



分立式光纤 传感技术与系统

Discrete Optical Fiber Sensing
Technology and Systems

* 刘铁根 江俊峰 等著 *



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

术著作出版基金

天津市科协自然科学学术专著基金

资助出版

工业和信息产业科技与教育专著出版资金

分立式光纤传感技术与系统

Discrete Optical Fiber Sensing Technology and Systems

刘铁根 江俊峰 刘琨 孟卓 陈信伟 著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

分立式光纤传感利用有限个独立的光纤传感单元实现单点或多点位置的待测量测量,具有灵敏度高、测量位置准确等独特优点。本书系统介绍了分立式光纤传感技术,内容包括光纤基本概念;光纤传感用光源;光纤传感中的光电接收器件;光纤耦合器等光纤器件的原理、结构、特性;光纤光栅传感原理和解调系统;光纤法珀传感原理和解调系统;光纤 Sagnac 干涉传感器;光纤 OCT 检测系统及功能化 OCT;光子晶体光纤传感器;光纤传感技术的工程应用。每章后面均附有本章的参考文献,以便读者查询。

本书内容全面,凝练了较新研究成果,并注重理论和工程实际相结合,适用性强,可供从事光纤传感技术及相关领域的科技工作者参考,也可作为光电专业师生的教材和参考读物。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

分立式光纤传感技术与系统/刘铁根等著. —北京:电子工业出版社, 2012.11

ISBN 978-7-121-18599-1

I. ①分… II. ①刘… III. ①光纤传感器—研究 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 226646 号

责任编辑:曲 昕

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:23 字数:588 千字

印 次:2012 年 11 月第 1 次印刷

定 价:69.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

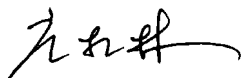
序

诺贝尔奖获得者高锟教授 1966 年发表的关于低损耗光纤的论文揭开了光纤技术蓬勃发展的序幕。光纤传感技术是利用光纤中传输光的特性变化与外界参量的关系,探索传感新原理和新结构的一门新兴学科,目前已能对位移、加速度、转动、流量、水声、温度、折射率、电流、电压、电场、磁场、核辐射等近百种参量进行传感,能为国家安全、重大工程、生物医药等多个领域提供监测手段和研究工具,并与光纤通信技术一起成为光纤技术的两个重要领域。与传统的传感器相比,光纤传感器具有电绝缘、抗电磁干扰、耐腐蚀、多参量测量、灵敏度高、质量轻、体积小、可嵌入、易组网、可远程监控等特点,在不少情况下能完成传统传感器很难甚至不能完成的任务,因此受到广泛的重视,成为传感技术前沿发展最为活跃的方向之一,在航空、航天、航海、石油化工、电力、核工业、土木工程、生物医药等领域有着广阔的应用前景。

天津大学刘铁根教授带领的科研团队在光纤传感技术研究领域耕耘多年,在光纤光栅传感、光纤法-珀传感、光纤陀螺,以及光纤相干层析技术等方面开展了大量工作,在理论和实践上很有建树,取得了许多有创造性的研究成果,获得过教育部科技进步一等奖、仪器仪表学会科学技术奖一等奖和天津市自然科学二等奖等多个奖项。2010 年刘铁根教授作为首席科学家、天津大学作为依托单位还承担了我国在光纤传感领域首个也是目前唯一一个 973 计划项目,致力于探索新一代光纤传感器的新原理和新结构,扩展光纤智能传感网拓扑结构,奠定工程应用基础,这将为我国光纤传感学科处于国际领先水平作出一份贡献。《分立式光纤传感技术与系统》是刘铁根教授及其带领的科研团队在近年来从事光纤传感技术研究的基础上,吸收了国内外学者相关研究成果,根据教学与科研工作的需要,从目前应用最广泛的光纤传感技术之一——分立式光纤传感技术与应用的角度编写而成的。这本书系统讲解了与光纤传感有关的主要知识体系,详尽地讲解了基于光纤光栅、光纤法-珀、Sagnac 干涉仪、光纤 OCT、光子晶体光纤等构建光纤传感器的理论、结构、制作及其解调。从光纤传感工程应用的角度介绍了光纤,光源,光电接收器件和光纤器件的器件原理、结构、特性参数等。书中最后提供了在大坝结构健康监测、动力电缆温度监测、隧道监测及龋齿检测系统中的典型应用例子。全书注重理论和工程实际相结合,内容取舍恰当,凝练了研究成果,对研究生和大学的高年级学生是一本很好的参考教材,对科学研究人员、工程技术人员也是一本很有特色的参考书。

