

11



高等学校教材

电子信息系列

光纤通信

高建平 编著

*Electronic
Information*

西北工业大学出版社



／ 高等学校教材

光 纤 通 信

高建平 编著

西北工业大学出版社

【内容简介】本书以目前常用的强度调制/直接检测光纤通信技术为主线,结合作者多年的教学与科研实践经验,比较全面地论述了光纤的传输理论,光源与光发送机的工作原理及辅助电路,光检测器与光接收机的工作原理及辅助电路,光纤通信系统的整体分析与工程设计,光纤、光源及光接收机等特性参数的测量技术,光纤通信的先进技术等内容。各章(除第1章外)之后均附有一定量的具有启发性、针对性及工程性的习题。

本书可作为电子信息工程及通信工程专业本科高年级学生的教材,对从事相关专业的科技人员也有较高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信/高建平编著. —西安:西北工业大学出版社,2005.8

ISBN 7-5612-1921-0

I. 光… II. 高… III. 光纤通信 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 024886 号

设计制作:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:029-88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:兴平市印刷厂

开 本:787 mm×1 092mm 1/16

印 张:19

字 数:454 千字

版 次:2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷

定 价:26.00 元

前 言

本书以目前常用的强度调制—直接检测(IM/DD)光纤通信技术为主线,结合作者多年的教学与科研实践体验,比较全面地论述了光纤的传输理论,光源与光发送机的工作原理及辅助电路,光检测器与光接收机的工作原理及辅助电路,光纤通信系统的整体分析与工程设计,光纤、光源及光接收机等特性参数的测量技术,光纤通信的先进技术等内容。

在光纤的色散特性分析、阶跃光纤的矢量解法、半导体激光器的工作特性分析、光接收机的噪声分析、模拟光接收机的特性参数分析、光源与光纤的耦合分析及数字光纤通信系统的总体设计等方面的论述,作者皆有一些独到的见解或独到之处。

本书的论述由浅入深、详略得当,读者自会在学习过程中有所体会。

作者本着理论分析与工程应用并重的原则,合理安排各章节的内容及习题,以期读者获得事半功倍之效。

目录及正文中标有“※”号的部分为选学内容。是否学习这部分内容,不影响前后知识的连贯性。

本书既可作为电子信息工程及通信工程专业本科高年级学生的教材,也可供从事相关专业的科技人员参考。

感谢西北工业大学出版社为作者提供了难得的机会。

鉴于作者水平有限,书中不足之处,恳请各位同行和读者不吝指正。

作 者

2005 年元月

目 录

第 1 章 光纤通信概论.....	1
1.1 通信系统基本结构及其发展史	1
1.2 光纤通信概述	2
第 2 章 光纤的传输理论.....	5
2.1 光纤的典型结构及分类	5
2.2 光纤的传输特性及主要参数	7
2.3 阶跃折射率光纤的模式理论.....	21
2.4 渐变折射率光纤的波动理论.....	37
2.5 单模光纤.....	49
※2.6 光纤的制造.....	59
2.7 光纤的成缆.....	61
本章小结	62
习题	67
第 3 章 光源与光发送机	70
3.1 激光的基本理论.....	71
3.2 半导体激光器(LD)	80
3.3 半导体发光二极管(LED)	112
3.4 光源的调制	115
3.5 光发送机	119
本章小结.....	137
习题.....	139
第 4 章 光检测器与光接收机.....	142
4.1 半导体光检测器	143
4.2 光接收机的噪声分析	162
4.3 数字光接收机的灵敏度	178
4.4 数字光接收机的辅助电路	197
※4.5 模拟光接收机	208

本章小结.....	212
习题.....	214
第 5 章 光纤通信系统	218
5.1 概述	218
5.2 数字光纤通信系统的基本结构	218
5.3 数字光纤通信系统的主要性能指标	220
5.4 光纤通信系统中的光耦合	224
5.5 数字光纤通信系统的总体设计	236
本章小结.....	243
习题.....	244
※第 6 章 光纤通信(系统)的测量技术	246
6.1 光纤损耗特性的测量方法	246
6.2 光纤色散特性的测量方法	251
6.3 光纤横截面折射率分布特性的测量方法	255
6.4 光接收机灵敏度和动态范围的测量方法	257
6.5 数字光纤通信系统的整体测量(眼图法)	258
本章小结.....	260
习题.....	260
第 7 章 光纤通信的先进技术	262
7.1 相干光纤通信系统	262
※7.2 波分复用光纤通信系统	270
7.3 光放大器及光孤子通信系统	276
本章小结.....	283
习题.....	285
附录	286
附录 1 一些常用物理常量的数值和单位	286
附录 2 特殊函数	286
附录 3 半导体光器件的典型技术参数	288
附录 4 量子噪声的泊松分布的推导	289
参考文献	291

