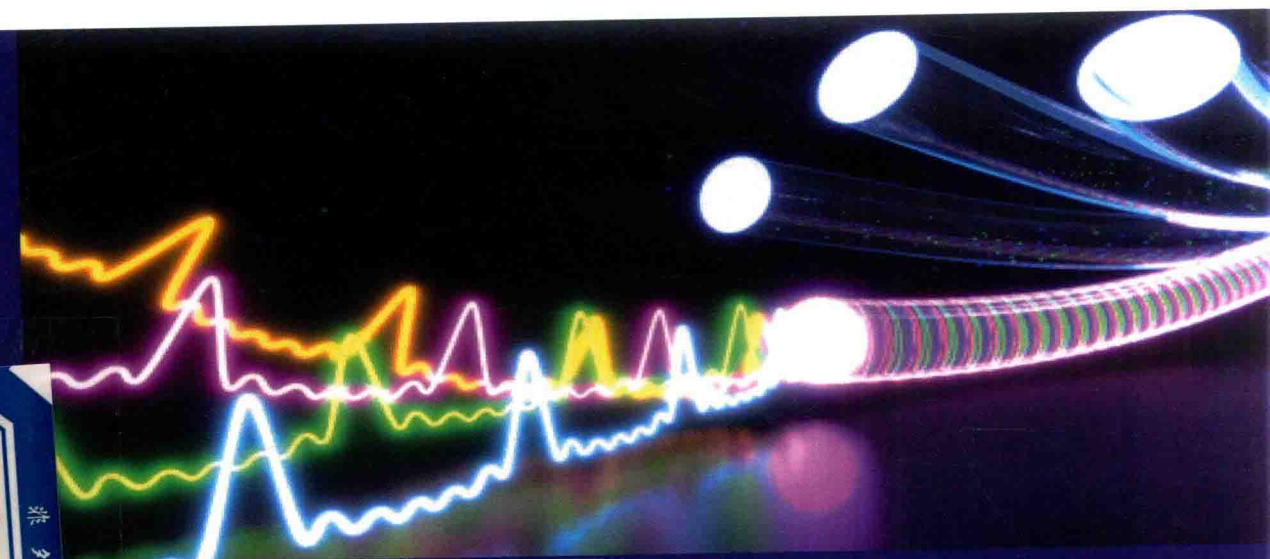


光学与光子学丛书

啁啾脉冲在光纤中的传输

郑宏军 黎 昕 白成林 著



非外借



科学出版社

光学与光子学丛书

啁啾脉冲在光纤中的传输

郑宏军 黎 昕 白成林 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

脉冲及其传输的性能研究是激光、光电子及光通信领域的永恒话题,其应用广泛。本书阐述了光纤通信系统中的关键光电子器件基础、不同光纤的传输系统特性,分析了脉冲传输理论基础与数值计算方法,利用数值计算和实验研究了啁啾光脉冲在不同光纤通信系统中的线性和非线性传输特性。本书内容主要包括啁啾脉冲在标准单模光纤系统、线性色散平坦光纤系统、凸形和凹形色散平坦光纤系统、色散离散渐减光纤系统、变参量光纤系统、双折射光纤系统、拉曼放大光纤系统中的传输特性;同时实验研究了模分复用前沿领域中新型少模光纤、新型模分复用器及其模式传输系统的性能。

本书适合激光、光电子、光通信等专业的学生或科技工作者学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

啁啾脉冲在光纤中的传输 / 郑宏军, 黎昕, 白成林著. —北京: 科学出版社, 2018.1

(光学与光子学丛书)

ISBN 978-7-03-056351-4

I. ①啁… II. ①郑… ②黎…③白… III. ①光脉冲-光纤传输技术 IV. ①TN781②TN818

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第010325号

责任编辑: 钱 俊 胡庆家 / 责任校对: 杜子昂

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 耕者设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018年1月第一次印刷 印张: 12 1/4

字数: 240 000

定价: 89.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

本丛书名由中国科学院院士母国光先生题写

光学与光子学丛书

《光学与光子学丛书》编委会

主 编 周炳琨

副主编 郭光灿 龚旗煌 朱健强

编 委 (按姓氏拼音排序)

陈家璧	高志山	贺安之	姜会林	李淳飞
廖宁放	刘 旭	刘智深	陆 卫	吕乃光
吕志伟	梅 霆	倪国强	饶瑞中	宋菲君
苏显渝	孙雨南	魏志义	相里斌	徐 雷
宣 丽	杨怀江	杨坤涛	郁道银	袁小聪
张存林	张书练	张卫平	张雨东	赵 卫
赵建林	朱晓农			

