

邴丕彬 著

# 光子晶体光纤 传感技术概论

GUANGZI JINGTI GUANGXIAN

CHUANGAN JISHU GAILUN



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

# 光子晶体光纤 传感技术概论

邴丕彬 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

本书对光子晶体光纤(PCF)传感技术的研究现状进行了详细的分析和介绍。对PCF的性质、应用以及常规分析方法进行了介绍,并重点介绍了基于PCF的倏逝波传感技术、表面等离子体共振(SPR)传感技术、表面增强拉曼效应(SERS)传感技术以及液晶填充传感技术、光栅传感技术、相位调制干涉型传感技术、聚合物PCF传感技术、太赫兹波传感技术、有源PCF传感技术等。

本书可供从事光子晶体光纤传感技术研究工作的工程技术人员、科学研究人员和高校相关专业的师生参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

光子晶体光纤传感技术概论 / 邴丕彬著. — 北京 :  
中国水利水电出版社, 2016. 12  
ISBN 978-7-5170-5029-2

I. ①光… II. ①邴… III. ①光学晶体—光纤传输技术—概论 IV. ①TN818

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第313283号

|      |  |
|------|--|
| 书 名  | 光子晶体光纤传感技术概论   |
| 作 者  | GUANGZI JINGTI GUANGXIAN CHUANGAN JISHU GAILUN<br>邴丕彬 著  |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: www.waterpub.com.cn<br>E-mail: sales@waterpub.com.cn<br>电话: (010) 68367658 (营销中心) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643、68545874<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点   |
| 排 版  | 中国水利水电出版社微机排版中心  |
| 印 刷  | 北京九州迅驰传媒文化有限公司   |
| 规 格  | 184mm×260mm 16开本 9.5印张 225千字   |
| 版 次  | 2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷  |
| 定 价  | 48.00元   |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

近十几年来，随着光电子技术的发展，光学传感技术突飞猛进，各类光学传感器的性能以及商品化程度明显提高，尤其是光纤传感技术，在各种工业精密传感、检测以及相关科学研究领域中发挥着越来越重要的作用。

在本书讲述中，作者以一种新型光纤——光子晶体光纤（PCF）为基础，介绍了多种传感原理在光子晶体光纤传感技术领域的应用，系统总结了近几年国内外研究工作者在光子晶体光纤传感技术领域前沿基础科研和理论成果，推广并宣传光子晶体光纤传感技术领域的研究与应用成果。

全书共分5章。第1章介绍光子晶体光纤，并分析了这种新型光纤的性质、应用和常见的几种理论分析方法；第2章介绍光子晶体光纤倏逝波传感技术；第3章介绍光子晶体光纤表面等离子体共振（SPR）传感技术，由于PCF-SPR传感技术同时具有SPR的高灵敏特性以及光子晶体光纤的优良传输特性，能够显著提高传感性能，特别适合用于传感，因此这一章也是重点叙述的章节；第4章介绍光子晶体光纤表面增强拉曼效应（SERS）传感技术；第5章则是对其他光子晶体光纤液晶填充、光栅、相位调制干涉型传感技术进行介绍，此外，还介绍了聚合物光子晶体光纤传感技术、光子晶体光纤太赫兹传感技术，以及有源光子晶体光纤传感技术等。

本书突出先进性、前瞻性的特点，作者由衷希望本书的出版能对我国光子晶体光纤传感技术的研究和发展起到一定的促进作用。

本书由河南省创新性科技团队“流体动力机械与流体输送工程”（C20140038）、国家自然科学基金“基于D型光子晶体光纤表面等离子体共振传感技术研究”（61601183）资助出版。

由于作者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作者

2016年11月

# 目 录

前言

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| <b>第 1 章 光子晶体光纤</b> .....             | 1  |
| 1.1 光子晶体光纤简介 .....                    | 1  |
| 1.2 光子晶体光纤的分类和性质 .....                | 3  |
| 1.2.1 TIR-PCF 的主要特性 .....             | 5  |
| 1.2.2 PBG-PCF 的主要特性 .....             | 9  |
| 1.3 光子晶体光纤的应用.....                    | 10 |
| 1.4 光子晶体光纤数值分析方法.....                 | 12 |
| 1.4.1 有效折射率法 .....                    | 12 |
| 1.4.2 有限差分法 .....                     | 14 |
| 1.4.3 平面波展开法 .....                    | 14 |
| 1.4.4 多极法 .....                       | 15 |
| 1.4.5 有限元法.....                       | 15 |
| 本章参考文献 .....                          | 19 |
| <b>第 2 章 光子晶体光纤倏逝波传感技术</b> .....      | 24 |
| 2.1 倏逝波传感技术原理.....                    | 24 |
| 2.2 光子晶体光纤倏逝波传感技术分类.....              | 26 |
| 2.2.1 光子晶体光纤倏逝波吸收型传感技术 .....          | 27 |
| 2.2.2 光子晶体光纤倏逝波激发荧光标记传感技术 .....       | 28 |
| 2.2.3 光子晶体光纤倏逝波激发表面等离子体共振的传感技术 .....  | 29 |
| 2.3 光子晶体光纤倏逝波传感技术研究进展.....            | 29 |
| 本章参考文献 .....                          | 39 |
| <b>第 3 章 光子晶体光纤表面等离子体共振传感技术</b> ..... | 42 |
| 3.1 表面等离子体共振传感原理.....                 | 42 |
| 3.1.1 表面等离子体共振原理 .....                | 42 |
| 3.1.2 表面等离子体共振在传感中的应用 .....           | 44 |
| 3.2 空气孔内表面镀膜的光子晶体光纤表面等离子体共振传感技术.....  | 47 |
| 3.2.1 六角结构 PCF-SPR 传感技术 .....         | 51 |
| 3.2.2 大半圆结构 PCF-SPR 传感技术 .....        | 60 |
| 3.2.3 悬芯结构 PCF-SPR 传感技术 .....         | 62 |
| 3.2.4 纤芯空气孔镀膜 PCF-SPR 传感技术 .....      | 72 |



