



清华大学电子与信息技术系列教材

廖延彪 编著

光纤光学



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

清华大学电子与信息技术系列教材

光 纤 光 学

廖延彪 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书从光的电磁理论出发,全面地论述了光在光纤中传输和传感的基本特性及其应用。具体内容包括:均匀折射率和非均匀折射率光纤的传输理论(光线理论、波动理论以及耦合模理论),光纤的损耗、色散、偏振和非线性特性,光纤设计的基本方法,光纤参数测量方法,光纤有源和无源器件,光纤技术进展以及光纤在传感方面的应用等。

本书可作为大专院校激光、光电子、光学仪器以及物理等专业的研究生教材,也可供上述专业的大学生和科技工作者学习、参考。

书 名: 光纤光学

作 者: 廖延彪 编著

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研楼,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者: 清华大学印刷厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 **印张:** 17 **字数:** 398 千字

版 次: 2000 年 3 月第 1 版 2000 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-01003-X/O·230

印 数: 0001~3000

定 价: 20.00 元

前 言

随着激光的问世,古老的光学已裂变出众多的分支,“光纤光学”是其中之一。它是研究光导纤维的光学特性及其应用的一门学科。“光纤光学”这一名称出现于20世纪50年代,但随着光纤技术的迅速发展,尤其是光纤通信的广泛应用,使这一新分支的内容愈来愈丰富。光纤光学的研究对象——光导纤维——的特点是它的有界性:光波在光纤中横向受边界限制,纵向可无限延伸,因而其光学特性和大块媒质的光学特性有很大差别,其中很多特性还正在研究之中。目前虽已有光纤光学方面的专著问世,但由于出版较早,未能包括近十年来的成果,且对光纤光学介绍不够全面。笔者撰写本书的目的就是要对光纤光学的原理及其应用作一个较全面的介绍。

全书共有8章,可分为3部分:光纤中光传输和传感的基本理论、各类光纤和光纤参数的测试方法、光纤的应用——光纤器件和传感。第一部分包括第1,2,3,8章和第6章的部分内容,主要讨论光纤传输的模式理论和模耦合理论,光纤的非线性理论,光纤的损耗、色散和偏振特性,着重讨论了光纤的偏振特性,对光纤传感的原理进行了较详细的论述。由于光纤的模式理论和模耦合理论与大块媒质中的光传输理论有很大差别,其计算过程又很繁杂;为使读者对其物理图像有一较清楚的了解,而又不必花过多精力于数学推导过程中,因此,本书对公式的数学过程从略,以突出对物理意义的阐述。此外,对偏振特性和光纤传感的原理部分则讨论较详细,这是其他专著所欠缺的,也是读者所需要的。第二部分包括第5,7两章,较全面地介绍了各类特种光纤和光纤的测试方法,其中对于变折射率光纤棒作为成像元件在光纤系统中的应用和高双折射光纤拍长的测量方法进行了较详细的论述。它有助于读者正确地选用光纤以满足工作的需要。第三部分包括第4,6两章,较全面地介绍了由光纤构成的各种有源和无源器件、各种光纤传感器,其中较详细地介绍了光纤光栅、光纤传感的补偿技术、光纤白光干涉技术、光纤光栅传感技术以及光纤传感在智能材料和结构中的应用。这部分的重点放在以后的应用中需要掌握的一些基本特性上,而不详述目前的实验系统。

本书在选材上注重突出基本概念,理论与实际并重,力求反映最新成果,注意系统性与完整性。

在此说明一点,本书所讨论的模式理论和模耦合理论只是对光导波问题做了现象性的描述,它只需经典场论。虽然模式理论推动了当今光纤技术和集成光学技术的发展,但是这一理论未涉及导波光的物理本质。导波光的许多更深入的问题,用模式理论无法解释。例如,在光纤这样一个很有限的空间内,导波光遵守光线光学规律(甚至比普通光波遵守得更好),在光纤中传输很长距离而衍射损耗很小;导波光量子的寿命和稳定性问题等。这些关于光导波本质性问题的探讨,必须采用量子理论。这已超出本书范围,而且这方面的研究成果尚不多见。

