



经典译丛



非线性 光纤光学

Nonlinear Fiber Optics (第五版)
Fifth Edition

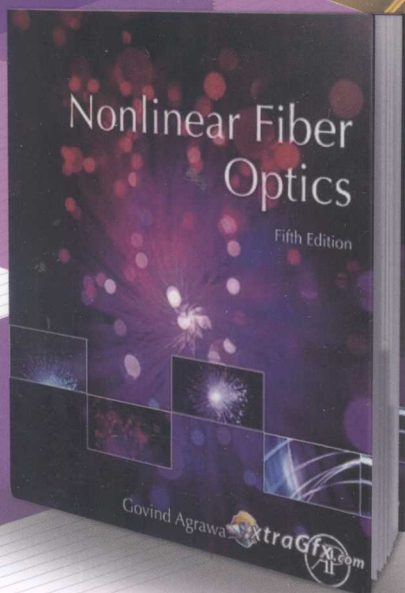
【美】 Govind Agrawal 著

贾东方 葛春风 等译
李世忱 贾东方 审校

光学与光电子学



Nonlinear Fiber Optics
Fifth Edition



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

经典译丛·光学与光电子学

非线性光纤光学

(第五版)

Nonlinear Fiber Optics

Fifth Edition

[美] Govind P. Agrawal 著

贾东方 葛春风 王肇颖 杨天新 译

李世忱 贾东方 审校



TN929.11

145

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry



北航

C1714626

内 容 简 介

光纤是20世纪的重大发明之一,其导光性能臻于完美,很难想象还会有更好的替代者。本书是光学、光子学和光纤通信领域的重要译著,主要内容包括脉冲在光纤中的传输、群速度色散、自相位调制、光孤子、偏振效应、交叉相位调制、受激喇曼散射、受激布里渊散射、四波混频、高非线性光纤、新型非线性现象、超连续谱产生等内容,科学归纳为非线性光纤光学,侧重于基本概念和原理,也涉及了一些应用。

全书理论严谨,处处结合实际例证,特别是紧密结合光纤非线性光学、光纤通信领域的新成果与新问题,图文并茂,说清讲透,且各章都附有习题,适合作为光学、物理学、电子工程等专业的本科生和研究生教学用书,同时对从事光通信产业的工程技术人员和从事光纤光学、非线性光学的科学家也是一本非常有用的参考书。

Nonlinear Fiber Optics, Fifth Edition

Govind P. Agrawal

ISBN: 978-0-12-397023-7

Copyright © 2013 by Elsevier Inc. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

Copyright © 2014 by Elsevier(Singapore)Pte Ltd. All rights reserved.

Printed in China by Publishing House of Electronics Industry under special arrangement with Elsevier(Singapore)Pte Ltd.

This edition is authorized for sale in Mainland of China. Unauthorized export of this edition is a violation of Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书中文简体字版专有出版权由 Elsevier(Singapore)Pte Ltd 授予电子工业出版社,仅限在中国大陆出版发行。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2013-5964

图书在版编目(CIP)数据

非线性光纤光学:第5版/(美)阿戈沃(Agrawal,G.P.)著;贾东方等译. —北京:电子工业出版社,2014.3
(经典译丛·光学与光电子学)

书名原文:Nonlinear Fiber Optics, Fifth Edition

ISBN 978-7-121-22436-2

I. ①非… II. ①阿… ②贾… III. ① 光纤通信-非线性光学 IV. ① TN929.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第019939号

策划编辑:马 岚

责任编辑:马 岚 特约编辑:马爱文

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:29 字数:742千字

印 次:2014年3月第1次印刷

定 价:69.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlls@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

Forward for the Fifth Edition

It is with pleasure that I write this forward for the Chinese translation of the fifth edition of my book entitled *Nonlinear Fiber Optics* and published in January 2013 by Academic Press, Elsevier. This new edition has expanded considerably from its previous editions and contains a new chapter devoted entirely to supercontinuum generation. In addition, all chapters were revised with new material in some of them.

The Optical Communication Group of Tianjin University is to be commended for undertaking this project and finishing it in a timely fashion. The same group translated the previous editions of my two books soon after they were published in English. I have heard from several colleagues that Chinese translation has been very well received by both the Chinese scientists and students. This is certainly a reflection of the quality of the translation. I am confident that the new translation will preserve the quality and will be liked by everyone as much as the previous editions.

