

g u a n g x i a n c h u a n s h u y u c h u a n g a n

应用物理技术丛书

光纤传输与传感

GUANGXIANCHUANSHUYUCHUANGAN

薛国良 王颖 郭建新 编著



河北大学出版社

TN929.11
55

应用物理技术丛书

光纤传输与传感

薛国良 王颖 郭建新 编著

河北大学出版社

责任编辑:韩 勇
封面设计:赵 谦
责任印制:闻 利

图书在版编目(CIP)数据

光纤传输与传感/薛国良编著. —保定:河北大学出版社,2004.9

ISBN 7-81097-012-7

I.光... II.薛... III.①光纤通信-数据传输-高等学校-教材②光纤通信-传感器-高等学校-教材
IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 067333 号

出版:河北大学出版社(保定市合作路 88 路)

印制:河北大学印刷厂

印张:11

版次:2004 年 10 月 1 版

经销:全国新华书店

规格:1/16(787mm×1092mm)

印数 0001~3000 册

印次:2004 年 10 月第 1 次

定价:22.00 元

编写说明

一般说来,综合性大学物理类专业的基础理论课程建设已经定型,而应用技术类的通用专业课程建设各类院校发展很不平衡,大都处于探索阶段;尤其是结合经济建设、科技进步和社会发展实际需要及学校自身特点来建设此类课程更是教学改革中一项有重要意义的研究课题。

1998年教育部颁布新专业目录之后,我校对物理类专业的建设方向进行了整合,本套丛书是以我校物理学院下属的4个研究所(光学与材料物理研究所,发光与显示技术研究所,静电研究所和生物物理技术研究所)为依托,为了建设应用技术类的通用专业课程而编写的一套体现我校特色的专业教材。

我校应用物理技术类的4个研究所的相关研究成果(如静电除尘与防护技术、发光与显示技术、等离子体诊断技术以及激光与红外应用技术、光纤传感技术等)在国内已得到广泛推广并收到很好的效果。以这种科研成果为依托来设置课程,编写教材会在一定程度上改变传统专业课程教学的模式,为培养创新型人才探索一种新的教学思路。

本套教材的编写从2000年启动,已列为河北省新世纪重点教改项目,所有教材均已经过几轮试用,将由河北大学出版社陆续出版。

本套丛书的书目如下:

《发光与显示技术》、《光纤传输与传感》、《应用光谱技术》、《激光技术》、《静电技术》、《红外技术》、《信息物理技术》、《等离子体技术》。

丛书编委会

2004.5

《应用物理技术》丛书编委会

主 编:傅广生

副主编:郭庆林

编 委:薛国良 韩 理 徐景智 刘志强

杨志平 王银顺 于 威

前 言

本教材系为我校物理类专业编写的一套体现我校特色的专业教材中的一本。

光纤传输与传感是一门涉及内容十分广泛的理论和技术课程,本书共分9章。考虑到物理学院教学计划的整体框架和与其他课程的衔接,在内容安排上进行了精心设计。

第一章至第二章主要讲光纤的传输,介绍了纤维光学方面的基础内容。第一章是光学纤维的光线理论,包括阶跃折射率光纤中光线的传播和梯度折射率光纤的光线理论。由于学时的限制,第二章简要介绍均匀光纤的波导理论而未涉及梯度折射率分布光纤的波导理论,以使同学对光波导理论的基本框架和常用术语有一些了解,便于将来查阅文献。

第三章光线力学从哈密顿原理和费马原理的等效性出发,系统讨论了现代几何光学的力学图像,包括“经典光线光学”和“量子光线力学”。本章内容集中了作者几年来的研究成果,不仅建立了光波导理论中较通俗的光线理论的扎实基础,也达到了一定的理论高度。

