

光子晶体 光纤中产生的 超连续谱

Supercontinuum Generation
in Photonic Crystal Fibers

王彦斌 王国良 陈前荣 侯 静 编著

Wang Yanbin Wang Guoliang Chen Qianrong Hou Jing



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

光子晶体 光纤中产生的 超连续谱

Supercontinuum Generation
in Photonic Crystal Fibers

王彦斌 王国良 陈前荣 侯 静 编著

Wang Yanbin Wang Guoliang Chen Qianrong Hou Jing



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书从最基本的麦克斯韦方程组出发,详细推导激光在光纤中传输满足的广义非线性薛定谔方程,并采用自适应分步傅立叶法求解该方程,模拟并实验研究了长脉冲和连续光体制下单、双波长泵浦光子晶体光纤超连续谱的产生过程。

本书适用于从事超连续谱产生和应用、光子晶体光纤特性分析与设计应用的工程技术人员,以及从事激光非线性传输、脉冲压缩与展宽、超连续谱产生机理分析的大专院校有关专业师生和科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

光子晶体光纤中产生的超连续谱/王彦斌等编著. —上海:上海交通大学出版社,2017

ISBN 978-7-313-16653-1

I. 光... II. 王... III. 光学晶体—光导纤维—连续谱—研究 IV. TQ342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 031048 号

光子晶体光纤中产生的超连续谱

编 著:王彦斌等

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:郑益慧

印 制:凤凰数码印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:259 千字

版 次:2017 年 3 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-16653-1/TQ

定 价:68.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:14.75

印 次:2017 年 3 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:025-83657309

前 言

超连续谱(Supercontinuum, SC)是指窄带光源入射到非线性介质后,在多种非线性效应和介质色散的共同作用下,使得出射光中产生了大量的新频率成分,从而使输出光谱得到了极大的展宽。超连续谱激光光源不仅具有传统白光光源的宽光谱特性,还具有高亮度、高空间相干性等独特的优势,因而在光通信领域尤其是波分复用技术、光谱学、光频率计量学、光学相干层析以及军事光电对抗领域都有广泛的应用。

根据超连续谱的产生介质不同,其发展大体经历了块状介质、普通光纤、光子晶体光纤三个阶段。由于块状介质的相互作用长度短、非线性系数低,在其中产生的超连续谱波段范围非常窄,只有几十纳米;普通光纤解决了相互作用长度短的问题,超连续谱可以扩展到几百纳米,但是其非线性系数和色散难以灵活调节,所以也限制了超连续谱波段范围的进一步展宽;1996年,第一根光子晶体光纤(Photonic Crystal Fibers, PCF)在英国巴斯大学拉制成功,由于其极高的非线性和灵活可调的色散特性,迅速成为产生宽带、平坦、明亮超连续谱的首选材料。目前,石英光子晶体光纤中产生的超连续谱已经超过两个倍频程。光子晶体光纤问世以来的近二十年内,有关超连续谱激光光源产生和应用的报道大量出现在 *Science*、*Physics Review Letter*、*Optics Express*、*Optics Letters* 等国际顶级期刊上,引起了世界各国包括美国、德国、英国、法国、日本、澳大利亚等科技强国非线性光学领域科研工作者的广泛关注和极大重视。

我国在超连续谱产生与应用方面的研究起步较晚,尤其对超连续谱产生机理的研究,目前大家的认识还较为肤浅,对光子晶体光纤中各种非线性效应之间的相互作用机理、色散效应对脉冲时域、频域变化的影响还不够深入,远没有形成系统的理论。在超连续谱应用方面的研究更是空白,仅限于相关理论的探索和实验室范围内的应用。因此,迫切需要一本详细介绍超连续谱产生机理及应用的书籍,来帮助人们揭开这一有趣

