



全国普通高校光电信息科学与工程专业规划教材



FIBER OPTICS (SECOND EDITION)

# 光纤光学

(第2版)

廖延彪 黎敏◎编著

Liao Yanbiao Li Min



清华大学出版社



01308283

## 内 容 提 要

本书从光的电磁理论出发,全面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、耦合模理论及非线性理论);光纤的损耗、色散、偏振以及非线性特性;光纤设计、光纤的连接和处理以及参数测量的基本方法;光纤有源和无源器件,各类特种光纤的简介,以及光纤在传输数据、能量、图像以及传感方面的应用等。

本书可作为普通高校光电信息科学与工程、光信息科学与技术、电子信息工程、电子科学与技术等相关专业的本科生及研究生教材,也可作为从事光电科技工作的工程技术人员参考使用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

光纤光学/廖延彪,黎敏编著.--2版.--北京:清华大学出版社,2013  
全国普通高校光电信息科学与工程专业规划教材  
ISBN 978-7-302-32293-1

I. ①光… II. ①廖… ②黎… III. ①纤维光学—高等学校—教材 IV. ①TN25

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 091754 号

责任编辑:盛东亮  
封面设计:李召霞  
责任校对:李建庄  
责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>  
地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084  
社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544  
投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)  
质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)  
课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:三河市君旺印装厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:19.5

字 数:488千字

版 次:2000年3月第1版

2013年8月第2版

印 次:2013年8月第1次印刷

印 数:12701~14700

定 价:39.00元

产品编号:053368-01

# 前言

## FOREWORD

本书第1版自2000年问世至今已有10余年的时间,已经重印8次。在这期间光纤理论和技术(包括光纤传输和传感)均已取得长足的进步。为此有必要对《光纤光学(第1版)》作必要的修改。

近10余年来,光纤领域的重要进展有两方面:光纤理论和光纤结构。由于光子晶体光纤的出现,使光纤传输理论翻开了新的一页:光波在光纤中传输时有禁带和导带;在较宽的波段可单模传输以及其他许多新的特性。至于光纤结构的进展,则是出现了构成光子晶体光纤的多孔/多层结构和用于光纤激光器的双包层光纤,它突破了仅由纤芯和包层,折射率为突变或渐变的常规结构。此外,分布式光纤传感器的出现,则是传感器领域的一个全新的传感器品种。对于这些进展,本版均有所反映,但对于光子晶体光纤的传输理论,由于内容太多、太深,已超出教学大纲要求,本版未涉及,读者可参考有关文献。

本版仍然保留第1版的主要特色: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,注重系统性与完整性。本书对公式的数学过程叙述从略,以突出对物理意义的阐述。对偏振特性和光纤传感的原理阐述较为详细;全面地介绍了各类特种光纤和光纤的测试方法,对于变折射率光纤作为成像元件在光纤系统中的应用进行了系统的论述,有助于读者在工作实践中正确地选用光纤。此外,书中也详尽地介绍了由光纤构成的各种有源和无源器件,以及各种光纤传感器。

本版修改部分主要包括:

(1) 编排次序有变。第2版仍为三部分,分别是光纤理论和特性:第1章光纤传输的基本理论;第2章光纤的特性;第3章光纤系统的损耗与光纤处理工艺。光纤技术和器件:第4章特种光纤;第5章光纤特征参数的测量;第6章光纤无源及有源器件。光纤应用:第7章光纤传输数据和图像;第8章光纤传感器。

(2) 内容有增删。第2章改写了2.4光纤的设计。第3章增加了3.4侧边抛磨光纤,3.5光纤的腐蚀,3.6光纤的改性。第4章增加了4.4红外光纤和紫外光纤,4.5荧光光纤,4.6聚合物光纤,4.7光子晶体光纤,4.8侧边抛磨光纤与金属化光纤,4.9单晶光纤,4.11双包层光纤,4.12多芯光纤,4.13微纳光纤。第5章增加了5.5.5偏振模式色散及其测量。第6章增加了6.4光纤旋转连接器,6.5光衰减器,6.6光缓存器,6.9.3大功率双包层光纤激光器,6.10光纤拉曼激光器与光纤布里渊激光器。第8章增加了8.7光纤荧光温度传感器,8.8分布式光纤传感器,8.9聚合物光纤传感器,8.10光子晶体光纤及其在传感中的应用,8.12光纤传感网络,并改写了8.13光纤传感技术的发展趋势及课题。

