



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

光学工程

P rinciple and Application of Optical Fiber
(Second Edition)

光纤光学

原理及应用 (第二版)

张伟刚 编著
Zhang Weigang



清华大学出版社



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

Principle and Application of Optical Fiber
(Second Edition)

光纤光学

原理及应用

(第二版)

张伟刚 编著
Zhang Weigang



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以经典电磁场理论和近代光学为基础,系统论述了光纤光学的基本原理、传输特性、设计方法、实现技术及主要应用。全书共12章,具体内容包括:光纤光学的基本概念、重要参数、光学及物化特性,光波在均匀光纤和渐变光纤中传输的光线理论和波动理论,单模光纤、微结构光纤的分类、特性、分析方法及典型设计,典型的光纤无源和有源器件分析、设计及器件发展分析,光纤光栅基本概念、关键因素、基本理论以及典型应用,光纤器件的设计方法和强度型、干涉型及微结构器件的研制,代表性特种光纤及其应用,光纤技术及其发展在通信和传感领域的典型应用,光纤拉制、处理及器件研制新技术,光纤特征参数测量方法及应用;光纤非线性效应理论及其典型应用等。

本书体系内容具有创新性,理论与应用并重,引入科研方法,吸纳最新成果(包括作者本人及合作者的科研成果),各章附小结、思考与习题。本书可作为高等学校光电子、激光、光学仪器、物理学、信息与通信技术等专业研究生和本科生教材,也可作为从事光纤通信和光纤传感技术的工程技术人员和其他相关专业人员的参考书。

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

光纤光学原理及应用/张伟刚编著. —2版. —北京:清华大学出版社,2017

(高等学校电子信息类专业系列教材)

ISBN 978-7-302-47801-0

I. ①光… II. ①张… 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(2017)第 168950 号

责任编辑:刘向威 战晓雷

封面设计:李召霞

责任校对:李建庄

责任印制:王静怡

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

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:20.75

字 数:503千字

版 次:2012年9月第1版 2017年11月第2版

印 次:2017年11月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:49.00元

产品编号:070660-01

第二版前言

FOREWORD

《光纤光学原理及应用》自 2012 年 9 月第 1 版出版以来,已在南开大学等高校作为教材使用了 10 个学期。本书的编著与出版也是科研成果转化为教材内容、科研与教学有机结合的一种有益尝试。在多年的光纤光学教学实践中,我们不断向学界前辈请教并与同行密切交流,也得到了专业教师、高校学生以及相关领域科技工作者的诸多关心和大力支持,使得本书内容不断充实和提高,作者在此深表敬意和感谢!

作者应清华大学出版社的邀请,根据学科发展和教材实际需求,在吸纳相关意见和建议的基础上,对《光纤光学原理及应用》进行修改再版。与第 1 版相比,第 2 版在纲目设计、篇章内容、典型实例、应用分析等方面进行了重新梳理、调整和补充,形成了全新的体系和结构,力求突出“体系内容创新、理论应用并重、引入科研方法、吸纳最新成果”的新特色,为读者提供最新的科研案例及研究思路,促进光纤光学领域的课题研究以及专业学习绩效的提高。本书第 2 版有关修改内容简述如下:

(1) 将第 1 版的 10 章增加为 12 章,增加的两章分别为“微结构光纤特性及分析”和“光纤器件设计及研制”;同时,第 2 版调整了章节顺序,使其知识体系符合内在的逻辑自洽性。

(2) 根据新的纲目设计对部分篇章内容进行了调整,如将第 1 版“第 7 章 光纤技术及其应用”的“7.4 典型光纤传感器”和“7.5 特种光纤及其应用”调整为第 2 版“第 9 章 光纤器件设计及研制”的“9.3 典型光纤器件研制”和“9.4 特种光纤及其应用”。

(3) 根据第 2 版“第 10 章 光纤技术及其应用”的需要,增加了“10.4 光纤新技术简介”,从光纤拉制、光纤处理和光纤器件研制 3 个角度简要介绍了光纤新技术。

