



王玉田 等编著

光电子学与 光纤传感器技术

GUANGDIANZIXUE
YU GUANGXIAN
CHUANGANQIJISHU



01
5

国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

光电子学与光纤传感器技术

王玉田 郑龙江 侯培国 胡春海 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

光电子学与光纤传感器技术/王玉田等编著. —北京:
国防工业出版社, 2003. 10
ISBN 7-118-03219-0

I. 光... II. 王... III. ①光电子学②光纤器件—
光电传感器 IV. ①TN201②TP212.14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 064469 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 8 $\frac{1}{2}$ 209 千字

2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月北京第 1 次印刷

印数: 1—5000 册 定价: 12.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

前 言

光纤是 20 世纪后半叶的重要发明之一,它与激光器、半导体探测器等一起构成了新的光学技术,即光电子学新领域。随着现代物理光学的最新成果的取得和材料科学以及加工技术的进步,使自 20 世纪 70 年代兴起的光纤传感理论与技术得到了进一步的发展,光纤传感技术为研究、开发高精度、高效率的自动化测试仪器和系统开辟了一条新的途径。

以麦克斯韦电磁场理论为基础的光波导技术的成熟为光纤技术的应用奠定了深厚的理论基础,使人们不但掌握了各向同性光导材料的特点,而且深刻地认识了各向异性光学介质的特性,这使光纤技术应用的范围和程度得到了拓宽和深化。光纤传感与测量技术已成为迅速发展的高新技术。

本书是在作者结合多年科研经验,参考了大量国内外相关文献的基础上编著而成的。全书共 7 章。第 1 章以光纤的基本特性为主线,从理论上较详尽地对光纤的结构特性、光学特性和传输特性进行了阐述。第 2 章和第 3 章对工程上常用的光源和光探测器进行了介绍,对光纤传感器使用的普通光源、气体放电光源、脉冲氙灯、半导体光源、激光光源的基本特性进行了论述;对光探测器,如热电探测器、光电子发射探测器、光电导探测器、光电二极管等的材料、机理及其光谱特性进行了论述。第 4 章至第 7 章对光纤温度传感器、光电混合式光纤传感器、光纤荧光传感器和光纤气体传感器进行了具体研究与分析。由于这类传感器是作者的科研成果的总结,在理论与应用方面论述得较具体,一些特殊的研究方法和数学模型是第 1 次出现在读者面前,故本书具有一定的科学研究参考价值。

IV

由于作者旨在突出应用性,因此没有用更大的篇幅去阐述几何光学和波动光学的基本原理,但这并不影响本书的理论性与特色,读者可以通过相关的参考书得以补充。光纤传感技术是一个内涵极其丰富的研究领域,涉及面十分广泛,尽管作者在取材和立意上做了许多工作,但是也难免出现不妥和错误之处,敬请读者不吝赐教。

本书由王玉田主编。第1章由郑龙江编写,第2章由侯培国编写,第3章至第5章由王玉田编写,第6章由郑龙江、胡春海编写,第7章由王书涛编写。

本书由李志全教授主审。张淑清教授、洪文学教授、王珏教授、张颖教授、郭增军高级工程师对本书给予了热情支持和帮助。在此对他们致以最诚挚的谢意。

内 容 简 介

本书是论述光纤传感器中使用的光纤、光源、光探测器以及光纤传感器系统原理、特点的著作。主要包括:传感光纤的结构特性、光学特性和传输特性;光纤传感器使用的光源,诸如气体放电光源、脉冲氙灯、半导体光源、激光光源的基本特性;阐述热电探测器、光电子发射探测器、光电导探测器、光电二极管等的光电机理及其光谱特性。本书从应用的角度,论述了分布式光纤温度传感器、辐射式光纤温度传感器、荧光光纤温度传感器和光电混合式光纤传感器的原理、特点以及一般设计方法。本书还用一定篇幅阐述了荧光光纤传感机理、荧光光纤传感器在海洋环境监测中的应用和吸收型光纤气体传感器的原理与设计。