第 1 章 光纤通信概论

人类文明的进步一直与 通信技术的发展紧密相连。从古代的烽火台到 1844 年的第一条商用电报线路;从 1878 年的第一台电话交换机到现在的互联网,通信技术的发展使得人类之间的信息交流更直接、更有效、更方便、更快捷。

1.1 通信系统基本结构及其发展史

一、通信系统的基本功能

任何一个通信系统都应具有把要传递的信息有效地、不失真地从发送地传输到接收地的基本功能。

二、通信系统的基本结构

图 1.1 表示任何一个通信系统的基本结构框图。它一般应由发送端机、接收端机和传输信道三个基本单元组成。

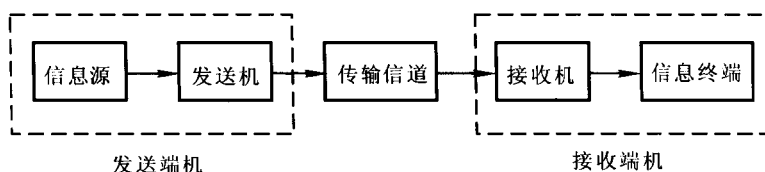


图 1.1 通信系统的基本结构框图

在发送端机,信息源把信息馈入到发送机中。发送机以信号的形式(一般为已调电磁波)把信息耦合到传输信道中,载有信息的信号在信道中由发送端机传输到接收端机。在接收端机,由接收机提取传输信道中的信号并经适当处理使之恢复成原来的信息,然后把此信息送到信息终端。至此,完成了信息由发送端机到接收端机的传输。某些情况下,发送与接收是可逆的。即两地之间的信息在信道中可以双向传输,发送端同时也可以接收信息,接收端同时也可以发送信息。

传输信道可分为无线传输信道和有线传输信道两种类型。无线传输信道主要指地球周围的大气层,而有线传输信道则主要指能够引导电磁波传播的传输线(如平行双导线、同轴电缆、

金属波导、介质波导等)。一般来讲,信道的传输特性是影响通信系统性能的决定性因素。选择不同的信道,将决定发送端机和接收端机的不同结构、类型及设计方式,从而决定了整个通信系统的性能。

三、通信系统的发展概况

信号在信道中传输时,随着传输距离的增加,将逐渐发生衰减和失真。例如,当信号沿金属类传输线传输时,由于产生热而使其幅度逐渐衰减,而当光频段信号在大气中传输时,由于大气分子对光的散射和吸收,将使其幅度逐渐衰减且形状也发生变化(称为失真)。当需要传输的距离较长时,为了使信号在接收端机能够被恢复成真实的原来的信息,必须在发送端机与接收端机之间对信号进行一次或多次处理(放大和整形),完成此种功能的部分称为中继站。在一般情况下,一个中继站应由背靠背放置的接收机和发送机组成。接收机部分接收信道中已达一定程度衰减和失真的传输信号,并对其进行放大和整形,然后送入发送机将其耦合至向接收端机一侧的信道继续传输。显然,中继站数目的增加将直接造成通信系统成本的增加。

人类研制每一种新型通信系统的目的无非是提高传输保真度,提高效率,以便能够更准确、更有效地把更多的信息传输尽可能远的距离(无中继)。

在 19 世纪以前,人类所使用的通信装置仅限于如烽火台、信号灯或喇叭之类的简单光学或声学装置。电报和电话的发明及应用是 19 世纪人类文明的重要标志。19 世纪末,麦克斯韦、赫兹、马可尼等分别在理论上和实验中发现了电磁波,并研制出第一台产生长波长电磁波的装置用于表演“无线电”。电磁波的发现使通信技术在 20 世纪得以飞速发展。广播、电视、雷达、卫星通信等通信技术的出现和发展除了极大地满足人类的生活需求外,也使得电磁波的频率不断升高、电磁波的波谱资源不断地得到开发和利用。进入 20 世纪 60 年代之后,由于激光器的诞生,使得人类对利用光频($10^{14} \sim 10^{15}$ Hz)进行通信产生了浓厚的兴趣,因为从理论上讲,光频通信系统的容量是微波通信系统的 10 万倍以上。到了 20 世纪 70 年代,衰减系数为 20 dB/km 的光纤的研制成功克服了光波在大气中传输时衰减太快的缺陷,加之半导体光源和光检测器的问世,使得通信技术进入了光纤通信的新时代。

