

国家级特色专业『通信工程』系列教材

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

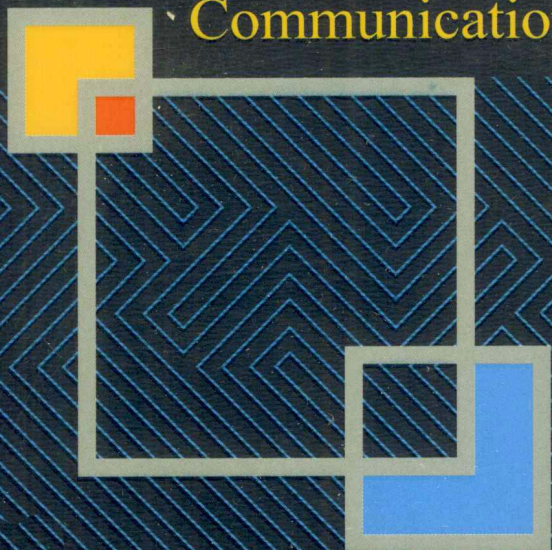
光纤通信 (第2版)

顾婉仪 主编

顾婉仪 黄永清 陈雪 张杰 张民 喻松 编著

Optical Fiber

Communications (2nd Edition)



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



名师名校

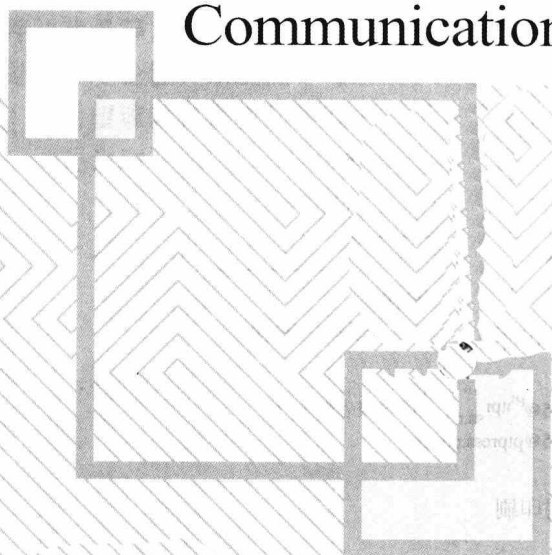
国家级特色专业『通信工程』系列教材
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

光纤通信 (第2版)

顾婉仪 主编
顾婉仪 黄永清 陈雪 张杰 张民 喻松 编著

Optical Fiber

Communications (2nd Edition)



人民邮电出版社

北京



名师名校

图书在版编目 (CIP) 数据

光纤通信 / 顾畹仪主编. — 2版. — 北京: 人民邮电出版社, 2011.9

国家级特色专业“通信工程”系列教材 21世纪
高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-25557-0

I. ①光… II. ①顾… III. ①光纤通信—高等学校—教材 IV. ①TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第139869号

内 容 提 要

本书系统地讲述了光纤通信的基本理论和关键技术, 主要内容包括光纤的传输理论(射线光学理论和波动光学理论)和传输性质(损耗、色散和非线性光学效应), 半导体激光器的工作原理、性质、光源的直接调制与间接调制、调制格式和激光发射机, 光电检测器的工作原理和性质、直接检测光接收机的组成、噪声的分析与灵敏度的计算方法、相干光检测光接收机, 光纤通信系统的构成、性能参数和系统的设计、光载无线技术, 各种无源光器件(尤其是波分复用器件)的基本原理、性质及其在光通信中应用, 光网络的发展与演变、光传送网、自动交换光网络、分组传送网、城域与接入光网络的组成结构、关键技术和发展趋势, 大容量 WDM 系统超长传输技术如色散补偿、光时分复用、量子通信, 光纤通信的测量技术(包括测量的标准、光纤特性测量、光器件的测量和光纤通信系统的测量)等。

本书系统性强, 论述深入浅出, 可作为通信类和电子信息类大学本科生教材, 也可作为光纤通信领域科技工作者的参考书。

国家级特色专业“通信工程”系列教材

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材

光纤通信(第2版)

-
- ◆ 主 编 顾畹仪
 - 编 著 顾畹仪 黄永清 陈雪 张杰 张民 喻松
 - 责任编辑 滑 玉
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 20.5 2011 年 9 月第 2 版
字数: 499 千字 2011 年 9 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-25557-0

定价: 43.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

自 20 世纪 70 年代以来，光纤通信一直以惊人的速度发展着，它为通信网络提供了难以想象的传输带宽，成为信息网络最主要的传输手段。目前，无论是在陆地还是在海底，在世界范围内都已形成了拥有巨大传输容量的光纤通信网络，为迅速增长的信息流量提供了宽敞、可靠的传送平台。

本教材的作者们长期从事光纤通信的科研和教学工作，圆满完成过大量国家自然科学基金、国家 863 和国家攻关项目，具有丰富的研究经验和丰硕的研究成果，编写过多本教材和专著，积累了丰富的教学经验。

《光纤通信》一书是最新出版的用于通信工程和电子信息工程等专业的本科生教材。该书是普通高等教育“十五”国家级教材，作者总结了多年来的科研成果和教学经验，参考了大量国内外的相关资料，系统讲述了光纤传输、光收发端机、光纤通信系统与网络、器件与测量等方面的基本原理和关键技术，反映了光纤通信的最新技术和当前的研究水平，是一本理论性、系统性、可读性和时新性均优秀的本科教材。