而又有用的物理现象,同时为超连续谱激光光源在我国的广泛应用打开一扇起航之门。

本书从最基本的麦克斯韦方程组出发,详细推导激光在光纤中传输满足的广义非线性薛定谔方程,并采用自适应分步傅立叶法对方程进行数值求解,仿真长脉冲和连续光体制下单波长、双波长泵浦光子晶体光纤超连续谱的形成过程,然后与之前发表在国际顶级期刊 *Optics Express*、*Optics Letters* 上的实验结果相比对,采用数学仿真和实验结果相互验证的方法,揭示超连续谱产生的潜在物理机制,并且开展了超连续谱产生的原理验证实验,最后是超连续谱当前的一些应用汇总。本书理论性强、条理清晰、内容丰富,具有一定的学术水平和实际应用价值,基本涵盖了作者在超连续谱产生理论和实验方面的研究成果,部分内容已经发表在 *Applied Optics*、*Journal of Optics*、*Chinese Physics Letter*、《物理学报》《光学学报》等国内外知名期刊上,并且申请和获得了多项国家发明、实用新型、国防专利。本书适用于从事超连续谱产生和应用、光子晶体光纤特性分析与设计应用的工程技术人员,以及从事激光非线性传输、脉冲压缩与展宽、超连续谱产生机理分析的大专院校有关专业师生和科研工作者。

全书共 9 章。第 1 章绪论,简要介绍非线性光学的诞生、发展和分类,综述研究超连续谱产生的科学意义、发展历程以及本书的研究内容和组织结构;第 2 章光子晶体光纤,介绍该新型光纤的由来、制备方法与优良特性,包括传导机制、无截止模传输、色散特性、高非线性,以及在非线性光学、激光器、放大器方面的应用;第 3 章超连续谱产生的理论基础,阐述激光在光纤中传输满足的广义非线性薛定谔方程、求解方法及相关的非线性效应;第 4 章单波长泵浦超连续谱产生的理论研究,采用自适应分步傅立叶法求解广义非线性薛定谔方程,理论研究单波长泵浦 PCF 超连续谱的形成过程;第 5 章光子晶体光纤中四波混频效应的产生,仿真和实验研究四波混频效应的产生及其在波长转换器方面的应用,并为下一章提供双波长泵浦源;第 6 章双波长泵浦超连续谱产生的理论研究,基于全光纤结构实验方案仿真双波长泵浦超连续谱的产生;第 7 章超连续谱产生的实验研究,介绍项目组开展的超连续谱产生的原理验证实验;第 8 章汇总超连续谱目前在多信道通信光源、非线性光谱学、光学相干层析、光频率计量学、光电对抗中的一些应用;第 9 章是总结与展望。

本书由王彦斌博士、王国良高级工程师、陈前荣研究员、侯静研究员、宋锐讲师等执笔。在本书的撰写过程中,国家自然科学基金委(批准号 61077076、61007037 和 11504420)、国家留学基金委、教育部新世纪优秀人才支持计划(NECT-08-0142)、中国洛阳电子装备试验中心、国防科学技术大学、悉尼大学、上海交通大学出版社等多家机构给予了大量的指导和帮助,作者在此表示衷心感谢!国防科学技术大学陆启生教授

对本书的理论部分进行了认真审阅,并提出了许多宝贵意见;陈子伦讲师、张斌讲师、李荧讲师、靳爱军博士、周旋风博士、殷科博士在开展超连续谱产生的实验中给予了极大的帮助和支持,对于他们的辛勤劳动表示感谢! 澳大利亚悉尼大学熊春乐博士在超连续谱产生的仿真中,耐心指导、无私帮助,借此机会也表示感谢! 同时还要感谢哈尔滨工业大学王治乐教授在实验现象分析、长春光学精密机械研究所李岩研究员在计算机运算方面的帮助。另外对在写作过程提出改进意见和帮助审阅的领导和同事郝永旺主任、李华高工、张文攀、任广森、朱荣臻、杨淼淼、王敏、刘连伟、邹前进、樊宏杰、陈洁、姚梅、郭豪、梁巍巍、赵宏鹏、殷瑞光、甘霖、李波、许振领、李慧、郭正红、王重阳等同志在此一并致谢! 最后,诚挚感谢我的父亲、母亲、妻子赵知艳、女儿王睿萱,他们无微不至的关怀、默默无闻的支持、无怨无悔的帮助、时时刻刻的陪伴,是我写作本书的不懈动力和精神支柱!

