



湖北高职“十一五”规划教材
湖北省高教学会高职专委会研制

总策划 李友玉 策划 屠莲芳

光纤光学基础

Guangxian Guangxue Jichu

主编 王臻 魏访



WUHAN UNIVERSITY PRESS
武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

光纤光学基础/王臻,魏访主编. —武汉:武汉大学出版社,2009.1
湖北高职“十一五”规划教材
ISBN 978-7-307-06845-2

I. 光… II. ①王… ②魏… III. 纤维光学—高等学校:技术学校—教材 IV. TN25

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第010311号

责任编辑:林莉 责任校对:刘欣 版式设计:马佳

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:cbs22@whu.edu.cn 网址:www.wdp.com.cn)

印刷:通山金地印务有限公司

开本:787×1092 1/16 印张:10 字数:234千字 插页:2

版次:2009年1月第1版 2009年1月第1次印刷

ISBN 978-7-307-06845-2/TN·35 定价:19.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

湖北高职“十一五”规划教材

光纤光学基础

武汉大学出版社

内 容 简 介

全书共分七个模块,分别是光纤导光原理、光纤基本特性、光无源器件、光有源器件、光纤的连接与耦合、特种光纤和光纤技术的应用。教材在大部分模块后面安排了相应的思考题与练习题。

本教材具有较强的高职院校课程改革的特点,同时兼顾实用性与前沿性,可以作为高职院校光电子专业、光信息专业、通信专业的教材,也可供相关技术人员参考。

前 言

《光纤光学基础》是湖北高职“十一五”规划教材,是在湖北省教育厅立项的湖北省教育科学“十一五”规划专项资助重点课题《高职光电子技术课程体系研究》(湖北高职“四个建设”系列规划课题)的成果基础上合作研制而成的。

光纤通信是 20 世纪 70 年代问世的通信新技术,作为其传输介质,光纤及其相关技术的发展成为研究的热点。随着人们对光纤认识的不断深入和光纤技术的迅猛发展,光纤的应用领域也在不断拓宽。光纤光学课程作为光电信息专业的专业基础课,地位十分重要。本教材内容涉及光纤导光原理、光纤基本特性、光无源器件、光有源器件、光纤的连接与耦合、特种光纤、光纤技术的应用。

本教材采用模块的形式编写,结合高职学生的基础和学习能力,在保持一定的理论分析深度的基础上,简化数学分析过程,尽可能多地采用实物图片和真实实例。

湖北省高等教育学会副秘书长、湖北省教育科学研究所高教研究中心主任李友玉研究员,湖北省高等教育学会高职高专教育管理专业委员会教学组组长李家瑞教授,秘书长屠莲芳,负责本教材研制队伍的组建、管理和本教材研制标准、研制计划的制定与实施。

本教材共分为七个模块。模块一由武汉职业技术学院魏访编写,模块二由鄂州职业大学吴英凯编写,模块三由武汉软件工程职业学院孙冬丽编写,模块四由武汉软件工程职业学院郑丹编写,模块五由武汉职业技术学院王臻编写,模块六由武汉职业技术学院张森编写,模块七由武汉交通职业学院何晓鸿编写。全书由王臻、魏访、李建新统稿。

本教材研制过程中,参阅了大量文献和成果,得到了合作院校和相关单位的大力支持,在此一并表示诚挚的感谢。

由于光纤及其技术的发展日新月异,加之我们的水平有限且编写时间仓促,不妥或谬误之处在所难免,敬请广大师生、读者及专家学者批评指正。

湖北高职“十一五”规划教材

《光纤光学基础》研制组

2009 年 1 月

主 编:王 臻 魏 访

副 主 编:张 森 李建新

参研人员:(按姓氏笔画排列)

王 臻(武汉职业技术学院)

孙冬丽(武汉软件工程职业学院)

张 森(武汉职业技术学院)

李建新(武汉软件工程职业学院)

吴英凯(鄂州职业大学)

何晓鸿(武汉交通职业学院)

