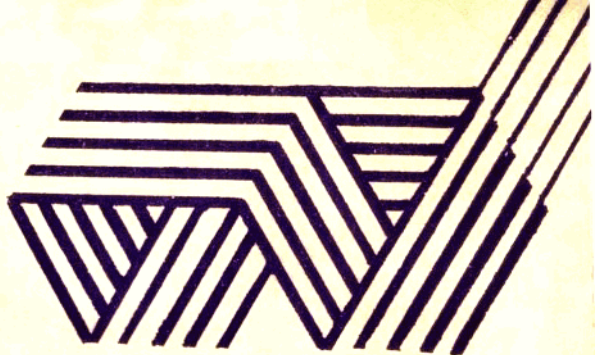


王学仁 编



光纤传感器



GUANG
XIAN
ZHUAN
GAN
QI

华中理工大学出版社

光纤传感器

王学仁 编

周九林 审

华中理工大学出版社

内 容 简 介

本书内容分为两大部分：第一章至第四章是第一部分，第五章至第十二章是第二部分。第一部分比较系统地介绍了光纤传感器的基础理论及通用技术，其中包括简要的光纤波导理论，单模光纤的偏振光学，光纤的耦合与连接，光纤干涉仪及其探测系统。第二部分介绍检测应变、压力、温度、声音、加速度、流量、磁场和电流的光纤传感器，比较详细地讲述了这些传感器的原理、结构及典型的测量结果。

本书可供应用物理、光学工程、仪器仪表、检测和自控等专业的高年级学生、研究生学习和参考，也可供从事传感器设计、研制及应用的工程技术人员学习和参考。

光 纤 传 感 器

王学仁 编

周九林 审

责任编辑 常江南

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

武汉大学出版社印刷总厂印刷

*

开本：850×1168 1/32 印张：15.5 字数：376 000

1989年9月第1版 1989年9月第1次印刷

印数：1-1 000

ISBN 7-5609-0377-0/TP·32

定价：3.06元

前 言

光纤传感器是70年代迅猛发展起来的新型传感器。由于光纤具有可挠曲、不受电磁干扰、超高绝缘、耐腐蚀、适于远距离遥测、灵敏度高等优点，故光纤传感器能够完成其它类型传感器难以胜任的工作，并且可以达到很高的检测精度。此外，光纤传感器可检测的物理量很广，因而它在各种技术领域中开始获得普遍应用。

从第一批光纤传感器问世以来，光纤传感器的开发、应用取得了巨大进展。在期刊上发表的有关论文资料非常丰富。到目前为止，国内外出版了几本光纤传感器方面的专著，内容各有侧重。有的书从纤维光学的角度出发，对光纤传感器进行分类，概括每种光纤传感器的工作原理。有的书从应用的角度出发，对光纤传感器进行分类，简要描述各种光纤传感器的原理、结构及其应用。本书首先以较长篇幅阐述光纤传感器的基础理论和通用技术问题，然后按照被检测的不同物理量，选择若干种有代表性的光纤传感器，详细介绍其工作原理、结构特点。

本书共分十二章。第一章扼要地阐述光纤分类、制备方法及光纤波导理论。第二章较系统地讨论单模光纤的偏振光学，其中包括单模光纤双折射的测量与分析，高、低双折射光纤的形成机理，单模光纤偏振器件等内容。这一章是偏振型光纤传感器的重要基础。第三章较详细地介绍光纤的耦合、连接的理论及器件。第四章全面地讲解光纤干涉仪及其探测系统。这一章是干涉仪型光纤传感器的重要基础。第五章至第十二章分别介绍检测应变、压力、温度、声音、加速度、流量、磁场和电流的光纤传感器。其中第七章光纤温度传感器和第八章光纤声传感器的内容相当丰

