

高等学校教材

光纤技术在电工领域中的应用

上海交通大学 管喜康 编



高等学校教材

光纤技术在电工领域中的应用

上海交通大学 管喜康 编

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书内容分两大部分。第一部分为光纤传输系统的组成部分, 主要介绍光纤、光源、光发送机、光检测器、光接收机的原理、构成、特性和电路, 并介绍由这些部件组成的光纤传输系统以及光纤系统在传输模拟信号和数字信号时的特点。第二部分为光纤传输技术在电工领域中的应用, 主要介绍在电压、电流、电场、局部放电的测量和试验方面的具体应用。

本书可做理工科高等院校电力和电工专业高年级学生的选修课教材, 也可供从事光纤通信应用技术的工作人员参考。

高等学校教材

光纤技术在电工领域中的应用

上海交通大学 管喜康 编

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

北京外文印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 11.25印张 253千字

1992年11月第一版 1992年11月北京第一次印刷

印数0001—1200册

ISBN7-120-01543-5/TM·439

定价3.00元

前 言

光纤技术是近十几年来迅速发展起来的一门新兴学科。光纤通信已成功地应用于邮电、电气化铁道、广播电视等领域。由于光纤传输系统的一系列优点，特别是光纤线路所具有的优越的抗电磁干扰能力和高绝缘性能，使得它在电力系统和电工制造等部门中得到广泛的应用。它除了用作长距离通信外，还被用来在中短距离内传输测量和控制信号，并且可以在超高压电力系统、高压电力设备以及高电压实验室中电位相差悬殊的两点之间进行信息传输。

本书根据编者多次对本内容讲授的经验总结并结合教学和科研实践写成，主要以电工领域中各专业的师生和工程技术人员为对象。其中前七章叙述了光纤技术的基础知识，后五章介绍了它在电工领域中的一些典型应用。叙述内容力求简明、概念清楚和易于理解。本书可作为理工科高等院校非电子专业学生的选修课教材；也可供研究院、所，实验室和工厂中从事光纤应用技术的工作人员参考。

本书由叶蜚誉副教授主审，并特请王明华教授参审。二位老师合作对这本书稿进行了认真审阅，提出了不少宝贵的意见，使编者受益匪浅，谨在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限、缺点错误在所难免，敬希读者批评指正。

编 者

1990. 11.

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 光纤	2
第一节 光纤的结构和种类	2
第二节 光纤的导光机理	5
第三节 几种不同形式的射线	11
第四节 沿光纤波导传输的模式	12
第五节 光纤的损耗	15
第六节 光纤的色散	20
第七节 光纤的连接	28
第二章 光源	32
第一节 引言	32
第二节 半导体光源的物理原理	34
第三节 发光二极管的结构和特性	37
第四节 激光二极管的结构和特性	41
第五节 光源的偏置和线性	45
第六节 光源的可靠性和寿命	49
第七节 光源与光纤的耦合	50
第三章 光检测器	55
第一节 引言	55
第二节 PIN 光电二极管	56
第三节 雪崩光电二极管	57
第四节 光检测器的电路模型	59
第五节 光检测器的噪声	61
第六节 光检测器的响应特性	64
第七节 小结	66
第四章 光发送机	67
第一节 概述	67
第二节 光源器件的模拟驱动电路	68
第三节 光源器件的数字脉冲驱动电路	73
第四节 光功率监测的显示	78
第五节 光源的保护	79
第六节 光源的温度控制	80
第五章 光接收机	82
第一节 概述	82
第二节 模拟接收机	82

第三节	数字接收机	86
第四节	光接收机的偏置电路和前置放大器	93
第六章	光纤传输系统	97
第一节	概述	97
第二节	最简单的光纤传输系统	97
第三节	光纤传输系统的功率估算	102
第四节	脉冲上升时间的估算	103
第五节	传输距离和信息容量	104
第七章	信号调制	105
第一节	概述	105
第二节	模拟传输中的调制方式	107
第三节	数字传输中的调制方式	108
第四节	调制方式的比较	109
第五节	频率调制	110
第六节	脉冲编码调制(PCM)	128
第八章	光纤通信在电工应用中的若干问题	132
第一节	概述	132
第二节	光纤传输系统的输入信号和输入回路	133
第三节	电磁感应和射线的影响	135
第四节	光导纤维的绝缘特性	135
第五节	发送器及光源的保护	139
第六节	发送器的直流工作电源	141
第七节	光纤传输系统中的遥控装置	142
第九章	光纤通信在冲击电压测量中的应用	143
第一节	引言	143
第二节	冲击电压测量装置	143
第三节	冲击电晕特性的测量	145
第四节	光纤通信用于冲击测量中的若干问题	147
第十章	光纤系统应用于电场测量	149
第一节	引言	149
第二节	测量工频电场的电场测量仪器	149
第三节	测量瞬态电场的电场测量仪器	152
第四节	球形电场传感器的应用	155
第十一章	光纤通信在局部放电试验中的应用	158
第一节	引言	158
第二节	光纤通信在局部放电试验中的应用	158
第三节	电力变压器内局部放电的监测	159
第十二章	利用光纤技术测量电力系统中的电流	164
第一节	引言	164
第二节	用光纤技术测量电流的两种方法	164
第三节	光电式电流传感器	165
第四节	磁光式电流传感器	170

