

科学技术前沿丛书

光纤通信与光纤传感

赵仲刚 等 编著

上海科学技术文献出版社

SHANGHAI KEXUE JISHU WENXIAN CHUBANSHE

(沪)新登字301号

光纤通信与光纤传感

杜柏林 逢永秀 编著
赵仲刚 宋金声 李华生

*

上海科学技术文献出版社出版发行
(上海市武康路2号 邮政编码 200031)

全国各书店经销

上海科技文献出版社昆山联营厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 17.375 字数 282,600

1993年12月第1版 1993年12月第1次印刷

印数: 1—1,100

ISBN 7-5439-0339-3/T·297

定价: 19.80元

《科技新书目》306-252

内 容 简 介

光纤通信和光纤传感都是 70 年代迅速崛起的前沿科学技术。本书以较新的内容介绍两者共同的基础知识和内在联系,各自的设计原理和应用。全书分 5 章:第 1 章光纤和光缆;第 2 章光源和光检测器件;第 3 章光无源器件;第 4 章光纤通信系统;第 5 章光纤传感器。在各章末尾附有重要参考文献。全书内容丰富,重点突出,论证清楚,文字简炼,系统完整,时新实用。

本书是一本供从事光纤通信和光纤传感器研究、设计制造和应用等工作的科研、管理、工程技术人员和大学相关专业学生的实用参考读物。

序 言

自本世纪70年代初第一根实用化石英光纤问世后,以光纤作为传输介质的光纤通信这项高新技术,已从实验室研制阶段迅猛地发展成为通信领域的一大产业。70年代中期,根据光纤不用任何中间级就能把待测量与光纤内的导光联系起来特性和日臻完善的光纤通信技术,构成了一种全新的直接交换信息的基础,成功地开发出诸多测量物理、化学等量值的光纤传感器,并以其独特优势快速占领各个应用领域。

各大工业国都在致力开发光纤通信与光纤传感技术,大量的研究成果和发展动向不断地散见于有关杂志中。本书在汲取这两门技术的理论精髓、总结其内在联系的前提下,熔光纤通信和光纤传感于一炉,这种刻意的写作体裁就有别于国内外出版的种数不多的且各自成书的版本了。

本书的作者都是多年从事本专业科研生产的高级科技人员,在总结前人工作的基础上,注入了各自主持设计时的思路和指导工程后的体会。全书内容丰富,系统完整,论证严谨,文字简炼,反映了新近的光纤通信和光纤传感器的水平和动向。各章末尾还附有重要参考文献,既便于自学,亦为深入钻研原著指示门径。相信本书会使读者获益良多。

由于本书具有以上优点,我十分高兴地将它作为有用的参考书,推荐给从事光纤通信和光纤传感器教学、研究、设计和工程的同行,介绍给大学相关专业的莘莘学子和意欲步入高新技术诸多应用领域的朋友们。

朱寄萍

1993.2

前 言

自本世纪 60 年代中期英籍华人高锟博士率先指出只要大幅度减少玻璃纤维中的金属离子,并改进其拉丝工艺,就完全有可能制造出适合于长距离通信的低损耗光纤。此后,美国的康宁公司即于 1970 年研制成功世界上第一根实用化石英光纤。至今,已获得了传输容量达数千兆赫·公里、损耗几近本征值的优质石英光纤,以光纤作为传输介质的光纤通信正在各信息领域取代金属线缆。光纤通信与微波、卫星通信一起,已成为当代信息传输的三大支柱之一。光波技术在陆地和空中通信中获得了广泛应用。光纤通信正朝着综合业务数字网(ISDN)和宽带综合数字网(B-ISDN)的方向发展。当前的趋势主要是采用超大容量的光纤通信系统、同步光纤网(SONET)、低成本的用户网和局域网(LAN)传输系统和同步数字系列(SDH)。随着超长波长氟化物光纤、掺铒光纤等新型光纤的出现,大规模集成光学器件的问世,以及光交换和全光中继器的不断完善,使人们多年探索的超大容量、长距离无中继的相干光通信乃至全光通信逐步变成现实。1991 年,世界光纤系统需要 563 万公里总值约 36 亿美元的光缆;到 1996 年,全年则需要 1100 万公里价值为 75 亿美元的光缆。横跨太平洋、大西洋的海底光缆系统早已星罗棋布并开通应用。以世界上 40 余公司共建的第一个使用光放大器的跨太平洋 TPC-5 光纤系统为例,将使日本、关岛、夏威夷和美国本土相联,总投资为 11 亿美元的回报是:通过 4 对传输速率为 5 Gbit/s 的光纤,最终将同时传输 100 多万路电话或等效的数据、传真、话音或电视台。