(4) 根据第 2 版的章节编排需要,增加了器件图片及实例分析,并引入专业科研设计和分析方法,以促进读者发现问题、分析并解决问题能力的提升。

(5) 光纤光学技术涉及较多专业缩略语,为行文简便,本书将相关缩略语在书后统一给出,而不在正文中一一注出其英文原形。

(6) 第 2 版的内容面向不同层面的读者,试图满足对光纤光学的专业知识学习、科研方法掌握、光纤课题研究以及工程应用实践等的不同需求,并努力使各方(如专业教师、高校学生以及相关领域科技工作者、科技管理人员等)学习或参考后均能有所裨益。

(7) 第 2 版对主要参考文献和英文缩略语进行了增补,对行文中的不当表述及插图进行了删减、更正和补充。

第 2 版全书共 12 章,第 1 章介绍光纤光学的基本概念、重要参数、光学及物化特性,第 2 章阐述光纤光学的基本理论及其分析思路,第 3 章和第 4 章分别阐述均匀、渐变光纤的光线理论和波动理论分析及典型应用,第 5 章阐述均匀、渐变单模光纤的性质及分析方法,第 6 章阐述微结构光纤的结构、特点、分类、方法及典型设计,第 7 章阐述典型的光

纤无源和有源器件设计及应用,第8章阐述光纤光栅基础知识、基本理论以及典型应用,第9章阐述光纤器件的设计步骤、设计方法、研制过程以及代表性的特种光纤及其应用,第10章阐述光纤技术在通信和传感领域的应用并简介光纤新技术,第11章阐述光纤特征参数的测量方法及其应用,第12章阐述光纤非线性效应理论及其典型应用。

本书的修订和增补工作全部由作者负责,并得到教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会重点项目“将科研方法引入光电信息专业课程的研究性教学方法探索与实践”的资助。在修改再版过程中,得到了清华大学出版社刘向威博士的大力支持,南开大学严铁毅副教授协助整理了补充资料,北京大学张严昕提出修改意见并校对全书,作者的学生耿鹏程、陈雷、王标、李晓兰、白志勇、高社成、王丽、王松、张芸山、于琳、魏石磊、薛晓琳、周权、张莉瑜、李新宇、李艳萍等以及参加本课程学习的同学提供了有益建议,在此一并表示衷心感谢。

限于作者水平,书中可能存在不足之处,敬请读者批评指正。

张伟刚

2017年5月于南开园

第一版前言

FOREWORD

“光纤光学”名称始见于 20 世纪 50 年代,它是一门研究光波在光纤中传输及变换特性的科学,属于光学的分支学科。光纤是一种圆柱形光波导。20 世纪 70 年代低损耗光纤的问世,为光纤光学这门新兴交叉科学的发展提供了难得的机遇。光纤作为新型的光波传输介质,具有优良的物理、化学、机械等性能,在现代光通信和光传感发展中具有举足轻重的地位,并在工农业生产、科学研究、国防安全、空间技术等领域得到了广泛应用。伴随着光纤技术的迅速发展,各种类型的光纤以及新型光纤器件不断出现,使光纤光学的内容愈来愈丰富,并为这一分支的科学研究和技术应用开辟了更加广泛的领域。

本书侧重介绍常规光纤的基本理论及实际应用,并根据实际需要对新型光纤(特别是微结构光纤)进行必要的阐述,对光纤光学的原理及应用作较为全面的介绍,同时反映最新的光纤光学研究成果。全书共 10 章,以经典电磁场理论和近代光学为基础,系统论述光纤光学的基本原理、传输特性、设计方法、实现技术以及主要应用。第 1 章介绍光纤光学的基本概念、重要参数、光学及物化特性。第 2 章阐述光纤光学的基本理论及其分析思路。第 3 章和第 4 章讲述均匀、渐变光纤的光线理论和波动理论分析方法及典型应用。第 5 章阐述均匀、渐变单模光纤的性质及分析方法。第 6 章阐述典型的光纤无源和有源器件设计及应用。第 7 章阐述光纤技术在通信和传感领域的应用以及典型的特种光纤及其应用。第 8 章阐述光纤光栅基础知识、基本理论以及典型应用。第 9 章阐述光纤特征参数的测量方法及其应用;第 10 章阐述光纤非线性效应理论及其典型应用。

