

# Development and Applications of Photonic Crystal Fibers

Bingtao Zhang, Yue'e Chen, Zigang Zhao, Yong Wang\*

Laser Research Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences),  
Qingdao Shandong  
Email: \*yongwang@vip.sdlaser.cn

Received: Jan. 3<sup>rd</sup>, 2019; accepted: Jan. 16<sup>th</sup>, 2019; published: Jan. 23<sup>rd</sup>, 2019

---

## Abstract

Photonic crystal fibers (PCFs) have attracted increasing attention in recent years due to the unique flexible structures that enable unprecedented advantages and superior performance compared with traditional optical fibers. In this paper, the concept, classification and principle of PCFs are introduced first. Then the development of PCFs in both academic and industrial fields is reviewed, and the theoretical analysis method, preparation process and related parameters and properties of PCFs are illustrated. Next, the PCFs made of different materials and diverse structures are characterized. Furthermore, the applications of PCFs in fiber lasers, fiber-optic sensing and communications, as well as our works in the fields are discussed. Finally, comprehensive insights into the overall situation, challenges and prospectives of PCFs are provided.

## Keywords

Photonic Crystal Fiber, Photonic Crystal, Holey Fiber, Photonic Bandgap, Fiber Lasers

---

# 光子晶体光纤的发展和应用

张炳涛, 陈月娥, 赵兹罡, 王 勇\*

齐鲁工业大学(山东省科学院), 激光研究所, 山东 青岛  
Email: \*yongwang@vip.sdlaser.cn

收稿日期: 2019年1月3日; 录用日期: 2019年1月16日; 发布日期: 2019年1月23日

---

## 摘 要

近年来, 光子晶体光纤由于自身灵活多变的结构而具有很多传统光纤无法比拟的奇异特性, 其在各领域

\*通讯作者。

的应用已经引起广泛关注。本文首先对光子晶体光纤的概念、分类和原理作了简要介绍,回顾了国内外光子晶体光纤的发展,介绍了光子晶体光纤的理论分析方法、制备工艺和相关参数及特性,讨论了几种不同材料及结构制成的光子晶体光纤的特点,对光子晶体光纤在激光、传感和通信等领域的应用以及我们的研发成果进行了介绍。最后,对光子晶体光纤进一步的发展和进行了展望。

## 关键词

光子晶体光纤, 光子晶体, 多孔光纤, 光子带隙, 光纤激光器

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

光纤技术是二十世纪最主要的技术成果之一。上世纪 60 年代,高锟博士小组首先提出用石英来传输信号的建议,1970 年康宁公司成功地研制出了传输损耗为 20 dB/km 的石英光纤。之后光纤技术快速发展,在通信系统、传感器、光纤激光器、医疗设备和光学器件等诸多领域中都具有重要的应用。几十年来,光纤技术无论在哪个应用领域,从最开始的石英光纤到磷酸盐、硼酸盐、硫化物和氟化物乃至塑料等光纤的发展,光纤的原理和结构并没有改变——均是基于光内全反射理论和采用纤芯和包层的结构。随着科技的发展,对传统光纤的要求越来越高。例如,人们对互联网速度的要求越来越高。为了满足这一需求,光纤通信系统开始向更高传输速率、更远传输距离和更大容量的方向发展。因此,要求传统光纤中消除色散和降低损耗,但传统光纤受其结构、材料和制造工艺等因素的限制,性能的提升非常缓慢。另外,在高功率光纤激光器的发展中,单模输出功率的提高是其发展的关键。近年来随着包层抽运、光束整形和抽运耦合等技术的发展,输出功率迅速提高。2004 年,Jeong 等人采用掺镱双包层光纤首次实现了单根光纤千瓦量级的激光输出[1]。2010 年,又实现了单根光纤 10 kW 近衍射极限的激光输出[2]。尽管光纤激光器的输出功率提高得很快,但是由于受光纤的非线性效应、光损伤及热损伤等物理机制的限制,欲大幅度地提高单个激光器的功率已经相当困难。因此,具有大模场的光纤是解决光纤激光器功率提升的一种有效途径[3]。由于光纤的非线性效应与光纤的模场面积成反比[4],模场面积越大非线性效应越弱,非线性功率阈值越高。然而,如果要求高光束质量的激光输出,须使光纤单模运转。而传统的单模光纤由于难以制作较小的数值孔径或者为达到较强的束光能力,纤芯的直径一般较小,大模场的单模光纤较难实现。基于以上原因,人们在不断地探索新型光纤,期盼着能克服传统光纤的不足。在这种情况下,光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)作为一种特殊的新型光纤应运而生[5]。