前 言

脉冲及其传输的性能研究是光通信研究的永恒话题,但鉴于实验条件等因素的限制,以往的脉冲传输与测量实验大多采用自相关技术等测量脉冲时域特性,不能准确得到脉冲的时域波形等特性。考虑到脉冲通常具有较大的频率啾啾且可以通过预啾啾技术等调节啾啾,提出采用能够准确测量脉冲时域波形等特性的二次谐波频率分辨光学门(SHG-FROG)前沿热点技术实验研究啾啾光脉冲在不同光纤通信系统中线性和非线性传输特性并作了深入系统的理论研究;数值分析与实验研究了啾啾脉冲在标准单模光纤系统、线性色散平坦光纤系统、凸形和凹形色散平坦光纤系统、色散离散渐减光纤系统、变参量光纤系统、双折射光纤系统、拉曼放大光纤系统中的传输特性;实验研究了模式复用前沿领域中新型少模光纤、新型模分复用器及其模式传输系统的性能;为光纤通信系统及其关键光电子器件设计和优化提供了重要的理论和实验依据。

本书共8章。第1章主要介绍啾啾脉冲传输若干关键技术研究现状、主要问题以及脉冲传输理论基础与数值计算方法;第2章深入分析啾啾脉冲实验测量原理与啾啾脉冲自相关特性;第3章理论分析与实验研究啾啾脉冲的线性传输特性;第4章揭示啾啾脉冲在标准单模光纤通信系统中的非线性传输演化规律;第5章在研究啾啾脉冲线性与非线性传输机理基础上,进一步实验和数值研究啾啾脉冲在色散平坦光纤正常色散区、色散离散渐减光纤系统、变参量光纤系统、双折射光纤系统等特种光纤系统中的传输性能,重点分析了脉冲输入功率、脉冲啾啾参量、脉冲间隔、光纤系统色散参量、非线性参量等对传输特性的影响;第6章研究啾啾脉冲在凸形和凹形色散平坦光纤系统中所产生超连续谱的特性;第7章讨论拉曼放大对啾啾脉冲传输特性的影响,提出了利用啾啾脉冲传输实验测量拉曼增益放大系数的新方法;第8章提出并实验研究模式复用前沿领域中新型少模光纤、新型模分复用器及其模式传输系统的性能。

本书相关工作得到了上海交通大学胡卫生教授及其课题组、University of Central Florida (CREOL) 的 Guifang Li 教授及其课题组、北京交通大学吴重庆教授及其课题组、华中科技大学徐静平教授及其课题组、刘山亮教授的热情指导和帮助!在此表示衷心感谢!同时本书相关工作得到了国家自然科学基金(项目编号:61671227, 61431009, 60778017 和 60877057), 山东省自然科学基金(项目编号:ZR2011FM015), “泰山学者”建设工程专项经费,山东省教育厅重点科技计划

项目(项目编号: J05C09), “区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室”开放基金(项目编号: 2011GZKF031101)等的资助, 在此一并表示衷心感谢!

本书是我们研究工作的初步梳理和总结, 由于水平有限, 再加上光纤通信技术及其应用迅猛发展、日新月异, 书中难免存在不妥之处, 敬请各位读者批评指正。

作 者

2017 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 脉冲传输若干关键技术的国内外研究现状	1
1.2 啁啾脉冲传输若干关键技术研究中存在的主要问题	4
1.3 光纤通信系统与脉冲传输理论	6
1.3.1 光纤通信系统中的关键光电子器件基础	6
1.3.2 光纤的基本特性	9
1.3.3 脉冲的基本传输方程	12
1.3.4 脉冲传输的数值计算方法	15
1.4 本章小结	17
参考文献	17
第 2 章 啁啾脉冲实验测量原理与啁啾脉冲自相关特性	33
2.1 频率分辨光学门技术原理	33
2.1.1 二次谐波-频率分辨光学门脉冲分析仪的数据测量	33
2.1.2 强度自相关曲线和自相关频谱曲线	35
2.1.3 波形和相位恢复算法的实现	35
2.2 啁啾脉冲自相关特性及其受噪声的影响	36
2.2.1 啁啾脉冲的自相关特性曲线随 m 和 $ C $ 的变化	38
2.2.2 脉冲噪声对超高斯脉冲及其自相关特性的影响	40
2.2.3 仪器随机噪声对超高斯脉冲自相关特性的影响	43
2.2.4 滤除随机噪声方法的应用实验	44
2.3 本章小结	46
参考文献	46
第 3 章 啁啾脉冲的线性传输研究	49
3.1 啁啾脉冲的线性传输实验与理论分析	49
3.1.1 脉冲传输前的实验测量	49
3.1.2 实验测量分析方法	52
3.1.3 脉冲传输前的实验测量分析	53
3.1.4 脉冲线性传输后的实验测量分析	54