随着光纤的深入研究,发现某些光纤易受诸如温度、压力、电场和磁场等环境因素的影响,从而导致光强、相位、频率和偏振态等光波量的变化。光纤无需任何中间级就能把待测量与光纤内的

导光联系起来,这就构成了一种全新的直接交换信息的基础,从而演绎出了光纤传感器这门新技术。由于光纤传感器灵敏度高、耐高压耐腐蚀、阻燃防爆、抗电磁干扰、频带宽、动态范围大、柔软纤细挠曲性好,外加体积小、重量轻和耗电少,故可做成具有多方面适应性的光纤传感器和传感器阵列。世界各先进工业国已开发出百余种光纤传感器,它的触角已涉及到国防军事、航空航天、工矿农业、能源环保、生物医学、计量测试、自动控制乃至家庭生活等各个领域,光纤传感器的应用使以前的棘手监测难题找到了解决办法。光纤的问世使传感器技术发生一场革命,正在开发中的晶体光纤、抗辐照光纤和中红外光纤等新型特种光纤必将为实现高度信息化社会做出重要贡献。

我国的通信事业和传感技术均不很发达,亟需大力建设,正可取捷径采用最新的光纤通信技术和光纤传感技术。尽管国力有限,除在基础研究方面,在光频复用、相干光通信、集成光路等长远项目研究及在孤子通信、全光通信等前景不明朗项目的研究方面与国外水平有较大差距外,在瞄准国际高科技走向、开发近期可以商用的技术方面还是卓有成效的。从中央到地方,从城市到乡村,均在大力推广光纤通信网。在第11届亚运会上,就有11个场馆配备了13套光缆现场彩色电视传输系统,成功地通过卫星地面站送入卫星向全世界转播。1992年底顺利开通的上海到无锡的传输速率为565 Mbit/s的光缆通信系统试验段,更使我国光纤通信跃上一个新台阶。我国第一条通向世界的全长1260公里中日海底光缆可望于1993年底投入使用,届时可开通7500条话路,为目前海底电缆通路能力的15倍。在光纤传感器方面,也研制开发出光纤陀螺以及测量温度、速度、压力、水声、电场和磁场等几十种传感器,有些并能批量生产进入商品市场。

为了实现光纤传感器系统的遥测和控制以满足多功能、智能化的要求,就得与计算机连接,就得与光纤传输系统联网。所以,光纤通信与光纤传感器两者之间,无论是对光纤本身的要求,还是在有源、无源光器件的设计、制造和选用方面,都有着许多共性。

有鉴于此,本书尝试着将以往各自成书的这两部分内容融为一体,以便读者能以较少的时间和精力获得较多的有内在联系的知识。

本书由赵仲刚高级工程师组织编写。全书共分5章:第1章是光纤光缆,由杜柏林高级工程师撰写;第2章是光有源器件,由逢永秀副研究员撰写;第3章是光无源器件,由宋金声高级工程师撰写;第4章是光纤通信系统,由李华生副教授撰写;第5章是光纤传感器,由赵仲刚高级工程师撰写。最后由张美敦教授、赵仲刚高级工程师统稿润色。撰写者都是多年从事本专业科研、生产、工程的科技人员,以简扼实用为前提,尽力阐述最新的光纤通信和光纤传感器的理论、现状和动向,也注入了各自主持设计时的思路和指导工程后的体会。各章末尾均附有重要的参考文献,以便为自学和深入钻研原著指示门径。