希望该教材在教学实践中不断完善，为培养我国光纤通信领域的科技人才做出贡献。是为序。



中国科学院资深院士

北京邮电大学名誉校长

2005 年 12 月

第2版 前言

本书自 2006 年出版以来受到广大读者的关注，作者感谢读者的厚爱和提出的宝贵意见。

五年来，光纤通信有了长足的发展。首先，随着通信流量的迅速增长，光纤通信系统持续向高速率、大容量、高频谱效率的方向发展。为了适应这一发展需求，新型外调制模块和光电检测器、高阶矢量调制格式、相干光检测和数字信号处理等技术受到人们的关注并得到迅速发展。其次，光网络的建设已颇具规模，自动交换光网络（ASON）和光传送网（OTN）已由研究阶段走向实用化；2005 年问世的分组传送网（PTN）也已推出系列产品，开始了商用；光纤到户的建设也已提到日程。另外，人类社会不断增长的随时随地获取宽带信息的需求，促进了光与无线通信的融合，用低损耗、大容量的光纤通信系统承载宽带无线信息成为发展的必然趋势，Radio over Fiber（RoF）成为热点研究课题。在 RoF 的研究中，不仅限于用光纤将射频信号或基带信号拉远，而且研究用光子学的技术与方法，解决微波/毫米波通信中的难点问题。总而言之，在过去的五年中，光纤通信技术发展演变迅速，新的光电器件、新的技术层出不穷。

为了保持教材的时新性，我们对本书进行了修订。在本次修订中，我们根据发展情况对原有内容进行了删减，并补充了近五年来发展迅速且有应用前景的新技术，同时，保持教材的总篇章和字数基本不变。

本书的不当之处，敬请广大读者批评指正。

从1970年第一批损耗较低的光纤问世至今的35年中,光纤通信以惊人的速度在发展,迅速成熟并得到广泛应用,成为主导的传送技术,在为通信网络提供巨大的传输和吞吐容量的同时,也不断地冲击着通信技术的各个领域发生变革,在人类信息化的进程中扮演着重要角色。

回顾光纤通信的发展历史,1970年是一个重要的里程碑。在这一年,美国的康宁玻璃公司研制出损耗为20dB/km的石英光纤,美国和日本同时实现了半导体激光器在室温下的连续工作,既证明光纤作为通信的传输媒质是大有希望的,同时又为光纤通信提供了体积小、容易调制的光源,为光纤通信的迅速发展和广泛应用拉开了序幕。几年后,光纤在850nm的损耗已降到2dB/km左右,半导体激光器和光电检测器的性能也不断提高,寿命不断加长,到1976年,第一个速率为44.7Mbit/s的光纤通信系统在美国亚特兰大顺利进行了现场实验,向实用化迈出坚实的一步。该系统经过全面性能测试后,很快商用化。20世纪80年代,光纤通信以其巨大的带宽、很低的损耗在通信网络中获得广泛的应用,并逐渐代替了传统的电缆通信。

20世纪80年代,为了进一步降低光纤的损耗,并获得更大的传输带宽,光纤通信经历了由850nm的多模光纤通信系统向1300nm的单模光纤通信系统的转变,并向1500nm过渡。这是因为在长波长时光纤的损耗可以降得更低,光纤在850nm的损耗为2dB/km左右,但在1300nm和1500nm时,损耗可以分别降到0.5dB/km和0.2dB/km以下。由多模光纤向单模光纤的过渡是为了消除光纤的模间色散,获得更大的传输带宽。在这个时期,光纤通信系统的速率也以超摩尔定律的速度迅速增长。

20世纪90年代初,掺铒光纤放大器(EDFA)以其优越的性能开始在光纤通信中应用,这促使了密集波分复用(DWDM)技术的发展。在20世纪90年代,基于光纤通信的这两项重大突破:DWDM+EDFA光纤传输系统和光网络的蔚然兴起。DWDM技术为单根光纤提供了不可思议的带宽容量,到2001年,OFC会议上报道的单根光纤的传输容量已达到10.92Tbit/s。DWDM+EDFA提供了大容量、长距离无电中继传输的可能,也促使了光网络的发展。联合国“1999世界电信论坛会议”副主席约翰·罗斯(John Roth)在论坛开幕演说时提到:光纤通信容量每9个月会增加一倍,但成本降低一半,比电子晶片发展速度的每18个月还快。按如此疯狂的速度发展,光网络注定会在世界范围的电信基础结构中扮演极其重要的角色。

20 世纪 90 年代中后期, 基于 WDM 技术的全光通信网引起众多的关注。全光通信网主要特点是将光交叉连接设备和光分插复用设备引入网络, 在光层实现信号的传输、复用、交换和选路功能, 构成灵活、透明、可动态重构的光网络。全光通信网被 ITU-T 定名为光传送网 (OTN)。

进入 21 世纪后, 增加网络的智能成为人们新的追求, 高度智能化的自动交换光网络 (ASON) 也应运而生。ASON 将控制与管理功能分离, 通过控制平面的信令、路由和自动发现机制实现连接的自动建立、维护和删除, 通过网络的智能使 QoS 保证和流量工程的特征十分明显, 可以支持带宽按需分配 (BoD)、光虚拟专用网 (OVPN)、组播等新业务的需求, 成为光网络发展演变的主流方向。与此同时, 标记光交换、突发光交换和分组光交换的研究也方兴未艾。

