

光子晶体光纤的 结构设计及其传输特性研究

张晓娟 著



科学出版社

光子晶体光纤的结构设计 及其传输特性研究

张晓娟 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是对光子晶体光纤传输特性进行系统深入研究所取得的研究成果。全书主要讲述了光子晶体光纤的相关概念、特性、应用、发展现状及相关数值模拟方法;重点阐述了脉冲在不同结构不同参数下光子晶体光纤中传输时的模场分布、截止、偏振、色散、损耗及非线性特性。

本书是一部关于 PCF 传输特性的专著,可供电子科学与技术、仪器科学与技术、光学工程等相关专业的科研人员和技术人员参考,也可作为相关领域研究和开发人员的工具书。

图书在版编目(CIP)数据

光子晶体光纤的结构设计及其传输特性研究 / 张晓娟著. —北京: 科学出版社, 2016

ISBN 978-7-03-048939-5

I. ①光… II. ①张… III. ①光学晶体—光导纤维—研究 IV. ①TQ342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 139092 号

责任编辑: 祝 洁 宋无汗 王 苏 / 责任校对: 刘亚琦

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 6 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2016 年 6 月第一次印刷 印张: 15.1/2

字数: 313 000

定价: 85.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

PCF 呈现出许多在传统光纤中难以实现的特性。鉴于此,本书作者和课题组于 2007 年开始进行深入的研究,取得了系统的研究成果。研究成果汇总,形成了本书的主体内容。

本书的主要工作是编程实现用于分析 PCF 模式特性的多种数值模拟方法,模拟不同结构、不同参数下 PCF 的模场分布、截止、偏振、色散及损耗等特性;模拟弯曲 PCF 的场能量及场分布沿传播方向的变化,研究不同类型 PCF 的弯曲损耗振荡特性;同时,编程实现广义非线性薛定谔方程的求解,模拟不同泵浦条件下 PCF 中的超连续谱、孤子及孤子俘获效应。

本书共 11 章,主要内容如下。

第 1 章为绪论,主要介绍 PCF 的相关概念、特性、应用及发展现状与最新的研究成果等。

第 2 章主要介绍用于 PCF 传输特性的多种数值模拟方法,包括平面波法、有限差分法(时域有限差分法和频域有限差分法)、分步傅里叶算法、光束传播法、光束传播-时域有限差分法。给出各个方法的理论模型,并介绍 PCF 中脉冲传输的广义非线性薛定谔方程(组)及其数值解法——分步傅里叶算法。

第 3 章运用平面波法研究光波由面内入射到二维光子晶体时,其光子带隙和模场分布,详细讨论光子带隙与晶格结构、原子占有率、背景材料及原子折射率之间的关系。

第 4 章提出一种类熊猫型高双折射 PCF 结构,应用全矢量频域有限差分法所进行的分析结果表明:通过选择合适的结构参数,可以使之达到 10^{-2} 量级,比传统的 D 型和熊猫型保偏光纤高出 2 个数量级,且可以获得理想的色散特性。这种结构的 PCF 可用于制作具有适当色散特性或偏振特性的保偏光纤及相关光纤器件。

第 5 章采用分步傅里叶算法,研究飞秒脉冲在所提出的类熊猫型高双折射 PCF 中传输时引起的超宽范围的超连续谱;讨论超短脉冲在三类具有不同色散曲线的 PCF 中传输时的超连续谱,讨论泵浦脉冲中心波长、峰值功率、时间延迟和初始脉冲宽度对信号脉冲波形和光谱的影响。

第 6 章采用分步傅里叶算法数值模拟研究所提出的类熊猫型高双折射 PCF 中的脉冲俘获现象,讨论泵浦脉冲和信号脉冲均沿快轴入射,或者分别沿快轴和慢轴入射时,脉冲俘获现象的形成条件,分析泵浦脉冲入射条件对脉冲俘获效果的影响。这为超高速全光开关的技术研究提供了非常重要的理论基础。

第7章采用束传播法和束传播-时域有限差分法模拟弯曲 PCF 的场能量及场分布沿传播方向的变化;采用时域有限差分法分别研究单模光纤、全内反射型 PCF 及带隙型 PCF 的弯曲损耗振荡特性。

