



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

清华大学信息科学技术学院教材——信息与通信工程系列

# 光纤光学

## ——原理与应用

Fiber Optics:  
Principles and Applications

廖延彪 编著  
Liao Yanbiao

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

清华大学信息科学技术学院教材——信息与通信工程系列

# 光纤光学

## ——原理与应用

Fiber Optics:  
Principles and Applications

廖延彪 编著

Liao Yanbiao

清华大学出版社

北京

## 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、模耦合理论、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,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;光纤在传输数据和图像、传感方面的应用,等等。

本书可作为高等院校激光、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和科技工作者学习和参考。

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:原理与应用/廖延彪编著. —北京:清华大学出版社,2010.9

(清华大学信息科学技术学院教材:信息与通信工程系列)

ISBN 978-7-302-22683-3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 085797 号

责任编辑:刘佩伟

责任校对:焦丽丽

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954, [jsjic@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:jsjic@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 刷 者:北京密云胶印厂

装 订 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:26.75 字 数:594 千字

版 次:2010 年 9 月第 1 版 印 次:2010 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:39.80 元

# 《清华大学信息科学技术学院教材》

## 编委会

(以姓氏拼音为序)

主任：郑大钟

副主任：蔡鸿程 胡事民 任勇 覃征  
汪蕙 王希勤 王雄 余志平

编委：高文焕 华成英 陆文娟 王诗宓 温冬婵  
萧德云 谢世钟 殷人昆 应根裕 郑君里  
郑纬民 周立柱 周润德 朱雪龙

秘书：王娜

责任编辑：马瑛珺 王一玲 陈国新

## 出版说明

本套教材是针对清华大学信息科学技术学院所属电子工程系、计算机科学与技术系、自动化系、微电子研究所、软件学院的现行本科培养方案和研究生培养计划的课程设置而组织编写的。这些培养方案和培养计划是基于清华大学对研究型大学的定位和对研究型教学的强调,吸纳多年来在教学改革与实践中所取得的成果和形成的共识,历经多届学生试用和不断修订而形成的。贯穿于其中的“本科教育的通识性、培养模式的宽口径、教学方式的研究型、专业课程的前沿性”的相关思想是我们组编本套教材所力求体现的基本指导原则。

本套教材以本科教材为主并适量包括研究生教材。定位上,属于信息学科大类中各个基本方向的基本理论和前沿技术的一套高等院校教材。层次上,覆盖学院公共基础课程、专业技术基础课程、专业课程、研究生课程。领域上,涉及6个系列14个领域,即学院公共基础课程系列,信息与通信工程系列(含通信、信息处理等领域),微电子光电子系列(含微电子、光电子等领域),计算机科学与技术系列(含计算机科学、计算机网络与安全、计算机应用、软件工程、网络计算等领域),自动化系列(含控制理论与控制工程、模式识别与智能控制、检测与电子技术、系统工程、现代集成制造等领域),实验实践系列。类型上,以文字教材为主并适量包括多媒体教材,以主教材为主并适量包括习题集、教师手册等辅助教材,以基本理论和工程技术教材为主并适量包括实验和实践课程教材。列入这套教材中的著作,大多是清华大学信息科学技术学院所属系所院开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有多年教学经验和教学改革基础上新编著的教材,也有部分已出版教材的更新和修订版本。教材在总体上突出求新与求实的风格,力求反映所属领域的基本理论和新进展,力求做到学科先进性和教学适用性的统一。

本套教材的主要读者对象为电子科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与工程、系统科学、电气工程、机械工程、化学与技术工程、核能工程等相关理工专业的大学生和研究生,以及相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望,这套教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者与工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的和有价值的进修或自学读物。我们同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并热忱欢迎提出批评和意见。

《清华大学信息科学技术学院教材》编委会

2003年10月

# 前 言

随着激光的问世,古老的光学已化分出众多的分支,光纤光学是其中之一。光纤光学是研究光导纤维的光学特性及其应用的一门学科。光纤光学这一术语出现于20世纪50年代,随着光纤技术的迅速发展,尤其是光纤通信的广泛应用,这个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,有的特性仍在研究中。本书是在10年前出版的《光纤光学》(清华大学出版社)一书的基础上修改扩充而成的,目的是结合近10年的发展对光纤光学的原理及应用做一较全面的介绍。