在本书的编写过程中,不少教师和研究生提出了许多宝贵的意见,并对教材的出版给予了大力协助,对此深表感谢。其中特别要感谢高以智教授等的支持和鼓励,还有赖淑蓉老师

和宋清霞同学的支持和帮助,她们两位为原稿的打印付出了大量辛勤的劳动。最后,还要感谢清华大学出版社的王仁康、孙礼等同志为本书的出版所做的具体指导和细致的编辑工作。

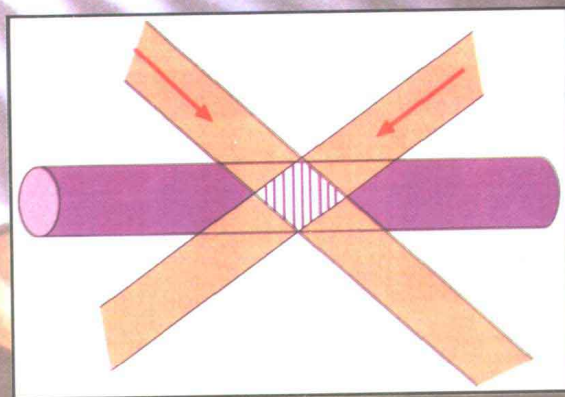
由于作者水平有限,书中难免存在错误和缺点,欢迎读者批评指正。

廖延彪

1999年11月7日于清华园

光纤光学

廖延彪 编著



责任编辑：孙 礼 封面设计：葛占基

ISBN 7-302-01003-X



9 787302 010036 >

定价：20.00 元



目 录

第 1 章 光纤传输的基本理论 1	
1.1 引言	1
1.2 均匀折射率光纤的光线理论	2
1.2.1 子午光线的传播	2
1.2.2 斜光线的传播	3
1.2.3 光纤的弯曲	4
1.2.4 光纤端面的倾斜效应	5
1.2.5 圆锥形光纤	5
1.3 变折射率光纤的光线理论	6
1.3.1 程函方程	7
1.3.2 光线方程	8
1.3.3 变折射率光纤中的光线 分析	9
1.4 光波导的一般理论 正规光 波导.....	11
1.4.1 麦克斯韦方程组.....	11
1.4.2 波动方程.....	13
1.4.3 模式.....	14
1.4.4 模式场的纵、横向分量	16
1.5 均匀折射率光纤的波动理论.....	18
1.5.1 矢量模.....	18
1.5.2 线偏振模与标量法.....	20
1.5.3 二层均匀光纤.....	22
1.5.4 电磁场分布图.....	30
1.6 变折射率光纤的波动理论.....	33
1.6.1 引言.....	33
1.6.2 平方律光纤的解析解.....	34
1.6.3 级数近似解.....	36
1.7 均匀折射率单模光纤的分析.....	37
1.7.1 引言.....	37
1.7.2 基本性质.....	38
1.7.3 功率分布.....	42
1.8 变折射率单模光纤的分析.....	44
1.8.1 等效平方律折射率光 纤法.....	44
1.8.2 等效阶跃折射率光 纤法.....	46
1.9 非正规光波导的模耦合方程.....	48
1.9.1 非正规光波导.....	48
1.9.2 非正规光波导的模耦 合方程(矢量模耦合 方程)	49
练习题	52
参考文献	53
第 2 章 光纤的特性	54
2.1 引言.....	54
2.2 光纤的损耗.....	54
2.2.1 吸收损耗.....	54
2.2.2 散射损耗.....	55
2.3 光纤的色散.....	56
2.3.1 引言.....	56
2.3.2 多模色散.....	57
2.3.3 波长色散.....	59
2.3.4 各种色散大小的比较.....	59
2.4 单模光纤的设计.....	60
2.4.1 引言.....	60
2.4.2 截止条件.....	62
2.4.3 等效阶跃折射率光纤.....	64
2.4.4 色散特性.....	66
2.5 偏振保持光纤简介.....	67
2.5.1 引言.....	67
2.5.2 偏振保持光纤的结构 类型.....	68
2.5.3 高双折射光纤的制作 方法.....	69