I am pleased that my work is available to a wide audience in China, and I thank the translators and the Chinese publisher for making this possible. Thanks are also due to the U. S. Publisher, Academic Press, for granting the permission for this translation.



Govind P. Agrawal
Rochester, New York, USA
November 2013

中文版序译文

很高兴为我的书 *Nonlinear Fiber Optics, Fifth Edition* 的中文版本——《非线性光纤光学(第五版)》的出版作序。这本书的最新英文版本是由 Academic 出版社于 2013 年 1 月出版的,与前版相比,除了新增超连续谱产生一章外,对其他章节的内容也做了很多扩充和更新。

天津大学光通信研究室的师生授权承接了这本书的中文翻译工作,并圆满完成了任务。该研究组还及时翻译了我的两本书 *Nonlinear Fiber Optics* 和 *Applications of Nonlinear Fiber Optics* 的前几个版本。我曾到访过中国,获知这本书自出版以来,已为中国广大科技人员和高校师生广泛接受和喜爱,这充分说明翻译工作是高质量的。我相信新的中文版本一定会像前几个中文版本那样保持它的高质量,并为每个读者所喜欢。

由于中文译本的出版,我的著作在中国将有更多的读者,我感到很高兴。在此要感谢译者和中国电子工业出版社为此所做的努力,同时还要感谢美国的 Academic 出版社对翻译工作的许可。



Govind P. Agrawal
Rochester, New York, USA
November 2013

译者序

随着光纤通信系统向超高速超大容量超长距离的持续发展,以及光孤子通信系统的实用化,光纤非线性光学的重要性日益突出。光纤通信技术的发展史在很大程度上就是光纤非线性理论与技术的发展史。特别是2000年以来,以光子晶体光纤为代表的高非线性光纤和大模面积光纤的出现,将光纤非线性效应的利用和抑制推到一个新的高度。除了在光纤通信领域的广泛应用外,非线性光纤光学在光学相干层析、高精度频率计量等领域中也得到应用。

本书作者 Govind. P. Agrawal 博士现任美国 Rochester 大学教授,在激光物理、非线性光学和光纤通信领域论著颇丰。我们将作者在此领域的名著 *Nonlinear Fiber Optics*, Fifth Edition 译成中文出版。本书的特色在于根据传输方程对光纤的各种非线性效应进行了科学归纳与剖析,把光纤对光脉冲的响应特性说清了,也讲透了。本书主要内容包括脉冲在光纤中的传输、群速度色散、自相位调制、光孤子、偏振效应、交叉相位调制、受激喇曼散射、受激布里渊散射、四波混频、高非线性光纤、新型非线性现象、超连续谱产生等内容,侧重于基本概念和原理,也涉及了一些应用。

我们于1992年翻译了作者1989年所著的 *Nonlinear Fiber Optics*, 由胡国绛、黄超译,李世忱审校。在此基础上,1999年余震虹、宋立军、王泰立翻译了作者1995年所著的 *Nonlinear Fiber Optics*, Second Edition, 但未通过出版社出版发行。2002年我们翻译了 *Nonlinear Fiber Optics*, Third Edition 和 *Applications of Nonlinear Fiber Optics*, 两书合并为《非线性光纤光学原理及应用》并由电子工业出版社出版,由贾东方、余震虹、谈斌、胡智勇译,李世忱审校。2010年我们出版了 *Nonlinear Fiber Optics*, Fourth Edition 和 *Applications of Nonlinear Fiber Optics*, Second Edition, 两书合并为《非线性光纤光学原理及应用(第二版)》,由贾东方、余震虹、王肇颖、杨天新译,李世忱和贾东方审校。*Nonlinear Fiber Optics*, Fifth Edition 与前一版相比,除新增超连续谱产生一章之外,几乎各章节也都有所修订,尤以第8章至第12章更新得较多。新版本的翻译工作同样由天津大学光电子技术二室组织,由贾东方、葛春风、王肇颖和杨天新主译;全书由李世忱和贾东方审校统稿。