郑 丹(武汉软件工程职业学院)

魏 访(武汉职业技术学院)

凝聚集体智慧 研制优质教材

教材是教师教学的脚本,是学生学习的课本,是学校实现人才培养目标的载体。优秀教师研制优质教材,优质教材造就优秀教师,培育优秀学生。教材建设是学校教学最基本的建设,是提高教育教学质量最基础性的工作。

高职教育是中国特色的创举。我国创办高职教育时间不长,高职教材存在严重的“先天不足”,目前使用的教材多为中专延伸版、专科移植版、本科压缩版等,这在很大程度上制约着高职教育教学质量的提高。因此,根据高职教育培养“高素质技能型专门人才”的目标和教育教学实际需求,研制优质教材,势在必行。

2005年以来,湖北省高教学会高职高专教育管理专业委员会(简称“高职专委会”)高瞻远瞩,审时度势,深刻领会国家关于“大力发展职业教育”和“提高高等教育质量”之精神,准确把握高职教育发展之趋势,积极呼应全省高职院校发展之共同追求;大倡研究之风,大鼓合作之气;组织全省高职院校开展“教师队伍建设、专业建设、课程建设、教材建设”(简称“四个建设”)的合作研究与交流,旨在推进全省高职院校进一步全面贯彻党的教育方针,创新教育思想,以服务为宗旨,以就业为导向,工学结合、校企合作,走产学研结合发展道路;推进高职院校培育特色专业、打造精品课程、研制优质教材、培养高素质的教师队伍,提升学校整体办学实力与核心竞争力;促进全省高职院校走内涵发展的道路,全面提高教育教学质量。

湖北省教育厅将高职专委会“四个建设”系列课题列为“湖北省教育科学‘十一五’规划专项资助重点课题”。全省高职院校纷起响应,几千名骨干教师和一批生产、建设、服务、管理一线的专家,一起参加课题协同攻关。在科学研究过程中,坚持平等合作,相互交流;坚持研训结合,相互促进;坚持课题合作研究与教材合作研制有机结合,用新思想、新理念指导教材研制,塑造教材“新、特、活、实、精”的优良品质;坚持以学生为本,精心酿造学生成长的精神食粮。全省高职院校重学习研究、重合作创新蔚然成风。

这种以学会为平台,以学术研究为基础开展的“四个建设”,符合教育部关于提高教育教学质量的精神,符合高职院校发展的需求,符合高职教师发展的需求。

在湖北省教育厅和湖北省高教学会领导的大力支持下,在湖北省高教学会

秘书处的指导下,经过两年多艰苦不懈的努力和深入细致的工作,“四个建设”合作研究初见成效。高职专委会与长江出版传媒集团、武汉大学出版社、复旦大学出版社等知名出版单位携手,正陆续推出课题研究成果:“湖北高职‘十一五’规划教材”,这是全省高职集体智慧的结晶。

交流出水平,研究出智慧,合作出成果,锤炼出精品。凝聚集体智慧,共创湖北高职教育品牌——这是全省高职教育工作者的共同心声!

湖北省高教学会高职专委会主任

黄木生

2009年1月

目 录

模块一 光纤导光原理	1
任务一 光纤的结构和类型	1
任务二 光在光纤中传输的基本性质	12
模块二 光纤的基本特性	20
任务一 光纤的损耗特性	20
任务二 光纤的色散特性	25
任务三 光纤的偏振和双折射特性	29
任务四 光纤的非线性特性	33
任务五 光纤的机械特性与温度特性	35
模块三 光纤无源器件	39
任务一 光纤活动连接器	39
任务二 光衰减器	48
任务三 光纤光栅	53
任务四 光耦合器	58
任务五 光波分复用器	61
任务六 光隔离器	65
任务七 光开关	70
模块四 光有源器件	76
任务一 光纤放大器	76
任务二 光纤激光器	89
模块五 光纤的连接与耦合	98
任务一 光纤的连接	98
任务二 光纤的耦合	108
模块六 特种光纤	117
任务一 大芯径特种光纤	117
任务二 单包层掺杂光纤	118
任务三 双包层掺杂光纤	122

