



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

光纤通信

(第2版)

林达权 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

光纤通信

(第2版)

林达权 主编

高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育),是《光纤通信》普通高等教育“十五”国家级规划教材(高职高专教育)的修订版,是在多年教学改革和实践的基础上编写而成的。

全书共 16 章,分别为概述、光纤光缆、光纤参数的测试、光源、光电检测器、光放大器、光无源器件、光发送机、光接收机、光端机的工作原理、光同步传输网、SDH 复用原理、复用技术、接口、光缆线路维护、典型电路分析。

本书的特点是理论与实践紧密结合,深入浅出,通俗易懂,书中介绍的设备更新为最新设备。本书每章开头都有学习目标,每章结尾均有小结及复习思考题。

本书可作为高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院和民办高校电子信息类通信、应用电子、信息技术等专业的专业课教材,也可作为通信企业职工的培训教材及通信技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信 / 林达权主编. — 2 版. — 北京: 高等教育出版社, 2008.11

ISBN 978-7-04-025028-2

I.光... II.林... III. 光纤通信—高等学校: 技术学校—教材 IV.TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 137405 号

策划编辑 孙杰 责任编辑 孙薇 封面设计 张志奇 责任绘图 朱静
版式设计 王艳红 责任校对 刘莉 责任印制 陈伟光

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京七色印务有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 14.25
字 数 340 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2003 年 8 月第 1 版
2008 年 11 月第 2 版
印 次 2008 年 11 月第 1 次印刷
定 价 19.70 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究
物料号 25028-00

前 言

光纤通信由于自身的优越性以及其它相关学科的支持,近年来得到了飞速的发展。它与卫星通信、无线通信一起成为长途通信的三大支柱,其中以光纤通信为主体。

通信划分为电子学通信和光子学通信两个范畴。电子学通信是以电子作为信息载体的通信手段,光子学通信是以光子作为信息载体的通信手段。光纤通信属于光子学通信的范畴。

光纤通信是“信息高速公路”的主要基石,它是信息社会的重要支柱,它发展速度之快、应用范围之广、性能之优越出乎人们的预想。它以高速、大容量著称,传输速率已到达几十兆位/秒。它的潜力还很大,就通信容量而言,光纤通信至少可到达 10^3 Tb/s,目前实用化容量还不到 0.1 Tb/s。

在我国,1993年以前基本上是建设 PDH,到现在已经发展了三代。第一代是 PDH,第二代是 SDH,第三代是 SDH+DWDM。目前,我国光纤通信已由国内市场转向国际市场。本书是2003年出版的《光纤通信》的再版,该版本紧跟国内国际市场,理论紧密结合实际、通俗易懂,从光纤光缆和基本器件讲起,涉及三代光纤通信的主要问题,重点突出技能培养。它是一本从初学至精通光纤通信基本知识的教材。

全书共16章,其中第2章、第15章由段景汉副教授编写,第6章第3节、第16章由李扬工程师编写,其余各章节由林达权教授编写,并由林达权统稿。

本书专门为高职高专院校学生所写,适用于该层次的读者,也可作为通信企业职工的培训教材,还可供从事光纤通信的工程人员参考。

本书由李文海教授和张敏副教授审阅,两位教授对本书的编写提出了很多宝贵意见和建议;在选题和成书过程中,还得到了祖诒教授、陈康教授、深圳中兴通讯股份有限公司的大力支持,黄良碧副教授阅读了所有章节,提出了宝贵意见。在此,一并表示衷心的感谢。