本书是作者在多年从事光纤光学科研与教学工作的基础上编写而成的,并得到国家科技部 863 计划项目(2002AA313110)、国家自然科学基金(11274181、10974100、10674075、60577018)、高等学校博士学科点专项科研基金(20120031110033)及天津市自然科学基金(15JCZDJC39800、10JCZDJC24300)的资助。全书基本概念明晰,理论与应用并重,体系有所创新,内容系统全面,注意吸纳国内外最新研究成果(也包括作者本人及合作者承担的国家 863 计划课题和国家自然科学基金的最新科研成果),可以满足高等学校光电子、激光、光学仪器、物理学、信息与通信技术等专业的高年级本科生和研究生的教学需要,也可供从事光纤通信和光纤传感技术的工程技术人员和其他相关人员参考。

在本书编写过程中,作者参考、吸纳了国内外有关的研究成果,书稿整理得到了严铁毅副教授的全力协助,作者的学生在资料收集、研究实例、思考习题、图形绘制、书稿校对等方面给予了帮助,他们是:姜萌、涂勤昌、刘海涛、刘长军、李婧、张绮、刘亚萍、林锦海、张春艳、刘卓琳、李晓兰、张珊珊、耿鹏程、殷丽梅、薛晓琳、严肃源、梁鸽、李杰良、崔治权等,作者在此

一并表示感谢。参加课程学习的学生也提供了有益的建议。本书出版得到了清华大学盛东亮、刘向威编辑的热情支持,在此表示衷心感谢。

限于作者水平,书中可能存在不足之处,敬请批评指正。

张伟刚

2012年7月于南开园

目录

CONTENTS

第 1 章 光纤光学基础	1
1.1 引言	1
1.2 光纤基本结构及分类	2
1.2.1 光纤基本结构	2
1.2.2 光纤典型分类	2
1.2.3 光纤拉制简介	5
1.3 光纤的重要参量	9
1.3.1 光纤的数值孔径	9
1.3.2 光纤的相对折射率差	10
1.3.3 光纤的归一化频率	10
1.4 光纤的光学与物化特性	10
1.4.1 光纤的特征参数	10
1.4.2 光纤的光学特性	10
1.4.3 光纤的物化特性	14
小结	15
思考与习题	15
第 2 章 光纤光学的基本理论	17
2.1 引言	17
2.2 光纤的光线理论	18
2.2.1 程函方程	18
2.2.2 光线方程	20
2.2.3 光线方程的应用	21
2.3 光纤的波动理论	23
2.3.1 麦克斯韦方程组	23
2.3.2 波动方程	23
2.3.3 亥姆霍兹方程	24
2.3.4 波导场方程	25
2.3.5 波导场的场解	26
小结	29
思考与习题	29
第 3 章 光纤的光线理论分析	31
3.1 引言	31
3.2 均匀光纤的光线理论分析	31

