准的方法应用波动理论。但当光在与光波长相比无穷大的介质空间传播时，可以当作“光线”处理。

根据直观的容易理解的几何光学处理方法（即光线理论），对于多模光纤而言可以得到许多有用的结果。根据麦克斯韦方程，当光波长与介质空间相比，接近为零时，直角坐标系中的光线方程为：

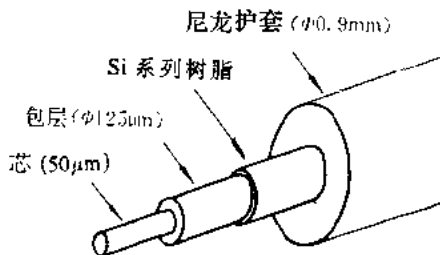


图1-1 光纤的结构

$$\frac{d}{dS} \left[n(x, y, z) \frac{d\mathbf{p}(S)}{dS} \right] = \nabla n \quad (1.1)$$

其中 $n(x, y, z)$ —— 介质空间的折射率分布;

S —— 光线轨迹的曲线坐标;

$\mathbf{p}(S)$ —— 光线轨迹上 S 点的位置矢量。

式(1.1)是光线传输微分方程的矢量形式。由其可以得出光在均匀介质(折射率 n 为常量)中直线传播的规律。即

$$n \frac{d\mathbf{p}(S)}{dS} = \text{const} \quad (1.2)$$

式(1.2)表明光线的轨迹是一条直线。

下面主要从简单的阶跃折射率分布光纤的特性出发进行讨论。这种阶跃光纤的芯折射率 n_1 和包层折射率 n_2 均为常量。当折射率差 $(n_1 - n_2)$ 足够小时, 比折射率差通常用下式表示:

$$\Delta = (n_1 - n_2) / n_1 \quad (1.3)$$

显然 $\Delta \ll 1$ 。考虑在通过光纤轴线的子午面内传播的光线——子午光线——的情形, 如图 1-2 所示, 当光纤内光的入射角 θ 大于全内反射临界角

$$\theta_c = \sin^{-1}(n_2/n_1) \quad (1.4)$$

时, 光纤对传播中的光起着有效的导波作用。

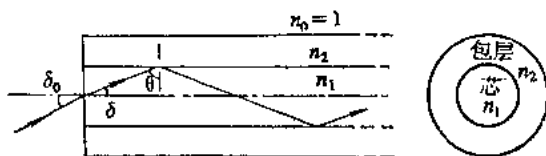


图1-2 阶跃光纤内子午光线

现在, 考虑光从光纤端面以与光轴夹角为 δ_0 入射的情况, 当

δ_0 足够小时, 如图 1-2 所示, θ 角则十分大, 故能保证光在光纤中以导波形式不断传送下去; 随着 δ_0 的逐步增大, δ 角相应增大, θ 变小, 当 θ 角变得比临界角 θ_c 还小时, 则在芯与包层界面上的全内反射条件崩溃。这时, 入射光不能再维持导波传送。使得 $\theta = \theta_c$ 的临界入射角 δ_{\max} 称最大受光角。由图 1-2 可知, 空气中的 δ_{\max} 满足以下关系式:

$$\sin \delta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1.5)$$

这里的 $\sin \delta_{\max}$ 称为数值孔径, 记作 N.A., 是反映光纤波导特性的重要参数。

对于发光管等空间非相干的足够小的光源, 由关系式:

$$P/P_0 = \sin^2 \delta$$

可知, 光耦合效率就等于 $(N.A.)^2$ 。在这类应用中采用数值孔径大的光纤是有益的。

普遍情况下, 考虑光从折射率为 n_0 的介质入射进光纤中, 则数值孔径的表达式应为:

$$N.A. = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0} = \frac{n_1}{n_0} \sqrt{2\Delta} \quad (1.6)$$

任意两条入射角不同的子午光线, 在阶跃光纤内传播的路径不同。换言之, 不同的波导模式, 分别对应于不同的入射角 δ 。显然光纤的芯径越大, 可容纳的导波模式便越多。光纤的归一化频率或归一化芯径定义如下:

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda_0} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} = \frac{2\pi a}{\lambda_0} n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1.7)$$

阶跃光纤内可容纳的导波模式数由下式给出:

$$N = \frac{v^2}{2} \quad (1.8)$$

若 $n_1 = 1.5$, $\Delta = 0.5\%$, $2a = 50\mu\text{m}$, 对于 $\lambda_0 = 1\mu\text{m}$ 的光而言有, $\nu = 23.6$, $N = 280$ 。

对于梯度型光纤则有:

$$N = \frac{\nu^2}{4} \quad (1.9)$$

不同的模式, 入射角 θ 不同, 因而各光线的轴向速度, 即各模式的群速度是不同的。对于一定的光纤而言, 信号通过单位长度光纤所需要的时间也就因模式不同而异, 这种现象叫做模式色散。当从光纤的一端入射进一个非常短的光脉冲时, 若将脉冲信号分解为许多个模式传送的话, 在光纤的输出端, 不同模式的到达时间就不同; 因而, 得到的光信号就成了一个时间展宽了的光脉冲。输出光脉冲的展宽幅度, 是由通过一定长度光纤所需时间最短的光线 ($\delta = 0$ 时) 和最长光线 ($\delta = \delta_{\text{max}}$ 时) 之间的时间差决定的。当 $\delta = 0$ 时, 光线沿光轴传播, 所需时间最短为 t_0 ; 当 $\delta = \delta_{\text{max}}$ 时, 光程最长, 传播时间为 t_m , 由几何关系不难得出 t_0 和 t_m 的关系:

$$t_0 = t_m \cdot \sin\theta_c = t_m \cdot n_2/n_1$$

时间差 τ 为:

$$\tau = t_m - t_0 = \left[-\frac{1}{\sin\theta_c} - 1 \right] t_0 \approx t_0 \Delta \quad (1.10)$$

