



经典译丛



ELSEVIER

光学与光电子学

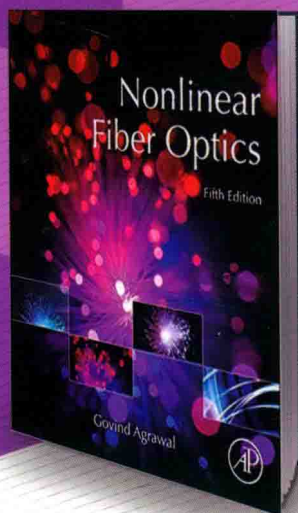
非线性光纤光学 (第五版)

Nonlinear Fiber Optics, Fifth Edition

【美】 Govind P. Agrawal 著

贾东方 葛春风 等译
李世忱 贾东方 审校

Nonlinear Fiber Optics, Fifth Edition



中国工信出版集团



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

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

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: 9780123970237

Copyright © 2013 Elsevier Inc. All rights reserved.

Authorized Chinese translation published by Publishing House of Electronics Industry.

Copyright © 2019 Elsevier Inc. and Publishing House of Electronics Industry. All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission in writing from Elsevier (Singapore) Pte Ltd. Details on how to seek permission, further information about the Elsevier's permissions policies and arrangements with organizations such as the Copyright Clearance Center and the Copyright Licensing Agency, can be found at our website: www.elsevier.com/permissions.

This book and the individual contributions contained in it are protected under copyright by Elsevier Inc. and Publishing House of Electronics Industry.

This edition of Nonlinear Fiber Optics, Fifth Edition is published by Publishing House of Electronics Industry under arrangement with ELSEVIER INC.

This edition is authorized for sale in mainland China, excluding Hong Kong, Macau and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本版由ELSEVIER INC.授权电子工业出版社在中国大陆(不包括香港、澳门以及台湾地区)出版发行。

本版仅限在中国大陆(不包括香港、澳门以及台湾地区)出版及标价销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受民事及刑事法律之制裁。

本书封底贴有Elsevier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:第五版/(美)戈文德·P.阿戈沃(Govind P. Agrawal)著;贾东方等译. —北京:电子工业出版社,2019.5

(经典译丛.光学与光电子学)

书名原文:Nonlinear Fiber Optics, Fifth Edition

ISBN 978-7-121-36403-7

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第079703号

责任编辑:马 岚

印 刷:山东华立印务有限公司

装 订:山东华立印务有限公司

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:28.5 字数:730千字

版 次:2019年5月第1版

印 次:2019年5月第1次印刷

定 价:99.00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, 88258888。

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

本书咨询联系方式: classic-series-info@phei.com.cn。

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

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

——译文

很高兴为我的书 *Nonlinear Fiber Optics, Fifth Edition* 的中文版——《非线性光纤光学》(第五版)的出版作序。这本书的英文版是由 Academic Press 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,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* 的前几版。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高质量的。我相信新的中文版一定会像前几个中文版那样保持它的高质量,并为每个读者所喜欢。

由于中译本的出版,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 Press 对翻译工作的许可。

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。特别是自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,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年翻译了作者在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、王泰立翻译了作者在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),同样由电子工业出版社出版。这本书由贾东方、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,除了新增超连续谱产生一章,几乎各章节都有所修订,第8章至第12章更新更多。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,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，其中利用光孤子的通信系统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材，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，他们不但阅读了手稿，而且还提出了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	3.2.2 啁啾高斯脉冲	43
1.1 历史的回顾	1	3.2.3 双曲正割脉冲	44
1.2 光纤的基本特性	2	3.2.4 超高斯脉冲	44
1.2.1 材料和制造	2	3.2.5 实验结果	46
1.2.2 光纤损耗	3	3.3 三阶色散	47
1.2.3 色度色散	4	3.3.1 啁啾高斯脉冲的演化	48
1.2.4 偏振模色散	7	3.3.2 展宽因子	49
1.3 光纤非线性	9	3.3.3 任意形状脉冲	51
1.3.1 非线性折射	10	3.3.4 超短脉冲测量	53
1.3.2 受激非弹性散射	11	3.4 色散管理	54
1.3.3 非线性效应的重要性	11	3.4.1 群速度色散引起的限制	54
1.4 综述	12	3.4.2 色散补偿	55
习题	14	3.4.3 三阶色散补偿	56
参考文献	14	习题	57
第2章 脉冲在光纤中的传输	18	参考文献	58
2.1 麦克斯韦方程组	18	第4章 自相位调制	60
2.2 光纤模式	20	4.1 自相位调制感应频谱变化	60
2.2.1 本征值方程	20	4.1.1 非线性相移	60
2.2.2 单模条件	21	4.1.2 脉冲频谱的变化	61
2.2.3 基模特性	21	4.1.3 脉冲形状和初始啁啾的影响	64
2.3 脉冲传输方程	23	4.1.4 部分相干效应	66
2.3.1 非线性脉冲传输	23	4.2 群速度色散的影响	67
2.3.2 高阶非线性效应	26	4.2.1 脉冲演化	67
2.3.3 喇曼响应函数及其作用	28	4.2.2 展宽因子	69
2.3.4 延伸到多模光纤	30	4.2.3 光波分裂	70
2.4 数值方法	32	4.2.4 实验结果	72
2.4.1 分步傅里叶法	32	4.2.5 三阶色散效应	73
2.4.2 有限差分法	34	4.2.6 光纤放大器中的自相位调制效应	75
习题	35	4.3 半解析方法	76
参考文献	36	4.3.1 矩方法	76
第3章 群速度色散	39	4.3.2 变分法	78
3.1 不同的传输区域	39	4.3.3 具体解析解	78
3.2 色散感应的脉冲展宽	40		
3.2.1 高斯脉冲	41		

