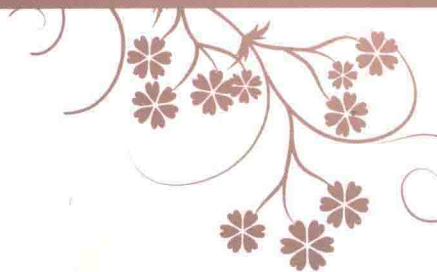


21世纪高等学校规划教材 | 电子信息



# 光纤光学原理及应用

张伟刚 编著



清华大学出版社

21世纪高等学校规划教材 | 电子信息



# 光纤光学原理及应用

张伟刚 编著

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、实现技术以及主要应用。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;单模光纤的性质及分析方法;典型的光纤无源和有源器件分析与设计;光纤技术在通信和传感领域的应用;典型的特种光纤(包括微结构光纤)及其应用;光纤光栅基础知识、基本理论以及典型应用;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。

本书理论应用并重,体系有所创新,内容系统全面,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;可作为高等学校光电子、激光、光学仪器、物理学、信息与通信技术专业的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. --北京:清华大学出版社,2012.9

21世纪高等学校规划教材·电子信息

ISBN 978-7-302-28474-1

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(2012)第 064771 号

责任编辑:高买花

封面设计:傅瑞学

责任校对:李建庄

责任印制:何 芊

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 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:18 字 数:449千字

版 次:2012年9月第1版 印 次:2012年9月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:33.00元

# 编审委员会成员

东南大学	王志功	教授
南京大学	王新龙	教授
南京航空航天大学	王成华	教授
解放军理工大学	邓元庆	教授
	刘景夏	副教授
上海大学	方勇	教授
上海交通大学	朱杰	教授
	何晨	教授
华中科技大学	严国萍	教授
	朱定华	教授
华中师范大学	吴彦文	教授
武汉理工大学	刘复华	教授
	李中年	教授
宁波大学	蒋刚毅	教授
天津大学	王成山	教授
	郭维廉	教授
中国科学技术大学	王煦法	教授
	郭从良	教授
	徐佩霞	教授
苏州大学	赵鹤鸣	教授
山东大学	刘志军	教授
山东科技大学	郑永果	教授
东北师范大学	朱守正	教授
沈阳工业学院	张秉权	教授
长春大学	张丽英	教授
吉林大学	林君	教授
湖南大学	何怡刚	教授
长沙理工大学	曾喆昭	教授
华南理工大学	冯久超	教授

西南交通大学

冯全源 教授

金炜东 教授

重庆工学院

余成波 教授

重庆通信学院

曾凡鑫 教授

重庆大学

曾孝平 教授

重庆邮电学院

谢显中 教授

张德民 教授

西安电子科技大学

彭启琮 教授

樊昌信 教授

西北工业大学

何明一 教授

集美大学

迟 岩 教授

云南大学

刘惟一 教授

东华大学

方建安 教授

# 出版说明

---

随着我国改革开放的进一步深化,高等教育也得到了快速发展,各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的投入力度,通过教育改革合理调整和配置了教育资源,优化了传统学科专业,积极为地方经济建设输送人才,为我国经济社会的快速、健康和可持续发展以及高等教育自身的改革发展做出了巨大贡献。但是,高等教育质量还需要进一步提高以适应经济社会发展的需要,不少高校的专业设置和结构不尽合理,教师队伍整体素质亟待提高,人才培养模式、教学内容和方法需要进一步转变,学生的实践能力和创新精神亟待加强。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2007年1月,教育部下发了《关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》,计划实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”(简称“质量工程”),通过专业结构调整、课程教材建设、实践教学改革、教学团队建设等多项内容,进一步深化高等学校教学改革,提高人才培养的能力和水平,更好地满足经济社会发展对高素质人才的需要。在贯彻和落实教育部“质量工程”的过程中,各地高校发挥师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势,对其特色专业及特色课程(群)加以规划、整理和总结,更新教学内容、改革课程体系,建设了一大批内容新、体系新、方法新、手段新的特色课程。在此基础上,经教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议,清华大学出版社在多个领域精选各高校的特色课程,分别规划出版系列教材,以配合“质量工程”的实施,满足各高校教学质量和教学改革的需要。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上。精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合21世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版

社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。推出的特色精品教材包括:

(1) 21 世纪高等学校规划教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 21 世纪高等学校规划教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 21 世纪高等学校规划教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 21 世纪高等学校规划教材·信息管理与信息系统。

(6) 21 世纪高等学校规划教材·财经管理与应用。

(7) 21 世纪高等学校规划教材·电子商务。

(8) 21 世纪高等学校规划教材·物联网。

清华大学出版社经过三十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

联系人:魏江江

E-mail: weijj@tup.tsinghua.edu.cn

# 前言

“光纤光学”名称始见于 20 世纪 50 年代,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。光纤是一种介质圆柱光波导。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,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。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的不断出现,使光纤光学的内容愈来愈丰富,也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。

本书是在作者多年从事光纤光学科研与教学工作的基础上编写而成的,并得到国家自然科学基金(10974100、10674075、60577018)的资助。全书基本概念明晰,理论应用并重,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。

本书在编写过程中,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,在此一并表示感谢。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。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出版社盛东亮、刘向威编辑的热情支持,在此表示衷心感谢。

限于作者水平,书中不足之处敬请批评指正。



2012 年 7 月于南开园



# 目 录

<b>第 1 章 光纤光学基础</b> .....	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 描述光纤的重要参量.....	10
1.3.1 光纤的数值孔径 .....	10
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.....	11
1.4.1 光纤的特征参数 .....	11
1.4.2 光纤的光学特性 .....	11
1.4.3 光纤的物化特性 .....	15
小结 .....	16
思考与习题 .....	16
<b>第 2 章 光纤光学的基本理论</b> .....	18
2.1 引言.....	18
2.2 光纤的光线理论.....	19
2.2.1 程函方程 .....	19
2.2.2 光线方程 .....	21
2.2.3 光线方程的应用 .....	22
2.3 光纤的波动理论.....	24
2.3.1 麦克斯韦方程组 .....	24
2.3.2 波动方程 .....	24
2.3.3 亥姆霍兹方程 .....	25
2.3.4 波导场方程 .....	26
2.3.5 波导场的场解 .....	27
小结 .....	30
思考与习题 .....	30

<b>第 3 章 光纤的光线理论分析</b> .....	32
3.1 引言 .....	32
3.2 均匀光纤的光线理论分析 .....	33
3.2.1 均匀光纤中的光线种类 .....	33
3.2.2 子午光线的传输分析 .....	34
3.2.3 偏斜光线的传输分析 .....	36
3.2.4 弯曲光纤的光线传输分析 .....	37
3.2.5 斜端面光纤的光线传输分析 .....	39
3.2.6 圆锥形光纤的光线传输分析 .....	41
3.3 渐变光纤的光线理论分析 .....	42
3.3.1 渐变光纤中的光线种类 .....	42
3.3.2 渐变光纤的光线方程 .....	43
3.3.3 渐变光纤的子午光线分析 .....	43
3.3.4 渐变光纤的螺旋光线分析 .....	44
小结 .....	45
思考与习题 .....	46
<b>第 4 章 光纤的波动理论分析</b> .....	47
4.1 引言 .....	47
4.2 均匀光纤的波动理论分析 .....	47
4.2.1 径向场方程形式 .....	48
4.2.2 本征解的选取 .....	48
4.2.3 模式及其分类 .....	51
4.2.4 模式本征值 .....	52
4.2.5 色散曲线与单模条件 .....	54
4.2.6 弱导光纤与线偏振模 .....	55
4.2.7 均匀光纤电磁场分布图 .....	58
4.3 渐变光纤的波动理论分析 .....	61
4.3.1 基本方程 .....	62
4.3.2 平方律光纤解析法 .....	62
4.3.3 WKB 分析法 .....	63
4.3.4 级数近似法 .....	64
小结 .....	66
思考与习题 .....	67
<b>第 5 章 单模光纤的性质及分析</b> .....	68
5.1 引言 .....	68
5.2 均匀单模光纤分析 .....	69