3.2.1	均匀光纤中的光线种类	31
3.2.2	子午光线的传输分析	32
3.2.3	偏斜光线的传输分析	34
3.2.4	弯曲光纤的光线传输分析	35
3.2.5	斜端面光纤的光线传输分析	38
3.2.6	圆锥形光纤的光线传输分析	39
3.3	渐变光纤的光线理论分析	41
3.3.1	渐变光纤中的光线种类	41
3.3.2	渐变光纤的光线方程	41
3.3.3	渐变光纤的子午光线分析	42
3.3.4	渐变光纤的螺旋光线分析	43
	小结	44
	思考与习题	44
第4章	光纤的波动理论分析	46
4.1	引言	46
4.2	均匀光纤的波动理论分析	46
4.2.1	径向场方程	46
4.2.2	本征解选取	47
4.2.3	模式及分类	50
4.2.4	模式本征值	50
4.2.5	色散曲线与单模条件	53
4.2.6	弱导光纤与线偏振模	54
4.2.7	均匀光纤电磁场分布	57
4.3	渐变光纤的波动理论分析	60
4.3.1	基本方程	61
4.3.2	平方律解析法	61
4.3.3	WKB 分析法	62
4.3.4	级数近似法	63
	小结	65
	思考与习题	66
第5章	单模光纤的性质及分析	67
5.1	引言	67
5.2	均匀单模光纤分析	68
5.2.1	模场精确分析	68
5.2.2	模场近似分析	72
5.2.3	功率分布分析	73
5.3	渐变单模光纤分析	74
5.3.1	等效阶跃型光纤法	74
5.3.2	等效平方律光纤法	77
5.4	单模光纤的双折射	79
5.4.1	光纤双折射类型	79
5.4.2	典型本征双折射	80
5.4.3	典型感应双折射	80

小结	82
思考与习题	83
第 6 章 微结构光纤特性及分析	84
6.1 引言	84
6.2 微结构光纤分类及特性	84
6.2.1 微结构光纤导光机制	84
6.2.2 微结构光纤典型分类	86
6.2.3 微结构光纤特性分析	87
6.3 微结构光纤典型分析方法	91
6.3.1 有效折射率模型	91
6.3.2 全矢量分析模型	93
6.3.3 典型全矢量分析法	94
6.4 微结构光纤设计分析	102
6.4.1 类六边形空孔带隙可调 MSF	102
6.4.2 双波段一维单偏振单模 MSF	104
6.4.3 双波段二维单偏振单模 MSF	108
小结	110
思考与习题	110
第 7 章 光纤无源和有源器件	112
7.1 引言	112
7.2 光纤无源器件分析	112
7.2.1 光纤耦合器	112
7.2.2 光纤偏振器	119
7.2.3 光纤滤波器	122
7.2.4 光纤隔离器	125
7.2.5 光纤衰减器	125
7.2.6 光纤开关	126
7.2.7 光纤连接器	126
7.3 光纤有源器件分析	127
7.3.1 光纤激光器	128
7.3.2 光纤放大器	129
7.4 光纤器件发展分析	132
7.4.1 光纤无源器件发展分析	132
7.4.2 光纤有源器件发展分析	133
7.4.3 光纤器件技术研究方向	135
小结	136
思考与习题	137
第 8 章 光纤光栅及其应用	138
8.1 引言	138
8.2 光纤光栅基础	139
8.2.1 光纤光栅基本类型	139
8.2.2 折射率分布与反射谱	140

8.2.3	光纤光栅制作技术	143
8.3	光纤光栅理论	147
8.3.1	光纤光栅典型理论	147
8.3.2	光纤光栅基本性质	150
8.3.3	传感解调关联理论	152
8.4	光纤光栅应用	158
8.4.1	光纤光栅在通信领域的应用	158
8.4.2	光纤光栅在传感领域的应用	161
8.4.3	光纤光栅及器件的研究方向	171
	小结	172
	思考与习题	173
第9章	光纤器件设计及研制	175
9.1	引言	175
9.2	光纤器件设计方法	176
9.2.1	基本设计思想	176
9.2.2	主要设计步骤	176
9.2.3	典型设计方法	180
9.3	典型光纤器件研制	184
9.3.1	光纤器件加工	184
9.3.2	强度型器件研制	184
9.3.3	干涉型器件研制	192
9.3.4	微结构器件研制	198
9.4	特种光纤及其应用	202
9.4.1	掺杂光纤及其应用	202
9.4.2	塑料光纤及其应用	203
9.4.3	红外光纤及其应用	204
9.4.4	紫外光纤及其应用	204
9.4.5	敏化光纤及其应用	205
	小结	206
	思考与习题	207
第10章	光纤技术及其应用	208
10.1	引言	208
10.2	光纤通信技术	208
10.2.1	光纤通信原理	208
10.2.2	光纤通信系统	209
10.2.3	多信道复用技术	214
10.2.4	全光纤通信系统	216
10.2.5	光纤通信网	218
10.3	光纤传感技术	221
10.3.1	光纤传感原理	221
10.3.2	光纤传感器建模	222
10.3.3	光纤传感器	225
10.3.4	光纤传感网	226