黎敏教授参加了本书第2版的全部修订工作。

在本书的修改过程中,不少教师和研究生提出了许多宝贵的意见,对此深表感谢。最后,还要感谢清华大学出版社的盛东亮编辑为本书的出版所做的悉心工作。

由于光纤光学技术发展迅猛,作者水平有限,书中难免存在疏漏,欢迎读者批评指正。

廖延彪

2013年7月于清华园

# 第1版前言

## FOREWORD

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较全面的介绍。

全书共有8章,可分为三部分: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纤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,注重系统性与完整性。

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波导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月于清华园

# 目录

## CONTENTS

<b>第 1 章 光纤传输的基本理论</b> .....	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 .....	12
1.4.3 模式 .....	14
1.4.4 模式场的纵、横向分量.....	15
1.5 均匀折射率光纤的波动理论.....	17
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 .....	21
1.5.4 电磁场分布图 .....	30
1.6 变折射率光纤的波动理论.....	32
1.6.1 引言 .....	32
1.6.2 平方律光纤的解析解 .....	33
1.6.3 级数近似解 .....	35
1.6.4 变折射率单模光纤的分析 .....	36



1.7	均匀折射率单模光纤的分析	38
1.7.1	引言	38
1.7.2	基本性质	38
1.7.3	功率分布	41
1.8	非正规光波导的模耦合方程	43
1.8.1	非正规光波导	43
1.8.2	非正规光波导的模耦合方程(矢量模耦合方程)	44
	思考题与习题	46
	参考文献	47
<b>第2章</b>	<b>光纤的特性</b>	<b>49</b>
2.1	引言	49
2.2	光纤的损耗	49
2.2.1	吸收损耗	49
2.2.2	散射损耗	51
2.3	光纤的色散	52
2.3.1	概述	52
2.3.2	模式色散	53
2.3.3	波长色散	53
2.4	光纤的设计	54
2.4.1	引言	54
2.4.2	多模光纤折射率分布的设计	54
2.4.3	单模光纤的设计	55
2.4.4	典型单模光纤的折射率分布	58
2.4.5	典型单模光纤性能	58
2.5	弹光效应	61
2.6	光纤中的双折射	65
2.6.1	纤芯的椭圆度引起的双折射	65
2.6.2	应力引起的双折射	65
2.6.3	弯曲引起的双折射	65
2.6.4	扭曲引起的双折射	67
2.6.5	外场引起的双折射	67
2.6.6	减小双折射影响的特殊措施	68
2.7	偏振光在光纤中的传输	68
2.7.1	偏振光的矩阵表示法——Jones 矢量法	68
2.7.2	Jones 矩阵法在光纤中的应用	70
2.7.3	单模光纤在外力作用下引起双折射效应的 Jones 矩阵	74

2.7.4	Poincaré 球图示法	76
2.8	光纤中的非线性效应	81
2.8.1	基本原理	81
2.8.2	自相位调制	84
2.8.3	光纤中的光孤子	86
2.8.4	交叉相位调制	88
2.8.5	受激拉曼散射	88
2.8.6	受激布里渊散射	90
2.8.7	四波混频	91
	思考题与习题	92
	参考文献	93
<b>第 3 章</b>	<b>光纤系统的损耗与光纤处理工艺</b>	<b>95</b>
3.1	光纤弯曲损耗	95
3.1.1	光纤的宏弯损耗	95
3.1.2	微弯引起的光纤损耗	96
3.2	光纤和光源的连接	97
3.2.1	半导体激光器和光纤的连接	98
3.2.2	半导体发光二极管和光纤的耦合	102
3.3	光纤和光纤的连接	102
3.3.1	光纤与光纤的固定连接	102
3.3.2	多模光纤和多模光纤的直接耦合	104
3.3.3	单模光纤和单模光纤直接耦合	107
3.4	侧边抛磨光纤	108
3.5	光纤的腐蚀	109
3.5.1	化学腐蚀法制作纳米光纤探针	109
3.5.2	影响腐蚀效果的因素	109
3.6	光纤的改性	110
3.6.1	掺杂效应	111
3.6.2	光敏效应	111
3.6.3	非线性效应——拉曼效应和布里渊效应	111
3.6.4	力学效应	111
3.6.5	热学效应	111
3.6.6	电磁效应	112
	思考题与习题	112
	参考文献	112
<b>第 4 章</b>	<b>特种光纤</b>	<b>114</b>
4.1	引言	114