全书共有10章,可分为3部分。第一部分包括第1~3章,主要讨论光纤中光波传输的光线理论和波动理论,光纤传输的非线性理论,光纤的损耗、色散和偏振特性。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。为使读者对其物理模型有一较清楚的了解,而又不必花过多精力用于数学推导过程中,本书对公式的数学推导过程从略,但突出对物理意义的阐述。此外,对光纤中的偏振特性讨论较为详细,这是使用光纤所需要的。第二部分包括第4~6和10章,较全面地介绍了各类特种光纤,光纤连接和处理的方法,以及光纤参数的测试方法,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光纤的模式色散测量方法进行了较全面的介绍。它有助于读者正确地选用合适的光纤以满足工作需要。第三部分包括第7~9章。较全面地介绍了由光纤构成的,或不是由光纤构成但对光纤系统有重要价值的各种有源和无源光纤器件,以及各种光纤传感器。这部分重点是介绍实际应用中要掌握的一些基本特性。

在此有必要说明一点,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唯像的描述,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的规律(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等问题。这些关于光导波本质问题的探讨,必须采用量子理论。这已超出本书范围,故未涉及。实际上,这方面的研究成果尚不多见。

本书既可作为教材,也可作为科技工作者的参考书。作为教材,书中内容可按教学大纲有所取舍。其中第1、2、7、9章,光纤中光波传输的光线理论和波动理论,光纤的特性,光纤

无源及有源器件,光纤传感器等可作为基本内容,重点讲述。第5、6章,可作为一般了解内容,仅做简要介绍;第3章,光纤中的非线性效应,视各校教学大纲不同,可有不同安排:重点讲述,简要介绍,或删除不讲;而第4、8、10章,可作为自学内容,目的是扩大眼界。建议教师课上以讲清楚物理概念为主,使学生了解光纤中光波传输的光线理论和波动理论,其余可作为自学的阅读材料,为学生今后工作中应用光纤、光纤器件和光纤系统打下必要的基础。作为参考书,本书可作为各领域相关读者系统而全面地了解光纤光学的参考读物。

本书的编写过程中,陈哲教授提供了第4章4.5~4.9节和第7章7.5.2节、7.7.3节的初稿;此外,不少教师和研究生对本书的内容提出了许多宝贵的意见,在此深表感谢。课题组的赖淑蓉和张敏老师,清华大学出版社的王一玲、陈国新编辑对教材的出版都给予了大力支持,在此一并表示感谢。最后,还要感谢清华大学出版社陈志辉编辑为本书的出版所做的细致的编辑工作。

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

2010年3月于清华园

# 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	3
1.2.2 斜光线的传播	4
1.2.3 光纤的弯曲	4
1.2.4 光纤端面的倾斜效应	6
1.2.5 圆锥形光纤	6
1.3 变折射率光纤的光线理论	7
1.3.1 程函方程	8
1.3.2 光线方程	9
1.3.3 变折射率光纤中的光线分析	10
1.4 光波导的一般理论——正规光波导	13
1.4.1 麦克斯韦方程组	13
1.4.2 波动方程	14
1.4.3 模式	16
1.4.4 模式场的纵、横向分量	17
1.5 均匀折射率光纤的波动理论	19
1.5.1 矢量模	20
1.5.2 线偏振模与标量法	22
1.5.3 二层均匀光纤	24
1.5.4 电磁场分布图	34
1.6 变折射率光纤的波动理论	36
1.6.1 引言	36
1.6.2 平方律光纤的解析解	38
1.6.3 级数近似解	40
1.7 均匀折射率单模光纤的分析	41



1.7.1	引言	41
1.7.2	基本性质	42
1.7.3	功率分布	46
1.8	变折射率单模光纤的分析	47
1.8.1	等效平方律折射率光纤法	48
1.8.2	等效阶跃折射率光纤法	50
1.9	非正规光波导的模耦合方程	52
1.9.1	非正规光波导	52
1.9.2	非正规光波导的模耦合方程(矢量模耦合方程)	53
	思考题与习题	56
	参考文献	57
<b>第2章</b>	<b>光纤的特性</b>	<b>59</b>
2.1	引言	59
2.2	光纤的损耗	59
2.2.1	吸收损耗	59
2.2.2	散射损耗	61
2.3	光纤的色散	62
2.3.1	概述	62
2.3.2	多模色散	63
2.3.3	波长色散	64
2.3.4	各种色散大小的比较	66
2.4	单模光纤的设计	66
2.4.1	引言	66
2.4.2	截止条件	68
2.4.3	等效阶跃折射率光纤	70
2.4.4	色散特性	71
2.5	偏振保持光纤简介	73
2.5.1	引言	73
2.5.2	偏振保持光纤的结构类型	74
2.6	弹光效应	75
2.7	光纤中产生双折射的原因	79
2.7.1	纤芯的椭圆度引起的双折射	79
2.7.2	应力引起的双折射	79
2.7.3	弯曲引起的双折射	79