本书可供光学、精密仪器、光电工程等学科的教师及研究生阅读,也可供相关工程技术领域的研究人员参考。

目 录

第 1 章 光纤的基本特性	1
1.1 引言	1
1.2 光纤的结构与分类	1
1.2.1 光纤的结构	1
1.2.2 光纤的分类	2
1.3 光纤的导光原理	4
1.3.1 光在介质分界面上的全反射	5
1.3.2 光线在光纤中的传播	5
1.3.3 光波在光纤中的传播	11
1.4 光纤的损耗特性	15
1.4.1 光纤的损耗系数	16
1.4.2 吸收损耗	16
1.4.3 散射损耗	18
1.4.4 辐射损耗	20
1.5 光纤的色散特性	21
1.5.1 时延差和色散系数	21
1.5.2 材料色散	23
1.5.3 波导色散	24
1.5.4 模间色散	25
1.5.5 光纤的传输带宽	27
1.6 光纤的偏振与双折射	29
1.6.1 单模光纤的理想偏振特性与双折射效应	29
1.6.2 保偏光纤	30
1.6.3 纯单模光纤	31
1.7 光纤的非线性	32

1.7.1	非线性折射	34
1.7.2	受激非弹性散射	35
1.7.3	参量过程与四波混频	38
1.7.4	光孤子	39
第2章	光源	42
2.1	引言	42
2.2	辐射光源基础	42
2.3	光源的相干性	44
2.3.1	时间相干性	45
2.3.2	空间相干性	46
2.4	非相干光源	48
2.4.1	热光源	48
2.4.2	气体放电光源	49
2.4.3	固态非相干光源——发光二极管	51
2.5	相干光源	56
2.5.1	激光器的工作原理	56
2.5.2	激光的模式	59
2.5.3	应用于光学传感领域的激光光源	61
第3章	光探测器和接收器	71
3.1	引言	71
3.2	热电探测器	73
3.2.1	辐射热电偶与热电堆	74
3.2.2	热敏电阻	74
3.2.3	气动式热探测器	75
3.2.4	热释电探测器	76
3.3	光电子发射探测器	76
3.3.1	光电子发射效应	76
3.3.2	光电管	77
3.3.3	光电倍增管	78
3.3.4	图像增强器	82
3.4	光电导探测器	83
3.4.1	工作原理和结构	83

3.4.2	基本特性	84
3.4.3	几种光电导材料	85
3.5	光电二极管	85
3.5.1	结型探测器工作原理	85
3.5.2	响应度	86
3.5.3	工作波长	87
3.5.4	工作模式	88
3.5.5	耗尽层宽度和结电容	89
3.5.6	响应时间	90
3.5.7	雪崩倍增效应	91
3.5.8	材料	94
3.5.9	探测器结构	94
3.6	接收器	96
3.6.1	前置放大器的设计	97
3.6.2	场效应晶体管(FET)前置放大器	98
3.7	光电二极管接收器中的噪声	98
3.7.1	噪声源概况	98
3.7.2	暗电流和散粒噪声	99
3.7.3	热噪声和放大器噪声	100
3.7.4	信噪比	100
第4章	光纤温度传感器	103
4.1	引言	103
4.2	分布式光纤温度传感器	104
4.2.1	分布式光纤温度传感器的特点	104
4.2.2	光纤光时域反射(OTDR)原理	105
4.2.3	光纤喇曼背向散射及其温度效应	106
4.2.4	分布式光纤喇曼背向散射光子温度传感器	109
4.2.5	分布式光纤布里渊散射型温度传感器	111
4.3	辐射式光纤温度传感器	116
4.3.1	红外测温的基本原理	116
4.3.2	辐射式光纤温度测量仪的分类	117
4.3.3	亮度测温仪	118

4.3.4	比色测温仪	119
4.3.5	辐射式光纤温度测量仪的构成及其特点	120
4.4	荧光光纤温度传感器	121
4.4.1	荧光光纤测温原理	121
4.4.2	荧光强度型光纤温度传感器	123
4.4.3	荧光强度比型光纤温度传感器	128
4.4.4	荧光寿命型光纤温度传感器	130
4.5	光纤光栅温度传感器	136
4.5.1	引言	136
4.5.2	光纤光栅传感器的原理及其特点	137
4.5.3	光纤光栅传感器的构成	141
第5章	光电混合式光纤传感器	143
5.1	引言	143
5.1.1	传感器的供电	144
5.1.2	传感器的分类	145
5.2	光推动电容式传感器	150
5.2.1	引言	150
5.2.2	光纤传输光推动油罐液位测量系统结构	151
5.2.3	电容式差压敏感元件特性	155
5.3	光推动混合式电流互感器	158
5.3.1	引言	158
5.3.2	光纤式电流互感器的原理	160
5.3.3	V/PWM和PWM/PPM调制	163
5.3.4	PWM/PPM调制	168
第6章	荧光光纤传感器	170
6.1	引言	170
6.2	荧光测量原理	171
6.2.1	荧光概述	171
6.2.2	荧光产生的机理	172
6.2.3	荧光物质的激发光谱和发射光谱	175
6.2.4	荧光寿命和量子产率	177
6.2.5	荧光强度与溶液浓度之间的关系	179