目前, 光纤通信已经广泛应用到长途骨干网、城域网和接入网中, 成为支撑信息网络的重要柱石之一。光纤通信之所以能获得如此迅速的发展, 与其特有的优越性能是分不开的。光纤通信具有以下优点:

- 传输损耗小, 带宽大;
- 尺寸小, 重量轻, 便于运输与敷设;
- 抗电磁干扰性能好; 光纤间串扰小;
- 原材料是 SiO_2 , 取之不尽, 用之不竭。

本书较系统、全面地介绍光纤通信的基本理论、关键技术和发展情况。本书的前 3 章系统地论述光纤通信系统的各个组成部分的基础理论, 包括光纤的传输理论和传输性质; 半导体激光器和光电检测器的原理、性能; 光源的调制和光发射机; 光接收机的噪声分析和灵敏度计算; 光收发端机的组成等。在前 3 章的基础上, 第 4 章介绍光纤通信系统的组成、性能参数和系统的设计。第 5 章介绍各种无源光器件, 尤其是 WDM 复用/解复用器件和光开关的工作原理、性能及其在光纤通信中的应用; 第 6 章介绍光网络的发展演变, 光传送网、自动交换光网络、光突发交换网、城域与接入光网络的组成结构和关键技术; 第 7 章介绍近几年出现的扩大容量和增加功能的光通信新技术, 如色散补偿、光分组交换、光时分复用、量子通信等。最后一章介绍光纤通信的测量技术。

本书在写作过程中参阅了大量的国内外的研究资料, 也凝聚了作者及其所在研究室多年来的教学经验和科研成果, 可作为通信类和电子信息类大学本科生教材, 也可作为光纤通信领域科技工作者的参考书。

由于作者的水平所限, 本书难免有错误或不当之处, 敬请广大读者批评指正。

作者于 2006 年 1 月

目 录

第 1 章 光纤的基本理论	1	第 2 章 光源和光发射机	46
1.1 光纤的射线光学分析	1	2.1 半导体激光器	46
1.1.1 光纤的结构和分类	1	2.1.1 激光原理的基础知识	46
1.1.2 多模阶跃折射率光纤的射线光学理论分析	3	2.1.2 激光激射条件	50
1.1.3 渐变折射率光纤	4	2.1.3 结构理论	52
1.2 阶跃折射率光纤的波动光学理论	6	2.1.4 典型分类	58
1.2.1 波动方程	6	2.1.5 模式概念	65
1.2.2 波动方程的解和光纤中的模式	7	2.1.6 基本性质	68
1.3 渐变折射率光纤的理论分析	22	2.2 半导体发光二极管	74
1.3.1 平方律型折射率分布光纤的波动理论解法	23	2.2.1 工作原理	74
1.3.2 WKB 法的基本思想	27	2.2.2 结构和分类	75
1.4 光纤的损耗	27	2.2.3 主要性质	75
1.4.1 引起光纤损耗的因素	28	2.3 光源的直接调制	76
1.4.2 光纤的损耗特性曲线——损耗谱	28	2.3.1 光源的两种调制方式	76
1.5 光纤的色散	29	2.3.2 光源的直接调制	77
1.5.1 光纤色散的概念	29	2.3.3 直接调制激光发射机	82
1.5.2 光纤色散的种类	30	2.4 光源的间接调制	86
1.5.3 光纤色散的表示法	31	2.4.1 间接调制的类型和特点	86
1.6 光纤中的非线性光学效应	32	2.4.2 电光调制和波导调制器	88
1.6.1 受激散射效应	32	2.4.3 电吸收调制器	88
1.6.2 折射率扰动	33	2.5 光源的调制格式	89
1.7 单模光纤	35	2.5.1 光调制格式的类型	89
1.7.1 单模光纤的结构特点	35	2.5.2 高速长距离系统中常用的调制格式	91
1.7.2 单模光纤的基本分析	35	2.6 小结	94
1.7.3 单模光纤的特性参数	37	习题	94
1.7.4 单模光纤的分类	39	第 3 章 光接收机	96
1.8 光纤的制造工艺和光缆的构造	40	3.1 光接收机简介	96
1.8.1 光纤的制造工艺	40	3.1.1 光接收机的分类与性能指标	96
1.8.2 光缆的构造	41	3.1.2 直接检测光接收机的构成及功能	97
1.9 小结	44	3.2 光电检测器	98
习题	45	3.2.1 PN 结的光电效应	98
		3.2.2 PIN 光电二极管	99