光子晶体光纤是近几十年来光纤传感、光纤通信及光纤激光器等领域的重大发明之一,并快速地应用到多个领域。相对于传统光纤,PCF 具有许多奇异的特性,如无截止波长的单模传输特性[5] [6] [7] [8] [9],色散可调特性[10],高双折射特性[11] [12],有效模面积可控特性[4] [13],光子禁带效应[14]等。这些新奇的特性,为光学与光电子器件的设计提供了新的机会,并展示了许多新的功能。例如,利用 PCF 可制作全光开关[15]、光波长转换器[16]、色散补偿器及全光 2R 再生器[17]等多种器件,并被期望广泛用于通信、生物、空间成像、医药、环境、军事、印刷、制造业等科技领域。

目前,国外研究 PCF 比较著名的机构有英国的 Bath 大学、南安普顿大学和 Blaze Photonics 公司、丹麦的 NKT 公司和日本的 NTT 实验室等。国内的燕山大学、天津理工大学、北京交通大学、上海光机所、

清华大学、南开大学等也较早地展开了对 PCF 的研究工作。随着 PCF 理论研究的深入和制作工艺的完善, PCF 的应用领域得到了不断的拓展, 并推动了 PCF 的实用化进程。现在, PCF 的制作技术已经得到很大的提高, 人们已经能拉制出各种复杂结构的 PCF, 并且一些不同用途的 PCF 产品已经被推出。虽然这些 PCF 产品的价格较贵, 还无法普遍应用, 但随着科学技术的不断发展和研究的逐渐深入, 低成本且具有优良性能的 PCF 必定会被广泛应用。

## 2. 光子晶体光纤简介

20 世纪 80 年代末出现了一种新型的光波导材料——光子晶体, 他是一种由人工制成的电介质结构, 使具有不同折射率的介质周期性排列, 形成了光子晶体(Photonic Crystal, PC)。类似于半导体和绝缘体中存在的电子禁带, 在某些材料中也可以制成在一定范围内特定方向上或全部方向上禁止光传播的材料。由于其具有光子带隙(Photonic Band Gap, PBG)特性, 我们也称之为光子带隙材料, 或称光子晶体 PBG 材料。PC 最初被 Yablonovitch [18]和 John [19]于 1987 年分别单独提出。PC 是根据传统晶体类比而来的, 但与传统晶体比, 在周期性尺寸、性质和制备方法等方面又有区别。PC 按折射率周期性变化的空间维度可分为一维、二维和三维 PC, 如图 1 所示, 分别对应了 1-D, 2-D 和 3-D 的 PC 结构。1992 年, 英国 Bath 大学的 Russell 第一次提出光子晶体光纤(PCF)的概念[20]。在 PCF 的中心处引入缺陷, 如在包层中添加按周期排列的空气孔, 改变 PCF 的周期结构, 则有缺陷的地方成了 PCF 的纤芯, 光在其中传播而不能进入 PC 包层, 这就是 PCF。