应该提到,光纤传感技术是现代光纤技术、电子信息、自动控制和计算机技术学科交叉而成的一种新技术,是现代光学技术的一项卓越成就,方兴未艾,对专业人才的需求日益增加。本书可为此做出一份贡献。正因为如此,本书的推出是非常有意义的。

中国仪器仪表学会理事长 中国工程院院士



前 言

自从 20 世纪 80 年代低损耗光纤问世以来, 光纤传感技术一直处于传感器技术发展的前沿, 并与光纤通信技术一起成为光纤技术的两个重要领域。与传统的传感器相比, 光纤传感器本身不带电, 具有抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀、本质安全、多参量测量(温度、应力、振动、位移、转动、电磁场、化学量和生物量等)、灵敏度高、质量轻、体积小、可嵌入(物体)等特点, 容易组成光纤传感网络。光纤传感器可实现对桥梁、水坝、建筑物、飞行器、舰船、火车、矿井、油田、油罐等恶劣环境的实时监测, 具有巨大的社会需求和广阔的应用前景。本书是作者在近年来从事光纤传感技术研究的基础上, 吸收了国内外学者相关研究成果, 根据教学与科研工作的需要, 从分立式光纤传感技术与应用的角度编写而成的。

本书从光电子技术的基本原理出发, 系统讲解了与光纤传感有关的主要知识体系。第 1 章介绍了光纤的基本概念、理论和制造方法; 第 2 章介绍了常见的光纤传感用光源的分类、光源特性参数及选取依据; 第 3 章介绍了光纤传感应用中的各种光电接收器件; 第 4 章介绍了各种光纤器件的原理、结构、特性参数和制作工艺; 第 5 章介绍了光纤光栅的原理和制作方法, Bragg 光栅和长周期光纤光栅的模式理论, 光纤光栅的传感原理和解调系统; 第 6 章介绍了光纤法-珀传感器的结构、制作方法、传感原理、解调系统和应用; 第 7 章介绍了 Sagnac 干涉仪传感器, 包括光纤陀螺系统及其检测系统, 光纤电流互感器和水听器; 第 8 章介绍了光纤 OCT 检测系统及各种功能化 OCT; 第 9 章介绍了光子晶体光纤的基本知识及光子晶体光纤传感器的应用; 第 10 章介绍了光纤传感技术在大坝结构健康监测、动力电缆温度监测、隧道监测及龋齿检测系统中的应用。

在编写中, 我们努力使得本书的内容都是最新的和实用的, 在理论方面力求简明易懂, 力求紧跟技术发展方向, 以使更多的读者通过阅读本书获益。

由于编写的时间仓促及光纤传感技术的不断发展, 书中难免有不足或错误之处, 诚恳希望读者给予批评和指正, 以便于提高水平, 把更好、更新的内容呈献给大家。

本书由刘铁根教授、江俊峰副教授撰写, 刘琨、孟卓、陈信伟、刘文辉、王龙志、丁振扬、尹金德、陈沁楠、王少华、曹聪、李定杰、杜阳、俞琳等参与了编写。苏亚、贾云伟、金灿、孟祥娥、丁小昆、赵玛利、姬强、李玉、赵鹏、张晶等为本书的编撰和校对做了很多工作。本书的编著是张以谟教授事业的延续, 值恩师八十寿辰和五十年从教之际, 谨以此书致贺并致谢意。本书由国家科学技术学术著作出版基金和天津市科协自然科学学术专著基金, 以及工业和信息产业科技与教育专著出版资金资助出版。在编写过程中得到了电子工业出版社、天津市科协和中国航天科工集团津航技术物理研究所等大力帮助, 在此表示衷心感谢。