1.2 光纤通信概述

一、光纤通信系统的构成

目前,实用光纤通信系统都采用强度调制—直接检测方式(IM/DD——Intensity Modulation/Direct Detection)。强度调制就是用电信号去调整光源产生的光波的强度(单位面积上的光功率),使之随信号电流呈线性变化;直接检测是指光接收机直接对光频进行检测。这种通信方式是本书讨论的重点,其优点是:系统结构简单,成本较低,容易实现。

图 1.2 示出了 IM/DD 光纤通信系统的组成框图。它由发送端机、光纤传输信道,接收端机三个主要部分组成。

在发送端机,欲传输的信号经电发送机转换成电信号,再由光发送机的光源进行电光转换(记做 E/O),形成光信号。

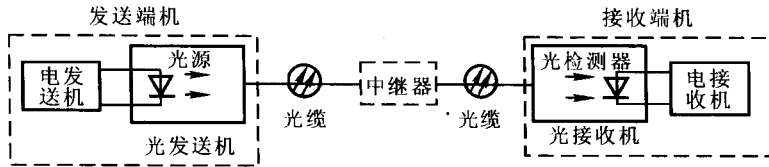


图 1.2 光纤通信系统组成框图

光源产生的光信号耦合到光纤中,经光纤传输到接收端机。

在接收端机,由光检测器直接检测光纤中传来的光信号并进行光电转换(记做 O/E),形成电信号,再由电接收机恢复成原来的信号。

在光纤通信系统中,除光源、光纤和光检测器外,都是电子线路。这些电子线路基本上由功率放大器、低噪声放大器、编码、整形、控制及保护等电路构成,与电通信所用的技术相同。光源、光纤和光检测器则完成电光转换、光的传输和光电转换的功能,正是这一功能实现了光纤通信系统大容量、高质量的传输特性。

光纤是光纤通信系统中最重要的一部分,它是(载有信号的)光波的传输媒介,其传输特性直接影响系统的通信质量。光纤的主要传输特性是损耗与色散。光纤的传输损耗特性用衰减系数表示,它与光波频率和光纤中的杂质浓度等因素有关。目前,在波长 $\lambda=1.55\text{ }\mu\text{m}$ 波段可以得到衰减系数小于 0.2 dB/km 的光纤。光纤的色散特性是指光纤中因不同频率、不同模式的光波的传输速度不同而使已调信号失真的现象。色散影响传输带宽,从而限制了通信容量和传输距离(无中继)。目前的光纤主要为石英光纤,其典型结构如图 1.3 所示。内部圆柱由折射率为 n_1 的石英材料组成(称为纤芯),外部圆柱壳由折射率为 n_2 的石英材料组成(称为包层), $n_1>n_2$ 。当在两种介质分界面上满足全反射条件时,可将光波限制在纤芯区域经多次全反射传输到目的地。

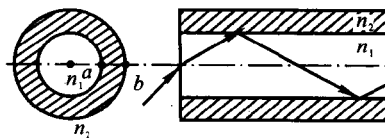


图 1.3 光纤的结构

光源是一种用来完成电光转换(E/O)的光器件,主要采用半导体激光器(LD——Laser Diode)和发光二极管(LED——Light Emitting Diode)。

光检测器是一种用来完成光电转换(O/E)的光器件,常采用 PIN 光电二极管和雪崩光电二极管(APD——Avalanche Photoelectric Diode)。

二、光纤通信的发展概况

光纤通信的发展趋势:由短波长向长波长发展;由低速率向高速率发展;由多模向单模发展,由小容量向大容量发展。

第一代光纤通信系统于 20 世纪 70 年代后期投入使用。其工作波长为 $\lambda=0.85\text{ }\mu\text{m}$ 。光源采用 GaAlAs 半导体激光器或发光二极管。传输信道为多模光纤,其衰减系数为 $2.5\sim$

4 dB/km。光检测器为 Si 材料 PIN 光电二极管或雪崩光电二极管。系统容量为三次群(34 Mbit/s)以下,无中继传输距离不超过 10 km。

第二代光纤通信系统于 20 世纪 80 年代中期投入使用,其工作波长为 $\lambda=1.3\ \mu\text{m}$ 。光源采用 InGaAsP 半导体激光器。传输信道为多模光纤,其衰减系数为 0.5~1 dB/km。光检测器为 Ge 材料雪崩光电二极管。系统容量为四次群(140 Mbit/s)。无中继传输距离为 50 km。

