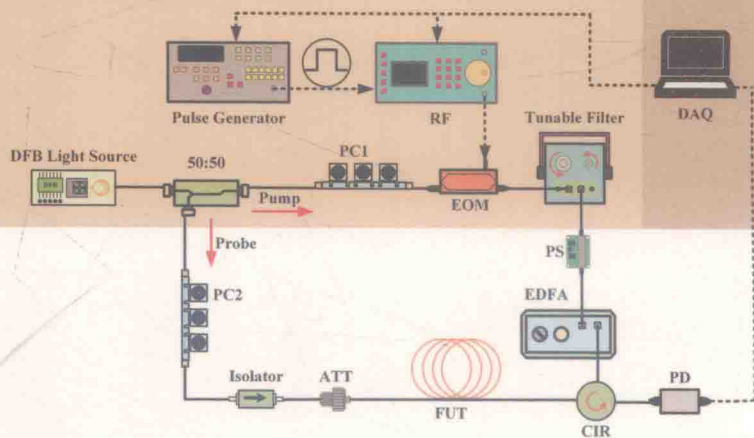


# 光纤传感器 及其应用技术

黎敏 廖延彪 编著



科学出版社

# 光纤传感器及其应用技术

黎 敏 廖延彪 编著

科学出版社

北 京

## 版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

### 内 容 简 介

为了适应光纤传感技术和产业的高速发展,本书以光纤中的光调制机理为主线,详细讨论强度调制、相位调制、波长调制和偏振态调制四大类光纤传感器的传感机理、关键问题和应用范例,以及近年来多行业规模化应用的分布式光纤传感技术的原理、方法和关键技术;选择性地将物联网技术中的重要骨架——光纤成网技术,新型光纤——聚合物光纤、光子晶体光纤和纳米光纤及其传感应用作为延伸与拓展。本书内容重点突出,结合学科最新进展,应用设计实例丰富。有助于在掌握基础理论和应用工具的同时,开阔科研视野、了解学科动态、启发创新思维。

本书适合电子信息类相关专业高年级本科生及研究生学习使用,也适合从事相关科研人员参考阅读。

#### 图书在版编目(CIP)数据

光纤传感器及其应用技术/黎敏,廖延彪编著. —北京:科学出版社,2018.6  
ISBN 978-7-03-057784-9

I. ①光… II. ①黎… ②廖… III. ①光纤传感器 IV. ①TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 126519 号

责任编辑:孙寓明/责任校对:董艳辉

责任印制:彭超/封面设计:苏波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

开本:787×1092 1/16

2018年6月第 一 版 印张:14 3/4

2018年6月第一次印刷 字数:378 000

定价:58.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

从第一代光纤传感器——牙科内窥镜开始,光纤传感器的研发和应用引领了生物医药、智能材料、电力等多个行业测试技术的革命性发展。现代光纤技术以 20 世纪 70 年代发展起来的超低损耗光纤为基础,历经 40 年的发展,在信息获取和信息传输领域发挥着不可替代的作用。获取信息是光纤传感的核心使命。作为一类重要的传感技术,光纤传感技术具有许多传统传感器所无法企及的优势,尤其是本征绝缘和抗电磁干扰性能,而与生俱来的信息传输能力,使得光纤传感器日益成为物联网发展的主干技术。正是这些独到之处促进了光纤传感器在我国当前基础建设高速发展、安全生产呼声日涨的条件下,加快进入电力、石油化工、大型基础设施建设、环境安全和生物医学等尚未开垦的传感技术处女地推广应用;并有望在超高压电力、石化、核电、大型构筑物、环境等安全监测领域取代传统的传感方式,成为信息传感技术的先锋。

光纤传感器发展史上有 3 次传感器成功崛起的浪潮。第 1 次浪潮——基于 Sagnac 效应的光纤陀螺和光纤 Mach-Zehnder 干涉型水听器,两者如今同时在军事和民用领域获得了成功的应用;第 2 次浪潮——本征/非本征 Fabry-Perot 干涉仪,迄今已有无数的研究和应用报道;第 3 次浪潮——光纤光栅(fiber bragg grating, FBG),始于为光纤通信设计的在线滤波器,而最终发展为高精度、准分布式多参量传感技术。而每一次传感器的革命浪潮都推动更多新传感机理和技术涌现。