|            |                           |            |
|------------|---------------------------|------------|
| 3.3        | 纳米线填充的光子晶体光纤表面等离子体共振传感技术  | 81         |
| 3.4        | 外表面镀膜的光子晶体光纤表面等离子体共振传感技术  | 86         |
| 3.5        | 光子晶体光纤表面等离子体共振传感技术展望      | 90         |
|            | 本章参考文献                    | 90         |
| <b>第4章</b> | <b>光子晶体光纤表面增强拉曼效应传感技术</b> | <b>98</b>  |
| 4.1        | 表面增强拉曼效应原理                | 98         |
| 4.1.1      | SERS 电磁增强理论               | 99         |
| 4.1.2      | SERS 化学增强理论               | 102        |
| 4.2        | SERS 基底                   | 104        |
| 4.3        | 光子晶体光纤表面增强拉曼效应传感技术        | 104        |
| 4.3.1      | 实芯 PCF-SERS 传感器           | 105        |
| 4.3.2      | 空芯 PCF-SERS 传感器           | 108        |
|            | 本章参考文献                    | 112        |
| <b>第5章</b> | <b>其他光子晶体光纤传感技术</b>       | <b>115</b> |
| 5.1        | 光子晶体光纤液晶填充传感技术            | 115        |
| 5.2        | 光子晶体光纤光栅传感技术              | 117        |
| 5.3        | 光子晶体光纤相位调制干涉型传感技术         | 121        |
| 5.4        | 聚合物光子晶体光纤传感技术             | 126        |
| 5.5        | 光子晶体光纤太赫兹波传感技术            | 128        |
| 5.6        | 有源光子晶体光纤传感技术              | 135        |
|            | 本章参考文献                    | 138        |

# 第1章 光子晶体光纤

传感器是能感受规定的被测量并按照一定规律转换成可用信号的器件或装置，它通常由敏感元件、转换元件及相应的机械结构与电子线路所组成。传感器是一种获取与处理信息的装置，是构成信息系统、自动化系统、通信系统的最基础的器件。传感器技术则是关于传感器的设计、制造、测试和应用的综合技术，涉及材料科学、微电子学、仪器仪表工艺、环境科学、物理、化学、生物医学及仿生学等多个学科。按照检测对象基本上可以把传感器分为两大类，即物理传感器和化学传感器。物理传感器把温度、湿度、压力、流量、各种几何量及光学参数等物理量作为检测对象。而化学传感器则对物质成分敏感，是一种小型化的、能专一和可逆地对溶液中的离子，空气中的有毒、有害、可燃气体或生物分子进行检测的器件。在生物圈中，存在着数以万计的物质，它们影响着生物学过程的各个方面。对这些物质进行快速自动分析，是科学家梦寐以求的目标。在过去40多年中，产生了一代新的传感器——生物传感器（Biosensor）。生物传感是一门由生物学、化学、物理学、医学、电子学等学科互相渗透而成长起来的高新技术科学，在生物医学、环境保护、食品安全、临床医学、军事医学及国家安全等领域有着重要应用价值。

传感技术是当代科技发展的一个重要标志，与通信技术、计算机技术共同构成信息产业的三大支柱。光纤传感技术是从20世纪70年代后期迅速发展起来的，并与光纤通信技术一起成为光纤技术的两个重要领域。光纤传感就是将被测量的变化转化为光纤中传输光参数（如光强、波长、相位及偏振态）的变化，通过测量光纤的输出光特性来确定被测量的大小。与传统的传感器相比，光纤传感器本身不带电，具有抗电磁干扰、电绝缘、防爆性能好、耐腐蚀、导光性能好、本质安全、多参量测量（温度、应力、振动、位移、转动、电磁场、化学量和生物量等）、灵敏度高、质量轻、体积小、可嵌入（物体）等特点，容易组成光纤传感网络，并可接入因特网和无线网。

然而采用普通光纤作为敏感元件的光纤传感器存在耦合损耗较大、保偏特性差和存在交叉敏感问题等若干难以克服的缺点，限制了光纤传感器性能的进一步提高。目前，采用光子晶体光纤（Photonic Crystal Fiber, PCF）制作传感器是传感器领域研究的一大热点，这类微结构光纤传感器有望解决上述普通光纤传感器存在的问题，并具有多维结构、调谐范围宽、模场面积大、可实现多参数测量等一系列优良特性。

## 1.1 光子晶体光纤简介

PCF 又称微结构光纤（Micro-Structured Optical Fiber, MSF）或多孔光纤（Holey Fiber, HF），是在二维光子晶体的基础上发展起来的一种特殊光纤，也是目前被广泛研究的一种新型光纤。

1991年，Russell 等人<sup>[1]</sup>根据光子晶体的导光原理首次提出 PCF 的概念，PCF 通常

由石英或聚合物和空气孔构成，在光纤的截面上空气孔成周期性排列，沿光纤的轴向不变，光纤的纤芯由缺失空气孔或引入一个不同形状的空气孔形成。最初设计这种光纤的目的是利用光子晶体包层形成的光子禁带进行导光。由于制作工艺的限制，PCF 在很长时间内只是一个概念性产物。

1996 年，英国南安普顿大学的 Knight 等人<sup>[2]</sup>在 OFC 会议上报道成功拉制出世界上第一根 PCF，如图 1-1 (a) 所示。人们发现这种光纤只是在结构上使用了类似的空气孔周期性排布，但是其纤芯由缺失空气孔形成，纤芯的有效折射率比包层的有效折射率高，导光机制与传统光纤的全内反射导光机制类似<sup>[3]</sup>。进一步研究发现，这根 PCF 具有无截止单模传输的特性，并且这种特性不依赖于包层空气孔的排列。在特定情况下，无序排列包层空气孔的 PCF 也能够实现无截止单模传输<sup>[4]</sup>。