6.2.6	荧光与物质结构的关系	180
6.2.7	环境因素对荧光的影响	181
6.3	海洋环境监测荧光光纤传感器	184
6.3.1	引言	184
6.3.2	测量海藻中叶绿素 a 含量的荧光光纤传感器	187
6.3.3	测量水中石油含量的荧光光纤传感器	199
第 7 章	光纤气体传感器	217
7.1	引言	217
7.2	光纤气体传感器的分类	218
7.2.1	光谱吸收型光纤气体传感器	218
7.2.2	消逝场型光纤气体传感器	219
7.2.3	荧光型光纤气体传感器	220
7.2.4	染料指示剂型光纤气体传感器	221
7.2.5	折射率变化型光纤气体传感器	222
7.2.6	多点复用型光纤气体传感器	223
7.3	吸收型光纤气体传感器的设计与信号处理	224
7.3.1	差分吸收检测	224
7.3.2	谐波检测	229
7.4	吸收型光纤气体传感头(气室)的设计	242
7.5	吸收型光纤气体传感器的应用	243
7.5.1	甲烷和乙炔谐波检测系统	244
7.5.2	甲烷气体差分检测系统	245
参考文献		247

第 1 章 光纤的基本特性

1.1 引 言

光纤(Optic fiber)是光导纤维的简称,是一种重要和常用的光波导材料。它利用光的全反射原理将光波能量约束在其界面内,并引导光波沿着光纤轴线方向传播。光纤的基本特性包括结构特性、光学特性及传输特性。结构特性主要是指光纤的几何尺寸(芯径等);光学特性包括折射率分布、数值孔径等;传输特性主要是指损耗及色散特性。本章介绍光纤的结构和分类,光波在光纤中的传输原理,光纤的损耗特性、色散特性、偏振特性及光纤的非线性效应等内容。

1.2 光纤的结构与分类

1.2.1 光纤的结构

光纤是一种由高度透明的石英(或其他材料)经复杂的工艺拉制而成的光波导材料。光纤的典型结构为多层同轴圆柱体,一般是由折射率较高的纤芯、折射率较低的包层以及涂敷层和护套构成,其剖面结构如图 1.1 所示。纤芯和包层作为光纤结构的主体,对光波的传播起着决定性作用。涂敷层与护套的作用则是隔离杂散光、提高光纤强度、保护光纤等。在某些特殊应用场合不加涂敷层和护套的光纤称为裸光纤。

纤芯的折射率较高,其主要成分为二氧化硅(SiO_2),其中掺杂极少量的其他材料,如二氧化锗(GeO_2)、五氧化二磷(P_2O_5)等,以

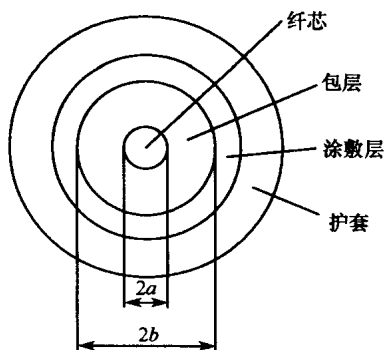


图 1.1 光纤的剖面结构

提高纤芯的折射率。纤芯的直径一般为 $5\mu\text{m}\sim 75\mu\text{m}$, 特殊应用时还可达 $600\mu\text{m}$ 。

包层为紧贴纤芯的材料层, 折射率略小于纤芯材料的折射率。其构成材料一般为纯二氧化硅, 有时也掺杂微量的三氧化二硼 (B_2O_3) 或四氧化二硅 (Si_2O_4), 以降低包层的折射率。包层的外径一般为 $100\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$ 。