光纤通信和光纤传感技术是日新月异发展着的高新技术,又是涉及众多学科的实用科技新领域,限于作者水平和经验,错误和不妥之处在所难免,敬请各位不吝指正。

赵仲刚谨启

1993年元月于上海

目 录

1 光纤与光缆	
1.1 概述	1
1.2 光纤传输的基本原理	3
1.2.1 全反射	3
1.2.2 光纤传输的基本原理	4
1.2.3 光纤传输的波动理论	6
1.3 光纤的传输特性	9
1.3.1 光纤的传输损耗	9
1.3.2 光纤中的色散与脉冲展宽	11
1.4 光纤的结构与分类	15
1.4.1 突变型光纤	16
1.4.2 渐变型光纤	16
1.4.3 单模光纤	18
1.5 光纤的制造技术	19
1.5.1 光纤预制棒的制备	19
1.5.2 光纤拉丝及一次涂覆	21
1.5.3 光纤二次涂覆	22
1.6 特种光纤	22
1.6.1 掺稀土元素光纤	22
1.6.2 保偏光纤(高双折射光纤)	27
1.7 光纤的强度	35
1.7.1 光纤断裂的一般机理	35
1.7.2 提高光纤强度的途径	36
1.8 光缆的结构	38
1.8.1 基本设计	39
1.8.2 光缆的制造技术	46
1.9 光缆的分类	43

1.9.1	光缆的种类和适用范围	46
1.9.2	中继传输用的光缆	47
1.9.3	用户光缆	49
1.9.4	海底光缆	51
1.9.5	其它光缆	52
1.10	光缆的特性	52
1.10.1	光缆的传输特性	53
1.10.2	光缆的机械特性	54
1.10.3	光缆的可靠性	55
1.11	光缆的敷设	56
1.12	光纤特性的测量	57
1.12.1	损耗测量	58
1.12.2	带宽测量	57
	参考文献	59
2	光有源器件	
A	光源器件	60
2.1	一般光源器件	60
2.1.1	白炽灯与卤钨灯	60
2.1.2	固体激光器	61
2.1.3	气体激光器	62
2.2	半导体发光二极管(LED)	63
2.2.1	引言	63
2.2.2	LED的分类与结构	65
2.2.3	LED的制造与性能	75
2.2.4	LED的封装与耦合	81
2.2.5	LED的退化和寿命	83
2.2.6	LED的应用	85
2.3	半导体激光二极管(LD)	89
2.3.1	LD的工作原理	90
2.3.2	不同发射波长LD的材料	90
2.3.3	LD的结构	92
2.3.4	LD的模式	96
2.3.5	LD的阈值条件	104

2.3.6	输出功率和转换效率	106
2.3.7	LD 的调制	108
2.3.8	LD 的封装、耦合和寿命问题	110
2.3.9	LD 的新进展	114
B	光检测器件	127
2.4	光电检测器的基本原理和检测过程	128
2.4.1	引言	128
2.4.2	基本检测原理	129
2.4.3	光电管的材料	130
2.4.4	检测过程的噪声	131
2.5	光电二极管的原理、结构和性能	133
2.5.1	光电二极管的几个主要问题	133
2.5.2	光电二极管的结构和性能	137
2.6	光电晶体管的原理、结构和性能	143
2.7	集成接收器件和阵列	145
	参考文献	146
3	光纤无源器件	
3.1	概述	150
3.1.1	光纤无源器件的定义和分类	150
3.1.2	光纤无源器件的技术特性	153
3.1.3	光纤无源器件的结构形式	156
3.1.4	光纤无源器件的发展动态	157
3.2	连接损耗和固定接头	159
3.2.1	光纤连接损耗计算	159
3.2.2	固定接头	168
3.3	活动连接器	176
3.3.1	单芯光缆连接器	177
3.3.2	多芯光缆连接器	184
3.3.3	活动连接器的发展动向	188
3.4	光纤耦合器	193
3.4.1	耦合机理	193
3.4.2	X 型及 Y 型耦合器	201
3.4.3	宽带耦合器	204

