



面向21世纪课程教材

# 光纤通信系统

GUANG XIAN TONG XIN XI TONG

顾婉仪 李国瑞 编著

北京邮电大学出版社



IN929.11  
G64

453612

面向21世纪课程教材

普通高等教育“九五”国家级重点教材



GUANGXIAN TONGXIN XITONG

# 光纤通信系统

顾婉仪 李国瑞 编著



00453612



北京邮电大学出版社  
·北京·

## 内 容 提 要

DWIS/11

本书系统地介绍了光纤的传输理论；半导体激光器的工作原理、性质、光源的直接调制和间接调制；光接收机的组成、噪声的分析和接收机灵敏度的计算；光纤通信系统的组成、性能指标及其分配以及系统的总体设计；还介绍了20世纪90年代以后发展起来的光纤通信新技术和新型系统，如掺铒光纤放大器、密集波分复用系统、全光通信网、色散补偿技术以及非线性光学效应等。本书力求理论上的系统性、技术上的时新性和应用上的实用性。

本书可作为通信类专业的大学本科生或研究生的教材，也可作为相关科技工作者的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

光纤通信系统/顾晓仪, 李国瑞编著. - 北京: 北京邮电大学出版社, 1999.11  
ISBN 7-5635-0387-0

I. 光… II. ①顾… ②李… III. 光导纤维通信系统 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第61339号

---

出版发行: 北京邮电大学出版社 电话: (010)62282185(发行部)

社 址: 北京市海淀区西土城路10号 邮编: 100876

经 销: 各地新华书店经售

印 刷: 北京雅艺彩印有限公司

开 本: 787 mm × 960 mm 1/16

印 张: 22.625

字 数: 487千字

版 次: 1999年11月第1版 1999年11月第1次印刷

印 数: 1—5000册

书 号: ISBN 7-5635-0387-0/TN·174

定 价: 29.40元

---

# 前 言

本书曾於 1989 年由人民邮电出版社出版，出版以来受到了广大读者的关注和好评，并于 1992 年获得原邮电部优秀教材特等奖，国家教委全国优秀教材奖。

近 10 年来，光纤通信有了长足的发展，在人类向信息社会过渡的过程中扮演着重要的角色。正如有关权威人士所说：纵观影响当今电信业的主要技术，很少有像光纤和光波传输系统那样能够引发如此剧烈的变革。光纤通信的发展和广泛应用，极大地提高了信息的传输容量，使通信行业发生翻天覆地的变化。

90 年代中期以前推出的光波系统是以电时分复用为基础的单信道系统，借助于这样的系统，将速率每五年提高了 9 倍。波分复用（WDM）技术和掺铒光纤放大器（EDFA）的实用化使之如虎添翼，面目一新，1996 年首次实现了太比特每秒（每秒 1 万亿比特）的传输，同时也使建立以波长路由为基础、具有高度灵活性和生存性的 WDM 全光通信网成为可能。光交叉连接、光分叉复用的概念应运而生，并很快进行了 WDM 光网络的现场试验。除此之外，新型的光电器件、新兴的技术和新型的系统也都层出不穷，获得迅速发展。

为了能够反映光纤通信当前的发展水平，将本书进行了改写和重写，在这次出版中，保留了原书前三章的基本理论体系，补充了近年来发展的新型光电器件；对一些重要的、发展快的内容进行了改写；同时，根据光纤通信的最新发展情况重写了第 4 章和第 5 章。

前三章系统地介绍了光纤通信的基本理论，讲述中力求理论体系的系统性和完整性，采取概念论述和数学推导相结合的方法，循序渐进、由浅入深地对光纤的传输理论、光源和光源的调制、光接收机的原理进行了较深入的讲述。

第 4 章参照 ITU-T 的建议，主要介绍光纤通信系统的组成、光同步数字体系、系统的性能指标及其分配、系统的总体设计等，同时也介绍了掺铒光纤放大器及其在系统中的应用、在 CATV 网络中广泛应用的副载波光波系统和光纤接入网等内容。