在本书的翻译过程中,对于一些涉及人名的术语的翻译,主要是根据本专业和业内人士的常用术语习惯来翻译的,如将 Raman 译成“喇曼”而不是“拉曼”,将 Michelson 译成“迈克尔逊”而不是“迈克耳孙”,将 Sagnac 译成“萨格纳克”而不是“萨奈克”,将 Poincaré 译成“邦加”而不是“庞加莱”,特此说明。读者可登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>),注册后下载由译者制作的教辅资料。

感谢 Govind. P. Agrawal 教授对中文译本出版方面给予的合作。感谢电子工业出版社对翻译工作的大力支持,特别要衷心感谢本书的策划编辑和责任编辑马岚女士,没有她的帮助和辛勤付出,本书将难以顺利出版。由于译者学识所限,难免有疏漏乃至错误之处,恳请广大读者及专家不吝赐教,提出修改意见,我们将不胜感激。

前 言

自从本书的第一版于1989年出版以来,非线性光纤光学一直是一个活跃的研究领域,并得到持续的快速发展。20世纪90年代,推动这种惊人发展的一个主要因素是通过在石英光纤中掺入像铒、镱之类的稀土离子制成的光纤放大器和光纤激光器的出现。掺铒光纤放大器使光纤通信系统的设计产生了革命性变化,其中利用到的光孤子通信正是从光纤的非线性效应中产生的。由于光放大器能补偿光信号在传输过程中遇到的所有损耗,因此可以使传输距离超过数千千米。同时,光放大器使波分复用(WDM)成为可能,于是导致了容量超过1 Tbps的光波系统的发展。非线性光纤光学在设计这种大容量光波系统中起了重要作用。实际上,对光波系统设计者来说,了解光纤中的各种非线性效应几乎是一个先决条件。

大约从2000年起,非线性光纤光学领域得到新的发展,并在近年来导致许多新型的应用。几种新型光纤,如微结构光纤、空芯光纤或光子晶体光纤被开发出来,它们的共同特征是其相对细的纤芯被包含大量空气孔的包层环绕着。这类光纤被归为高非线性光纤,它们中的非线性效应被显著增强,即使光纤长度只有几厘米,也能够观察到其中的非线性效应。与通信用的传统光纤相比,高非线性光纤的色散特性也有很大的不同。由于这些改变,微结构光纤表现出许多奇异的非线性效应,在光学相干层析、高精度频率计量学等领域中得到应用。

第五版旨在反映最新的科学成就,其独特之处是全面覆盖了非线性光纤光学学科。本书保留了第四版中的大部分内容,然而,为试图包括非线性光纤光学所有相关课题的最新研究成果,本书的内容增加了许多。主要变化是在第11章和第12章,尤其是将第12章分成两章,其中新增的第13章专门介绍超连续谱产生现象。因为光子晶体光纤的设计和其他微结构光纤的最新进展,在本版本中,第11章和第12章新增的内容较多。其他所有章节也做了不同程度的更新。例如,第2章新增一节来介绍多模光纤中的非线性效应。第6章到第10章详细介绍了偏振问题,因为它们非常重要。而且,由于偏振问题涵盖的研究领域不断取得进展,第8章到第10章的变化较大。

本书的潜在读者包括高年级本科生、攻读硕士和博士学位的研究生、致力于光纤产业的工程师和技术人员,以及从事光纤光学和光通信研究的科学家。此修订版可以作为研究生和高年级本科生的非线性光纤光学课程的教科书,以及非线性光学、光纤光学或光通信课程的参考书。本书在每章的最后都提供了一定数量的习题,使之更适宜作为教材使用。

我要感谢对第五版的完成做出直接或间接贡献的所有人,特别是我的研究生,是他们的好奇心和求知欲使得本书在几方面有了改进。我的一些同事对本书第五版的出版也给予了不少帮助,他们不但阅读手稿,而且还提出有价值的意见或建议,在此向他们表示感谢。我还要感谢众多的读者,他们给我反馈了一些有用的信息。最后,我还要感谢我的妻子 Anne, 女儿 Sipra、Caroline 和 Claire, 感谢她们对我的工作的理解和支持。