富。在光纤传感器中，除了最基本的干涉仪型、偏振型之外，还有利用别的物理效应的其它类型。

书末附有数量较多的参考文献，便于读者对某些专题深入探讨。

成都电讯工程学院的孙守瑶副教授审阅了部分书稿，特此致谢。

在本书的编写、出版过程中，得到了哈尔滨科技大学、华中理工大学出版社的各级领导的支持和鼓励，在此一并致以谢意。

由于编者水平有限，书中错误和不当之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

编、审者 谨识

1988年3月

目 录

第一章 光纤概论	(1)
§ 1-1 引言.....	(1)
§ 1-2 光纤的结构、分类与制备方法.....	(1)
§ 1-3 子午光线的传播.....	(7)
1-3-1 子午光线在折射率阶跃型光纤中的传播.....	(7)
1-3-2 子午光线在折射率渐变型光纤中的传播.....	(9)
§ 1-4 平板波导的电磁场分析.....	(11)
1-4-1 对称平板介质波导的模式.....	(11)
1-4-2 截止特性、传播常数和场形状.....	(14)
§ 1-5 折射率阶跃型光纤的电磁场分析.....	(16)
§ 1-6 光纤的色散与损耗.....	(20)
第二章 单模光纤的偏振光学	(24)
§ 2-1 引言.....	(24)
§ 2-2 偏振光的表示方法.....	(26)
2-2-1 椭圆偏振、线偏振和圆偏振.....	(28)
2-2-2 琼斯矢量表示法.....	(27)
2-2-3 偏振器件的矩阵表示法.....	(29)
2-2-4 偏振光的圆复平面表示法.....	(31)
2-2-5 偏振光的庞加莱球表示法.....	(32)
§ 2-3 单模光纤双折射的测量.....	(34)
2-3-1 偏振棱镜、波片和补偿器.....	(34)
2-3-2 光纤本征双折射及法拉第效应的测量.....	(38)
2-3-3 光纤的弹光偏振测量.....	(45)
2-3-4 光纤的双折射与拍长.....	(48)
2-3-5 光纤双折射的反向散射测量.....	(50)
2-3-6 液体芯光纤的偏振测量.....	(52)

§ 2-4 单模光纤双折射的理论分析	(53)
2-4-1 微扰耦合理论	(53)
2-4-2 弹光效应	(57)
2-4-3 扭转诱导的双折射	(59)
2-4-4 光纤芯椭圆度造成的双折射	(61)
2-4-5 电光效应	(62)
2-4-6 电磁场引起的双折射	(63)
2-4-7 弯曲诱导的双折射	(64)
2-4-8 拉伸与弯曲组合诱导的双折射	(67)
2-4-9 光纤本征双折射与扭转效应的组合	(69)
2-4-10 自旋光纤的双折射	(72)
§ 2-5 不同类型的双折射光纤	(73)
2-5-1 传感器对光纤双折射的要求	(73)
2-5-2 扰动与随机偏振耦合	(74)
2-5-3 普通低双折射光纤	(77)
2-5-4 自旋光纤	(79)
2-5-5 形状型高双折射光纤	(81)
2-5-6 应变型高双折射光纤	(82)
2-5-7 蝴蝶结式高双折射光纤	(83)
§ 2-6 单模光纤偏振器件及偏振态的演变	(86)
2-6-1 光纤起偏器	(86)
2-6-2 光纤补偿器	(89)
2-6-3 偏振态演变的分析	(91)
2-6-4 偏振态演变的实验	(95)
第三章 光纤的耦合与连接	(99)
§ 3-1 引言	(99)
§ 3-2 光源与光纤的耦合	(101)
3-2-1 直接耦合	(101)
3-2-2 匹配措施	(102)
§ 3-3 光纤全息耦合	(103)
§ 3-4 光功率分配器概述	(105)