第三代光纤通信系统于 20 世纪 90 年代初期投入使用,其工作波长为 $\lambda=1.55\ \mu\text{m}$ 。光源和光检测器与第二代光纤通信系统类同。传输信道为单模光纤(色散更低、损耗更小),其衰减系数可达 0.25 dB/km。系统容量超过五次群(565 Mbit/s)。无中继传输距离可达 100 km。

目前,由于单纵模激光器和光放大器的研制成功及投入使用,更大容量(几十 Gbit/s)、更长无中继传输距离的新型光纤通信系统已在实验室内研制成功并进入实用阶段。这些新型光纤通信系统包括:相干光纤通信、波分复用光纤通信、全光通信和光孤子通信等系统。

三、光纤通信的优点及应用

1. 光纤通信的主要优点

(1)频带宽,容量大。单模光纤在低损耗区($\lambda=1.45\sim1.55\ \mu\text{m}$)内,其理论带宽可达 $10^{12}\ \text{Hz}$ 。

(2)损耗小,无中继传输距离长。光纤最低损耗可降到 0.2 dB/km 以下。

(3)尺寸小,质量轻。一条 12 根光纤组成的光缆的直径为 12 mm,单位长度的质量约为 90 g/m。

(4)抗电磁干扰。

(5)绝缘性好,抗腐蚀,使用安全。

(6)材料资源丰富。石英光纤的主体材料是 SiO_2 ,其资源十分丰富。

2. 光纤通信的应用

由于光纤的优点明显突出,使得光纤通信的应用十分广泛。它的大容量是互联网和移动通信系统所需要的;它的抗电磁干扰特性使之安全地工作在电力网或变电所内的强电场环境中;它的抗腐蚀性能适合化工厂等工作环境;它的质量很轻,适于安装在飞行器、舰艇等高速行驶的物体上,以减轻负荷,节省燃料。

第 2 章 光纤的传输理论

光纤是光波传输的信道。分析光波在光纤中的传输问题,可以采用两种理论:几何光学和波动光学。几何光学用光射线来代表光能量传输的路线,视光射线沿直线传播,在两种媒质的分界面处产生反射和折射(遵循反射、折射定律)。几何光学是一种近似理论,只在频率无限高(波长无限短)时,才是精确的。由于几何光学简单直观,而光波的频率很高(波长很短),因此,对于横截面几何尺寸远大于光波长的多模光纤常用几何光学法来分析。

波动光学是把光纤中光波作为经典的电磁波,它必须满足麦克斯韦方程组和全部边界条件。求解满足边界条件的麦克斯韦方程组,可以得到精确的解析(或数值)形式的结果,也即得到了光纤中容许传输的光波的电磁场的结构形式——模式,从而可以分析光纤的传输特性。

2.1 光纤的典型结构及分类

一、光纤的典型结构

光纤是一种横截面很小的可挠透明的长丝。它具有束缚和传输光能量的作用。为了便于工程上安装和敷设,常常将多根光纤组合成具有一定机械强度的光缆。

单根光纤的典型结构如图 2.1 所示,它主要由纤芯、包层和涂敷层组成。

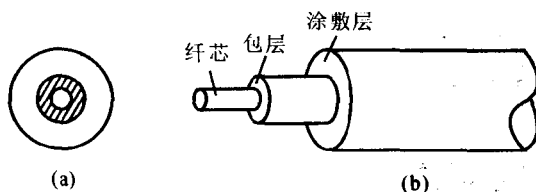


图 2.1 光纤的典型结构
(a)横截面结构图; (b)立体结构图

纤芯是半径为 a 、折射率为 n_1 的单固体介质圆柱体。半径 a 的典型数值为几微米到几百微米。纤芯外面包有折射率为 n_2 ($n_2 < n_1$) 的单固体介质——包层,包层的厚度一般为 $100\ \mu\text{m}$ 左右。包层除了具有束缚光波(使光波在纤芯内传输)的作用之外,还可以减少由于纤芯表面处介质的不连续性而产生的散射损耗,增加光纤的机械强度,并且保护纤芯以避免吸收可能接

触到的表面沾染物质。涂敷层的作用是保护光纤不受水汽的侵蚀和机械擦伤,同时还增加了光纤的柔韧性。

二、光纤的分类

1. 按光纤的原材料不同分类

(1)石英光纤。这种光纤的纤芯和包层均由高纯度的 SiO_2 经掺有适当的杂质制成。石英光纤的损耗低,强度及可靠性高,但价格也较高。目前,石英光纤应用最广泛。

(2)多组分玻璃光纤。如用钠玻璃($\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO}$)经适当掺杂制成。这种光纤的损耗较低,但可靠性较差。