Govind P. Agrawal
Rochester, NY

目 录

第1章 导论	1
1.1 历史的回顾	1
1.2 光纤的基本特性	2
1.2.1 材料和制造	2
1.2.2 光纤损耗	3
1.2.3 色度色散	4
1.2.4 偏振模色散	7
1.3 光纤非线性	9
1.3.1 非线性折射	10
1.3.2 受激非弹性散射	11
1.3.3 非线性效应的重要性	11
1.4 综述	12
习题	14
参考文献	14
第2章 脉冲在光纤中的传输	17
2.1 麦克斯韦方程组	17
2.2 光纤模式	19
2.2.1 本征值方程	19
2.2.2 单模条件	20
2.2.3 基模特性	20
2.3 脉冲传输方程	22
2.3.1 非线性脉冲传输	22
2.3.2 高阶非线性效应	25
2.3.3 喇曼响应函数及其作用	27
2.3.4 延伸到多模光纤	29
2.4 数值方法	31
2.4.1 分步傅里叶法	31
2.4.2 有限差分法	33
习题	34
参考文献	35
第3章 群速度色散	38
3.1 不同的传输区	38
3.2 色散感应的脉冲展宽	39
3.2.1 高斯脉冲	40
3.2.2 啁啾高斯脉冲	42
3.2.3 双曲正割脉冲	43
3.2.4 超高斯脉冲	43

3.2.5	实验结果	45
3.3	三阶色散	46
3.3.1	啁啾高斯脉冲的演化	47
3.3.2	展宽因子	48
3.3.3	任意形状脉冲	50
3.3.4	超短脉冲测量	52
3.4	色散管理	53
3.4.1	群速度色散引起的限制	53
3.4.2	色散补偿	54
3.4.3	三阶色散补偿	55
	习题	56
	参考文献	57
第4章	自相位调制	59
4.1	自相位调制感应频谱变化	59
4.1.1	非线性相移	59
4.1.2	脉冲频谱的变化	60
4.1.3	脉冲形状和初始啁啾的影响	63
4.1.4	部分相干效应	65
4.2	群速度色散的影响	66
4.2.1	脉冲演化	66
4.2.2	展宽因子	68
4.2.3	光波分裂	69
4.2.4	实验结果	71
4.2.5	三阶色散效应	72
4.2.6	光纤放大器中的自相位调制效应	74
4.3	半解析方法	75
4.3.1	矩方法	75
4.3.2	变分法	77
4.3.3	具体解析解	77
4.4	高阶非线性效应	79
4.4.1	自变陡效应	79
4.4.2	群速度色散对光波冲击的影响	81
4.4.3	脉冲内喇曼散射	83
	习题	85
	参考文献	85
第5章	光孤子	88
5.1	调制不稳定性	88
5.1.1	线性稳定性分析	88
5.1.2	增益谱	89
5.1.3	实验结果	91
5.1.4	超短脉冲产生	92
5.1.5	调制不稳定性对光波系统的影响	93

5.2	光孤子	95
5.2.1	逆散射法	95
5.2.2	基阶孤子	97
5.2.3	二阶和高阶孤子	98
5.2.4	实验验证	100
5.2.5	孤子稳定性	101
5.3	其他类型的孤子	103
5.3.1	暗孤子	103
5.3.2	双稳孤子	105
5.3.3	色散管理孤子	106
5.3.4	光相似子	106
5.4	孤子微扰	108
5.4.1	微扰法	109
5.4.2	光纤损耗	109
5.4.3	孤子放大	111
5.4.4	孤子相互作用	113
5.5	高阶效应	116
5.5.1	脉冲参量的矩方程	116
5.5.2	三阶色散	118
5.5.3	自变陡效应	119
5.5.4	脉冲内喇曼散射	121
5.5.5	飞秒脉冲的传输	124
	习题	126
	参考文献	126
第6章	偏振效应	132
6.1	非线性双折射	132
6.1.1	非线性双折射的起源	132
6.1.2	耦合模方程	134
6.1.3	椭圆双折射光纤	135
6.2	非线性相移	136
6.2.1	无色散交叉相位调制	136
6.2.2	光克尔效应	137
6.2.3	脉冲整形	140
6.3	偏振态的演化	141
6.3.1	解析解	141
6.3.2	邦加球表示法	143
6.3.3	偏振不稳定性	144
6.3.4	偏振混沌	146
6.4	矢量调制不稳定性	147
6.4.1	低双折射光纤	147
6.4.2	高双折射光纤	149
6.4.3	各向同性光纤	150