07	4.2 变折射率光纤 .....	115
18	4.2.1 变折射率光纤棒的成像理论 .....	115
18	4.2.2 变折射率光纤棒的制造 .....	120
18	4.2.3 变折射率光纤棒的应用 .....	121
08	4.2.4 变折射率光纤棒的像差 .....	124
08	4.3 偏振保持光纤简介 .....	126
08	4.3.1 引言 .....	126
08	4.3.2 偏振保持光纤的结构类型 .....	127
10	4.4 红外光纤与紫外光纤 .....	127
00	4.4.1 概述 .....	127
00	4.4.2 氟化物与硫化物光纤 .....	128
00	4.4.3 空芯波导 .....	130
00	4.4.4 多晶红外光纤 .....	132
00	4.4.5 红外光纤的应用 .....	132
00	4.4.6 紫外光纤 .....	134
00	4.5 荧光光纤 .....	135
00	4.5.1 概述 .....	135
00	4.5.2 荧光光纤成分 .....	135
00	4.5.3 荧光光纤的光学性能 .....	136
00	4.5.4 荧光光纤的应用 .....	136
00	4.5.5 闪烁塑料光纤 .....	137
00	4.6 聚合物光纤 .....	137
00	4.6.1 概述 .....	137
00	4.6.2 聚光物光纤种类和材料 .....	138
00	4.6.3 聚合物光纤的特性 .....	139
00	4.6.4 聚合物光纤器件及应用 .....	141
00	4.7 光子晶体光纤 .....	141
00	4.7.1 概述 .....	141
00	4.7.2 光子晶体光纤的类型、材料与制作 .....	142
00	4.7.3 光子晶体光纤的特性 .....	143
00	4.7.4 光子晶体光纤的应用 .....	145
00	4.8 侧边抛磨光纤与金属化光纤 .....	146
00	4.8.1 侧边抛磨光纤的制备 .....	146
00	4.8.2 金属化光纤 .....	146
00	4.9 单晶光纤 .....	147
00	4.9.1 概述 .....	147
00	4.9.2 材料 .....	147
00	4.9.3 单晶光纤的特性与应用 .....	147
00	4.10 增敏和去敏光纤 .....	149

4.10.1	对辐射的增敏和去敏光纤	149
4.10.2	磁敏光纤	150
4.11	双包层光纤	150
4.12	多芯光纤	152
4.13	微纳光纤	153
	思考题与习题	154
	参考文献	155
<b>第5章</b>	<b>光纤特征参数的测量</b>	<b>156</b>
5.1	引言	156
5.1.1	光纤测量的内容与特点	156
5.1.2	光纤测量的方法	156
5.1.3	光纤测量仪器	157
5.2	损耗测量	158
5.2.1	光纤损耗的测量	158
5.2.2	光纤器件的插损测量	160
5.2.3	谱损的测量	161
5.2.4	反射损耗的测量	162
5.3	模场直径测量	162
5.3.1	模场直径定义	162
5.3.2	测量方法	163
5.4	截止波长及其测量	164
5.4.1	截止波长的定义	165
5.4.2	传导功率法	166
5.4.3	模场直径法	167
5.4.4	替代法	167
5.5	色散测量	168
5.5.1	测量原理	168
5.5.2	相移法	169
5.5.3	干涉法	169
5.5.4	基带测量	171
5.5.5	偏振模色散及其测量	173
5.6	折射率分布、几何尺寸与最大理论数值孔径的测量	176
5.6.1	折射近场法	176
5.6.2	近场扫描法	177
5.6.3	几何尺寸的测量	179
5.6.4	最大理论数值孔径的测量	179
5.7	高双折射光纤拍长的测量	180
	思考题与习题	181