(3)塑料包层光纤。其纤芯用 SiO_2 制成,包层用硅树脂制成。

(4)全塑光纤。其纤芯和包层均用塑料制成。此类光纤损耗较大,可靠性较差,但价格较低。

2. 按光纤横截面上折射率分布的规律不同分类

(1)阶跃折射率光纤。纤芯介质的折射率是均匀分布的,在纤芯与包层的分界面处,折射率发生突变。

(2)渐变折射率光纤。这种光纤的折射率在纤芯中连续变化,在纤芯与包层的分界面处,折射率恰好等于包层介质的折射率。

3. 按光纤中传输模式的数量分类

(1)单模光纤。在单模光纤中,只有基模可以传输。

(2)多模光纤。在一定的工作波长下,光纤除了传输基模之外,还可以同时传输其他模式。

多模光纤可采用阶跃折射率分布(称为多模阶跃折射率光纤),也可以采用渐变折射率分布(称为多模渐变折射率光纤)。而单模光纤常采用阶跃折射率分布(称为单模阶跃折射率光纤)。

就石英光纤而言,大体可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类型。这也是目前国内常用的三种类型的光纤。图 2.2 示出了它们的横截面结构、折射率分布、光的传输路径及有关参数。

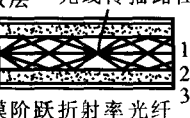
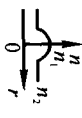
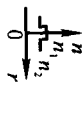
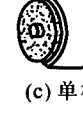
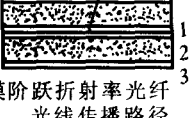
折射率分布	结构	光路径	芯径 μm	带宽 $\text{MHz} \cdot \text{km}$	接续	成本
		 (a) 多模阶跃折射率光纤	50	<200	较易	较低
		 (b) 多模渐变折射率光纤	50	$200 \sim 3 \times 10^3$	较易	高
		 (c) 单模阶跃折射率光纤	<10	73×10^3	较难	较高

图 2.2 三种主要类型石英光纤的折射率分布及有关参数

2.2 光纤的传输特性及主要参数

一、光在光纤中的传输

本节我们首先应用几何光学理论分析多模光纤中光的传输路径及有关问题。在后面几节,将利用波动光学理论研究光纤中光波的电磁场的分布特性及有关性质。

1. 多模阶跃折射率光纤中光的传输

在多模阶跃折射率光纤的纤芯中,光波(光射线)沿直线传输,在纤芯与包层的分界面处发生全反射而使能量集中在纤芯之内。在一般情况下,阶跃折射率光纤中可以存在两种形式的光射线:子午射线和斜射线。

图 2.3 示出了阶跃折射率光纤的纤芯中,某子午射线的传输路径。子午射线是与光纤轴线相交的平面折线,它在光纤端面上的投影是一条过轴的直线。

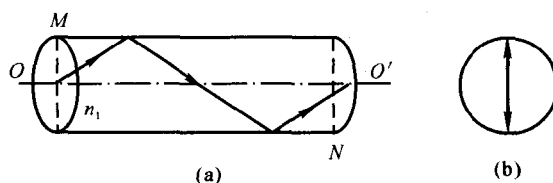


图 2.3 阶跃折射率光纤中的子午射线

(a)子午面的传输路径;(b)在端面的投影

图 2.4 示出了阶跃折射率光纤的纤芯中某斜射线的传输路径。斜射线是不经过光纤轴线(在纤芯与包层的分界面和焦散面所限定的区域内传输)的空间折线,它在光纤端面上的投影为一组首尾相接的折线。

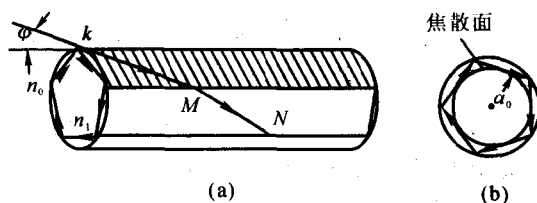


图 2.4 阶跃折射率光纤中的斜射线

(a)斜射线的传输理论;(b)在端面的投影

在光纤(靠发送端一侧)的端面上,以不同角度入射的射线所走的路径不同,进而形成不同的传输模式。下面以子午射线为例进行分析,以得到一些有用的概念。

(1)传输条件。如图 2.5 所示,一条子午射线于光纤的端面上以入射角 φ 由光源经空气区域($n_0=1$)耦合入射到光纤的纤芯中。设纤芯介质的折射率为 n_1 ,包层介质的折射率为 n_2 。