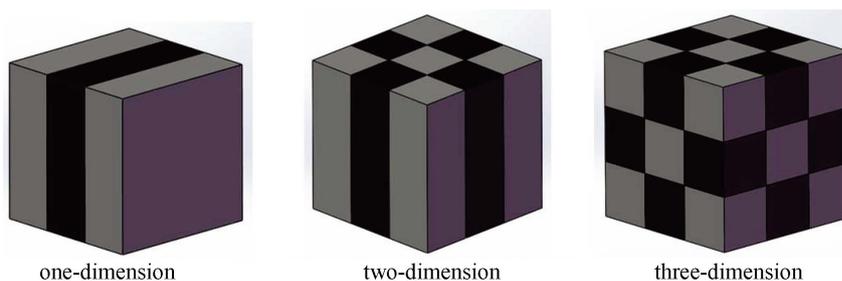
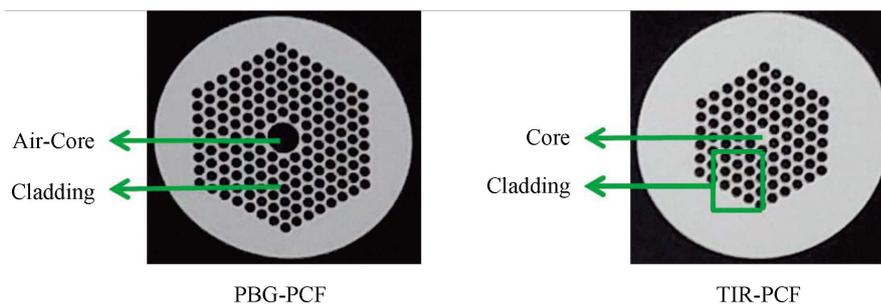


Figure 1. Structures of three kinds of photonic crystals  
图 1. 三种光子晶体结构

PCF 也被称为微结构光纤或多孔光纤, 是一种具有特殊结构的光纤。其纤芯周围周期性排布着波长量级的气孔, 入射光被限制在纤芯中并沿着纤芯传播。PCF 可按不同的特点和传光机理分类。例如, 按形状可分为三角形、六边形、八边形、正方形和混合型等; 按照材料可分为石英玻璃 PCF, 到后来的硝酸盐玻璃、硫化物玻璃、肖特玻璃和塑料光纤等; 按照光纤的特性可分为大模场面积光子晶体光纤、高非线性 PCF、高双折射 PCF、色散补偿 PCF 和超低损耗 PCF 等; 按照模式数量可分为单模 PCF 和多模 PCF。而以上的分类都只是按照 PCF 的某一个显著特点来分类的, 不足以解释 PCF 到底是什么。所以, 还是从最根本的传光机理来分类是最科学的: 带隙型光子晶体光纤(Photonic Bandgap PCF, PBG-PCF)和折射率引导型光子晶体光纤(Total Internal Reflection PCF, TIR-PCF), 如图 2 所示。

PBG-PCF 的原理为光子禁带, 由于该种光纤的纤芯一般采用空气孔, 纤芯的折射率  $n_{\text{core}}$  低于包层的折射率  $n_{\text{cladding}}$ , 所以不像传统光纤一样满足全反射机理, 而其包层具有周期排列的空气孔结构, 并且该结构要求空气孔的半径长度、空气孔的间距和空气孔的排列十分严格, 这种特殊的排列方式形成布拉格衍射效应, 致使频率位于带隙内的光被限制在纤芯中传播, 无法在包层中传播而泄露出去, 达到导光的目的。第二种 TIR-PCF 的导光原理与传统光纤一样, 利用内全反射原理传光, 但区别在于 PCF 的包层材

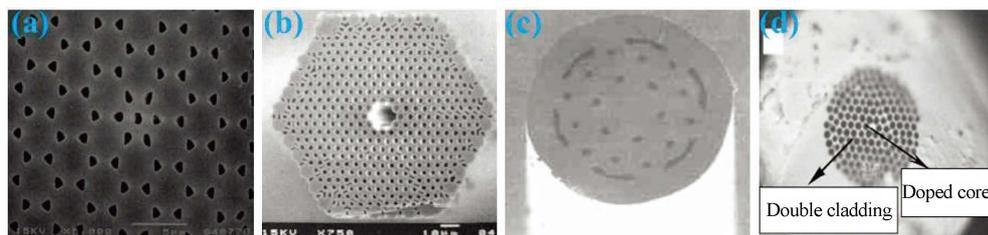
料与纤芯材料一般相同,纤芯为实心,而包层上有规则或随机排列的空气孔,使包层的有效折射率  $n_{\text{cladding}}$  低于纤芯的折射率  $n_{\text{core}}$ 。