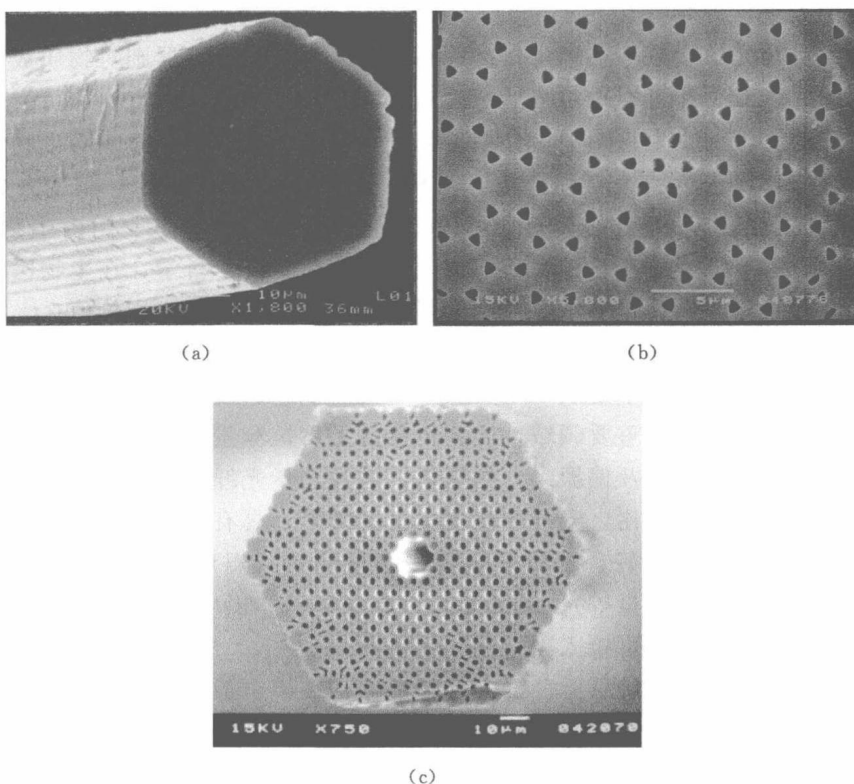


图 1-1 PCF 放大图

- (a) 第一根实芯 TIR 型 PCF 的光纤截面图；(b) 第一根光子带隙型 PCF 的光纤截面图；  
(c) 三角形格子排列的中空芯光子带隙型 PCF 光纤截面图

1998 年，Science 杂志报道了 Knight 等人<sup>[5]</sup>拉制出第一根依靠光子带隙原理导光的 PCF。该 PCF 芯区是空气孔，包层由石英材料中蜂窝结构排列的空气孔构成，如图 1-1 (b) 所示。但是仔细研究发现，这种光纤实际上并不是真正意义上的光子带隙光纤，即实际上大部分光不是在中心小孔而是在石英中传输的。

真正能够实现光在空气芯中传输的光子带隙光纤是 1999 年由 Science 报道的 Cregan



等人<sup>[6]</sup>拉制的，光纤包层由三角形排布的空气孔构成，芯区是由中心抽去 7 根空芯棒所构成，如图 1-1 (c) 所示。

此后，随着拉制工艺的提高，各种性能更为优良的 PCF 层出不穷。2003 年，国际顶级期刊 Science<sup>[7]</sup> 和 Nature<sup>[8]</sup> 分别刊出了关于 PCF 发展的综述性文章，标志着 PCF 在国际上得到认可。从此，越来越多的科研人员投入到 PCF 的研制工作中，使得 PCF 的控制技术趋于成熟，新型 PCF 的分析和研究方法不断完善，提出很多简单、实用的模型以及高效的分析方法，并不断扩大 PCF 的应用范围，标志着基于 PCF 的研究进入了新的历史发展阶段。

PCF 的拉制方法是影响其实用化的关键。设计和制作预制棒是完成 PCF 拉制的首要任务。常见的 PCF 是以二氧化硅为基底的，这种光纤通常是用堆砌法来拉制的，图 1-2 所示为堆砌法拉制 PCF 示意图。即将制作好的预制棒放在光纤拉丝塔上，然后利用传统光纤的拉制方法进行拉制，拉制过程中需要对温度和速度进行精密的控制，在拉制成功的 PCF 的表面加上涂覆层，这样就形成了符合要求的 PCF。另外，还有许多其他的方法来制作预制棒，如挤压法<sup>[9]</sup>、溶凝胶制造法<sup>[10]</sup>和钻孔法等。

PCF 的切割可以使用标准光纤切割刀进行且效果良好。只有当 PCF 的纤芯尺寸非常小，或者 PCF 的空气填充率非常高的时候，PCF 的切割面才会出现微小变形。

PCF 的熔接与常规阶跃光纤差别显著。通常情况下，固芯 PCF 与传统阶跃光纤或者固芯 PCF 之间可以直接熔接；但是 PCF 的熔接要达到较小的熔接损耗和较好的模场匹配，用普通的熔接机电弧放电是不行的，需要使用特殊熔接机，能够对加热参数详细控制。但是特殊熔接机的价格十分昂贵且用途较单一，很少有单位能够负担得起。另外，可以利用普通熔接机进行手动熔接，如改变放电参数和放电时间，也能够实现减小熔接损耗，这需要长时间的经验积累和熟练的操作技术。

最近几年，PCF 以其独特的结构和导光机制吸引了学术界的关注，成为光学和光电物理学的研究热点。

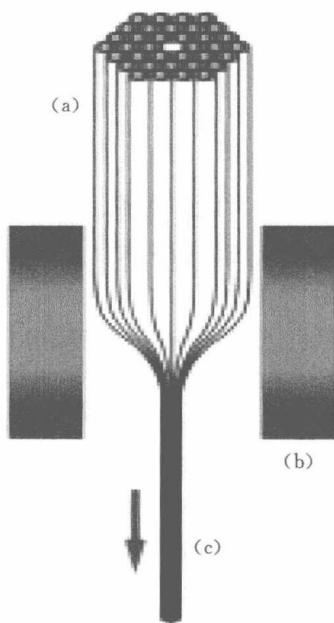


图 1-2 堆砌法拉制 PCF 示意图  
(a) 玻璃管堆砌；(b) 在 1800~2000℃ 条件下拉制；  
(c) 拉制成功的 PCF

## 1.2 光子晶体光纤的分类和性质

根据导光机理不同，可将 PCF 分为两类，即全内反射型光子晶体光纤 (Total Internal Reflection Photonic Crystal Fiber, TIR-PCF) 或折射率引导型光子晶体光纤 (Index Guiding PCF) 和光子带隙型光子晶体光纤 (Photonic Band Gap Photonic Crystal Fiber, PBG-PCF)。其典型结构如图 1-3 所示。