本书旨在从光纤传感器发展历程中数以百计的物理量传感原理和技术中提炼出一条明晰的发展脉络,使读者能够方便地掌握传感器的原理、关键技术、应用及发展方向。为此,将众多光纤通信技术书籍中共有的光纤光学部分的内容浓缩为开篇第 1 章,作为学习导读和基础。传感器内容的第一部分包括第 2~6 章,展开并详细讨论强度调制型、相位调制型、波长调制型和偏振态调制型四大类和分布式光纤传感的原理、针对性的核心技术和设计方法;并提供了大量典型应用和设计案例作为工程师们的设计参考。第二部分包括第 7~9 章,延伸介绍光纤传感网络技术、新材料光纤——聚合物光纤传感器以及新型导光机理光纤——光子晶体和纳米光纤传感器,供读者了解和把握光纤技术最新研究进展及相关领域的现状。相信对开阔读者的专业学习视野、了解学科的前沿动态、启发创新思维会有一定的帮助。

本书结合作者在光纤教学和科研中的切身体会,在参考国内外大量相关书籍资料的基础上编写而成。虽然,少数类型的光纤传感技术已获得大规模工程应用,但由于被测物理参量种类多、传感机理不同、应用环境复杂,仍有大量的传感器处于研发阶段,很多技术尚待完善。新的传感机理和应用领域不断涌现,加之笔者水平所限,书中难免有不当之处,欢迎广大读者不吝批评指正。

黎 敏

二〇一八年春于南湖

# 目 录

<b>第 1 章 光纤技术基础</b> .....	1
1.1 光纤的基本特性 .....	1
1.1.1 均匀折射率光纤中光线的传播与数值孔径 .....	2
1.1.2 光纤的弯曲 .....	3
1.1.3 光纤端面的倾斜效应 .....	4
1.1.4 圆锥形光纤 .....	5
1.1.5 光纤的损耗 .....	6
1.1.6 光纤的色散 .....	8
1.2 常用光纤器件 .....	8
1.2.1 光纤定向耦合器、环形器与 WDM .....	9
1.2.2 光纤偏振器件——PM 控制器、起偏器与消偏器、扰偏器和光隔离器 .....	17
1.2.3 全光开关 .....	25
1.2.4 光纤光栅与光纤滤波器 .....	27
1.2.5 光调制器 .....	34
1.2.6 掺杂光纤激光器 .....	37
1.2.7 大功率光纤激光器与包层泵浦技术 .....	42
1.2.8 光纤放大器 .....	45
1.3 小结 .....	48
习题与思考 .....	49
<b>第 2 章 强度调制型光纤传感器</b> .....	50
2.1 强度调制传感原理 .....	50
2.1.1 反射式强度调制 .....	50
2.1.2 透射式强度调制 .....	52
2.1.3 光纤模式功率分布强度调制 .....	54
2.1.4 折射率强度调制 .....	55
2.1.5 光吸收系数调制 .....	57
2.2 强度调制型光纤传感器的补偿技术 .....	57
2.2.1 光源负反馈稳定法 .....	57
2.2.2 双波长补偿法 .....	58
2.2.3 旁路光纤监测法 .....	59

2.2.4	光桥平衡补偿法	60
2.2.5	神经网络补偿法	62
2.3	强度调制型光纤传感器的类型及应用实例	63
2.3.1	光纤微弯传感器	63
2.3.2	光纤温度传感器	66
2.4	强度调制型光纤传感器的研究与发展方向	69
	习题与思考	69
<b>第3章</b>	<b>相位调制型光纤传感器</b>	<b>70</b>
3.1	相位调制型光纤传感器原理	70
3.1.1	应力应变效应	70
3.1.2	温度应变效应	73
3.2	光纤干涉仪的类型	74
3.2.1	Mach-Zehnder 和 Michelson 光纤干涉仪	74
3.2.2	Sagnac 光纤干涉仪	75
3.2.3	光纤 Fabry-Perot 干涉仪	79
3.2.4	光纤环形腔干涉仪	79
3.2.5	相位压缩原理与微分干涉仪	81
3.2.6	白光干涉型光纤传感器	83
3.3	相位调制型光传感器的信号解调技术	87
3.3.1	干涉仪的信号解调	87
3.3.2	光纤锁相环方法	90
3.3.3	相位生成载波(PGC)解调方案	92
3.4	光纤干涉仪的传感应用实例	93
3.4.1	振动传感器	94
3.4.2	磁场传感器	96
3.4.3	电流传感器	97
3.5	相位调制型光纤传感器的发展	102
	习题与思考	102
<b>第4章</b>	<b>波长调制型光纤传感器</b>	<b>103</b>
4.1	波长调制传感原理	103
4.2	光纤布拉格光栅传感器	103
4.2.1	光纤布拉格光栅传感模型	103
4.2.2	光纤光栅增敏与去敏设计	109
4.2.3	光纤布拉格光栅在光纤传感领域中的典型应用	113