目 录

第 1 章 光纤的基本理论	1
1.1 光纤的结构	1
1.2 光在光纤中传输的电磁方程	3
1.2.1 光纤传光的基本原理	3
1.2.2 光在阶跃光纤中的传播	3
1.2.3 光在渐变光纤中的传播	4
1.2.4 光纤中的模式传播	5
1.2.5 阶跃折射率光纤的标量分析	6
1.2.6 阶跃折射率光纤的矢量分析	8
1.3 光纤的特性	11
1.3.1 损耗	12
1.3.2 色散	16
1.3.3 非线性效应	20
1.4 光纤的分类	21
1.4.1 石英光纤	21
1.4.2 塑料光纤	23
参考文献	29
第 2 章 光纤传感用光源	31
2.1 光纤传感光源的种类及特性参数	31
2.1.1 光源的分类	31
2.1.2 光源的特性参数	32
2.2 LED 光源	33
2.2.1 LED 的工作原理	34
2.2.2 LED 的结构	35
2.2.3 LED 的特性	36
2.3 SLD 光源	38
2.3.1 SLD 的工作原理	38
2.3.2 SLD 的结构	39
2.3.3 SLD 的特性	42
2.4 DFB 光源	44
2.4.1 DFB 激光器的结构和工作原理	44
2.4.2 DFB 激光器的基本结构	45
2.4.3 DFB 激光器的特性	45

2.5 ASE 光源	48
2.5.1 ASE 的工作原理	49
2.5.2 ASE 光源的结构	49
2.5.3 ASE 光源的特性	51
2.6 窄线宽频扫光源	51
2.6.1 工作原理	51
2.6.2 基本结构	53
2.6.3 窄线宽频扫光源的特性	55
参考文献	55
第 3 章 光电探测器	57
3.1 光电探测器概述	57
3.1.1 光电效应	57
3.1.2 光电探测器的性能参数	59
3.2 光电探测器的分类及其特性参数	64
3.2.1 PIN 探测器	64
3.2.2 APD 探测器	71
3.2.3 InGaAs 探测器阵列	78
3.2.4 CCD 阵列	84
参考文献	91
第 4 章 光纤器件	93
4.1 光纤器件概述	93
4.1.1 光纤器件的基本参数	93
4.1.2 光纤器件的基本结构	93
4.2 光纤耦合器	94
4.2.1 光纤耦合器的定义和分类	94
4.2.2 光纤耦合器的基本原理与结构	94
4.2.3 光纤耦合器的性能参数	95
4.2.4 几种典型光纤耦合器的结构及原理	96
4.3 光隔离器	102
4.3.1 光隔离器的原理	102
4.3.2 光隔离器的特性	103
4.3.3 几种光隔离器	105
4.4 光环行器	107
4.4.1 光环行器的原理	107
4.4.2 光环行器的特性	107
4.4.3 光环行器的结构和工作原理	108
4.4.4 光环行器在光分插复用器中的应用	109

4.5	光纤衰减器	111
4.5.1	光纤衰减器的分类	111
4.5.2	光衰减器的性能	113
4.6	光纤起偏器	114
4.6.1	光纤起偏器概述	114
4.6.2	保偏光纤起偏器	114
4.6.3	偏振控制器	116
4.7	光开关	117
4.7.1	光开关的性能参数	117
4.7.2	光开关的种类	117
4.7.3	各种光开关技术	119
4.8	光纤放大器	123
4.8.1	掺铒光纤放大器	124
4.8.2	其他光纤放大器	128
4.8.3	几种光纤放大器的比较	129
4.9	光纤延迟线	129
4.9.1	光纤延迟线的基本原理	130
4.9.2	光纤延迟线的性能特点	131
4.9.3	光纤延迟线的应用	131
	参考文献	134

第 5 章 光纤光栅传感技术 135

5.1	光纤光栅概述	135
5.2	光纤的光敏性	136
5.2.1	硅基光纤的光敏性	136
5.2.2	光纤的光敏性机理	139
5.2.3	光纤光敏性的增强以及光纤光栅的寿命周期	142
5.3	光纤 Bragg 光栅模式理论	143
5.3.1	模式耦合理论	144
5.3.2	包层模耦合和辐射模耦合	146
5.3.3	光纤光栅的非线性效应	147
5.4	光纤 Bragg 光栅制作	148
5.4.1	内部写入法	148
5.4.2	全息干涉法	149
5.4.3	分波前干涉法	150
5.4.4	相位掩模法	150
5.4.5	聚焦离子束写入	151
5.5	长周期光纤光栅的模式理论	151
5.5.1	耦合模理论	151
5.5.2	级联 LPG	152