**Figure 2.** Two types of PCF (photonic crystal fiber)  
**图 2.** 两种类型 PCF

### 3. 国内外光子晶体光纤的发展简介

第一根光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber, PCF)于1996年诞生[5],由英国南安普顿大学的 Knight 和 Birks 等人制作出来。1997年, Birks 等人发现这根光纤具有无截止单模传输特性[6]。1998年,第一根带隙型 PCF 问世,端面如图 3(a)所示, Knight 等对其进行了分析,发现入射光由于光子带隙效应被限制在较低折射率的纤芯里进行传播[21]。1999年, Cregan 等拉制出了第一根在空气中传光的带隙型光纤,如图 3(b)所示,其包层气孔呈现出密集而有序的周期性,具有能够实现光子带隙效应的结构,处于频率缺陷态的光子被束缚在中心大气孔也就是缺陷态处进行传播[22]。此后,随着光子晶体光纤的研究和制备工艺的日益改善,人们也对两种 PCF 的结构和特性有了更多的了解,在相继发现它们的其它特性的同时,也在逐渐降低两种 PCF 的损耗。2000年,英国 Bath 大学的 Ortigosa-Blanch 等成功研制了第一根高双折射 PCF [23],波长 1550 nm 处的双折射值为  $3.7 \times 10^{-3}$ ,拍长为 0.41 mm。同年,贝尔实验室的 Ranka 等人第一次报道了 PCF 中的反常色散特性[24]。2003年, Russell [25]与 Knight [26]分别于《Science》和《Nature》发表了关于 PCF 的综述性文章,象征着 PCF 制作工艺的成熟化,新结构的研发获得了巨大的进步,同时人们对 PCF 的损耗和其它特性的研究更加细致和深入,获得了迅速的进步。2004年, Tajima 等制备出了 1310 nm 和 1550 nm 处损耗分别为 0.37 dB/km 和 0.71 dB/km 的折射率引导型 PCF [27]。2005年,丹麦技术大学的 Nielsen 等报道了在 1550 nm 处损耗为 0.48 dB/km 的折射率引导型 PCF。这一年, Bath 大学的 Roberts 等将带隙光纤的最低损耗降到了 1.2 dB/km。近来,科研人员不再局限于研究单一的基质-气孔周期排列的 PCF,也对一些新型的 PCF 更加关注。例如,填充液晶、液体、金属、掺杂稀土和特殊空气孔排列等结构的 PCF。2008年, Schmidt 等设计了一种晶格呈三角排布且具有并行金属纳米线的 PCF,对熔融状态的金属加压,使其进入到石英材质的空心管中,其在亚波长尺度成像、液晶装置、极化玻璃、电化学等诸多应用领域具有巨大的潜在价值[28]。2009年, Vogel 等报道了一种大模场面积的单模 PCF,该光纤由 19 个掺镱纤芯组成,并产生了自相干,为大模场高亮度掺稀土 PCF 激光器提供新的技术途径[29]。2010年, Buczynski 等人用铅铋镓硅玻璃制成的 PCF 成功地获得了从近红外到中红外(700~2500 nm)的超连续谱[30]。2015年, Belli 等人设计了一种填充氢气的 PCF,得到了从真空紫外 124 nm 到红外 1200 nm 的超连续谱,该光纤在紫外波段的转换效率达到 5% [31]。2017年, De 等人报道了具有高双折射( $10^{-2}$  量级)、低损耗(1.55  $\mu\text{m}$  处为 10.2 dB/m)和具有色散位移特性的无复杂包层的十边形 PCF [32]。PCF 从诞生之日起发展迅猛,直到今日, PCF 在理论、性能和应用探索等方面均获得了重大进展,加快了其实用化的步伐。



**Figure 3.** (a) The first photonic bandgap PCF; (b) The first photonic bandgap PCF transmitting light in the air; (c) PCF manufactured by Tsinghua University; (d) PCF manufactured by Yanshan University