2.7.4	扭曲引起的双折射	81
2.7.5	外场引起的双折射	81
2.7.6	减小双折射影响的特殊措施	82
2.8	偏振光在光纤中的传输	82
2.8.1	偏振光的矩阵表示法——Jones 矢量法	83
2.8.2	Jones 矩阵法在光纤中的应用	84
2.8.3	单模光纤在外力作用下引起双折射效应的 Jones 矩阵	89
2.8.4	Poincaré 球图示法	91
	思考题与习题	97
	参考文献	97

<b>第3章</b>	<b>光纤中的非线性效应</b>	<b>99</b>
3.1	引言	99
3.2	基本原理	99
3.2.1	非线性极化	99
3.2.2	受激非弹性散射	100
3.2.3	基本传输方程	101
3.2.4	非线性脉冲传输	103
3.3	自相位调制	107
3.3.1	非线性相移	108
3.3.2	脉冲形状和初始啁啾的影响	110
3.4	光纤中的光孤子	111
3.4.1	概述	111
3.4.2	脉冲演化	112
3.4.3	基态孤子	114
3.4.4	暗孤子	114
3.5	交叉相位调制	116
3.6	受激拉曼散射	117
3.6.1	拉曼增益谱	118
3.6.2	拉曼阈值	119
3.6.3	光纤拉曼散射的应用	120
3.7	受激布里渊散射	122
3.7.1	概述	122
3.7.2	布里渊增益谱	123
3.7.3	受激布里渊散射的应用	124

3.8	四波混频 .....	126
3.8.1	四波混频原理 .....	126
3.8.2	多模光纤中的相位匹配 .....	128
3.8.3	单模光纤中的相位匹配 .....	128
3.8.4	双折射光纤中的相位匹配 .....	129
	思考题与习题 .....	130
	参考文献 .....	132
<b>第4章</b>	<b>光纤的连接和处理 .....</b>	<b>133</b>
4.1	引言 .....	133
4.2	光纤弯曲损耗 .....	133
4.2.1	光纤的宏弯损耗 .....	133
4.2.2	微弯引起的光纤损耗 .....	135
4.3	光纤和光源的连接 .....	136
4.3.1	半导体激光器和光纤的连接 .....	136
4.3.2	半导体发光二极管和光纤的耦合 .....	140
4.4	光纤和光纤的连接 .....	141
4.4.1	多模光纤和多模光纤的直接耦合 .....	141
4.4.2	单模光纤和单模光纤直接耦合 .....	144
4.5	光纤端面的处理 .....	146
4.5.1	涂覆层剥除 .....	146
4.5.2	光纤端面制备 .....	146
4.5.3	光纤端面质量的检验 .....	148
4.6	光纤的固定连接 .....	148
4.6.1	光纤对准调节 .....	148
4.6.2	光纤的固定 .....	150
4.7	光纤熔接 .....	152
4.7.1	概述 .....	152
4.7.2	影响光纤熔接性能的因素 .....	152
4.7.3	光纤熔接中容易出现的问题与解决方法 .....	153
4.8	侧边抛磨光纤 .....	155
4.8.1	引言 .....	155
4.8.2	侧边抛磨光纤的制备 .....	155
4.8.3	侧边抛磨光纤的应用 .....	156
4.9	光纤的腐蚀 .....	158