任务四	抗辐射特种光纤·····	123
任务五	耐高温特种光纤·····	125
任务六	能量光纤·····	127
任务七	色散补偿光纤·····	129
任务八	弯曲不敏感单模光纤·····	131
任务九	保偏光纤·····	133
任务十	光子晶体光纤·····	135
模块七	光纤技术的应用·····	139
参考文献	·····	149

模块一 光纤导光原理

作为一种新兴的通信技术,光纤通信在短短的几十年中获得了迅速的发展,目前一个覆盖全球的光纤通信网已经建立起来。

光纤是光导纤维(Optical Fiber)的简称,作为光纤通信的传输介质,光纤及其应用技术也受到人们的普遍关注。本模块将重点介绍光纤的结构特性和光学特性。

各种光纤如图 1.1 所示。



图 1.1 各种光纤

任务一 光纤的结构和类型

◆ 知识点

- ☐ 光纤的基本结构与几何尺寸参数
- ☐ 光纤的分类方式
- ☐ 光纤相关参数的测量

◆ 任务目标

- ☐ 熟悉光纤的结构和特点
- ☐ 了解光纤的分类
- ☐ 学会测量光纤的基本参数(几何参数、折射率分布)

任务导入:

为了满足光纤中光信号的传输要求,根据光的传输原理和传输特性,光信号在光纤内传输中要求全反射,以减少光信号在传输过程中的辐射损耗,因此光纤的结构和材料选择要满足一定的技术要求。

各种光纤成品如图 1.2 所示。

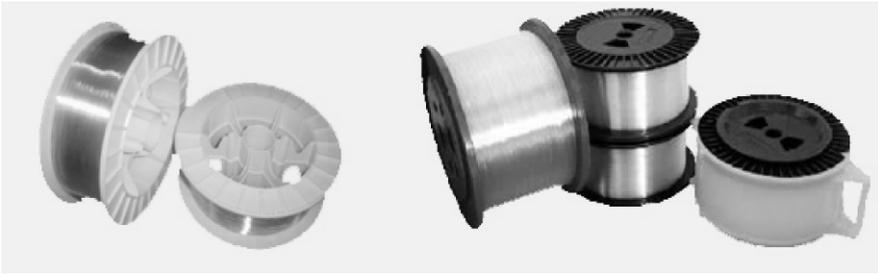


图 1.2 各种光纤成品

相关知识:

1. 光纤的结构和各部分的作用

光纤是一种由高度透明的石英(或其他材料)经复杂的工艺控制而成的光波导材料。光纤的典型结构为多层同轴圆柱体,一般是由折射率较高的纤芯、折射率较低的包层以及涂覆层和护套构成的,其典型结构和实物模型如图 1.3 和图 1.4 所示。纤芯和包层作为光纤结构的主体,对光波的传播起着决定性作用。涂敷层与护套的作用则是隔离杂散光、提高光纤强度、保护光纤等。

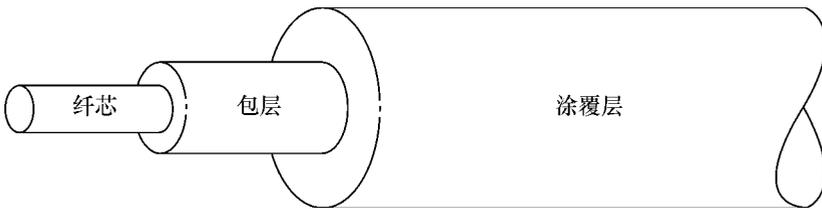


图 1.3 典型光纤结构



图 1.4 光纤实物结构模型

光纤芯的折射率较高,是光波的传输介质,其材料的主要成分为含量高达 99.999% 的二氧化硅(SiO_2),其中掺杂极少量的其他材料,如掺入少量的二氧化锗(GeO_2)、五氧化二磷(P_2O_5)等,以提高纤芯的折射率。