**图 3.** (a) 第一根光子带隙光子晶体光纤; (b) 第一根在空气中传光的带隙光子晶体光纤; (c) 清华大学制备的光子晶体光纤; (d) 燕山大学拉制的光子晶体光纤

从上世纪末第一根 PCF 的诞生至今, 中国科研人员在 PCF 的模拟、制备、测量、特性和应用等方面也做了大量的研究和贡献。燕山大学较早地开展了 PCF 的研究工作。2001 年, 侯蓝田、李曙光等人首次提出了研制无序光子局域化和光子晶体相结合的新型传能光纤的设想[33]。2002 年, 燕山大学红外光纤与传感研究所在侯蓝田的领导下, 在中国率先拉制出了第一根集成式 PCF。2003 年, 清华大学的倪屹等采用毛细玻璃管拼接并拉丝的方法试制成功 PCF (如图 3(c)), 该光纤在 633 nm 以上波段为单模传输, 而且芯区面积比常规单模光纤大了一个量级[34]。同年, 国内很多大学和科研机构开始对 PCF 的色散特性、模式、产生超连续谱和相关应用等作了报道[35] [36] [37] [38]。2005 年至今, 国内更多的科研人员加入了 PCF 的研究队伍, 不仅对 PCF 的非线性、各特性的模拟与分析、器件制备、各领域的应用等方面做了大量的研究, 还在不断探索着新型结构和新型材料的 PCF, 这促使我国 PCF 技术的迅速发展。2007 年, 刘兆伦和侯蓝田等设计了一种第一层为椭圆空气孔缺陷的宽带色散平坦 PCF。结果表明, 改进的 PCF 的色散曲线可以在很宽的波长范围内保持色散平坦并具有较低的色散值[39]。2009 年, 燕山大学的陈月娥等报道了国内自行研制和制备的以高功率光子晶体光纤激光器为目标的  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂双包层 PCF (端面如图 3(d)), 并公开了相关制备流程、工艺和关键技术[40]。2012 年, Du 等设计了一种高双折射的金属填充型 PCF, 经过对金丝直径及气孔尺寸等几何结构参数的优化, 最终获得了一种能够在两个通讯窗口进行偏振滤波的 PCF [41]。2013 年, Xue 等设计了一种填充液体且涂覆金属层的 PCF [42], 可以很好地实现在通讯窗口的偏振滤波作用。同年, 天津理工大学的曹晔等人提出了一种新型的微结构纤芯的 PCF, 在纤芯中引入 10 个呈矩形排列的小圆空气孔, 该光纤在波长 1.55  $\mu\text{m}$  处双折射最大值可达  $3.45 \times 10^{-2}$ , 限制损耗最低为  $2.88 \times 10^{-9}$  dB/m。2014 年, 燕山大学陈月娥等设计了一种集成型多芯 PCF, 通过对比显示, 集成多芯 PCF 能实现高功率、高光束质量的激光输出, 为制作高功率光纤激光器提供了新的解决方案[43]。2015 年, 南开大学的吴宵宵等制备出了一种石墨烯包层结构的高双折射 PCF, 并获得了高达 0.13 的双折射率, 限制损耗低于  $10^{-6}$  dB/km [44]。近年中国科学院上海光学精密机械研究所也提出了稀土离子掺杂的软玻璃全固态光纤概念, 避免了空气孔带来的缺陷, 使得全光纤激光器成为可能, 并使得 PCF 与传统光纤容易焊接, 降低了连接损耗。

总之, PCF 灵活多变的结构及其优异的特性决定着它在光源器件、通讯、国防科技等许多领域有着重要的应用价值。

#### 4. 光子晶体的参数和相关特性

PCF 因其灵活多变的构造而具备许多优异的特性, 并可通过改变包层结构参数(如空气孔直径  $d$  及孔间距  $\Lambda$ )来调节相关特性, 例如改变空气孔数量、大小来调节包层有效折射率, 从而改变模场、损耗等的大小, 而且大量的实验研究发现包层结构参数与 PCF 各参数和性能密切相关, 所以不能再沿用传统光纤的计算公式, 需作出相应的调整, 也正是这个原因, 才发现了 PCF 具有一些传统光纤不可比拟的新奇特性。