4.3	光纤 SPR 传感器	114
4.3.1	SPR 原理与理论模型	114
4.3.2	光纤 SPR 传感器及其应用	116
4.4	光声光谱微量气体检测技术	121
4.4.1	光声光谱原理	121
4.4.2	光声气室的设计与优化	122
4.4.3	微量气体的光声光谱法高精度检测实例	126
4.5	光纤荧光温度传感器	127
4.6	光纤黑体(高温)温度计	131
	习题与思考	132
<b>第 5 章</b>	<b>偏振态调制型光纤传感器</b>	<b>133</b>
5.1	偏振态调制传感原理	133
5.1.1	泡克耳斯效应	133
5.1.2	克尔效应	134
5.1.3	法拉第效应	135
5.1.4	弹光效应	136
5.2	偏振调制光纤传感器类型及应用实例	137
5.2.1	光纤电流传感器	137
5.2.2	BSO 晶体光纤电场传感器	139
5.2.3	医用胎压计	140
5.2.4	动脉光纤血流计	142
5.2.5	光纤偏振干涉仪	143
	习题与思考	143
<b>第 6 章</b>	<b>分布式光纤传感器</b>	<b>145</b>
6.1	引言	145
6.2	时域分布式光纤传感器的工作机理	147
6.2.1	光纤中的背向散射光分析	147
6.2.2	OTDR 技术	147
6.2.3	瑞利散射型分布式光纤传感技术	148
6.2.4	基于拉曼散射的分布式光纤传感技术	149
6.2.5	布里渊散射型分布式光纤传感技术	149
6.2.6	拉曼型、布里渊型和偏振模式耦合型分布式温度传感方法比较	152
6.2.7	FBG 和 BOTDR 性能比较	152
6.3	其他(准)分布式光纤传感器	153

6.3.1	光纤 F-P 传感器 .....	154
6.3.2	基于干涉技术的分布式光纤传感器 .....	157
6.4	分布式光纤传感器的应用 .....	158
6.5	小结 .....	160
	习题与思考 .....	160
<b>第 7 章</b>	<b>光传感器网络技术 .....</b>	<b>161</b>
7.1	概述 .....	161
7.1.1	可用于构成光传感网的光纤传感器 .....	161
7.1.2	成网技术 .....	165
7.2	光纤光栅传感网络 .....	169
7.3	基于干涉型光纤传感器的光纤传感网 .....	174
7.3.1	大规模干涉型光纤传感网络的基本结构 .....	174
7.3.2	超大容量干涉型光纤传感网络的信号处理方法 .....	176
7.3.3	超大容量干涉型光纤传感网络的偏振诱导信号衰落及其控制方法 .....	176
7.3.4	长距离复合复用网络结构中的光放大机理及极限性能 .....	178
	习题与思考 .....	179
<b>第 8 章</b>	<b>新材料光纤传感器及其应用技术 .....</b>	<b>180</b>
8.1	光子晶体光纤及其在传感中的应用 .....	180
8.1.1	光子晶体光纤 .....	180
8.1.2	光子晶体光纤传感器 .....	184
8.1.3	PCF 小结 .....	187
8.2	聚合物光纤及其传感应用 .....	187
8.2.1	聚合物光纤材料及类型 .....	188
8.2.2	多模聚合物光纤传感器及其应用 .....	193
8.2.3	单模聚合物光纤传感器及其应用 .....	198
8.3	小结 .....	203
	习题与思考 .....	204
<b>第 9 章</b>	<b>纳米光纤与传感器 .....</b>	<b>205</b>
9.1	纳米光纤 .....	205
9.1.1	纳米光纤的典型特征——极高的倏逝场能量 .....	206
9.1.2	纳米光纤的制造与操作 .....	206
9.2	纳米光纤中的光传输 .....	208
9.2.1	传输方程与精确解 .....	208



9.2.2 传输损耗 .....	209
9.2.3 纳米光纤的色散与超连续谱 .....	210
9.3 纳米光纤的典型应用 .....	211
9.3.1 纳米光纤传感器 .....	211
9.3.2 非线性光学器件 .....	213
9.3.3 纳米光纤耦合器 .....	213
9.3.4 原子捕获与导向 .....	214
9.4 纳米光纤传感的发展前景 .....	216
习题与思考 .....	217
参考文献 .....	218
附录 1 符号表 .....	220
附录 2 缩写词汇表 .....	222

# 第 1 章 光纤技术基础

## 1.1 光纤的基本特性

光纤是光导纤维的简称。光导纤维是工作在光波波段的一种介质波导,通常是圆柱形。光导纤维将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介质,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。当满足一定的人射条件时,光波就能沿着纤芯向前传播。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。图 1-1 是单根光纤结构图。