第8章详细讨论孤子在 PCF 内的传输特性,并研究孤子间的相互作用。

第9章对新型磁光材料——磁性光子晶体进行了详细的分析,发现在一维磁性光子晶体中适当地选择材料结构可以使材料的法拉第旋转角大幅度提高(可达数千倍)。在二维磁性光子晶体中心处引入缺陷,可以有效地抑制透射光波偏振态的变化,同时,材料的法拉第旋转角较连续分布介质增大约4倍。因此二维磁性光子晶体具有应用于制作磁敏光纤的潜力。

第10章介绍利用 MATLAB 设计用于分析 PCF 传输特性的用户界面。用户在不精通 MATLAB 的情况下,通过输入相关参数,即可对不同结构的 PCF 进行分析研究。

第11章采用时域有限差分法,结合吸收边界条件、总场-散射场边界条件等,采用点源和线源两种不同的激励源设置,编程实现对不同光子晶体结构中的辐射场和散射场的模拟。

感谢渭南师范学院专项基金对本书的支持!

由于 PCF 和相关技术正在蓬勃发展之中,加之篇幅有限,本书难免会有遗漏和不足之处,诚恳希望诸位专家、同仁和广大读者批评指正。

张晓娟

2016年2月

于陕西渭南

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 光子晶体光纤	1
1.1.1 PCF 的分类	1
1.1.2 PCF 的色散	2
1.1.3 PCF 的特性和应用	2
1.1.4 PCF 的数值计算方法	6
1.1.5 PCF 的制备	9
1.2 PCF 中的非线性效应	10
1.2.1 自相位调制和交叉相位调制	10
1.2.2 受激拉曼散射和受激布里渊散射	11
1.2.3 四波混频	11
1.2.4 其他效应	11
1.3 PCF 中非线性特性的研究现状	12
1.3.1 SC 的产生	12
1.3.2 光孤子	14
1.3.3 全光开关	14
1.4 PCF 传感器的研究现状	15
1.5 PCF 弯曲损耗特性的研究现状	17
参考文献	18
第 2 章 理论模型	28
2.1 平面波方法	28
2.1.1 特征方程的建立	28
2.1.2 带隙的计算	33
2.1.3 模场的计算	35
2.2 频域有限差分法	36
2.2.1 模场计算理论	36
2.2.2 带隙计算理论	39
2.3 分步傅里叶算法	44
2.3.1 广义非线性薛定谔方程	44
2.3.2 耦合广义非线性薛定谔方程组	47
2.3.3 分步傅里叶算法	48

2.4 时域有限差分法	50
2.4.1 麦克斯韦方程和 Yee 元胞	50
2.4.2 三维 FDTD 法	51
2.4.3 二维紧凑 FDTD 法	54
2.4.4 吸收边界条件——完全匹配层	55
2.4.5 激励源设置	58
2.4.6 时间步长和空间步长的选取	59
2.5 光束传播法	60
2.5.1 傅里叶变换光束传播法	60
2.5.2 分步傅里叶算法	61
2.5.3 边界条件	63
2.6 光束传播-时域有限差分法	63
2.6.1 已有算法的优缺点	63
2.6.2 一种新型算法——光束传播-时域有限差分法	64
2.6.3 BP-FDTD 法的边界条件	65
2.7 本章小结	65
参考文献	65
第 3 章 PBG-PCF 的特性分析	67
3.1 导光原理	67
3.2 PWM 程序实现步骤	67
3.3 光波面内入射时的 PBG	68
3.3.1 正方晶格	68
3.3.2 三角晶格	73
3.4 二维光子晶体的模场分布	78
3.4.1 周期性正方和三角晶格	78
3.4.2 存在点缺陷的正方晶格	81
3.4.3 存在点缺陷的三角晶格	84
3.4.4 存在线缺陷的正方晶格	85
3.5 光波由面外进入 PCF 时的 PBG 及模场分布	86
3.5.1 晶格结构对 PBG 的影响	86
3.5.2 原子占有率 f 对 PBG 的影响	87
3.5.3 背景材料折射率 n_2 对 PBG 的影响	88
3.5.4 原子折射率 n_1 对 PBG 的影响	88
3.5.5 HC-1550-02 型 PCF 的 PBG 及模场分布	89
3.6 本章小结	91
参考文献	92