由于时间仓促和水平所限,书中可能有不当或错误之处,望读者批评指正。

编 者

2008年6月

目 录

第 1 章 概述	1	5.1 作用与要求	47
1.1 光纤通信的发展概况	1	5.2 PN 结光电二极管	48
1.2 光纤通信系统的组成	2	5.3 PIN 光电二极管	49
1.3 光纤通信系统所涉及的光纤光缆和器件	3	5.4 雪崩光电二极管	50
1.4 光纤通信的优点	4	小结	51
1.5 光纤通信的发展趋势	5	复习思考题	52
小结	7	第 6 章 光放大器	53
复习思考题	7	6.1 光放大器的类型	53
第 2 章 光纤光缆	8	6.2 掺铒光纤放大器的基本组成和工作原理	54
2.1 光纤光缆的结构	8	6.3 拉曼放大器	55
2.2 光纤的导光原理	10	6.4 EDFA 和 DRA 的应用	62
2.3 光纤的传输特性	15	小结	62
2.4 单模光纤和多模光纤	17	复习思考题	62
2.5 光缆线路敷设	18	第 7 章 光无源器件	63
2.6 光缆的接续	23	7.1 光纤活动连接器	63
小结	29	7.2 光衰减器	64
复习思考题	29	7.3 光波分复用器	65
第 3 章 光纤参数的测试	31	7.4 其他无源器件	67
3.1 测试项目和要求	31	小结	68
3.2 光纤衰减系数的测试	32	复习思考题	69
3.3 单模光纤色散特性的测试	34	第 8 章 光发送机	70
3.4 多模光纤衰减系数的测试	36	8.1 LED 光发送盘	70
3.5 多模光纤带宽的测试	36	8.2 LD 光发送盘	71
小结	37	8.3 信号经过发送支路时进行的处理	75
复习思考题	37	8.4 平均发送光功率测试	76
第 4 章 光源	38	小结	76
4.1 引言	38	复习思考题	77
4.2 半导体的发光原理	38	第 9 章 光接收机	78
4.3 半导体激光器 LD	39	9.1 前置放大器方框图	78
4.4 发光二极管 LED	43	9.2 光接收盘	79
小结	45	9.3 信号经过接收电路时进行的处理	79
复习思考题	46	9.4 接收电路的测试	80
第 5 章 光电检测器	47	小结	82

复习思考题	83	13.2 WDM	158
第 10 章 光端机的工作原理	84	13.3 DWDM	158
10.1 概述	84	小结	164
10.2 光端机的组成	84	复习思考题	164
10.3 PDH 光端机设备举例	88	第 14 章 接口	165
小结	102	14.1 光接口	165
复习思考题	102	14.2 电接口	173
第 11 章 光同步传输网	103	小结	175
11.1 同步 SDH 概述	103	复习思考题	175
11.2 STM 帧结构	106	第 15 章 光缆线路维护	176
11.3 SDH 系统及 SDH 设备	110	15.1 光缆线路维护的基本任务与方法	176
11.4 基本网络单元的工作原理	117	15.2 光缆线路维护的主要内容	179
11.5 复用过程与参考模型的对应关系	125	15.3 线路障碍的判断与处理	182
小结	126	小结	192
复习思考题	127	复习思考题	193
第 12 章 SDH 复用原理	128	第 16 章 典型电路分析	194
12.1 基本复用结构	128	16.1 DWDM	194
12.2 STM-1 信号的形成	130	16.2 DWDM 设备与应用	197
12.3 STM-N 信号的形成	139	16.3 ZXWM M900 机柜的配置	203
12.4 指针	141	16.4 维护与故障处理	205
12.5 开销字节	150	小结	214
小结	156	复习思考题	215
复习思考题	156	中英文名词术语对照	216
第 13 章 复用技术	157	参考文献	221
13.1 复用技术的基本概念	157		

第 1 章

概 述

学习目标

- 了解光纤通信的发展概况
- 掌握光纤通信的组成
- 掌握光纤通信的优点

1.1 光纤通信的发展概况

1880年,贝尔发明了光话系统,但光通信的关键性困难——光源和传光介质没有解决,所以长达80年左右的时间内,光通信没有多大的进展。

1960年美国科学家梅曼发明了世界上第一台红宝石激光器,1960年贝尔实验室又发明了氦-氟激光器。

激光器的发明使光通信的研究有了进展。

对于传光介质,在20世纪60年代初出现了研究大气激光通信的热潮。这种通信方式,优点是无需敷设线路,经济方便。缺点是受自然条件的影响太大,难于实现。

在大气激光通信的研究受阻之后,又有人进行地下光波通信的实验。但这种通信方式,系统复杂、造价高、测试困难,也无法实现。

早在1954年,出现传光用的纤维,但衰减达1000 dB/km,无法实用。

1964年,高琨博士根据介质波导理论,提出光纤通信的概念,他指出:只要设法消除玻璃中的杂质,做出衰减低于20 dB/km的光纤是完全可能的,光纤损耗极限还远低于这个数值。这一重大研究成果,使光纤通信的研究出现了生机。所以英籍华人高琨博士被誉称为“光纤通信之父”。