§ 3-5 定向耦合器的制作技术	(107)
3-5-1 研磨法	(107)
3-5-2 侵蚀法	(109)
3-5-3 硅胶玻璃的应用	(111)
§ 3-6 定向耦合器的理论	(112)
3-6-1 可调弯曲式光纤耦合器的理论	(112)
3-6-2 瓶式光纤耦合器的理论	(117)
§ 3-7 定向耦合器的测试	(120)
3-7-1 三端口弯曲式光纤耦合器的测试	(120)
3-7-2 四端口弯曲式光纤耦合器的测试	(122)
3-7-3 瓶式光纤耦合器的测试	(125)
§ 3-8 对接光纤的耦合	(129)
§ 3-9 光纤间的永久性连接	(133)
§ 3-10 光纤连接器	(134)
3-10-1 球透镜耦合式多模光纤连接器	(134)
3-10-2 偏心衬套式单模光纤连接器	(136)
3-10-3 精密小孔定心式单模光纤连接器	(137)
§ 3-11 扩束连接器的光线追迹理论	(138)
第四章 光纤干涉仪及其探测系统	(142)
§ 4-1 引言	(142)
§ 4-2 光纤干涉仪	(145)
4-2-1 干涉仪概述	(148)
4-2-2 周期性、动态范围和线性输出	(146)
4-2-3 迈克尔孙干涉仪和马赫-泽德干涉仪	(147)
4-2-4 法布里-珀罗干涉仪	(148)
§ 4-3 探测系统	(149)
4-3-1 概述	(149)
4-3-2 无源零差	(151)
4-3-3 有源零差	(153)
4-3-4 光源波长调谐	(156)
4-3-5 外差	(157)

4-3-6 似外差.....	(160)
§ 4-4 利用位相产生载波的零差技术.....	(162)
§ 4-5 单边带零差探测.....	(169)
§ 4-6 干涉仪型光纤传感器的偏振衰变.....	(177)
第五章 光纤应变传感器.....	(181)
§ 5-1 引言.....	(181)
§ 5-2 干涉仪型光纤应变传感器.....	(182)
§ 5-3 干涉仪型光纤应变测量的进展.....	(186)
§ 5-4 偏振型光纤应变传感器.....	(188)
§ 5-5 微弯型光纤应变传感器.....	(192)
第六章 光纤压力传感器.....	(198)
§ 6-1 引言.....	(198)
§ 6-2 干涉仪型光纤压力传感器.....	(199)
§ 6-3 偏振型光纤压力传感器.....	(202)
6-3-1 单色弹光压力传感器.....	(202)
6-3-2 特征波长弹光压力传感器.....	(205)
6-3-3 利用低双折射光纤的弹光压力传感器.....	(209)
§ 6-4 膜片弯曲型光纤压力传感器.....	(214)
§ 6-5 频率编码型光纤压力传感器.....	(218)
第七章 光纤温度传感器.....	(223)
§ 7-1 引言.....	(223)
§ 7-2 干涉仪型光纤温度传感器.....	(225)
7-2-1 马赫-泽德干涉仪温度传感器.....	(225)
7-2-2 迈克尔孙干涉仪温度传感器.....	(227)
§ 7-3 偏振型光纤温度传感器.....	(230)
7-3-1 双折射光纤温度传感器.....	(230)
7-3-2 利用石英晶体旋光性的温度传感器.....	(234)
7-3-3 利用LiNbO ₃ 双折射的温度传感器.....	(238)
§ 7-4 材料吸收型光纤温度传感器.....	(241)
7-4-1 单耦合器式半导体吸收型测温器.....	(241)

7-4-2	双耦合器式半导体吸收型测温器	(244)
7-4-3	分布式红宝石吸收型测温器	(247)
7-4-4	稀土材料的吸收与温度的关系	(250)
7-4-5	回流环式稀土材料吸收型测温器	(252)
7-4-6	双光源式稀土材料吸收型测温器	(255)
§ 7-5	红外荧光衰变型光纤温度传感器	(258)
§ 7-6	串音型光纤温度传感器	(261)
§ 7-7	热辐射型光纤温度传感器	(277)
§ 7-8	包、敷层损耗型光纤温度传感器	(285)
§ 7-9	液体包层型光纤温度传感器	(292)
第八章	光纤声传感器	(295)
§ 8-1	引言	(295)
§ 8-2	干涉仪型光纤声传感器	(297)
8-2-1	裸光纤干涉仪的灵敏度	(297)
8-2-2	有敷层的光纤干涉仪的灵敏度	(302)
8-2-3	光纤敷层的优化	(319)
8-2-4	激光器调谐的信号稳定技术	(325)
8-2-5	有不同延迟的外差探测	(328)
8-2-6	光纤水听器阵列	(331)
§ 8-3	偏振型光纤声传感器	(332)
8-3-1	模-模干涉的光纤声传感器	(332)
8-3-2	卷绕的单光纤声传感器	(336)
8-3-3	聚束声传感器	(340)
8-3-4	光纤超声传感器	(344)
8-3-5	光纤应变类型与灵敏度的关系	(349)
8-3-6	双腔式光纤声传感器	(351)
§ 8-4	微弯型光纤声传感器	(355)
8-4-1	膜片式微弯型光纤声传感器	(355)
8-4-2	橡胶套式微弯型光纤声传感器	(356)
§ 8-5	受抑全内反射型光纤声传感器	(361)