由于作者水平有限,加之目前对于超连续谱产生机理和应用的研究还处于探索阶段,所以书中存在的不准确或不恰当之处,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 非线性光学	1
1.1.1 非线性光学的诞生	1
1.1.2 非线性光学的发展	2
1.1.3 非线性光学的分类	3
1.1.4 非线性光学的应用	4
1.2 超连续谱的研究现状	4
1.2.1 研究超连续谱产生的意义	4
1.2.2 超连续谱产生的研究阶段	5
1.2.3 超连续谱在 PCF 中产生的研究进展	6
1.2.4 白光超连续谱产生的研究	7
1.3 本书的主要内容和组织结构	9
参考文献	10
第 2 章 光子晶体光纤	16
2.1 光子晶体光纤的由来与制备	16
2.1.1 光子晶体光纤的由来	16
2.1.2 光子晶体光纤的制备	18
2.2 光子晶体光纤的导光原理与分类	20
2.2.1 光子晶体光纤的导光原理	20
2.2.2 光子晶体光纤的分类	22

2.3	光子晶体光纤的优良特性	22
2.3.1	无截止单模传输的特性	22
2.3.2	灵活可调的色散特性	24
2.3.3	高非线性	26
2.3.4	高双折射	27
2.4	光子晶体光纤的后处理技术	28
2.4.1	光子晶体光纤的拉锥	28
2.4.2	光子晶体光纤的膨胀后拉锥	29
2.4.3	空气孔选择性塌缩技术	30
2.5	光子晶体光纤的应用	32
2.5.1	在非线性光学中的应用	32
2.5.2	光子晶体光纤激光器	33
2.5.3	全光器件方面的应用	34
2.5.4	光子晶体光纤参量放大器	35
2.6	光子晶体光纤的熔接	35
2.6.1	光子晶体光纤的熔接损耗分析	36
2.6.2	模场相近的光子晶体光纤与普通光纤熔接	37
2.6.3	模场相差较大的光子晶体光纤与普通光纤熔接	38
2.6.4	模场相差较大的光子晶体光纤之间熔接	40
2.7	本章小结	43
	参考文献	44
第3章	超连续谱产生的理论基础	52
3.1	广义非线性薛定谔方程	52
3.1.1	理论出发点——光纤中的麦克斯韦方程组	52
3.1.2	亥姆霍兹方程	53
3.1.3	分离变量法	55
3.1.4	广义非线性薛定谔方程	57
3.2	分步傅立叶法	58
3.2.1	分步傅立叶法的原理	58
3.2.2	时域步长的选取	60

3.3 产生超连续谱的非线性效应	61
3.3.1 自相位调制与交叉相位调制	61
3.3.2 调制不稳定性	63
3.3.3 受激拉曼散射	64
3.3.4 高阶孤子分解	65
3.4 本章小结	66
参考文献	67
 第4章 单波长泵浦超连续谱产生的理论研究	69
4.1 超短脉冲泵浦产生超连续谱的数值模拟	69
4.1.1 超短脉冲模拟的初始设置	69
4.1.2 超连续谱的产生过程	71
4.2 长脉冲和连续光泵浦机制在数值模拟中的困难	73
4.2.1 时域步长的设置	73
4.2.2 脉宽的近似处理	75
4.2.3 随机噪声的模拟	76
4.2.4 步长自适应变化的实现	77
4.3 长脉冲泵浦超连续谱产生的理论研究	79
4.3.1 长脉冲模拟的初始设置	79
4.3.2 调制不稳定性与脉冲分裂	80
4.3.3 脉冲内拉曼散射与超连续谱的产生	82
4.4 连续光泵浦超连续谱产生的理论研究	84
4.4.1 连续光模拟的初始设置	84
4.4.2 连续光泵浦机制下的调制不稳定性	86
4.4.3 超连续谱的产生	88
4.4.4 平均化处理	91
4.5 长脉冲和连续光产生超连续谱的对比	93
4.6 本章小结	93
参考文献	94
 第5章 光子晶体光纤中四波混频效应的产生	97