第 4 章 新型高双折射 PCF 的结构设计	94
4.1 基本原理	94
4.2 已有的高双折射 PCF 结构	95
4.2.1 椭圆状的高双折射 PCF	95
4.2.2 中心空气孔不对称的高双折射 PCF	96
4.2.3 空气孔不规则的高双折射 PCF	96
4.2.4 空气孔非对称分布的高双折射 PCF	97
4.2.5 其他类型的高双折射 PCF	97
4.3 新型高双折射 PCF 的结构设计及特性分析	98
4.3.1 模场分布和截止特性	99
4.3.2 偏振特性	101
4.3.3 损耗特性	102
4.3.4 色散特性	103
4.4 本章小结	106
参考文献	107
第 5 章 光子晶体光纤中 SC 的产生	109
5.1 不同色散区域 SC 的产生	109
5.1.1 反常色散区	109
5.1.2 近零色散区	111
5.1.3 正常色散区	114
5.1.4 高阶效应对产生 SC 的影响	115
5.2 高双折射 PCF 中 SC 的产生	116
5.2.1 入射脉冲偏振方向沿 PCF 慢轴	118
5.2.2 光脉冲沿任意偏振方向入射	122
5.3 色散对超连续谱产生的影响	123
5.3.1 二阶色散对超连续谱产生的影响	124
5.3.2 三阶色散对超连续谱产生的影响	126
5.3.3 数值模拟中色散阶数的选择	129
5.4 色散平坦 PCF 和双零色散 PCF 中超连续谱的产生	132
5.4.1 色散平坦 PCF 中超连续谱的产生	132
5.4.2 双零色散 PCF 中超连续谱的产生	136
5.4.3 PCF 结构参数对色散曲线的影响	143
5.5 双波长泵浦对超连续谱产生的影响	143
5.5.1 泵浦脉冲中心波长对超连续谱产生的影响	144
5.5.2 泵浦脉冲峰值功率对超连续谱产生的影响	152
5.5.3 泵浦脉冲与信号脉冲之间的时间延迟对超连续谱产生的影响	154
5.5.4 泵浦脉冲的初始脉冲宽度对超连续谱产生的影响	156

5.6 本章小结	158
参考文献	158
第6章 类熊猫型高双折射 PCF 中的脉冲俘获分析	160
6.1 理论模型	160
6.2 泵浦和信号脉冲均沿快轴入射	161
6.2.1 处于不同色散区的影响	161
6.2.2 群速度的影响	163
6.2.3 时域中心延迟的影响	166
6.2.4 峰值功率的影响	167
6.2.5 脉冲半宽度的影响	167
6.2.6 脉冲中心波长的影响	168
6.3 泵浦和信号脉冲分别沿快轴和慢轴入射	169
6.3.1 时域中心延迟的影响	170
6.3.2 峰值功率的影响	171
6.3.3 脉冲半宽度的影响	172
6.3.4 中心波长的影响	173
6.4 本章小结	174
参考文献	174
第7章 PCF 的弯曲特性分析	176
7.1 弯曲光纤的等效折射率模型	176
7.2 弯曲 PCF 的场能量及场分布沿传播方向的变化	177
7.3 PCF 弯曲振荡特性分析	179
7.3.1 计算模型	179
7.3.2 SMF 的弯曲损耗振荡特性	180
7.3.3 TIR-PCF 的弯曲损耗振荡特性	180
7.3.4 PBG-PCF 的弯曲损耗振荡特性	183
7.4 本章小结	185
参考文献	185
第8章 PCF 中孤子的传输特性	187
8.1 孤子	187
8.2 孤子分裂与色散波的产生	189
8.2.1 拉曼效应导致的孤子分裂	189
8.2.2 高阶色散导致的孤子分裂及色散波产生	190
8.2.3 色散曲线的影响	191
8.3 孤子间的相互作用	193
8.3.1 同频不同时的孤子间的相互作用	193
8.3.2 同时不同频的孤子间的相互作用	194

8.4 本章小结	196
参考文献	196
第 9 章 磁性光子晶体的光学特性	197
9.1 磁性光子晶体的发展历史	197
9.2 一维磁性光子晶体	198
9.2.1 状态方程	198
9.2.2 数值分析方法	200
9.2.3 一维准周期结构磁性光子晶体	201
9.2.4 斜入射情况	205
9.3 二维磁性光子晶体	206
9.3.1 周期结构二维磁性光子晶体	206
9.3.2 缺陷结构二维磁性光子晶体	212
9.4 本章小结	214
参考文献	214
第 10 章 用于分析 PCF 传输特性软件的用户界面设计	217
10.1 MATLAB 简介	217
10.2 M 文件实现界面设计	217
10.3 界面操作流程及应用举例	219
10.3.1 模式特性和散射特性	219
10.3.2 光子晶体特性	224
10.3.3 非线性特性	224
10.4 本章小结	226
参考文献	226
第 11 章 时域有限差分程序设计及数值计算结果	227
11.1 时域有限差分法实现的基本流程	227
11.2 点源辐射场	228
11.3 线源辐射场	232
11.4 光波导辐射场	234
11.5 本章小结	236
参考文献	236