2.5.4 低双折射光纤的制作
方法..... 70

2.6 弹光效应..... 71

2.7 光纤中产生双折射的原因..... 74

2.7.1 纤芯的椭圆度引起的
双折射..... 74

2.7.2 应力引起的双折射..... 75

2.7.3 弯曲引起的双折射..... 75

2.7.4 扭曲引起的双折射..... 76

2.7.5 外场引起的双折射..... 77

2.7.6 减小双折射影响的特
殊措施..... 77

2.8 偏振光在光纤中的传输..... 78

2.8.1 偏振光的矩阵表示法
——Jones 矢量 78

2.8.2 Jones 矩阵法在光纤中
的应用..... 79

2.8.3 单模光纤在外力作用下
引起双折射效应的 Jones
矩阵..... 84

2.8.4 Poincaré 球图示法..... 86

练习题 91

参考文献 92

3.4.2 两光纤端面之间的间
隙对耦合损耗的影响 101

3.4.3 两光纤轴之间的倾斜
对耦合损耗的影响 102

3.4.4 光纤端面的不完整性
对耦合损耗的影响 102

3.4.5 光纤种类不同对耦合
损耗的影响 103

3.5 单模光纤和单模光纤直接耦
合的损耗 104

3.5.1 两光纤的离轴和轴
倾斜引起的耦合损耗 α_1
..... 104

3.5.2 两光纤端面间的间隙
引起的耦合损耗 α_2 105

3.5.3 不同种类光纤引起的
耦合损耗 α_3 105

3.6 多模光纤通过透镜耦合的计
算举例 105

3.6.1 单透镜的近轴特性 106

3.6.2 单透镜的球差 107

3.6.3 耦合效率 108

练习题..... 110

参考文献..... 110

第 3 章 外界因素引起的光纤系统的损

耗 93

3.1 引言..... 93

3.2 弯曲引起的光纤损耗..... 93

3.2.1 光纤的宏弯损耗..... 93

3.2.2 微弯引起的光纤损耗..... 94

3.3 光纤和光源的耦合损耗..... 95

3.3.1 半导体激光器和光纤
的耦合损耗..... 96

3.3.2 半导体发光二极管和
光纤的耦合损耗 100

3.4 多模光纤和多模光纤的直接
耦合损耗 101

3.4.1 轴偏离对耦合损耗的影
响 101

第 4 章 光纤无源及有源器件..... 112

4.1 引言 112

4.2 熔锥型单模光纤光分/合路连
接器 112

4.2.1 理论分析 113

4.2.2 制作工艺 115

4.3 磨抛型单模光纤定向耦合器 ... 116

4.4 光纤偏振器 118

4.4.1 光纤偏振控制器 118

4.4.2 保偏光纤偏振器 118

4.5 光纤滤波器 120

4.5.1 Mach-Zehnder 光纤滤
波器 120

4.5.2 Fabry-Perot 光纤滤

波器	121	5.8 紫外光纤	157
4.6 光纤隔离器	124	5.9 增敏和去敏光纤	158
4.7 光纤调制器	124	5.9.1 对辐射的增敏和去敏 光纤	158
4.8 掺杂光纤激光器与放大器	125	5.9.2 磁敏光纤	159
4.8.1 光纤激光谐振腔	126	5.10 镀金属光纤	159
4.8.2 掺杂光纤激光介质	127	练习题	159
4.8.3 掺杂光纤激光器的 调谐	128	参考文献	160
4.8.4 光纤激光器的调 Q 和 锁模	129	第 6 章 光纤技术的主要应用	161
4.8.5 光纤激光器的输出线宽的 压缩	129	6.1 引言	161
4.8.6 光纤放大器	129	6.2 光纤通信技术	162
4.9 光纤光栅	131	6.3 光纤传感技术	165
4.9.1 引言	131	6.3.1 光纤传感器的定义及 分类	165
4.9.2 光纤布喇格光栅的理论 模型	131	6.3.2 光纤传感器的特点	165
4.9.3 均匀周期正弦型光纤 光栅	133	6.4 振幅调制传感型光纤传感器	166
4.9.4 非均匀周期光纤光栅	135	6.4.1 光纤微弯传感器	166
4.9.5 光纤光栅的写入方法 简介	136	6.4.2 光纤受抑全内反射传 感器	168
练习题	140	6.4.3 光纤辐射传感器	168
参考文献	140	6.5 振幅调制型光纤传感器的补 偿技术	169
第 5 章 特种光纤	142	6.5.1 双波长补偿法	169
5.1 引言	142	6.5.2 旁路光纤监测法	171
5.2 变折射率光纤棒的成像理论	142	6.5.3 光桥平衡补偿法	171
5.2.1 折射率分布	142	6.6 相位调制传感型光纤传感器	173
5.2.2 光纤棒中光线的轨迹	144	6.6.1 引言	173
5.2.3 成像特性	146	6.6.2 Mach-Zehnder 光纤干涉仪 和 Michelson 光纤干涉仪	174
5.3 变折射率光纤棒的制造	148	6.6.3 Sagnac 光纤干涉仪	175
5.4 变折射率光纤棒的应用	149	6.6.4 光纤 Fabry-Perot 干 涉仪	182
5.4.1 光纤棒用作准直物镜	149	6.6.5 光纤环形腔干涉仪	183
5.4.2 光纤棒用作成像物镜 在复印机中的应用	152	6.6.6 白光干涉型光纤传 感器	185
5.5 折射率光纤棒的像差	152	6.6.7 外界压力对光纤干涉 仪的影响	186
5.6 红外光纤	156		
5.7 塑料光纤	157		