3.2.3 雪崩光电二极管	104	4.5.3 ROF 技术的主要应用	168
3.3 放大电路及其噪声	108	4.6 小结	170
3.3.1 噪声的数学处理	108	习题	170
3.3.2 放大器输入端的噪声源	110	第5章 无源光器件和 WDM 技术	172
3.3.3 场效应管和双极晶体管的 噪声源	112	5.1 无源器件的几个常用性能参数	172
3.3.4 前置放大器的设计	116	5.2 光纤和波导型无源光器件	173
3.4 光接收机的灵敏度	117	5.2.1 光连接器和光耦合器	173
3.4.1 灵敏度计算的一般方法	117	5.2.2 偏振控制器	176
3.4.2 灵敏度的高斯近似计算	118	5.2.3 光纤布拉格光栅	177
3.4.3 影响光接收机灵敏度的主要 因素	121	5.2.4 Mach-Zahnder 滤波器	179
3.5 光接收机的组成模块	122	5.2.5 非线性环路镜	180
3.5.1 码间干扰问题与均衡滤波 电路	122	5.3 光学无源器件	182
3.5.2 接收机的动态范围和自动增益 控制电路	125	5.3.1 偏振分束器	182
3.5.3 再生电路	127	5.3.2 光隔离器	182
3.6 相干检测光接收机简介	130	5.3.3 光环行器	183
3.6.1 相干检测原理简介	132	5.3.4 自聚焦透镜	185
3.6.2 DPSK 信号的准相干检测	134	5.3.5 F-P 腔滤波器	185
小结	135	5.3.6 光栅	187
习题	136	5.4 波分复用、解复用器件	188
第4章 光纤通信系统	138	5.4.1 光栅型复用、解复用器	188
4.1 模拟光纤通信	138	5.4.2 干涉膜滤波器型复用、解复用 器件	190
4.2 数字光纤通信系统和总体设计	140	5.4.3 阵列波导光栅型复用、解复 用器	191
4.2.1 数字光纤通信系统基本组成	140	5.5 光开关	193
4.2.2 数字光纤通信系统总体设计	143	5.5.1 机械光开关	193
4.3 数字光纤传输系统的性能指标	150	5.5.2 微机电机械光开关	194
4.3.1 误码性能	150	5.5.3 热光开关	195
4.3.2 抖动、漂移性能	153	5.5.4 波长选择开关	197
4.3.3 可用性	154	5.5.5 高速光开关	199
4.4 光纤放大器及其在光纤通信系统 中的应用	154	5.6 WDM 光纤传输系统	201
4.4.1 掺铒光纤放大器	155	5.6.1 波分复用、密集波分复用和 光频分复用	201
4.4.2 喇曼光纤放大器	161	5.6.2 波分复用系统的构成	202
4.5 光载无线技术	164	5.6.3 WDM 系统的标称波长	204
4.5.1 光载无线技术简介	164	5.6.4 波分复用系统的管理技术	206
4.5.2 ROF 系统的关键技术	165	5.6.5 大容量 WDM 实验系统的 示例	207
		5.7 小结	208

习题	209	7.1.5 前向纠错编码技术	265
第 6 章 光网络	211	7.1.6 光孤子技术	265
6.1 光网络的发展与演变	211	7.2 色散和偏振模色散补偿	266
6.1.1 光网络发展概况	211	7.2.1 概述	266
6.1.2 光分组交换网	213	7.2.2 常用的色散补偿技术	268
6.1.3 光突发交换网	218	7.2.3 偏振模色散补偿技术	272
6.2 光传送网	221	7.3 光时分复用技术	273
6.2.1 光传送网的分层结构	222	7.3.1 概述	273
6.2.2 光交叉连接节点的结构	222	7.3.2 光时分复用原理	273
6.2.3 光分插复用器和 WDM 环形网	226	7.3.3 光时分复用关键技术	274
6.2.4 IP over WDM 技术	231	7.3.4 光时分复用网络	278
6.3 自动交换光网络	233	7.4 量子通信	280
6.3.1 ASON 的体系结构	233	7.4.1 概述	280
6.3.2 ASON 的控制平面	235	7.4.2 量子通信的理论基础	281
6.3.3 ASON 的三种连接	237	7.4.3 量子通信的实现方案	281
6.3.4 ASON 的特点	238	7.4.4 量子密码术	282
6.4 分组传送网	239	7.4.5 量子通信的特点	283
6.4.1 发展情况	239	7.5 小结	283
6.4.2 MPLS-TP 的网络功能架构	240	习题	284
6.4.3 MPLS-TP 的多业务承载 和数据转发功能	242	第 8 章 光纤通信测量	285
6.4.4 MPLS-TP 的 OAM 与生存性	242	8.1 测量的标准	285
6.5 城域与接入光网络	243	8.2 光纤特性的测量	286
6.5.1 城域光网络概况	243	8.2.1 光纤衰减常数的测量	286
6.5.2 城域网的技术选择	245	8.2.2 单模光纤色散的测量	289
6.5.3 接入光网络	251	8.2.3 单模光纤的偏振模色散的 测量	290
6.6 小结	257	8.3 光器件的测量	293
习题	257	8.3.1 半导体光源的测量	294
第 7 章 扩大容量和增加功能的新光 通信技术	259	8.3.2 半导体光检测器的测量	298
7.1 大容量 WDM 系统超长传输技术	259	8.3.3 无源光器件的测量	301
7.1.1 概述	259	8.4 光纤通信系统的测量	303
7.1.2 新型光纤技术	260	8.4.1 系统误码性能的测量	303
7.1.3 新型光调制技术	262	8.4.2 系统抖动性能的测量	306
7.1.4 分布式光放大技术	264	8.4.3 系统光接口性能的测量	312
		8.5 小结	316
		习题	316

第 1 章 光纤的基本理论

光具有波粒二象性，既可以将光看成光波，也可以将光看作是由光子组成的粒子流。因而，在分析光纤中光的传输特性时相应地有两种理论：射线光学（即几何光学）理论和波动光学理论。