第 1 章 绪 论

1.1 光子晶体光纤

1.1.1 PCF 的分类

光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)是近十年来发展起来的一种新型微结构光纤。最早的 PCF 制作于 1996 年^[1],在纯石英光纤上沿横向周期性地排列空气孔,形成周期性的折射率分布。随着对 PCF 研究的深入,其定义更为广泛,制作材料更加丰富。除 SiO_2 外,硫化物、聚合物、玻璃材料以及负折射材料都被用于制备 PCF,且空气孔的排列也不再局限于周期性的排布。根据导光机制可以将 PCF 分为两种^[2]:一种是全内反射型 PCF(total internal reflection photonic crystal fiber, TIR-PCF),这种 PCF 纤芯的折射率高于包层等效折射率,和传统光纤一样,通过全内反射的原理进行光传输;另一种是光子带隙型 PCF(photonic bandgap photonic crystal fiber, PBG-PCF),纤芯的折射率比包层等效折射率低,利用光子晶体的 PBG 效应将光限制在纤芯中传输,纤芯可以是空气,也可以是其他低折射率的材料。图 1.1 和图 1.2 分别是几种不同结构的 TIR-PCF 和 PBG-PCF 截面图。

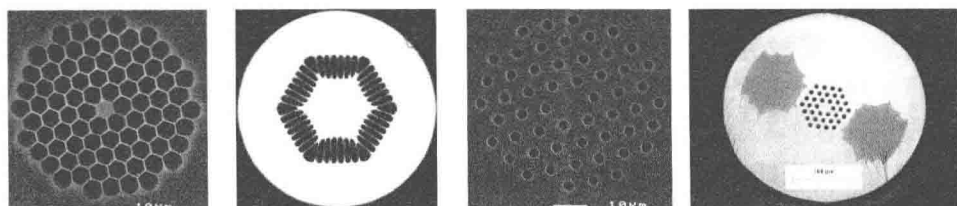


图 1.1 TIR-PCF 横截面示意图

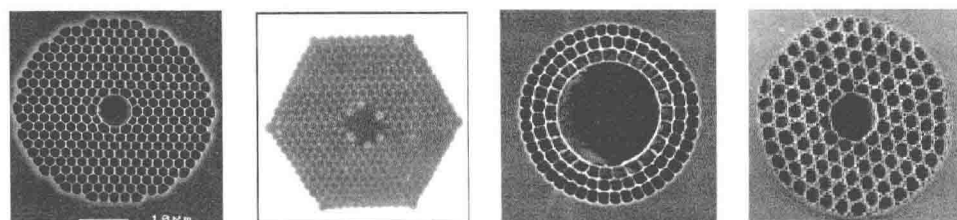


图 1.2 PBG-PCF 横截面示意图

1.1.2 PCF 的色散

在光纤中传输的光脉冲,受到光纤的折射率分布、光纤材料的色散特性、光纤中的模式分布以及光源的光谱宽度等因素决定的“延迟畸变”,使该脉冲波形在通过光纤后发生展宽。这一效应称作“光纤的色散”。在光纤中,一般把色散分成以下4种。

(1)多模色散:由于各模式之间群速度不同而产生的色散,仅发生在多模光纤中。

(2)波导色散:由于某一传播模式的群速度对于光波的频率(或波长)不是常数,同时光源的谱线又有一定的宽度而产生的色散。在PCF中,波导色散与PCF的结构有关。

(3)材料色散:由于光纤材料的折射率随入射光频率变化而产生的色散。材料色散与PCF的结构无关。

(4)偏振(模)色散:由于光纤结构不完全轴对称,光纤中同时存在的两个正交模式传播速度不同,即群延迟不同而产生的色散,称为偏振色散或偏振模色散。对于一般的PCF,由于制作工艺和材料本身特性的制约,完全轴对称的PCF是不存在的,但两正交模式的传播速度差别不大,因此,通常忽略偏振模色散的影响。