1970年是光纤通信史上闪光的一年。这一年美国康宁玻璃公司拉制出了20 dB/km的低损耗光纤,同一年,贝尔实验室又研究成功了在室温下可连续工作的激光器。此后,光纤的损耗不断下降,1972年降至4 dB/km,1973年降至1 dB/km,1976年降至0.5 dB/km,同年美国首先在亚特兰大成功地进行了速率为44.763 Mb/s、距离为10 km的光纤通信系统的现场试验,使光纤

通信向实用化迈进了第一步。

1980年,多模光纤通信系统投入了商用,单模光纤通信系统也进入现场试验。

1983年,美、日、德、法、英、荷、意等国都先后宣布以后不再使用电缆,而改用光缆。

随着光纤通信技术的日益发展,光缆不仅敷向大陆,而且敷向海底。美、日、英三国联合建立的太平洋海底光缆,全长8300 km,使用840 Mb/s系统,连接美、日、新西兰等国。由美、英、法三国联合建设的横跨大西洋的海底光缆,全长6000 km,使用560 Mb/s系统,1991年开通使用。

我国用了不到15年的时间,从研制至推广应用,其发展之快、应用范围之广、规模之大、所涉及学科之广是前所未有的。在世界技术革命的浪潮中,光纤数字通信技术异军突起,迅猛发展,它的发展速度超出人们的预想,光纤通信被誉为通信工具中的王牌。

光纤通信已经经历了三代,第一代使用PDH技术,此时的网络比较简单,适合于小容量传输,传输速率为2.048 Mb/s、8.448 Mb/s、34.368 Mb/s、139.264 Mb/s;第二代使用SDH技术,是宽带传输,速率为155 Mb/s、622 Mb/s、2500 Mb/s,适合于用户传输网络建设和市话传输网络建设;第三代使用SDH+DWDM技术,性能卓越,使用光中继传输,向全光通信迈进了一大步,使用波分复用技术,通信容量已达10 Gb/s、20 Gb/s、40 Gb/s、80 Gb/s和320 Gb/s。现在,光纤通信正在向高速率、大容量和智能化的方向发展。光纤通信、卫星通信和无线通信是现代化通信三大支柱,其中光纤通信是主体。

1.2 光纤通信系统的组成

现代的光纤通信系统有准同步光纤通信系统(PDH)、同步光纤通信系统(SDH)和波分复用系统(DWDM)等。PDH是Plesiochronous Digital Hierarchy的缩写,SDH是Synchronous Digital Hierarchy的缩写。WDM是Wavelength Division Multiplexing的缩写,是光波分复用。DWDM是Dense Wavelength Division Multiplexing的缩写,是密集波分复用。

最基本的光纤通信系统组成如图1.1所示。图中,LD,LED为光源,PIN,APD为光电检测

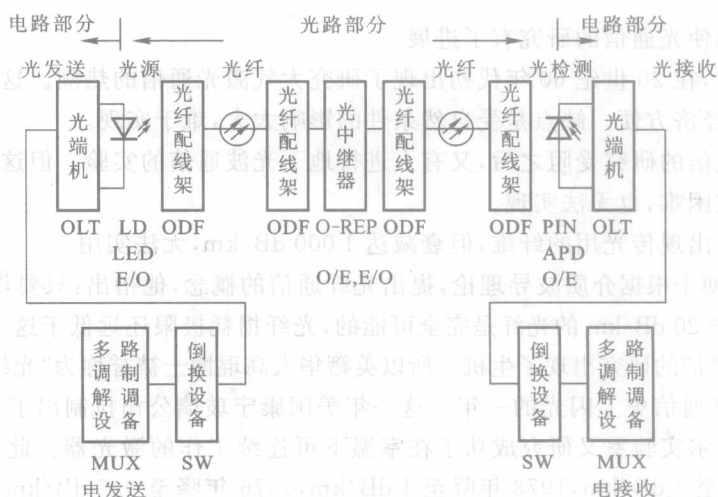


图 1.1 光纤通信系统的基本组成

器,E/O表示将电转换为光,O/E表示将光转换为电。它由多路调制解调设备、光端机、光纤、中继器等组成,通信是双向的。现在以一个方向为例,说明其工作的主要过程。它包括6个部分,即电发送侧、光发送侧、光纤、中继器、光接收侧、电接收侧。电发送侧和电接收侧属于多路调制解调设备(电端机),同理,光发送侧和光接收侧属于光端机。此外还有一些附属设备,如图中所画的光纤配线架。