第四、五两章讨论了光纤传感元件。除介绍光纤的制造、光纤的损耗特性、光纤的物理性能、光源和光电探测器以外,还简要介绍了特殊光纤和光缆技术。

第六章讨论光纤传感器中的耦合。内容涉及半导体激光器与光纤的耦合、光纤与光纤的耦合和光纤耦合器,并介绍了光纤连接器的现状及发展以及光缆连接器技术的发展趋势。

第七章光调制技术涉及光强度调制技术、偏振调制技术、相位调制技术、波长调制技术和频率调制技术等。

第八章在以上各章的基础上系统介绍光纤传感器,包括温度传感器、表面粗糙度传感器、电流传感器、微弯传感器、光纤血流计等传感器。

第九章介绍了光纤技术的新进展,借此开阔同学的眼界。

本书在编写过程中尽量避免繁难的数学推导,强调物理概念阐述,因此适于学生自学。在系统介绍理论知识的基础上有选择地介绍一些有实用意义的基本知识和工程上的某些技术细节。为了使本书内容反映理论和技术的的前沿,特别注意加入了国内外相关领域的最新成果,这些内容不仅为学习光纤传感技术提供了必要的基本知识,也为灵活运用这些基本知识进而构思光学传感与测量方法提供了创造思维的基本理论准备。

本书在丛书选题确定之前做为讲义已使用多年,在不断完善过程中参考了大量同行的书目及相关文献,分别列在每章内容之后,在此一并向有关作者表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切期望广大读者批评指正。

著 者
2004.5

目 录

绪 论 纤维光学与光纤传感器的发展	(1)
第一节 纤维光学发展的三个阶段	(1)
第二节 光纤传感器的发展	(2)
第一章 光学纤维的光线理论	(5)
第一节 引 言	(5)
第二节 阶跃折射率光纤中子午光线的传播	(6)
第三节 斜光线的传播	(8)
第四节 光学纤维的弯曲	(10)
第五节 子午光线的色散(阶跃型)	(13)
第六节 梯度折射率光纤的光线理论	(14)
第二章 光学纤维的波导理论	(23)
第一节 介质中的波动方程	(23)
第二节 无限厚包层下贝塞尔方程的求解	(26)
第三节 弱传导光学纤维	(32)
第三章 光线力学	(40)
第一节 引 言	(40)
第二节 哈密顿原理和费马原理	(42)
第三节 光线方程	(43)
第四节 哈密顿正则方程	(45)
第五节 量子光线力学的基本概念	(51)
第六节 光线力学的应用:非成像光学	(56)
第四章 光纤与光缆	(59)
第一节 光纤的制造	(59)
第二节 光纤的损耗特性	(61)
第三节 光纤的物理性能	(68)
第四节 特殊光纤	(69)
第五节 光缆技术	(74)
第五章 光源与光电探测器	(86)
第一节 光 源	(86)
第二节 光电探测器	(93)
第六章 光纤传感器中的耦合	(103)
第一节 半导体激光器与光纤的耦合	(103)
第二节 光纤与光纤的耦合	(105)
第三节 光纤耦合器	(112)

第七章 光调制技术	(115)
第一节 光强度调制技术.....	(115)
第二节 光偏振调制技术.....	(121)
第三节 相位调制技术.....	(125)
第四节 波长调制技术.....	(133)
第五节 频率调制技术.....	(136)
第八章 光纤传感器	(139)
第一节 光纤温度传感器.....	(139)
第二节 光纤表面粗糙度传感器.....	(144)
第三节 光纤电流传感器.....	(147)
第四节 光纤微弯传感器.....	(150)
第五节 光纤血流计.....	(151)
第九章 光纤技术新进展	(158)
第一节 分布式和复用式光纤传感器.....	(158)
第二节 光纤光栅传感器及其应用.....	(164)

绪论 纤维光学与光纤传感器的发展

第一节 纤维光学发展的三个阶段

纤维光学(也称光波导理论)是近40年从近代光学领域发展起来的一门新的分支学科,它是研究光学信息(光线或图像)在透明光学纤维中的传输机理的一门新学科。

纤维光学的发展,大致可分为三个阶段:

一、早期阶段

1854年,英国的丁达尔(J. Tyndall)指出光线能够沿着盛水的弯曲通道通过内全反射而传播:光从小孔对面的玻璃窗口射入水中,当水从小孔流出时,可清楚地看到光线沿弯曲水柱传播的现象。1927年,英国的贝尔德(J. C. Baird)首先指出了利用光的全反射现象而制成的石英光纤可以用来解析图像。1930年,德国的拉姆(H. Lamm)提出,把柔软的光学纤维集成束,可以传送光学图像,他把直径为 $40\mu\text{m}$ 的石英光学纤维有规则地排列起来,做成了肠胃检查镜。

在此后的20年内,由于技术水平和材料的限制,相关研究的进展不大。

二、20世纪50年代

从20世纪50年代开始,纤维光学开始蓬勃发展,主要标志有三:

1. 光导纤维拉制工艺的完善

1953年,荷兰的范希尔(Van Heel)将一种折射率为1.47的塑料涂敷在玻璃纤维上,制成了玻璃(芯)——塑料(涂层)光学纤维,但涂层难以均匀,效果不理想;1955年,美国人希斯乔威兹(B. I. Hicechowitz)把高折射率的玻璃棒插在低折射率的玻璃管中,放在高温炉中拉制,得到了玻璃(芯)——玻璃(包层)光学纤维。

2. 建立了纤维光学理论

1956年英国的卡珀尼(N. S. Kapany)首次提出了“纤维光学”的理论命名,基础是传统几何光学。

3. 实用性增加

由于纤维光学理论的发展和光纤制作工艺的改进,光学纤维元件的质量有了很大的提高,应用范围也日益广泛。早在1954年,卡珀尼曾用 $50\mu\text{m}$ 的光学纤维排列成光学纤维传像束,但由于一些技术问题没有解决,实际应用受到限制。1960年,美国首先解决了光学纤维的排列工艺,制出了可弯曲的、分辨率较高的光学纤维传像束,并在医疗仪器中使用。从此以后,光学纤维束开始成为商品,并有了广泛的应用。例如,利用光学纤维柔软可弯曲传像的特性而制成的潜望镜、内窥镜,在工业、国防和医疗上都有重要的应用;利用光学纤维柔软的特点制作的各种图像变换器,可以改变光源或图像的形状、大小,在光电控制和记录系

统中用处很大;利用光学纤维元件传递图像、移动像面及耐真空的特性而制作的光学纤维面板,在电子光学器件(如像增强器、变像管等)中可作端窗和极间耦合元件,对改进器件性能、简化器件结构作用很大。

三、20 世纪 70 年代之后

纤维光学的理论获得了新发展,其标志有二:

(1)以几何光学中的费马原理和分析力学中的哈密顿原理的等价性为基础建立起来的哈密顿光学的基本概念和方法被用来处理光线在光纤中的传播问题,从而实现了几何光学的力学化,形成了纤维光学的光线理论。加以以波动理论为基础形成并发展的光波导理论,使纤维光学理论更加完善了。

(2)与此同时,由于把半导体工艺引入了光学纤维的制造中,低损耗、低色散光学纤维的问世和梯度折射率光学纤维的出现,促进了激光通信、波导光学、梯度折射率光学和微型光学的发展。尤其是光纤传感器的出现,开拓了纤维光学应用的新领域。以透明高分子材料为基本材料制作的塑料光纤由于有广阔前景,也获得了长足发展。

第二节 光纤传感器的发展

一、概述

光纤传感技术是伴随着光通信技术的发展而逐步形成的。在光通信系统中,光纤被用作远距离传输光波信号的媒质。显然,在此类应用中要尽量避免光纤传输的光信号少受外界干扰。在光纤通信系统中,通信质量易受干扰的一个原因是光纤对外界环境因素十分敏感,如温度、压力、电场、磁场等环境条件的变化等引起光波参量,如强度、相位、频率、偏振态等的变化。这一现象启发人们提出了光纤传感的概念。如果能测出光波参量的变化,就可以知道导致这些光波参量变化的温度、压力、电场、磁场等物理量的大小。光纤传感技术就是在此背景下产生的。