本书主要考虑波导色散和材料色散的影响。其中波导色散与PCF的结构有关;材料色散由PCF的材料性质决定。PCF中的总色散是这两部分色散的和。当材料种类一定时,通过改变包层的空气孔大小可以方便地调节波导色散的大小,因此,PCF的色散可调范围较大。

在计算PCF中脉冲的传输时,广义非线性薛定谔方程中的色散系数对应的是总色散的色散系数。

1.1.3 PCF 的特性和应用

相比传统光纤,PCF表现出许多十分优异的特性,概括如下。

(1)无截止波长的单模传输特性^[3]。对PCF而言,可以通过对结构参数的调整,使得单模的截止波长较传统光纤短很多,可以在近紫外到近红外全波段维持单模。实际中,对于规则分布的三角结构的PCF,空气孔间距不变,空气孔半径减小,可以增加单模传输波长范围。这为波分复用增加信道数提供了充足的资源,此外,较大的单模波长范围扩大了PCF光纤传感器的检测范围。

(2)良好的色散性质^[4-6]。与普通光纤不同,PCF可以由单一材料制成,因此纤芯和包层在力学与热学上可以做到完全匹配,即纤芯和包层的折射率差不会因材料的不相容性而受限制,从而可以在很大的波长范围内得到较大的色散。在纯石英及普通单模光纤中产生正常色散的波长,在PCF中却可以实现反常色散,因此

容易实现孤子传输、色散补偿及超短脉冲压缩等。此外,PCF 还有一个重要的特点,即零色散点波长可调。只要改变 PCF 的基本参数,就可以在几百纳米的波长范围内取得零色散。

(3)高双折射特性^[7-10]。由于 PCF 包层空气孔大小和形状可以灵活设置,这为高双折射 PCF 的设计提供了条件。要想获得高的双折射,仅需要打破空气孔在结构上的六重对称性。目前,通过改变光纤横向结构来产生双折射的方法主要有:将空气孔做成椭圆形、将中心孔制成不对称状、将空气孔做成不规则状或者将空气孔的分布调整为不对称状等。这样获得的双折射比传统的光纤至少高出一个数量级。与传统双折射光纤相比,PCF 还具有设计自由性大、对温度变化不敏感等优点。因此,在长距离通信、传感、特定激光器等方面有重要应用。

(4)大的模场面积^[11,12]。模场面积的大小直接影响到非线性效应的强弱。通过增加模场面积,可以减小在传输过程中的非线性效应,有利于脉冲在其中的稳定传输。对于普通光纤,需要对材料的折射率进行比较复杂的设计,以增大模场的有效面积。但 PCF 不同,它可以直接调节包层空气孔的大小和孔间距,实现模场有效面积的调节。普通光纤的模场有效面积调节范围为 $1\sim 100\mu\text{m}^2$,而 PCF 的模场有效面积范围为 $1\sim 800\mu\text{m}^2$ 。

(5)高的非线性效应^[13,14]。增加包层空气孔半径,可以明显减小模场有效面积,极大地增加非线性系数,进而增强 PCF 的非线性效应。目前,已经生产出多种不同尺寸型号的高非线性 PCF 用于产生超连续谱。Petrooulos 等^[15]拉制的小芯径 PCF,在 1550nm 处的非线性系数高达 $640(\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$ 。同时,也可以利用三阶非线性系数较高的玻璃材料来代替 SiO_2 ,进一步增加 PCF 的非线性系数。

除此之外,PCF 还易于实现多芯传输,也可以制作成大孔径的 PCF。这些特性突破了传统光纤光学的局限,拓展了光纤的应用范围,在光电子器件、超快激光光学、光通信、微光电子学及强场物理学等领域开辟了新的研究方向。随着理论分析和制造技术的成熟,基于 PCF 的光电子器件研究也得到了很多学者的关注。

1)PCF 光栅

随着 PCF 制作技术的完善及理论分析的深入,将传统光纤光栅和 PCF 结合,为制造新型的光纤光栅提供了机会。1999 年,Eggleton 等^[16]首次报道利用紫外曝光法在纤芯掺铒的 PCF 中写入光纤布拉格光栅和长周期光纤光栅,引领光纤光栅技术步入一个新的时代。和传统的光纤光栅相比,PCF 光栅具有很多优点。传统光纤光栅的包层谐振波是在空气硅界面上相干反射形成,其传输谱很容易随着外界环境的变化而发生变化,而 PCF 包层分布着很多空气孔,其模场一般分布在离纤芯很近的包层空气孔中,传输特性稳定。同时,相比传统光纤光栅,PCF 光栅对温度和压力不敏感,且具有宽的波长调谐范围。因此,PCF 光栅的制造方法和理论分析成为近年来的又一研究热点^[17,18]。2002 年,Kakarantzias 等^[19]利用 CO_2 激光