4.9.1	化学腐蚀法制作纳米光纤探针的原理	158
4.9.2	影响腐蚀效果的因素	159
4.9.3	化学腐蚀法的分类	160
4.9.4	化学腐蚀法应用于具有渐变场结构的光纤传感器	163
4.10	光纤的改性	165
4.10.1	掺杂效应	165
4.10.2	光敏效应	165
4.10.3	拉曼效应和布里渊效应	166
4.10.4	力学效应	166
4.10.5	热学效应	166
4.10.6	电磁效应	166
	思考题与习题	166
	参考文献	167
<b>第5章</b>	<b>特种光纤</b>	<b>169</b>
5.1	引言	169
5.2	变折射率光纤	170
5.2.1	变折射率光纤棒的成像理论	170
5.2.2	变折射率光纤棒的制造	176
5.2.3	变折射率光纤棒的应用	177
5.2.4	变折射率光纤棒的像差	180
5.3	红外光纤	183
5.3.1	概述	183
5.3.2	氟化物光纤	184
5.3.3	硫化物红外光纤	186
5.3.4	空芯波导	186
5.3.5	多晶红外光纤	189
5.3.6	红外光纤的应用	190
5.4	荧光光纤	196
5.4.1	概述	196
5.4.2	荧光光纤成分	196
5.4.3	荧光光纤的光学性能	197
5.4.4	荧光光纤的应用	198
5.4.5	闪烁塑料光纤	198
5.5	聚合物光纤	199

5.5.1	概述	199
5.5.2	聚光物光纤种类和材料	199
5.5.3	聚合物光纤的特性	201
5.5.4	聚合物光纤器件	204
5.5.5	聚合物光纤应用	204
5.6	光子晶体光纤	205
5.6.1	概述	205
5.6.2	光子晶体光纤的分类	205
5.6.3	光子晶体光纤的材料和制作	207
5.6.4	光子晶体光纤的特性	208
5.6.5	光子晶体光纤的应用	209
5.7	单晶光纤	211
5.7.1	概述	211
5.7.2	材料	211
5.7.3	单晶光纤的特性	211
5.7.4	单晶光纤的应用	213
5.8	增敏和去敏光纤	213
5.8.1	对辐射的增敏和去敏光纤	213
5.8.2	磁敏光纤	214
5.9	紫外光纤	214
5.10	镀金属光纤	215
5.11	双包层光纤	215
5.12	多芯光纤	218
5.13	微纳光纤	220
	思考题与习题	221
	参考文献	222
<b>第6章</b>	<b>光纤特征参数的测量</b>	<b>223</b>
6.1	引言	223
6.1.1	光纤测量的内容	223
6.1.2	光纤测量的特点	223
6.1.3	光纤测量的方法	223
6.1.4	光纤测量仪器	225
6.2	损耗测量	225
6.2.1	概述	225

6.2.2	光纤损耗的测量	226
6.2.3	光纤器件的插损测量	229
6.2.4	谱损的测量	230
6.2.5	反射损耗的测量	230
6.3	模场直径测量	231
6.3.1	模场直径定义	231
6.3.2	测量方法	231
6.4	截止波长	233
6.4.1	截止波长的定义	234
6.4.2	传导功率法	235
6.4.3	模场直径法	236
6.4.4	替代法	237
6.5	色散测量	237
6.5.1	测量原理	237
6.5.2	相移法	239
6.5.3	干涉法	239
6.5.4	基带测量	241
6.6	折射率分布的测量	243
6.6.1	折射近场法	243
6.6.2	近场扫描法	245
6.7	几何尺寸测量	247
6.7.1	概述	247
6.7.2	折射近场法测几何尺寸	247
6.7.3	近场法测几何尺寸	248
6.8	最大理论数值孔径的测量	248
6.8.1	折射近场法	248
6.8.2	远场法	249
6.8.3	远场光斑法	250
6.9	高双折射光纤拍长的测量	250
6.9.1	散射光法	250
6.9.2	透射光法	251
6.10	偏振模色散	254
6.10.1	概述	254
6.10.2	定义	254
6.10.3	测量方法	255