5.6	LPG 的制作	153
5.6.1	逐点写入法	153
5.6.2	振幅掩模法	154
5.6.3	腐蚀刻槽法	155
5.7	光纤光栅传感原理	156
5.7.1	光纤 Bragg 光栅传感原理	156
5.7.2	长周期光纤光栅传感原理	160
5.7.3	光纤光栅的封装	161
5.8	光纤光栅解调系统	162
5.8.1	边缘滤波法	162
5.8.2	可调谐滤波器法	163
5.8.3	干涉扫描法	167
5.8.4	双腔干涉扫描法	170
5.8.5	傅里叶变换光谱法	172
5.8.6	小结	172
	参考文献	173
第 6 章	光纤法-珀传感技术	176
6.1	光纤法-珀传感器概述及主要应用	176
6.1.1	光纤法-珀传感器概述	176
6.1.2	光纤法-珀传感器的主要应用	177
6.2	光纤法-珀干涉仪理论	177
6.2.1	平行平板的多光束干涉	177
6.2.2	F-P 干涉仪研究光谱线的精细结构	181
6.2.3	F-P 干涉仪的双光束近似	182
6.3	本征型光纤法-珀传感器	183
6.3.1	本征型光纤法-珀传感器概述	183
6.3.2	IFPI 传感器的常见结构	184
6.3.3	光纤 IFPI 传感头的制作	185
6.4	非本征型光纤法-珀传感器	186
6.4.1	非本征型光纤法-珀传感器概述	186
6.4.2	非本征型光纤法-珀 (EFPI) 传感器的传感原理及常见结构	188
6.4.3	膜片式微型 EFPI 光纤压力传感器	189
6.5	光纤法-珀传感解调系统	194
6.5.1	强度解调法	194
6.5.2	相位解调	200
6.5.3	时间扫描型低相干干涉解调	210
6.5.4	空间扫描型低相干干涉解调	216
	参考文献	222

第 7 章 光纤 Sagnac 干涉仪传感技术	226
7.1 Sagnac 效应.....	226
7.2 光纤陀螺仪的基本原理.....	227
7.3 光纤环的绕制工艺和质量检测系统.....	230
7.3.1 光纤环温度漂移效应和绕制工艺.....	230
7.3.2 零漂检测和 Allan 方差.....	233
7.3.3 偏振串扰检测系统.....	235
7.3.4 光纤环瞬态特性检测系统.....	238
7.4 保偏光纤陀螺系统.....	246
7.5 消偏光纤陀螺系统.....	247
7.6 全光纤电流互感器.....	249
7.7 光纤水听器.....	251
参考文献.....	252
第 8 章 光纤 OCT 检测技术	254
8.1 OCT 的发展.....	254
8.2 OCT 层析原理.....	256
8.2.1 OCT 理论分析.....	256
8.2.2 生物组织的光学特性.....	257
8.2.3 光源.....	258
8.3 时域 OCT.....	260
8.3.1 OCT 扫描装置.....	260
8.3.2 双光束 OCT.....	262
8.3.3 光学外差探测.....	263
8.4 OCT 信号特性.....	263
8.4.1 探测深度.....	263
8.4.2 敏感度.....	264
8.4.3 散斑.....	265
8.4.4 OCT 系统的分辨率.....	266
8.4.5 系统色散.....	267
8.5 频域法光纤 OCT.....	267
8.5.1 光谱 OCT.....	267
8.5.2 复谱频域 OCT.....	269
8.5.3 频域 OCT 相关参数.....	269
8.5.4 频域 OCT 系统的成像速度分析.....	270
8.5.5 频域 OCT 与时域 OCT 之间的联系与区别.....	271
8.6 OCT 技术的特点.....	272
8.7 功能 OCT.....	272
8.7.1 偏振 OCT.....	273
8.7.2 多普勒 OCT.....	275