第 5 章主要介绍 90 年代以后发展起来的光纤通信新技术和新型系统，如密集波分复用技术、全光通信网、色散补偿技术以及对光纤通信有重要影响的非线性光学效应等。这些新技术和新型系统已经或即将对通信行业产生巨大影响，有良好的应用前景。

本书在写作过程中凝聚了作者所在课题组多年来的科研经验和成果，也包含了何华杰博士、张杰博士、申云峰博士、孙建博士等在他们博士论文中的部分研究成果。

由于作者的水平有限，本书中难免有错误或有不周之处，敬请广大读者批评指正。

作者于 1999 年 6 月 8 日

# 绪 论

1970年,美国康宁玻璃公司研制出损耗为20 dB的石英光纤,证明光纤作为通信的传输媒质是大有希望的。同年, GaAlAs 异质结半导体激光器实现了室温下的连续工作,为光纤通信提供了理想的光源。从此,便开始了光纤通信迅速发展的时代。

在20世纪70年代,光纤通信由起步到逐渐成熟。这首先表现在光纤的传输质量大大提高,光纤的传输损耗逐年下降。1972~1973年,在0.85  $\mu\text{m}$ 波段,光纤的传输损耗已下降到2 dB/km左右;与此同时,光纤的带宽不断增加。光纤的生产从带宽较窄的阶跃型折射率光纤转向带宽较大的渐变型折射率光纤;另外,光源的寿命不断增加,光源和光电检测的性能不断改善。

光纤和光电器件的发展为光纤传输系统的诞生创造了有利条件。到1976年,第一条速率为44.7 Mbit/s的光纤通信系统在美国亚特兰大的地下管道中诞生。该系统经过现场实验和全面性能测试后,很快商用化。

80年代是光纤通信大发展的年代。在这个时期,光纤通信迅速由0.85  $\mu\text{m}$ 波段转向1.3  $\mu\text{m}$ 波段,由多模光纤转向单模光纤。通过理论分析和实践摸索,人们发现,在较长波段光纤的传输损耗可以达到更小的值。经过科学家和工程技术人员努力,很快在1.3  $\mu\text{m}$ 和1.55  $\mu\text{m}$ 波段分别实现了损耗为0.5 dB/km和0.2 dB/km的极低损耗的光纤传输。同时,石英光纤在1.31  $\mu\text{m}$ 波段时色度色散为零,这就促使1.3  $\mu\text{m}$ 波段单模光纤通信系统的迅速发展。各种速率的光纤通信系统如雨后春笋般在世界各地建立起来,显示出光纤通信优越的性能和强大的竞争力,并很快替代电缆通信,成为电信网中重要的传输手段。

在80年代,波分复用系统、相干光通信系统、光纤放大器等技术已受到人们的重视,投入大量的人力和物力进行研究。80年代末期,掺铒光纤放大器问世,它的优越的性能使其他类型的放大器望尘莫及,很快进入实用化阶段。由于掺铒光纤放大器是工作在1.55  $\mu\text{m}$ 波段,而在这一波段光纤的损耗也最低,从而促使1.55  $\mu\text{m}$ 波段光纤通信的更快发展。

随着人类社会信息化时代的临近,对通信的需求呈现加速增长的趋势。为了满足带宽和容量的需求,一条途径是提高单信道系统的速率,1993年2.5 Gbit/s的系统已经实用化,1995年又推出10 Gbit/s的系统。但是,受电子速率瓶颈的限制,单信道速率达到40 Gbit/s以上已很困难。另一条途径是发展波分复用技术。由于一般的掺铒光纤放大器的带宽仅有35  $\mu\text{m}$ 左右,必须把复用信道集中在掺铒光纤放大器的带宽之内,也就是发展密集波分复用技术。这一技术在90年代很快实用化。