10.4 光纤新技术简介	232
10.4.1 光纤拉制新技术	232
10.4.2 光纤处理新技术	234
10.4.3 光纤器件研制新技术	237
小结	238
思考与习题	239
第 11 章 光纤特征参数的测量	241
11.1 引言	241
11.2 光纤测量常用仪器	242
11.2.1 光源	243
11.2.2 光纤熔接机	247
11.2.3 光谱分析仪	248
11.2.4 光功率计	248
11.2.5 光波长计	249
11.2.6 光时域反射计	251
11.3 光纤几何参数测量	252
11.3.1 几何特征参数	252
11.3.2 测量注入条件	253
11.3.3 典型测量方法	254
11.4 光纤折射率分布测量	255
11.4.1 折射近场法	256
11.4.2 近场扫描法	257
11.5 光纤数值孔径测量	258
11.5.1 远场强度有效数值孔径	259
11.5.2 典型测量方法	259
11.6 光纤衰减测量	260
11.6.1 光纤衰减机理	260
11.6.2 典型测量方法	261
11.7 光纤色散测量	263
11.7.1 光纤色散机理	263
11.7.2 典型测量方法	263
11.8 光纤模场直径测量	265
11.8.1 模场直径定义	265
11.8.2 典型测量方法	266
11.9 高双折射光纤拍长测量	267
11.9.1 光纤拍长定义	267
11.9.2 典型测量方法	269
小结	274
思考与习题	274
第 12 章 光纤非线性效应及其应用	276
12.1 引言	276
12.2 光纤非线性效应	276
12.2.1 光纤的非线性效率	276

12.2.2	光纤的非线性特性	277
12.3	光脉冲传输方程	283
12.3.1	非线性介质中的波动方程	283
12.3.2	分析法推导光脉冲传输方程	284
12.3.3	因素法推导光脉冲传输方程	288
12.3.4	光脉冲传输方程的简化形式	291
12.4	光纤光孤子及其应用	292
12.4.1	光纤中的光孤子	292
12.4.2	光纤中光孤子的传输	295
12.4.3	光孤子通信关键技术	298
12.4.4	光孤子通信应用展望	300
小结		304
思考与习题		304
参考文献		306
附录 A 英文缩略语		309

本章首先阐述光纤的基本概念,并归纳出有关光纤光学的一些基本问题和基础知识要点,然后介绍光纤的基本结构和分类,并描述光纤的 3 个重要参量,最后阐述光纤的光学特性和物化特性。

1.1 引言

光纤(OF)是在 20 世纪 70 年代问世的。光纤是光导纤维的简称,是一种圆柱形光波导。光纤光学是一门研究光波在光纤中传输及变换特性的科学。光纤作为新型的光波传输介质,由于具有优良的物理、化学、机械等性能,在现代光通信和光传感发展中具有举足轻重的地位,并在工农业生产、科学研究、国防安全、空间技术等领域得到了广泛应用。目前,新型光纤无论结构上还是性能上都与早期的光纤有很大的不同,特别是塑料光纤(PF)及微结构光纤(MSF)的出现,更是在光纤技术领域引起了新的变革。各种新型光纤的不断出现为光纤的科学研究和技术应用开辟了更加广泛的领域,同时也为光纤光学这门新兴交叉学科的发展提供了难得的机遇。本书侧重介绍常规光纤(GF,亦称传统光纤)的基本理论及实际应用,并根据实际需要新型光纤(特别是微结构光纤)进行必要的阐述。在后续章节中,如无特殊说明,书中“光纤”一词均指常规光纤。