3.4.4	星形耦合器	205
3.4.5	树形耦合器	206
3.5	光纤波分复用器	207
3.5.1	多层介质膜型波分复用器	207
3.5.2	光栅型波分复用器	209
3.5.3	熔融型波分复用器	211
3.6	光纤开关	214
3.6.1	工作原理	214
3.6.2	机械式光开关	216
3.6.3	非机械式光开关	222
3.7	光衰减器及其它器件	225
3.7.1	光衰减器	225
3.7.2	磁光非互易器件	229
3.7.3	光纤传感用特种器件	232
3.8	平面型光无源器件	236
3.8.1	光波导制造技术	236
3.8.2	电极点焊及光纤耦合技术	240
3.8.3	发展前景	242
参考文献		245
4	光纤通信系统	
4.1	概述	247
4.1.1	光纤通信系统的组成和特点	247
4.1.2	光纤通信系统的发展	250
4.2	光纤数字通信系统	252
4.2.1	光纤数字通信系统简介	252
4.2.2	主要设备的功能和性能	260
4.2.3	光纤通信系统的辅助设备	290
4.2.4	光纤数字通信系统的测量	304
4.2.5	光纤数字通信系统的设计考虑	313
4.3	光纤图像传输系统	321
4.3.1	光纤图像传输的一般考虑	321
4.3.2	光纤图像传输系统的调制方式	323
4.3.3	传输质量要求	332

• • •

4.3.4	设备举例	341
4.4	光纤数据传输系统	342
4.4.1	数据通信与数据传输	342
4.4.2	光纤基带数据传输	347
4.4.3	光纤局域网	350
4.4.4	³⁾ 光纤用户网	358
4.5	光纤通信系统的应用进展	364
4.5.1	同步数字系列(SDH)	364
4.5.2	海底光缆通信系统	367
4.5.3	光纤有线电视	371
4.5.4	军用光纤系统	375
4.5.6	塑料光纤传输系统	377
	结语	380
	参考文献	381
5	光纤传感器	
5.1	概述	382
5.1.1	引言	382
5.1.2	光纤传感器的分类	383
5.1.3	国外光纤传感器发展状况	387
5.1.4	我国光纤传感器发展现状	391
5.1.5	国内外光纤传感器研究动向	393
5.2	光的调制与检测	398
5.2.1	强度调制与检测	399
5.2.2	波长(颜色)调制与检测	413
5.2.3	频率调制与检测	419
5.2.4	相位调制与检测	423
5.2.5	偏振态调制与检测	442
5.3	光纤传感器的应用	447
5.3.1	光纤温度传感器	447
5.3.2	压力、振动、加速度和音响光纤传感器	461
5.3.3	光纤位移传感器	476
5.3.4	光纤角速度传感器(光纤陀螺)	482
5.3.5	光纤速度(流速)传感器	487

5.3.6	光纤电流、电压传感器	492
5.3.7	光纤磁场传感器	497
5.3.8	光纤电磁场传感器	506
5.3.9	光纤放射性射线传感器	510
5.3.10	光纤光谱(气体、液体)传感器	512
5.3.11	光纤医疗用化学量(pH值、氧饱和度)传感器	517
5.3.12	光纤图像传感器	519
5.4	光纤传感器成网技术和遥测系统	523
5.4.1	光纤传感器的成网技术	524
5.4.2	光纤传感器的遥测系统	523
5.4.3	光纤传感器网和遥测系统的估算	533
	参考文献	537

1 光纤与光缆

1.1 概 述

人类社会正步入信息时代,人们对信息交换的要求日益提高,交换的内容更趋丰富。由于光纤的信息容量极大,用光纤作为传输媒质的光纤通信已在全世界得到广泛的应用。

光纤又称光导纤维,是一种由双层玻璃纤维构成的传输光波的波导。它的外径通常只有 $125\ \mu\text{m}$ 。光波亦可看成是一种电磁波,与通常的波导相比,光纤是一种传输更高频率电磁波的介质波导。目前主要传输近红外光,传输波长为 $0.85\ \mu\text{m}$ 、 $1.3\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 。其频率比毫米波通信又提高了三个数量级。