发展迅速的各种新型业务对通信网的带宽和容量提出了越来越高的要求。以欧美为例,

尽管传统的电话业务增长缓慢，用户线年增长率只有百分之三，但是高速数据交换网和互联网主机的数量在过去的三年里每年增加一倍，各类交互式服务（如多媒体通信、家庭购物等）大致以同样的速率增长。移动电话市场也在迅速扩大。面对上述挑战，通信网的两大主要组成部分，传输和交换，都在不断的发展和革新。

随着掺铒光纤放大器的广泛应用和波分复用技术的成熟，一根光纤中已经能够传输几百吉比特每秒到上太比特每秒的数字信息。传输系统容量的快速增长带来的是对交换系统发展的压力和动力。通信网中交换系统的规模越来越大，运行速率越来越高，未来的大型交换系统将需要处理总量达几百太比特每秒的信息。但是目前的电子交换和信息处理网络的发展已接近了极限。为了解决电子瓶颈限制问题，研究人员开始在交换系统中引入光子技术，从而引发了全光通信的发展。

目前最引人注目的是 WDM 全光通信，它是在传送网中加上光层，在光上进行交叉连接和分叉复用，从而减轻电交换节点的压力，大大提高整个网络的传输容量和节点的吞吐容量，成为网络升级的首选方案，这也是当前光纤通信的研究热点。

总而言之，自 1970 年以来的不到 30 年的时间里，光纤通信以惊人的速度发展着，为国家信息基础设施提供了宽敞的传输通路。纵观光纤通信的发展过程，可以看到以下几点发展趋势：

- (1) 由短波长 ( $0.85\ \mu\text{m}$ ) 向长波长 ( $1.3\ \mu\text{m}$  和  $1.55\ \mu\text{m}$ ) 发展；
- (2) 由多模光纤向单模光纤发展；
- (3) 由低速率向高速率发展；
- (4) 由准同步数字系列 (PDH) 向同步数字系列 (SDH) 发展；
- (5) 应用领域遍及市话、长途和接入网；
- (6) 新技术、新型器件层出不穷。

光纤通信之所以能得到如此迅速的发展，与光纤通信的优越性是分不开的。光纤通信的主要优点有：

- 传输损耗低，容量大；
- 尺寸小，重量轻，有利于敷设和运输；
- 抗电磁干扰性能好，适合应用于有强电干扰和电磁辐射的环境中；
- 光纤之间的串话小；
- 制造光纤的主要原料是  $\text{SiO}_2$ ，它是地球上蕴藏量最丰富的物质，取之不尽，用之不竭。

我国是具有广阔通信市场的大国，从 1974 年开始研究光纤通信，目前在全国已基本形成“八条南北纵穿、八条东西横跨”的光缆网络格局。现有线路总长度为 10 万公里，“九五”期间将新建 11 万公里光缆线路，其中省间干线将有 90% 采用 2.5 Gbit/s SDH 设备。目前在国家 13 条光缆干线上已经开始了主要以  $8 \times 2.5\ \text{Gbit/s}$  SDH 波分复用系统为主的扩容工程，WDM 市场的启动势在必行。随着 WDM 光传输系统的进一步推广和普及，对节点的吞

吐能力提出了更高的要求。同时 IP 技术、ATM 技术、IP over SDH、IP over WDM 等业务的发展将会引发对通信容量的更大需求，并可能导致电信传送网络的变革，WDM 全光网络的研究已经引起通信界的极大重视，一些现场实验也正在筹备中。

另一方面，在光纤干线网基本建成以后，光纤接入网的建设已经提到日程；无源光网络、有源光网络和光纤同轴混合网的研究都在进行中；由于光纤独特的优越性能必将使其在接入网的建设中再现光芒。