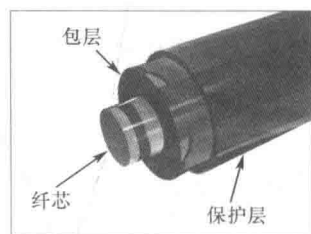


图 1-1 单根光纤结构简图

光波在光纤中传输时,由于纤芯边界的限制,其电磁场解不连续。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。多模光纤纤芯直径大( $2a=50\sim 500\ \mu\text{m}$  标准包层直径  $2b=125\sim 400\ \mu\text{m}$ ),芯-包层折射率差大( $\Delta=(n_1-n_2)/n_1=0.01\sim 0.02$ );单模光纤纤芯直径小( $2a=2\sim 12\ \mu\text{m}$ ),芯-包层折射率差小( $\Delta=0.0005\sim 0.001$ )。

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(即阶跃型);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的。图 1-2 给出了这两类光纤的示意图和典型尺寸。图 1-2(a)是单模阶跃折射率光纤,图 1-2(b)和图 1-2(c)分别是多模阶跃折射率光纤和多模梯度折射率光纤。

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。保偏光纤又可细分为单偏振光纤、高双折射光纤、低双折射光纤和圆偏光纤 4 种。只能传输一种偏振模式的光纤称为单偏振光纤;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的为低双折射光纤);能传输圆偏振光的光纤则称为圆双折射光纤。

按制造的材料分,光纤有: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  $0.2\ \text{dB/km}$ ,一般小于  $1\ \text{dB/km}$ ;②多组分玻璃纤维,其特点是芯-包层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  $1\ \text{dB/m}$ ;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( $5\sim 10\ \mu\text{m}$ )的光波;⑤液芯光纤,特点是纤芯为液体,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。

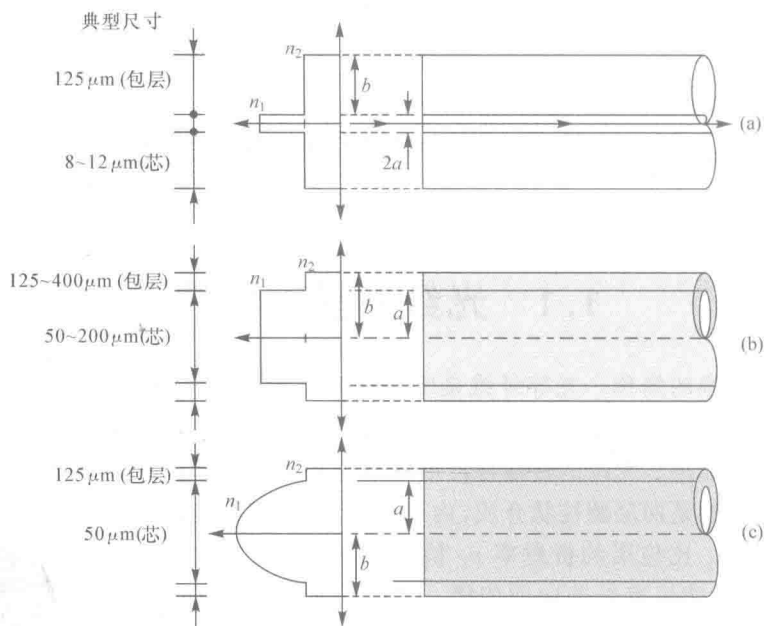


图 1-2 单模和多模光纤结构示意图

### 1.1.1 均匀折射率光纤中光线的传播与数值孔径

本小节利用几何光学的方法(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,分析光纤弯曲、光纤端面倾斜、光纤为圆锥形情况下光线传播的特性,介绍光纤的损耗和色散。

#### 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,光线在光纤的纤芯-包层分界面反射时,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 1-3 所示。这是子午光线传播的特点。

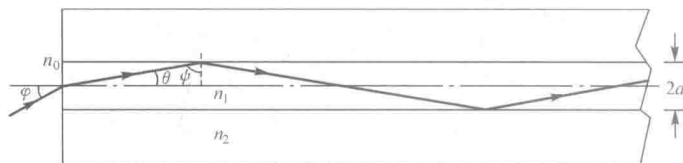


图 1-3 子午光线在光纤中的传播

由图 1-3 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,  $n_0$  为光纤周围介质的折射率。要使光能完全限制在光纤内传输,则应使光线在纤芯-包层分界面上的入射角  $\psi$  大于(至少等于)临界角  $\psi_0$ , 即

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

临界角:  $\theta_0 = 90^\circ - \psi_0, \sin \theta_0 = \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$ 。

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  $\psi_0$  的入射角  $\varphi_0$ , 反映了光纤集光能力的大小, 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 N.A. 表示, 即

$$\text{N.A.}_{\text{子}} = n_0 \sin \varphi_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