4.4	高阶非线性效应	80	第6章	偏振效应	134
4.4.1	自变陡效应	80	6.1	非线性双折射	134
4.4.2	群速度色散对光波冲击的影响	82	6.1.1	非线性双折射的起源	134
4.4.3	脉冲内喇曼散射	84	6.1.2	耦合模方程	136
习题		86	6.1.3	椭圆双折射光纤	137
参考文献		86	6.2	非线性相移	138
第5章	光孤子	90	6.2.1	无色散交叉相位调制	138
5.1	调制不稳定性	90	6.2.2	光克尔效应	139
5.1.1	线性稳定性分析	90	6.2.3	脉冲整形	142
5.1.2	增益谱	91	6.3	偏振态的演化	143
5.1.3	实验结果	93	6.3.1	解析解	143
5.1.4	超短脉冲产生	94	6.3.2	邦加球表示法	145
5.1.5	调制不稳定性对光波系统的影响	95	6.3.3	偏振不稳定性	146
5.2	光孤子	97	6.3.4	偏振混沌	148
5.2.1	逆散射法	97	6.4	矢量调制不稳定性	149
5.2.2	基阶孤子	99	6.4.1	低双折射光纤	149
5.2.3	二阶和高阶孤子	100	6.4.2	高双折射光纤	151
5.2.4	实验验证	102	6.4.3	各向同性光纤	152
5.2.5	孤子稳定性	103	6.4.4	实验结果	153
5.3	其他类型的孤子	105	6.5	双折射和孤子	155
5.3.1	暗孤子	105	6.5.1	低双折射光纤	155
5.3.2	双稳孤子	107	6.5.2	高双折射光纤	156
5.3.3	色散管理孤子	108	6.5.3	孤子牵引逻辑门	158
5.3.4	光相似子	108	6.5.4	矢量孤子	159
5.4	孤子微扰	110	6.6	随机双折射	161
5.4.1	微扰法	111	6.6.1	偏振模色散	161
5.4.2	光纤损耗	111	6.6.2	非线性薛定谔方程的 矢量形式	162
5.4.3	孤子放大	113	6.6.3	偏振模色散对孤子的 影响	163
5.4.4	孤子互作用	115	习题		166
5.5	高阶效应	118	参考文献		166
5.5.1	脉冲参量的矩方程	118	第7章	交叉相位调制	170
5.5.2	三阶色散	120	7.1	交叉相位调制感应的非线性 耦合	170
5.5.3	自变陡效应	121	7.1.1	非线性折射率	170
5.5.4	脉冲内喇曼散射	123	7.1.2	耦合非线性薛定谔 方程	171
5.5.5	飞秒脉冲的传输	126	7.2	交叉相位调制感应的调制不稳 定性	172
习题		128			
参考文献		128			