包层为紧贴纤芯的材料层,与纤芯共同构成光波导。材料一般为纯二氧化硅(SiO_2),有时也掺杂微量的三氧化二硼(B_2O_3),以降低包层的折射率。包层的外径一般为 $125\sim 140\ \mu\text{m}$,主要起着限制光强在纤芯中传输的作用。包层折射率略小于纤芯材料的折射率。

为了增强光纤的柔韧性,提高机械强度,增加抗老化性能以及延长光纤的寿命,一般在包层的外面用环氧树脂或硅胶等高分子材料做一层涂覆层。该涂覆层用来保护光纤起到护

套的功能,其外径一般为 $300\mu\text{m}$ 左右。

(1) 光纤的纤芯

光纤的纤芯是一种直径为 $8\sim 100\mu\text{m}$ 、柔软的、能够很好地传导光波的透明介质,它是光信号的传输路径,可由玻璃或塑料来制成。其中使用超高纯度石英玻璃(SiO_2)制作的光纤具有很低的线路传输损耗,各种技术性能都较好。光纤芯的折射率 n_1 通常在 1.5 左右,多模光纤的纤芯直径一般为 $50\sim 100\mu\text{m}$,单模光纤的纤芯直径为 $8\sim 10\mu\text{m}$,所以光纤是一种比电线、电缆直径小得多的信号传输介质,几乎与人的头发丝粗细相当。

(2) 光纤的包层

在折射率 n_1 较高的单根纤芯外面再用折射率 n_2 稍低一些的材料制作成纤芯包层,将纤芯包住。纤芯与包层的交界面为在纤芯内传输的光线提供一个光滑的反射面,起到光隔离、防止光泄漏的作用。只有纤芯的折射率 n_1 大于包层的折射率 n_2 时,才能使光信号在传输过程中形成全反射,构成一条光通道。因为临界角 $\theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$,为了尽量扩大临界角 θ_c ,以便使光源的光信号能更容易耦合进光纤,所以包层折射率 n_2 应尽可能接近纤芯折射率 n_1 。当然 n_2 的增大也可减少光线在包层介质 n_2 中的穿透深度。通常多模光纤的包层直径为 $140\mu\text{m}$,单模光纤的包层直径为 $125\mu\text{m}$ 。从光的传输原理可知,为了满足光信号的传输,光纤的制造工艺要保证使纤芯和包层的不圆度和不同心度尽可能小。

(3) 涂敷保护层

用环氧树脂或硅胶在光纤包层外面涂敷一层保护层,保护光纤不受水汽和各种有害物质的侵蚀、防止光纤被划伤,同时还可增强光纤的柔韧性,增加光纤的机械强度,提高抗老化性能。

(4) 外保护套

在光纤涂敷层的外面再加一层保护套,即可构成一个完整的单根光纤。将多根光纤放在一个保护套内,按一定的结构排列就可构成光缆。加装外保护套除了可保护光纤不受损伤外,还可增加机械强度,为了提高光缆的抗拉性能,便于光缆的工程敷设,要在光缆内增设金属加强芯,特殊应用场合的光缆,如海底光缆,还要加装铠甲,做成铠装光缆,防止鱼类等海洋动物咬伤光缆,保证信息传输道路的正常畅通。

2. 光纤的分类

光纤用来作为光信号传输的介质,根据传输特性、传输模式数量、制造光纤所用材料、纤芯折射率分布规律等,可将光纤按下列方式分类。

(1) 根据制造光纤所使用的原材料分类

① 石英光纤。该光纤的纤芯和包层都是由高纯度的 SiO_2 掺入适量杂质制成的,目前这种光纤的损耗最低,强度和可靠性最高,性能最优良,因此使用最广泛,但价格较高。石英光纤一般用 $\text{GeO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ 和 P_2O_5 做纤芯,用 $\text{B}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 做包层。

② 多组分玻璃纤维光纤。例如用钠玻璃($\text{SiO}_2 \cdot \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO}$)掺入适当杂质制成的光纤,该光纤的损耗虽然较低,但强度和可靠性等方面还存在一些问题,有些技术问题还有待于解决。