6.4.4	实验结果	151
6.5	双折射和孤子	153
6.5.1	低双折射光纤	153
6.5.2	高双折射光纤	154
6.5.3	孤子牵引逻辑门	156
6.5.4	矢量孤子	157
6.6	随机双折射	159
6.6.1	偏振模色散	159
6.6.2	非线性薛定谔方程的矢量形式	160
6.6.3	偏振模色散对孤子的影响	161
	习题	164
	参考文献	164
第7章	交叉相位调制	168
7.1	交叉相位调制感应的非线性耦合	168
7.1.1	非线性折射率	168
7.1.2	耦合非线性薛定谔方程	169
7.2	交叉相位调制感应的调制不稳定性	170
7.2.1	线性稳定性分析	170
7.2.2	实验结果	172
7.3	交叉相位调制配对孤子	173
7.3.1	亮-暗孤子对	173
7.3.2	亮-灰孤子对	174
7.3.3	周期解	175
7.3.4	多耦合非线性薛定谔方程	176
7.4	频域和时域效应	177
7.4.1	非对称频谱展宽	177
7.4.2	非对称时域变化	181
7.4.3	高阶非线性效应	183
7.5	交叉相位调制的应用	184
7.5.1	交叉相位调制感应的脉冲压缩	184
7.5.2	交叉相位调制感应的光开关	186
7.5.3	交叉相位调制感应的非互易性	187
7.6	偏振效应	188
7.6.1	交叉相位调制的矢量理论	188
7.6.2	偏振演化	189
7.6.3	偏振相关频谱展宽	190
7.6.4	脉冲捕获和压缩	192
7.6.5	交叉相位调制感应光波分裂	195
7.7	双折射光纤中的交叉相位调制效应	196
7.7.1	低双折射光纤	196
7.7.2	高双折射光纤	198
	习题	199
	参考文献	200

第8章 受激喇曼散射	203
8.1 基本概念	203
8.1.1 喇曼增益谱	203
8.1.2 喇曼阈值	204
8.1.3 耦合振幅方程	206
8.1.4 四波混频效应	208
8.2 准连续受激喇曼散射	209
8.2.1 单通喇曼产生	210
8.2.2 光纤喇曼激光器	211
8.2.3 光纤喇曼放大器	213
8.2.4 喇曼串扰	216
8.3 短泵浦脉冲的受激喇曼散射	217
8.3.1 脉冲传输方程	218
8.3.2 无色散情形	218
8.3.3 群速度色散效应	220
8.3.4 喇曼感应折射率变化	222
8.3.5 实验结果	223
8.3.6 同步泵浦光纤喇曼激光器	226
8.3.7 短脉冲喇曼放大	227
8.4 孤子效应	228
8.4.1 喇曼孤子	228
8.4.2 光纤喇曼孤子激光器	231
8.4.3 孤子效应脉冲压缩	232
8.5 偏振效应	233
8.5.1 喇曼放大的矢量理论	234
8.5.2 偏振模色散效应对喇曼放大的影响	237
习题	238
参考文献	239
第9章 受激布里渊散射	244
9.1 基本概念	244
9.1.1 受激布里渊散射的物理过程	244
9.1.2 布里渊增益谱	245
9.2 准连续受激布里渊散射	247
9.2.1 布里渊阈值	247
9.2.2 偏振效应	248
9.2.3 控制受激布里渊散射阈值的方法	249
9.2.4 实验结果	251
9.3 光纤布里渊放大器	253
9.3.1 增益饱和	253
9.3.2 放大器设计和应用	254
9.4 受激布里渊散射动力学	255
9.4.1 耦合振幅方程	256
9.4.2 利用Q开关脉冲的受激布里渊散射	257