6.6.8 温度对光纤干涉仪的影响	190	第7章 光纤特征参数的测量	217
6.6.9 光纤干涉仪的传感应用	191	7.1 引言	217
6.7 偏振态调制型光纤传感器	191	7.2 衰减测量	218
6.7.1 光纤电流传感器	191	7.2.1 衰减测量注入条件	219
6.7.2 双折射对光纤传感的影响	193	7.2.2 切断法	219
6.7.3 对光纤电流传感探头的进一步分析	193	7.2.3 插入损耗法	219
6.7.4 光纤偏振干涉仪	196	7.2.4 背向散射法	220
6.8 光纤光栅传感器	197	7.3 基带测量	221
6.8.1 引言	197	7.3.1 时域法	221
6.8.2 光纤布喇格光栅应变传感模型分析	198	7.3.2 频域法	222
6.8.3 光纤布喇格光栅温度传感模型分析	203	7.4 色散测量	223
6.8.4 光纤布喇格光栅在光纤传感领域中的典型应用	204	7.5 截止波长的测量	224
6.9 传光型光纤传感器	205	7.5.1 传导功率法	225
6.9.1 振幅调制传光型光纤传感器	206	7.5.2 模场直径法	226
6.9.2 相位调制传光型光纤传感器	208	7.6 折射率分布的测量	226
6.9.3 偏振态调制传光型光纤传感器	209	7.6.1 折射近场法	227
6.10 光纤传感器用于智能材料和结构	210	7.6.2 近场扫描法	229
6.10.1 引言	210	7.7 模场直径的测量	230
6.10.2 可用于智能结构的光纤传感器	211	7.7.1 横向位移法	230
6.10.3 光纤传感器用于智能结构的一些问题	211	7.7.2 传输场法	231
6.11 光纤传感技术的发展趋势及课题	212	7.8 最大理论数值孔径的测量	232
练习题	213	7.8.1 折射近场法	232
参考文献	214	7.8.2 远场法	233
		7.8.3 远场光斑法	234
		7.9 高双折射光纤拍长的测量	234
		7.9.1 散射光法	234
		7.9.2 透射光法	236
		7.10 几何尺寸的测量	240
		7.10.1 折射近场法测几何尺寸	240
		7.10.2 近场法测几何尺寸	241
		练习题	241
		参考文献	241
		第8章 光纤中的非线性效应	243
		8.1 引言	243
		8.2 光纤中的克尔效应	244
		8.3 光纤中的光孤子	245
		8.4 光脉冲的传播方程	248

8.5 非线性效应对群速度色散的平衡作用	250	散的平衡作用	252
8.5.1 群速度色散引起的脉冲展宽	250	8.6 单模光纤中的光孤子	254
8.5.2 自相位调制	251	8.7 暗孤子	255
8.5.3 在反常色散区中非线性折射率效应对群速度色散的应用	256	8.8 光孤子的应用	258
		练习题	258
		参考文献	259

第 1 章 光纤传输的基本理论

1.1 引言

光纤是光导纤维的简称。它是工作在光波波段的一种介质波导,通常是圆柱形。它把以光的形式出现的电磁波能量利用全反射的原理约束在其界面内,并引导光波沿着光纤轴线的方向前进。光纤的传输特性由其结构和材料决定。

光纤的基本结构是两层圆柱状媒质,内层为纤芯,外层为包层;纤芯的折射率 n_1 比包层的折射率 n_2 稍大。当满足一定的入射条件时,光波就能沿着纤芯向前传播。图 1.1.1 是单根光纤结构图。实际的光纤在包层外面还有一层保护层,其用途是保护光纤免受环境污染和机械损伤。有的光纤还有更复杂的结构,以满足使用中不同的要求。

光波在光纤中传输时,由于纤芯边界的限制,其电磁场解是不连续的。这种不连续的场解称为模式。光纤分类的方法有多种。按传输的模式数量可分为单模光纤和多模光纤:只能传输一种模式的光纤称为单模光纤,能同时传输多种模式的光纤称为多模光纤。单模光纤和多模光纤的主要差别是纤芯的尺寸和纤芯-包层的折射率差值。