另一方面,光纤本身有许多固有优点:如长距离低损耗、易弯曲、体积小、重量轻、成本低、防水、防火、耐腐蚀、抗电磁干扰等等。这促使人们在各个领域对光纤传感器进行深入研究,使光纤传感技术获得了飞速发展——在航天飞机及航天器(各部位压力、温度传感、陀螺)、航海(声纳)、石油化工(液面、流量、二相流中空隙度的测量)、电力工业(高压输电网的电流、电压计量)、核工业(放射剂量、原子能发电站泄漏剂量监测)、医疗器械(血液流速、血压及心音测量)、科学研究(地球自转)等技术领域都取得了可喜的研究成果。

概括地说,光纤传感器就是利用待测物理量对光纤内传输的光波参量进行调制,并对被调制过的光波信号进行解调检测,从而获得待测量值的一种装置。具体说来,就是利用光导纤维在预测媒质中光的偏振状态、相位特性、干涉特性、光强等变化来检测各种物理量的仪器。它是 1977 年提出的,仅至 1982 年底已报道的各种光纤传感器就达 60 多种,到目前为止已经可以探测 70 多种物理量。

二、光纤传感器的分类

(1)按光学纤维的作用来分类,可分为功能型光纤传感器和非功能型光纤传感器两种。功能型光纤传感器是指光纤本身既是传输介质又是敏感元件,所以又叫传感型光纤传感器或全光纤传感器,如图0-1(a)所示;非功能型光纤传感器中光纤只作为传输介质,用其他敏感元件感受被测物理量的变化,因此也称作传光型传感器或混合型传感器,如图0-1(b)所示。

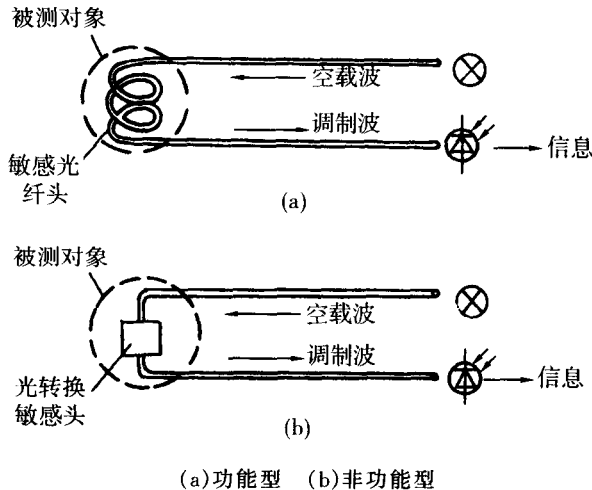


图0-1 功能型与非功能型光纤传感器示意图

对功能型光纤传感器来说,核心问题是光纤本身起敏感元件的作用。光纤与被测对象相互作用时,光纤自身的结构参量(尺寸和形状)发生变化,光纤的传光特性发生相关变化,光纤中的光波参量受到相应控制,即在光纤中传输的光波受到了被测对象的调制,空载波变为调制波,携带了被测对象的信息,这是一层意思;再一层意思是,光纤与被测对象作用时,光纤自身的结构参量并不发生变化,而光纤中传输的光波自身发生了某种变化,携带了待测信息。将这两层意思结合起来,才是将光纤用作敏感头的完整理解。

对非功能型光纤传感器来说,关键部件是光转换敏感元件。这里也有两层意思。其一是光转换元件与待测对象相互作用时,光转换元件自身的性能发生了变化,由光纤送来的光波通过它时,光波参量发生了相关变化,空载波变成了调制波,携带了待测量信息;其二是不采用任何光转换元件,仅由光纤的几何位置排布实现光转换功能,结构十分简单。

(2)从上述讨论可知,无论是功能型光纤传感器,还是非功能型光纤传感器,最终都是利用光波参量的调制来实现待测信息提取的,我们称之为光波调制技术。从光波调制的方式来分类,有强度调制、位相调制、频率调制、偏振调制及波长调制(光纤传感头的光频谱特性随待测物理量变化)等。