式中: 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传播路径长度一般都大于光纤的长度。由图 1-3 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  $\eta'$  分别为

$$S' = LS = \frac{L}{\cos \theta}, \quad \eta' = L\eta = \frac{L \tan \theta}{2a}$$

式中:  $S$  和  $\eta$  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

$$S = \frac{1}{\cos \theta} = \frac{1}{\sin \psi}, \quad \eta = \frac{\tan \theta}{2a} = \frac{1}{2a \tan \psi}$$

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  $\varphi$  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。

## 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。图 1-4 为斜光线的全反射光路。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

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

斜光线的数值孔径则为

$$\text{N.A.}_{\text{斜}} = n_0 \sin \varphi_a = \frac{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\cos \gamma}$$

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 1-4 还可求出单位长度光纤中斜光线的光路长度  $S_{\text{斜}}$  和全反射次数  $\eta_{\text{斜}}$  为

$$S_{\text{斜}} = \frac{1}{\cos \theta} = S_{\text{子}}, \quad \eta_{\text{斜}} = \frac{\tan \theta}{2a \cos \gamma} = \frac{\eta_{\text{子}}}{\cos \gamma}$$

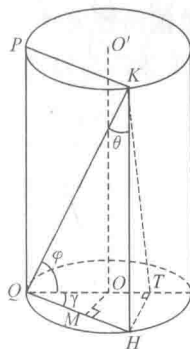


图 1-4 斜光线的全反射光路

### 1.1.2 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、数值孔径等参数都会发生变化。图 1-5 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 1-5 中的几何关系可得

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

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  $S_0 < S_T$ 。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  $\eta_0 < \eta_T$ 。  $\eta_0$  的具体表达式为

$$\eta_0 = \frac{1}{\frac{1}{\eta_T} + \alpha a} \quad (1-2)$$

利用图 1-5 的几何关系, 还可求出光纤弯曲时孔径角  $\varphi_0$  的表达式为

$$\sin \varphi_0 = \frac{1}{n_0} \left[ n_1^2 - n_2^2 \left( \frac{R+a}{R+h} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1-3)$$

由此可见, 光纤弯曲时其入射端面上各点的孔径角不相同, 且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 1-6 是光纤透光率  $T$  随弯曲半径变化的一个典型测量结果。

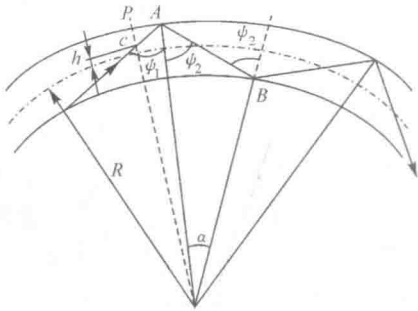


图 1-5 光纤弯曲时光线的传播

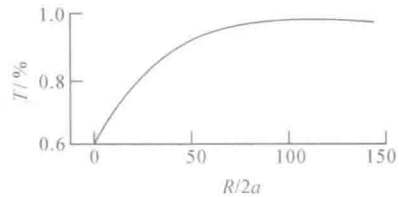


图 1-6 光纤透光率与弯曲半径的关系曲线(实验曲线)

### 1.1.3 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, 这是具体工作中应注意的一个实际问题。

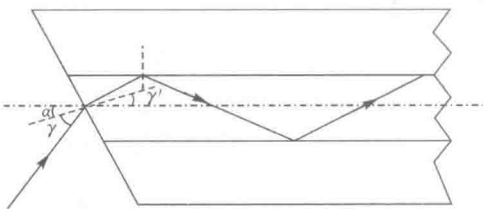


图 1-7 入射端面倾斜时光纤中的光路

图 1-7 是入射端面倾斜的情况,  $\alpha$  是端面的倾斜角,  $\gamma$  和  $\gamma'$  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

$$\sin \alpha = \left[ 1 - \left( \frac{n_0 \sin \gamma}{n_1} \right)^2 \right]^{1/2} \left[ 1 - \left( \frac{n_2}{n_1} \right)^2 \right]^{1/2} - \frac{n_0 n_2}{n_1^2} \sin \gamma \quad (1-4)$$

式(1-4)说明: 当  $n_1, n_2, n_0$  不变时, 倾斜角  $\alpha$  愈大, 接收角  $\gamma$  就愈小。所以光纤入射端面倾斜后, 要接收入射角为  $\gamma$  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  $\alpha$  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  $\beta$  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  $\gamma'$  为

$$\gamma' = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_0} \sin \beta\right) - \arcsin \beta \quad (1-5)$$