射线光学是用光射线代表光能量传输线路来分析问题的方法。这种理论适用于光波长远远小于光波导尺寸的多模光纤，可以得到简单、直观的分析结果。

波动光学是把光纤中的光作为经典电磁场来处理。因此，光纤中的光场必须服从麦克斯韦方程组和全部边界条件。从波动方程和电磁场的边界条件出发，可以得到全面、正确的解析或数字结果，给出光纤中的场结构形式（即传输模式），从而给出光纤中完善的场的描述形式。它的特点是能够精确地、全面地描述光纤的传输特性，这种理论适合于单模光纤和多模光纤的分析。

本章首先用射线光学理论简单分析光在多模光纤中的传输情况，然后采用波动光学理论分析光在光纤中的传输性能，其次讨论光纤的基本传输性能——损耗特性、色散特性和非线性效应，分析单模光纤的结构和性能，最后介绍光纤的制造工艺和光缆的结构。

1.1 光纤的射线光学分析

1.1.1 光纤的结构和分类

光纤通信中所使用的光纤是截面很小的可绕透明长丝，它在长距离内具有束缚和传输光的作用。

光纤是圆截面介质波导。图 1-1 所示是光纤的横截面图。光纤由纤芯、包层和涂覆层构成。纤芯由高度透明的材料构成；包层的折射率略小于纤芯，从而可以形成光波导效应，使大部分的光被束缚在纤芯中传输；涂覆层的作用是增强光纤的柔韧性。此外为了进一步保护光纤，提高光纤的机械强度，一般在带有涂覆层的光纤外面再套一层热塑性材料，成为套塑层（或称二次涂覆层）。在涂覆层和套塑层之间还需填充一些缓冲材料，成为缓冲层（或称垫层）。

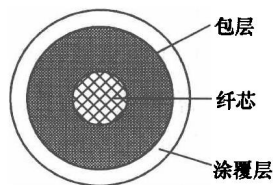


图 1-1 光纤的横截面结构图

目前使用的光纤大多为石英光纤。它以纯净的二氧化硅材料为主，为了改变折射率，中间掺以合适的杂质。掺锗和磷使折射率增加，掺硼和氟使折射率降低。

光纤依据不同的原则可有不同的分类方法。

(1) 按光纤横截面的折射率分布分类

根据光纤横截面折射率分布的不同, 常用光纤可以分成阶跃折射率分布光纤 (简称阶跃光纤) 和渐变折射率分布光纤 (简称渐变光纤) 两种类型, 其折射率分布如图 1-2 所示。

图 1-2 (a) 所示为光纤的横截面图, 其纤芯直径为 $2a$, 包层直径为 $2b$ 。

图 1-2 (b) 所示为阶跃光纤横截面的折射率分布, 纤芯折射率为 n_1 , 包层折射率为 n_2 。纤芯和包层的折射率都是均匀分布, 折射率在纤芯和包层的界面上发生突变。

图 1-2 (c) 所示为渐变光纤横截面的折射率分布, 包层的折射率为 n_2 , 是均匀的, 而在纤芯中折射率则随着纤芯的半径的加大而减小, 是非均匀的、且连续变化。

此外, 还有三角型折射率光纤、双包层光纤和四包层光纤等, 单模光纤的折射率分布如图 1-3 所示。

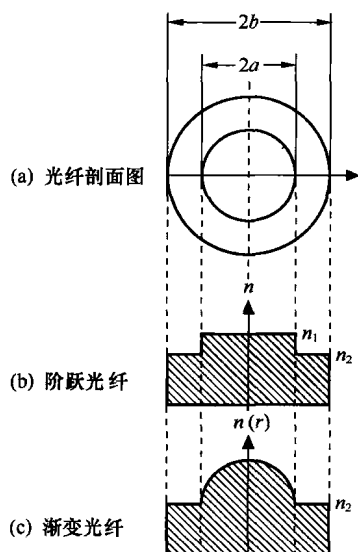


图 1-2 两种光纤的折射率分布

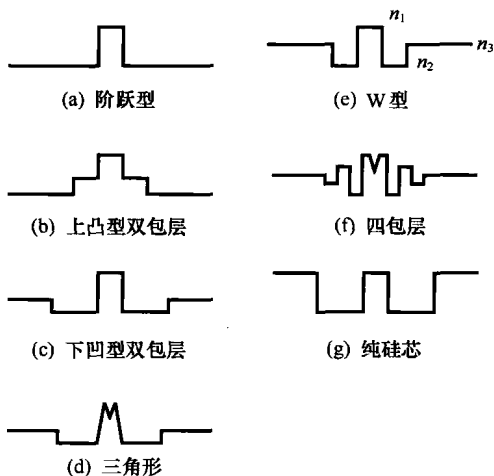


图 1-3 单模光纤的折射率分布形式

(2) 按光纤中的传导模式数量分类

光是一种电磁波, 它沿光纤传输时可能存在多种不同的电磁场分布形式 (即传播模式)。能够在光纤中远距离传输的传播模式称为传导模式。根据传导模式数量的不同, 光纤可以分为单模光纤和多模光纤两类。