绪 论

利用光波来传输被测电气参数的信息，已经有好几十年的历史了。磁光效应或法拉第效应被用来测量电流，电光效应、波克尔效应、霍尔效应被用来测量电压。这两种测量电流和电压的方法都具有这样的特点，即光波都是在大气空间中直接传播的。近十余年来，光纤通信由于在光导纤维和光源等器件上的突破性进展而获得了很快的发展。由于它具有一系列的优越性，特别是它的抗电磁干扰能力和绝缘特性，使得它的应用已经不再局限于邮电通信领域，而且在电磁环境恶劣的、电压很高的电力系统和电工制造等部门也得到了广泛的应用。光电子学已被用来测量很高的电压，例如几百万伏的冲击电压；光电式和磁光式电流传感系统已被用来测量高压电力系统中的电流；光纤技术还被用来测量电场强度、电晕损耗、雷电记录、绝缘子的电压分布、气体放电中的预放电电流等。不仅如此，光电子学与某些传感器相结合，例如：与压力传感器结合，可以测量断路器动作后高电位触点附近的压力变化；与温度传感器结合，可以测量高压电力电缆芯线上的温度变化；与微音器结合，可以探测电力设备内部由局部放电引起的超声信号。在电工领域中，光纤传输信号的技术不仅用于传输待测的电气参量和非电的参量，而且还被用来作为试验或生产中的一种控制手段，例如用于雷电研究站中发射“引发雷电火箭”的控制装置。

在高电压和大电流场合下，系统中会出现短暂的或重复的瞬变过程，例如断路器操作或雷电过程引起的短暂瞬变过程、可控硅整流元件正常工作时产生的重复的瞬变过程，使传输弱信号所处的电磁环境极为不利。在高电压实验室中，由放电引起的瞬变过程，使实验室的接地极电位瞬时跳高，给测量工作造成困难，并将威胁仪器和人身的安全。所有这些电工领域中不容易处理的屏蔽和隔离问题，在应用光纤传输系统后都变得容易处理了。

当今的光纤技术，不仅把光导纤维作为一种光波导器件在进行开发和研究，而且还把光导纤维作为一种传感器在进行开发和研究。磁光式电流传感器，就是把光纤作为一种传感器件在电工领域中的一项实际应用。

我们在学习光电子学基础的同时，还要把光纤通信作为一项实用化的技术，让它在电工领域（实际上远不限于电工领域）中得到更广泛的开发和应用。

第一章 光 纤

光纤是整个光纤传输系统中的传输介质。光纤的传输特性对整个系统的性能起着重要的作用。在本章中将叙述光纤的结构和类型，光在光纤中的传播，以及光信号在光纤中的损耗和失真等有关问题。

第一节 光纤的结构和种类

光纤是一种工作在光频下的介质波导，它的主要部分由纤芯和包层组成。纤芯和包层构成同轴圆柱体，光纤外面还包有弹性塑料缓冲物，如图1-1所示。纤芯的折射率比包层的

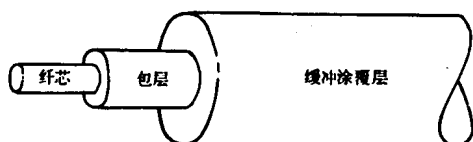


图 1-1 单根光纤结构简图

略高一些。它的横截面尺寸可与人的头发丝相比。纤芯的直径，按照光纤种类的不同，可从几个 μm 到 $100\mu\text{m}$ 。包层必须有一定的厚度，包层的外直径按照光纤种类的不同，可从 $100\mu\text{m} \sim 400\mu\text{m}$ 。从原理上来说，对于光线沿着光纤纤芯的传播而言，包层并不是必要的，

但是它具有若干种用途，即：它能够减少由于纤芯表面的不连续性而产生的散射损耗；能够增加光纤的机械强度；能够保护纤芯，以避免纤芯吸收可能接触到的表面沾染物质。由于光纤的几何尺寸很小，机械强度很差，容易受到外界物体的侵袭，因此，在包层之外又被覆上弹性塑料层。弹性塑料层外还有尼龙外层等物质，起保护光纤的作用。

由于通信上的需要，把多根光纤集合在一起构成光缆。

光纤按组成的成分来分，有以二氧化硅为主要成分的石英纤维，有多种组份的多组份纤维，有以液体作芯子的液芯纤维，有以塑料为材料的塑料纤维等。用得较多的是以二氧化硅为主要成分的石英光纤，在传输距离短的场合也可用塑料光纤。

光纤纤芯的折射率比包层的折射率约大1%左右。石英玻璃的折射率 $n=1.5$ 。由于光纤纤芯的折射率比包层的折射率大，光波就被限制在纤芯与包层界面以内的纤芯中沿纤芯的轴向向前传播。所以，把光纤称做为圆柱型光波导。光在光纤中的传播是单方向的。要实现双向通信就得用二根光纤。一根传送去方向的信号，另一根传送来方向的信号。

根据光纤能允许激励的总传输模数来分，光纤有多模光纤和单模光纤两种。单模光纤的纤芯直径很细，仅几个 μm 。由于只有单一光传播模式能在这种光纤的纤芯中传播，所以叫单模光纤。多模光纤的直径较大，至少有 $50\mu\text{m}$ ，由于有多种的光传播模式以不同的途径同时在纤芯中传播，所以叫做多模光纤。