涂敷层的材料一般为环氧树脂、硅橡胶等高分子材料, 外径约为 $250\mu\text{m}$, 用于增强光纤的柔韧性、机械强度和耐老化特性。

护套的材料一般为尼龙或其他有机材料, 用于增加光纤的机械强度, 保护光纤。

1.2.2 光纤的分类

光纤的分类有多种方式, 可以按光纤横截面上的折射率分布、光纤的传输总模数、构成光纤的材料成分、光纤的制造方法以及工作波长进行分类。

1) 按光纤横截面上的折射率分布分类

根据光纤横截面上折射率的径向分布, 光纤可以分为均匀光纤(也称为阶跃型光纤或突变型光纤)和非均匀光纤(也称为渐变型光纤或梯度型光纤)2种。

阶跃型光纤在纤芯和包层交界处的折射率呈阶梯型突变, 如

图 1.2(a)所示。纤芯的折射率 n_1 和包层的折射率 n_2 为均匀常数,其折射率分布一般表示为

$$n = \begin{cases} n_1 & r \leq a \\ n_2 & a < r \leq b \end{cases} \quad (1.2.1)$$

式中: r 为光纤的径向坐标; $n_1 > n_2$ 。

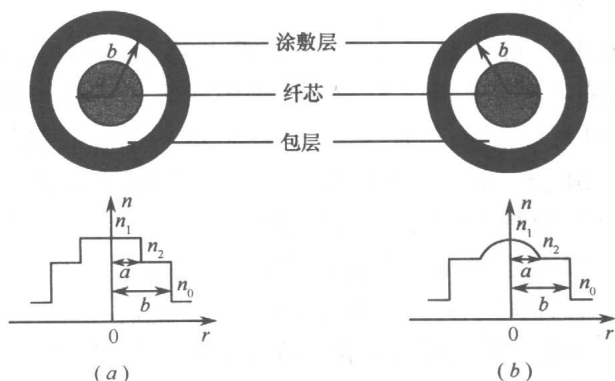


图 1.2 阶跃型光纤与渐变型光纤的横截面和折射率分布

(a)阶跃型光纤; (b)渐变型光纤。

渐变型光纤纤芯的折射率 n_1 随着半径的增加按一定的规律逐渐减少,直到纤芯与包层的交界处为止,如图 1.2(b)所示。包层的折射率 n_2 为均匀常数,而纤芯的折射率 n_1 不是均匀常数。其折射率分布可以表示为

$$n = \begin{cases} n_1 [1 - 2\Delta \cdot f(r/a)]^{1/2} & r \leq a \\ n_2 & a < r \leq b \end{cases} \quad (1.2.2)$$

式中: $f(r/a) \leq f(1) = 1$; $n_1 > n_2$ 。无论阶跃型和渐变型光纤,均定义 Δ 为光纤的相对折射率差,即

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (1.2.3)$$

其大小决定了光纤对光场的约束能力和光纤端面的受光能力。

2) 按光纤的传输总模数分类

光波在光纤中传播时存在模式问题。所谓模式是指传输线横

向截面和纵向截面上的电磁场的分布形式。模式不同,其分布也不同。根据光纤中传输的模式,可分为单模光纤和多模光纤 2 类。

单模光纤理论上只传输一种模式,它的纤芯直径很小,通常在 $4\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ 范围内。由于单模光纤只传输主模,避免了模式色散,使得这种光纤的传输频带很宽,传输容量大,适用于大容量、长距离的光纤通信。

多模光纤可传输多种模式,其纤芯直径较粗,典型尺寸为 $50\mu\text{m}$ 左右。多模光纤又分为多模均匀光纤和多模非均匀光纤。多模均匀光纤的纤芯直径一般为 $50\mu\text{m}\sim 75\mu\text{m}$,包层直径为 $100\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$,由于其纤芯直径较大,传输模式较多,这种光纤的传输性能较差,带宽比较窄,传输容量小。多模非均匀光纤的纤芯直径一般也是 $50\mu\text{m}\sim 75\mu\text{m}$,但由于纤芯中折射率随半径的增加而减小,因而可获得比较小的模式色散。这种光纤频带较宽,容量较大。一般多模光纤指的就是这种多模非均匀光纤。