7.2.1	线性稳定性分析	172	8.2	准连续受激喇曼散射	211
7.2.2	实验结果	174	8.2.1	单通喇曼产生	212
7.3	交叉相位调制配对孤子	175	8.2.2	光纤喇曼激光器	213
7.3.1	亮-暗孤子对	175	8.2.3	光纤喇曼放大器	215
7.3.2	亮-灰孤子对	176	8.2.4	喇曼串扰	218
7.3.3	周期解	177	8.3	短泵浦脉冲的受激喇曼散射	219
7.3.4	多耦合非线性薛定谔方程	178	8.3.1	脉冲传输方程	220
7.4	频域和时域效应	179	8.3.2	无色散情形	220
7.4.1	非对称频谱展宽	179	8.3.3	群速度色散效应	222
7.4.2	非对称时域变化	183	8.3.4	喇曼感应折射率变化	224
7.4.3	高阶非线性效应	185	8.3.5	实验结果	225
7.5	交叉相位调制的应用	186	8.3.6	同步泵浦光纤喇曼激光器	228
7.5.1	交叉相位调制感应的脉冲压缩	186	8.3.7	短脉冲喇曼放大	229
7.5.2	交叉相位调制感应的 光开关	188	8.4	孤子效应	230
7.5.3	交叉相位调制感应的 非互易性	189	8.4.1	喇曼孤子	230
7.6	偏振效应	190	8.4.2	光纤喇曼孤子激光器	233
7.6.1	交叉相位调制的矢量 理论	190	8.4.3	孤子效应脉冲压缩	234
7.6.2	偏振演化	191	8.5	偏振效应	235
7.6.3	偏振相关频谱展宽	192	8.5.1	喇曼放大的矢量理论	236
7.6.4	脉冲捕获和压缩	194	8.5.2	偏振模色散效应对喇曼 放大的影响	239
7.6.5	交叉相位调制感应光波 分裂	197	习题		240
7.7	双折射光纤中的交叉相位调制 效应	198	参考文献		241
7.7.1	低双折射光纤	198	第9章	受激布里渊散射	246
7.7.2	高双折射光纤	200	9.1	基本概念	246
习题		201	9.1.1	受激布里渊散射的物理 过程	246
参考文献		202	9.1.2	布里渊增益谱	247
第8章	受激喇曼散射	205	9.2	准连续受激布里渊散射	249
8.1	基本概念	205	9.2.1	布里渊阈值	249
8.1.1	喇曼增益谱	205	9.2.2	偏振效应	250
8.1.2	喇曼阈值	206	9.2.3	控制受激布里渊散射 阈值的方法	251
8.1.3	耦合振幅方程	208	9.2.4	实验结果	253
8.1.4	四波混频效应	210	9.3	光纤布里渊放大器	255
			9.3.1	增益饱和	255
			9.3.2	放大器设计 and 应用	256
			9.4	受激布里渊散射动力学	257

9.4.1	耦合振幅方程	258	10.5.4	残余光纤双折射效应	307
9.4.2	利用Q开关脉冲的受激 布里渊散射	259	10.6	四波混频的应用	310
9.4.3	受激布里渊散射感应的 折射率变化	262	10.6.1	参量振荡器	310
9.4.4	弛豫振荡	265	10.6.2	超快信号处理	311
9.4.5	调制不稳定性混沌	266	10.6.3	量子关联和噪声压缩	313
9.5	光纤布里渊激光器	268	10.6.4	相敏放大	314
9.5.1	连续运转方式	268	习题		315
9.5.2	脉冲运转方式	270	参考文献		316
习题		272	第11章	高非线性光纤	320
参考文献		273	11.1	非线性参量	320
第10章	四波混频	277	11.1.1	n_2 的单位和数值	320
10.1	四波混频的起源	277	11.1.2	自相位调制法	322
10.2	四波混频理论	279	11.1.3	交叉相位调制法	324
10.2.1	耦合振幅方程	279	11.1.4	四波混频法	325
10.2.2	耦合振幅方程的 近似解	279	11.1.5	n_2 值的变化	325
10.2.3	相位匹配效应	281	11.2	石英包层光纤	328
10.2.4	超快四波混频过程	282	11.3	空气包层锥形光纤	329
10.3	相位匹配技术	283	11.4	微结构光纤	332
10.3.1	物理机制	283	11.4.1	设计和制造	332
10.3.2	多模光纤中的相位 匹配	283	11.4.2	模式和色散特性	333
10.3.3	单模光纤中的相位 匹配	286	11.4.3	空芯光子晶体光纤	335
10.3.4	双折射光纤中的相位 匹配	288	11.4.4	布拉格光纤	336
10.4	参量放大	291	11.5	非石英光纤	337
10.4.1	早期工作的回顾	291	11.5.1	硅酸铅光纤	337
10.4.2	光纤参量放大器的增益 谱和带宽	292	11.5.2	硫化物光纤	340
10.4.3	单泵浦结构	294	11.5.3	氧化铍光纤	340
10.4.4	双泵浦结构	297	11.6	脉冲在细芯光纤中的传输	341
10.4.5	泵浦消耗效应	300	11.6.1	矢量理论	342
10.5	偏振效应	301	11.6.2	频率相关的模式分布	343
10.5.1	四波混频的矢量理论	302	习题		344
10.5.2	参量增益的偏振 相关性	303	参考文献		345
10.5.3	线偏振和圆偏振泵浦	305	第12章	新型非线性现象	348
			12.1	孤子分裂和色散波	348
			12.1.1	二阶和高阶孤子的 分裂	348
			12.1.2	色散波产生	350
			12.2	脉冲内喇曼散射	354
			12.2.1	通过孤子分裂增强的 喇曼感应频移	354