光波在光纤中的传输有如下特点:一是光波能量以电磁波的形式在光纤内部或表面沿其轴向传输,二是光波以全反射原理或其他机理(如光子带隙等)被约束在光纤界面内,三是光波的传输特性由光纤的结构和材料特性所决定。光纤光学的理论与实验研究所涉及的基本问题是:光波是如何进入光纤的?光波如何在光纤中传输?光波又怎样在光纤中进行变换?具体而言,包括如下一些基本问题:

- (1) 光波入射——光纤模式的激励。
- (2) 光波传输——模式分布与输出。
- (3) 光波变换——模式耦合与约束。

研究光纤光学的目的就是要通过对光纤中光波的传输及变换特性进行理论探索和实验分析,为光纤技术的研发及应用奠定理论基础并提供技术支持。

与其他任何光波导的研究类似,学习光纤光学首先要了解光纤的一些基础知识。具体而言,本章主要阐述以下几个方面的问题:

- (1) 光纤的基本结构。介绍光纤的几何结构、材料组分以及折射率分布规律等。

- (2) 光纤的分类方式。阐述光纤的分类原则,给出几种典型的分类方法。
- (3) 光纤的可能用途。根据光纤的具体分类,概要介绍光纤的可能用途。
- (4) 光纤的拉制方法。介绍石英光纤的拉制过程;简介塑料光纤和微结构光纤的拉制过程。
- (5) 光纤的重要参量。阐述光纤的3个重要参量(数值孔径、相对折射率差和归一化频率)。
- (6) 光纤的光学特性。阐述光纤的两个重要光学特性(损耗和色散)。
- (7) 光纤的物化特性。阐述典型光纤的物理和化学特性。

1.2 光纤基本结构及分类

1.2.1 光纤基本结构

石英光纤是常规光纤的代表,其主要成分是二氧化硅(SiO_2),由纤芯、包层、涂覆层组成。图1.1为光纤端面图, a 、 b 分别为纤芯和包层的半径。光纤纤芯的折射率较高,主要成分为掺杂二氧化锗(GeO_2)的二氧化硅(SiO_2),掺杂的目的是为了提高纤芯的折射率,纤芯直径一般为 $5\sim 50\mu\text{m}$;包层折射率略低于纤芯的折射率,成分一般为纯二氧化硅,包层直径标准值为 $125\mu\text{m}$;涂覆层为环氧树脂、硅橡胶等高分子材料,其外径约 $250\mu\text{m}$,涂覆的目的在于增强光纤的机械强度和柔韧性。

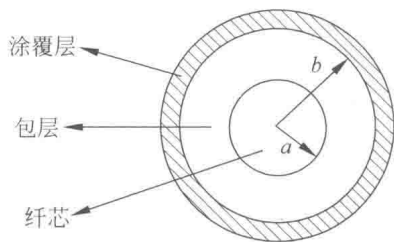


图 1.1 光纤端面结构示意图

1.2.2 光纤典型分类

1.2.2.1 光纤的一般分类

一般而言,光纤可分为两大类:一类是通信用光纤,另一类是非通信用光纤。前者主要用于各种光纤通信系统中,后者则在光纤传感、光纤信号处理、光纤测量及各种常规光学系统中广为应用。对于通信用光纤,在其系统工作波长处需满足低损耗、宽频带(即大容量)以及元器件(如光源、探测器和光无源器件)之间的高效率耦合等要求。同时,亦要求光纤具有良好的机械稳定性、低廉的成本和环境适应性等。对于非通信用光纤,通常要求具有特殊的性能(如高双折射、高非线性及高敏感性等),而在其他方面的要求则相应降低。