3.1.5	高斯脉冲线性传输理论	56
3.1.6	脉冲线性传输的数值分析与讨论	58
3.2	啁啾双曲正割脉冲的线性传输	59
3.2.1	线性啁啾双曲正割脉冲的特性参量	59
3.2.2	双曲正割脉冲线性传输的数学模型	61
3.2.3	双曲正割脉冲线性传输的特性	61
3.3	啁啾指数脉冲的线性传输	66
3.3.1	啁啾指数脉冲的特性	66
3.3.2	初始线性啁啾指数脉冲的线性传输特性	68
3.3.3	初始非线性啁啾对脉冲时域波形的影响	69
3.4	本章小结	71
	参考文献	71
第 4 章	啁啾脉冲在标准单模光纤通信系统中的非线性传输研究	77
4.1	啁啾脉冲演化成孤子的实验研究	77
4.1.1	实验装置	77
4.1.2	实验结果与分析	78
4.1.3	讨论	84
4.2	啁啾孤子演化和传输的数值分析	85
4.2.1	输入脉冲特性	85
4.2.2	啁啾孤子的演化形成	86
4.2.3	啁啾孤子的传输特性	88
4.3	啁啾指数脉冲的非线性传输特性	89
4.3.1	指数脉冲非线性传输的数学模型	89
4.3.2	$A=1$ 时指数脉冲的非线性传输特性	90
4.3.3	$A=2$ 时指数脉冲的非线性传输特性	92
4.4	本章小结	95
	参考文献	96
第 5 章	啁啾脉冲在特种光纤通信系统中传输特性的研究	99
5.1	啁啾脉冲在色散平坦光纤正常色散区的传输特性	99
5.1.1	实验装置	99
5.1.2	实验结果与分析	100
5.1.3	讨论与结论	104
5.2	色散离散渐减光纤中的啁啾脉冲压缩	105
5.2.1	输入光脉冲的特性实验测量	105

5.2.2 脉冲压缩的时域特性数值计算与实验测量分析	107
5.2.3 讨论与总结	109
5.3 啁啾光脉冲在变参量系统中传输特性的研究	110
5.3.1 理论模型	111
5.3.2 数值研究	112
5.3.3 讨论与小结	115
5.4 啁啾脉冲的碰撞特性	116
5.4.1 双折射光纤中孤子碰撞的理论模型	116
5.4.2 初始线性啁啾对孤子碰撞特性的影响	117
5.4.3 讨论与小结	122
5.5 本章小结	123
参考文献	123
第 6 章 啁啾脉冲的超连续谱	129
6.1 啁啾脉冲在凸形色散平坦光纤中的超连续谱	129
6.1.1 凸形色散平坦光纤中产生超连续谱的理论模型	129
6.1.2 凸形色散平坦光纤中的超连续谱数值计算与分析	131
6.2 啁啾脉冲在凹形色散平坦光纤中的超连续谱	135
6.2.1 凹形色散平坦光纤中产生超连续谱的理论模型	135
6.2.2 凹形色散平坦光纤中的超连续谱数值计算与分析	136
6.3 本章小结	141
参考文献	142
第 7 章 啁啾脉冲拉曼放大及其增益系数测量	144
7.1 啁啾脉冲在拉曼放大系统中的传输特性	144
7.1.1 拉曼放大的实验装置	144
7.1.2 拉曼放大的实验结果与讨论	145
7.1.3 拉曼放大的数值计算与分析	150
7.1.4 讨论与结论	153
7.2 啁啾脉冲在拉曼放大系统中的增益系数测量	153
7.2.1 拉曼放大的系数测量原理	153
7.2.2 拉曼增益系数的实验测量	154
7.2.3 计算讨论与结论	160
7.3 本章小结	160
参考文献	161

第 8 章 新型少模光纤、少模复用器及少模脉冲传输	164
8.1 少模光纤和少模复用器	165
8.1.1 少模光纤的结构与特性	165
8.1.2 少模模分复用器的结构与特性	171
8.2 少模光纤系统中的模拟信号传输	173
8.2.1 少模光纤系统中的模拟传输实验装置	174
8.2.2 实验结果与讨论	175
8.3 少模光纤系统网络中的数字脉冲传输	177
8.3.1 少模光纤系统网络中的数字传输实验装置	178
8.3.2 少模数字脉冲传输特性的实验测量与分析	180
8.4 本章小结	182
参考文献	182