3) 按构成光纤的材料成分分类

按构成光纤的材料成分分类,光纤可分为石英光纤、塑料包层石英纤芯、多组分玻璃纤维、全塑光纤等。

4) 按光纤的制造方法分类

光纤的制造方法包括改进的化学汽相沉积法(MCVD)、等离子体激活化学汽相沉积法(PCVD)、管外化学汽相沉积法、多组分玻璃制造法等。

5) 按工作波长分类

按工作波长分类可分为短波长光纤和长波长光纤 2 种。

1.3 光纤的导光原理

分析光纤的导光原理主要有 2 种方法:一种是射线法;另一种是波动理论法。射线法是将光波看成是一条几何射线,用光射线理论分析光纤传输特性的方法,该方法的优点是比较直观。波动理论法是将光波按电磁场理论,用麦克斯韦方程去求解,根据解析

式分析光纤传输特性的方法。

1.3.1 光在介质分界面上的全反射

当光线从折射率为 n_1 的介质入射到折射率为 n_2 的介质的分界面上时($n_1 > n_2$),将产生反射和折射现象,如图 1.3 所示。

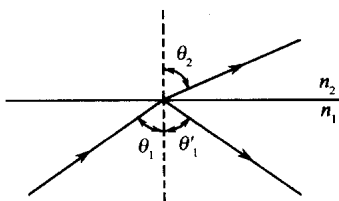


图 1.3 光在介质分界面上的反射与折射

根据斯涅耳(Snell)定律,光线的入射角 θ_1 、反射角 θ'_1 和折射角 θ_2 之间满足下面的关系式,即

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta'_1 \\ n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \end{cases} \quad (1.3.1)$$

由于 $n_1 > n_2$,因此折射角 θ_2 大于入射角 θ_1 。当入射角增大到 $\theta_1 = \theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$ 时, $\theta_2 = 90^\circ$,此时不再有光线进入介质 n_2 ,所有的光能量将全部发生反射。这种现象称为光的全反射, θ_c 称为全反射的临界角。事实上,由于光的波动性,即使是在全反射的情况下,光波也会进入介质 n_2 表面一定的深度,称为穿透深度,其大小取决于 2 种介质的折射率、入射角以及入射光的偏振态和频率。

1.3.2 光线在光纤中的传播

根据射线光学理论研究光纤中的光射线,可以直观地了解光在光纤中的传播机理。本节采用射线光学理论对均匀光纤和非均匀光纤的传输特性进行简单的分析。

1.3.2.1 光线在均匀光纤中的传播

所谓均匀光纤,是指纤芯中的折射率分布是均匀的、不随半径

变化的光纤。在光纤中存在 2 种不同形式的光射线,即子午光线和斜射光线。

1) 子午光线

如图 1.4 所示,通过纤芯的轴线 OO' 可以做很多个平面,这些平面称为子午面。子午面上与轴线相交的光射线,称为子午光线,简称子午线。从图中可以看出,子午线在纤芯与包层的交界面上来回全反射而形成锯齿形波,被限制在光纤纤芯中,它是一条与光纤轴线相交的平面折线,在端面上的投影为一条直线。

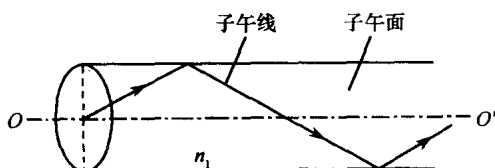


图 1.4 光纤中的子午线与子午面

子午光线在阶跃型光纤中的传输如图 1.5 所示。当光线射入纤芯后,在纤芯与包层界面处满足全反射条件的光线,就能在纤芯内来回反射向前传播。

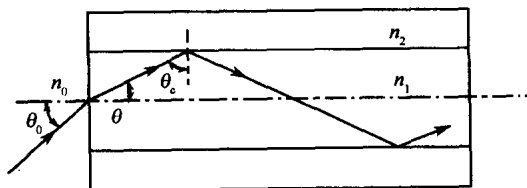


图 1.5 子午光线在阶跃型光纤中的传输

设空气折射率为 n_0 ,纤芯折射率为 n_1 ,包层折射率为 n_2 ,入射角为 θ_0 。在纤芯端面上光线产生折射,其折射角 θ 可从斯涅耳定律求得,即

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta \quad (1.3.2)$$

由于 $n_0 < n_1$,因此 $\theta < \theta_0$ 。设该折射光线到达纤芯和包层界面时恰好发生全反射,即它在包层内的折射角 $\theta_2 = 90^\circ$,则相应的入射角 $\theta_1 = \theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$ 。其中 θ_c 为纤芯与包层界面的全反射