- 单模光纤: 光纤中只传输一种模式, 即基模 (最低阶模式)。单模光纤的纤芯直径极小, 为 $4\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$, 包层直径为 $125\mu\text{m}$ 。单模光纤适用于长距离、大容量的光纤通信系统。
- 多模光纤: 光纤中传输的模式不止一个, 即在光纤中存在多个传导模式。多模光纤的纤芯直径较大, 多模光纤的纤芯一般为 $50\mu\text{m}$, 其横截面的折射率分布为渐变型, 包层的外径为 $125\mu\text{m}$ 。多模光纤适用于中距离、中容量的光纤通信系统。

需要指出的是, 单模光纤和多模光纤只是一个相对概念。光纤中可以传输的模式数量的多少取决于光纤的工作波长、光纤横截面折射率的分布和结构参数。对于一根确定的光纤, 当工作波长大于光纤的截止波长时, 光纤只能传输基模, 为单模光纤, 否则为多模光纤。

(3) 按光纤构成的原材料分类

光纤按其构成的原材料可分为以下4类。

- 石英系光纤：它主要是用高纯度的 SiO_2 掺有适当的杂质制成，例如用 $\text{GeO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ 和 $\text{P}_2\text{O}_5 \cdot \text{SiO}_2$ 做纤芯，用 $\text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 做包层。目前这种光纤损耗最低，强度和可靠性最高，应用最广泛。

- 多组分玻璃光纤：例如用钠玻璃掺有适当的杂质制成。这种光纤的损耗较低，但可靠性不高。

- 塑料包层光纤：纤芯是用石英制成，包层是硅树脂。

- 全塑光纤：纤芯和包层均由塑料制成，其损耗较大，可靠性也不高。

目前，光纤通信中主要使用石英系光纤。

(4) 按光纤的套塑层分类

光纤按其套塑层可分为以下两类。

- 紧套光纤：典型的紧套光纤各层之间都是紧贴的，光纤被套管紧紧箍住，不能在其中松动。在光纤与套管之间放置了一个缓冲层，以减小外面应力对光纤的作用。紧套光纤的结构简单，使用和测试都比较方便。

- 松套光纤：典型的松套光纤的护套为松套管，光纤能在其中松动。管内空间填充油脂，以防水分渗入。松套光纤的机械性能、防水性能都比较好，便于成缆。若一根管内放入2~20根光纤，可制成光纤束，称为松套光纤束。

1.1.2 多模阶跃折射率光纤的射线光学理论分析

在多模阶跃光纤的纤芯中，光按直线传输，在纤芯和包层的界面上光发生反射。由于光纤中纤芯的折射率 n_1 大于包层的折射率 n_2 ，所以在芯包界面存在着临界角 ϕ_c ，如图1-4所示。图1-4所示为阶跃光纤的子午光线（一般将通过光纤轴线的平面称作子午面，把传输中总是位于子午面内的光线称为子午光线）。当光线在芯包界面上的入射角 ϕ 大于 ϕ_c 时，将产生全反射。若 ϕ 小于 ϕ_c ，入射光一部分反射，一部分通过界面进入包层，经过多次反射后，光很快衰减掉。所以可以形象地说阶跃光纤中的传输模式是靠光射线在芯包界面上的全反射而使能量集中在纤芯之中传输。

这里，首先定义光纤的相对折射率差，这一参数直接影响光纤的性能：

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (1-1)$$

光纤通信中所用的光纤的 Δ 一般小于1%，所以 Δ 可近似表示为

$$\begin{aligned} \Delta &\approx \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \\ &\approx \frac{(n_1 - n_2)}{n_2} \end{aligned} \quad (1-2)$$

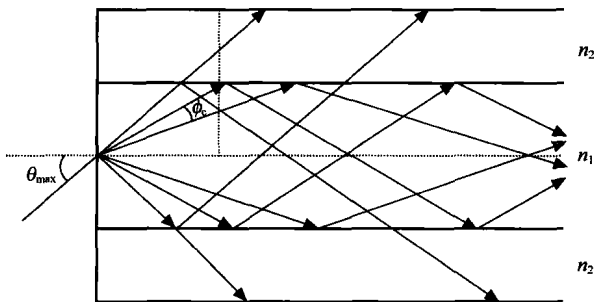


图1-4 阶跃光纤的子午光线

形成导波的子午光线必须能在芯包界面上产生全反射。由光纤中光线在界面的全反射条件, 可以推出临界角 ϕ_c 为

$$\phi_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (1-3)$$

那么, 光在纤芯端面的最大入射角 $\theta_{\max}$ 应满足

$$\begin{aligned} \sin \theta_{\max} &= n_1 \sin(90^\circ - \phi_c) \\ &= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \end{aligned} \quad (1-4)$$

由此可以定义光纤的数值孔径为

$$\begin{aligned} NA &= \sin \theta_{\max} \\ &= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \\ &\approx n_1 \sqrt{2\Delta} \end{aligned} \quad (1-5)$$