第1章 绪 论

自 1960 年美国科学家 Maiman 成功研制世界上第一台激光器(红宝石激光器)^[1]以来,固体、液体、气体和半导体等各种激光器在短时间内相继问世,为科学研究提供了崭新的有效工具。技术上的重大突破,催生了光电子学和激光物理学等系列新学科。之后,激光及其光电子技术取得了迅速的发展,并广泛应用于工农业生产^[2-4]、生命科学^[5]、信息科学^[6-13]、强场物理^[14-24]、“快点火”受控核聚变^[25-32]、探索极端物理条件下物质行为等重大科学研究领域,在整个经济及社会发展中发挥出越来越重要的作用。随着激光及其光电子技术的发展,至 1970 年,人们已经将光纤损耗降低到约 20dB/km;到 1979 年,将 1.55 μm 波长的光纤损耗降低到约 0.2dB/km^[33]。低损耗光纤的获得,不仅导致了光纤通信领域的革命,而且也导致了非线性光纤光学新领域的出现。随后,掺铒光纤放大器得到了迅速发展^[34-48],有效补偿了 1.55 μm 波长区的光纤损耗,有力地推动了线性和非线性光纤光学的快速发展,激光光源(半导体激光光源、光孤子光源和波分复用光纤通信系统的超连续谱光源等),放大器(半导体光放大器、掺铒光纤放大器和拉曼放大器等),光电探测器件,调制器、波分复用和解复用器、耦合器和光开关器件等都取得了突破性进展,光纤通信技术不断得到阶段性的飞跃。大多数光电子器件中使用了光纤,与光纤通信系统及其关键光电子器件相关的激光脉冲在光纤中的线性和非线性传输特性研究得到了国际科技工作者的普遍关注^[49-149]。

1.1 脉冲传输若干关键技术的国内外研究现状

为了研究脉冲在线性和非线性传输过程中的波形、相位和啁啾(chirp)等特性,人们进行了长期的积极探索。脉冲线性传输的研究在光纤通信等领域中仍然占据重要地位,并不断取得高速率、大容量的新成果^[51-78]。例如,文献[51]采用波分复用超连续谱光源、CS-RZ 码流、色散管理技术完成了 81 $\times$ 40Gbit/s、80km 的线性传输实验,误码率达到 10^{-9} 。文献[52]采用超连续谱产生的 1046 个信道光源(信道间隔 6.25GHz)在单模光纤中完成了 1046 $\times$ 2.67Gbit/s、126km 的超密集波分复用传输实验。文献[53—55]分别研究了 PAM4 调制格式 2 $\times$ 64Gbit/s 标准单模光纤

70km 传输, 无源光网络 PAM4 调制格式突发模式 25Gbit/s 数据上行传输, PAM4 调制格式 4×56.25Gbit/s 标准单模光纤 80km 传输。文献[56—60]分别分析了 16QAM 调制格式、224Gbit/s、单边带直接探测、标准单模光纤 160km 传输, 64QAM 调制格式、3.84Tbit/s、单信道奈奎斯特脉冲传输 150km, 42.3Tbit/s、18Gbaud、64QAM 调制格式、C 波段、WDM 相干传输 160km, PDM-16QAM 调制格式、65-Gbaud、1.6Tbit/s(4×400Gbit/s)标准单模光纤 205km 数据上行传输, QAM-PAM 调制格式、280Gbit/s、偏振复用传输 320km。文献[61]和[62]研究了少模模式复用传输; 文献[63—65]对用于模式复用传输的光子灯笼进行了研究; 文献[66]和[67]分别研究了 3×10Gbit/s、20km 少模模式组传输, 5Tbit/s、2.2km 少模模式组传输; 文献[68]和[69]研究了轨道角动量模式传输; 文献[70—78]研究了啁啾脉冲产生与传输放大。