#### 4.1. 归一化频率与无截止单模传输特性

归一化频率  $V$  决定着光纤中传播的模式数, 对于传统的阶跃型光纤, 单模传输的定义及条件如下[6]:

$$V = \frac{2\pi\rho}{\lambda} \sqrt{n_{\text{co}}^2 - n_{\text{cl}}^2} < 2.405 \quad (1)$$

(1)式中,  $\rho$  为纤芯半径,  $n_{\text{co}}$  和  $n_{\text{cl}}$  分别为纤芯和包层的折射率。而 PCF 的结构复杂, 不同于传统光纤, 所以归一化频率的定义需要加以修正。光在纤芯中传播与传播常数  $\beta$  有关[6]:

$$kn_0 > \beta > \beta_{\text{FSM}} \quad (2)$$

(2)式中,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $n_0$  是纤芯的折射率,  $\beta_{\text{FSM}}$  是基本空间填充模(FSM)的传播常数, 是相对于无限大的 PCF 包层而言, 所以  $\beta_{\text{FSM}}$  也是允许在包层传播的最大传播常数, 由于传统阶跃光纤的  $\beta$  与  $k_{n1}$  有关, 所以 Birks 等对其定义为[6]:

$$n_{\text{eff}} = \beta_{\text{FSM}} \cdot k \quad (3)$$

(3)式中  $k = 2\pi/\lambda$ 。通过(2)式可知, 纤芯的横向波矢  $k_T$  介于 0 到  $k_{T\text{max}} = (k^2 n_0^2 - \beta_{\text{FSM}}^2)^{1/2}$  之间, 再根据纤芯和包层的边界条件量化  $k_T$ , 这样  $V$  值就由  $\rho k_{T\text{max}}$  获得, 其中孔间距  $\Lambda$  可粗略的认为是缺陷的纤芯的半径, 所以 PCF 的有效归一化频率可被确定[6]:

$$V = \frac{2\pi\Lambda}{\lambda} \sqrt{n_0^2 - n_{\text{eff}}^2} \quad (4)$$

(4)式中  $\sqrt{n_0^2 - n_{\text{eff}}^2}$  为 PCF 的数值孔径, 通过公式可看出,  $V$  不但与波长有关还与孔间距  $\Lambda$  有关, 同时 Birks 等人也给出了  $V$  与  $\Lambda/\lambda$  的关系, 发现当  $\Lambda/\lambda$  趋于无限大, 也就是波长趋于 0 时,  $V$  趋于一个常数, 所以只要设计好  $d/\Lambda$  的比值, 就可实现无限单模传输。

随后 Niels Asger Mortensen 和 Jacob Riis Folkenberg 对用石英棒替换一个空气孔作为纤芯的三角型 PCF 进行研究, 详细地探究了  $V$  与  $\Lambda/\lambda$ ,  $\lambda/\Lambda$  与  $d/\Lambda$  的关系, 发现当  $V < \pi$  就可实现单模传输, 而单模与多模的边界为  $d/\Lambda = 0.406$ , 并给出了相应的关系式[9]:

$$\lambda^*/\Lambda = \alpha(d/\Lambda - d^*/\Lambda)^\gamma \quad (5)$$

(5)式中  $\alpha$  与  $\gamma$  为一常数,  $d^*/\Lambda = 0.406$ 。当  $d/\Lambda > d^*/\Lambda$  时,  $\lambda/\Lambda < \lambda^*/\Lambda$  为多模传输,  $\lambda/\Lambda > \lambda^*/\Lambda$  为单模传输。当  $d/\Lambda \leq d^*/\Lambda(0.406)$  时, 就可支持无限单模传输。