③ 塑料包层光纤。这种光纤的纤芯用石英玻璃材料制成,它的包层一般用硅树脂塑料材料来制作。

④ 全塑光纤。该光纤的纤芯和包层都是由塑料制成的,其价格较低,但传输损耗较大,

且可靠性也存在一定程度的问题。

(2) 按纤芯介质的折射率 n 的径向分布分类

目前通信用光纤根据纤芯横截面上折射率的径向分布情况,可粗略分为阶跃型(Step Index, SI)折射率分布光纤和渐变型(Graded Index, GI)折射率分布光纤两大类,这两类光纤不论是传输特性还是制造工艺,都有很大差异。阶跃型折射率光纤的制造工艺较为简单,但传输模间色散较大。渐变型折射率光纤的传输模间色散较小,但制造工艺较为复杂。

(3) 按纤芯中传输模式数量分类

按纤芯中传输的模式数量分类,可分为能传输几百至上千个模式的多模光纤和只能传输一种模式的单模光纤。多模光纤的制造工艺成本较低,但存在模间色散。模间色散是造成波形失真的主要原因,所以多模光纤的传输速率不会太高。单模光纤因无模间色散,可用于高速传输系统。

3. 几种常用的石英光纤的结构及特点

(1) 多模光纤(Multimode, MM)

可以传播多种模式的光纤,称为多模光纤。根据折射率在纤芯和包层的径向分布情况,又可分为阶跃多模光纤和渐变多模光纤。它们的制造工艺、折射率的分布规律、传输特性是不同的。

① 阶跃型多模光纤(Step Index Multimode, SIMM)。阶跃型多模光纤的折射率 n_1 在整个光纤芯内保持不变,在纤芯与包层界面处突然发生变化,由 n_1 变成 n_2 ,如图 1.5 所示。

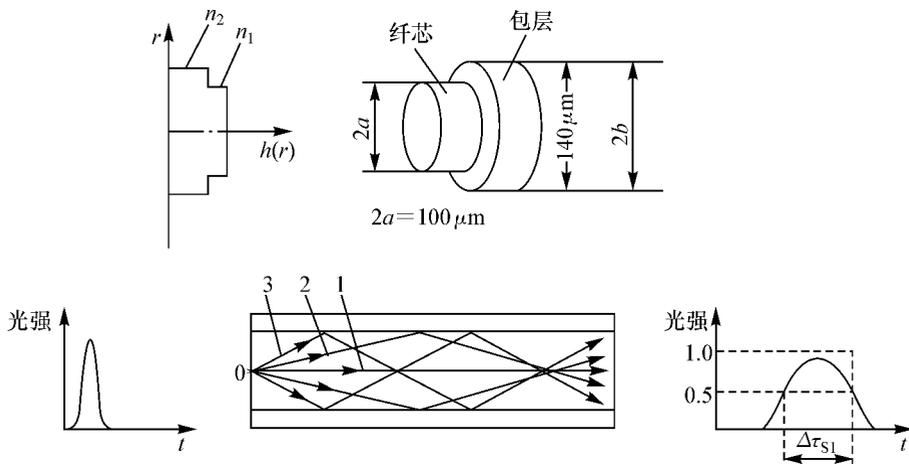


图 1.5 阶跃型多模光纤的结构及传输色散示意图

阶跃型多模光纤的折射率分布为:

$$n = \begin{cases} n_1 & r < a \\ n_2 & a \leq r \leq b \end{cases} \quad (n_1 > n_2) \quad (1.1)$$

式中, r 是光纤的径向坐标($0 \leq r \leq b$), n_1 和 n_2 分别是纤芯与包层的均匀折射率, $n_1 > n_2$, 其折射率在纤芯与包层的分界处($r = a$ 处)产生了阶跃式变化。阶跃型多模光纤的纤芯直径