1.2.1 电发送侧

电发送侧的主要任务是将电信号进行放大、复用、成帧等处理,然后输送到光发送侧。

1.2.2 光发送侧

光发送侧的主要任务是将电信号转换为光信号,并进行处理,然后耦合到光纤。

1.2.3 光纤

光纤的主要任务是传送光信号。

1.2.4 中继器

中继器的主要任务是放大和整形。它将接收的光信号转换为电信号,然后进行处理,处理完成后,又将电信号转换为光信号,继续向前传送。

1.2.5 光接收侧

光接收侧主要任务是接收光信号,并将光信号转换为电信号。

1.2.6 电接收侧

电接收侧主要任务是对电信号进行解复用、放大等处理。

经过上述处理后,就可以进行双向通信。

1.3 光纤通信系统所涉及的光纤光缆和器件

从图1.1可以看出,整个系统属于光电系统:一部分属于电子电路,传输电信号;一部分属于光域,传输光信号。用来传输光信号的有:光纤、光源、光电检测器、光放大器和光无源器件。

1.3.1 光纤

光纤是光纤通信的传输介质,其任务是传送光信号。光纤通信系统波长在近红外波长。光纤通信的传输介质材料是石英,它属于介质波导,它是一个圆柱体,由纤芯和包层组成。纤芯折射率为 n_1 ,包层的折射率为 n_2 ,且 $n_1 > n_2$ 。当满足全反射条件时,就可将光限制在纤芯中传播。光纤的主要特性是损耗和色散。损耗用衰减系数表示,其单位为dB/km。

光纤有三个低损耗窗口,波长为

$\lambda_0 = 0.85 \mu\text{m}$ 短波长波段

$\lambda_0 = 1.31 \mu\text{m}$ 长波长波段

$\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ 长波长波段

光纤的色散是指光纤对不同的频率成分和不同的模式成分传输速度不同而使信号散开的现象。色散用色散系数表示,其单位为 $\text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。信号的散开,即色散的存在影响传输带宽,进而影响光纤的传输容量和传输距离。

1.3.2 光源

光源的作用是将电转换为光,即完成电光转换。常用的光源有激光器(LD)和发光二极管(LED)。LD和LED是光发送侧的主要器件之一。激光器性能较好,价钱较贵。发光二极管性能稍次,价钱较低。

1.3.3 光电检测器

光电检测器的作用是将光转换为电,即完成光电转换。常用的光电检测器有PIN光电二极管和APD光电二极管,其中APD有放大作用。

1.3.4 光放大器

光放大器的作用是放大光信号,它接收来自于光纤的光信号,将光信号放大后,又送至下一段光纤,继续进行传送,在全光通信中将起到重要作用。

光放大器的种类有:半导体光放大器、非线性光纤放大器和掺杂光纤放大器。其中最重要的是掺铒光纤放大器。

1.3.5 光无源器件

光无源器件与电无源器件一样重要,光无源器件是为光路服务的。在光纤通信中除了使用上述光器件之外,还使用了如下的一些光无源器件。有光纤活动连接器、固定连接器、光衰减器、无源光耦合器、光波分复用器、光隔离器和光开关等。

1.4 光纤通信的优点

光纤通信之所以成为通信工具中的王牌,是因为它具有以往的任何通信方式不可比拟的优越性。

1.4.1 容量大

大家知道,载波的频率越高,所能携带的信息量就越大。通常多模光纤每千米的带宽为 $1 \sim 10 \text{ GHz} \cdot \text{km}$,单模光纤每千米的带宽可达 $1.5 \text{ THz} \cdot \text{km}$ 以上。因此,可以说光纤是构成信息高速公路的主要传输通道。