9.4.3	受激布里渊散射感应的折射率变化	260
9.4.4	弛豫振荡	263
9.4.5	调制不稳定性混沌	264
9.5	光纤布里渊激光器	266
9.5.1	连续运转方式	266
9.5.2	脉冲运转方式	268
	习题	270
	参考文献	271
第 10 章	四波混频	275
10.1	四波混频的起源	275
10.2	四波混频理论	277
10.2.1	耦合振幅方程	277
10.2.2	耦合振幅方程的近似解	277
10.2.3	相位匹配效应	279
10.2.4	超快四波混频过程	280
10.3	相位匹配技术	281
10.3.1	物理机制	281
10.3.2	多模光纤中的相位匹配	281
10.3.3	单模光纤中的相位匹配	284
10.3.4	双折射光纤中的相位匹配	286
10.4	参量放大	289
10.4.1	早期工作的回顾	289
10.4.2	光纤参量放大器的增益谱和带宽	290
10.4.3	单泵浦结构	292
10.4.4	双泵浦结构	295
10.4.5	泵浦消耗效应	298
10.5	偏振效应	299
10.5.1	四波混频的矢量理论	300
10.5.2	参量增益的偏振相关性	301
10.5.3	线偏振和圆偏振泵浦	303
10.5.4	残余光纤双折射效应	305
10.6	四波混频的应用	308
10.6.1	参量振荡器	308
10.6.2	超快信号处理	309
10.6.3	量子关联和噪声压缩	311
10.6.4	相敏放大	312
	习题	313
	参考文献	314
第 11 章	高非线性光纤	318
11.1	非线性参量	318
11.1.1	n_2 的单位和数值	318
11.1.2	自相位调制法	320

11.1.3	交叉相位调制法	322
11.1.4	四波混频法	323
11.1.5	n_2 值的变化	323
11.2	石英包层光纤	326
11.3	空气包层锥形光纤	327
11.4	微结构光纤	330
11.4.1	设计和制造	330
11.4.2	模式和色散特性	331
11.4.3	空芯光子晶体光纤	333
11.4.4	布拉格光纤	334
11.5	非石英光纤	335
11.5.1	硅酸铅光纤	335
11.5.2	硫化物光纤	338
11.5.3	氧化铍光纤	338
11.6	脉冲在细芯光纤中的传输	339
11.6.1	矢量理论	340
11.6.2	频率相关的模式分布	341
	习题	342
	参考文献	343
第 12 章	新型非线性现象	347
12.1	孤子分裂和色散波	347
12.1.1	二阶和高阶孤子的分裂	347
12.1.2	色散波产生	349
12.2	脉冲内喇曼散射	353
12.2.1	通过孤子分裂增强的喇曼感应频移	353
12.2.2	互相关技术	356
12.2.3	通过喇曼感应频移调谐波长	357
12.2.4	双折射效应	359
12.2.5	喇曼感应频移的抑制	361
12.2.6	零色散波长附近的孤子动力学	364
12.2.7	多峰喇曼孤子	366
12.3	四波混频	368
12.3.1	四阶色散的作用	368
12.3.2	光纤双折射的作用	369
12.3.3	参量放大器和波长变换器	371
12.3.4	可调谐光纤参量振荡器	372
12.4	二次谐波产生	374
12.4.1	物理机制	374
12.4.2	热极化和准相位匹配	375
12.4.3	二次谐波产生理论	377
12.5	三次谐波产生	379
12.5.1	高非线性光纤中的三次谐波产生	379

12.5.2	群速度失配效应	380
12.5.3	光纤双折射效应	382
	习题	383
	参考文献	383
第 13 章	超连续谱产生	388
13.1	皮秒脉冲泵浦	388
13.1.1	非线性机制	389
13.1.2	2000 年后的实验进展	390
13.2	飞秒脉冲泵浦	392
13.2.1	微结构石英光纤	392
13.2.2	微结构非石英光纤	395
13.3	时域和频域演化	397
13.3.1	超连续谱的数值模拟	397
13.3.2	交叉相位调制的作用	400
13.3.3	交叉相位调制感应的捕获	402
13.3.4	四波混频的作用	405
13.4	连续(CW)或准连续(quasi-CW)光泵浦	406
13.4.1	非线性机制	407
13.4.2	实验进展	409
13.5	偏振效应	411
13.5.1	双折射微结构光纤	411
13.5.2	近各向同性光纤	412
13.5.3	各向同性光纤中的非线性偏振旋转	413
13.6	超连续谱的相干性	415
13.6.1	频域相干度	415
13.6.2	改善相干性的技术	417
13.6.3	频谱非相干孤子	419
13.7	光畸形波	421
13.7.1	脉冲间起伏的 L 形统计	421
13.7.2	控制畸形波统计的技术	422
13.7.3	再论调制不稳定性	423
	习题	426
	参考文献	426
附录 A	单位制	431
附录 B	非线性薛定谔方程的源代码	433
附录 C	缩写词	436
	中英文术语对照表	438