12.2.2 互相关技术·····	357	13.2.2 微结构非石英光纤·····	396
12.2.3 通过喇曼感应频移调 谐波长·····	358	13.3 时域和频域演化·····	398
12.2.4 双折射效应·····	360	13.3.1 超连续谱的数值模拟···	398
12.2.5 喇曼感应频移的抑制···	362	13.3.2 交叉相位调制的作用···	401
12.2.6 零色散波长附近的孤子 动力学·····	365	13.3.3 交叉相位调制感应的 捕获·····	403
12.2.7 多峰喇曼孤子·····	367	13.3.4 四波混频的作用·····	406
12.3 四波混频·····	369	13.4 连续(CW)或准连续(quasi-CW) 光泵浦·····	407
12.3.1 四阶色散的作用·····	369	13.4.1 非线性机制·····	408
12.3.2 光纤双折射的作用·····	370	13.4.2 实验进展·····	410
12.3.3 参量放大器和波长 变换器·····	372	13.5 偏振效应·····	412
12.3.4 可调谐光纤参量 振荡器·····	373	13.5.1 双折射微结构光纤·····	412
12.4 二次谐波产生·····	375	13.5.2 近各向同性光纤·····	413
12.4.1 物理机制·····	375	13.5.3 各向同性光纤中的非线性 偏振旋转·····	414
12.4.2 热极化和准相位匹配···	376	13.6 超连续谱的相干性·····	416
12.4.3 二次谐波产生理论·····	378	13.6.1 频域相干度·····	416
12.5 三次谐波产生·····	380	13.6.2 改善相干性的技术·····	418
12.5.1 高非线性光纤中的三次 谐波产生·····	380	13.6.3 频谱非相干孤子·····	420
12.5.2 群速度失配效应·····	381	13.7 光学怪波·····	422
12.5.3 光纤双折射效应·····	383	13.7.1 脉冲间起伏的L形 统计·····	422
习题·····	384	13.7.2 控制怪波统计的技术···	423
参考文献·····	384	13.7.3 再论调制不稳定性·····	424
第13章 超连续谱产生·····	389	习题·····	427
13.1 皮秒脉冲泵浦·····	389	参考文献·····	427
13.1.1 非线性机制·····	390	附录A 单位制·····	432
13.1.2 2000年后的实验进展···	391	附录B 非线性薛定谔方程的源代码···	433
13.2 飞秒脉冲泵浦·····	393	附录C 缩略语·····	436
13.2.1 微结构石英光纤·····	393	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）。能使入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

$$\Delta = \frac{n_1 - n_c}{n_1} \tag{1.2.1}$$

以及由下式定义的归一化频率：

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

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 节将讨论光纤的模式，其中将表明，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。

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

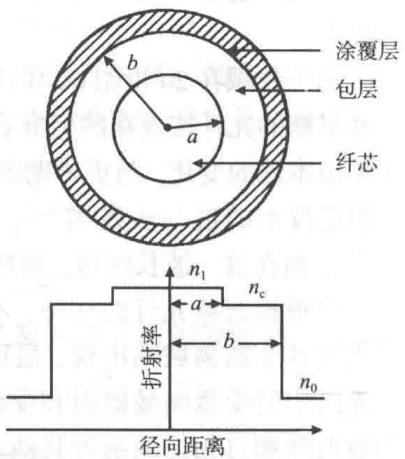


图 1.1 阶跃折射率光纤的横截面与折射率分布示意图

差是通过在制造过程中选择掺杂物来实现的。掺杂 GeO_2 和 P_2O_5 可以提高纯石英的折射率，因而适合作为纤芯；而硼(B)和氟(F)用来作为包层的掺杂物，因为它们能减小石英的折射率。对于特殊的应用，还可以采用另外一些掺杂物。例如，为制作光纤放大器和激光器，可以利用 ErCl_3 和 Nd_2O_3 这样的掺杂物，在石英光纤的纤芯中同时掺入稀土离子。