8.8	OCT 的应用	276
8.8.1	光学相干层析成像技术在生物组织测量中的应用	277
8.8.2	光学相干层析成像技术在医学中的应用	278
8.8.3	OCT 在珍珠行业的应用	279
	参考文献	279
第 9 章	光子晶体光纤传感技术	283
9.1	光子晶体及其应用	283
9.1.1	光子晶体概述	283
9.1.2	光子晶体的特征	284
9.1.3	光子晶体的应用	287
9.2	光子晶体光纤	287
9.2.1	光子晶体光纤的概念和分类	287
9.2.2	光子晶体光纤的特性	291
9.2.3	光子晶体光纤的制作	293
9.2.4	液晶填充式光子晶体光纤	293
9.3	光子晶体光纤传感器的国内外研究现状	301
9.4	光子晶体光纤压力传感器	302
9.4.1	微弯压力 PCF 传感器	302
9.4.2	高压 PCF 传感器	306
9.5	光子晶体光纤应变传感器	309
9.5.1	光子晶体光纤法布里-珀罗干涉传感器	309
9.5.2	光子晶体光纤法布里-珀罗干涉型高温应变传感器	310
9.6	光子晶体光纤温度传感器	312
9.6.1	光子晶体光纤 F-P 温度与折射率传感器	312
9.6.2	液晶填充光子晶体光纤温度传感器	314
	参考文献	315
第 10 章	光纤传感器的工程应用	318
10.1	大坝光纤传感监测系统	318
10.1.1	大坝监测的要求	318
10.1.2	大坝监测的原理及系统组成	319
10.1.3	大坝监测系统的综合应用	320
10.2	动力电缆温度监测系统	323
10.2.1	动力电缆温度监测的要求	323
10.2.2	动力电缆温度监测的原理及系统组成	323
10.2.3	动力电缆温度监测系统的综合应用	324
10.3	隧道监测系统	325
10.3.1	隧道监测的要求	326
10.3.2	隧道监测的原理及系统组成	326

10.3.3 隧道监测系统的综合应用	327
10.4 光学相干层析成像技术在医学诊断领域的应用	330
10.4.1 眼科检查	331
10.4.2 光纤 OCT 龋齿检测	338
10.5 光学相干层析成像技术在工业领域的应用	345
10.5.1 工程聚合物材料检测	345
10.5.2 珠宝玉石检测	346
参考文献	350

第 1 章 光纤的基本理论

光纤是光导纤维（Optical Fiber）的简称，它是传输光的导体。光纤实际上是由透明材料做成的纤芯和在它周围采用比纤芯的折射率稍低的材料做成的包层所被覆，将射入纤芯的光信号，经包层面反射，使光信号在纤芯中传播前进的媒体。

光导纤维正是利用光的全反射原理制造而成的，1966 年，美籍华人高锟（C.K.Kao）和霍克哈姆（C.A.Hockham）发表论文。高锟博士针对当时玻璃纤维传输损耗高达 1 000 dB/km 的情况，指出大的传输损耗不是石英光纤本身固有的基本特性，而是由材料中杂质产生的。材料本身的损耗是由瑞利散射决定的，它随波长的四次方而下降，其损耗是很低的。因此，有可能制造出应用于长距离通信的低损耗光纤。1970 年，美国康宁公司根据高锟博士的思想，采用化学汽相沉积（CVD）工艺首次研制成功损耗为 20 dB/km 的光纤，成为世界公认的第一根通信用光导纤维。1977 年美国在芝加哥相距 7 000 m 的两个电话局之间，首次用多模光纤成功地进行了光纤通信实验。1979 年石英光纤的损耗已经降至理论极限值 0.2 dB/km，这相当于空气的透明度^[7]。

目前，全世界都在进行各种光纤的开发和应用商品化的研究。光纤正迅速渗透到从高科技的光通信到普通装饰品的各个应用领域之中。光纤是当今社会各类信息传输媒质中最重要的一种。据有关方面统计，全球各类通信业务中 60% 以上是通过光纤传输的。在可预见的将来，还没有任何一种其他媒质可以替代光纤。随着波分复用（DWDM 和 CWDM）技术、光纤放大技术、色散补偿及管理技术等的发展，超长距离、超大容量的全光通信时代已离我们越来越近了。网络的进步和市场需求促进了光纤制造技术的发展，光纤性能日益提高、光纤新品层出不穷，光纤的优点越来越被人们发挥到极致。

光纤已成为信息社会的基础，正改变着我们的生活。光纤技术除了在通信方面的应用外，在医学检测领域、工业生产现场监视和调度、交通监视控制指挥、大型建筑物的结构检测、航天航空领域光纤陀螺技术、超高压输电线电流检测、潜艇声呐制造、火炮的激光控制等方面还有广泛应用，因此光导纤维被人们誉为信息时代的神经。