#### 4.2. 数值孔径(Numerical Aperture, NA)

在阶跃型光纤中, 数值孔径表示光进出光纤时的锥角大小, 即束光能力的大小, 是一个很重要的参数。高数值孔径的 PCF 是通过增大空气包层与纤芯材料的折射率差来提高数值孔径的。高数值孔径有利于提高耦合效率、传送高功率激光, 尤其适合应用于激光尾纤、光纤传感、点火系统及包层泵浦等。

传统光纤的 NA 值定义为:

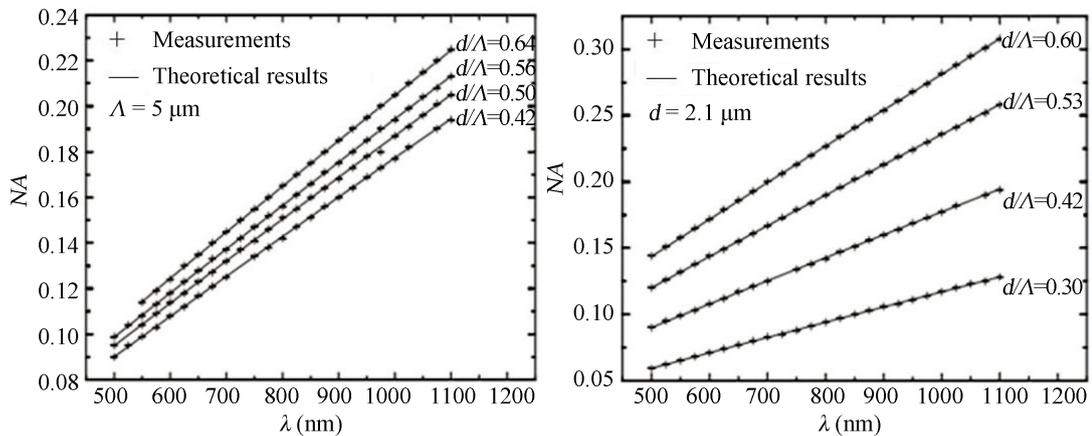
$$NA = \sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (6)$$

公式(6)中  $n_1$  是纤芯的折射率,  $n_2$  是包层的折射率, 可看出 NA 与材料和传输光波长有关。但在折射率引导型光子晶体光纤中, 由上面知, NA 值也按照传统光纤的公式来定义:

$$NA = \sqrt{n_0^2 - n_{\text{neff}}^2} \quad (7)$$

(7)式中的有效折射率  $n_{\text{eff}}$  不再是材料的真实折射率, 而是有效折射率, 与包层的结构参数有关, 当包层

的孔径变化时，有效折射率  $n_{\text{eff}}$  也随之变化，所以通过计算可得出  $NA$  与  $d/\Lambda$  的关系曲线，如图 4，无论当  $\Lambda$  还是  $d$  固定不变时， $NA$  都随  $d/\Lambda$  和  $\lambda$  的增大而变大[45]。



(图片来自《光谱学与光谱分析》，2010，30(7): 1908~1912。)

**Figure 4.** Relationship between  $NA$  and  $\lambda$   
**图 4.** 不同  $d/\Lambda$  数值下  $NA$  与  $\lambda$  的关系

### 4.3. 有效模场面积与限制损耗特性

在光纤中，光能量不完全集中在纤芯中传输，部分能量在包层中传输，纤芯直径不能反映光纤中的能量分布。于是人们提出了有效面积的概念，其计算公式为[46]：

$$A_{\text{eff}} = \frac{n_2 \left[ \iint E_t(x, y) \cdot E_t^*(x, y) dx dy \right]^2}{\iint \tilde{n}_2(x, y) \left[ E_t(x, y) \cdot E_t^*(x, y) \right]^2 dx dy} \quad (8)$$

(8)式中， $E_t(x, y)$  是横截面的电场分布(\*表示共轭)， $\tilde{n}_2$  表示某点材料的非线性折射率系数。

通常包层微结构的空气孔层数是有限的，纤芯中传导的光从纤芯通过包层空气孔间隙泄漏到包层，从而造成光纤的传输损耗，称为限制损耗。基模的限制损耗值为[47]：

$$L_c = \frac{40\pi}{\lambda \ln 10} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \text{ (dB/m)} \quad (9)$$