5.1	四波混频效应的理论基础	97
5.1.1	四波混频效应产生的根源	97
5.1.2	四波混频效应产生的理论	99
5.1.3	影响四波混频增益的因素	101
5.2	光子晶体光纤中四波混频效应产生的数值模拟	103
5.2.1	PCF 中四波混频效应产生的有效模拟	104
5.2.2	PCF 结构对四波混频效应的影响	106
5.2.3	脉冲峰值功率对四波混频效应的影响	108
5.2.4	连续光泵浦四波混频效应的模拟产生	109
5.3	四波混频产生的实验研究及其在波长转换方面的应用	111
5.3.1	实验研究 PCF 中四波混频效应的产生	111
5.3.2	利用 PCF 中的四波混频效应实现波长转换	114
5.4	本章小结	117
	参考文献	117
第 6 章	双波长泵浦超连续谱产生的理论研究	120
6.1	双波长泵浦产生超连续谱的方案	120
6.1.1	基于二阶非线性晶体的双波长泵浦方案	121
6.1.2	全光纤结构的双波长泵浦方案	121
6.2	长脉冲机制双波长泵浦超连续谱产生的理论研究	124
6.2.1	全光纤结构双波长泵浦方案的理论模型	124
6.2.2	双波长泵浦源的建立	126
6.2.3	残留泵浦光的单独演化	127
6.2.4	双波长的共同演化和超连续谱的形成	128
6.2.5	群速度不匹配对超连续谱产生的影响	131
6.3	连续光机制双波长泵浦超连续谱产生的理论研究	134
6.3.1	建立双波长泵浦源	135
6.3.2	白光超连续谱的模拟产生	136
6.4	各种泵浦方案的综合比较	140
6.5	本章小结	140
	参考文献	141

第 7 章 超连续谱产生的实验研究	144
7.1 超连续谱产生的实验方案	144
7.1.1 基于透镜耦合的实验方案	144
7.1.2 全光纤结构的实验方案	145
7.1.3 不同光纤间的熔接	146
7.2 一种增加 PCF 模场直径的方法	147
7.2.1 PCF 空气孔的塌缩减小	147
7.2.2 空气孔塌缩引起的模场直径增大	149
7.2.3 PCF 模场增大后的应用价值	151
7.3 皮秒脉冲泵浦超连续谱的产生	152
7.3.1 基于选择性空气孔塌缩的全光纤结构实验方案	153
7.3.2 光束在过渡区的传输	154
7.3.3 超连续谱的产生	155
7.4 纳秒脉冲泵浦超连续谱的产生	157
7.4.1 耦合系统的设计	158
7.4.2 PCF 与普通光纤的低损耗熔接	158
7.4.3 实验结果	160
7.5 连续光泵浦超连续谱产生的尝试	164
7.5.1 输出尾纤为 15/130 激光器的实验	164
7.5.2 输出尾纤为 30/250 激光器的实验	164
7.6 本章小结	168
参考文献	169
第 8 章 超连续谱的应用	173
8.1 多信道通信光源	173
8.2 非线性光谱学	174
8.3 光学相干层析	178
8.4 光频率计量学	183
8.5 超连续谱在光电对抗中的应用	189
8.5.1 超连续谱对抗 CCD 的实验组成与布局	189
8.5.2 实验现象与分析	191

8.6 本章小结	194
参考文献	194
第9章 总结与展望	202
9.1 本书解决的几个问题	202
9.2 未来工作的展望	205
附录 专有名词及其缩写	207
索引	210
致 谢	213

表 目 录

表 4.1	PCF 在波长 770 nm 处的色散系数	70
表 4.2	傅立叶变换的时域与频域对应参数	75
表 4.3	PCF P 在波长 1 064 nm 处的色散系数	79
表 4.4	在波长 1 064 nm 处的色散系数	85
表 5.1	PCF G 在波长 1 064 nm 处的色散系数	105
表 5.2	不同结构 PCF 中四波混频效应的产生	106
表 5.3	不同结构 PCF 在波长 1 064 nm 处的色散系数	107
表 5.4	PCF_FWM 在波长 1 064 nm 处的色散系数	113
表 6.1	全光纤结构双波长泵浦方案用到的 PCF	122
表 6.2	PCF-A 在波长 1 064 nm 处的色散系数	126
表 6.3	PCF-SC 在波长 1 064 nm 处的色散系数	127
表 6.4	PCF-SC1 在波长 1 064 nm 处的色散系数	134
表 6.5	各种泵浦方案的综合比较	140
表 7.1	尾纤为 15/130 激光器的实验数据	165
表 7.2	尾纤为 30/250 激光器的实验数据	167
表 7.3	回光的监测	168