参考文献	182
<b>第6章 光纤无源及有源器件</b>	<b>183</b>
6.1 引言	183
6.2 光纤耦合器、环行器与光波分复用器	184
6.2.1 熔锥型单模光纤光分/合路连接器	184
6.2.2 磨抛型单模光纤定向耦合器	187
6.2.3 光环行器	188
6.2.4 光波分复用器(WDM)	190
6.3 光开关、光纤滤波器与光纤调制器	190
6.3.1 概述	190
6.3.2 光开关原理	191
6.3.3 光纤调制器	192
6.3.4 光纤滤波器	194
6.4 光纤旋转连接器	197
6.4.1 光纤旋转连接器的工作原理	197
6.4.2 光纤旋转连接器的基本结构	197
6.5 光衰减器	199
6.5.1 光衰减器原理、分类与基本结构	199
6.5.2 全光纤热光型可变光衰减器	199
6.6 光缓存器	201
6.7 光纤偏振器件	203
6.7.1 光纤偏振控制器	203
6.7.2 保偏光纤偏振器	203
6.7.3 光纤隔离器	204
6.8 光纤光栅	205
6.8.1 引言	205
6.8.2 光纤光栅的分类	206
6.8.3 光纤 Bragg 光栅的理论模型	208
6.8.4 均匀周期正弦型光纤光栅	209
6.8.5 非均匀周期光纤光栅	211
6.8.6 光纤光栅的写入方法简介	213
6.9 掺杂光纤激光器与放大器	214
6.9.1 掺杂光纤激光器	214
6.9.2 光纤放大器	218
6.9.3 大功率双包层光纤激光器	219
6.10 光纤拉曼与光纤布里渊激光器	222
6.10.1 光纤拉曼激光器与放大器	222
6.10.2 光纤布里渊激光器与放大器	222

思考题与习题	224
参考文献	225
<b>第 7 章 光纤传输数据和图像</b>	227
7.1 概述	227
7.2 光纤通信	227
7.3 光纤传输距离的估算	228
7.3.1 光纤的损耗	228
7.3.2 光纤的色散	230
7.3.3 色散对光纤传输的影响	231
7.4 光纤传光束	232
7.5 光纤传像束	232
7.5.1 概述	232
7.5.2 光纤传像束的结构	233
7.5.3 光纤传像束的性能	234
7.5.4 应用	235
思考题与习题	235
参考文献	236
<b>第 8 章 光纤传感器</b>	237
8.1 概述	237
8.1.1 光纤传感器的定义及分类	237
8.1.2 光纤传感器的特点	238
8.2 振幅调制传感型光纤传感器	238
8.2.1 光纤微弯传感器	239
8.2.2 光纤受抑全内反射传感器	240
8.2.3 光纤辐射传感器	241
8.3 振幅调制型光纤传感器的补偿技术	242
8.3.1 双波长补偿法	242
8.3.2 旁路光纤监测法	243
8.3.3 光桥平衡补偿法	243
8.4 相位调制传感型光纤传感器	243
8.4.1 引言	243
8.4.2 Mach-Zehnder 光纤干涉仪和 Michelson 光纤干涉仪	244
8.4.3 Sagnac 光纤干涉仪	245
8.4.4 光纤 Fabry-Perot 干涉仪	247
8.4.5 光纤环形腔干涉仪	251
8.4.6 白光干涉型光纤传感器	252
8.4.7 外界压力对光纤干涉仪的影响	255