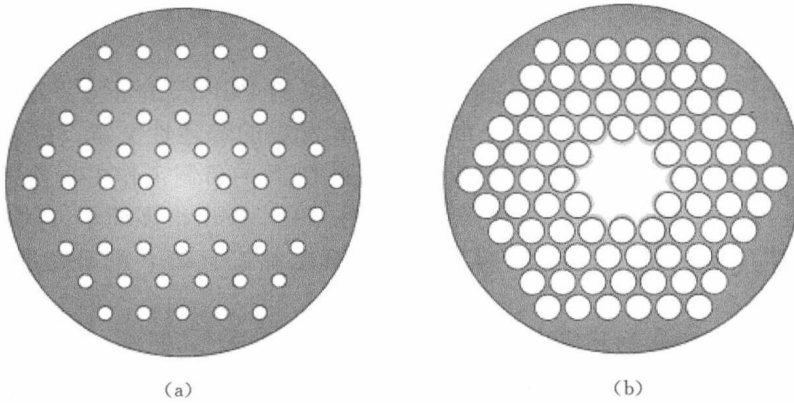


图 1-3 PCF 的典型结构  
(a) TIR-PCF; (b) PBG-PCF

对于 TIR-PCF，它是利用纤芯和包层中有效折射率的差别来限制光在纤芯中传输的。由于芯区折射率大于包层的等效折射率，其导光机理与传统光纤相似，必须满足全内反射条件的光能够在纤芯中传输。但其与常规的单模光纤有所不同，由于包层中包含着空气，光子晶体光纤包层中空气孔的尺寸比光纤中传输光的波长还要小，故而也被称为修正/改进的全内反射 (Modified Total Internal Reflection, M-TIR)。根据光的传输原理，包层中的空气不需要严格按照规律排列，对包层中空气孔的形状及周期性无严格要求，不需要在包层中形成光子禁带，只需要满足全内反射中折射率的数值条件即可，实现起来也相对容易。可以通过改变 PCF 中空气孔的形状、大小、间距及排列方法等，来实现满足不同需求的特殊功能 PCF。

对于 PBG-PCF，可以通过求解光波在 PCF 中传输的本征方程，得出实芯和空芯 PCF 的传导条件，即光子能隙导光理论。它与 TIR-PCF 的原理截然不同，是通过在纤芯引入了折射率低于包层材料的空缺，利用光子带隙效应，使光在 PCF 的空气孔中而非在石英中传播。对于 PBG-PCF 来说，光传输的机理不可能是全内反射，因为没有任何一种固体材料的折射率能够低于空气的折射率。它的导光原理是通过合理设计包层空气孔结构，使其成为沿轴向周期性排列的石英-空气孔结构，获得光子禁带。特定频率的光场以各不相同的角度进入光纤，遇到光子禁带时无法穿越而被反射回来，从而被严格限制在纤芯中传播，即利用横向存在的光子带隙使光波只能沿纵向传播。这种 PCF 只能传输某些频率范围内的光，不满足光子带隙效应频率的光就无法在光纤中传输。纤芯缺陷材料的折射率比包层低，通常为空气；为了在包层中形成禁带，对空气孔的形状以及排列有着严格的要求。制备此类光纤具有一定难度，对加工工艺要求很高。

PCF 以其优异的性质显示出了巨大的发展潜力和广阔的应用前景，拓宽了光纤的应用范围。目前 PCF 的拉制技术也逐渐成熟，多种拉制方式已被提出，图 1-4 是较为常见的、生产技术比较成熟的结构。

相对于传统光纤，PCF 具有许多新颖独特的光传输特性。经过合理设计的 PCF 可以获得许多独特的性质。TIR-PCF 与 PBG-PCF 结构不同，所带来的性质也不尽相同。

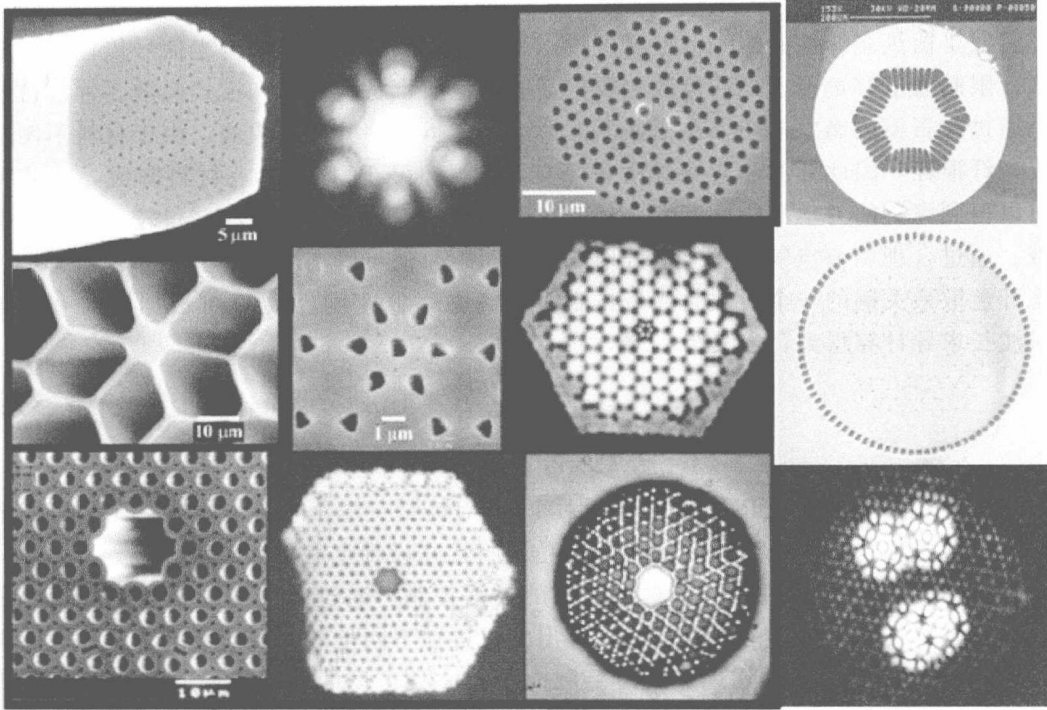


图 1-4 各种结构的 PCF 示意图

### 1.2.1 TIR-PCF 的主要特性

#### 1. 无截止单模传输

光纤单模传输具有噪声小、无模式色散等优点，在光纤远程通信、传感等方面具有重要应用。一般而言，对于传统阶跃型光纤，传输模式数目取决于归一化频率。依据单模光纤中归一化频率  $V$  值的定义，PCF 的  $V_{\text{eff}}$  值可类比定义为<sup>[3]</sup>

$$V_{\text{eff}} = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} (n_o^2 - n_{\text{eff}}^2)^{1/2} \quad (1-1)$$