根据光纤纤芯截面中折射率分布的不同，又有阶跃折射率分布型光纤和渐变折射率分布型光纤两种。后者又称做梯度折射率分布型光纤。

阶跃折射率分布型的光纤，如图1-2所示。图的左面表示光纤的截面，中间表示折射率沿纤芯直径的分布图型，右面则画出了光入射于纤芯后的传播模式。图中 d_1 为纤芯直径， d_2 为包层的外直径。从中间的图型可以看到纤芯内的折射率是均匀的，等于 n_1 。到了纤芯与包层的交界面，折射率突然从 n_1 阶跃地下降到包层的折射率 n_2 。在阶跃折射率分布的光纤中，光波在纤芯与包层的界面处发生全反射。由于入射角 α 的大小不同，纤芯中光波有着不同的折线传播途径，如图中的右面部分所示。由于纤芯内的折射率均匀，都等于 n_1 ，光波在纤芯内的传播速率也都是相同的，它等于 c/n_1 ， c 是真空中光的传播速率。

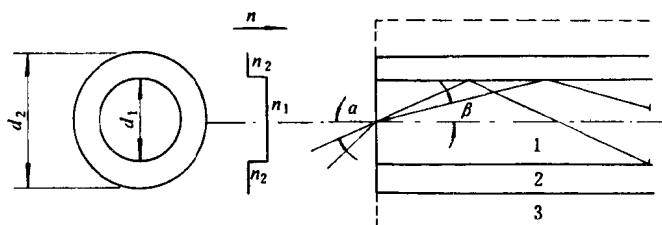


图 1-2 阶跃折射率分布型光纤

1—纤芯；2—包层；3—保护层

另一种渐变折射率分布（梯度）型光纤，如图1-3所示。图中， d_1 和 d_2 分别为纤芯的直径和包层的外直径。在这里，我们可以从中间的图型中看到纤芯中的折射率分布就不是均匀的。折射率在纤芯的中心处最大，等于 n_1 ，沿着纤芯半径 r 的方向，折射率 n 逐渐从 n_1 开始减小，到了与包层的分界面处，折射率减小到包层的折射率 n_2 。在右面的图中可见，光波在梯度型光纤中不是以折线的方式全反射地沿着轴向传播。它的传播途径近似于正弦形。由于这种光纤入射角 α 的大小不同，其纤芯中光波有着不同的、正弦振幅的传播途径。由于纤芯的折射率是按照图中 $n(r)$ 的规律分布的，光纤在纤芯不同半径 r 处的传播速率也各不相同。在纤芯的中心 $r=0$ 处，折射率 $n_{r=0}$ 为最大，光的传播速率最小，在纤芯和包层的交界面处， $r=d_1/2$ ，折射率 $n_{r=d_1/2}$ 为最小，光的传播速率最大。

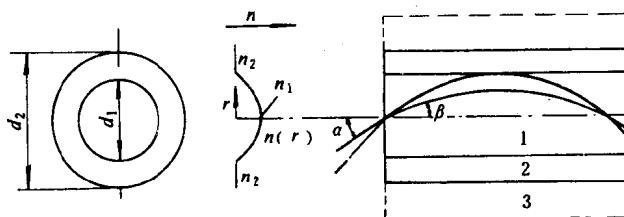


图 1-3 渐变折射率分布型（梯度型）光纤

1—纤芯；2—包层；3—保护层

由于阶跃型和梯度型两种光纤的纤芯中存在很多光传播模式，所以都是多模光纤。单模光纤的纤芯最细，但就其折射率分布来看，它是属于阶跃型的光纤，如图1-4所示。只是由于其纤芯的直径 d_1 比多模阶跃型纤芯的 d_1 小得多，仅允许光波以单一模式在纤芯中传播，因而叫单模光纤。

在图1-5中，给出了单模和多模阶跃折射率光纤和梯度折射率光纤的比较。图中同时示

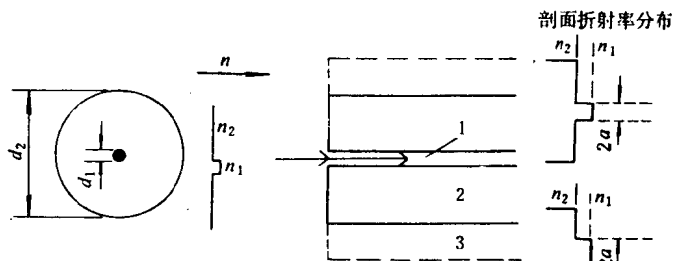


图 1-4 单模光纤

1—纤芯；2—包层；3—保护层

出了几种单模和多模光纤的典型尺寸。从某些角度来看，多模光纤与单模光纤相比具有若干优点。多模光纤有较大的纤芯直径，使之易于把光功率注入光纤中，并且容易与同类型光纤相连接。另一个优点是，可以利用发光二极管（LED）光源把光功率注入多模光纤，而单模光纤则必须用激光二极管（LD）来激励。虽然发光二极管输出的光功率比激光二极管的小（见第二章光源），但发光二极管容易制造、价格比较便宜、要求的电路比较简单、而且寿命比激光二极管长，因此，在许多应用场合，发光二极管更合乎需求。