图 1.1.1 单根光纤结构简图

多模光纤的纤芯直径大($2a = 50 \sim 500 \mu\text{m}$),芯-皮折射率差大($\Delta = (n_1 - n_2)/n_1 = 0.01 \sim 0.02$);单模光纤纤芯直径小($2a = 2 \sim 12 \mu\text{m}$),芯-皮折射率差也小($\Delta = 0.0005 \sim 0.01$)。

按纤芯折射率分布的方式可分为阶跃折射率光纤和梯度折射率光纤。前者纤芯折射率是均匀的,在纤芯和包层的分界面处,折射率发生突变(或阶跃);后者折射率是按一定的函数关系随光纤中心径向距离而变化。图 1.1.2 给出了这两类光纤的示意图和典型尺寸,图 1.1.2(a)是单模阶跃折射率光纤,图 1.1.2(b)和(c)分别是多模阶跃和梯度折射率光纤。

按传输的偏振态,单模光纤又可进一步分为非偏振保持光纤(简称非保偏光纤)和偏振保持光纤(简称保偏光纤)。其差别是前者不能传输偏振光,而后者可以。保偏光纤又可再分为单偏振光纤、高双折射光纤、低双折射光纤和圆保偏光纤 4 种。只能传输一种偏振模式的光纤称为单偏振光纤;只能传输两正交偏振模式、且其传播速度相差很大者为高双折射光纤;而其传播速度近于相等为低双折射光纤;能传输圆偏振光的则称为圆双折射光纤。

按制造光纤的材料分,有:①高纯度熔石英光纤,其特点是材料的光传输损耗低,有的波长可低到 0.2 dB/km ,一般均小于 1 dB/km ;②多组分玻璃纤维,其特点是芯-皮折射率可在较大范围内变化,因而有利于制造大数值孔径的光纤,但材料损耗大,在可见光波段一般为 1 dB/m ;③塑料光纤,其特点是成本低,缺点是材料损耗大,温度性能较差;④红外光纤,其特点是可透过近红外($1 \sim 5 \mu\text{m}$)或中红外($\sim 10 \mu\text{m}$)的光波;⑤液芯光纤,特点是纤芯为液体,

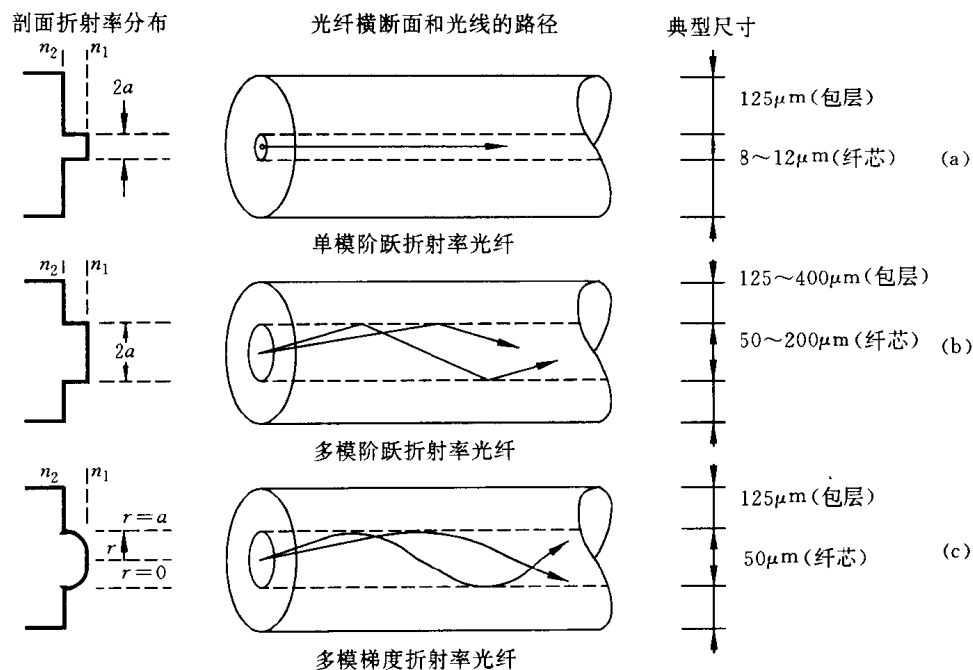


图 1.1.2 单模和多模光纤结构示意图

因而可满足特殊需要；⑥晶体光纤，特点是纤芯为单晶，可用于制造各种有源和无源光纤器件。

分析光波在光纤中的传播特性有两种基本方法：光线光学的方法和波动光学的方法，本章将分别加以介绍。

1.2 均匀折射率光纤的光线理论

下面用几何光学的方法(即光线理论)来处理光波在阶跃折射率光纤中的传输特性。分别讨论子午光线和斜光线的传播，并分析光纤端面倾斜、光纤弯曲、光纤为圆锥形情况下光线传播的特性。