石英光纤的制造可以分为两个阶段^[68]：第一阶段，利用气相沉积法制造具有所需折射率分布和相对纤芯-包层尺寸的圆柱体预制棒，典型的预制棒长 1 m，直径为 2 cm。第二阶段，利用精密进给装置，以适当的速度把预制棒推进到高温炉拉成纤维。在此过程中，纤芯-包层相对尺寸保持不变。预制棒制造和光纤拉制这两个阶段都采用了一些复杂的技术，以保证纤芯尺寸和折射率分布的均匀性^[68~70]。

制造预制棒有几种方法，其中最常用的 3 种方法是改进化学气相沉积法(modified chemical vapor deposition, MCVD)、外气相沉积法(outside vapor deposition, OVD)和气相轴向沉积法(vapor-phase axial deposition, VAD)。图 1.2 给出了 MCVD 过程的示意图。在此过程中，在大约 1800 °C 高温下， SiCl_4 和 O_2 混合气体通过熔融石英管，在其内壁沉积 SiO_2 层。为确保沉积的均匀性，多嘴火焰在石英管长度范围内来回移动。通过向石英管中加入氟来控制包层的折射率。当内壁形成了具有足够厚度的包层后，将 GeCl_4 或 POCl_3 蒸气加入到混合蒸气中以形成纤芯。当各层均沉积好后，提高火焰的温度，使石英管坍塌，形成所谓的固态棒状预制棒。

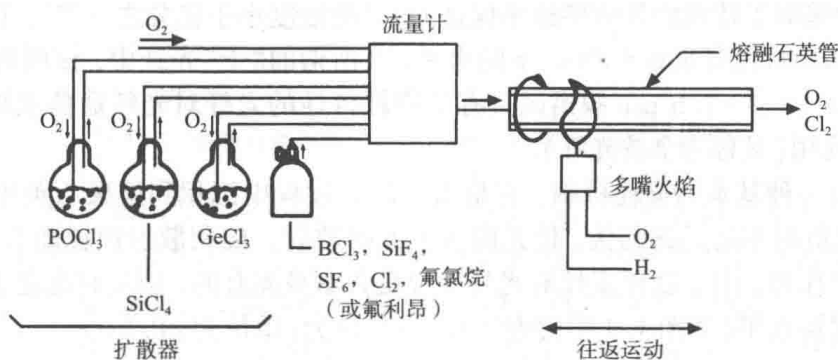


图 1.2 通常用于光纤制造的 MCVD 过程示意图^[68] (©1985 Elsevier)

以上描述极其简单，只给出了制造光纤预制棒的大致过程，实际上光纤的制造需要涉及大量的技术细节，对此感兴趣的读者可参阅这方面的文献^[68~70]。

1.2.2 光纤损耗

光纤的一个重要参量是光信号在光纤中传输时的功率损耗。若 P_0 是入射进光纤的功率，则透射功率为

$$P_T = P_0 \exp(-\alpha L) \quad (1.2.3)$$

式中， α 是衰减常量(attenuation constant)，或称为衰减系数(attenuation coefficient)，它是光纤损耗的量度， L 是光纤长度。习惯上光纤的损耗通过下式用 dB/km 单位来表示(见附录 A 有关分贝单位的说明)：

$$\alpha_{\text{dB}} = -\frac{10}{L} \log \left(\frac{P_T}{P_0} \right) = 4.343\alpha \quad (1.2.4)$$

上式可用于表征 α_{dB} 和 α 的关系。

正如所料，光纤损耗与光波长有关。图 1.3 给出了利用 MCVD 法制造的单模石英光纤的

损耗谱^[68], 该光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 处的损耗最小, 约为 0.2 dB/km 。显而易见, 在较短波长处有较高的损耗, 在可见光区损耗达几 dB/km 左右。然而值得注意的是, 即使是 10 dB/km 的损耗, 也仅仅对应于衰减常量 $\alpha \approx 2 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$, 相对于大多数其他材料而言, 这是一个惊人的低值。