光纤的损耗特性表示光纤在传播光功率时每单位长度上的衰减程度，常用单位为 dB/km。光纤损耗的高低将影响传输距离或中继站的长短。

多模光纤有个模间色散问题。当把光脉冲注入光纤时，脉冲内的光功率分布在光纤的所有（或大多数）模式之中。能够在多模光纤中传播的每个模色的行进速度是稍有不同的。这意味着在某一给定的光脉冲内的各模式到达光纤末端的时间是稍有不同的，从而使得沿光纤行进的脉冲在时间上展宽。光纤的脉冲展宽常用单位为 ns/km。梯度型折射率分布的光纤，在模间色散效应上比阶跃型的有好得多的特性。这使得梯度型折射率光纤具有比阶跃型光纤大得多的带宽（数据传输能力）。单模光纤中是不存在模间色散的，因而单模光纤具有的带宽或数据传输能力比梯度型光纤还要大些。

表格 1-1 中列出了各种光纤的特征。

表 1-1

各种光纤的特征

	多 模 光 纤		单 模 光 纤
	阶 跃 型	渐 变 型	
折射率分布和光传播的状况			

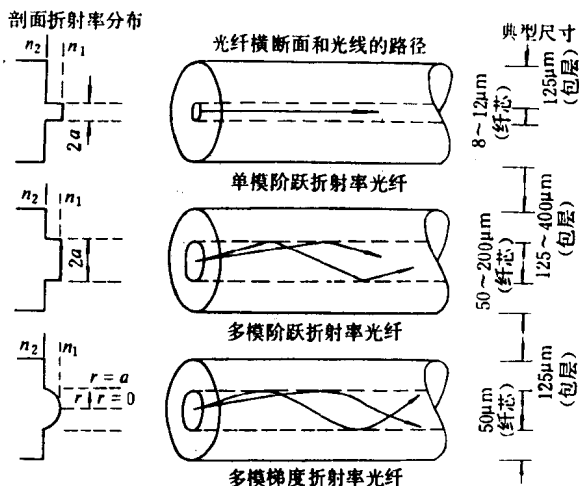


图 1-5 单模和多模阶跃折射率光纤与梯度折射率光纤的比较

续表

	多 模 光 纤		单 模 光 纤
	阶 跃 型	渐 变 型	
纤芯直径	40~200 μm	约50 μm	数 微 米
每公里的传输损耗①	从本质上说, 传输损耗由光纤材料的组成成分决定, 与上述分类无关。对石英光纤来说, 是3dB (光波长为0.85 μm), 0.5dB (光波长为1.3 μm) 左右。		
每公里的传输带宽②	10~50MHz	数百兆赫~数千兆赫	大于10000 MHz
连 接	比 较 容 易 (1 μm 级的准确度)	比 较 容 易 (1 μm 级的准确度)	困 难 (0.1 μm 级的准确度)

① 表示被传输信号的衰减率。

损耗 [dB] = $-10 \lg (\text{传通率})$

$$\text{传通率} = \frac{\text{输出信号的大小}}{\text{输入信号的大小}}$$

例如: 0.5dB 相当于传通率为89.1%;

3dB 相当于传通率为50.1%。

② 表示频率成分达到什么程度的信号能够通过的一种尺度。

1MHz = 10^6 Hz ;1GHz = 10^9 Hz 。

第二节 光纤的导光机理

光纤是如何导光的, 可以用两种方法来说明。第一种方法是利用几何光学或射线光学中光的反射和折射概念。这种方法可以提供传输机理的直观图象。在分析把光加在光纤的端面时, 射线理论容易解释。第二种方法是用模式理论把光波当作电磁波, 把光纤当作圆柱波导, 用电磁场分布的模式来解释光纤的导光现象。这里我们主要以射线理论来解释光波在光纤中传播的物理现象。

先来复习一下与光纤有关的几个基本光学定律和定义。材料的基本光学参量是折射率。在自由空间光波行进的速度 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。光的速度与光的频率及波长之间的关系是 $c = v\lambda$ 。光波进入某一介质时, 光波在该介质中的速度 v 就比在自由空间的速度 c 小。速度 v 与材料的特性有关。真空中光速 c 与材料中光速 v 的比值就是材料的折射率 n , 即 $n = c/v$ 。对于空气, n 的典型值是1.00, 水的折射率是1.33, 玻璃的折射率是1.5。

通过研究在某一介质材料中以平面波行进的光射线的行为, 可以非常容易地解释折射、反射的概念。当光线遇到两种不同媒质的分界面时, 一部分光线被反射回到第一种媒质中去, 而其余的光线则在进入第二种媒质时发生弯折, 即折射。图1-6给出了这种情形。图中媒质1和媒质2的折射率分别为 n_1 和 n_2 , 而且有 $n_2 < n_1$ 。在图中, 光线自媒质1向媒质2投射。在两种媒质的分界面上, 光线的折射是因为在两种不同折射率的材料中光的速度不同而引起的。在分界面处有如下的关系

$$n_1 \sin \varphi_1 = n_2 \sin \varphi_2 \quad (1-1a)$$

与上式等效的另一种写法是

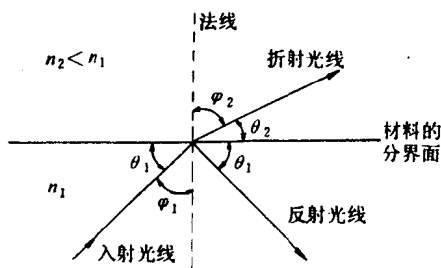


图 1-6 在材料分界面上光线的折、反射

$$n_1 \cos \theta_1 = n_2 \cos \theta_2 \quad (1-1b)$$

上两式中的角度 φ_1 、 φ_2 、 θ_1 和 θ_2 的定义见图 1-6。 φ_1 和 φ_2 是入射光线和折射光线与分界面的法线所成的角度。 θ_1 和 θ_2 则是与分界面所成的角度。由于已经假定 $n_2 < n_1$ ，所以 $\varphi_2 > \varphi_1$ 或 $\theta_1 > \theta_2$ 。