第 1 章 导 论

本章将对光纤的特性进行综述,这对于理解后面各章讨论的非线性效应是很重要的。

- 1.1 节 简要回顾光纤光学领域内取得的进展。
- 1.2 节 讨论诸如光损耗、色散、双折射等光纤的基本特性。由于光纤的色散特性在利用超短光脉冲探索非线性效应的研究中的重要性,故对其给予了特别的重视。
- 1.3 节 简单介绍由折射率的强度相关性和受激非弹性散射引起的各种非线性效应,在这些非线性效应中,利用光纤作为非线性介质,对自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)、受激喇曼散射(SRS)、受激布里渊散射(SBS)等做了广泛研究。在后面的不同章节中,将分别对每一种非线性效应进行讨论。
- 1.4 节 综述本书各章所讨论的光纤中的非线性效应及其内容安排和材料组织。

1.1 历史的回顾

早在 19 世纪,人们就已经知道全内反射现象,这是引导光在光纤中传输的基础。全内反射现象发现的背后有段有趣的历史,读者可以参考有关文献^[1]。虽然在 20 世纪 20 年代就制成了无包层的玻璃纤维^[2-4],但直到 20 世纪 50 年代,才知道使用包层能够改善光纤的特性,从而诞生了光纤光学这个领域^[5-8]。当时光纤受益于介电包层的思想并不很明显,但它却有着不寻常的历史^[1]。

这一领域在 20 世纪 60 年代发展十分迅速,当时的主要目的是利用玻璃光纤束传输图像^[9]。这些早期的光纤按现在的标准看具有很高的损耗(大于 1000 dB/km);然而这种情形到 1970 年发生了根本性的变化,与更早期的预见一致^[10],石英光纤的损耗降至 20 dB/km 以下^[11]。随着光纤制造技术的进一步发展^[12],1979 年已将 1.55 μm 波长附近的损耗降至仅 0.2 dB/km 的水平^[13],而在这一波长区域,损耗大小的限制主要来自于瑞利散射这个基本过程。

低损耗石英光纤的获得,不仅掀起了光纤通信领域的革命^[14-16],而且也促使了非线性光纤光学这个新领域的出现,最近的评述可参阅文献^[17,18]。早在 1972 年,就有人研究了单模光纤中的受激喇曼散射和受激布里渊散射^[19-21],这些工作促进了诸如光感应双折射、参量四波混频和自相位调制等其他非线性现象的研究^[22-26]。1973 年,有人提出了通过色散和非线性效应的相互作用将会导致光纤支持类孤子脉冲这样一个重要结论^[27],后来于 1980 年在实验中观察到了光孤子^[28]并在 20 世纪 80 年代导致了超短光脉冲的产生和控制方面的一些进展^[29-33]。另一个同样重要的进展是将光纤用于光脉冲压缩和光开关^[34-41]。1987 年,利用光纤非线性效应的压缩技术已产生了 6 fs 的脉冲^[42]。一些综述文章和专著介绍了这一领域在 20 世纪 80 年代所取得的巨大进展^[43-47]。

非线性光纤光学领域在 20 世纪 90 年代继续得到发展。当在光纤中掺入稀土元素并用其制作放大器和激光器时,又增添了一个新的研究内容。由于掺铒光纤放大器(EDFA)工作在 1.55 μm 波长附近,对光纤通信系统非常有用,因此引起了人们的极大关注^[48]。EDFA 的使用