因为对光波参量的上述调制是通过光纤特性的变化来实现的,因此首先讨论光纤的基本性质、相关的传感元件和耦合技术,它们是光调制技术的基础。光调制技术将在第七章讨论。

三、光纤传感器的优点

通常对传感器有如下一些要求：

- (1)在转换功能上要求：工作范围宽、线性度好、信噪比高、重复性好、长时间变化小等；
- (2)检测信号不仅容易处理、容易传输而且不易受待测对象环境的影响，即抗干扰性能好；
- (3)与被测对象所处环境相容，对待测量扰动小；
- (4)体积小、重量轻、价廉、可靠性高等。

光纤传感器能够较好地满足这些要求，而且在多样性（即采用一种光调制形式可以构成多种多样的传感器）、环境适应性（不受电磁干扰、耐腐蚀、空间窄小、便于使用等）以及可靠性等方面更具特色。光纤传感器是以光学技术为基础的，因此，它不但能构成纯电子技术不能实现的传感器，还能结合光、电技术各自的特长，构成新的传感器，扩大传感器的应用范围。现将光纤传感器的优点分列如下：

(1)灵敏度高：比压电陶瓷传感器灵敏度高一个数量级。

(2)几何适应性强：可在复杂、弯曲通道中使用。

(3)抗干扰、抗高温、高压、电磁和强辐射的干扰，保密性强。因为光纤本身是电介质，而且敏感元件也可以用电介质材料制作，因此光纤传感器具有良好的电绝缘性，特别适用于高压供电系统及大容量电机的测试。又因为它可以抗电磁干扰，因此特别适合于高压大电流、强磁场噪声、强辐射等恶劣环境中，能解决许多其他传感器无法解决的问题。

(4)可实现远距离探测。因为光纤的传输损耗很小（目前的石英光纤的最小损耗可低达 0.16dB/km ），因此光纤传感技术与遥测技术相结合，很容易实现对被测场的远距离监控。这对于工业生产过程的自动控制以及对核辐射、易燃、易爆气体和大气污染等进行监控尤为重要。

(5)结构简单、体积小，价格便宜。

(6)非侵入性好。由于传感头可做成电绝缘的，而且其体积可以做得很小（最小可做到只稍大于纤芯的直径）。因此，它不仅对电磁场是非侵入式的，而且对速度场也是非侵入式的，故对被检测场不产生干扰。这对于弱电磁场及小管道内流速、流量等的监测具有特别重要的意义。

四、光纤传感器举例：水听器（动栅式）

动栅式水听器属于功能型光纤传感器，其结构如图0-2所示。两根光纤隔开一小段距离，间隙中放着一对全透射等距离光栅。当两光栅相对运动时，透射强度就发生变化，利用此原理可制作水听器。控制栅元宽度可改变灵敏度和动态范围，例如减小宽度可提高灵敏度，但降低了动态范围。

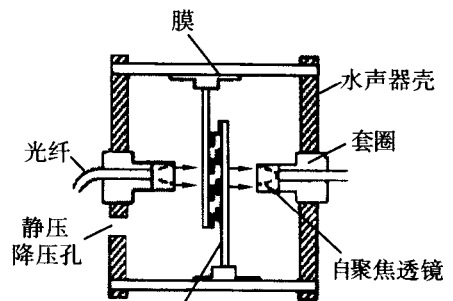


图0-2 水听器原理图

第一章 光学纤维的光线理论

第一节 引言

为了对光纤波导的原理及其重要的光学特性有基本的了解。本章及以下两章首先介绍光纤波导的基本原理。

光纤是传光的纤维波导或光导纤维的简称。通常,它是由高纯度的石英玻璃掺杂少量杂质如锗(Ge)、硼(B)、磷(P)等元素制成的细长圆柱形材料,它细如发丝,通常直径为几微米到几百微米。实用的结构有两个同轴区,内区称为纤芯,外区称为包层。通常,在包层外面还有一层起支撑保护作用的套层。

因为光是电磁波,所以光在光纤中的传输可用麦克斯韦波动方程来分析。当光纤的端面尺寸比光波长大多时(如通常用于光纤通讯的多模光纤直径为 $80\mu\text{m}$,对于在真空中波长为 $0.8\mu\text{m}$ 的光来说即满足上条件),可以用几何光学的方法来讨论它的传光原理,这就是所谓光线理论。