5.2.1 模场精确分析 .....	69
5.2.2 模场近似分析 .....	73
5.2.3 功率分布分析 .....	75
5.3 渐变单模光纤分析 .....	76
5.3.1 等效阶跃型光纤法 .....	76
5.3.2 等效平方律光纤法 .....	79
5.4 单模光纤的双折射 .....	81
5.4.1 光纤双折射类型 .....	81
5.4.2 典型本征双折射 .....	82
5.4.3 典型感应双折射 .....	82
小结 .....	84
思考与习题 .....	85
<b>第 6 章 光纤无源和有源器件 .....</b>	<b>86</b>
6.1 引言 .....	86
6.2 光纤无源器件分析 .....	87
6.2.1 光纤耦合器 .....	87
6.2.2 光纤偏振器 .....	93
6.2.3 光纤滤波器 .....	96
6.2.4 光纤隔离器 .....	99
6.2.5 光纤衰减器 .....	100
6.2.6 光纤开关 .....	100
6.2.7 光纤连接器 .....	101
6.3 光纤有源器件分析 .....	102
6.3.1 光纤激光器 .....	102
6.3.2 光纤放大器 .....	104
6.4 光纤器件发展分析 .....	107
6.4.1 光纤无源器件发展分析 .....	107
6.4.2 光纤有源器件发展分析 .....	108
6.4.3 光纤器件技术研究方向 .....	110
小结 .....	111
思考与习题 .....	112
<b>第 7 章 光纤技术及其应用 .....</b>	<b>113</b>
7.1 引言 .....	113
7.2 光纤通信技术 .....	113
7.2.1 光纤通信原理 .....	113
7.2.2 光纤通信系统 .....	114
7.2.3 多信道复用技术 .....	119

7.2.4	全光纤 OADM 通信系统 .....	121
7.2.5	光纤通信网 .....	123
7.3	光纤传感技术 .....	126
7.3.1	光纤传感原理 .....	126
7.3.2	光纤传感器建模 .....	128
7.3.3	光纤传感器 .....	131
7.3.4	光纤传感网 .....	132
7.4	典型光纤传感器 .....	138
7.4.1	强度型光纤传感器 .....	138
7.4.2	干涉型光纤传感器 .....	145
7.4.3	微结构光纤传感器 .....	151
7.5	特种光纤及其应用 .....	157
7.5.1	掺杂光纤及其应用 .....	157
7.5.2	塑料光纤及其应用 .....	158
7.5.3	红外光纤及其应用 .....	159
7.5.4	紫外光纤及其应用 .....	159
7.5.5	敏化光纤及其应用 .....	160
	小结 .....	161
	思考与习题 .....	162
<b>第 8 章</b>	<b>光纤光栅及其应用 .....</b>	<b>164</b>
8.1	引言 .....	164
8.2	光纤光栅基础 .....	165
8.2.1	光纤光栅基本类型 .....	165
8.2.2	折射率分布与反射谱 .....	166
8.2.3	光纤光栅制作技术 .....	169
8.3	光纤光栅理论 .....	173
8.3.1	光纤光栅典型理论 .....	173
8.3.2	光纤光栅基本性质 .....	176
8.3.3	传感解调关联理论 .....	179
8.4	光纤光栅的应用 .....	185
8.4.1	光纤光栅在通信领域的应用 .....	185
8.4.2	光纤光栅在传感领域的应用 .....	187
8.4.3	光纤光栅及器件的研究方向 .....	198
	小结 .....	199
	思考与习题 .....	200
<b>第 9 章</b>	<b>光纤特征参数的测量 .....</b>	<b>202</b>
9.1	引言 .....	202

9.2 光纤测量常用仪器 .....	203
9.2.1 光源 .....	204
9.2.2 光纤熔接机 .....	207
9.2.3 光谱分析仪 .....	208
9.2.4 光功率计 .....	209
9.2.5 光波长计 .....	210
9.2.6 光时域反射计 .....	212
9.3 光纤几何参数测量 .....	213
9.3.1 几何特征参数 .....	213
9.3.2 测量注入条件 .....	214
9.3.3 典型测量方法 .....	215
9.4 光纤折射率分布测量 .....	216
9.4.1 折射近场法 .....	217
9.4.2 近场扫描法 .....	218
9.5 光纤数值孔径测量 .....	219
9.5.1 远场强度有效数值孔径 .....	220
9.5.2 典型测量方法 .....	220
9.6 光纤衰减测量 .....	221
9.6.1 光纤衰减机理 .....	222
9.6.2 典型测量方法 .....	222
9.7 光纤色散测量 .....	224
9.7.1 光纤色散机理 .....	224
9.7.2 典型测量方法 .....	225
9.8 光纤模场直径测量 .....	226
9.8.1 模场直径定义 .....	226
9.8.2 典型测量方法 .....	227
9.9 高双折射光纤拍长测量 .....	229
9.9.1 光纤拍长定义 .....	229
9.9.2 典型测量方法 .....	230
小结 .....	235
思考与习题 .....	236
<b>第 10 章 光纤非线性效应及其应用 .....</b>	<b>237</b>
10.1 引言 .....	237
10.2 光纤非线性效应 .....	238
10.2.1 光纤中的非线性效率 .....	238
10.2.2 光纤的非线性特性 .....	239
10.3 光脉冲传输方程 .....	245
10.3.1 非线性介质中的波动方程 .....	245