1.2.1 子午光线的传播

通过光纤中心轴的任何平面都称为子午面，位于子午面内的光线则称为子午光线。显然，子午面有无数个。根据光的反射定律：入射光线、反射光线和分界面的法线均在同一平面，光线在光纤的芯-皮分界面反射时，其分界面法线就是纤芯的半径。因此，子午光线的入射光线、反射光线和分界面的法线三者均在子午面内，如图 1.2.1 所示。这是子午光线传播的特点。

由图 1.2.1 可求出子午光线在光纤内全反射所应满足的条件。图中 n_1, n_2 分别为纤芯和包层的折射率， n_0 为光纤周围媒质的折射率。要使光能完全限制在光纤内传输，则应使光

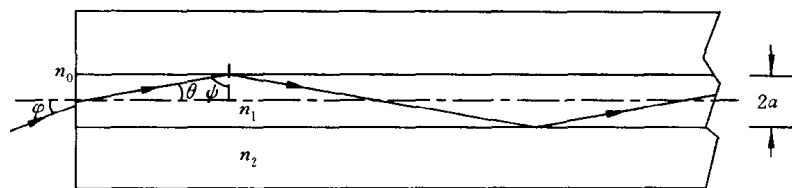


图 1.2.1 子午光线的全反射

线在纤芯-包层分界面上的入射角 ψ 大于(至少等于)临界角 ψ_0 , 即

$$\sin\psi_0 = \frac{n_2}{n_1}, \quad \psi \geq \psi_0 = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

或

$$\sin\theta_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

式中 $\theta_0 = 90^\circ - \psi_0$ 。再利用 $n_0 \sin\varphi = n_1 \sin\theta$, 可得

$$n_0 \sin\varphi_0 = n_1 \sin\theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

由此可见, 相应于临界角 ψ_0 的入射角 φ_0 , 反映了光纤集光能力的大小, 通称为孔径角。与此类似, $n_0 \sin\varphi_0$ 则定义为光纤的数值孔径, 一般用 NA 表示, 即

$$NA_f = n_0 \sin\varphi_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.2.1)$$

下标“子”表示是子午面内的数值孔径。由于子午光线在光纤内的传播路径是折线, 所以光线在光纤中的路径长度一般都大于光纤的长度。由图 1.2.1 中的几何关系, 可得长度为 L 的光纤中, 其总光路的长度 S' 和总反射次数 η' 分别为

$$S' = LS = \frac{L}{\cos\theta} \quad (1.2.2)$$

$$\eta' = L\eta = \frac{L \tan\theta}{2a} \quad (1.2.3)$$

式中 S 和 η 分别为单位长度内的光路长和全反射次数; a 为纤芯半径, 其表达式分别为

$$S = \frac{1}{\cos\theta} = \frac{1}{\sin\psi} \quad (1.2.4)$$

$$\eta = \frac{\tan\theta}{2a} = \frac{1}{2a \tan\psi} \quad (1.2.5)$$

以上关系式说明, 光线在光纤中传播的光路长度只取决于入射角 φ 和相对折射率 n_0/n_1 , 而与光纤直径无关; 全反射次数则与纤芯直径 $2a$ 成反比。

1.2.2 斜光线的传播

光纤中不在子午面内的光线都是斜光线。它和光纤的轴线既不平行也不相交, 其光路轨迹是空间螺旋折线。此折线可为左旋, 也可为右旋, 但它和光纤的中心轴是等距的。由图 1.2.2 中的几何关系可求出斜光线的全反射条件。图中 QK 为入射在光纤中的斜光线, 它与光纤轴 OO' 不共面; H 为 K 在光纤横截面上的投影, $HT \perp QT$, $OM \perp QH$ 。由图中几何关系

得斜光线的全反射条件为

$$\cos\gamma \sin\theta = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

再利用折射定律 $n_0 \sin\varphi = n_1 \sin\theta$, 可得在光纤中传播的斜光线应满足如下条件:

$$\sin\varphi \cos\gamma \leq \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_0}$$

斜光线的数值孔径则为

$$NA_{斜} = n_0 \sin\varphi_a = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\cos\gamma} \quad (1.2.6)$$