一、光纤的结构

多模光纤分为阶跃折射率光纤和渐变折射率(或梯度折射率)光纤两种,阶跃折射率光纤是由内外两层折射率不同的石英或玻璃材料组成,也有用涂层来代替外层材料的情况;渐变折射率(或梯度折射率)光纤,它的折射率在径向是逐渐变化的,中心大,边缘小,如图 1-1 所示。本章讨论折射率具有阶跃分布的光纤问题。

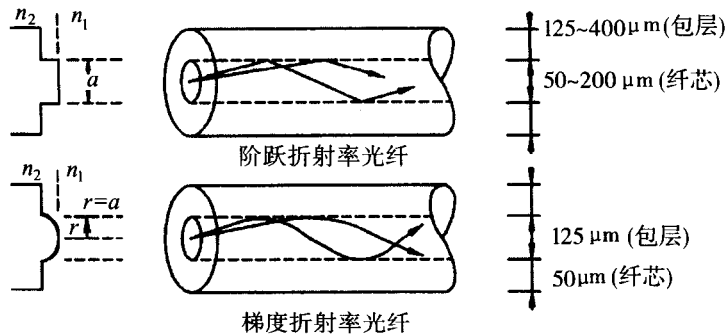


图 1-1 阶跃折射率光纤和梯度折射率光纤结构示意图

二、光纤导光原理

光线光学的基本关系式是非涅耳定律。

首先,我们来看光在分层介质中的传播,如图 1-2 所示。图中介质 1 的折射率为 n_1 , 介质 2 的折射率为 n_2 。当光束以较小的 θ_1 角入射到介质界面上时,部分光进入介质 2 产生折射,部分光被反射。它们之间的相对强度取决于两种介质的折射率。介质的折射率定义为光在空气中的速度与光在介质中的速度之比。

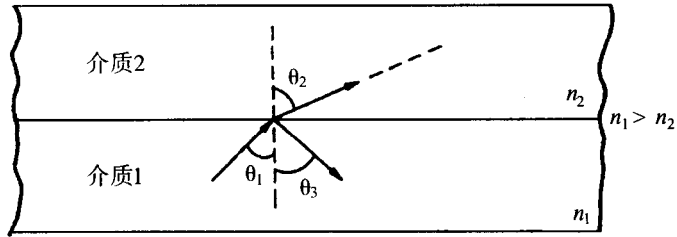


图 1-2 入射光线、反射光线和折射光线

如果光线入射到光纤端面上,又经折射进入光学纤维后,它在纤芯和包层的界面上以角度 θ_1 角度反射,如果我们选取适当的入射角,使角度 θ_1 大于纤芯界面内壁上的全反射临界角时,光线就会在界面上发生全反射,此全反射的光线又会以同样角度 θ_1 在对面内壁上产生第二次全反射。如果光纤是均匀的直圆柱体,那么入射光线在纤芯内经若干次全反射后会从另一端出射。这就是光线在光纤中传播的简单原理,下面将作较深入的讨论。

第二节 阶跃折射率光纤中子午光线的传播

一、子午光线

在一根光纤中,通过光纤中心轴的平面都称为子午面,它有无穷多个;位于子午面内的光线称为子午光线,它在光纤端面上的投影即为光纤端面上的直径。如图 1-3 所示。

讨论子午光线好处:由于子午光线和光纤中心轴处于同一平面内,那么对子午光线的数学处理可在一平面内进行。根据光的反射定律,入射光线和反射光线始终处于同一平面内,因此,子午光线经多次全反射后仍在原入射平面内。如果光纤是均匀的直圆柱体,则入射端光线只要满足全反射条件,它就会在另一端以相同入射角度出射。