一般为 $d=2a=50\sim 100\mu\text{m}$ 。

光信号在这种多模阶跃型光纤中传输的特点是模间色散 $\Delta\tau$ 太大,脉冲展宽厉害。其原因是纤芯材料的折射率分布均匀,各种模式的光信号在纤芯中的传播速度是相等的,但不同模式的光线各自的传播路径不同,所以同时进入光纤入端不同模式的光信号,传输到达光纤出端时传播的路程长度各不相同,即到达光纤出端的时间不同,产生了时间延迟差,形成了模间色散。如图 1.5 所示。

最大延迟时间 $\Delta\tau_{\text{max}}$ 的计算方法如下:从图 1.6 中可以看出,传输距离最短的是最低次模(基模),它是沿光纤轴心传输(图中的中心虚线位置),设其传输距离为 L ,传输距离最长的是最高次模式的光信号,即纤包交界处当入射角为临界角 θ_c 的那种模式,其接收角为 θ_{max} ,传输距离为 $L/\sin\theta_c$,最大群延迟时间 $\Delta\tau_{\text{max}}$ 为:

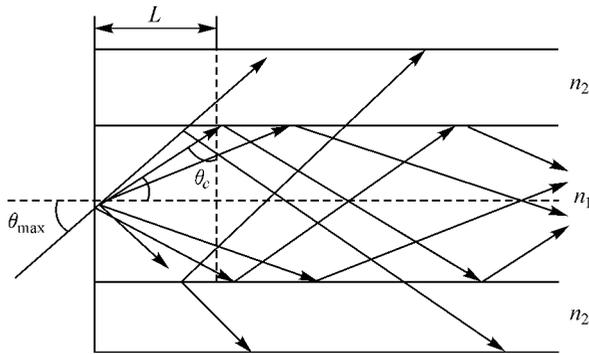


图 1.6 阶跃型多模光纤中各种模式的传输路径

$$\begin{aligned}\Delta\tau_{st} &= \Delta L/v = [(L/\sin\theta_c) - L]/(c/n_1) = Ln_1/c(1/\sin\theta_c - 1) \\ &= Ln_1/c(n_1/n_2 - 1) = \frac{Ln_1}{c} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_2} = \frac{Ln_1}{c} \cdot \Delta\end{aligned}\quad (1.2)$$

式中, ΔL 是基模与最大模式光信号的传输光程差, $v=c/n_1$ 是光在纤芯内的传播速度, c 是真空中光速。 $\Delta=(n_1-n_2)/n_1$ 为光纤的相对折射率差,也是光纤的一个重要参数, n_1 、 n_2 分别为纤芯材料的折射率,由于 n_1 与 n_2 近似相等,则 $n_1/n_2\approx 1$ 。所以单位距离($L=1\text{km}$)的最大延时为

$$\Delta\tau_{ast} \approx \frac{1}{c} n_1 \Delta\quad (1.3)$$

由上式可以看出,光纤的时延差与 Δ 成正比, Δ 越大,时延差越大,从减小光纤时延差的观点上看,希望 Δ 较小为好。这种 Δ 小的光纤称为弱导光纤,通信用光纤都是弱导光纤。由于色散延时的存在,限制了阶跃型多模光纤的传输带宽,使它的传输带宽 B 与距离 L 的乘积,即带宽距离积 BL 一般小于 $200\text{MHz}\cdot\text{km}$,这是阶跃型多模光纤的主要缺点。因阶跃型多模光纤的传输带宽较窄,所以仅作为短距离通信网的传输介质。

② 渐变型多模光纤(Graded Index Multimode, GIMM)。在渐变型多模光纤中,其纤芯的折射率沿径向不是均匀分布的,即纤芯材料的折射率不是一个常数 n_1 ,纤芯中心的折射率最大,而沿纤芯半径方向其折射率逐渐减小,至芯包交界面处降为包层折射 n_2 ,如图 1.7 所示。从图中还可看出,各阶模在渐变型多模光纤中的传输时,低次模的光线传