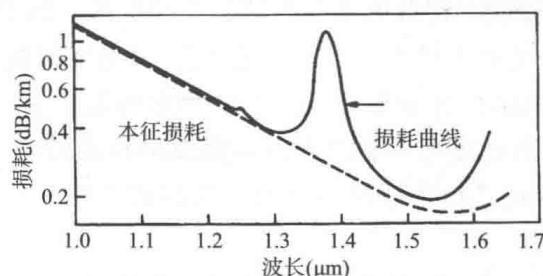


图 1.3 单模光纤的损耗曲线, 虚线表示纯石英中由瑞利散射和吸收引起的本征损耗^[68] (©1985 Elsevier)

有几个因素对图 1.3 中的损耗谱有贡献, 其中主要是材料吸收和瑞利散射(Rayleigh scattering)。石英玻璃在紫外区存在电子共振, 在波长超过 $2 \mu\text{m}$ 的远红外区存在振动共振, 但在 $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$ 波长区几乎没有吸收。然而, 即使极少量的杂质也能在这一波长窗口造成显著的吸收。实际上影响光纤损耗的最重要的杂质是基态振动吸收峰在约 $2.73 \mu\text{m}$ 处的氢氧根离子 OH^{-1} , 其吸收峰波长的谐波对应于图 1.3 中 $1.4 \mu\text{m}$ 附近的主吸收峰和 $1.23 \mu\text{m}$ 附近的次吸收峰, 因而在光纤制造过程中采取了特别的预防措施来保证 OH^{-1} 的浓度小于亿分之一^[68]。目前石英光纤在 $1.4 \mu\text{m}$ 附近的吸收峰也降至 0.5 dB 以下的水平, 在所谓的“干”光纤中, 该吸收峰实际上消失了^[71], 这种在整个 $1.3 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 频谱区具有低损耗特性的光纤对光纤通信系统十分有用, 到 2000 年已能够商用(又称为全波光纤)。

瑞利散射是一种基本的损耗机制, 它是由于制造过程中沉积到熔融石英中的随机密度涨落引起的, 导致折射率的局部起伏, 使光向各个方向散射。瑞利散射损耗随 λ^{-4} 变化, 因而主要对短波长区起作用, 由于这种损耗对光纤来说是其本身固有的, 因而它决定了光纤损耗的最终极限。本征损耗水平(如图 1.3 中的虚线所示)估计为(单位为 dB/km)

$$\alpha_R = C_R / \lambda^4 \quad (1.2.5)$$

式中, 常量 C_R 在 $0.7 \sim 0.9 \text{ dB}/(\text{km} \cdot \mu\text{m}^4)$ 范围, 其具体值与纤芯的成分有关。因为在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 附近, $\alpha_R = 0.12 \sim 0.15 \text{ dB/km}$, 所以在此波长处石英光纤的损耗主要是由瑞利散射引起的。在有些玻璃中, α_R 能减小到约为 0.05 dB/km 的水平^[72], 这种玻璃可用来制造超低损耗光纤。

可能造成光纤损耗的其他因素包括光纤弯曲和纤芯-包层界面处光的散射^[65]。现代光纤在 $1.55 \mu\text{m}$ 附近的损耗约为 0.2 dB/km 。由于熔接和成缆损耗, 用于光纤通信系统中的光缆的总损耗比此值略大一些。

1.2.3 色度色散

当一束电磁波与电介质的束缚电子相互作用时, 介质的响应通常与光波频率 ω 有关, 这种特性称为色度色散, 简称色散, 它表明了折射率 $n(\omega)$ 对频率的依赖关系。一般来说, 色散的起源与介质通过束缚电子的振荡吸收电磁辐射的特征谐振频率有关, 当远离介质谐振频率时, 折射率 $n(\omega)$ 可用塞尔迈耶尔(Sellmeier)公式很好地近似^[65],

$$n^2(\omega) = 1 + \sum_{j=1}^m \frac{B_j \omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2} \quad (1.2.6)$$

式中, ω_j 是谐振频率, B_j 为第 j 个谐振的强度, 式(1.2.6)中的求和号包含了所有对相关的频率范围有贡献的介质谐振频率。对于光纤而言, B_j 和 ω_j 与纤芯成分有关^[67], 实验上可通过取 $m=3$ 的式(1.2.6)与测得的色散曲线^[73]拟合得到。对于块体熔融石英玻璃, 这些参量值为^[74]: $B_1=0.696\,166\,3$, $B_2=0.407\,942\,6$, $B_3=0.897\,479\,4$, $\lambda_1=0.068\,404\,3\,\mu\text{m}$, $\lambda_2=0.1\,162\,414\,\mu\text{m}$, $\lambda_3=9.896\,161\,\mu\text{m}$, 这里 $\lambda_j=2\pi c/\omega_j$, c 为真空中的光速。图 1.4 给出了熔融石英的折射率 n 随波长的变化关系, 在可见光区, n 大约为 1.46, 但在 $1.5\,\mu\text{m}$ 波长附近此值将减小 1%。