图 目 录

图 1.1	超连续谱的产生	5
图 1.2	PCF 的拉锥和零色散点的递减	8
图 2.1	蝴蝶翅膀、蛋白石及其微观的光子晶体结构	17
图 2.2	PCF 的横截面	18
图 2.3	堆积法的制作过程	19
图 2.4	两次拉丝横截面结构	19
图 2.5	光子带隙型光子晶体光纤	21
图 2.6	光子晶体光纤的分类	22
图 2.7	V_{eff} 随 Λ/λ 的变化曲线;虚线为阶跃光纤的单模截止频率 $V_{\text{eff}}=2.405$	23
图 2.8	当 $d_{\text{core}}=5\text{ }\mu\text{m}$ 时,逐渐增大 d/Λ (从右至左)PCF 的色散曲线	25
图 2.9	保持 d/Λ 不变,逐渐减小 d_{core} (从右至左)PCF 的色散曲线	26
图 2.10	各种保偏光纤	27
图 2.11	拉锥过程中横截面结构的变化	29
图 2.12	光纤膨胀拉锥处理过程图	30
图 2.13	光子晶体光纤选择性空气孔塌缩	31
图 2.14	光子晶体光纤一个空气孔被堵的过程	31
图 2.15	光子晶体光纤一个空气孔塌缩的过程	32
图 2.16	大模面积双包层掺镱光子晶体光纤	34
图 2.17	光子晶体光纤和普通光纤熔接的设置	37
图 2.18	光子晶体光纤中心孔塌缩的实验	38
图 2.19	不同圈数空气孔被堵的显微镜照片	39

图 2.20	空气孔塌缩后光子晶体光纤的纵向剖面	39
图 2.21	HI1060 和 HNPCF1 的显微镜照片	40
图 2.22	不同光纤的显微镜图像	40
图 2.23	不同光纤的显微镜图像	41
图 2.24	HNPCF2 中心两圈孔塌缩、其他孔不变的显微镜照片	41
图 2.25	HNPCF2 中心两圈孔塌缩、其余孔变小的显微镜照片	42
图 2.26	HNPCF1 中心三圈孔塌缩后的横截面图	43
图 3.1	分步傅立叶法	59
图 3.2	熔石英的拉曼增益谱	65
图 4.1	$T_{FWHM}=166\text{ fs}$ 高斯脉冲的时域图和频谱	70
图 4.2	自相位调制	72
图 4.3	脉冲内受激拉曼散射示意图	73
图 4.4	超连续谱的产生	74
图 4.5	实现步长自适应变化的流程图	78
图 4.6	PCF P 的色散曲线	79
图 4.7	$T_{FWHM}=30\text{ ps}$ 高斯脉冲的时域图和频谱	80
图 4.8	调制不稳定性	81
图 4.9	超连续谱的产生	83
图 4.10	初始连续光的时域图和频谱	85
图 4.11	HF1050 的色散曲线	86
图 4.12	连续光泵浦机制下的调制不稳定性	87
图 4.13	当 $L=6.5\text{ m}$ 时超短脉冲的形成	89
图 4.14	自陡效应	89
图 4.15	超连续谱的产生	90
图 4.16	HF1050 的 PM 曲线(上面)和 GVM 曲线(下面),孤子和对应色散波 由小圆圈标出	91
图 4.17	平均化处理	92
图 5.1	四波混频效应的相位匹配图	103
图 5.2	PCF G 的色散曲线	104
图 5.3	PCF G 中的四波混频效应	106
图 5.4	当 $P_0=2000\text{ W}$ 时,PCF1、PCF2、PCF3 和 PCF4 中产生的	