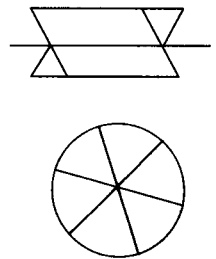


图 1-3 子午面与子午光线

二、全反射条件

见 1-4 图, n_1, n_2 分别为纤芯和包层材料的折射率, n_0 为周围介质的折射率,在界面上,若满足

$$n_1 \sin \psi = n_2 \sin \frac{\pi}{2}, \quad (\text{反射定律}) \quad (1-1)$$

则 ψ 就是全反射的临界角, 记作 ψ_c , 则有:

$$\sin \psi_c = \frac{n_2}{n_1}, \quad (1-2)$$

若用 θ 角表示, 由于 $\theta_c = 90^\circ - \psi_c$, 故有 $\cos \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$, 则:

$$\sin \theta_c = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (1-3)$$

再用 φ 角表示, 又由折射定律, $n_0 \sin \varphi = n_1 \sin \theta$, 所以

$$n_0 \sin \varphi_c = n_1 \sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1-4)$$

这表明, 要使子午光线能以全反射形式传播, 则光线入射角必须满足:

$$\psi \geq \psi_c \quad \text{即} \quad \theta \leq \theta_c, \quad \text{亦即} \quad \varphi \leq \varphi_c$$

通常将 φ_c 称之为孔径角, 它表示光纤集光能力的大小。工程上还用数值孔径来表示这种性质, 记作 $N.A.$ 定义为

$$N.A. = n_0 \sin \varphi_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1-5)$$

三、光路长度和全反射次数

光路长度一般大于光纤长度, 先考虑单位长度内的光路长度。如图 1-4 所示:

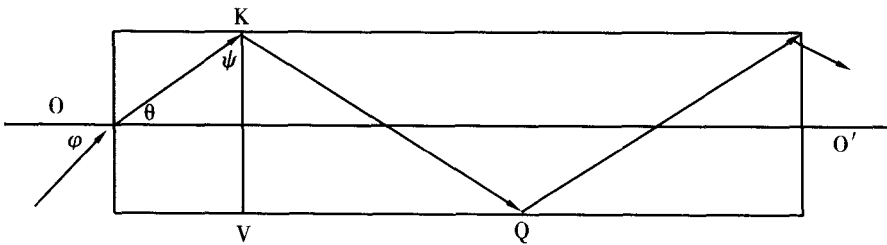


图 1-4 阶跃光纤中的子午光线

\overline{KQ} 为两次全反射之间的路程, 若知此量, 再知道传播中的全反射次数, 则光路长度可求出。在 $\triangle KVQ$ 中:

$$\frac{1}{\overline{KQ}} = \frac{D}{\sin \theta} = \frac{D}{\cos \psi}, \quad \overline{VQ} = \frac{D}{\tan \theta} = D \tan \psi \quad (1-6)$$

D 为纤芯直径, 则单位长度内的光路长度为:

$$S = \frac{\overline{KQ}}{\overline{VQ}} = \frac{1}{\cos \theta} = \frac{1}{\sin \psi} \quad (1-7)$$

同样, 单位长度内的全反射次数为:

$$\eta = \frac{1}{\overline{VQ}} = \frac{\tan \theta}{D} = \frac{1}{D \tan \psi} \quad (1-8)$$

故长度为 L 的光纤总光路长度 S' 和总全反射次数 η' 分别为:

$$\begin{cases} S' = LS = \frac{L}{\cos\theta} \\ \eta' = L\eta = \frac{L \operatorname{tg}\theta}{D} \end{cases} \quad (1-9)$$

又由折射定律 $n_0 \sin\varphi = n_1 \sin\theta$, 可有:

$$\cos\theta = \sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1} \sin\varphi\right)^2} \quad (1-10)$$

代入上两式, 有:

$$S' = \frac{L}{\sqrt{1 - \left(\frac{n_0}{n_1} \sin\varphi\right)^2}} \quad (\text{与 } D \text{ 无关}) \quad (1-11)$$

$$\eta' = \frac{L}{D} \cdot \frac{\sin\varphi}{\sqrt{\left(\frac{n_1}{n_0}\right)^2 - \sin^2\varphi}} \quad (\text{与 } D \text{ 有关, 成反比}) \quad (1-12)$$