在纯硅纤芯的 PCF 中热激蚀刻实现长周期光栅,这种方法利用激光照射使 PCF 包层出现周期性的塌缩,从而形成光栅。2004 年, Lim 等^[20]提出利用机械压力法在 PCF 中写制长周期光栅;也可以利用双光子吸收的方法^[21]在没有掺杂的纯硅纤芯中写入 PCF 光栅。

国内,南开大学^[22]首次利用紫外曝光法,在柚子型 PCF 中写制光纤布拉格光栅,对其透射谱和反射谱进行了分析,随后对该光栅反射谱中多个峰的温度和应变传感特性进行了理论和实验研究。燕山大学^[23]在 PCF 光栅方面也做了少许的理论研究,他们主要是基于模式耦合理论和传输矩阵法对基于 PCF 的布拉格光栅特性和时延特性等进行了理论分析。

2) 方向耦合器

一般的方向耦合器是利用拉锥的方法把两个光纤的纤芯拉制在一起,而 PCF 可以通过包层空气孔的排布形成具有几个纤芯的 PCF 结构,直接完成光耦合过程。Mangan 等^[24]首次拉制了双芯 TIR-PCF,并对其耦合特性做了分析。此后,研究人员设计了具有各种特性的多芯 PCF 方向耦合器。现在的研究^[25-27]多基于 TIR 型双芯 PCF,实现偏振分离器、复用/解复用器等功能。也有三芯 TIR-PCF^[28]的有关报道,但是较少。

国内也开展了相关的工作。清华大学的张林等^[29]设计了双芯 PCF 偏振分束器,两个纤芯周围的空气孔和包层其他空气孔的大小不同,因此具有很高的双折射,获得分束比列优于一 11dB、带宽为 40nm、长度为 1.7mm 的分束器;南开大学^[30]研究小组设计了具有单偏振单模的 PCF 耦合器,通过适当调整纤芯周围空气孔的大小,可以得到带宽为 200nm、长度为几毫米的单偏振单模耦合器。本实验室^[31]在这方面也开展了部分研究,从耦合模理论出发,推导出三芯 PCF 的耦合模方程,通过数值模拟研究了该结构 PCF 的耦合特性,讨论了其在耦合强度连续可调光纤定向耦合器和大模场光纤激光器方面的应用。

3) 超连续光源

超连续谱(supercontinuum, SC)是超短激光脉冲在介质中传输时,由于介质的非线性效应导致脉冲光谱被极大加宽的现象,一般光谱展宽可达几十到几百纳米。相比传统光纤,PCF 可通过设计结构得到很高的非线性和可调的色散,进而实现超宽的频谱展宽。Alfano 和 Shapiro^[32]利用倍频锁模玻璃激光器泵浦 BK7 玻璃,首次在固体介质中获得了 400~700nm 的 SC。Ranka 等^[33]首次报道了 PCF 中 2 个倍频程的 SC 产生。此后,PCF 中 SC 的研究便成为一个热点。SC 光谱作为一种光源,在光通信、光学频率测量及生物医学等领域具有广泛的应用。目前,SC 的主要应用如下。

光通信领域: SC 最主要的应用是用于通信领域。在密集波分复用(dense wavelength division multiplexing, DWDM)系统中,传统方法中每个通道采用不同

的光源进行波长分割叠加处理,难以对波长间隔进行准确的控制,而通过使用 SC 这一单一光源,可以将通道数目增加 10 倍以上。随着 SC 光源制作工艺的成熟,SC 必将成为未来超大容量通信实验研究工作中极其重要的工具性光源,为通信领域带来革命性的变化。

用于群速度测量:现有的测量群速度的方法有飞行时间法(time of flight)和相移法。两种方法均受到光谱宽度的限制,从而影响测量的分辨率。1995 年,Mori 等报道了一种新的群速度测量方法,他们以锁模激光器作为泵浦光源获得 SC 脉冲,用来测量光纤中的群速度色散,长度为 130km 的光纤的群延迟的分辨率为 0.01ps/km。