1.1 光纤的结构

普通石英光纤和塑料光纤的结构十分简单（见图 1-1），主要是由纤芯、包层和涂覆层构成，纤芯是由高度透明的材料制成^[5]；纤芯的折射率 n_1 比包层的折射率 n_2 稍大，这样当光满足一定的入射条件时，利用全反射原理使光波沿着纤芯向前传播。涂覆层的作用是保护光纤不受水蒸气的侵蚀和机械的擦伤，同时又增加光纤的柔韧性。

典型的通信用光纤截面如图 1-2 所示，对于单模光纤，其标准包层直径是 125 μm ，加上涂覆层后，光纤直径约为 250 μm 。事实上，不同类型的光纤虽然由纤芯、包层和涂覆层三个基本部分组成，但各自的几何尺寸差异却很大，用于高清晰度图像传输的光纤其芯径小，包层薄；传输高功率能量的照明光纤则一般具有更粗的纤芯和细薄的包层；用于通信的光纤则是厚包层和小纤芯，纤芯折射率到包层的折射率的变化是阶跃变化，

纤芯的折射率可以是均匀的,也可能是渐变的;还有一些高性能的光纤其结构会更复杂,如光子晶体光纤的结构。



图 1-1 光纤结构图

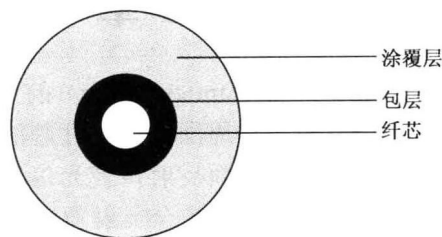


图 1-2 通信用光纤截面图

光子晶体光纤的结构不同于石英光纤和塑料光纤,光子晶体光纤的概念最早由 Russell ST J 等人于 1992 年提出。它基于 Yablnovitho E 和 Johns 于 1987 年分别从影响光子的传播行为和光子局域化效应角度所提出的光子晶体(PC)概念,结构表现为沿轴向均匀排列着空气孔,从光纤端面看,存在周期性的二维结构,如果其中一个孔遭到破坏或缺失,则光可能会局限在缺陷内传播,其传播机制不同于利用全内反射的普通光纤,而是利用光子带隙(PBG)结构,使一定波长和传输常数范围内的光的所有模式无法在横向扩展而穿透包层材料,从而达到使光沿轴向传播的目的。

光子晶体光纤具有周期性的排列结构,它同传统的光纤在结构上有很大的不同,按导光机制的不同,光子晶体光纤可以分为两大类:全内反射导光型和光子带隙导光型。图 1-3 所示为一种最典型的全内反射型的光子晶体光纤,该光纤包层由周期性的空气孔排列形成,纤芯通过在周期性排布时缺少一个或几个空气孔形成,即该处空气孔的位置由实心材料占据。因此芯区的折射率大于包层的等效折射率,此时导光机制可以由类似于传统阶跃光纤的全内反射原理加以解释。图 1-4 所示为光子带隙导光型光子晶体光纤,通常也称为光子带隙光纤。

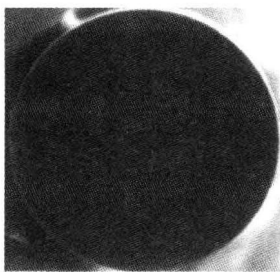


图 1-3 全内反射型的光子晶体光纤的横截面图

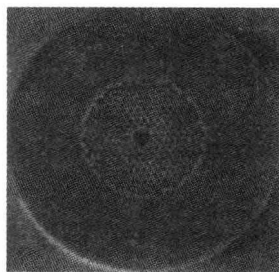


图 1-4 光子带隙导光型光子晶体光纤的横截面图

与传统光纤比,光子晶体光纤具有许多重要的特点,如可以在很大的波长范围内保持单模传输特性;可以在大模场面积的光子晶体光纤里保持单模传输特性;空气孔结构的变化可以导致许多重要的应用,如高双折射光纤;PCF 具有特殊的色散特性,可以通过调整空气孔结构来改变光纤的零点色散。通过改变光纤纤芯的大小,可以使光纤具有极低或极强的非线性效应,等等。关于光子晶体光纤的具体内容将在第 10 章进一步介绍^[1-4]。