根据折射定律,在入射端面两侧,入射角 φ 与折射角 θ_z 应满足如下关系:

$$n_0 \sin \varphi = \sin \theta_z = n_1 \sin \theta_i \quad (2.1)$$

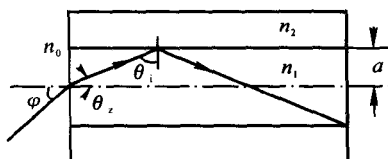


图 2.5 子午射线的传输条件(阶跃光纤)

进入纤芯的子午射线必须在纤芯与包层的分界面处发生全反射,才可使光能量被束缚在纤芯内。根据全反射条件,应有

$$\theta_i > \theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.2)$$

式中, $n_2 < n_1$, θ_c 称为临界角。

由图 2.5 中的几何关系,可得

$$\theta_i + \theta_z = \frac{\pi}{2}$$

代入式(2.1)有

$$\begin{aligned} \sin \varphi &= n_1 \sin \theta_z = n_1 \cos \theta_i = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_i} \leq n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c} = \\ &= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}} = n_1 \sqrt{2\Delta} \end{aligned}$$

传输条件为

$$\varphi \leq \varphi_{\max} = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \arcsin n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.3)$$

式中

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} = \frac{n_1 + n_2}{2n_1} \frac{n_1 - n_2}{n_1} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.4)$$

Δ 称为相对折射率差。

(2) 光纤的数值孔径(NA)。由式(2.3)可知: n_1 与 n_2 的差别越大, $\varphi_{\max}$ 就越大,表明光纤收集光射线的能力越强。由此,定义光纤的数值孔径(记为 NA)为

$$\text{NA} = \sin \varphi_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (2.5)$$

由式(2.5)可见,光纤的数值孔径越大,其收集的光能量就越多。

斜射线的数值孔径比子午射线的数值孔径稍大。一般情况下,通信用光纤的 n_1 与 n_2 差别较小(称为弱导光纤),其数值孔径也较小。

2. 多模渐变折射率光纤中光的传输

在渐变折射率光纤的纤芯中,介质的折射率随离开轴线的距离呈方幂规律变化。设纤芯半径为 a ,取以光纤轴线为 z 轴的圆柱坐标系 (ρ, φ, z) ,则纤芯及包层介质的折射率可以表示为

$$n(\rho) = \begin{cases} n_0 [1 - 2\Delta(\rho/a)^g]^{1/2} & (\rho < a) \\ n_2 (\text{常量}) & (\rho \geq a) \end{cases} \quad (2.6)$$

式中, n_0 为纤芯轴线处介质的折射率; n_2 ($n_2 < n_0$ 且 $n_2 \approx n_0$) 为包层介质的折射率; $\Delta =$

$\frac{n_0^2 - n_2^2}{2n_0^2} \approx \frac{n_0 - n_2}{n_0}$, 称为渐变折射率光纤的相对折射率差; g 称为折射率分布指数。

适当地选择纤芯介质折射率的分布形式(改变 g 值), 可以使入射角不同的光射线有大致相等的时延, 从而大大减小群时延差、减小光纤的模式色散, 改善渐变折射率光纤的频率特性。在一般情况下, 渐变折射率光纤中也可以存在两种形式的光射线: 子午射线和斜射线。在渐变折射率光纤中, 光射线的传输路径不再是折线, 而是连续、弯曲的曲线。

图 2.6 示出了渐变折射率光纤的纤芯中, 某子午射线的传输路径以及在光纤端面上折射率的分布。在此情况下, 光射线未到达纤芯与包层的分界面就返回纤芯区。

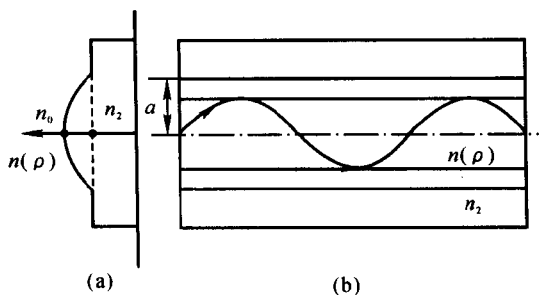


图 2.6 渐变折射率光纤中的子午射线

(a) 折射率分布; (b) 子午射线的传输路径

图 2.7 示出了渐变折射率光纤的纤芯中, 某斜射线的传输路径在光纤端面上的投影。可以看出, 斜射线在外焦散面(不一定与纤芯和包层的分界面重合但不会超出分界面之外)与内焦散面之间的空间区域(盘旋着)沿轴线传输并与两焦散面相切。在特殊情况下, 如果内、外焦散面重合, 则斜射线成为螺旋线。