1.4.2 传输损耗小

目前的单模光纤在 $1.31\ \mu\text{m}$ 处的传输损耗约为 $0.35\ \text{dB/km}$, 在 $1.55\ \mu\text{m}$ 处的传输损耗低达 $0.2\ \text{dB/km}$ 。传输损耗小, 就意味着无中继传输距离远。光纤不仅损耗低, 而在相当宽的频带内损耗几乎不随频率的变化而变化, 较之同轴电缆的损耗按 \sqrt{f} 规律增加要优越得多。

1.4.3 抗干扰性强

光纤通信抗干扰性强的优点主要体现在以下三点。

① 由于光纤信道带宽很大, 特别适合于采用数字通信方式, 而抗干扰性强又正是数字通信的一大优点。

② 同一条光缆中不同光纤芯线之间几乎不存在相互间的串扰, 因为光信号在光纤中传输时, 对外辐射很小, 因此, 保密性好。

③ 制造光纤用的材料为绝缘介质, 因此, 即使在强电磁场环境中应用, 也不受外界的电磁干扰。

1.4.4 体积小, 质量轻

相同容量的光缆与电缆相比较, 直径要小几倍到十几倍, 质量要轻几倍到几十倍。

1.4.5 原材料资源丰富

制造电缆用的铜材料, 地球上的资源非常有限; 而制造光纤用的二氧化硅材料则非常丰富。

就其经济性而言, 光纤通信在长途大容量系统中已显示出了明显的优势, 而在用户线路上使用光缆传输, 还存在着成本过高的问题。随着光纤通信技术的不断发展及其产业的形成, 光纤通信在经济上的优势会更加显现出来。

1.5 光纤通信的发展趋势

目前最为成熟的强度调制-直接检波方式仍属于一种最原始的调制、解调方式; 而目前的光纤通信系统, 其带宽的利用率还很低, 其利用率一般不超过 1% 。下面简单介绍光纤通信的发展趋势。

1.5.1 光波分复用系统

光纤在很宽的波段上都具有很小的传输损耗。如从 $1.2\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 范围内, 其频率间隔可达 $125\ \text{THz}$, 若每个信道间隔按 $5\ \text{GHz}$ 计算, 则可在一根光纤中传输 2500 个信道, 其容量之大令人难以置信。充分利用光纤巨大带宽资源的一种有效方法就是采用光波分复用(WDM)技术。

1.5.2 相干光纤通信

目前广泛应用的强度调制-直接检波的光纤通信, 虽然还在向高速率发展, 但已经受到了半

导体激光器的极限调制速率、接收机灵敏度难以进一步提高等种种条件的限制。正像无线通信从强度调制、直接检波的方式向超外差方式发展那样,光纤通信也可以利用类似于外差方式的技术发展成为相干光纤通信。

1.5.3 超长波长光纤通信

SiO₂ 石英系光纤的最低损耗值已接近理论值,要实现长距离通信,就要寻求新的光纤材料。通常,把 2 μm 以上具有极低损耗的光纤称为超长波长光纤(或红外光纤),这种光纤构成的系统称为超长波光通信系统。目前考虑的新型光纤材料主要有三类,各种材料的低损耗波长和理论损耗极限值见表 1.1。

表 1.1 新材料特性

类 属	材 料	结 构	透光范围/μm	衰减/(dB/km)	损耗波长/μm
重金属氧化物	GeO ₂	玻 璃	~5.7	0.15	1.7~1.8
	GeO ₂ - Sb ₂ O ₂				
硫族化物	GeS ₂	玻 璃	0.5~11	10 ⁻²	5~6
	GeSe ₃	玻 璃	~12	10 ⁻²	4.5
卤 化 物	BeF ₂	玻 璃	0.15~0.45	10 ⁻²	1.05
	ZrF ₄ - ThF ₄ - BaF ₂	玻 璃	0.3~7	10 ⁻² ~10 ⁻³	3
	TlBr - TlI	多 晶	2~3.5	10 ⁻² ~10 ⁻⁵	10.6
	Ag(Cl/Br)	多 晶 单 晶	0.43~18	10 ⁻³	5

1.5.4 光纤孤子通信

光纤孤子通信的特点是:

① 利用光纤中的非线性现象。当光纤入射功率较低时,光纤可以认为是线性系统,随着光纤入射功率的增加,光纤中的非线性现象就逐渐明显。在非线形现象中,出现一种被称为超短脉冲孤子的现象。利用这种“超短脉冲孤子”进行通信,称为光纤孤子通信。

② 光纤孤子脉冲具有自整形特性。利用光纤中的非线性现象,超短脉冲孤子在传输过程中,前沿速度慢,后沿速度快,有自整形作用;由于光纤的色散效应,光脉冲在传输过程中有展宽现象。当展宽达到平衡状态时,就会得到无畸变脉冲,这也体现超短脉冲的自整形特性。

③ 能保持脉冲的 ps 量级脉宽和幅度,能传送极长的距离。

④ 光纤孤子脉冲通信系统还在研究中。

1.5.5 全光通信系统

现在的光纤通信使用光电转换技术,这使得系统的设备复杂,稳定性和可靠性不高;而且信号容易失真,影响通信质量。以后要向全光方向发展。全光就是不使用光电转换技术,称之为“全光通信系统”。

小 结

光纤通信正向高速度、大容量、智能化的方向发展。

最基本的光纤通信系统由电端机、光端机、光纤(光缆)和中继器组成。电端机主要用来进行复用和解复用处理,光端机主要用来进行 E/O 或 O/E 处理,光纤用来传送光信号,中继器用来进行 E/O 和 O/E、放大、整形处理。

光纤通信系统主要有光纤光缆、光源(LD 和 LED)、光检测(PIN 和 APD)、光放大器、光无源器件等。

复习思考题

1. 光通信的发展主要遇到了什么样的困难和解决了什么样的问题?
2. 光纤通信系统由哪些部分组成?
3. 光纤通信的优点有哪些?

附 录 光 纤 光 学

附录一 光纤通信系统组成及工作原理图



附录二 光纤通信系统的主要性能指标

第 2 章

光纤光缆

学习目标

- 掌握光纤的基本结构
- 掌握光纤的传光原理
- 掌握光纤的衰减和色散特性
- 了解光缆的敷设和熔接

2.1 光纤光缆的结构

1. 光纤的结构

光纤是光导纤维的简称,它是一种新的导光材料。现在实用的光纤是一根比人的头发稍粗的玻璃丝。光纤外径一般为 $125\sim 140\ \mu\text{m}$,芯径一般为 $3\sim 100\ \mu\text{m}$ 。光纤在光通信系统中的作用是在不受外界干扰的条件下,低损耗、小失真地将光信号从一端传送到另一端。

光纤的结构一般是双层或多层的圆柱体,如图 2.1 所示。中心部分是纤芯,纤芯以外的部分称为包层。纤芯的作用是传导光,包层的作用是将光波封闭在光纤中传播。为了达到传导光波的目的,需要使纤芯材料的折射率 n_1 大于包层的折射率 n_2 。为了实现纤芯与包层的折射率差,需要使纤芯与包层的材料有所不同。目前实际纤芯主要是石英光纤,其中的主要成分是石英。如果在石英中掺入一定的掺杂剂,就可作为包层材料,经这样的掺杂后,上述目的就可达到了。

目前广泛应用的掺杂剂主要是二氧化锗(GeO_2)、五氧化二磷(P_2O_5)、三氧化二硼(B_2O_3)、氟(F)。前两种用于提高石英材料的折射率,后两种用于降低石英材料的折射率。