### 1.1.4 圆锥形光纤

圆锥形光纤是指直径随光纤长度呈线性变化的光纤。圆锥形光纤因具有一系列特殊性能, 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 1-8 是子午光线通过圆锥形光纤的光路。设  $\delta$  为圆锥形光纤的锥角, 由图 1-8 可知, 在圆锥形光纤中, 光线在芯-包层分界面上的反射角  $\psi$  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

$$\psi_n = 90^\circ - \frac{n_1}{n_0} \arcsin \psi - (2m-1) \frac{\delta}{2} \quad (1-6)$$

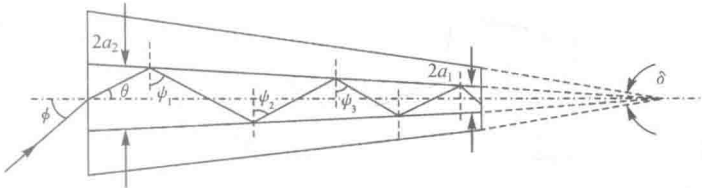


图 1-8 锥形光纤中的子午光线

式中:  $m$  为反射次数。

式(1-6)说明, 当光线从圆锥形光纤的大端入射时, 由于反射角  $\psi_n$  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  $a_2$  分别为光纤出射端(小端)和入射端(大端)的半径。

若  $\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \approx 1$ , 则由上式可得

$$\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \leq \frac{\frac{a_1}{a_2} = \left[1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} - \sin \theta}{\cos \theta} \quad (1-7)$$

这是一般情况下圆锥形光纤聚光的条件。再利用  $\sin\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{a_2 - a_1}{l}$  ( $l$  为光纤长度), 可得

$$l \geq \frac{1}{2} \frac{2(a_2 - a_1) \cos \theta}{\frac{a_1}{a_2} \left[1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} - \sin \theta} \quad (1-8)$$

式(1-8)说明, 为使圆锥形光纤聚光, 光纤有个最小长度  $l_0$ 。

另外, 圆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

$$a_2 \sin \varphi_0 = a_1 \sin \varphi'_0 \quad (1-9)$$

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,圆锥形光纤可改变孔径角,可用于耦合。

### 1.1.5 光纤的损耗

光纤的损耗、色散、偏振对于光纤通信、光纤传感、光纤非线性效应的研究都是十分重要的特性参量。由于存在损耗,在光纤中信号的能量将不断衰减,为了实现长距离光通信和光传输,就需在一定距离建立中继站,把衰减了的信号反复增强。损耗决定了光信号在光纤中被中继放大之前可传输的最大距离。但是,两中继站间可允许的距离不仅由光纤的损耗决定,而且还受色散的限制。在光纤中,脉冲色散越小,脉冲所携带的信息容量就越大。例如,若脉冲的展宽由 1 000 ns 减小到 1 ns,则脉冲所传输的信息容量将由 1 Mb/s 增加到 1 000 Mb/s。因此,仔细分析光纤的损耗特性和色散特性十分重要。另外,一般的单模光纤不能保持传输偏振光的偏振态,为此需用保偏光纤。因此,在光纤通信、光纤传感和光纤的非线性效应的研究中都需要了解光纤的偏振特性、保偏、消偏和偏振控制的方法。以下各节将对光纤的这些特性分别进行介绍。

光纤的损耗机理如图 1-9 所示。

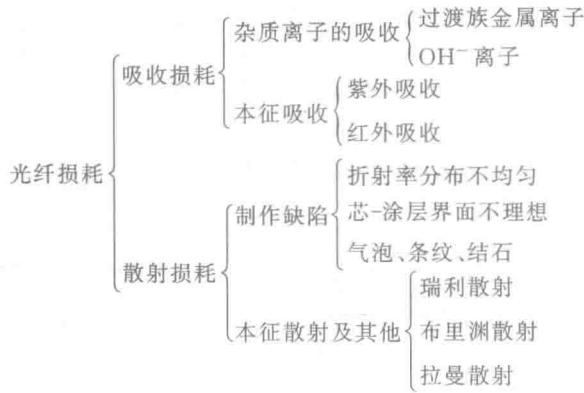


图 1-9 光纤的损耗机理

从图 1-9 可知,光纤的损耗主要由材料的吸收损耗和散射损耗确定。

#### 1. 吸收损耗

在一般的光学玻璃中都有一些附加元素,其中很多是杂质,它们多半具有较低激发能的电子态。同时还存在一些外来金属离子,其电子态比玻璃的本征态更易激发。它们的吸收带可以出现在光谱的可见和红外区域<sup>[1]</sup>。