四波混频效应	107
图 5.5 当 $P_0=3\,000\text{ W}$ 时, PCF1、PCF2、PCF3 和 PCF4 中产生的 四波混频效应	109
图 5.6 当 $L=35\text{ m}$ 时, PCF1、PCF2、PCF3 和 PCF4 中产生的四波混频效应	110
图 5.7 当 $L=50\text{ m}$ 时, PCF1、PCF2、PCF3 和 PCF4 中产生的四波混频效应	111
图 5.8 Nd:YAG 调 Q 微晶片激光器	112
图 5.9 实验所用的 PCF_FWM	112
图 5.10 PCF_FWM 中产生的四波混频效应	113
图 5.11 基于 PCF 四波混频效应的全光波长转换器结构示意图	114
图 5.12 PCF 零色散点随孔间距减小的变化曲线	115
图 5.13 四波混频效应产生的参量波长随泵浦波长与零色散点之间偏差的 变化曲线	116
图 6.1 基于二阶非线性晶体的双波长泵浦方案	121
图 6.2 全光纤结构的双波长泵浦方案	122
图 6.3 PCF-A 的输出光谱	123
图 6.4 双波长泵浦源随输出功率(a)和 PCF-SC 长度(b)的演化图	123
图 6.5 全光纤结构双波长泵浦方案的示意图	125
图 6.6 PCF-A 中四波混频效应	126
图 6.7 提取的信号光 686 nm 和残留的泵浦光 $1\,064\text{ nm}$	127
图 6.8 残留泵浦光 $1\,064\text{ nm}$ 在 PCF-SC 中的演化及最外层孤子的位置也在 图中标出	129
图 6.9 PCF-SC 中的孤子自频移	130
图 6.10 PCF-SC 的群速度折射率曲线	131
图 6.11 泵浦光 $1\,064\text{ nm}$ 和信号光 686 nm 在 PCF-SC 中的共同演化	132
图 6.12 PCF-SC 的群速度匹配曲线, 最外层孤子和对应的色散波波长由 圆圈标出	133
图 6.13 PCF-SC1 的群速度匹配曲线	133
图 6.14 双波长泵浦源在 PCF-SC 和 PCF-SC1 中的演化	134
图 6.15 PCF-A 中四波混频效应的产生	135
图 6.16 从 PCF-A 中输出的光谱	136
图 6.17 双波长泵浦源在 PCF-SC 和 PCF-SC1 中的演化	137

图 6.18	从 50 m 的 PCF-SC(绿线)和 PCF-SC1(红线)输出的光谱	137
图 6.19	PCF-SC 中的孤子自频移	138
图 6.20	交叉相位调制所致的调制不稳定性	139
图 6.21	PCF-SC 的相位匹配曲线和群速度匹配曲线	139
图 7.1	基于透镜耦合的超连续谱产生实验方案	145
图 7.2	全光纤结构的超连续谱产生实验方案	146
图 7.3	实验中采用的光纤熔接机(Fujikura FSM-40PM)	146
图 7.4	PCF 空气孔塌缩减小的示意图	148
图 7.5	从端面 A 到端面 C 的 PCF 最小塌缩长度	149
图 7.6	模场直径 D_{MFD} 和有效模场面积 A_{eff} 随空气孔塌缩的变化情况	150
图 7.7	孔直径 $d_0=4\text{ }\mu\text{m}$ 和 $d=0.4\text{ }\mu\text{m}$ 的 PCF 模场分布(比例相同)	151
图 7.8	熔接损耗随空气孔塌缩的变化情况	152
图 7.9	基于选择性空气孔塌缩的全光纤结构实验方案	154
图 7.10	B 点处的入射光强分布(a)和 D 点处的出射光强分布(b)	154
图 7.11	超连续谱的形成过程	156
图 7.12	PCF 的群速度匹配曲线和相位匹配曲线	157
图 7.13	PCF 的 SEM 和色散曲线	159
图 7.14	空气孔塌缩形成的过渡区域	159
图 7.15	从入射光纤输出的光谱	160
图 7.16	超连续谱的产生过程	161
图 7.17	$P_{\text{out}}=800\text{ mW}$ 时的近场光斑	162
图 7.18	$P_{\text{out}}=1\text{ }200\text{ mW}$ 时超连续谱点亮的光纤线圈	163
图 7.19	$P_{\text{out}}=1\text{ }200\text{ mW}$ 时 PCF 输出端的近场光斑	163
图 7.20	群速度折射率随波长的变化曲线	164
图 7.21	尾纤为 15/130 激光器泵浦 PCF 产生超连续谱的实验装置	165
图 7.22	连续光激光器的频域和时域输出	165
图 7.23	泵浦功率为 53W 时从 PCF 输出的光谱	166
图 7.24	烧毁的熔接点(黑色椭圆内)	166
图 7.25	尾纤为 30/250 激光器泵浦 PCF 产生超连续谱的实验方案	167
图 8.1	基于超连续谱谱切片的光纤 WDM 光源	174
图 8.2	1 000 个信道的 WDM 发射机,3 个图分别表示虚线所指位置的	