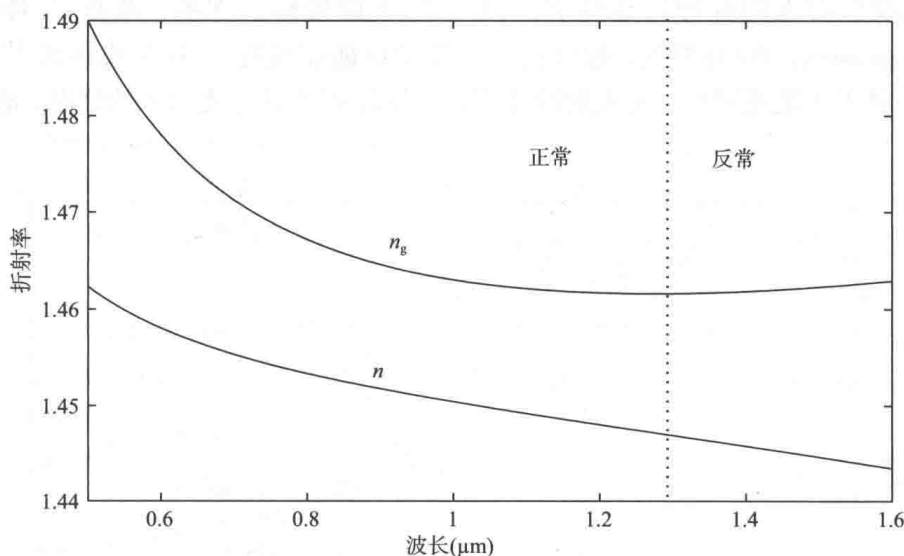


图 1.4 熔融石英的折射率 n 和群折射率 n_g 随波长的变化

由于光脉冲不同的频谱分量以不同的速度 $c/n(\omega)$ 传输, 因而光纤色散在短光脉冲的传输中起关键作用, 甚至当非线性效应不很严重时, 色散感应的脉冲展宽对光通信系统也是有害的。正如后面章节所讨论的, 在非线性区域, 色散和非线性的结合将导致性质不同的结果。从数学意义上讲, 光纤的色散效应是通过在脉冲频谱的中心频率 ω_0 附近将模传输常数 β 展开成泰勒级数来解释的,

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (1.2.7)$$

式中,

$$\beta_m = \left(\frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right)_{\omega=\omega_0} \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (1.2.8)$$

参量 β_1 和 β_2 与折射率 $n(\omega)$ 有关, 它们的关系可由下式得到:

$$\beta_1 = \frac{1}{v_g} = \frac{n_g}{c} = \frac{1}{c} \left(n + \omega \frac{dn}{d\omega} \right) \quad (1.2.9)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left(2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2 n}{d\omega^2} \right) \quad (1.2.10)$$

式中, n_g 是群折射率, v_g 是群速度。图 1.4 给出了熔融石英的群折射率 n_g 随波长的变化关系, 利用 $v_g = c/n_g$ 可以得到群速度。从物理意义上讲, 光脉冲包络以群速度移动, 而参量 β_2 表示群速度的色散, 它是造成脉冲展宽的原因, 这一现象称为群速度色散 (group-velocity dispersion, GVD), β_2 为群速度色散参量。实际情况下还常用到色散参量 $D = d\beta_1/d\lambda$, 它和 β_2 及 n 的

关系为

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \tag{1.2.11}$$

图 1.5 给出了利用式(1.2.6)和式(1.2.10)得到的 β_2 和 D 随波长 λ 的变化关系。一个显著特征是, β_2 和 D 均在 $1.27\text{ }\mu\text{m}$ 附近趋于零, 而对于更长的波长则改变符号, 这一波长称为零色散波长 (zero-dispersion wavelength), 记为 λ_0 。然而, 色散效应在 $\lambda = \lambda_0$ 处并不能完全消除, 因为在此波长附近的脉冲传输要求式(1.2.7)中应包括三次项, 系数 β_3 称为三阶色散 (third-order dispersion, TOD) 参量, 这种高阶色散效应能在线性^[65] 和非线性区^[75] 引起超短光脉冲的畸变。对于超短光脉冲, 或入射脉冲波长 λ 与 λ_0 相差只有几纳米的情况, 必须考虑三阶色散效应。