数值孔径表征了光纤的集光能力。由此看出, n_1 、 n_2 差别越大, 即 Δ 越大, 光纤收集射线的能力越强。通信用光纤的数值孔径是较小的。

以上是最大理论数值孔径, 实际应用中尚有其他数值孔径定义。

斜射线的数值孔径与子午线的不同, 比子午线的稍大。

从子午线出发, 还可得出有关光纤中模式色散的简单概念。以不同的角度入射的射线将在光纤中形成不同的模式, 如图 1-4 所示。在多模阶跃折射率光纤中, 满足全反射条件、但入射角不同的光线的传输路径是不同的, 结果使不同的光线所携带的能量到达终端的时间不同, 存在着时延差, 即模式色散, 从而使传输的脉冲发生了展宽, 限制了光纤的传输容量。可用最大群时延差粗略地表示模式色散的程度。假若在长为 L 的光纤中, 走得最快的模式所用的时间为 $\tau_{\min}$, 走得最慢的模式所用的时间为 $\tau_{\max}$, 则最大群时延差 $\Delta\tau_{\max}$ 为

$$\begin{aligned} \Delta\tau_{\max} &= \tau_{\max} - \tau_{\min} \\ &= \frac{\frac{L}{\sin \phi_c} - L}{\frac{c}{n_1}} \\ &= \frac{Ln_1}{c} \frac{n_1 - n_2}{n_2} \\ &\approx \frac{\Delta Ln_1}{c} \end{aligned} \quad (1-6)$$

单位长度光纤的最大群时延差为

$$\Delta\tau_{\max} \approx \frac{\Delta n_1}{c} \quad (1-7)$$

从式 (1-7) 中可以看出, 最大群时延差与相对折射率差 Δ 成正比, 使用弱导波光纤有助于减少模式色散。时延差限制了多模阶跃折射率光纤的传输带宽。为此, 人们研制了渐变折射率光纤。

1.1.3 渐变折射率光纤

多模渐变折射率光纤纤芯中的折射率是连续变化的, 它随纤芯半径 r 的增加按一定规律

减小,如图1-2所示。采用渐变折射率光纤的目的是减小多模光纤的模式色散。

在多模渐变折射率光纤中,相对折射率差定义为

$$\Delta = \frac{n^2(0) - n_2^2}{2n^2(0)} \quad (1-8)$$

式中, $n(0)$ 、 n_2 分别是 $r=0$ 处的和包层的折射率。

在渐变折射率光纤中,由于纤芯的折射率不均匀,光射线的轨迹不再是直线而是曲线。适当选取纤芯的折射率的分布形式,可以使不同入射角的光线有大致相等的光程,从而大大减小多模光纤模式色散的影响。

渐变折射率光纤的折射率分布可以表示为

$$n(r) = \begin{cases} n(0) & r = 0 \\ n(0) \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^g} & r < a \\ n_2 & r \geq a \end{cases} \quad (1-9)$$

式中: g 是折射率分布指数; a 是纤芯半径; r 是纤芯中任意一点到轴心的距离。当 $g = \infty$ 时,式(1-9)为阶跃折射率光纤的折射率分布。使群时延差减至最小的最佳折射率分布指数 g 为2左右。

图1-5所示的渐变折射率光纤中的子午射线,以不同入射角进入纤芯的光射线在光纤中传过同一距离时,靠近光纤轴线的射线所走的路程短,而远离轴线所走的路程长。由于纤芯折射率是渐变的, $n(r)$ 随 r 的增加而减小,所以近轴处的光速慢,远轴处的光速快。当折射率分布指数 g 取最佳时,就可以使全部子午射线以同样的轴向速度在光纤中传输,这对模式色散起了均衡作用,从而消除模式色散,这种现象称做自聚焦,这种光纤称为自聚焦光纤。

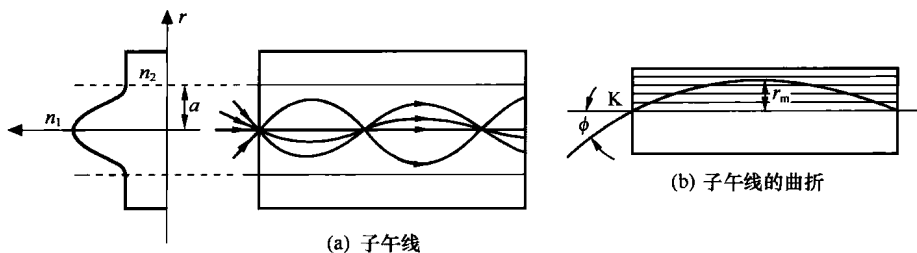


图1-5 渐变折射率光纤中的子午射线

由于渐变折射率光纤纤芯中的折射率是随 r 变化的,所以子午线不是直线而是曲线,在渐变折射率光纤中,光射线是靠光的折射原理而发生弯曲的。为了便于说明问题,将沿光纤 r 方向连续变化的折射率分为不连续的若干层来表示,如图1-5(b)所示。一射线以入射角 ϕ 射向光纤端面的K点。进入纤芯后,它先是从光密媒质向光疏媒质传输,这时,它将折向法线,其轴向角将逐渐减小,在某一半径 $r = r_m$ 处,射线与光纤轴平行。在此以后,它又由光疏媒质进入光密媒质。此时,它将离法线而折射,其轴向角逐渐增大,这样就形成了周期变化的射线轨迹。很明显,不同折射率分布的光纤,就有不同的射线轨迹。就是同一光纤中,以不同的初始条件入射的射线也各有不同的轨迹。