思考题与习题	261
参考文献	261
<b>第 7 章 光纤无源及有源器件</b>	<b>262</b>
7.1 引言	262
7.2 光纤耦合器——熔锥型单模光纤光分/合路连接器	263
7.2.1 熔锥型单模光纤光分/合路连接器	263
7.2.2 磨抛型单模光纤定向耦合器	267
7.3 光开关	269
7.3.1 概述	269
7.3.2 光开关的技术参数	269
7.3.3 光开关原理	269
7.4 光纤旋转连接器	271
7.4.1 光纤旋转连接器的工作原理	271
7.4.2 光纤旋转连接器的基本结构	271
7.5 光纤调制器	273
7.5.1 基于 Kerr 效应的光纤相位调制器	273
7.5.2 基于热极化保偏光纤电光相位调制器	274
7.6 光纤滤波器	275
7.6.1 Mach-Zehnder 光纤滤波器	275
7.6.2 Fabry-Perot 光纤滤波器	276
7.7 光衰减器	279
7.7.1 光衰减器原理	279
7.7.2 光衰减器分类和基本结构	279
7.7.3 全光纤热光型可变光衰减器	281
7.8 光缓存器	283
7.9 光纤偏振器件	284
7.9.1 光纤偏振控制器	284
7.9.2 保偏光纤偏振器	285
7.9.3 光隔离器	286
7.10 光环行器	288
7.11 光纤光栅	290
7.11.1 引言	290
7.11.2 光纤光栅的分类	291
7.11.3 光纤布喇格光栅的理论模型	294

7.11.4	均匀周期正弦型光纤光栅	296
7.11.5	非均匀周期光纤光栅	298
7.11.6	光纤光栅的写入方法简介	300
7.12	掺杂光纤激光器与放大器	303
7.12.1	概述	303
7.12.2	光纤激光谐振腔	303
7.12.3	掺杂光纤激光介质	305
7.12.4	掺杂光纤激光器的调谐	306
7.12.5	光纤激光器的调 Q 和锁模	307
7.12.6	光纤激光器的输出线宽和压缩	307
7.12.7	光纤放大器	307
7.13	大功率双包层光纤激光器	309
7.13.1	概述	309
7.13.2	双包层光纤的结构与特点	309
7.13.3	双包层光纤激光器的原理	310
7.13.4	双包层光纤激光器的泵浦耦合技术	310
7.13.5	双包层光纤激光器的应用	312
	思考题与习题	312
	参考文献	313

<b>第 8 章</b>	<b>光纤传输数据和图像</b>	<b>315</b>
8.1	概述	315
8.2	光纤通信简介	315
8.3	光纤传输距离的估算	316
8.3.1	光纤的损耗	316
8.3.2	光纤色散	318
8.3.3	色散对光纤传输的影响	319
8.4	光纤传光束	320
8.5	光纤传像束	321
8.5.1	概述	321
8.5.2	光纤传像束的结构	321
8.5.3	光纤传像束的性能	324
8.5.4	应用	324
	思考题与习题	326
	参考文献	326



第 9 章 光纤传感器	328
9.1 概述	328
9.1.1 光纤传感器的定义及分类	328
9.1.2 光纤传感器的特点	329
9.2 振幅调制传感型光纤传感器	329
9.2.1 光纤微弯传感器	329
9.2.2 光纤受抑全内反射传感器	331
9.2.3 光纤辐射传感器	332
9.3 振幅调制型光纤传感器的补偿技术	333
9.3.1 双波长补偿法	333
9.3.2 旁路光纤监测法	334
9.3.3 光桥平衡补偿法	334
9.4 相位调制传感型光纤传感器	334
9.4.1 引言	334
9.4.2 Mach-Zehnder 光纤干涉仪和 Michelson 光纤干涉仪	335
9.4.3 Sagnac 光纤干涉仪	336
9.4.4 光纤 Fabry-Perot 干涉仪	339
9.4.5 光纤环形腔干涉仪	342
9.4.6 白光干涉型光纤传感器	344
9.4.7 外界压力对光纤干涉仪的影响	347
9.4.8 温度对光纤干涉仪的影响	351
9.4.9 光纤干涉仪的传感应用	351
9.5 偏振态调制型光纤传感器	352
9.5.1 光纤电流传感器	352
9.5.2 双折射对光纤传感的影响	353
9.5.3 光纤偏振干涉仪	354
9.6 波长调制型光纤传感器	355
9.6.1 引言	355
9.6.2 光纤布喇格光栅应变传感模型分析	355
9.6.3 光纤布喇格光栅温度传感模型分析	361
9.6.4 光纤布喇格光栅在光纤传感领域中的典型应用	362
9.6.5 长周期光纤光栅在传感领域的应用	365
9.6.6 光纤光栅折射率传感技术	365
9.6.7 LPG 马赫-泽德干涉仪折射率传感器	368
9.7 光纤荧光温度传感器	368