实用的光纤并不是裸露的玻璃丝,而是要在它的外面附加几层塑料涂层,以增加

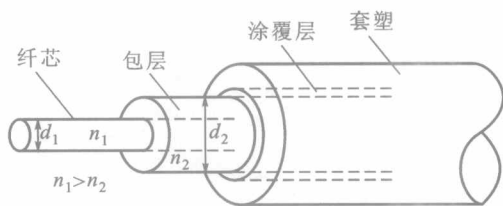


图 2.1 光纤的结构示意图

光纤的强度。经过涂覆以后的光纤称为光纤芯线。涂覆有一次涂覆和二次涂覆。同时光纤可分为紧套光纤和松套光纤,如图 2.2 所示。

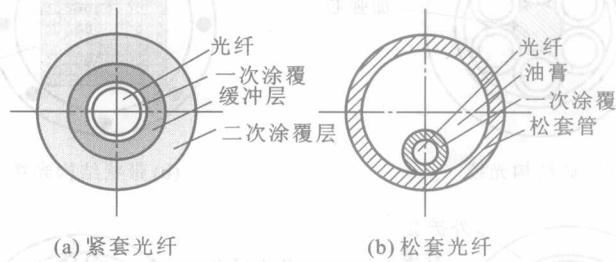


图 2.2 光纤芯线结构

紧套光纤是二次涂覆光纤,其目的是为了减小外应力对光纤的作用。紧套光纤的一个优点是结构相对简单,无论是测量还是使用都比较方便。

松套光纤即光纤可以在套塑层中自由活动。其优点主要是:机械性能好,具有较好的耐侧压力能力;温度特性好;防水性能好,管中充油膏,水分不能进去;有利于提高光纤的稳定可靠性,便于成缆,一般不会引入附加损耗。松套光纤一般都制成一管多芯的结构。

2. 光纤的成缆

(1) 光纤为什么要成缆

将若干根光纤按一定方式加上护套和加强材料组成一条光缆。一条光缆所容纳的光纤数与技术条件有关,有 4、8、12、...、144、...根。

光纤之所以要成缆,有如下理由:

- ① 如果不成缆,过大的张力会使光纤断裂。
- ② 光纤与其他元件组合成缆后,使其具有良好的传输性能以及抗拉、抗冲击、抗弯曲等机械性能。
- ③ 可根据不同的使用情况,制成不同结构形式的光缆。
- ④ 可加入金属线,以传送电能。

(2) 光纤成缆时应考虑的问题

光纤成缆时应考虑以下几个问题:

① 首先应考虑机械性能。为了提高机械性能,在拉制光纤时,可加涂覆层;考虑成缆产生的应力,在光缆中加入固件。

② 其次考虑光学性能。一般光学性能在制造中考虑。

③ 最后考虑光缆结构。光缆的结构主要取决于应用场合。不同的应用场合要求使用不同结构的光缆,主要应用场合有架空、水底和地下管道等。

3. 光缆结构

图 2.3 给出几种光缆结构图,图 2.3(a)是经典结构即层绞式光缆,图 2.3(b)是带状结构光缆,图 2.3(c)是骨架结构光缆,图 2.3(d)是单元结构光缆。