10.3.2	分析法推导光脉冲传输方程 .....	246
10.3.3	杂凑法推导光脉冲传输方程 .....	250
10.3.4	光脉冲传输方程的简化形式 .....	253
10.4	光纤光孤子及其应用 .....	253
10.4.1	光纤中的光孤子 .....	253
10.4.2	光纤中光孤子的传输 .....	257
10.4.3	光孤子通信关键技术 .....	260
10.4.4	光孤子通信应用展望 .....	262
	小结 .....	265
	思考与习题 .....	266
	主要参考文献 .....	268
	英文缩略语 .....	270

# 第 1 章

## 光纤光学基础

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,并描述光纤的三个重要参量;进而,阐述光纤的光学特性和物化特性;最后,对本章进行小结。

### 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,是一种介质圆柱光波导。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,新型光纤无论从结构上还是性能上,都与早期的光纤有很大的不同,特别是塑料光纤及微结构光纤的出现,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,并根据实际需要对新型光纤(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,二是光波以全反射的原理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——模式约束与耦合。

光纤光学研究的目的,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,为光纤技术的发展及应用奠定基础。

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、塑料光纤和微结构光纤的拉制过程;
- (5) 光纤的重要参量: 阐述光纤的三个重要参量(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( $\text{SiO}_2$ ), 由纤芯、包层、涂敷层组成。图 1.1 为光纤剖面图,  $a$ 、 $b$  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( $\text{GeO}_2$ )的二氧化硅, 掺杂的目的是为了提高纤芯的折射率, 纤芯直径一般在  $5\sim 50\mu\text{m}$  之间; 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  $125\mu\text{m}$ ; 涂敷层为环氧树脂、硅橡胶等高分子材料, 其外径约  $250\mu\text{m}$ , 涂敷的目的在于增强光纤的机械强度和柔韧性。

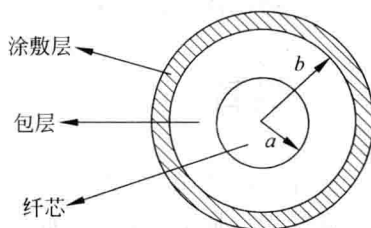


图 1.1 光纤剖面结构示意图

### 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之中, 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), 而在其他方面则要求相应降低。

#### 1.2.2.2 根据折射率分布特征分类

根据光纤横截面上折射率的径向分布特征, 可以大致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  $f(r/a) = (r/a)^g$ ;  $\Delta$  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,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之为模式。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,其定义和意义将在本章第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  $V < 2.405$ ,则只能容纳单模,称之为主模或基模。

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对比图示。

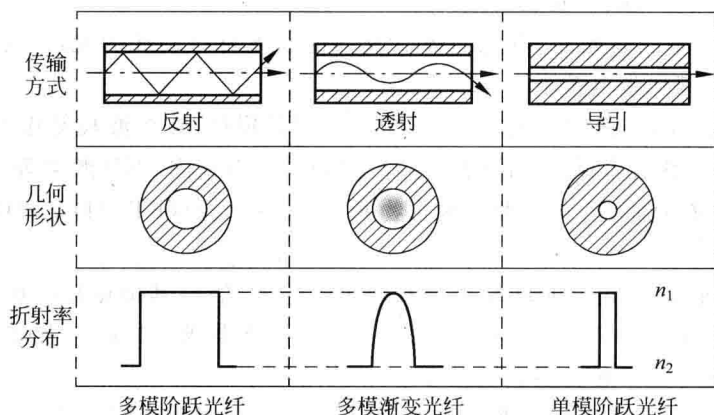


图 1.2 多模阶跃光纤、多模渐变光纤和单模阶跃光纤对比图示