§ 8-6 纹影型光纤声传感器	(367)
第九章 光纤加速度计	(373)
§ 9-1 引言	(373)
§ 9-2 干涉仪型光纤加速度计	(374)
9-2-1 直接转换式光纤加速度计	(374)
9-2-2 间接转换式光纤加速度计	(376)
§ 9-3 偏振型光纤加速度计	(380)
§ 9-4 间隙耦合型光纤加速度计	(386)
第十章 光纤流量计	(391)
§ 10-1 引言	(391)
§ 10-2 光纤平行于液流方向的流量计	(392)
§ 10-3 旋涡分离式光纤流量计	(393)
10-3-1 流体力学原理	(393)
10-3-2 多模光纤流量计	(396)
10-3-3 单模光纤法布里-珀罗干涉仪流量计	(398)
10-3-4 全光纤迈克尔孙干涉仪流量计	(400)
10-3-5 改进的光纤流量计	(403)
第十一章 光纤磁场传感器	(407)
§ 11-1 引言	(407)
§ 11-2 干涉仪型光纤磁场传感器	(408)
11-2-1 灵敏度的理论分析	(408)
11-2-2 灵敏度的测量	(414)
11-2-3 金属玻璃的应用	(418)
11-2-4 直流磁场的探测	(423)
11-2-5 低频交流磁场的探测	(425)
11-2-6 闭环系统	(427)
§ 11-3 偏振型光纤磁场传感器	(431)
11-3-1 磁致伸缩光纤线圈架的应用	(431)
11-3-2 光时域反射术的应用	(436)
11-3-3 特种光纤线圈的应用	(438)

11-3-4 上升时间超短的极强磁场的探测.....	(441)
第十二章 光纤电流传感器.....	(444)
§ 12-1 引言.....	(444)
§ 12-2 干涉仪型光纤电流传感器.....	(445)
§ 12-3 磁光式光纤电流变换器.....	(447)
12-3-1 原理.....	(447)
12-3-2 元件.....	(453)
12-3-3 测量.....	(457)
§ 12-4 利用法拉第材料的光纤电流传感器.....	(462)
参考文献.....	(468)

第一章 光纤概论

§1-1 引言

随着激光通信的发展，光纤波导迅速地发展起来。1970年，美国科宁玻璃公司首先制成世界上第一根低损耗光纤（20分贝·公里⁻¹）。1972年，美国贝尔实验室开发了制作低损耗光纤的新工艺——化学气相沉积（CVD）法。从此，开始了低损耗光纤波导研究的新阶段。

随着光纤的广泛应用，对光纤提出许多特殊要求，因而就出现了许多不同类型和不同性能的光纤。按材料分，有玻璃光纤、塑料光纤和液体芯光纤三种；按折射率分布形式分，有折射率阶跃分布和渐变分布两种光纤；按使用波段分，有可见光、红外和紫外三种波段光纤；按传输模的数目分，有单模和多模两种光纤。此外，还有激活光纤、发光光纤和耐辐照光纤等。

本章作为光纤概论，其主要内容为，介绍一般玻璃光纤的结构、分类与制备方法；利用几何光学的方法，分析子午光线在折射率阶跃分布和渐变分布两种光纤中的传播；应用电磁场理论，对平板和圆柱形两种波导进行分析；简述光纤的色散与损耗。