用于波形测量:随着超高速光通信的发展,提高光波测量的时间分辨率日益重要。虽然利用光学非线性效应的光取样方法时间响应较短,但取样脉冲的持续时间较长,因此时间分辨率限制在几皮秒。Takara 等利用超连续光源得到时间分辨率为 0.6ps 的取样脉冲,成功地对 100Gbit/s 的光脉冲串进行了波形测量。

生物医学领域:光学相干断层成像术(optical coherence tomography,OCT)是一门干涉测量和非侵入式成像技术,其纵向分辨率由光谱宽度决定。传统的 OCT 系统中最普遍的做法是采用超级冷光半导体激光器做光源,但是它严重受到带宽的限制,因此成像的纵向精度一般只有 $10\sim 15\mu\text{m}$ 。超连续光源以其较宽的带宽和较高的相干性极大地提高了成像系统的纵向分辨率。

全光解复用:全光解复用是全光信号处理的基本功能,是低比特率的电信号与高比特率的光信号之间的桥梁。基于光纤和半导体激光器的四波混频效应,已实现无误码的全光解复用达 200Gbit/s。Morioka 等用抖动小于 100fs 的低噪声超连续短脉冲作为泵浦源,利用一段 300m 的保偏光纤的四波混频效应,成功地对 500Gbit/s 的信号进行了无误码的全光解复用。

总之,SC 在光通信、超快光学、光谱度量学、分光学和医学成像等领域都有很重要的应用,对其的研究也具有很大的应用价值。

目前 PCF 在传感领域的研究主要集中在以下几个方面。

隐失波探测器:利用待测物质与光纤中的光波场相互作用,使其中一部分频率的光被吸收,最后通过检测输出光波中的频率来分析物质的特性。PCF 中较强的隐失波场以及待测物质与光波场较长的相互作用距离给这种探测器带来了很大的优越性。

荧光生物传感:比起传统单模光纤,双包层 PCF 有更好的双光子荧光效应,可以实现更好的荧光生物传感。因为有两个包层,所以光波既可以在此 PCF 的内芯中传输,也可以在其两个包层之间的部分传输。用来刺激载色体的光波在 PCF 内芯中传输,生物体发射的荧光信号被 PCF 接收,在两个包层之间的部分传输,外包层空气孔的存在保证了 PCF 有一个很大的数值孔径,可以很好地接收生物的荧光

信号。

弯曲探测:在多芯 PCF 中,不同纤芯中传输的光的相位不同,利用相位的差值可以精确地判断出弯曲特征,并且可以计算出弯曲的角度。

非线性性质:特殊设计的 PCF 可以具有很大的非线性效应,基于非线性效应,PCF 可以将一个窄脉冲输入转变为连续宽频谱输出,这种谱源可用于光学相干 X 射线技术、光谱学及计量学中。

单模及大模面积:PCF 的这一性质使其适合于大功率激光传输,无非线性效应的大功率激光传输的实现,将会大幅度提高光纤传感的灵敏度,实现一些原来无法实现的传感测量。

掺杂 PCF:在空气孔中充入聚合物作为掺杂成分(或其他掺杂成分,如高折射率液体),依靠掺杂成分受不同环境因素影响的变化,对环境中的各种参量进行测量。如在光纤的空气孔中充入对温度敏感的聚合物,则光纤包层的有效折射率随温度的变化而变化,通过分析出射光波,可以较为精确地计算出温度的变化。

原子导:在临近的空气孔中放入导电的电线,产生的磁场使得原子在空气孔中传输。利用这种方法可以检测与原子运动有关的物理量,如重力和磁场强度。

此外,PCF 还可以被用作超短脉冲激光器^[34-37]、拉曼放大器^[38]、参量放大器、波长转换器^[39,40]、压力温度传感器^[41-43]及脉冲成型器^[44,45]等。

1.1.4 PCF 的数值计算方法

数值计算方法在 PCF 的传输、设计和应用方面发挥着重要的作用。从最初的标量法到现在的矢量法,目前国内外已经建立了多种分析 PCF 特性的理论方法,如平面波法^[46]、有限差分法^[47,48]、多极法^[49,50]、超格子法^[51]、光束传播法^[52,53]、有效折射率法^[3,54,55]及有限元法^[56,57]等,这些方法各有其特点。