以光信号作为通信手段由来已久,古代烽火通信即是最早的光通信。60年代激光技术发展起来后,大气激光通信成为热门,这些都是无线通信。至于使光信号沿着光纤传输的光有线通信则是70年代初开始迅速发展起来的一门新兴技术。

早在1930年前后就有人提出了由玻璃纤维传光的设想。到50年代,开始出现了在光学纤维中形成中心有高折射率分布的结构设计。但是它的传输损耗很大,即使是最透明的优质光学玻璃,损耗亦达 $1000\ \text{dB/km}$,显然不能满足通信要求。1966年,英国标准电信研究所的美籍华人高锟博士指出,玻璃中的光损耗主要是由其中所含的过渡金属离子的吸收损耗造成的,如能将这些离子含量降低到 10^{-6} 以下,则可使玻璃对光的吸收损耗下降到 $10\ \text{dB/km}$ 以下。1970年,美国康宁公司用化学气相沉积法(CVD法)制成了高纯度二氧化硅光纤,它的损耗为 $20\ \text{dB/km}$,使长距离传输成为可能。这一成就立即得到各国广泛重视,掀起了光纤通信

研究的热潮。其后,1973年美国贝尔电话研究所制得了损耗为2.5 dB/km的光纤。1976年日本电报电话公司茨城研究所与藤仓电线公司宣布制成了损耗为0.47 dB/km的光纤。目前光纤的损耗已达0.154 dB/km(1.55 μm 波长下),接近和达到了理论极限值。这些成就表明:光纤通信的中继距离可以比电传输线的长得多,十分有利于长途干线通信、跨洋海底光缆等方面的应用,而在市内及邻近城市间有可能实现长距离无中继传输;同时,由于光波频率极高,因此多路复用的潜力极大。目前多模光纤的带宽已可达几千兆赫·公里,而单模光纤的带宽则可达几百千兆赫·公里。因此,长距离大容量光纤通信已经实现。

光纤通信与其他现代通信相比具有如下优点:

(1) 保密性好,难以窃听。

(2) 光纤间的串音少,串音衰减可大于60 dB。

(3) 抗电磁干扰性好。光信号不受外界电磁场的干扰,光纤光缆可靠近高压输电线平行敷设而不受影响,可以高密度布线而仪器间互不引入干扰信号。由于光纤是介质材料,因此可在雷区敷设而不招致雷击。同时还可在核爆炸区使用,保证系统不受强电磁脉冲的破坏。

(4) 体积小、重量轻、敷设方便,可以充分利用有限的敷设空间。

(5) 玻璃原材料(二氧化硅)资源丰富。

因此,在最近的20年中,光纤通信取得了极为迅速的发展。光纤通信的应用范围已遍及邮电、铁道、电力系统、交通监控、计算机网络、军用、工业企业内部通信等领域。光缆线路及网络计划已扩大到数百甚至数千公里。横跨太平洋及大西洋的海底光缆系统已经建成。光纤通信的发展已可与60年代的半导体热潮相媲美,光纤通信业已成为一门新兴的工业。

我国的光纤通信研究从70年代中后期开始,现亦取得了相当快的发展,并已在市内电话、邮电通信干线、广播电视、电力系统、交通监控、军用及海底光缆等多个领域中推广应用。

1.2 光纤传输的基本原理

1.2.1 全反射

光在均匀介质中是沿直线传输的，当一束光射到两种介质的交界面时就会发生折射和反射。如图 1-1 所示，当一束光线由介质 1 射向介质 2 时，到达界面后一部分光线反射回介质 1 内，称为反射光。另一部分光线射入介质 2，称为折射光。这些光线与界面法线的夹角分别称为入射角、反射角及折射角。