按照反射定律，入射光线与分界面构成的角度 θ_1 正好等于反射光线与同一界面所构成的角度。另外，入射光线、反射光线和分界面的法线都位于与两种材料分界面垂直的同一平面内。

当折射率较大材料中的入射角 θ_1 变得较小时，折射角 θ_2 就趋向于零。当入射角 θ_1 变得更小时，光线变成全内反射。利用斯奈尔定律的式 (1-1) 可以确定全内反射所需要满足的条件。

光纤是由纤芯和包层两部分组成的同轴圆柱体。纤芯的折射率 n_1 比包层的折射率 n_2 要稍大一些。这是纤芯和包层一定要满足的条件。通常， n_1 和 n_2 之间的关系用相对折射率差 Δ 表示，即

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

由于 n_1 和 n_2 在数值上的差不大，或者说 n_1 实际上仅大于 n_2 1% 左右，所以有

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \approx \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (1-3)$$

一、阶跃折射率光纤中光的传播

阶跃折射率分布的多模光纤，因为它的纤芯尺寸比我们所关心的光的波长（约为 $1\mu\text{m}$ ）大得多，因此可以利用简单的射线光学的理论来解释光在光纤中传播的物理现象。为使分析简单起见，我们只考虑属于代表某个光纤模式的一个射线束中的某一根特殊的射线——子午射线。子午射线位于光纤的子午面上。子午面包含光纤对称轴（即纤芯轴线）的平面。所以，子午射线在它们前进的路程中，每隔一定距离穿过光纤的轴芯一次。

先来考察一下，光从空气中射向光纤纤芯中心处的折射现象，如图 1-7 所示。光的入射角 θ_0 ，当光到达纤芯后射线的角度将为 θ 。这些角都是射线与界面垂直线所成的角度。根据斯奈尔定律

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta \quad \text{或} \quad \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta \quad (1-4)$$

因 $n_0 = 1$ 、 $n_1 > 1$ ，故 $\theta < \theta_0$ 。这是从空气入射于纤芯的情形。

再来考察光的射线从纤芯射至包层交界面的情形，如图 1-8(a) 所示。从纤芯入射于包层的界面的法线的角度为 θ_1 ，到包层后射线的角度为 θ_2 ，于是有

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1-5)$$

因为纤芯的折射率 n_1 大于包层的折射率 n_2 ，所以 $\theta_1 < \theta_2$ 。当纤芯的入射角 θ_1 逐渐增大时， θ_2 也逐渐增大。在 $\theta_2 = 90^\circ$ 时，光线不再进入包层，而在交界面掠射，如图 1-8(b) 所

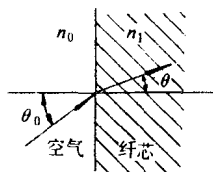


图 1-7 光从空气入射于纤芯

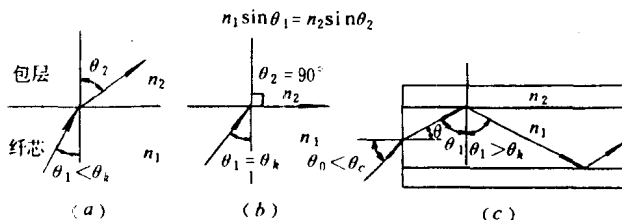


图 1-8 射线在纤芯和包层界面处的三种不同情形

(a) $\theta_1 < \theta_k$, 射线折射至包层; (b) $\theta_1 = \theta_k$, 射线沿界面掠射; (c) $\theta_1 > \theta_k$ 射线在纤芯全内反射

示。这时光从纤芯入射于界面的角称为临界角 $\theta_1 = \theta_k$, 而且有 $\sin \theta_k = \frac{n_2}{n_1}$ 。 $\theta_2 = 90^\circ$ 时的这种光传播情形, 在光纤中具有重要的意义。因为当 $\theta_1 > \theta_k$ 或 $\theta_2 > 90^\circ$ 时, 如图1-8(c)所示, 光在纤芯入射于界面时, 将从界面返回至纤芯, 这就是光射线在纤芯内的全反射。

射线在纤芯和包层界面处能发生全反射, 就意味着光线在纤芯内经过无数次的全反射后, 能从光纤的一端传向另一端。这就是阶跃型光纤中光传播的典型物理图象。

为了使光纤波导传播的射线在包层界面发生全反射, 就要求入射至界面的角度大于临界角, 即 $\theta_1 > \theta_k$ 。由图1-8(c)知, $\theta_1 + \theta = 90^\circ$, 所以 θ 应小于 $90^\circ - \theta_k$, 也就是要求先从空气入射于纤芯的角度 θ_0 小于入射角的临界角 θ_c , 即 $\theta_0 < \theta_c$ 。因为

$$\begin{aligned} \sin \theta_c &= n_1 \sin (90^\circ - \theta_k) = n_1 \cos \theta_k \\ &= n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_k} = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \\ &= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \end{aligned} \quad (1-6)$$