对于杂质含量很低的玻璃,它的紫外吸收仅与  $O^{2-}$  的激发态有关。在熔融石英中,氧离子束缚很紧,有很高的紫外透明性,其吸收边在短紫外波长区;但是,吸收边尾可延伸到长波区。另外,由于材料随机分子结构会引起电场的局部变化,这局域电场就会感应而引起能量接近或者稍低于带边的激子能级变宽,这些能级加宽所感应的场又可以引起吸收边尾进入可见区域。由于吸收不显著,能量为  $E$  的光子的衰减因子  $\alpha$  服从如下规律

$$\alpha \sim \exp\left(\frac{E-E_k}{\Delta E}\right) \quad (1-10)$$

式中:  $E_k$  是材料的有效能隙;  $\Delta E$  是表征该材料吸收特性的特征量。

图 1-10 给出了熔融石英和高纯度碱钙硅酸盐玻璃的本征吸收损耗与入射光波长和频

率的关系曲线。由图 1-10 和式(1-10)可知,熔融石英曲线的斜率较大( $\Delta E = 0.5 \text{ eV}$ ,  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ ),而碱钙硅酸盐玻璃的  $\Delta E$  值仅  $0.3 \text{ eV}$ 。熔融石英的能隙较大,一般是  $E_g = 13.4 \text{ eV}$ ,因此,它的本征吸收损失较低,而且随频率的增加上升速率比其他玻璃缓慢。熔融石英能隙较大是由于  $\text{O}^{2-}$  离子处于紧束缚状态。另外,从图 1-10 可见,波长从  $1 \mu\text{m}$  变到  $0.4 \mu\text{m}$  时,熔融石英的损耗要增加一个数量级。

高纯度的均匀玻璃,在可见和红外区域的本征损失很小。但是,一些外来元素产生了重要的杂质吸收,这些主要的杂质是  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{V}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$  和  $\text{Ni}^{2+}$ 。它们的电子跃迁能级位于材料的能隙中,可以被可见光或近红外光激发。因此,它们在可见和近红外区域有很强的吸收损耗。

对于低浓度杂质离子的玻璃材料,在给定的频率下,由吸收引起的衰减和杂质浓度成正比,在材料中的这些杂质可通过原材料的提纯和制作工艺的改进而除去。除金属杂质外,  $\text{OH}^-$  是另一个极重要的杂质。为了降低 O-H 基的吸收损耗,原材料的脱水技术十分重要。近来,消除  $\text{OH}^-$  的方法已有显著成效,可以制出水的质量比小于几十个  $\text{ng/g}$  的高硅玻璃材料。即使这样,在  $0.95 \mu\text{m}$  处的  $\text{OH}^-$  吸收峰基本上可以消除,但在  $1.37 \mu\text{m}$  处的  $\text{OH}^-$  吸收峰却很难避免。

实验证明,在纯熔融石英中,要想得到  $4 \text{ dB/km} (\lambda = 0.85 \mu\text{m})$  的损耗,杂质的质量比如下:

$$\begin{aligned} \text{OH}^- < 5 \mu\text{g/g} & \quad \text{Fe}^{2+} < 0.05 \mu\text{g/g} & \quad \text{Co}^{2+} < 0.01 \mu\text{g/g} \\ \text{Cr}^{3+} < 0.03 \mu\text{g/g} & \quad \text{Mn}^{3+} < 0.002 \mu\text{g/g} & \quad \text{Cu}^{2+} < 0.01 \mu\text{g/g} \end{aligned}$$