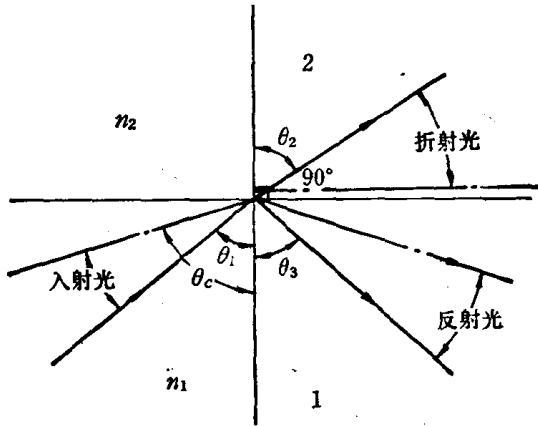


图 1-1 光线的折射与反射

业已证明：

- (1) 反射角 θ_3 必定等于入射角 θ_1 。
- (2) 折射角 θ_2 与入射角 θ_1 之间的关系服从斯乃尔定律：

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

式中 n_1 、 n_2 ——介质 1 及介质 2 的折射率。

由式 (1-1) 可知，若 $n_1 > n_2$ ，则 $\theta_2 > \theta_1$ 。因此当入射角 θ_1 增大到某一临界值 θ_c 时，如图 1-1 所示，折射角会达到 90° ，即折射光掠过界面。当入射角再增大时，光线全部反射，空气中没有折射光了，这种现象称为全反射。显然，全反射只有当光从折射率大的介质射向折射率小的介质时才能产生。所有入射角在全反射临界角

θ_c 与 90° 之间的入射光都能在界面发生全反射。由式 1-1 可得:

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \sin 90^\circ = \frac{n_2}{n_1} \quad (1-2)$$

1.2.2 光纤传输的基本原理

图 1-2 是折射率为突变型分布的光纤(即突变型光纤)中光线的折射与全反射。光纤由纤芯及包层两部分组成,纤芯折射率为 n_1 ,包层折射率为 n_2 ,而且 $n_1 > n_2$ (例如 $n_1 = 1.47$, $n_2 = 1.46$),其周围是空气(折射率 $n_0 = 1.0$)。当光线以某一角度 θ_0 射到光纤端面时,在端面发生折射进入光纤后又射到纤芯与包层界面。若 $n_1 > n_2$,则只要在界面的入射角大于全反射临界角 θ_c ,就能发生全反射。由于反射角与入射角相等,当光纤是均匀圆柱体时,该光线就可在光纤内所有纤芯与包层的界面处发生全反射而沿光纤全长传输(这里假设光纤是直线状态而没有弯曲的)。

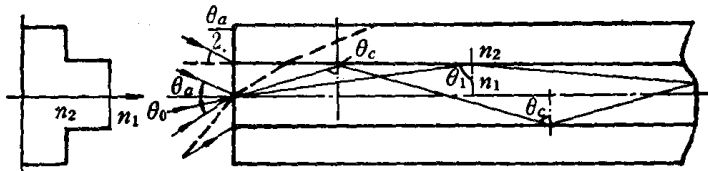


图 1-2 突变型光纤中光线的传播

由图 1-2 可见, θ_0 越小则 θ_1 越大。因此当端面入射角小于某一临界角 θ_a 时,就可达到 $\theta_1 > \theta_c$,这就是全反射条件。这里 θ_a 称为孔径角。 θ_a 的大小表示光纤对于光线的可接收范围,在 $2\theta_a$ 角锥体外的入射光线都会穿过包层散射掉。定义:

$$NA = n_0 \sin \theta_a \quad (1-3)$$

式中 NA ——数值孔径。对于周围介质是空气的情况, n_0 为 1,则 $NA = \sin \theta_a$ 。 NA 的大小反映了光纤接收入射光的能力。由式 (1-1)、(1-2)、(1-3) 可得:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1-4)$$

由式(1-4)可知, NA 决定于光纤材料的特性参数 n_1 与 n_2 的

• • •