公式表明: 光线在光学纤维中传播的光路长度与光纤直径无关, 仅取决于光束入射角 φ 、光学纤维所处媒质的折射率 n_0 和光学纤维芯的折射率 n_1 , 并且光路随着光学纤维长度的增加而增加。全反射次数除有上述关系外, 还与光纤直径有关, 与 D 成反比。

第三节 斜光线的传播

入射到光纤端面上的光束, 除子午光线外, 还有斜光线, 即不与中心轴平行也不相交的光线, 此种光线的讨论须在三维空间中进行。由于斜光线和中心轴不在一个平面内, 因而斜光线每进行一次全反射, 平面方位就改变一次, 其光路轨道是螺旋折线, 如图 1-5 所示。在端面投影可以是左旋线, 也可以是右旋线, 且这螺旋折线与中心轴等距。



图 1-5 阶跃光纤中斜光线的轨迹

一、斜光线的全反射

如图 1-6, \overline{QK} 为入射的斜光线, H 为 K 在光纤端面上的投影, T 为 H 通过 Q 、 O 点直径上的垂足。

$\angle QKH = \theta$, 为斜光线与光纤轴夹角。

$\angle KQT = \varphi$, 为斜光线入射角。

$\angle HQT = \gamma$, \overline{QH} 与 \overline{QT} 之夹角, 称“轴倾角”。

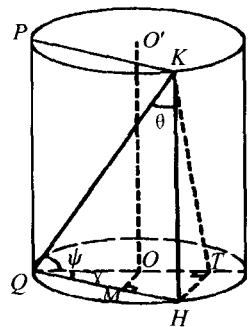


图 1-6 斜光线的全反射条件

$$\begin{cases} \cos \gamma = \frac{\overline{QT}}{\overline{QH}}, \overline{QT} = \overline{QH} \cos \gamma, \\ \sin \theta = \frac{\overline{QH}}{\overline{QK}}, \overline{QK} = \frac{\overline{QH}}{\sin \theta}, \\ \cos \psi = \frac{\overline{QT}}{\overline{QK}} = \cos \gamma \sin \theta \end{cases} \quad (1-13)$$

式(1-13)给出了三个角度之间的关系,由于全反射时 ψ 不变,而 $\sin \psi = n_2/n_1$, $\cos \psi = \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2}$,则有斜光线的全反射条件:

$$\cos \gamma \sin \theta = \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2} \quad (1-14)$$

因此,在光纤中传播的斜光线须满足:

$$\cos \gamma \sin \theta \leq \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2} \quad (1-15)$$

如果用光线在端面的入射角 φ 来表

$$\sin \varphi \cos \gamma \leq \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1-16)$$

如果是子午光线入射,则 QH 和 QT 重合, $\gamma = 0$,则上结果还原为前面关于子午光线的结果:

$$\begin{cases} \sin \theta \leq \sqrt{1 - (n_2/n_1)^2} \\ \sin \varphi \leq \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \end{cases} \quad (1-17)$$

由(1-4)式可得到斜光线的数值孔径为

$$N.A._{斜} = n_0 \sin \varphi_c = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\cos \gamma} \quad (1-18)$$

由于 $\cos \gamma \leq 1$,故可知斜光线的数值孔径要比子午光线大。

二、光路长度和全反射次数

由图1-6可知,单位长度中的光路长度 $S_{斜} = \frac{\overline{QK}}{\overline{KH}} = \frac{1}{\cos \theta}$ 将此式与子午光线结果 $S = \frac{1}{\cos \theta} = \frac{1}{\sin \psi}$ 比较,可知两者相同。这说明在 ψ 角相等的情况下,斜光线和子午光线的 S 相同。

同样,单位长度内的全反射次数为 $\eta_{斜} = \frac{1}{\overline{KH}}$,由于

$$\overline{KH} = \frac{\overline{QH}}{\text{tg} \theta} = \frac{D \cos \gamma}{\text{tg} \theta}$$

$$\text{则有 } \eta_{斜} = \frac{\text{tg} \theta}{D \cos \gamma}, \quad (1-19)$$

比较子午光线的结果 $\eta_z = \frac{\text{tg} \theta}{D}$,可知 $\eta_{斜} = \eta_z / \cos \gamma$ 。