1.2 光在光纤中传输的电磁方程

在物理光学中,研究光波在光纤中传播的理论主要包括射线理论和模式理论。

射线理论是应用几何光学中的反射和折射原理解释光波在光纤中传播这一物理现象。模式理论是把光波当做电磁波,把光纤当做波导,然后根据电磁场理论中的麦克斯韦方程组求得波动方程,采用标量近似法或矢量法解偏微分方程,求得电磁场分布的模式来解释光纤中的光传输现象。本节将从这两方面阐述光纤传输的基本原理。

1.2.1 光纤传光的基本原理

光纤的传光原理可以用几何光学的反射、折射特性来分析。当光源发出的光到达两种不同介质的分界面时,会产生反射与折射现象。光的反射定律表明反射角等于入射角,折射定律则满足

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1-1)$$

其中, n_1 和 n_2 为两种介质的折射率, θ_1 和 θ_2 分别为入射角与折射角,当 $\theta_2 \geq 90^\circ$ 时,此时入射光将全部被反射,这种现象被称做光的全反射,如图 1-5 所示。我们把对应于折射角 $\theta_2 = 90^\circ$ 的入射角叫做临界入射角。可以很容易得到临界入射角为

$$\theta_k = \sin^{-1}(n_1 / n_2) \quad (1-2)$$

1.2.2 光在阶跃光纤中的传播

所谓阶跃光纤,是指在纤芯与包层区域内,其折射率分布分别是均匀的,其值分别为 n_1 与 n_2 ,但在纤芯与包层的分界面处,其折射率的变化是阶跃的^[8, 23]。图 1-6 所示为阶跃光纤折射率分布。

其折射率分布的表达式为

$$n(r) = \begin{cases} n_1, & r \leq a_1 \\ n_2, & a_1 < r \leq a_2 \end{cases} \quad (1-3)$$

阶跃光纤是早期光纤的结构方式,后来在多模光纤中逐渐被渐变光纤所取代(因渐变光纤能大大降低多模光纤所特有的模式色散),但用它来解释光波在光纤中的传播还是比较形象的,如图 1-7 所示。

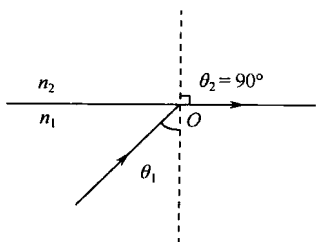


图 1-5 全反射原理图

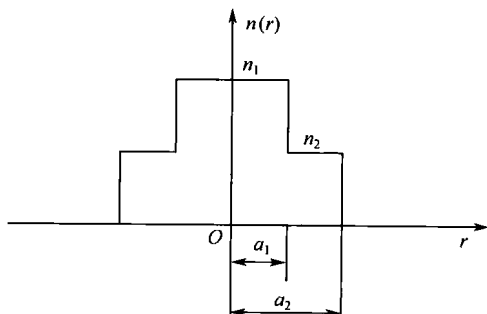


图 1-6 阶跃光纤折射率分布

因为光在空气中的折射率为 $n_0 = 1$ ，于是应用光的折射定律可得

$$n_0 \sin \theta_c = n_1 \sin \theta_3 = n_1 \sin(90^\circ - \theta_1) \quad (1-4)$$

为保证光在光纤中的全反射，则应有 $\theta_1 = \theta_k$ ，且

$$\sin \theta_k = n_2 / n_1 \quad (1-5)$$

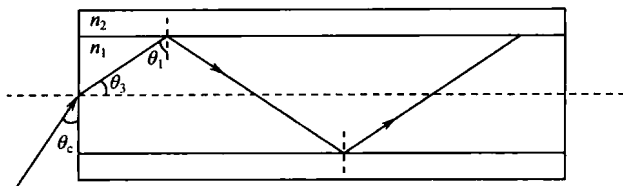


图 1-7 光在阶跃光纤中的传播轨迹

于是有

$$\sin \theta_c = n_1 \sin(90^\circ - \theta_k) = n_1 \cos \theta_k = n_1 \sqrt{1 - (n_2 / n_1)^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} = NA \quad (1-6)$$

$$\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2 \approx (n_1 - n_2) / n_1 \quad (1-7)$$

其中， Δ 是相对折射率差，NA 为数值孔径。

阶跃光纤数值孔径 NA 的物理意义是：能使光在光纤内以全反射形式进行传播的接收角 θ_c 的正弦值。光纤的 NA 并非越大越好。NA 越大，虽然光纤接收光的能力越强，但光纤的模式色散也越厉害。因为 NA 越大，其相对折射率差 Δ 也就越大。 Δ 值越大，光纤的模式色散也越大，从而使光纤的传输容量变小。因此 NA 取值的大小要兼顾光纤接收光的能力和模式色散。