# 目 录

## 绪 论

<b>第 1 章 光纤的传输理论</b> .....	( 1 )
1.1 光纤的基本性质 .....	( 1 )
1.1.1 光纤的结构、分类和光的传输 .....	( 1 )
1.1.2 光纤的传输性质 .....	( 7 )
1.2 介质平板波导 .....	( 11 )
1.2.1 基本波导方程式 .....	( 11 )
1.2.2 对称介质平板波导的传输模式 .....	( 13 )
1.2.3 介质板波导中的多模群时延 .....	( 22 )
1.3 阶跃折射率光纤的模式理论 .....	( 23 )
1.3.1 圆柱坐标系中的波导方程式 .....	( 23 )
1.3.2 阶跃折射率光纤中波动方程的解 .....	( 25 )
1.3.3 近似解——LP 模 .....	( 32 )
1.4 渐变折射率光纤的近似分析 .....	( 39 )
1.4.1 渐变折射率光纤的近似解 .....	( 39 )
1.4.2 渐变折射率光纤特性的 WKB 法分析 .....	( 44 )
1.5 单模光纤 .....	( 50 )
1.5.1 单模光纤的基本分析 .....	( 50 )
1.5.2 单模光纤的结构 .....	( 52 )
1.5.3 单模光纤的频率色散 .....	( 53 )
1.5.4 单模光纤的极化 .....	( 56 )
1.5.5 单模光纤的发展与演变 .....	( 59 )
小结 .....	( 60 )
习题 .....	( 61 )
<b>第 2 章 光源和光调制</b> .....	( 64 )
2.1 激光原理的基础知识 .....	( 64 )
2.1.1 原子能级的跃迁 .....	( 64 )
2.1.2 半导体中载流子的统计分布 .....	( 68 )



2.1.3	PN 结的能带 .....	(71)
2.2	半导体激光器和发光二极管 .....	(74)
2.2.1	半导体激光器 .....	(74)
2.2.2	F-P 腔半导体激光器的结构与分类 .....	(76)
2.2.3	量子阱半导体激光器 .....	(80)
2.2.4	分布反馈激光器 .....	(81)
2.2.5	发光二极管 .....	(86)
2.3	半导体激光器的模式性质 .....	(88)
2.3.1	厄密-高斯模式的解 .....	(89)
2.3.2	激光器的纵模 .....	(91)
2.3.3	激光器的横模 .....	(96)
2.4	半导体激光器的瞬态性质 .....	(98)
2.4.1	瞬态过程 .....	(99)
2.4.2	速率方程组及其解 .....	(100)
2.4.3	结发热效应 .....	(107)
2.5	半导体激光器的自脉动现象 .....	(110)
2.5.1	自脉动现象 .....	(110)
2.5.2	双区共腔激光器中的自脉动 .....	(113)
2.5.3	光丝耦合 .....	(114)
2.6	半导体激光器的直接调制和光发射机 .....	(116)
2.6.1	光源的调制方式 .....	(117)
2.6.2	光源的直接调制原理 .....	(117)
2.6.3	激光发射机 .....	(119)
2.7	光源的间接调制 .....	(125)
2.7.1	电光调制 .....	(125)
2.7.2	声光调制 .....	(135)
2.7.3	磁光调制 .....	(137)
2.7.4	波导调制器和电吸收调制器 .....	(138)
小结	.....	(139)
习题	.....	(140)
<b>第 3 章</b>	<b>光接收机 .....</b>	<b>(144)</b>
3.1	光电检测器 .....	(145)
3.1.1	光电二极管 .....	(145)

3.1.2	雪崩光电二极管 .....	(149)
3.2	放大器及其电路的噪声 .....	(155)
3.2.1	噪声分析的一般方法 .....	(156)
3.2.2	放大器输入端的噪声源 .....	(158)
3.2.3	场效应管和双极晶体管的噪声源 .....	(160)
3.2.4	前置放大器的设计 .....	(164)
3.3	光电检测过程的统计性质及灵敏度的精确计算 .....	(167)
3.3.1	灵敏度计算的一般方法 .....	(167)
3.3.2	雪崩光电检测过程的统计分布 .....	(168)
3.3.3	接收机灵敏度的精确计算方法 .....	(169)
3.4	灵敏度计算的高斯近似法 .....	(173)
3.4.1	光电检测器散粒噪声的计算 .....	(173)
3.4.2	高斯近似计算公式及其推导过程 .....	(175)
3.4.3	接收机灵敏度与 $z, B, a, EXT$ 等因素的关系 .....	(182)
3.4.4	高斯近似计算的误差估计 .....	(187)
3.4.5	激光器和光纤系统的噪声 .....	(190)
3.5	光接收机的均衡网络、自动增益控制电路和再生电路 .....	(195)
3.5.1	码间干扰问题与均衡滤波电路 .....	(195)
3.5.2	接收机的动态范围和自动增益控制电路 .....	(198)
3.5.3	再生电路 .....	(203)
小结	.....	(207)
习题	.....	(210)