分析指出,如果光纤的折射率分布采取双曲正割函数的分布,所有的子午射线具有完善

的自聚焦性质, 即从光纤端面入射的子午射线经过适当的距离会重新汇聚到一点, 这些光线具有相同的时延。纤芯折射率分布为

$$n(r) = n(0)\text{sech}(ar) \quad (1-10)$$

渐变折射率光纤中的斜射线是不经过光纤轴的空间曲线, 它也是根据折射原理而弯曲的。

分析渐变折射率光纤中的射线传输轨迹时, 可采用射线方程, 可以由已知的折射率分布和初始条件求出射线的轨迹。射线方程为

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dr}{ds} \right) = \nabla n \quad (1-11)$$

式中: r 是轨迹上某一点的位置矢量; s 为射线的传输轨迹; ds 是沿轨迹的距离单元; ∇n 为折射率的梯度。

由于渐变折射率光纤纤芯折射率是变化的, 所以纤芯端面上不同点的集光能力不同, 因此在渐变折射率光纤中引入了本地数值孔径的概念, 它是指光纤端面上某一点的数值孔径, 表征了渐变折射率光纤端面上某一点的集光能力的大小。其表达式为

$$NA(r) = \sqrt{n^2(r) - n_2^2} \quad (1-12)$$

本地数值孔径与该点的折射率有关, 该点的折射率越大, 本地数值孔径就越大。

1.2 阶跃折射率光纤的波动光学理论

1.2.1 波动方程

光纤是一种介质光波导, 这种波导具有无传导电流、无自由电荷和线性各向同性的特点。在光纤中传播的电磁波满足如下的麦克斯韦方程组:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1-13)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1-14)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0 \quad (1-15)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1-16)$$

式中, $\vec{E}$ 、 $\vec{H}$ 、 $\vec{D}$ 、 $\vec{B}$ 分别为电场矢量、磁场矢量、电通量密度和磁通量密度。电通量密度和磁通量密度与场矢量之间的关系有:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (1-17)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (1-18)$$

式中: μ 是材料的磁导率, 在真空中为 μ_0 ; ϵ 是材料的介电常数, 在真空中为 ϵ_0 。

应用式 (1-13) ~ 式 (1-18) 及矢量恒等式

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = \nabla \nabla \cdot \vec{E} - \nabla^2 \vec{E}$$

得到电场和磁场的波动方程

$$\nabla^2 \vec{E} + \nabla (\vec{E} \cdot \frac{\nabla \epsilon}{\epsilon}) = \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (1-19)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + \left(\frac{\nabla \varepsilon}{\varepsilon}\right) \times (\nabla \times \vec{H}) = \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (1-20)$$

在光纤中介电常数的变化非常缓慢，可以近似认为 $\nabla \varepsilon \approx 0$ ，这时波动方程可以简化为

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (1-21)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu_0 \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (1-22)$$

如果电磁场做简谐振荡，由波动方程可以推出均匀介质中的矢量亥姆霍兹方程：

$$\nabla^2 \vec{E} + k_0^2 n^2 \vec{E} = 0 \quad (1-23)$$

$$\nabla^2 \vec{H} + k_0^2 n^2 \vec{H} = 0 \quad (1-24)$$

式中： $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 是真空中波数； λ 是真空中光波波长； n 为介质的折射率。

在直角坐标系中， $\vec{E}$ 、 $\vec{H}$ 的 x 、 y 、 z 分量均满足标量的亥姆霍兹方程：

$$\nabla^2 \psi + k_0^2 n^2 \psi = 0 \quad (1-25)$$

式中： ψ 代表 $\vec{E}$ 或 $\vec{H}$ 的各个分量。

1.2.2 波动方程的解和光纤中的模式

在光纤的分析中，求上述亥姆霍兹方程满足边界条件的解，即可得到光纤中的场的解答。求解的方法主要有两种：标量近似解和矢量解。

分析阶跃光纤时，假设光纤里的横向（非光传输的方向）电磁场的幅度满足标量亥姆霍兹方程，求出近似解。这是一种近似，其前提是光纤的相对折射率差 Δ 很小。 Δ 很小的光纤称作弱导波光纤，一般阶跃光纤可以满足这一条件。分析渐变光纤时，假设包层的尺寸无穷，边界不起作用，然后假设横向（非光传输的方向）电磁场的幅度满足标量亥姆霍兹方程，求出标量近似解。采用标量近似解法可以得到光纤中各个模式的传输系数、模式的截止条件、单模传输条件、多模传输时的模式数量和模式功率分布等的简便计算公式。还可以利用这一方法来分析光纤的色散特性。采用标量近似解得到的光纤中的模式为标量模。这种方法可使分析大为简化，其结果也比较简单，便于应用。

矢量解是求满足边界条件的矢量亥姆霍兹方程的解答。矢量解中各个分量在直角坐标系中都满足标量的亥姆霍兹方程。而在圆柱坐标系统中，除 E_z 、 H_z 外，其他横向分量都不满足标量的亥姆霍兹方程。因而矢量解法是从解 E_z 、 H_z 的标量亥姆霍兹方程入手，再通过场的横向分量与纵向分量的关系，求其他分量。

在分析阶跃光纤时，纤芯和包层的折射率都是均匀的，所以矢量解是严格的分析方法，它可以得到精确的模式及分布，但是比较复杂。

对于渐变光纤，需要作一些近似假设，分析仍然十分复杂，需进行数值计算。

采用矢量解得到的光纤中的模式为矢量模式。

1. 标量解

当光纤的包层和纤芯的折射率差别极小时，称为弱导波光纤，其比值为