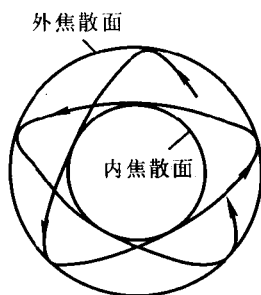


图 2.7 渐变折射率光纤中的斜射线

(1) 传输条件。如图 2.8 所示, 一条子午射线于光纤的纤芯端面上的 $\rho = \rho_0$ ($\rho_0 < a$) 点, 沿临界入射角 $\varphi_{\max}$ 由光源经空气区域($n'_0 = 1$) 耦合入射到纤芯区域并恰好在纤芯与包层的分界面处折回纤芯。可见: 在 $\rho = \rho_0$ 点, 凡入射角 $\varphi < \varphi_{\max}$ 的子午射线均可满足传输条件。

根据折射定律, 在端面($\rho = \rho_0$) 处有

$$n'_0 \sin \varphi_{\max} = \sin \varphi_{\max} = n(\rho_0) \sin \theta_{s0} \quad (2.7)$$

式中, θ_{s0} 为 $\rho = \rho_0$ 点折射光线的轴向角(也是端面处的折射角)。

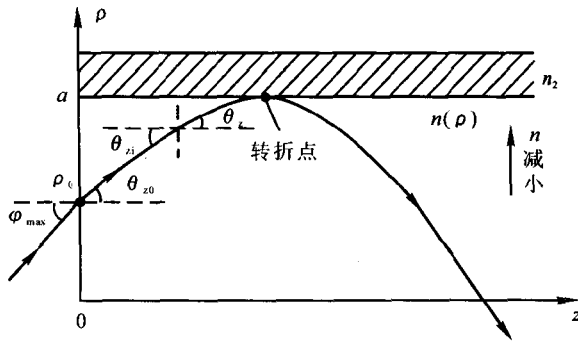


图 2.8 子午射线的传输条件(渐变光纤)

另一方面,光射线进入渐变折射率光纤的纤芯区之后,由于纤芯区介质的折射率随 ρ 坐标的增大而减小,导致光射线在行进过程中不断地发生折射,其轨迹为曲线(向折射率较大的一侧弯曲)。根据折射定律,应有如下关系:

$$\begin{aligned} n(\rho_0) \sin \theta_{i0} &= n(\rho_0) \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_{z0} \right) = \\ n(\rho_0) \cos \theta_{z0} &= n(\rho) \sin \theta_i = n(\rho) \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_{zi} \right) = \\ n(\rho) \cos \theta_{zi} &= n(\rho) \cos \theta_z \end{aligned} \quad (2.8)$$

式中, θ_z 为 $\rho = \rho$ 处光射线的轴向角。

特别是在转折点($\theta_z = \theta_{z\#} = 0$) 有

$$\left. \begin{aligned} \rho &= a \\ n(\rho_0) \cos \theta_{z0} &= n(a) = n_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

联立式(2.7) 和式(2.9),可得

$$\sin \varphi_{\max} = n(\rho_0) \sin \theta_{z0} = n(\rho_0) \sqrt{1 - \cos^2 \theta_{z0}} = \sqrt{n^2(\rho_0) - n_2^2} \quad (2.10)$$

最后得到端面上 $\rho = \rho_0$ 处的传输条件为

$$\varphi \leq \varphi_{\max} = \arcsin [n^2(\rho_0) - n_2^2]^{1/2} \quad (2.11)$$

(2)(本地) 数值孔径。定义渐变折射率光纤纤芯区距离轴线 ρ 处的数值孔径(也称为本地数值孔径) 为

$$\text{NA}(\rho) = [n^2(\rho) - n_2^2]^{1/2} = n_0 \sqrt{2\Delta} \left[1 - \left(\frac{\rho}{a} \right)^g \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

由式(2.11),式(2.12) 和式(2.6) 可以看出,数值孔径随 ρ 的增大而减小,在光纤的端面上,离轴线越远的位置,光纤收集光射线(能量) 的能力越弱。在轴线处有 $\text{NA}(0) = \text{NA}_{\max} = \sqrt{n_0^2 - n_2^2}$,光纤收集光射线的能力最强;在 $\rho = a$ 处, $\text{NA}(a) = 0$ 。