输路程短,但靠近纤芯中心的材料折射率大,光传输的速度低;高次模的光线传输路程长,但偏离纤芯中心的材料折射率逐渐变小,光传输的速度逐渐变高,所以高模数的光线与低模数的光线通过光纤时的光程相同,其结果是高模数的光线传输所用时间基本与低模数的光线传输时间相同。合理设计光结的折射率分布,使沿轴心附近传输的低次模和沿纤芯周边附近传输的高次模在光纤中的传输时间相等,那么这种光纤中各模式传输的时延差就会大大减小。如渐变型折射率多模光纤的脉冲展宽可减小到仅有阶跃型折射率多模光纤的 1/100 左右。

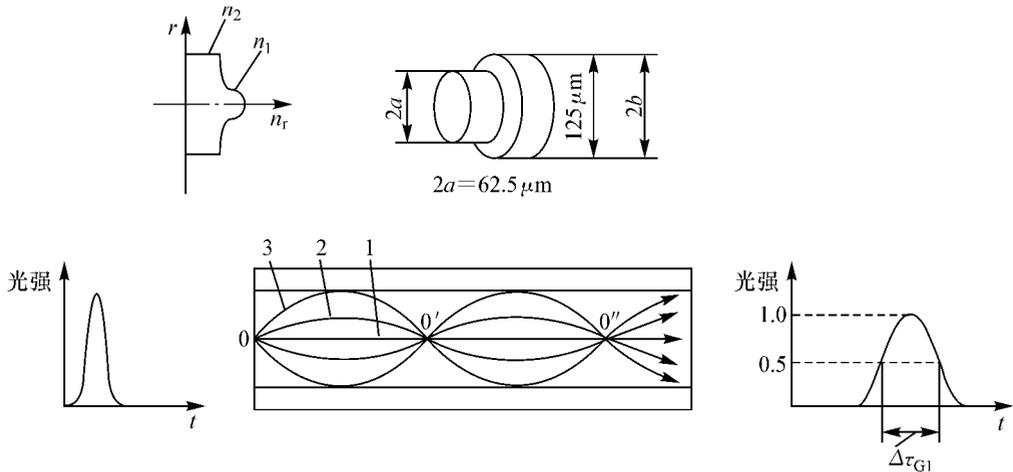


图 1.7 渐变型折射率多模光纤的结构及传输色散示意图

渐变型多模(GIMM)光纤的折射率分布为

$$n(r) = \begin{cases} n_1 [1 - 2\Delta(r/a)^g]^{1/2} & r < a \\ n_2 & a \leq r \leq b \end{cases} \quad (1.4)$$

式中, a 是纤芯半径, r 表示从纤芯 ($r=0$) 到芯包界面 ($r=a$) 中任一点的距离 (μm), Δ 为光纤的纤芯包层相对折射率差, b 是包层半径, g 是折射率分布指数。当 $g = \infty$ 时, 即为阶跃型多模光纤, 所以阶跃型多模光纤是渐变型多模光纤的特例。

渐变型光纤的最佳折射率分布要通过非常复杂的计算才能求得, 但在工程上常常作简化处理。理论和实践都证明, 当光纤折射率分布由指数 $g \approx 2$ 时, 群延时差减至最小, 这时纤芯的折射率分布接近为抛物线分布。光信号在渐变型多模光纤的纤芯中的传输过程, 虽然光纤芯的折射率是连续变化的, 但可以理解为光线在多层反射面的折射过程, 如图 1.8 所示。

对于渐变型多模光纤, 由于色散延时比阶跃型色散延时小得多, 它的传输带宽距离乘积一般可达 $0.2 \sim 2 \text{GHz} \cdot \text{km}$, 传输比特速率距离乘积可达 $0.3 \sim 10 \text{Gbit/s} \cdot \text{km}$, 当传输比特速率为 100Mbit/s 时, 传输距离可达 100km , 渐变型多模光纤信息的传输容量比阶跃型光纤的传输容量大 $100 \sim 200$ 倍。尽管如此, 在考虑多种因素的影响时, 对于传输比特速率为 $620 \text{Mbit/s} \sim 2.5 \text{Gbit/s}$, 中继距离为 30km 以上的干线通信系统, 仍不能满足要求。长距离高速率传输系统, 要采用带宽极大的单模光纤作为传输介质最为合适。