1.2.3 光在渐变光纤中的传播

渐变光纤的折射率分布是在光纤的轴心处最大，而随剖面径向坐标值的增加折射率逐渐变小， $n_1 > n_{11} > n_{12} > n_{13} > \dots > n_2$ 。

若 $n_1 > n_2$ ，则有 $\theta_2 > \theta_1$ 。这样光在每两层的分界面皆会产生折射现象。由于外层的折射率总比内层要小一些，所以根据折射定律和全反射原理，光线每经过一个分界面，就向轴线靠近一些，一直到纤芯与包层的分界面，产生全反射现象。全反射的光又逐层折射回光纤纤芯。这样就完成了一个传输全过程，使光线基本上局限在纤芯内进行传播（见图 1-8 和图 1-9）。

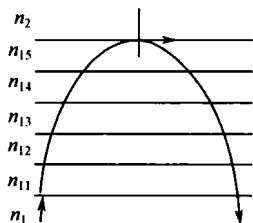


图 1-8 渐变光纤折射率分布

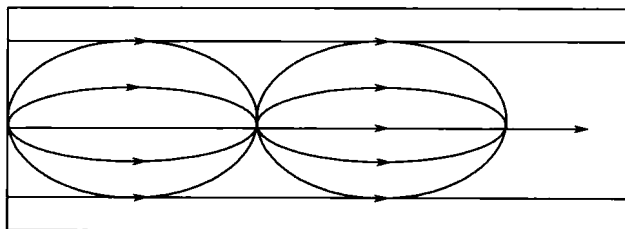


图 1-9 光在渐变光纤中的传播轨迹

设想如果光纤不是由一些离散的均匀层组成，而是由无穷多个同轴均匀层组成。换

句话讲, 光纤剖面的折射率随径向坐标增加而连续变化, 且遵从抛物线变化规律, 那么光在纤芯的传播轨迹就不会呈折线形状, 而是呈连续变化形状。

理论上可以证明光在其中的传播轨迹为

$$\gamma(z) = A \sin \left(\frac{\sqrt{2\Delta}}{a_1} z + \varphi \right) \quad (1-8)$$

其中, A 为正弦曲线振幅; a_1 为纤芯半径; Δ 为相对折射率差; φ 为初始相位; z 为轴向距离参数。

于是以不同角度入射的光线族皆以正弦曲线轨迹在光纤中传播, 且近似呈聚焦状。

1.2.4 光纤中的模式传播

在光纤直径比波长大得多的情况下, 应用几何光学的定律来解释光在光纤中的传播是适用的。然而, 当光纤的直径减小到与波长接近时, 射线理论往往不准确, 甚至无法解释。要想得到全面、正确的结论, 必须采用模式理论来分析光在光纤中的传播。

电磁场的基本方程——麦克斯韦方程组的微分形式为

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1-9)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad (1-10)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (1-11)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1-12)$$

其中, E 、 H 、 D 、 B 、 J 、 ρ 分别代表矢量电场强度、磁场强度、电位移、磁感应强度、电流密度, 以及标量电荷密度。

联立麦克斯韦方程组可以得到波动方程, 考虑在以下条件:

- (1) 仅推导各向同性物质的波动方程;
- (2) 假设介质的磁导率与时间无关;
- (3) 在所研究的区域中无源, 介电常数变化缓慢。

可以得到化简的波动方程为

$$\nabla^2 E = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (1-13)$$

$$\nabla^2 H = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \quad (1-14)$$

其中, v 是电磁波在介质中的传播速度, 它与电磁波在真空中传播的速度 c 之间的关系是

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} = \frac{c}{\sqrt{n}} \quad (1-15)$$

其中, 光速 $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$, $n = \sqrt{\mu_r\epsilon_r}$ 是介质的相对折射率。

如果电磁场做简谐振荡, 则为

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (1-16)$$

$$\nabla^2 H + k^2 H = 0 \quad (1-17)$$

其中, $k^2 = n^2 k_0^2$, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间的波数量, λ 为工作波长。

式 (1-16), 式 (1-17) 称为矢量的亥姆霍兹方程。