8.4.8	温度对光纤干涉仪的影响 .....	258
8.4.9	光纤干涉仪的传感应用 .....	259
8.5	偏振态调制型光纤传感器 .....	259
8.5.1	光纤电流传感器 .....	259
8.5.2	双折射对光纤传感的影响 .....	262
8.5.3	光纤偏振干涉仪 .....	263
8.6	波长调制型光纤传感器 .....	264
8.6.1	引言 .....	264
8.6.2	光纤布喇格光栅应变传感模型 .....	264
8.6.3	光纤布喇格光栅温度传感模型分析 .....	269
8.6.4	光纤布喇格光栅在光纤传感领域中的典型应用 .....	270
8.6.5	长周期光纤光栅在传感领域的应用 .....	272
8.6.6	光纤光栅折射率传感技术 .....	273
8.6.7	LPG 马赫-泽德干涉仪折射率传感器 .....	275
8.7	光纤荧光温度传感器 .....	275
8.7.1	光纤荧光温度传感原理 .....	275
8.7.2	荧光寿命测温 .....	276
8.7.3	荧光强度比测温 .....	276
8.7.4	荧光传感材料 .....	277
8.7.5	荧光测温系统在工业领域的应用 .....	278
8.8	分布式光纤传感器 .....	278
8.8.1	概述 .....	278
8.8.2	散射型分布式光纤传感器 .....	280
8.8.3	偏振型和相位型分布式光纤传感器 .....	280
8.9	聚合物光纤传感器 .....	281
8.10	光子晶体光纤及其在传感中的应用 .....	281
8.10.1	光子晶体光纤用于气体检测 .....	282
8.10.2	基于孔内光和物质相互作用的其他传感器 .....	283
8.10.3	特种光子晶体光纤与传感 .....	283
8.10.4	掺杂的微结构聚合物光纤传感器 .....	285
8.11	传光型光纤传感器 .....	286
8.11.1	振幅调制传光型光纤传感器 .....	286
8.11.2	相位调制传光型光纤传感器 .....	288
8.11.3	偏振态调制传光型光纤传感器 .....	289
8.12	光纤传感网络 .....	290
8.12.1	可用于构成光传感网的传感器 .....	291
8.12.2	成网技术 .....	291
8.13	光纤传感技术的发展趋势及课题 .....	295
	思考题与习题 .....	295
	参考文献 .....	297

# 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。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( $\Delta=0.005\sim 0.01$ )。



图 1.1.1 单根光纤结构简图

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。前者纤芯折射率均匀,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)和图 1.1.2(c)分别是多模阶跃折射率光纤和梯度折射率光纤。

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;只能传输两正交线偏振模式、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者为低双折射光纤;能传输圆偏振光的则称为圆双折射



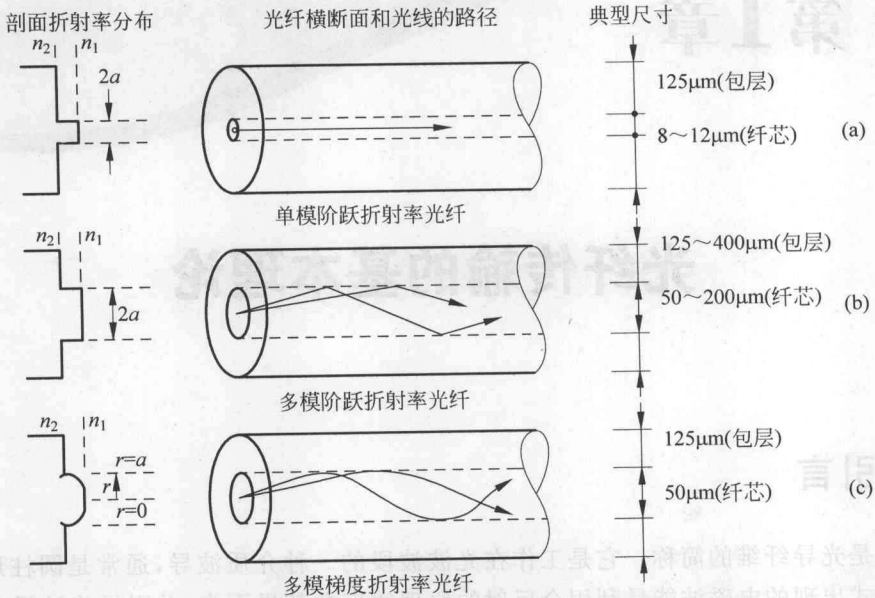


图 1.1.2 单模和多模光纤结构示意图

光纤。

按制造光纤的材料可分为：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 0.2dB/km，一般均小于 1dB/km；②多组分玻璃纤维，其特点是芯-皮折射率在较大范围内变化，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 1dB/m，比石英光纤要大几百倍；③塑料光纤，其特点是成本低，折射率可变范围大，易于掺杂，以满足不同使用要求，缺点是传输损耗大，温度性能较差；④红外光纤，其特点是可透过近红外(1~5μm)或中红外(~10μm)的光波，缺点是传输损耗大；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。⑦光子晶体光纤，这是近十年出现的一个光纤的新品种。它具有许多特殊的光传输特性。

分析光波在光波中传播性有两种基本方法：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都在同一平