## 第4章 光纤通信系统和通信网 .....

4.1	数字光纤通信系统 .....	(212)
4.1.1	数字光纤通信系统的组成 .....	(212)
4.1.2	系统性能及其测试 .....	(222)
4.2	光同步数字传输网 .....	(229)
4.2.1	SDH的帧结构 .....	(231)
4.2.2	SDH的复用映射结构 .....	(232)
4.2.3	SDH传送网的网络结构 .....	(236)
4.3	光纤通信系统的总体设计 .....	(242)
4.3.1	系统的总体考虑 .....	(242)
4.3.2	设计方法 .....	(245)

4.3.3	功率预算和色散预算 .....	(245)
4.4	掺铒光纤放大器及其在系统中的应用 .....	(249)
4.4.1	EDFA 的工作原理和基本性能 .....	(250)
4.4.3	EDFA 在系统中的应用 .....	(256)
4.5	光纤接入网 .....	(258)
4.5.1	混合光纤同轴型接入网 .....	(259)
4.5.2	无源光网络 .....	(262)
4.6	模拟光纤通信系统 .....	(266)
4.6.1	SCM 光波系统的基本组成和调制方式 .....	(266)
4.6.2	SCM 光波系统的非线性失真 .....	(267)
4.6.3	SCM 光纤通信系统中非线性失真的补偿 .....	(278)
小结	.....	(280)
习题	.....	(280)
<b>第 5 章</b>	<b>光纤通信新技术 .....</b>	<b>(282)</b>
5.1	波分复用技术 .....	(282)
5.1.1	WDM 光纤通信系统的构成和概况 .....	(282)
5.1.2	复用、解复用器件 .....	(285)
5.1.3	WDM 系统的设计 .....	(295)
5.1.4	相干光通信 .....	(297)
5.2	非线性光学效应及其对光纤通信的影响 .....	(301)
5.2.1	非线性光学效应 .....	(301)
5.2.2	受激散射及其对光纤通信的影响 .....	(303)
5.2.3	非线性折射率调制引起的非线性光学效应 .....	(307)
5.2.4	光孤子通信 .....	(309)
5.3	全光通信网 .....	(311)
5.3.1	光交换方式 .....	(311)
5.3.2	WDM 全光通信网 .....	(315)
5.3.3	WDM 全光网中的同频干扰 .....	(325)
5.4	色散补偿技术 .....	(328)
5.4.1	单模光纤中的色散 .....	(328)
5.4.2	半导体激光器的调制特性 .....	(329)
5.4.3	色散补偿方案 .....	(329)
5.5	光时分复用技术 .....	(335)

小结 .....	(338)
习题 .....	(339)
<b>附录</b> .....	<b>(341)</b>
附录 1 贝塞尔方程及其性质 .....	(341)
附录 2 两平行介质波导中兼并模的耦合 .....	(345)
<b>参考文献</b> .....	<b>(347)</b>

# 第 1 章 光纤的传输理论

分析光纤中光的传输，可以用两种理论：射线光学（即几何光学）理论和波动光学理论。射线光学是忽略波长  $\lambda$  的光学，是用光射线去代表光能量传输路线的方法。这种理论对于光波长远远小于光波导尺寸的多模光纤是容易得到简单而直观的分析结果的，但对于复杂的问题，射线光学只能给出较粗糙的概念。

波动光学是把光纤中的光作为经典电磁场来处理，因此，光场必须服从麦克斯韦方程组以及全部边界条件。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，给出波导中容许的场结构形式（即模式），从而给出光纤中完善的场的描述。