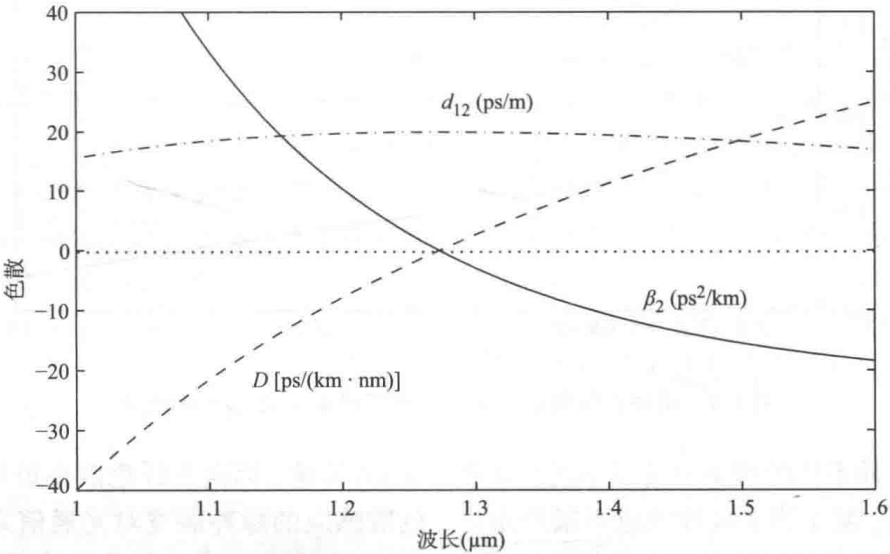


图 1.5 熔融石英中 β_2 , D 和 d_{12} 随波长的变化曲线, β_2 和 D 均在 $1.27\text{ }\mu\text{m}$ 附近的零色散波长处变为零

图 1.4 和图 1.5 所示曲线是针对块体熔融石英玻璃的结果。实际玻璃光纤的色散特性偏离了这些曲线, 原因有两方面。首先, 纤芯中有少量的掺杂物 GeO_2 和 P_2O_5 , 在这种情况下利用式(1.2.6)时, 参量值的选取要因纤芯的掺杂量而异, 即对于不同的掺杂量, 式中所取参量值要与之对应^[67]; 其次, 由于介电波导效应, 其有效模折射率略低于纤芯的材料折射率 $n(\omega)$, 因而减小了其本身对 ω 的依赖关系^[65~67], 于是在考虑材料色散的基础上还要考虑到波导色散的贡献, 二者之和才是总色散。通常, 除了在 $\lambda = \lambda_0$ 附近波导色散和材料色散可以相比拟, 波导色散对 β_2 的贡献相当小。波导色散的主要作用是使 λ_0 稍微移向长波长一端。标准光纤的 $\lambda_0 \approx 1.31\text{ }\mu\text{m}$ 。图 1.6 给出了单模光纤总色散的测量结果^[68], 图中绘出的是色散参量 D , 它和 β_2 之间的关系用式(1.2.11)表示。

波导色散的一个有趣特性是, 它对 D (或 β_2) 的影响取决于光纤设计参量, 如纤芯半径 a 和纤芯-包层折射率差 Δ 。光纤的这一特性可用来把零色散波长 λ_0 位移到有最小损耗的 $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 附近, 这种色散

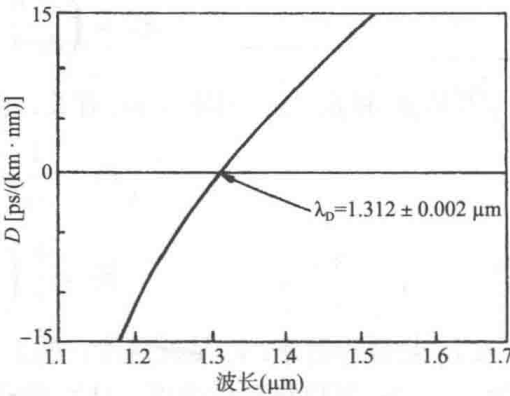


图 1.6 测量的单模光纤的色散参量 D 随波长的变化曲线^[68] (©1985 Elsevier)