则由公式 (1-3) 可将式 (1-6) 写成

$$\sin \theta_c \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1-7)$$

式中 θ_c ——光纤射向纤芯的入射临界角。

θ_c 的物理概念是只有当入射角 θ_0 小于临界角 θ_c 时, 才可能让光线在纤芯和包层的界面发生全反射。光线将被闭锁在纤芯内, 经过反复许多次的全反射使光线沿着纤芯的长度方向向前传播。如果入射角 θ_0 大于临界角 θ_c 时, 光线将折射到包层中, 不再成为有用的光传播, 形成射线损失。由于光纤的直径很小, 光线全反射传播时的折线长度也就很短, 所以光纤即使不是直线状而呈圆弧状, 甚至把光纤卷成圆筒状, 光信号仍能沿光纤向前传播。当然把光纤卷成直径过份小的圆弧状是不好的, 它将使光纤造成机械损伤, 也会增大光功率损耗。

入射角 θ_0 实际上也就是光纤接受光圆锥的半角。 θ_0 的临界角 θ_c 的正弦, 即 $\sin \theta_c$ 是阶跃型光纤的一个重要参数, 叫做光纤的数值孔径, 用符号 NA 表示, 即

$$NA = \sin \theta_c \approx n_1 \sqrt{2\Delta}$$

数值孔径 NA 可用来计算光纤接受光的特性, 如图1-9所示。由式 (1-6) 和式 (1-7) 可以看到, 数值孔径 NA 只和纤芯的折射率 n_1 和包层的折射率 n_2 的大小有关, 或者说和纤芯的

折射率 n_1 和光纤的相对折射率差 Δ 有关,而和光纤纤芯的直径、包层的直径无关。如 $n_1 = 1.5$, $\Delta = 0.01$, 则 $NA = 0.21$, 与之相应的临界角 θ_c 或接受光圆锥半角为 12.12° , 圆锥角 $2\theta_c \approx 24.5^\circ$ 。数值孔径是一个比1小的无量纲量, 它的数值通常在 $0.14 \sim 0.5$ 的范围内。数值孔径也是用来计算光源至光纤的光功率耦合效率的。

沿纤芯由界面全反射而向前传播的射线, 就是被称为穿过轴心许多次的子午射线。如果波导的轴向长度(即光纤长度)为 l , 则子午射线的路程长度如图1-10所示, 它们之间的关系式为

$$p(\theta) = l \sec\theta = l / \cos\theta \quad (1-8)$$

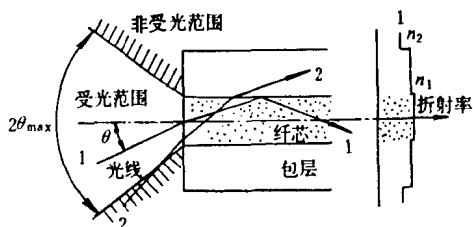


图 1-9 阶跃型折射率光纤的
轴向截面和光线传播

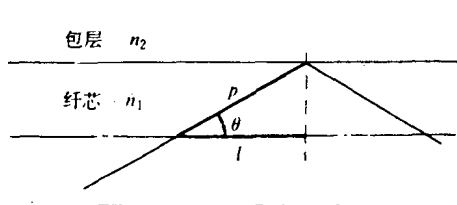


图 1-10 折线路程 p 和轴向路程 l

可见, 路程长度以及传播时间是射线角度 θ 的函数, 而与光纤直径无关。由于光纤是阶跃型折射率分布的, 因此每一射线将是全内反射的折线轨迹。在多模光线中, 可以有许多小于入射临界角的射线, 这些射线都有各自不同的路程长度。注意到纤芯内的折射率是均匀的, 路程不同的各射线的传播速率都是相同的, 因而到达光纤接收端的时延也就各不相同。把接收端的许多射线相加起来, 就造成显著的脉冲展宽, 也即严重色散。式(1-8)中的 $\theta = 0^\circ$ 时, 光线沿着轴向传播, 射线的路程最短。当 $\theta = \theta_c$ 时, 光线沿着最长的折线路程向前传播, 射线的路程最长。最长路程和最短路程间每单位长度光纤的时延差 τ_s , 根据图1-10的关系可得

$$\tau_s = \frac{p - l}{v} \times \frac{1}{l} \quad (1-9)$$

由式(1-8)和 $v = c/n_1$, 上式可写成

$$\begin{aligned} \tau_s &= \frac{l \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right)}{\frac{c}{n_1}} \times \frac{1}{l} \\ &= \frac{n_1}{c} \cdot \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) = \frac{n_1}{c} \left(\frac{1}{\sin\theta_1} - 1 \right) \\ &= \frac{n_1}{c} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) = \frac{n_1}{c} \Delta \\ &= \frac{(NA)^2}{2n_1 c} \end{aligned} \quad (1-10)$$

如 $n_1 = 1.5$ 、 $\Delta = 0.01$ 、 $c = 3 \times 10^5 \text{ km/s}$, 则 $\tau_s = 50 \text{ ns/km}$, 相应的带宽约为 $10 \text{ MHz} \cdot \text{km}$ 。这就是阶跃折射率分布光纤中由于光线行进的折线路程不同而引起的色散现象。