1.2.2.2 根据折射率分布特征分类

根据横截面上折射率的径向分布特征,可以将光纤大致地分为阶跃型和渐变型(亦称梯度型)两类。阶跃型光纤(SIF)的折射率分布特征是在纤芯与包层的交界面上发生跃变,其一般表达式为

$$n = \begin{cases} n_1 & 0 \leq r \leq a \\ n_2 & a < r \leq b \end{cases} \quad (n_1 > n_2) \quad (1.1)$$

式中, r 为光纤的径向坐标, a 为纤芯半径, b 为包层半径,纤芯和包层的折射率 n_1 和 n_2 均为

常数,在 $r=a$ 处折射率呈阶跃式变化。

渐变型光纤(GIF)的折射率分布特征是从纤芯开始随半径增大而有规律地减小,具有自聚焦性质。其一般表达式为

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \cdot f\left(\frac{r}{a}\right)} & 0 \leq r \leq a \\ n_2 & a < r \leq b \end{cases} \quad (n_1 > n_2) \quad (1.2)$$

式中,函数 f 满足 $f(r/a) \leq f(1) = 1$,一般可取 $f(r/a) = (r/a)^g$ 。 Δ 为光纤的相对折射率差,与 n_1 和 n_2 有关, $n_2 = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta}$,且 $\Delta \ll 1$ 。 g 为折射率分布参数,它决定了折射率分布曲线的形状。当 $g = \infty$ 时,即为阶跃折射率分布光纤;当 $g = 2$ 时,称为平方分布(或抛物线分布)光纤;当 $g = 1$ 时,为三角分布光纤。

1.2.2.3 根据光纤中模式数目分类

光波在光纤中传输时,由于纤芯边界限制,满足边界条件的电磁场解是不连续的,这种不连续的场解称为模式。模式是光纤中光波传输的一种极为重要的特性,直观上可以将模式看成光场在光纤截面上的一种分布图,其严格意义将在第2章讨论。当光纤中只允许一个模式传输时,为单模光纤(SMF);当光纤中允许两个或更多的模式传输时,则为双模或多模光纤(MMF)。

在光纤中允许存在的模式数目可由下式来估算:

$$M = \frac{g}{2(g+2)} V^2 \quad (1.3)$$

式中, V 称为光纤归一化频率,其定义和意义将在 1.3.3 节阐述; g 为折射率分布参数,意义同上。当 V 很大时,光纤中可以传输几十甚至几百个模式;当 V 很小时,则只允许少数几个或单个模式传输。在阶跃光纤中,若 $V < 2.405$,则它只能容纳单模,称为主模或基模。

根据国际电信联盟电信标准局(ITU-T)的有关标准,标准光纤外径统一为 $125\mu\text{m}$ 。单模光纤和多模光纤的主要区别在于芯径尺寸,单模光纤的芯径约为 $10\mu\text{m}$,而多模光纤的芯径约为 $50\mu\text{m}$ 。图 1.2 为多模阶跃光纤、多模渐变光纤和单模阶跃光纤的对比。