式中： $\Lambda$  为包层中空气孔间的间隔； $\lambda$  为入射波长； $n_o$  和  $n_{\text{eff}}$  分别为 PCF 芯区与包层的等效折射率。

由于  $n_{\text{eff}}$  是波长的函数，当波长增大（减小）时，光波模场分布向包层区域扩散（中心二氧化硅区域集中），使得  $n_{\text{eff}}$  减小（增大），从而  $n_o$  和  $n_{\text{eff}}$  之差增大（减小），一定程度上抵消了波长的变化对  $V_{\text{eff}}$  值的影响，满足了单模传输条件。理论结果表明，在传统阶跃光纤中，为保证单模传输，归一化频率必须小于 2.4048，当入射波长减小时，归一化频率逐渐变大，最终能够打破单模传输条件<sup>[11-14]</sup>。对于 PCF，归一化频率  $d/\Lambda < 0.406$  时就可以无截止单模传输（Endlessly Single Mode）<sup>[15]</sup>。通过优化 PCF 的结构参数，如空气孔大小、间距等，能够满足无截止单模传输条件。PCF 的这个特性可以应用于光通信的波分复用中，能够提供充足的信道资源，同时对于 PCF 传感器，无截止单模传输特性能够扩大传感器的检测范围。

## 2. 色散灵活可控

色散是衡量光纤性能的一个重要参数，光纤的色散特性直接影响光信号传输时的脉冲形状、限制通信容量等。光纤色散主要包括波导色散、材料色散和模式色散3种。常规光纤是通过在石英玻璃中掺杂，在横截面上形成一定折射率分布制成的，由于材料不匹配会造成光纤损耗，因此纤芯和包层折射率不能相差太大。PCF由单一材料制成，纤芯和包层可以得到完美的力学和热学匹配，从而可以在非常宽的波长范围内获得较大或较稳定的色散。通过合理调节空气孔尺寸、排列方式和间距，就可以实现各种期望的色散特性。描述光纤色散最关键的一个参数是光纤的群速度色散，群速度色散  $D$  可根据模式有效折射率对波长求导计算得到，定义为

$$D = -\frac{\lambda}{c} \cdot \frac{\partial^2 n_{\text{eff}}}{\partial \lambda^2} \quad (1-2)$$

其中

$$n_{\text{eff}} = \beta(\lambda, n_m) / k_0$$

式中： $n_{\text{eff}}$ 为有效折射率。PCF的有效折射率  $n_{\text{eff}}$ 与包层空气孔的结构和占空比都有明显的关系。因此与传统阶跃光纤相比，PCF的色散特性在设计上有更多的灵活性。

在PCF中，色散特性得到了史无前例的灵活控制。通过改变光纤截面中空气孔的尺寸、形状及其排列方式，能够灵活地设计出具有各种不同色散特性的光纤。例如，能够调节零色散点位置<sup>[16]</sup>，能够实现宽波段范围内中心波长可调的平坦色散<sup>[17-21]</sup>，并且平坦色散中心波长可以适当移动，色散值可以根据需要设计成正色散、反常色散<sup>[22]</sup>或者零色散<sup>[23]</sup>。

## 3. 大模场面积

有效模场面积是PCF中一个重要参数，其表达式为

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left( \iint_{-\infty}^{+\infty} |E(x, y)|^2 dx dy \right)^2}{\iint_{\text{NLR}} |E(x, y)|^4 dx dy} \quad (1-3)$$

式中： $E(x, y)$ 为模场的电场分布；NLR为波导的非线性区域，对于PCF来说NLR对应于空气孔之外的光纤背景材料区域，通常来说即是二氧化硅材料。对于设计者来说，可以根据需要获得非常大的模场面积<sup>[24,25]</sup>。具有大模场面积(Large Mode Area, LMA)的光纤可以降低功率密度和非线性效应，有利于高功率、高能量的传输而没有非线性效应或材料损坏。掺杂稀土元素的大模场面积PCF是高功率PCF激光器的关键器件。大模场面积能够有效提高连续波和脉冲激光器系统的标定功率，这对开发光纤激光器和放大器非常有利，既能经受更高的功率，又不会达到器件损伤的功率密度。

在PCF中，允许把芯径做得很大。例如，文献[26]所涉及的大模面积PCF，其芯径可以达到传输波长的50倍，书中认为光纤中传输模式的数量是由空气孔直径  $d$  与空气孔间隔  $\Lambda$  之比决定的，因而只要包层设计合理，能否维持单模运转与光纤的绝对尺寸无关。大芯径光纤可调节波导色散，使单模截止移到更短的波长，并扩大有用的传输光谱。图1-5所示为NKT公司生产的一种典型结构的LMA-PCF结构示意图，其空气孔呈六角排列，6层包层空气孔，去掉一个中心空气孔形成纤芯。