自 1973 年, Hasegawa 在脉冲非线性传输中提出光孤子概念以来^[79], 光孤子脉冲的非线性传输理论和实验得到了普遍研究^[79-149]。1974 年, 文献[85]提出采用逆散射方法求解非线性问题, 随后孤子脉冲的非线性理论不断得到完善。1980 年, Mollenauer 等在脉冲传输实验中发现光孤子, 极大地促进了脉冲非线性传输的研究^[86]。为了将孤子脉冲周期性地放大传输, 就必须克服光纤损耗。目前, 通常采用的孤子放大方法有掺铒光纤放大器的集总放大方式、分布式拉曼放大方式或前两者相结合的方式。在国内外光孤子通信系统的研究与开发中, 采用这些方法已进行了一系列现场实验并取得了可喜成果。文献[87]实现了单信道 5Gbit/s、15000km 和双通道 10Gbit/s、11000km 的孤子传输实验。文献[88]实现了 4×20Gbit/s、2000km^[89]和 16×20Gbit/s、1300km 的波分复用孤子传输实验。文献[90]采用色散补偿技术进行了单信道 20Gbit/s、传输距离为 2000km 的光孤子东京城域网传输实验; 文献[91]实现了 2×80Gbit/s、10000km 的孤子传输实验。文献[92]采用色散管理孤子技术完成了 40Gbit/s、1000km 的传输实验。Gouveia-Neto, Iwatsuki, Murphy 和 Mollenauer 等利用拉曼放大进行了孤子脉冲产生^[93]、啁啾孤子脉冲压缩^[94-95]和孤子脉冲传输的研究^[96-105]。其中, Murphy 利用拉曼放大将 20ps 啁啾孤子压缩为 1.3ps^[95]; Mollenauer 等利用 1460nm CW 拉曼泵浦实现了 10ps、1560nm 孤子脉冲在 10km 单模光纤中的传输实验^[96]。Iwatsuki 等利用 1450nm 和 1480nm CW 双向拉曼泵浦实现了 5Gbit/s、1550nm 孤子脉冲在 23km 色散位移光纤中的传输实验, 误码率为 2×10^{-10} ^[97]。Okhrimchuk 等利用 1240nm 拉曼泵浦和 24km 单模光纤环实现了 10Gbit/s、10000km 孤子传输实验^[98]。Ereifej 等利用 1455nm 拉曼泵浦、色散位移光纤和单模光纤混合光纤环将 5ps、10GHz 孤子脉冲调制成 10Gbit/s 码流并复用成 40Gbit/s 孤子码流, 实现了 40Gbit/s 孤子码流在色散管理孤子系统中无误码传输 5300km 和 7500km^[99]。Pincemin 等研究了拉曼放大对 $N \times 20$ Gbit/s 波

分复用系统中色散管理孤子在信道内相互作用和信道间碰撞的影响,表明拉曼放大能有效减少脉冲信道内相互作用和信道间碰撞的影响^[100]。Tio 等数值分析了孤子脉冲在拉曼放大器中的传输^[101-105]。文献[106—109]研究了光纤激光器中的非线性孤子脉冲现象;文献[110—117]研究了色散波演化成基阶孤子脉冲、孤子光纤振荡器、中红外孤子脉冲产生、呼吸孤子脉冲、飞秒拉曼孤子脉冲、色散管理孤子脉冲、多级孤子脉冲压缩、孤子与非线性傅里叶变换;文献[118—120]研究了孤子脉冲的自频移现象;文献[121—125]研究了明暗孤子相互作用、双孤子脉冲以及多孤子脉冲的特性和相互作用;文献[126—128]研究了少模光纤、多模光纤中的孤子脉冲相互作用和压缩。

近年来,世界各国相继提出了光孤子通信的发展计划。例如,日本星计划项目(Star Project),旨在采用孤子技术构建全球距离的 Tbit/s 全光网,以满足急剧增长的多媒体、数据等业务需求,使现有的通信网改建升级为下一代通信网基础设施。美国 MIT 林肯实验室主持超快孤子多接入网计划,该计划研究单信道 100Gbit/s 的 TDM 多接入网的网络结构、节点与收发设备等关键技术。荷兰飞利浦光子研究中心主持的欧洲升级计划目标是在欧洲网已铺设的标准单模光纤上采用光孤子传输,为欧洲的通信干线增大容量。法国电信(CNET)制订的致力于 WDM 孤子传输技术产业化,实现 1Tbit/s、1000km 孤子传输的科技发展计划等,以及最近提出的孤子通信系统 ITU-T 标准建议等都表明孤子通信系统是下一代光纤通信系统的优选方案。