由于 $\cos\gamma \leq 1$, 因而斜光线的数值孔径比子午光线的要大。

由图 1.2.2 还可求出单位长度光纤中斜光线的光路长度 $S_{斜}$ 和全反射次数 $\eta_{斜}$ 为

$$S_{斜} = \frac{1}{\cos\theta} = S_{子} \quad (1.2.7)$$

$$\eta_{斜} = \frac{\tan\theta}{2a\cos\gamma} = \frac{\eta_{子}}{\cos\gamma} \quad (1.2.8)$$

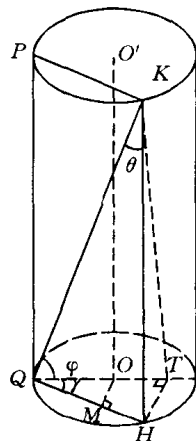


图 1.2.2 斜光线的全反射光路

1.2.3 光纤的弯曲

实际使用中, 光纤经常处于弯曲状态。这时其光路长度、数值孔径等诸参数都会发生变化。

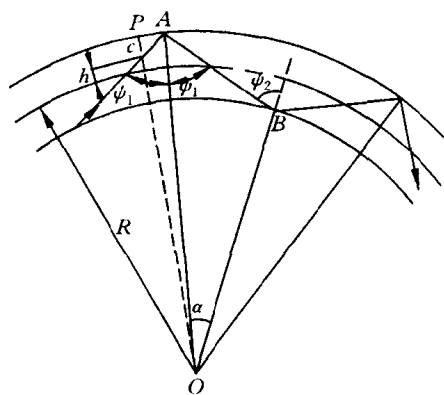


图 1.2.3 光纤弯曲时光线的传播

图 1.2.3 为光纤弯曲时光线传播的情况。设光纤在 P 处发生弯曲。光线在离中心轴 h 处的 c 点进入弯曲区域, 两次全反射点之间的距离为 AB 。利用图中的几何关系可得

$$S_0 = \frac{\sin\alpha}{\alpha} \left(1 - \frac{a}{R}\right) S_f \quad (1.2.9)$$

式中 a 为纤芯半径; R 为光纤弯曲半径。 S_0 是光纤弯曲时, 单位光纤长度上子午光线的光路长度。

由于 $(\sin\alpha/\alpha) < 1$, $(a/R) < 1$, 因而有 $S_0 < S_f$ 。这说明光纤弯曲时子午光线的光路长度减小了。与此相应, 其单位长度的反射次数也变少了, 即 $\eta_0 < \eta_f$ 。 η_0 的具体表达式为

$$\eta_0 = \frac{1}{\frac{1}{\eta_f} + \alpha a} \quad (1.2.10)$$

利用图 1.2.3 的几何关系, 还可求出光纤弯曲时孔径角 φ_0 的表达式为

$$\sin\varphi_0 = \frac{1}{n_0} \left[n_1^2 - n_2^2 \left(\frac{R+a}{R+h} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1.2.11)$$

由此可见, 光纤弯曲时其入射端面上各点的孔径角不相同, 是沿光纤弯曲方向由大变小。

由上述分析可知,光纤弯曲时,由于全反射条件不满足,其透光量会下降。这时既要计算子午光线的全反射条件,又要推导斜光线的全反射条件,才能求出光纤弯曲时透光量和弯曲半径之间的关系。实验结果表明,当 $R/2a < 50$ 时,透光量已开始下降; $R/2a \approx 20$ 时,透光量明显下降,说明大量光能量已从光纤包层逸出。图 1.2.4 是光纤透光率随弯曲半径变化的一个典型的测量结果。

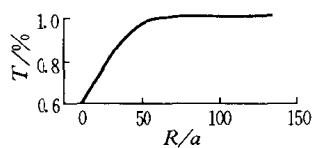


图 1.2.4 光纤透光率与弯曲半径的关系曲线(实验曲线)

1.2.4 光纤端面的倾斜效应

光纤端面与其中心轴不垂直时,将引起光束发生偏折,这是工作中应注意的一个实际问题。

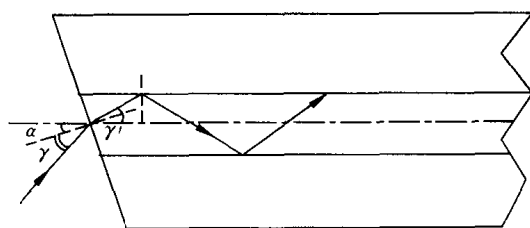


图 1.2.5 入射端面倾斜时光纤中的光路

图 1.2.5 是入射端面倾斜的情况, α 是端面的倾斜角, γ 和 γ' 是端面倾斜时光线的入射角和折射角。由图中几何关系可得

$$\sin \alpha = \left[1 - \left(\frac{n_0 \sin \gamma}{n_1} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right]^{-1/2} - \frac{n_0 n_2}{n_1^2} \sin \gamma \quad (1.2.12)$$