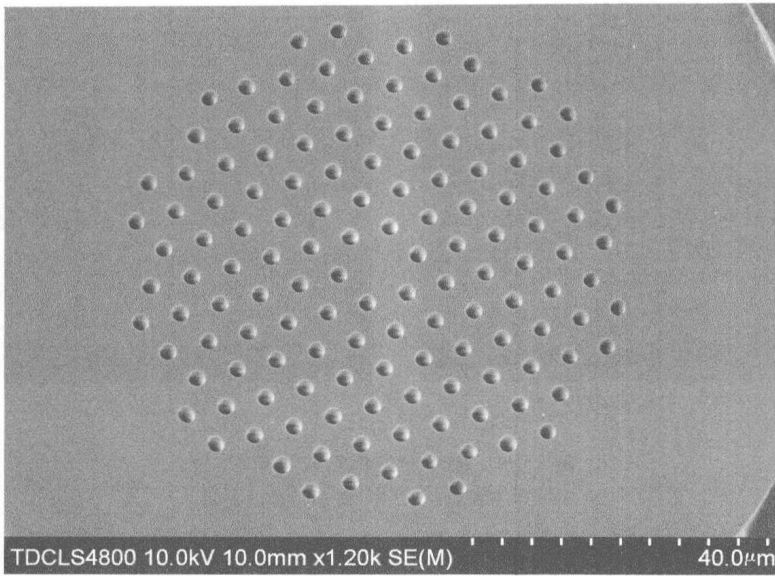


图 1-5 LMA-PCF 结构示意图

目前, 设计和制备具有低损耗的单模大模场面积 PCF 是研究的难点和重点。

#### 4. 高双折射效应

一般单模光纤的双折射定义为两正交模式的传播常数之差, 即  $\beta_x - \beta_y$ 。两正交偏振模式的传播常数  $\beta_x$  和  $\beta_y$  之间相差越大, 两偏振模式之间的耦合就越困难, 则光纤的偏振保持能力就越强。因此, 可以用模式双折射来描述光纤的保偏性能, 定义为

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{\frac{2\pi}{\lambda}} = \left| \frac{\beta_x}{k_0} - \frac{\beta_y}{k_0} \right| = |n_{\text{eff}x} - n_{\text{eff}y}| \quad (1-4)$$

式中:  $n_{\text{eff}x}$  和  $n_{\text{eff}y}$  分别为两个正交偏振模式的有效折射率, 且  $n_{\text{eff}x} = \frac{\beta_x}{k_0}$ ,  $n_{\text{eff}y} = \frac{\beta_y}{k_0}$ 。

模式双折射也可以用归一化双折射表示, 定义为

$$B' = \frac{\Delta\beta}{\beta_{xy}} = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{\frac{1}{2}(\beta_x + \beta_y)} = \frac{|n_{\text{eff}x} - n_{\text{eff}y}|}{n} \quad (1-5)$$

一般常规单模光纤的  $B'$  值在  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  之间。当  $B' < 10^{-6}$  时为低双折射光纤 (Low Birefringence fiber, LB);  $B' > 10^{-5}$  时为高双折射光纤 (High Birefringence fiber, HB)。

高双折射是 PCF 的另一个重要特性。普通双折射光纤是通过引入形状双折射或应力双折射制作的, 这就大大增加了制作工艺的难度和制作的成本。但利用 PCF 灵活的结构设计就比较容易实现双折射, 通过对 PCF 的纤芯附近引入局部缺陷或者利用光纤包层本身具有内各向异性特点, 可以比较容易地打破光纤的对称性, 能够实现 PCF 的高双折射效应。比如在某一对称方向上减少一定空气孔或者改变空气孔尺寸, 就可以实现很高的双折射, 这是传统保偏光纤所不及的。图 1-6 所示为一种典型的熊猫型结构高双折射 PCF。

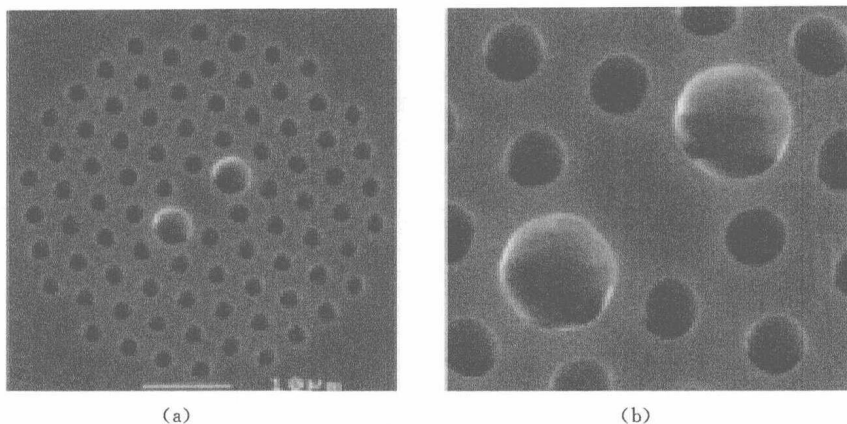


图 1-6 熊猫型结构高双折射 PCF  
(a) PCF 截面图；(b) 纤芯结构放大图

PCF 的高双折射特性在长距离通信、传感等方面具有重要应用。传统的熊猫型 PCF 和蝴蝶结型 PCF 模式双折射可达  $5 \times 10^{-4}$ 。经过特殊设计的 PCF 可以提供的模式双折射通常可以达到  $10^{-3}$  数量级<sup>[27-29]</sup>。目前报道的双折射高达  $7.7 \times 10^{-3}$  的 PCF 已经被拉制出来，并经过实验证明<sup>[30]</sup>。

### 5. 高非线性

一般来讲，任何电介质对光的响应都是非线性的，表征介质对光相应的极化率张量与电场强度有关。当光较弱时，可以忽略介质的非线性响应，只保留线性响应部分；在强电磁场的作用下，必须考虑非线性响应部分，将极化强度写成电场的级数展开形式，即

$$P = \epsilon_0 [\chi^{(1)} \cdot E + \chi^{(2)} \cdot EE + \chi^{(3)} \cdot EEE + \dots] \quad (1-6)$$

式中： $\chi$  为电极化率。由于二氧化硅分子是中心对称结构，其二阶非线性系数等于零，没有二阶非线性效应，所以石英光纤中的非线性效应起于三阶电极化率。并且略去高阶非线性效应，只考虑其主要作用的三阶非线性效应。将光纤对光的非线性响应写成折射率表达的形式，即

$$\tilde{n}(\omega) = n(\omega) + n_2 |E|^2 \quad (1-7)$$

式中： $n_2$  为光纤背景材料的非线性折射率，它与二氧化硅的三阶电极化率有关。对于二氧化硅来说， $n_2$  的值约为  $3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ，其在不同波长条件下的准确值可以由 Sellmeier 准确求得。