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，然后着重于波动光学理论的分析。

## 1.1 光纤的基本性质

### 1.1.1 光纤的结构、分类和光的传输

#### 1. 光纤的结构和分类

##### (1) 光纤的结构

光通信中使用的光纤是横截面很小的可挠透明长丝，它在长距离内具有束缚和传输光的作用。

图 1.1.1 是光纤的横截面图。从图中可以看出，光纤主要是由纤芯、包层和涂敷层构成。纤芯是由高度透明的材料制成的；包层的折射率略小于纤芯，从而造成一种光波导效应，使大部分的电磁场被束缚在纤芯中传输；涂敷层的作用是保护光纤不受水汽的侵蚀和机械的擦伤，同时又增加光纤的柔韧性。在涂敷层外，往往加有塑料外套。

为了便于工程上安装和敷设，常常将若干根光纤组合成光缆。光缆的结构繁多，图 1.1.2 给出的是我国较为普遍采用的层绞式和骨架式两种结构。光缆中的钢质加强心，一方面是为了提高其抵抗张力的能力；另一方面由于加强心的膨胀系数小于塑料，所以它能抵制塑料的伸缩从而使光缆的温度特性有所改善。

##### (2) 光纤的分类

按光纤的原材料的不同，光纤可分为以下几种类型：

① 石英系光纤。这种光纤的纤芯和包层是由高纯度的  $\text{SiO}_2$  掺有适当的杂质制成，例如

用  $\text{GeO}_2 \cdot \text{SiO}_2$  和  $\text{P}_2\text{O}_5 \cdot \text{SiO}_2$  作芯子，用  $\text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$  作包层。目前，这种光纤的损耗最低、强度和可靠性最高、应用最广泛，但价格也较高。

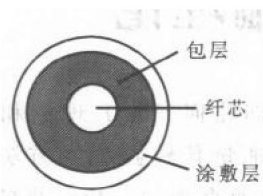


图 1.1.1 光纤的结构

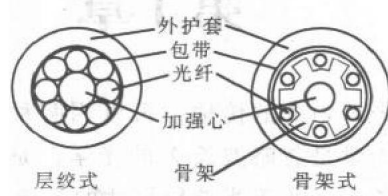


图 1.1.2 光缆结构

② 多组份玻璃纤维。如用钠玻璃 ( $\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO}$ ) 掺有适当杂质制成。这种光纤的损耗较低，但可靠性尚存在一些问题。

③ 塑料包层光纤。这种光纤的芯子是用石英制成，包层是硅树脂。

④ 全塑光纤。这种光纤的芯子和包层都由塑料制成。塑料光纤的价格低于石英光纤，但损耗大，可靠性尚存在一定问题。

光通信中主要用石英光纤，本书后面所说的光纤也主要是指石英光纤。

根据光纤横截面上折射率分布的情况来分类，光纤可分为阶跃折射率型和渐变折射率型（也称为梯度折射率型）。对于阶跃折射率光纤，在纤芯中折射率分布是均匀的，在纤芯和包层的界面上折射率发生突变；而对于渐变折射率光纤，折射率在纤芯中连续变化。

根据光纤中的传输模式数量分类，光纤又可分为多模光纤和单模光纤。在一定的工作波长下，多模光纤是能传输许多模式的介质波导，而单模光纤只传输基模。

多模光纤可以采用阶跃折射率分布，也可以采用渐变折射率分布；单模光纤多采用阶跃折射率分布。因此，石英光纤大体上也可以分为多模阶跃折射率光纤、多模渐变折射率光纤和单模阶跃折射率光纤三种，它们的结构、尺寸、折射率分布及光传输的示意图如图 1.1.3 所示。