上式说明:当 n_1, n_2, n_0 不变时,倾斜角 α 愈大,接收角 γ 就愈小。所以光纤入射端面倾斜后,要接收入射角为 γ 的光线,其值要大于正常端面的孔径角。反之,若光线入射方向和倾斜端面的法线方向分别在光纤中心轴的两侧,则其接收光的范围就增大了 α 角。

同样,光纤出射端面的倾斜会引起出射光线的角度发生变化。若 β 是出射端面的倾斜角,当 $\beta \neq 0$ 时,出射光线对光纤轴要发生偏折,其偏向角 γ' 为

$$\gamma' = \arcsin \left(\frac{n_1}{n_0} \sin \beta \right) - \arcsin \beta \quad (1.2.13)$$

1.2.5 圆锥形光纤

圆锥形光纤是指其直径随光纤长度呈线性变化的光纤。锥形光纤由于具有一系列特殊性能,因而可制成许多光纤器件。在光纤与光纤、光纤与光源、光纤与光学元件的耦合中应用日益广泛。图 1.2.6 是子午光线通过锥形光纤的光路。设 δ 为锥形光纤的锥角。由图可知,在锥形光纤中,光线在芯-皮分界面上反射角 ψ 随反射次数增加而逐渐减小。由图中几何关系以及折射定律可得

$$\psi_n = 90^\circ - \frac{n_0}{n_1} \arcsin \varphi - (2m - 1) \frac{\delta}{2} \quad (1.2.14)$$

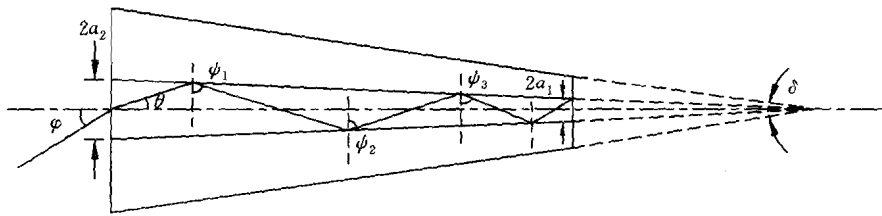


图 1.2.6 锥形光纤中的子午光线

式中 m 是反射次数。上式说明,当光线从锥形光纤的大端入射时,由于反射角 ψ_r 随反射次数的增加而不断减小,因而全反射条件易被破坏。可能会出现全反射条件不满足的情况。根据全反射条件,要使入射光线都能从光纤另一端出射,则应满足

$$\sin\left(\theta_0 + \frac{\delta}{2}\right) \leq \frac{a_1}{a_2} \left[1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

式中 a_1 和 a_2 分别是光纤出射端(小端)和入射端(大端)的半径。若 $\cos(\delta/2) \approx 1$,则由上式可得

$$\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \leq \frac{\frac{a_1}{a_2} \left[1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} - \sin\theta}{\cos\theta} \quad (1.2.15)$$

这是一般情况下锥形光纤聚光的条件。再利用

$$\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{a_2 - a_1}{l}$$

l 是光纤长度,可得

$$l \geq \frac{1}{2} \frac{2(a_2 - a_1)\cos\theta}{\frac{a_1}{a_2} \left[1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} - \sin\theta} \quad (1.2.16)$$

上式说明,为使锥形光纤聚光,光纤有个最小长度 l_0 。

另外,锥形光纤两端孔径角不一样,大端孔径角小,小端孔径角大,两者满足下列关系:

$$a_2 \sin\varphi_0 = a_1 \sin\varphi'_0 \quad (1.2.17)$$

式中

$$\sin\varphi'_0 = \frac{1}{n_0} (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\sin\varphi_0 = \frac{a_1}{a_2} \frac{1}{n_0} (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}}$$

由此可见,锥形光纤可改变孔径角,因而可用于耦合。

1.3 变折射率光纤的光线理论

前面讨论了纤芯折射率分布为常数时光的传输理论。对于实际的光纤,由于制造工艺问题,在光纤的芯-皮分界面上和纤芯中心部分,其折射率总存在有梯度变化,当这种折射率的