光纤中的非线性效应由于其长度长而有其独特之处。在光纤中存在的非线性效应主要包括 3 次谐波 (THG)、四波混频 (FWM)、自相位调制 (SPM)、交叉相位调制 (XPM)、受激拉曼 (SRS) 和受激布里渊散射 (SBS) 等。

光纤中非线性系数  $\gamma$  可以表示为

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} \times 10^3 \quad \text{W}^{-1} \text{ km}^{-1} \quad (1-8)$$

式中： $\lambda$  为真空中波长； $A_{\text{eff}}$  为有效模场面积。



传统的阶跃光纤由于有效模场面积受限制，要得到较高的非线性系数，只有想办法提高纤芯的非线性折射率系数，通常的做法是在纤芯中掺杂铯等元素或直接使用高非线性折射率材料。对于 PCF 来说，提高非线性系数的另一个有效途径就是减小纤芯的有效模场面积。随着光纤有效模场面积的减少，可以使得非线性系数增加，而有效模场面积可以通过减少  $\Lambda$  得到<sup>[31]</sup>。此外，随着光纤包层空气填充比  $d/\Lambda$  的增大，光纤的非线性效应也相应增加。图 1-7 所示为一种高非线性 PCF。

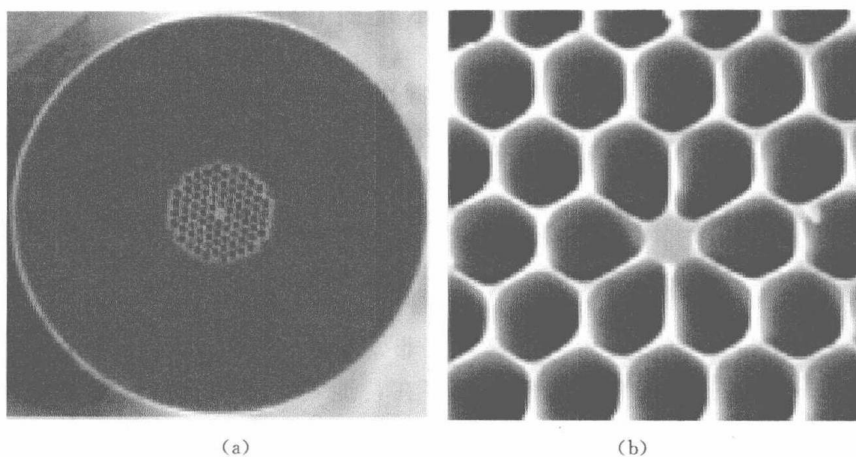


图 1-7 高非线性的 PCF  
(a) PCF 截面图；(b) 芯区放大图

当然，当 PCF 芯径过小时，将会有很大一部分光能量泄漏到包层中，不仅增大模场面积，也增加了光纤的损耗。因此在实际应用中，要综合考虑模场面积和限制损耗。通过结构设计，将模场面积控制在合理范围，可以得到预期的非线性系数。PCF 非线性研究方面最重要的例子就是能够产生超连续谱相干光源<sup>[32-36]</sup>。

### 1.2.2 PBG-PCF 的主要特性

#### 1. 损耗特性

PBG-PCF 能够避免纤芯材料的本征吸收和散射问题，理论上可实现极低的损耗。但是，由于受工艺水平的限制，纤芯材料的本征吸收和瑞利散射仍无法避免，即使采用先进的光纤制作工艺后，PBG-PCF 的损耗仍大于传统阶跃光纤的损耗水平。

理论研究结果表明，光纤包层中的空气孔结构对 PBG-PCF 的限制损耗 (Confinement Loss) 影响很大<sup>[37-39]</sup>，实际 PBG 光纤的包层区域不可能无限大，因此无法避免地存在限制损耗。产生损耗的另一个重要因素是存在表面模 (Surface Mode) 以及表面模与传输模式间的能量耦合<sup>[40,41]</sup>。此外，由于空芯内壁表面无法做到绝对光滑，这也使得损耗无法进一步降低。

尽管损耗问题暂时无法解决，但是 PBG-PCF 仍然具有巨大的应用潜力。特别是其光能量主要束缚于纤芯空气中，所以对弯曲效应不敏感，甚至可使曲率半径小于波长级别，具有实际意义，适合于生物医疗器件、微细加工领域。

## 2. 低非线性

PBG-PCF 利用空气导光, 因此非线性系数非常小<sup>[42]</sup>, 具有高的损伤阈值<sup>[43-45]</sup>, 有利于抑制有害的非线性过程。基于其结构的独特性, PBG-PCF 还可用于粒子传导 (Particle Guidance) 方面的应用, 微小粒子可在辐射压力下克服重力并向前推动。据报道, 目前在实验中已经实现了 150mm 距离的粒子传导<sup>[46]</sup>。

## 1.3 光子晶体光纤的应用

由于 PCF 具有无截止单模、灵活的色散特性、良好的非线性效应、高双折射效应等特性, 已经受到世界研究领域的极力追捧, 各国分别斥巨资进行研究。随着对 PCF 理论研究的深入和制造工艺的改善, 它的种种优越的特性将会得到更加深入研究和广泛应用。目前, PCF 在一些领域已经实用化, 如光纤通信、非线性光学和光电子学等领域的前沿研究。

### 1. 能量传输

大模场面积 PCF 在许多应用领域都具有非常重要的地位, 其中最重要的是它的单模大功率光传输。由于 PCF 包层空气孔的存在, 能够有效地将传输能量限制在纤芯中传输, 所以它的传输损耗很低。通过选择适当的空气孔排列方式和直径, 将大模场面积与宽带单模传输特性结合起来, 就可以实现大功率能量的传输, 可以用于制造高功率光纤激光器及光纤放大器。无截止单模 PCF 能够在很宽波长范围内维持单模传导特性, 可以实现可见、甚至紫外波段的单模激光传输, 且具有比普通单模光纤更小的弯曲损耗。英国南安普顿大学光电研究中心的 Monro 等人<sup>[47]</sup>已经拉制出在波长 1550nm 处模场面积为  $680\mu\text{m}^2$  的单模 PCF, 并且几乎所有波长的光在这种 PCF 中都能表现为单模传输特性。