在国家自然科学基金、国家“863”计划和相关部委等的支持下,中国有许多科研院所开展了光孤子通信理论与实验研究,主要研究了光孤子光源、光孤子补偿放大器、孤子传输理论和传输实验,并取得了许多成果。Liu 等通过引入新的因变量变换给出了修正的非线性薛定谔方程在不同条件下的孤子解,并分析了孤子解的特征^[129-131]。高以智、许宝西、杨祥林和余建军等采用半导体光孤子光源,利用掺铒光纤放大器对孤子脉冲放大后,在色散位移光纤中进行了长距离传输研究^[132-136];余建军等在不同色散光纤的光纤链中进行了孤子传输的实验^[137];张晓光等以色散补偿光纤作为色散补偿器件成功实现了 10GHz、38km 色散管理孤子的传输实验^[138]。曹文华等研究了拉曼放大作用下的孤子脉冲传输等情况^[139-141];其中,曹文华等计算模拟了在色散缓变光纤中利用拉曼泵浦脉冲产生拉曼孤子脉冲的情况^[139]。李宏等数值研究了利用调制拉曼泵浦脉冲来控制暗孤子的传输^[140],表明调制拉曼泵浦进行传输控制,不仅可以有效地抑制暗孤子的时间抖动,同时还明显降低了暗孤子间的相互作用。沈廷根等研究发现^[141],在光子晶体光纤的各个线缺陷中掺入拉曼增益介质,能够对孤子脉冲进行拉曼放大。文献[142—149]研究了矢量孤子、耗散孤子、涡旋光孤子、Peregrine 孤子、近红外波段宽带孤子

及其传输放大特性。贾东方、刘颂豪、庞小峰、杨祥林和黄景宁等的著作或译作对我国光孤子理论和实验研究作出了较大的贡献^[80-84]。国内光孤子研究的技术基础相对较弱,面临的技术难度较大,研究经费不足等,导致研究工作进展缓慢,与国外研究的差距较大。目前华南师范大学、华中科技大学、北京邮电大学、山西大学、天津大学、内蒙古大学、南京邮电学院、聊城大学等部分单位仍然坚持研究。

1.2 啁啾脉冲传输若干关键技术研究中存在的主要问题

由于受到实验条件等各种因素的限制,在以往的激光脉冲传输与测量实验中大多采用自相关技术等测量脉冲时域特性^[80, 86, 93-98, 132-138, 150-168],不能准确得到脉冲的时域波形、相位和啁啾等信息,而仅注重输入、输出脉冲的宽度及其变化等。电光条纹相机^[169]虽然能够较准确地测量光强的空间或时间分布,但受到光谱响应特性限制,不适于测量长波长光脉冲,且价格昂贵、结构复杂、操作苛刻。频率分辨光学门(FROG)测量技术^[168, 170-191]经过十几年的研究和发展,可以有效抑制背景且具有较高的动态范围,能够准确测量脉冲的时域波形、相位和啁啾等特征信息,并能较全面地测量各种脉冲特性。就作者所知,目前国内外了解和应用这种技术进行脉冲传输研究的科研人员还为数不多。研究发现,脉冲通常具有较大频率啁啾,其频率啁啾的变化对脉冲特性的影响较大^[168, 192-208],且频率啁啾可以通过改变传输长度、采用啁啾光栅技术或预啁啾技术等进行调节^[168]。显然,利用能够准确测量脉冲的时域波形等特性的二次谐波频率分辨光学门(SHG-FROG)技术实验研究啁啾脉冲在光纤通信系统中的线性和非线性传输特性,并对脉冲传输作深入系统的理论研究是一项创新性工作,可以为光纤通信系统及其关键光电子器件设计和优化提供重要的理论和实验依据。

线性传输问题,考虑到以往实验条件等各种因素的限制,利用 SHG-FROG 技术实验研究 10GHz 短脉冲在色散平坦光纤中的线性传输特性,并对脉冲传输作深入的理论研究非常重要。在此研究基础上,有必要进一步研究其他脉冲的线性传输特性。自从在非线性传输中提出光孤子概念以来^[79],关于双曲正割脉冲的研究受到了广泛关注,但是其研究工作大多限于非线性传输中^[80-84, 86-149, 206-208]。双曲正割脉冲线性传输特性的变化规律很难解析给出,人们对其线性传输规律的认识受到很大限制。以往对指数脉冲的研究仅限于 $T \geq 0$ 的情况^[209-211],双边指数脉冲($-\infty < T < \infty$)的传输特性难于解析研究。鉴于此,研究啁啾双曲正割脉冲和啁啾双边指数脉冲的线性传输特性是一项创新的工作,可以填补人们对两脉冲线性传输认识的国际空白。