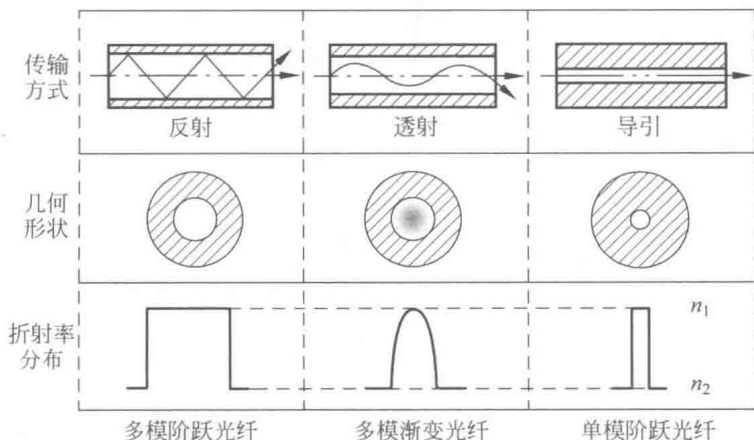


图 1.2 多模阶跃光纤、多模渐变光纤和单模阶跃光纤的对比

1.2.2.4 根据传输的偏振态分类

根据传输的偏振态,单模光纤又可进一步分为偏振保持光纤(即保偏光纤)和非偏振保持光纤(即非保偏光纤),二者的差异在于能否传输偏振光。保偏光纤(PMF)又可再分为单偏振光纤(只能传输一种偏振模式的光波)、高双折射光纤(只能传输正交偏振模式且其传输速度相差很大的光波)、低双折射光纤(只能传输正交偏振模式且其传输速度近于相等的光波)和圆保偏光纤(能传输圆偏振光波)4种。

1.2.2.5 根据光纤材料及结构分类

目前,光纤在传输领域的应用已经发展到了一个相当完善的阶段。工作波长在 $0.85\mu\text{m}$ 、 $1.31\mu\text{m}$ 和 $1.55\mu\text{m}$ 处的衰减已接近理论极小值。单模光纤因质量较高、价格便宜,目前已成为光纤通信与传感的首选。而根据光纤材料及结构分类的光纤更是种类繁多,不胜枚举。以下是一些典型实例。

- 石英光纤(QF),即通信用光纤,通常在其中掺杂锗、五氧化二磷或氧化硼以形成必要的折射率差来进行光传导。
- 多芯光纤(MCF),指由两个及以上纤芯组成的光纤。多个纤芯对外界的物理敏感性不一致,可用于弯曲、二维或三维应力及位移的矢量感测。
- 红外光纤(IF),其特点是可传输大功率光能,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。红外光纤可分为玻璃红外光纤、晶体红外光纤和空芯红外光纤3类。一般而言,制造前两类光纤有一定困难。
- 有源光纤(AF),即纤芯是利用具有增益激活材料制作的光纤。这种光纤在外光源泵浦下可输出激光或对外来微弱光信号进行直接光放大,常用于激光传感器的设计与研制,如环形腔和F-P腔激光器,其精细度高达300。
- 增敏光纤(SF),即通过增强光纤的磷光、电光或温度效应,使光波特征参数对外界作用(如磁场、电流、温度、压力、转速等)的敏感性增强。该光纤可构成各种灵敏的光纤传感系统。
- 液芯光纤(LCF),指在光纤芯中充入某种特殊液体而制成的光纤,其芯径较粗。该光纤适用于对结构体材料内部裂痕及断裂的监测。
- 发光光纤(FF),指采用磷光体、发光晶体以及其他发光材料制成的光纤,可用于探测X射线、高能粒子以及其他带电粒子。
- 塑料光纤(PF),亦称聚合物光纤,具有相对较高的损耗,在短波长使用时损耗更大。该光纤只适合在接近室温和短距离传输的条件下运行,具有坚固、不易断裂等优点。塑料光纤可用于光纤位移(或曲率)的感测。塑料光纤是光纤到户(FTTH)工程中最有希望的传输介质。
- 双包层光纤(DCF),指纤芯外有两个包层的光纤,其特点是模场半径大,弯曲损耗小,在很宽的范围内具有较低的色散,可用于光纤激光器或多参数传感测量。若纤芯外有多个包层结构,则称为多包层光纤。
- 微结构光纤(MSF),即近些年来兴起的一种横截面具有二维周期性微孔阵列的新型光纤。通过特殊的几何结构设计,这种光纤可以形成光子禁带。改变微孔阵列排布、填充介质或注入特种流体,可以极大地改变其传输性质。相关内容将在第6章详细论述。

此外,人们还根据科学研究和工程需要设计并研制出耐辐射光纤、负色散光纤、弯曲不