对于空芯的 PBG-PCF, 同样适于传输高功率激光, 包括连续光或者高峰值功率的脉冲光。PBG-PCF 在短脉冲能量传输中有很大的应用, 因为这种光纤是用纤芯的空气孔进行导光的, 使得材料的非线性和光纤的损耗大大减小, 因而可以通过设计不同的纤芯空气孔的尺寸和包层的周期性结构的排列, 来实现对不同波长的脉冲能量传输。当入射光的波长与中心波长相对应时, 95% 以上的光脉冲能量被限制在了纤芯空气孔。这种光纤一般是用单一材料 (不掺杂质的石英) 制成的, 其光学特性的温度稳定性较好, 不容易受到外界影响。英国 Bath 大学的 F. Luan 等人<sup>[48]</sup>成功地用 5m 长的包层中充氮气的空芯 PCF 传输了波长为 800nm 的孤子脉冲, 该脉冲的脉宽小于 300fs, 峰值功率为 2.2MW, 重复频率为 5kHz, 这种情况下实现的最低损耗为 0.27dB/m。

此外, PCF 再制造过程中可以掺入稀土元素, 使得 PCF 自身成为增益介质, 形成掺杂式 PCF 激光器。可以灵活设计 PCF 的结构, 使其成为多芯 PCF, 制成锁相 PCF 激光器<sup>[49-51]</sup>。对于 PCF 放大器, 相关文献曾报道了峰值功率为 1.1MW, 峰值亮度大于  $10\text{kW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{Hz})$  的掺镱 PCF 放大器<sup>[52-55]</sup>。

### 2. 超连续谱

非线性 PCF 最成功的应用之一是利用纳秒、皮秒和飞秒脉冲产生超连续谱光。PCF

结构灵活,通过合理的设计 PCF 中周期性排列的空气孔,可以使 PCF 具有很强的非线性效应,尤其是实芯的 PCF。高功率的脉冲通过某种材料后,它的频谱会由于材料的非线性效应发生展宽,即产生超连续谱,这种光谱在度量学、光谱学以及光学相干层析成像技术中有着广泛的应用。图 1-8 所示为各种方法产生的宽带光源的光谱图<sup>[56]</sup>。从图中可以看出,高功率窄脉冲激光器经过具有高非线性的 PCF 后产生的超连续谱光源(最上面第一条曲线)无论在谱宽还是在功率上都有非常明显的优势。另外,研究表明,掺杂有稀有元素的 PCF 还能够将超连续谱向长波方向移动<sup>[57]</sup>。

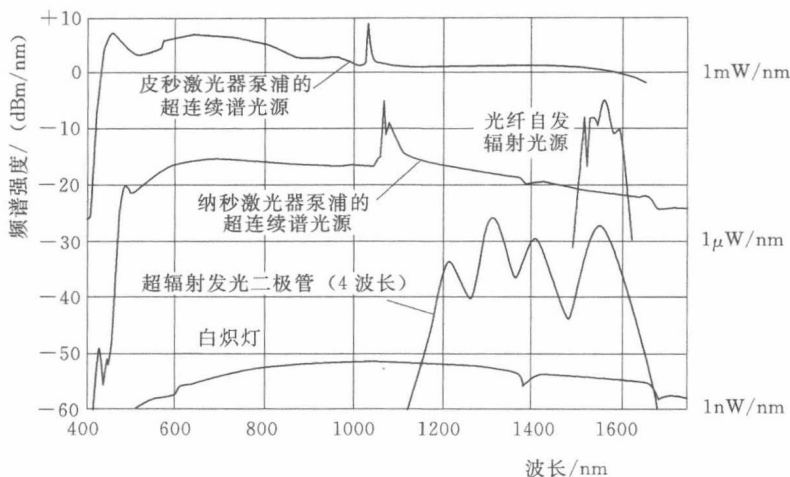


图 1-8 各种宽带光源的比较

PCF 产生超连续谱是由于光纤中零色散波长附近的高阶孤子裂变成红移的低频孤子和蓝移的非孤子辐射,这是一种新的光谱展宽机理。由于 PCF 的零色散点可以移至短波长处,则可利用这个特点制成超宽的连续光谱<sup>[58]</sup>。英国 Bath 大学的 A. Ortigosa-Blanch 等人用 200fs 的泵浦脉冲在 PCF 上产生了超连续光谱。将脉宽 100fs、峰值为 8kW 的脉冲(能量 0.8nJ)注入 75cm 长的 PCF 中,可以得到超连续谱,谱宽可以延伸进紫外区域<sup>[59]</sup>。日本电报电话公司的 T. Yamamoto 等人<sup>[60]</sup>用波长 1562nm、脉宽 2.2ps、重复频率 40GHz 的光脉冲注入 200m 长的色散平坦保偏 PCF 中,在 1550nm 区域产生了超过 40nm 宽的均匀超连续谱。美国 Rochester 大学的 Zhu 等人利用丹麦 Crystal Fiber A/S 公司的低双折射、高非线性的光子晶体光纤获得 600~1000nm 的超连续谱<sup>[61]</sup>。

### 3. PCF 传感器

PCF 最有潜力的应用前景就是 PCF 传感器。由于 PCF 的结构设计灵活,基于 PCF 的传感器被广泛应用在生物传感、环境检测和生化结构监测中。PCF 传感器有很多类型,如基于倏逝波的 PCF 传感器、基于表面等离子体共振的 PCF 传感器、基于表面增强拉曼效应的 PCF 传感器、基于液晶填充的 PCF 传感器、基于光纤光栅的 PCF 传感器以及空心 PCF 的气体传感器、有源 PCF 传感器、太赫兹 PCF 传感器等,在本书后面的章节中,将重点介绍这几种传感器的原理和发展现状。

目前,将 PCF 应用于温度、压力、应变、折射率等参数的传感测量受到各国研究人