如前所述, 光纤在接受光射线时有一最大接受角, 接受角的大小由数值孔径 NA 表示。当光源与光纤耦合时, 应该让光源发出的光尽可能多地耦合进光纤中, 为此不仅要求光源的发光面应稍小于或最多等于纤芯的端面, 而且光源的发光圆锥角必须与光纤的最大接受角相配合。如光源发光圆锥角超出光纤最大接受角, 超出部分的光功率就无法进入纤芯, 造成输入光功率的耦合损耗。光纤得到的光功率 P_f 和光源发出的光功率 P_s 的关系, 决定于光纤数值孔径的大小

$$P_f = (NA)^2 P_s \quad (1-11)$$

就是说, 输入耦合系数 P_f/P_s 与光纤数值孔径 NA 的平方成比例。实际的低损耗光纤, 如 $NA \approx 0.2$, 则 $P_f \approx 0.04 P_s$, 显然输入耦合系数很小, 也即耦合损耗很大。

从式(1-10)看出, 色散现象随着数值孔径的增大变得更严重; 而从式(1-11)看出, 光源耦合进光纤的光功率随着数值孔径的增大变得更加有利。从这二者来看, 在选择光纤的数值孔径时是有矛盾的。所以在设计光纤系统时, 应该兼顾两方面要求, 选择适当的数值孔径。如果受系统功率限制, 就采取较大的数值孔径; 反之, 如果系统受色散限制, 就采用较小的数值孔径。

二、渐变折射率光纤中光的传播

渐变型(梯度型)折射率分布的光纤, 在纤芯的中心处折射率最大, 定为 n_1 , 沿着纤芯的半径方向, 折射率逐渐减小, 到纤芯和包层的界面处折射率减小到包层的折射率 n_2 。最普遍的折射率渐变分布规律是平方规律, 即所谓抛物线型规律。

渐变型折射率的分布可表示为

$$n(r) = \begin{cases} n(0) \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a_1} \right)^a \right]^{1/2} \approx n_1 \left[1 - \left(\frac{r}{a_1} \right)^a \Delta \right] & r < a_1 \\ n(a_1) = n_1(1 - \Delta) = n_2 & r > a_1 \end{cases} \quad (1-12)$$

式中 $n(0)$ ——纤芯中心的折射率, 等于 n_1 ;

$n(a_1)$ ——纤芯与包层界面的折射率, 等于 n_2 ;

r ——纤芯内任意一点到中心的距离;

a_1 ——纤芯的半径;

Δ ——相对折射率差;

a ——折射率分布指数, 当 $a = 2$ 时, 即为抛物线型分布。

为了讨论渐变型折射率分布光纤中光线的传播, 我们可以近似地把渐变型光纤的纤芯看作由许多薄层所组成, 如图1-11所示, 并且认为各薄层内的折射率是均匀的, 所以在各薄层内的射线的传播都是直线。从该图中第0层以角度 θ_0 斜射入第一层的光线, 依照斯奈尔的折射定律, 其折射角 θ_1 略小于入射角 θ_0 。各层反复依次折射。由于各薄层的折射率为 $n_0 > n_1 > n_2 > n_3 > \dots$, 逐渐地变小, 所以 $\theta_0 > \theta_1 > \theta_2 > \theta_3 \dots$ 。各薄层中的射线方向从纤芯中心沿半径方向至包层逐渐改变, 只要光线入射于纤芯端面的角度小于临界角, 则 $n_0 > n_1 > n_2 > n_3 \dots$ 的规律, 将使射线在某一层界面或最多在纤芯和包层的界面处, 使射线

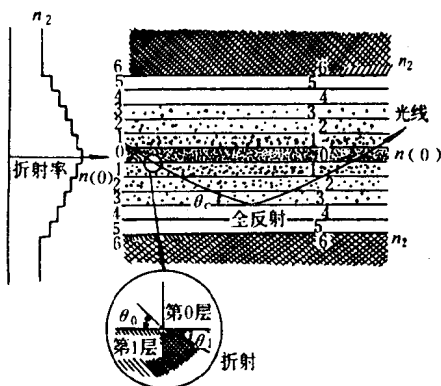


图 1-11 由许多阶跃型薄层逼近的渐变型光纤模型

闭锁在纤芯内，结果使光线沿中心轴弯曲前行。假使薄层的层数极多， $n(r)$ 按式 (1-12) 分布，则光线的传播轨迹将是光滑弯曲的周期性振荡的射线轨迹。因为射线轨迹对光纤轴线成小角度， $\sin\theta \approx \theta$ ，可以认为它是与轴线近于平行的射线。在这样的条件下，求轨迹的一般方程为

$$\frac{d}{dz} \left(n \frac{dr(z)}{dz} \right) = \frac{dn}{dr} \quad (1-13)$$

因 n 是不随 z 轴方向变化的，上式可以化成

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

将 $n(r)$ 式代入，得

$$\frac{d^2 r(z)}{dz^2} = \frac{-2r\Delta}{a_1 [1 - (r/a_1)^2 \Delta]} \approx -\frac{2r\Delta}{a_1^2} \quad (1-14)$$

解该二阶微分方程，得光线的轨迹

$$r(z) = A \sin \left(\frac{\sqrt{2\Delta}}{a_1} z \right) + B \cos \left(\frac{\sqrt{2\Delta}}{a_1} z \right) \quad (1-15)$$

式中的 A 和 B 是决定于边界条件的常数。由此可见，周期性振荡属于正弦形。振荡周期与光纤的相对折射率差 Δ 有关，它代表聚焦的程度。因为渐变型光纤有明显的自聚焦倾向，不同振幅的正弦形轨迹在通过轴心时几乎都聚合在一起，如图1-12所示。所以，渐变型光纤除了有时被叫做梯度型光纤外，还被称做聚焦型光纤。