导致了多信道光波系统设计上的革命^[14-16]。2000年以后,人们利用光纤中的两种非线性效应——受激喇曼散射和四波混频来研究和开发新型光纤放大器,这两种放大器不需要掺杂光纤,能够工作在任意波长区。事实上,喇曼放大器在现代通信系统中的应用已经相当普遍^[49]。基于四波混频的光纤参量放大器因其在超快信号处理中的潜在应用亦受到人们关注^[50]。

光纤放大器的出现同时加快了对光孤子的研究,并最终导致新型光孤子(如色散管理孤子和耗散孤子)概念的建立^[51-54]。另一个重大进展是光纤光栅,光纤光栅始于1978年^[55],在20世纪90年代得到发展,并成为光波技术不可分割的一部分^[56]。自从1996年以来,已经研究出了几种新型光纤(如光子晶体光纤、多孔光纤、微结构光纤及锥形光纤等)^[57-61],第11章将分别介绍它们。这类光纤在结构上的改变将影响其色散和非线性特性,尤其是使零色散波长移向可见光区。有些光纤具有两个零色散波长,于是在可见光和近红外区表现为反常色散。同时由于这类光纤的纤芯较细,其非线性效应大大增强,这种组合导致了各种各样的新型非线性效应(将在第12章中介绍)。能使人射光的频谱在相当短的光纤中展宽100倍以上的超连续谱现象将在第13章中讨论^[62-64]。随着以上这些研究的进展,非线性光纤光学这一领域在进入21世纪以后已得到迅猛发展,并将在不久的将来继续得到发展。

1.2 光纤的基本特性

最简单的光纤是由折射率略低于纤芯的包层包裹着纤芯组成的,纤芯和包层的折射率分别记为 n_1 和 n_c ,这样的光纤通常称为阶跃折射率光纤(step-index fiber),以区别于纤芯折射率从中心轴到纤芯-包层分界面逐渐变小的渐变折射率光纤(graded-index fiber)^[65-67]。图1.1给出了阶跃折射率光纤的横截面和折射率分布。描述光纤特性的两个参量分别是纤芯-包层相对折射率差 Δ ,定义为

$$\Delta = \frac{n_1 - n_c}{n_1} \quad (1.2.1)$$

以及由下式定义的归一化频率:

$$V = k_0 a (n_1^2 - n_c^2)^{1/2} \quad (1.2.2)$$

式中, $k_0 = 2\pi/\lambda$, a 为纤芯半径, λ 为光波波长。实际上,还常用纤芯直径(core diameter)来表征纤芯尺寸的大小,习惯上简称为芯径。本书中若无特殊说明,芯径指的均是纤芯直径。

参量 V 决定了光纤中能容纳的模式数量。2.2节将会讨论光纤的模式,其中将会表明,在阶跃折射率光纤中,如果 $V < 2.405$,则它只支持单模,满足这个条件的光纤称为单模光纤。单模光纤和多模光纤的主要区别在于纤芯半径,对于典型的多模光纤来说,其纤芯半径 $a = 25 \mu\text{m}$,而 Δ 的典型值约为 3×10^{-3} 的单模光纤要求 $a < 5 \mu\text{m}$ 。包层半径 b 的数值无太严格的限制,只要它大到足以把光纤模式完全封闭在纤芯内就满足要求,对单模和多模光纤,其标准值为 $b = 62.5 \mu\text{m}$ 。因为研究非线性效应大多用单模光纤,除非特别说明,本文中所指光纤均为单模光纤。

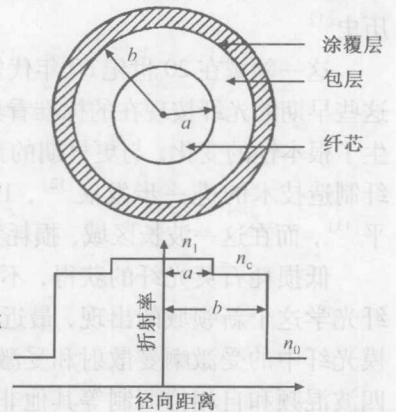


图1.1 阶跃折射率光纤的横截面与折射率分布示意图

1.2.1 材料和制造

用于制造低损耗光纤的材料是由熔融 SiO_2 分子合成的纯石英玻璃。纤芯和包层折射率的