平面波法(plane wave method, PWM)是用于研究 PCF 比较早且运用比较广泛的一种算法,主要适用于研究完整周期结构 PCF 的 PBG。该方法考虑了 PCF 的复杂包层结构,将模场分解为平面波分量的形式,将介电常数展开为傅里叶级数,并将以上分解代入麦克斯韦方程组中,得到一组本征值方程,通过求解本征值问题得到相应 PCF 结构的 PBG 和模场分布。这种方法的优点是:没有引入假设条件,可以精确模拟 PCF,为频带结构的计算提供了一个稳定可靠的算法;编程简单,可以借助现有算法库中的傅里叶变换(Fourier transform)、矩阵对角化等标准程序,且计算速度很快。缺点是:对于存在缺陷的有限周期结构,需要引入“超晶胞”;为了计算的精确,需要选择大量的平面波,导致计算量急剧增加。而且,如果介电常数是随波长变化的函数,不再是常数,则在计算过程中没有确定的本征方程,计算会变得相当复杂和困难。

有效折射率法(effective index model, EIM)仅适用于计算 TIR-PCF,是由

Birks 等首先提出,将 PCF 类比于阶跃光纤,求解等效阶跃光纤的基模特征方程,得到模式的传输常数及模场分布。这种方法可以对 PCF 的单模运行机制做出很好的解释,能够给出一些 PCF 的深层运行规律,计算过程简单;缺点是忽视了 PCF 截面复杂的折射率分布,在 PCF 包层空气孔较大的情况下,误差较大,不能适用。

有限差分法包括时域有限差分(finite difference time domain, FDTD)法和频域有限差分(finite difference frequency domain, FDFD)法。FDTD 法是 1966 年由 Yee 提出来的,将麦克斯韦旋度方程组转化为一组差分方程来求解。FDFD 法利用有限差分原理,将麦克斯韦方程组化为矩阵形式的特征方程,通过求解特征方程直接得到模场分布和能带图,无论是差分方程还是边界条件的差分近似都比 FDTD 法简单、方便。用 FDFD 法可快速得到整个剖分域中的场值,而不必人为细分总场值,因而简单易行。其生成的矩阵为稀疏矩阵,其中只有一些为数不多的非零矩阵元,明显地减少了计算量,节省计算机内存。FDTD 法精度较高,能够得到一组动态的模场传输过程,而 FDFD 法得到的是已经稳定的模场分布,不能显示中间的动态传输过程。同时, FDTD 法对不规则非均匀介质的散射问题也有广泛的适用性。

FDFD 法利用有限差分原理,将麦克斯韦方程组化为矩阵形式的特征方程,通过求解特征方程直接得到模场分布和能带图。无论是差分方程还是边界条件的差分近似都比时域法简单、方便,同时,有限差分法对不规则非均匀介质的散射问题有广泛的适用性。用 FDFD 法可快速得到整个剖分域中的场值,而不必人为细分总场值,因而简单易行。其生成的矩阵为稀疏矩阵,其中只有一些为数不多的非零矩阵元,求逆时间为 $O(N^2)$,明显地减少了计算量,节省了计算机内存。

FDTD 法精度较高,能得到电磁波的时域解,通过傅里叶变换可得到频域解。但是 FDTD 法的计算需要大量的存储空间,且计算时间较长。与 FDTD 法相比, FDFD 法可以直接求解亥姆霍兹方程,更适合计算禁带结构和本征态,也可以求解带隙图、模场分布及有效折射率分布等问题。同时在频域中不必对时间作量化处理,可以减少迭代过程,计算效率较高。但是,随着离散节点数的增加, FDFD 法的计算时间会变得相当长,这一点极大地限制了该方法在分析实际问题中的应用。

有限元法(finite element method, FEM)最早于 20 世纪 50 年代产生于力学领域,20 世纪 60 年代末到 70 年代初应用于电磁工程领域,是一种成熟而且适用范围非常广泛的数值计算方法。对于如波动方程这样的偏微分方程, FEM 将其表征的连续函数所在的封闭场划分成有限个小区域,每个小区域用一个待定的近似函数来代替,于是整个场域的函数被离散化,由此获得一组近似的代数方程,并联立求解,以获得该场域中函数的近似数值。 FEM 适用于不规则截面、不同形状空气孔及不同折射率材料的情况,计算精确;但该方法在计算中涉及大量的未知量,编程复杂,对计算机的配置要求也很高。