和阶跃型多模光纤一样，渐变型光纤中也有很多不同的光波传播模式。与纤芯轴较近的低次模光线经过的区域，其折射率大，在折射率大的区域光的传播速率就小，如图1-13所示，反之亦然。渐变型光纤的这个特点，使各个模式的光线尽管其轨迹路程长度长短不一，但较长的轨迹路程有较快的速率，较短的轨迹路程有较慢的速率。结果是，所有不同长度的轨迹到达接收端的时延差大为减小。许多不同模式的射线相加，脉冲展宽必然较小，色散较轻。所以，从色散或脉冲展宽的观点看，渐变型光纤肯定优于阶跃型光纤。这一点从表格1-1的每公里的传输带宽的数据资料中也可明显看出。

在渐变折射率光纤中，最长的路程是正弦峰值接触纤芯与包层界面的路程，最短路程

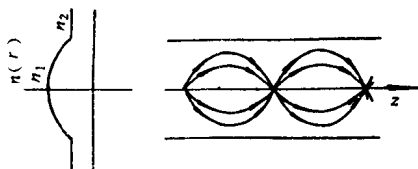


图 1-12 渐变型光纤的自聚焦倾向，不同幅度的轨迹通过轴心时几乎聚合在一起

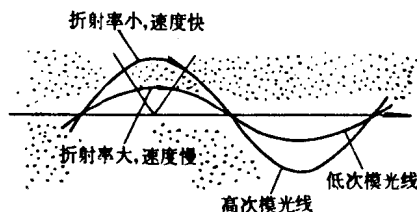


图 1-13 聚焦型光纤中模的群速度的物理意义

是沿纤芯轴心的直线路程，两路程之间的时延差（每单位长度光纤）

$$\tau_g \approx \frac{n_1 \Delta^2}{2c} \quad (1-16)$$

如 $n_1 = 1.5$, $\Delta = 0.01$, 则 $\tau_g \approx 0.75 \text{ ns/km}$ 。与式 (1-10) 的阶跃型光纤的路程时延差 τ_s 相比, τ_g 要小很多。

第三节 几种不同形式的射线

从射线理论出发, 我们描述了阶跃型和渐变型多模光纤中子午射线的传播路程。我们所以选择对子午射线进行讨论, 是为了使问题的分析过程简单一些, 容易给读者留下多模光波导中射线传播的直观图象。实际上多模光纤中的射线形式不止上述讨论的子午射线一种形式。图 1-14 所示为阶跃折射率光纤内的几种不同类型的射线。一种是受导的射线, 这是入射光在圆锥角以内, 以致射线在纤芯与包层的界面产生全内反射, 参阅图 1-9 中的光线 1, 这时图 1-14 纤芯内射线与轴心的角 θ 小于或等于 $\sin^{-1} \sqrt{2\Delta} \approx \sqrt{2\Delta}$, 形成子午射线的传播路程的情形。这是上面已经讲过的对光纤传输最有利的情形。另一种射线是入射角大于临界角。这时有一部分光反射至纤芯, 而另一部分光折射至包层。后者成为泄漏光线, 引起部分能量损耗。还有一种是入射角更大的情形, 这种射线到了纤芯与包层的界面, 全部辐射到了光纤外面而成为完全不受导的光线。此外在图 1-9 中还画出了偏离光纤轴心的光线 2。这种被称为歪斜射线的光以斜角触及纤芯与包层的界面。歪斜射线只要到达纤芯和包层界面时满足全反射条件, 就会在纤芯中扭折向前传播, 如图 1-15 所示。歪斜射线不满足全反射条件, 也会出现射线泄漏至包层或完全辐射到光纤外部的情形。

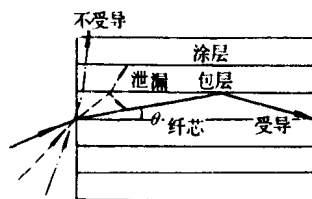


图 1-14 阶跃折射率光纤内几种不同类型的射线

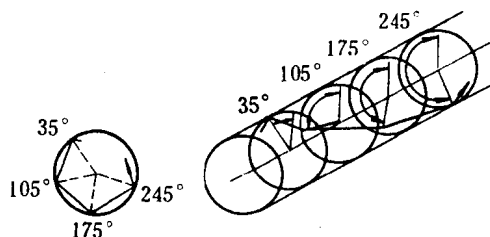


图 1-15 不穿越轴心的歪斜射线

图 1-16 和图 1-17 分别给出了阶跃型和渐变型光纤中歪斜射线的图形。图的右边画的是歪斜射线轨迹在轴心垂直面上的投影, 显示出轨迹不穿越轴心, 而是在两个圆柱面 A 和 B

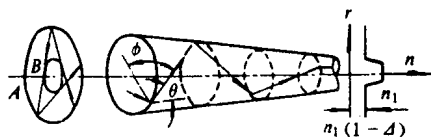


图 1-16 阶跃型光纤中的歪斜射线

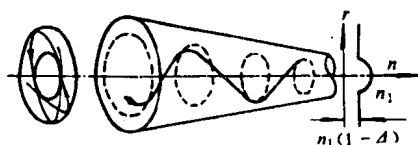


图 1-17 渐变型光纤中的歪斜射线