要想得到  $0.5 \text{ dB/km}$  以下的损耗,  $\text{OH}^-$  的质量比要降低到几个  $\text{ng/g}$ 。

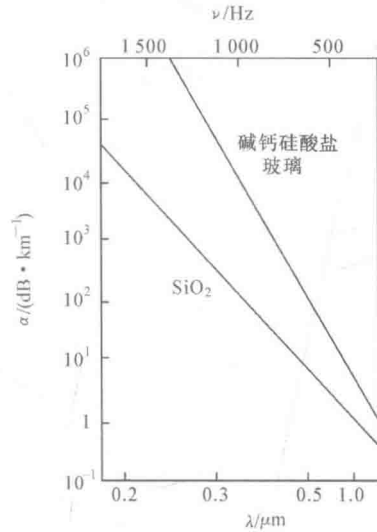


图 1-10 玻璃的本征吸收损耗与波长的关系

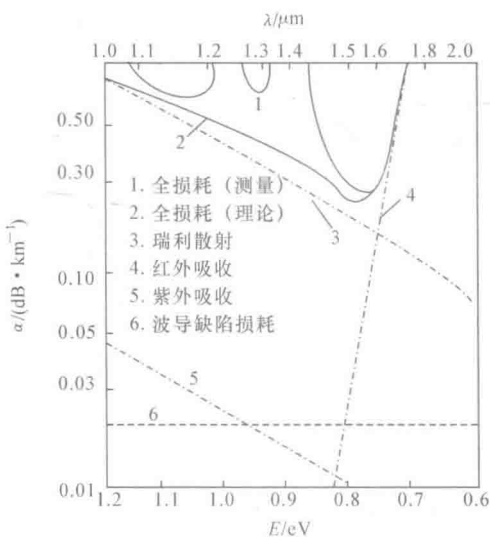


图 1-11 典型单模光纤的损耗曲线

## 2. 散射损耗

如前所述,散射损耗主要来源于光纤的制作缺陷和本征散射,其中主要是折射率起伏。光纤材料中随机分子结构可以引起折射率发生微观层面上的局部变化,缺陷和杂质原子也可以引起折射率发生局部变化。对这两种折射率变化引起的光能损失可以和波导的结构无关地进行分析。瑞利散射是一种基本的、重要的散射,因为它是一切媒质材料散射损耗的下限。其主要特点是散射损耗与波长的四次方成反比。散射体的尺寸小于入射光波长时,瑞利散射总是存在的。瑞利散射是一种重要的本征散射,它和本征吸收一起构成了光纤材料的本征损耗,它们表示在完美条件下材料损耗的下限。图 1-11 给出了



普通单模光纤的损耗曲线,图中还给出了红外吸收、紫外吸收、瑞利散射和波导缺陷损耗。

### 1.1.6 光纤的色散

在光纤中传输的光脉冲,受到由光纤的折射率分布、光纤材料的色散特性、光纤中的模式分布以及光源的光谱宽度等因素决定的“延迟畸变”,使该脉冲波形在通过光纤后发生展宽。这一效应称作“光纤的色散”<sup>[2,3]</sup>。在光纤中一般把色散分为以下4种。

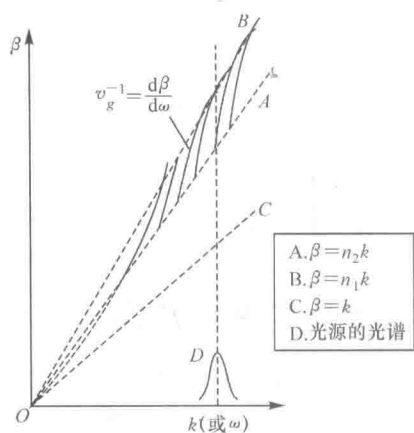


图 1-12 多模光纤  $k$ - $\beta$  曲线

(或波长)不是常数(图 1-12 中  $k$ - $\beta$  曲线不是直线),同时光源的谱线又有一定宽度,因此产生波导色散。

#### 3. 材料色散

由于光纤材料的折射率随入射光频率变化而产生的色散。

#### 4. 偏振(模)色散

一般的单模光纤中都同时存在两个正交模式( $HE_{11x}$ 模和  $HE_{11y}$ 模)。若光纤的结构为完全的轴对称,则这两个正交偏振模在光纤中的传播速度相同,即有相同的群延迟,故无色散。实际的光纤必然会有一些轴的不对称性,因而两正交模有不同的群延迟,这种现象称为偏振色散或偏振模色散。

在上述4种色散中,波导色散和材料色散都和光源的谱宽成正比,为此常把这两者总称为“波长色散”。下面讨论均匀芯光纤的色散。

首先给出群延迟的表达式。群延迟是指信号沿单位长度光纤传播后产生的延迟时间  $t$ 。设群速度为  $v_g$ ,则在角频率  $\omega_0$  附近的  $\omega$  的群时延可表示为

$$t = \frac{1}{v_g} = \frac{d\beta}{d\omega} = \left. \frac{d\beta}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} + (\omega - \omega_0) \left[ \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \right] \quad (1-11)$$

如光源发出的是严格的单色波,则上式只有第一项。第一项之值因模式不同而异,故引起模式色散;第二项则产生波导色散和材料色散。

#### 1. 模式色散

这是仅仅发生于多模光纤中由于各模式之间群速度不同而产生的色散。由于各模式以不同时刻到达光纤出射端,造成脉冲展宽。图 1-12 是说明多模光纤传播特性的  $k$ - $\beta$  曲线( $k, \beta$  分别为横、纵向传播常数) $\omega$ ,角频率,在  $\beta = n_1 k$  与  $\beta = n_2 k$  之间并列着许多模的  $k$ - $\beta$  曲线,在各模式的曲线与一定频率线(图中虚线)交点处的斜率  $\frac{d\beta}{d\omega}$ ,是因模而异产生的色散,  $\frac{d\beta}{d\omega}$  是群速度的倒数。

#### 2. 波导色散

这是由于某一传播模式的群速度对于光的频率

## 1.2 常用光纤器件

光无源器件是一种能量消耗型器件,它包括光连接器、光耦合器、光开关、光衰减器、光隔