## 2. 光的传输

### (1) 多模阶跃折射率光纤中光的传输

可以用射线光学理论分析多模光纤中光的传输问题。

在多模阶跃折射率光纤的纤芯中，光按直线传输，在纤芯和包层的界面上光发生反射。由于包层的折射率  $n_2$  小于纤芯的折射率  $n_1$ ，所以存在着临界角  $\varphi_c$ ，如图 1.1.4 所示。当光线在界面上的入射角  $\varphi$  大于  $\varphi_c$  时，将产生全反射现象。若  $\varphi < \varphi_c$ ，入射光有一部分反射，另一部分通过界面进入包层，经过多次反射以后，光能量很快衰减。因此，只有满足全反射条件的光线才能携带能量传向远方。

临界角  $\varphi_c$  由下式决定：

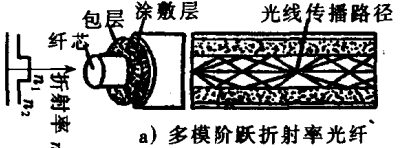
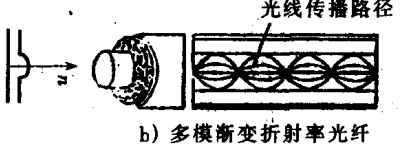
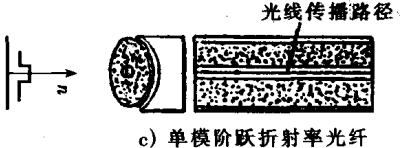
光纤类型与折射率分布、光的传输	芯径( $\mu\text{m}$ )	包层直径( $\mu\text{m}$ )	频带宽度	接续和成本
 <p>a) 多模阶跃折射率光纤</p>	50	125	较大 < 200 MHz · km	接续较易 成本费最小
 <p>b) 多模渐变折射率光纤</p>	50	125	大 200 MHz · km ~ 3 GHz · km	接续较易 成本费最大
 <p>c) 单模阶跃折射率光纤</p>	< 10	125	很大 > 3GHz · km	接续较难 成本费较小

图 1.1.3 三种主要类型的光纤

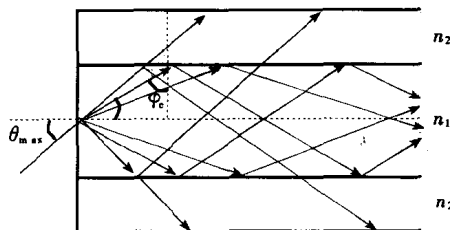


图 1.1.4 阶跃折射率光纤的子午光线

$$\varphi_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (1.1.1)$$

若光源发射的光经空气以后耦合到光纤中，那么满足光纤中全内反射条件的光的最大入射角  $\theta_{\max}$  满足

$$\sin \theta_{\max} = n_1 \sin(90^\circ - \varphi_c) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.1.2)$$

定义光纤的数值孔径为

$$\text{NA} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.1.3)$$

数值孔径表示光纤的集光能力。

实际上，光的全反射现象远非射线光学描述的这么简单。全反射仅仅是能量全反射，在靠近界面的包层介质中仍具有电磁波，只是透射波的场分量沿垂直于界面的方向按指数规律

衰减，即所谓是倏逝波。而且透射波的波矢量有平行于界面的分量，从而构成了表面波。Goos-Hänchen 的实验证实了光表面波的存在，证明并不是入射波到达界面时就在该点反射，而是反射点离入射点有一段距离。

在多模阶跃折射率光纤中，满足全反射、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，从而产生了脉冲展宽，这就限制了光纤的传输容量。

从射线光学的观点可以计算多模阶跃折射率光纤中子午光线的最大群时延差。子午光线是处在一个子午面（包含光纤轴线的平面）内，经过光纤的轴线在周围界面间作内部全反射的光线，如图 1.1.4 所示。设光纤的长度为  $L$ ，光纤中平行轴线的入射光线的传输路径最短，为  $L$ ；以临界角入射到纤芯和包层界面上的光线的传输路径最长，为  $\frac{L}{\sin \varphi_c}$ 。因此，最大时延差为

$$\Delta\tau_d = \frac{\frac{L}{\sin \varphi_c} - L}{c/n_1} = \frac{Ln_1}{c} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_2} \quad (1.1.4)$$