应当指出，光纤波导理论的内容是非常丰富的，这里只能涉及一小部分。掌握这部分内容将为学习传感器原理打下基础。

§1-2 光纤的结构、分类与制备方法

1. 光纤的结构

一般来说，光纤由三部分组成（图1-1），中心部分是芯，

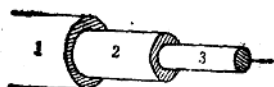


图 1-1 光纤的结构

1——敷层, 2——包层, 3——芯

包围着芯的中间层是包层, 起保护作用或其它特殊作用的外层是敷层。对于某些光纤传感器, 其敷层具有特殊功能, 有关这方面的情况后面将结合具体的光纤传感器, 给予详细的说明。在本章讨论光纤的传光和波导特性时, 暂不考虑敷层, 即设想为裸光纤。

2. 光纤的分类

如图1-2所示, n_1 和 n_2 代表光纤的芯和包层的折射率, $n_2 < n_1$; n_0 代表真空或空气的折射率。按照折射率分布形式和传播模式的特点, 光纤可分为三类。

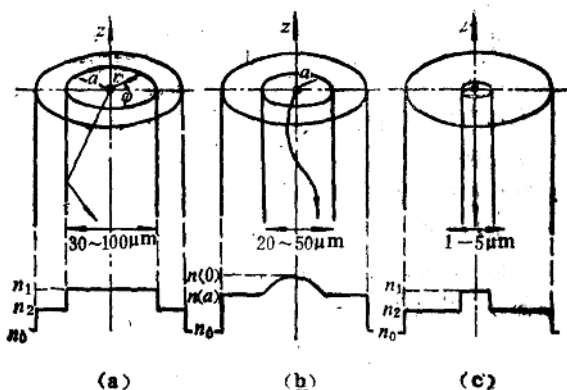


图 1-2 三类光纤的折射率分布、芯直径尺寸
以及其中的传播光线

(1) 折射率阶跃型多模光纤, 如图1-2(a)所示。这种光纤的芯与包层的相对折射率差为

$$\Delta_1 = (n_1 - n_2) / n_1. \quad (1-1)$$

(2) 折射率渐变型多模光纤, 如图1-2(b)所示。这种光纤芯的折射率不是均匀的, 而是从轴线向四周逐渐减小。折射率的分布如下^[1.1]:

$$\left. \begin{aligned} n_1(r) &= n(0) \left[1 - \Delta_2 \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right], & r < a; \\ n_2(r) &= n(a), & r \geq a; \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中, a 为光纤芯的半径, $n(0)$, $n(r)$ 和 $n(a)$ 分别为轴线上、距轴线 r 处和包层的折射率; 而

$$\Delta_2 = \frac{n^2(0) - n^2(a)}{2n^2(0)} \approx \frac{n(0) - n(a)}{n(0)} \quad (1-3)$$

为折射率渐变型光纤的相对折射率差; α 为正数, 称为渐变折射率的分布指数, 当 $\alpha \rightarrow \infty$ 时, 就是阶跃型折射率分布, 当 $\alpha = 2$ 时, 称为抛物线型折射率分布。

(3) 折射率阶跃型单模光纤, 如图1-2(c)所示。这种光纤芯的直径 (或者相对折射率差 Δ_1) 如此之小, 以致于仅有轴向光线、单个模 (HE_{11}) 可以在光纤中传播。

图1-2中在光纤芯内带箭头的折线、曲线和直线表示光线。有关光线在光纤中传播的分析见 § 1-3, 有关折射率阶跃型光纤的电磁场分析见 § 1-5。

3. 光纤的制备方法

在介绍光纤的制备方法之前, 首先引入两个重要概念:

一个概念是光纤的数值孔径 N.A., 定义为

$$N.A. = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}. \quad (1-4)$$

1-3-1节将给出数值孔径的物理意义。

另一个概念是光纤的传输损耗 $\alpha_1(\lambda)$, 它是光波长的函数, 定义为

$$\alpha_1(\lambda) = (10/L) \lg(W_1/W_2), \quad (1-5)$$

式中, L 是光纤的长度, W_1 和 W_2 分别是输入和输出的光功率, $\alpha_s(\lambda)$ 的单位是分贝·公里⁻¹。

下面在描述以不同方法制备光纤所采用的技术指标时, 经常要用到这两个概念。

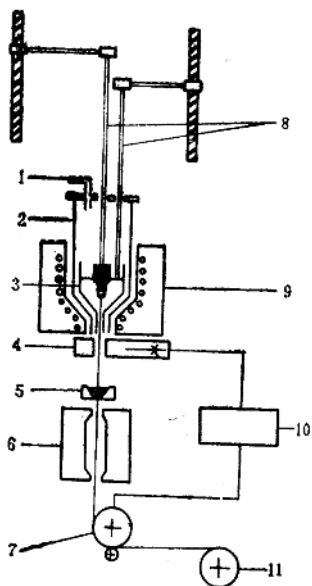
制备光纤的方法^[1,2]比较多, 这里只列举其中的几种。

(1) 棒管法 这或许是最早出现、而又最简单的拉制光纤的方法。把具有芯成分的棒放入具有包层成分的管中, 利用加热炉拉制成适当尺寸的光纤。为了得到良好的芯-包层界面, 玻璃棒的直径和管的内径要配合得好, 而且棒的外表面、管的内表面一定要抛光和清洗干净。这种方法的优点在于以很低的成本得到高数值孔径的光纤。这种方法的缺点是, 气泡和污物可能进入芯和包层的分界面, 引起附加损耗。利用这种方法制作的光纤, 对波长为0.85微米的光的损耗为400分贝·公里⁻¹, 数值孔径可达0.6。

(2) 双坩埚法 为了把玻璃熔制和拉丝工艺统一起来, 简化工艺流程, 使生产连续进行, 提出了一种制作光纤的新工艺——双坩埚法, 如图1-3所示。由电炉丝将分别放在内、外坩埚中的芯玻璃和包层玻璃加热到适当的温度, 其熔液通过坩埚嘴流出。只要严格控制内外坩埚嘴之间的距离、嘴的截面积、拉丝速度, 就可得到一定直径和包层厚度的光纤。这样制成的光纤对波长为0.85微米的光的损耗低于5分贝·公里⁻¹, 这种方法的缺点是, 要求有净化设施, 并且只能使用二氧化硅含量低的玻璃。

(3) 激光加热法 用二氧化硅含量低的玻璃制作光纤时, 由于这些玻璃的软化温度较低, 故使用普通加热炉就可以了。而拉制二氧化硅或二氧化硅含量高的玻璃光纤, 则需要2000℃以上的高温热源。一般来说, 250瓦的CO₂激光器可用于拉制这种光纤。利用激光加热法制作的光纤, 对波长为0.82微米的光的损耗约为10分贝·公里⁻¹, 数值孔径可达0.35。

(4) 火焰水解法 利用这种方法可制作损耗低(对波长为



0.82微米的光的损耗不超过约2分贝·公里⁻¹)、数值孔径适宜的光纤。化学纯的四氯化硅、四氯化锗、三氯化硼和磷酰氯,通过往复运动的喷嘴,在高温下水解,生成高纯度氧化物的混合物。化学反应方程如下:

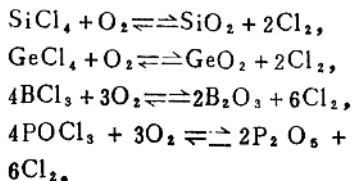


图 1-3 制作光纤的双坩埚法

- 1——净化气, 2——室, 3——双坩埚, 4——光纤直径测量仪,
5——涂敷器, 6——敷层热化装置, 7——导轮, 8——棒料,
9——加热炉, 10——光纤直径控制单元, 11——光纤卷筒

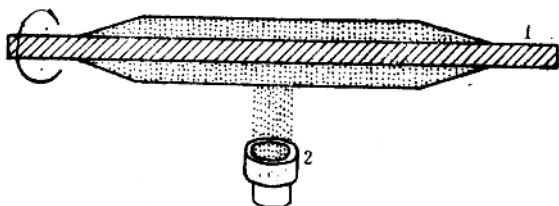


图 1-4 火焰水解法的氧化物沉积过程

- 1——母棒, 2——喷嘴