非线性传输问题,特别是由非线性薛定谔方程所描述的孤子问题出现在现代科学的各个分支中,例如,信息科学中的光纤孤子可以用非线性薛定谔方程描述。由于光孤子具有广阔、明朗的应用前景和易于实验研究等特点,几十年来得到了广泛的研究和发展,为物理学、信息科学、生命科学、等离子体和其他学科中众多的类似问题的解决作出了重大贡献^[80-84]。鉴于以往自相关技术实验条件等各种因素的限制^[80, 86, 93-98, 132-138, 150-168],利用 SHG-FROG 技术实验研究啁啾脉冲在光纤中传输前后脉冲宽度、波形、啁啾和时间带宽积等的变化以及脉冲演化形成孤子的规律和特点并作系统的理论研究具有创新性。在此基础上,进一步研究双边指数脉冲($-\infty < T < \infty$)等的非线性传输特性非常重要。这对光孤子光源及其通信系统的设计和优化具有重要指导作用。

近年来,光纤超连续谱广泛应用于波分复用光通信系统、超连续谱激光源等关键光电子器件^[80, 51, 52, 212-225]、超短脉冲产生^[226-228]、光学相干层析和光谱分析^[229-231]等重要领域,其研究得到了广泛关注。人们对在色散位移光纤、色散平坦光纤、色散平坦渐减光纤、光子晶体光纤等多种光纤中产生的超连续谱进行了理论和实验研究,其中凸形色散分布平坦光纤或平坦渐减光纤中产生的超连续谱特性较好^[232-238]。以往的文献通常以无啁啾的双曲正割脉冲为入射脉冲研究光纤中的超连续谱。考虑到实际脉冲源通常具有较大频率啁啾,以啁啾高斯脉冲为入射脉冲,研究线性频率啁啾对啁啾高斯脉冲产生超连续谱的影响,并与啁啾双曲正割脉冲产生超连续谱的情况进行了比较,可为我们利用啁啾脉冲获得最佳超连续谱和实现波分复用光纤通信系统超连续谱光源的优化设计提供重要依据。

孤子脉冲碰撞具有科学上的重要性,在光逻辑器件和偏振复用系统中具有重要的实用价值,从而引起了科技工作者的广泛兴趣^[80, 239-250]。Menyuk 推导了孤子脉冲在双折射光纤中的非线性耦合方程,并研究了无啁啾孤子脉冲的传输稳定性^[80, 244-246]。随后,无啁啾正交偏振孤子碰撞特性得到了普遍关注^[247-250]。考虑到脉冲通常具有较大的频率啁啾,啁啾孤子脉冲在双折射光纤中的碰撞特性研究是一项具有特色的工作,对光逻辑器件和偏振复用系统的进一步研究具有重要意义。

光纤拉曼放大是基于受激拉曼散射原理,以光纤作为增益介质而实现的全光放大,是光纤光学中的一个重要的非线性过程。相对于稀土掺杂的光纤放大而言,它具有更大的增益带宽、灵活的增益谱区、更低的放大器自发辐射噪声以及能够有效抑制信噪比(SNR)的劣化等优点,近年来在光纤传输系统中获得越来越多的应用^[80, 93-105, 138-141],如 Mollenauer 等利用拉曼放大进行了孤子脉冲的产生^[93]、啁啾孤子脉冲的压缩^[94, 95]和孤子脉冲的传输研究^[96-105],国内对光纤拉曼放大的研究大多集中在线性传输系统中的泵浦源数目、功率、波长等的选择和优化,对利用

光纤拉曼放大的光孤子传输系统的研究较少^[139-141]。目前,拉曼放大光孤子传输系统的研究中大多采用自相关技术等测量脉冲时域变化,难于准确判断脉冲的时域波形等^[80, 93-98]。鉴于以往实验条件等各种因素的限制,采用能准确测量脉冲时域波形的 SHG-FROG 技术研究拉曼放大对光孤子传输特性的影响,并作相应的理论分析,将对拉曼放大器及其通信系统的进一步研究具有一定的指导意义。

近年来,模分复用研究由美国、日本和部分欧洲国家主导^[251-261]。在中国,2014 年科技部资助了天津大学牵头的“多维复用光纤通信基础研究”(“973”基础研究项目^[251])。天津大学、清华大学、北京大学、北京邮电大学、中国科学院半导体研究所、武汉邮电科学研究院、华中科技大学、北京交通大学先后加入模分复用领域的研究工作。总之,模分复用领域处于基础研究阶段,已经成为新一代通信系统的研究热点^[251-261]。模分复用研究涉及模分复用光纤、模式产生与转换、复用解复用机制、模分复用光放大器、模分复用光传输系统、模分复用光网络等。本书主要在少模光纤、少模复用器、少模光纤系统中的模拟信号传输和少模光纤系统网络中的数字脉冲传输等方面^[253, 254, 256-257, 260, 261]开展系列创新性工作。