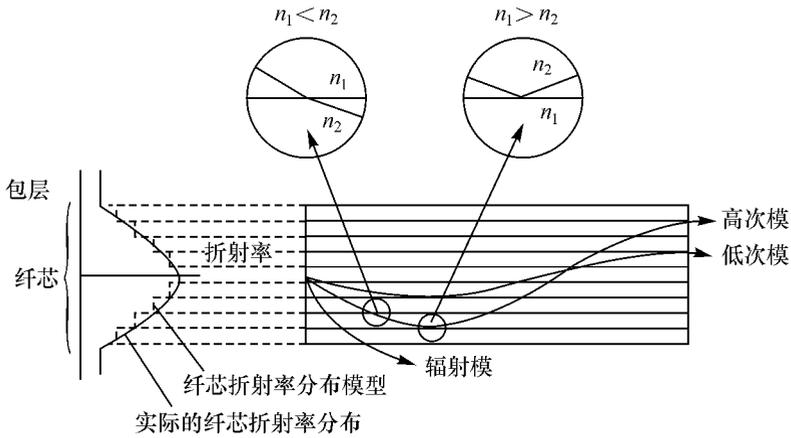


图 1.8 渐变型多模光纤中光的传输模型

(2) 单模光纤

在一根光纤中只能传输一种模式的光纤称为单模光纤，其材料折射率的分布为阶跃型，但其纤芯很细，通常纤芯直径 $d=2a=8\sim 10\mu\text{m}$ 。在单模光纤中只传输 $m=0$ 的基模，所以模间色散为零，其总的传输色散很小，带宽极大。

在单模传输光纤中，光信号沿光纤的轴线直线传播，图 1.9 是单模光纤的结构及传输色散示意图。为了调整通信系统的工作波长或改变色散特性，目前已经研制出各种结构复杂的单模光纤，如色散移位光纤、非零色散移位光纤、色散补偿光纤以及工作于 1550nm 的衰减最小的光纤等。

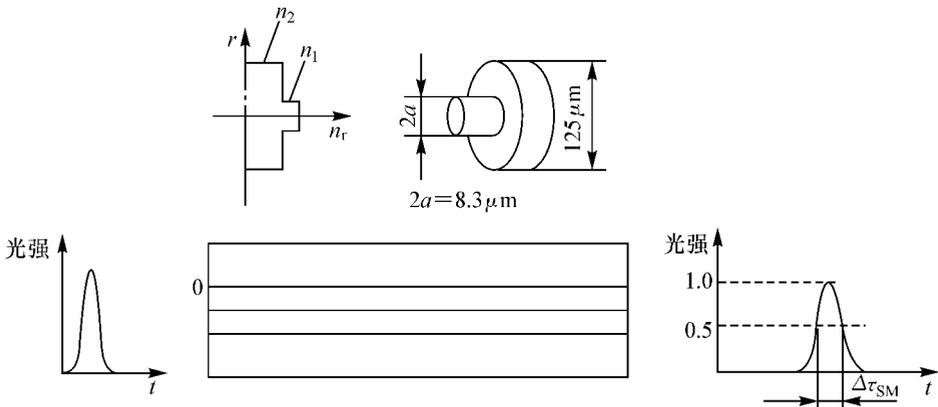


图 1.9 单模光纤的结构及传输色散示意图

由于单模光纤的色散小，传输带宽很宽，衰减较小，所以单模光纤主要用于长距离传输的高速网。单模光纤的问题是纤芯直径很小，其制造工艺较复杂，将光发射机的光信号耦合进光纤也比较困难，光功率的耦合效率较低。

表 1.1 列出了阶跃型多模光纤、渐变型多模光纤和阶跃型单模光纤的一些传输特性