例如: 当 $n_1 = 1.5$, $\Delta = 0.5\%$, 光纤长度为 $L = 1\text{Km}$ 时, 得 $t_c = 5\mu\text{s}$, $\tau = 25\text{ns}$, 换言之, 此阶跃光纤在多模状态下传送光脉冲时, 每公里的脉冲展宽幅度为 25ns , 可见阶跃光纤的色散非常大, 所以传送容量相当小。但因 τ 和 Δ 成正比, 在介电体的波导上被复包层的话, 通过减小 Δ 的值可以使模式色散下降。

为理解梯度光纤中的光线路径需要相当复杂的计算, 可参考文献[2]。这里引用其重要的结果。设梯度光纤的折射率分布是

轴对称的二次方分布形式:

$$n(r) = \begin{cases} n_1(1-g^2r^2)^{1/2} & (r < a) \\ n_2 & (r \geq a) \end{cases} \quad (1.11)$$

在子午面内, 光线以正弦波的形式蛇行, (参见图 1-3(a))。在 $z=0$ 处, 与光轴夹角为 φ 的光线路径可用下式表示:

$$\left. \begin{aligned} r &= A \cdot \sin(2\pi z/L_P) \\ A &= \sin\varphi/g \\ L_P &= 2\pi\cos\varphi/g \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

式中: A 、 L_P 分别是蛇行幅度和步距(Pitch)。

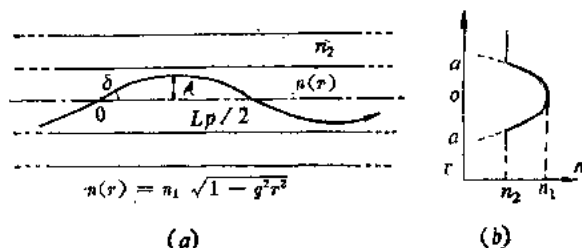


图1-3 梯度型光纤内的

(a)光线路径 (b)折射率分布

实际光纤的折射率分布如图 1-3(b) 所示, 根据式 (1.11) 则有:

$$n_2 = n(a) = n_1\sqrt{1-g^2a^2} \quad (1.13)$$

常数 g 为:

$$g = \sqrt{2\Delta/a} \quad (1.14)$$

将(1.12), (1.13)代入(1.11)可得:

$$n(r) = n_1[1 - 2\Delta(r/a)^2]^{1/2} \approx n_1[1 - \Delta(r/a)^2] \quad (1.15)$$

显然, 由于沿轴线方向行进的光线与蛇行光线长度不等, 同样也

会产生模式间的色散。但是，在梯度光纤中，随着位移偏离轴心，相应点的折射率也变小，从而光速增大。在蛇行的偏离度最大的部位 M 点， $r = A = \sin\varphi/g_0$ 。代入(1.11)式得

$$n(A) = n_1 \cos\varphi \quad (1.16)$$

此处的光速 $V_A = C_0/n(A)$ ，是轴芯部位光速 $V_0 = C_0/n_1$ 的 $(1/\cos\varphi)$ 倍，从而使得蛇行时间比想象的要短得多，计算得到的蛇行光线通过单位长度光纤所用的时间为：

$$t = \frac{n_1}{2C_0} \left(\cos\varphi + \frac{1}{\cos\varphi} \right) \quad (1.17)$$

随着光线倾角 φ 的增大，蛇行的幅度随之增大，当 r 接近光纤的芯半径 a 时，导波条件将无法保证，因此，以 $A = a$ 为限，此时相应的 φ 及 t 分别以 φ_m 和 t_m 表示。这时式(1.12)所示的边界条件变为： $n_2 = n_1 \cos\varphi_m$ ，比折射率差为

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 1 - \cos\varphi_m \quad (1.18)$$

式(1.17)与(1.18)联立求得：

$$t_m = \frac{n_1}{2C_0} \left[(1 - \Delta) + \frac{1}{1 - \Delta} \right] \approx \frac{n_1}{c} \left(1 + \frac{\Delta^2}{2} \right)$$

而沿轴向直线传播的光通过单位长度光纤需要的时间为： $t_0 = n_1/C_0$ 。二者之差为 τ ，则

$$\tau = t_m - t_0 = \frac{t_0 \Delta^2}{2} \quad (1.19)$$

比较(1.7)式，在阶跃光纤的场合， $\tau \propto \Delta$ ，而梯度光纤的 $\tau \propto \Delta^2$ ；由于 $\Delta \ll 1$ ，所以，采用梯度型折射率分布光纤可以显著减少模式色散。例如：当 $n_1 = 1.5$ ， $\Delta = 0.5\%$ ，光纤长 $L = 1\text{km}$ 时， $t_0 = 5\mu\text{s}$ ，阶跃光纤的 τ 值为 25ns ；而梯度光纤的 τ 值只有 63ps ，差三个