(1) 经典结构光缆

经典结构光缆如图 2.3(a)所示。中央有加强芯,外边有外护套,在加强芯的周围集合数根

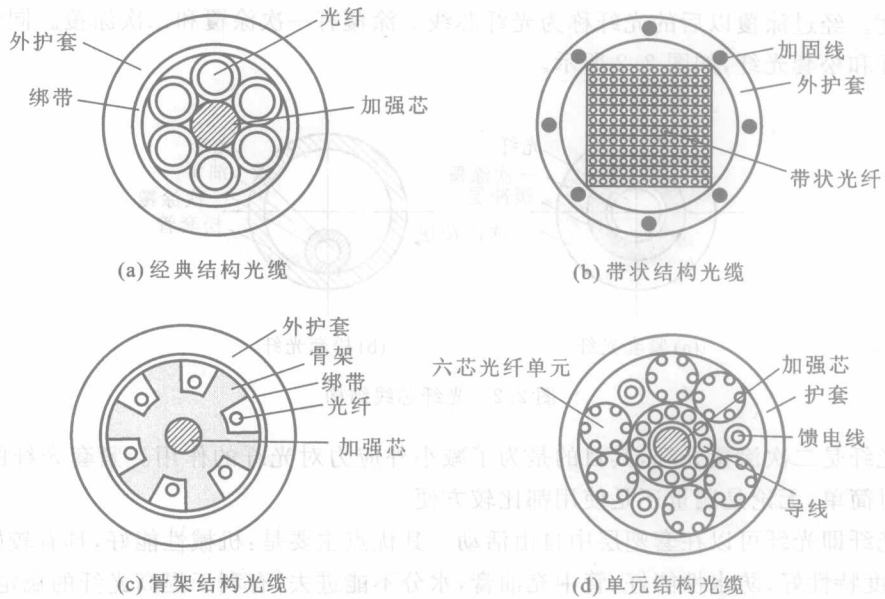


图 2.3 光缆结构

松套结构光纤。这种结构的光缆能很好地保护光纤,光缆敷设时引起损耗变化小。适合于制作芯线比较少的光缆,一般限于几芯到几十芯。实用中也有一百多芯的光缆。

(2) 带状结构光缆

带状结构光缆如图 2.3(b)所示。由 4~12 芯的光纤构成光纤带,然后由光纤带构成光缆。适合于制作 100 芯以上的高密度光缆。

(3) 骨架结构光缆

骨架结构光缆如图 2.3(c)所示。它是将一次涂覆的光纤置于骨架中,使光纤免受各种外力的影响。

(4) 单元结构光缆

单元结构光缆如图 2.3(d)所示。中央有加强芯,它将几根或几十根光纤制作成缆芯单元,再将几个缆芯单元绞合成光缆。这种结构适合于制作十到几百根光纤的光缆。

2.2 光纤的导光原理

光具有两重性,既可以把光看成光波,也可以把光看成是由光子组成的粒子流。光纤的导光原理可以使用两种理论来解释:射线理论和波动理论。射线理论把光作为光线处理。比较直观、易懂,但它是一种近似方法,只能作定性分析。波动理论要解麦克斯韦方程,它很严密,有定量结果,但较复杂。

2.2.1 从射线理论分析光纤的导光原理

1. 光纤的导光原理

光纤是怎样把光波传向远方的呢？因为光具有两重性。所以简单直观的解释，是从光线的观点来看光的传播——光是通过全反射来进行传播的。

光进入光纤后的射线传播，通过 3 种介质和 2 种界面进行。这 3 种介质是空气、纤芯和包层。空气的折射率为 n_0 ($n_0 \approx 1$)，纤芯的折射率为 n_1 ，包层的折射率为 n_2 。空气和纤芯端面之间形成界面 1，纤芯与包层之间形成界面 2。在界面 1，其入射角记为 θ_0 ，折射角记为 θ 。在界面 2，其入射角记为 ϕ_1 ，折射角记为 ϕ_2 。

当 $\phi_2 = 90^\circ$ ，称为临界情况，此时的人射角 ϕ_1 记为 ϕ_c 。

(1) 临界状态时光线的传播情况

临界状态时光线的传播情况如图 2.4(a) 所示。因为在界面 2 上：

$$\text{折射角 } \phi_2 = 90^\circ$$

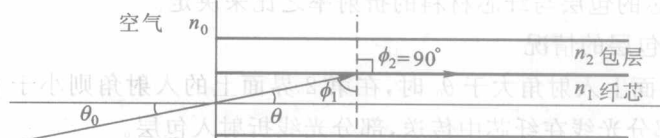
$$\text{入射角 } \phi_1 = \phi_c$$

所以在界面 1 上有

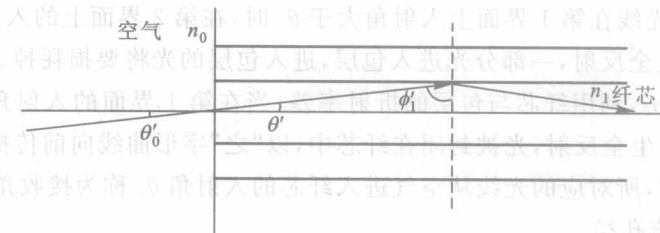
$$\text{折射角 } \theta = 90^\circ - \phi_c$$

现在来求界面 1 上的入射角 θ_0 。根据折射定理有

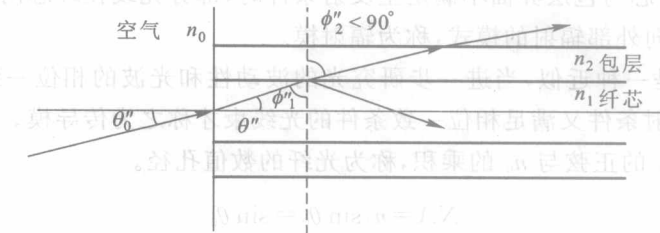
$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta = n_1 \sin(90^\circ - \phi_c) = n_1 \cos \phi_c \quad (2.1)$$



(a) 临界状态



(b) 全反射状态



(c) 部分光进入包层状态

图 2.4 光线的反射和传播