定义光纤的相对折射率差为

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.1.5)$$

单位长度光纤的最大群时延差为

$$\Delta\tau_d \approx \frac{n_1 \Delta}{c} \quad (1.1.6)$$

群时延差限制了多模阶跃折射率光纤的传输带宽，使它的传输带宽一般小于  $200 \text{ MHz} \cdot \text{km}$ 。为了减小多模光纤的脉冲展宽，人们制造了渐变折射率光纤。

## (2) 多模渐变折射率光纤中光的传输

渐变折射率光纤的折射率在纤芯中连续变化。适当地选择折射率的分布形式，可以使不同入射角的光线有大致相等的光程，从而大大减小群时延差。渐变折射率光纤的脉冲展宽可以减小到仅有阶跃折射率光纤的  $1/100$  左右。

光纤的光学特性决定于它的折射率分布。在渐变折射率光纤中，纤芯中折射率的分布是变化的，而包层中的折射率通常是常数，用  $n_a$  表示。纤芯中折射率分布可用幂律式表示。

故渐变折射率光纤的折射率<sup>①</sup>分布可以表示为

① 在有些书中，纤芯中折射率分布表示为： $n(r) = n_0 \left[ 1 - 2\Delta \left( \frac{r}{a} \right)^{\alpha} \right]^{1/2}$ ，将此式展开且忽略高次项，仅保留两项，便得到(1.1.7)式。两式非常接近，但从(1.1.7)式出发，可使许多分析计算简化。



$$n(r) = \begin{cases} n_0 \left[ 1 - \Delta \left( \frac{r}{a} \right)^g \right] & r < a \\ n_a & r \geq a \end{cases} \quad (1.1.7)$$

式中： $g$  是折射率变化的参数； $a$  是纤芯半径； $r$  是光纤中任意一点到轴心的距离； $\Delta$  是渐变折射率光纤的相对折射率差，即

$$\Delta = \frac{n_0 - n_a}{n_0} \quad (1.1.8)$$

阶跃折射率光纤也可以认为是  $g = \infty$  的特殊情况。使群时延差减至最小的最佳的  $g$  在 2 左右，称为抛物线分布。下面用射线光学理论分析渐变折射率光纤中子午光线和偏射线的传输性质。

### ① 近轴子午光线

光线在介质中的传输轨迹应该用射线方程表示：

$$\frac{d}{ds} \left( n \frac{dr}{ds} \right) = \nabla n \quad (1.1.9)$$

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； $\nabla n$  表示折射率的梯度。

将射线方程应用到光纤的圆柱坐标中，讨论抛物线分布的光纤中的近轴子午光线，即和光纤轴线夹角很小、可近似认为平行于光纤轴线（ $z$  轴）的子午光线。由于光纤中的折射率仅在径向变化，而沿圆周方向和  $z$  方向是不变的。因此，对于近轴子午光线，射线方程可简化为

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{1}{n} \frac{dn}{dr} \quad (1.1.10)$$

式中  $r$  是射线离开轴线的径向距离。

对抛物线分布，有

$$\frac{dn}{dr} = - \frac{n_0 \Delta}{a^2} \cdot 2r \quad (1.1.11)$$

将上式代入 (1.1.10) 式中，得

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = - \frac{2n_0 r}{na^2} \cdot \Delta \quad (1.1.12)$$

对近轴光线， $\frac{n_0}{n} \approx 1$ ，因此上式可近似为

$$\frac{d^2 r}{dz^2} \approx \frac{2r}{a^2} \cdot \Delta \quad (1.1.13)$$

设  $z=0$  时， $r=r_0$ ， $\frac{dr}{dz} = r_0'$ ，上式的解为

$$r = r_0 \cos \left[ (2\Delta)^{1/2} \frac{z}{a} \right] + r_0' \frac{a}{(2\Delta)^{1/2}} \sin \left[ (2\Delta)^{1/2} \frac{z}{a} \right] \quad (1.1.14)$$