(3) 渐变折射率光纤纤芯横截面上的光功率分布。设光源对光纤(端面) 均匀照射且光纤无损耗传输,则纤芯内 $\rho(0 \leq \rho \leq a)$ 处的光功率密度为

$$p(\rho) = A [\text{NA}(\rho)]^2 \quad (2.13)$$

式中, A 为常量(正比于光源的光功率)。

可见,渐变折射率光纤的(本地) 数值孔径越大,该处的光功率密度也越大。另一方面,通过测量(一段不长的) 光纤输出端面上的光功率分布,可得到该光纤的 $\text{NA}(\rho)$,从而可推求其

纤心介质的折射率 $n(\rho)$, 这种方法称为近区场测试法。

二、光纤的损耗特性

光纤的传输损耗是光纤的重要特性之一, 它将使传输的光信号产生衰减。当入纤光功率和接收机灵敏度给定之后, 光纤的传输损耗将成为决定系统无中继传输距离的重要因素。

在一般情况下, 光信号在光纤中(沿 z 轴)传输时, 光功率随 z 坐标呈指数规律(均匀)衰减, 即

$$P(z) = P_i e^{-\alpha z} \quad (2.14)$$

式中, P_i 为光纤输入端($z = 0$)由光源耦合进光纤的入纤功率; α 称为衰减(损耗)系数。

设光信号在光纤中传输(无中继)的轴向距离为 L , 则有

$$\alpha = \frac{-10}{L \lg e} \lg \frac{P(L)}{P_i} \quad (\text{dB/km}) \quad (2.15)$$

引起光纤损耗的因素非常复杂, 衰减损耗系数的具体确定经常依赖于实验测量。降低光纤损耗主要依赖于光纤制造工艺的提高及对光纤材料的研究。下面仅简单说明一下光纤损耗的机理。

对于石英类光纤而言, 在 $0.8 \mu\text{m}$ 到 $1.6 \mu\text{m}$ 波长范围内, 产生传输损耗的主要因素: ①纤芯和包层物质的吸收损耗, 如石英材料的本征吸收和杂质吸收; ②纤芯和包层材料的散射损耗, 如瑞利散射、受激喇曼散射和受激布里渊散射等引起的损耗; ③波导散射损耗(由光纤表面粗糙或随机畸变所致); ④光纤弯曲所产生的辐射损耗。

以上损耗从其机理上又可分为两种不同情况。其一是石英光纤的固有损耗, 如石英材料的本征吸收和瑞利散射, 这种损耗从机理上限制了光纤所能达到的最小损耗; 另一种为石英光纤的非固有损耗, 如杂质吸收和波导散射等, 它们可以通过材料提纯和改善工艺而减小直至消除。

1. 石英光纤的固有损耗

(1) 石英材料的本征吸收(损耗)。石英材料的本征吸收有两个频带。一个在红外波段(称为红外吸收带), 另一个在紫外波段(称为紫外吸收带)。红外吸收是由物质分子的振动引起的。纯石英材料 SiO_2 的三个谐振(吸收)峰分别对应波长为 $9.1 \mu\text{m}$, $12.5 \mu\text{m}$ 和 $21 \mu\text{m}$ 。其损耗带尾延伸到 $1.5 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 。经掺杂后, 掺杂元素与 SiO_2 形成组合谐振造成吸收峰平移。掺锗 Ge 将使最低吸收波长向高的方向平移, 由纯 SiO_2 的 $9.1 \mu\text{m}$ 移至 $11.0 \sim 11.4 \mu\text{m}$, 这种移动对减小光纤通信波段($0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$)中的损耗有利。而掺硼 B 或掺磷 P 都将明显加大在 $1 \sim 2 \mu\text{m}$ 波段的本征红外吸收。

【例 2.1】 掺锗的石英光纤的红外衰减系数为

$$\alpha \approx 7.81 \times 10^{11} \exp(-48.48/\lambda) \quad (\text{dB/km})$$

当 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时, $\alpha \approx 0.02 \text{ dB/km}$, 其影响较小。但当 $\lambda = 1.7 \mu\text{m}$ 时, $\alpha \approx 0.32 \text{ dB/km}$ 。显然, 红外吸收影响了光纤通信的工作波段向更长波长方向扩展。

紫外吸收是由原子跃迁引起的。其吸收峰在波长为 $0.16 \mu\text{m}$ 处。但其损耗带尾延伸到波长 $1 \mu\text{m}$ 附近, 对光纤通信产生一定的影响。

(2) 石英材料的瑞利散射(本征散射)损耗。导致光纤固有损耗的另一因素是瑞利散射, 它由光纤中介质折射率在微观上的随机起伏所致。在石英光纤的制造过程中, 石英材料处于高温