1.3 光纤通信系统与脉冲传输理论

1.3.1 光纤通信系统中的关键光电子器件基础

光纤通信系统的大多数光电子器件(如光孤子光源、波分复用光纤通信系统的超连续谱光源、拉曼放大器、光逻辑器件等)使用了光纤,几乎都涉及脉冲在光纤中的传输等问题,研究脉冲传输特性对光纤通信系统及其光电子器件的设计和优化具有重要意义。本节对部分关键光电子器件的基础介绍有助于后续章节相关问题的深入研究。

1.3.1.1 光孤子光源

光孤子概念是由 Hasegawa^[79]和 Tappert 于 1973 年首次提出的。当光纤的线性色散效应和非线性自相位调制效应达到平衡时,脉冲在光纤中可演化形成光孤子,时域呈双曲正割波形,其时域波形和脉宽在随后的传播过程中保持不变,可应用于光通信中。1980 年, Gouveia-Neto, Iwatsuki, Murphy 和 Mollenauer 等首次在实验中观察到了光孤子^[86]。研究表明^[80-84, 87-149],光孤子通信是高速、长距离、大容量通信的优选方案,是 21 世纪最有潜力和应用前景的通信方式之一。光孤子光源是实现光孤子通信的关键光电子器件。目前,利用各种半导体激光器、光纤

激光器等都能成功研制光孤子光源。光孤子光源在光纤通信、光谱学和生命科学等领域具有重要的应用价值,目前已成为光电子技术领域十分活跃的研究课题。本书以半导体光孤子光源为例介绍光孤子光源的基本原理。

半导体光孤子光源可以由增益开关半导体激光器、Fabry-Perot(F-P)腔滤波器和掺铒光纤放大器三大部分构成。增益开关半导体激光器产生可变速率光脉冲。改变激光器的偏置电流,可得到不同脉宽、谱宽和强度的脉冲。在增益开关状态下,会伴随较大的频率啁啾。适当设计 F-P 腔滤波器参数,使其谐振频率与信号中心频率一致,腔体带宽与信号带宽相等,可利用 F-P 腔滤波器有效滤除脉冲的啁啾成分。通常情况下,滤波后脉冲接近变换极限,其平均功率很低,远低于孤子阈值功率。随后,可以采用掺铒光纤放大器模块,对脉冲进行放大,以达到或超过孤子的阈值功率,从而使脉冲在光纤中传输演化成孤子。本书部分章节研究了啁啾脉冲的传输演化等问题。

1.3.1.2 波分复用光纤通信系统的超连续谱光源

随着信息化社会的发展,传输信息量的激增,实时性要求的提高,用户数量的扩大,传统的时分复用扩容方法已经不能满足需求,波分复用技术成为增加系统容量的有效方法。波分复用系统的常规光源仍是具有不同波长且波长间隔须精确控制的多个分离的激光器。随着波分复用信道数量的增加,系统常规光源出现了波长间隔控制困难、成本上升以及可靠性不高等问题。研究表明^[80, 51, 52, 212-215]波分复用光纤通信系统的超连续谱光源具有宽带宽、低噪声、信道间的光频稳定和容易与光纤耦合等特点,是未来超大容量光纤通信系统最有希望的光源。

波分复用超连续谱光源主要由锁模光纤激光器、调制器、放大器、超连续谱光纤、分波器等部分构成。锁模光纤激光器能产生高速、稳定的短脉冲,作为种子脉冲源。调制器一般采用 LiNbO_3 调制器,对种子脉冲进行调制。放大器通常采用掺铒光纤放大器,将调制后的种子脉冲放大到数百毫瓦至瓦级输出功率。超连续谱光纤常采用色散位移光纤和色散平坦光纤等,其作用是利用强非线性(如自相位调制)将入射的高功率脉冲展宽形成超连续光谱。分波器可以采用阵列波导型波分复用器等,将超连续光谱分割成许多按一定波长间隔排列的脉冲光源,供系统使用。本书部分章节研究了啁啾等参量对脉冲形成超连续谱的影响。

1.3.1.3 偏振复用与光逻辑器件

偏振复用是在同一传输信道同一波长脉冲中,利用两个相互正交的光偏振态独立地传输两路数据信号,偏振复用能够有效地降低脉冲间的相互作用,增大系统传输距离,并且能使每个信道的数据速率提高一倍,已经成为增大波分复用系