(9)式中  $n_{\text{eff}}$  是基模的有效折射率， $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  表示基模有效折射率的虚部。

PCF 的有效模场面积( $A_{\text{eff}}$ )是由空气孔的直径  $d$  和孔间距  $\Lambda$  决定的，与光纤的尺寸无关，所以可以通过调节  $d$  和  $\Lambda$  以及  $d/\Lambda$  来调整  $A_{\text{eff}}$ 。一般，包层的填充率的增大会有效的减小纤芯面积和纤芯 - 包层折射率差，使模场面积减小，但也不尽然。Vittoria Finazzi 等人对三角形 4 环单实芯石英 PCF 的有效模场面积进行了详细分析，发现当纤芯直径( $d_{\text{co}} = 2\Lambda - d$ )小于波长时，由于芯径太小而不能很好地限制光波，模场会迅速变大，有效模场面积随芯径的变化有最小值[46]。

在高功率激光器中，由于功率大，模场面积小，能量密度大，会导致显著的非线性效应，而且一些单模光纤中因耦合效率等因素，也需要大模场面积。所以，大模场单模 PCF 可以很好地解决这个问题。较小的包层空气填充率就可保证大模场面积，可是也会造成较大的限制损耗，从[46]可知限制损耗随有效模场面积与  $\Lambda$  和  $d/\Lambda$  都有关，我们选定  $d/\Lambda = m$ ，以  $d = m\Lambda$ ，代入

$$d_{\text{co}} = 2\Lambda - d \quad (10)$$

得到

$$d_{co} = (2 - m)\Lambda \quad (11)$$

从(11)式可知, 令  $m = 0.6$ ,  $\Lambda = 1.0 \mu\text{m}$  时,  $d_{co} < \lambda$ ,  $A_{\text{eff}}$  随  $\Lambda$  增大而减小,  $\Lambda = 1.2 \mu\text{m}$  时,  $d_{co} > \lambda (1.55 \mu\text{m})$ ,  $A_{\text{eff}}$  随  $\Lambda$  增大而增大, 即把  $A_{\text{eff}}$  与芯径的关系转换成了  $A_{\text{eff}}$  与孔间距的关系, 如果  $\Lambda < 1.2 \mu\text{m}$  时, 限制损耗随  $A_{\text{eff}}$  的减小而减小, 当  $\Lambda > 1.2 \mu\text{m}$  时, 限制损耗随  $A_{\text{eff}}$  的增大而减小, 限制损耗并不是随有效截面积单调递增或递减。所以在设计 PCF 时, 如果  $d_{co} = (2 - m)\Lambda < \lambda$  时, 我们在追求大模面积的同时, 不能忽略随之增大的限制损耗, 一定要综合考虑。

#### 4.4. 高双折射与保偏性能分析

理想的单模光纤的横截面及折射率分布是高度对称的, 可以传输两种基模  $\text{HE}_{11}^x$  和  $\text{HE}_{11}^y$ , 这两种基模相互正交且具有相同传输常数  $\beta$ , 因此这两个基模是相互简并的。但实际的光纤并不是那么完美, 例如, 由于截面形状的不对称或者横截面应力的存在,  $x$  和  $y$  方向折射率有区别, 导致模式简并特性被破坏, 两模式的传播常数存在以下差别:

$$\Delta\beta = |\beta_x - \beta_y| \quad (12)$$

(12)式中  $\beta_x$  和  $\beta_y$  分别是  $x$  轴和  $y$  轴的传播常数, 双折射的值一般用模式双折射  $B$  来衡量:

$$B = \Delta\beta/k_0 = |\beta_x - \beta_y|/k_0 \quad (13)$$

将  $\text{HE}_{11}^x$  和  $\text{HE}_{11}^y$  模式的有效折射率  $n_{\text{eff}}^x = \beta_x/k_0$  和  $n_{\text{eff}}^y = \beta_y/k_0$  代入(13)式可得:

$$B = |n_{\text{eff}}^x - n_{\text{eff}}^y| \quad (14)$$

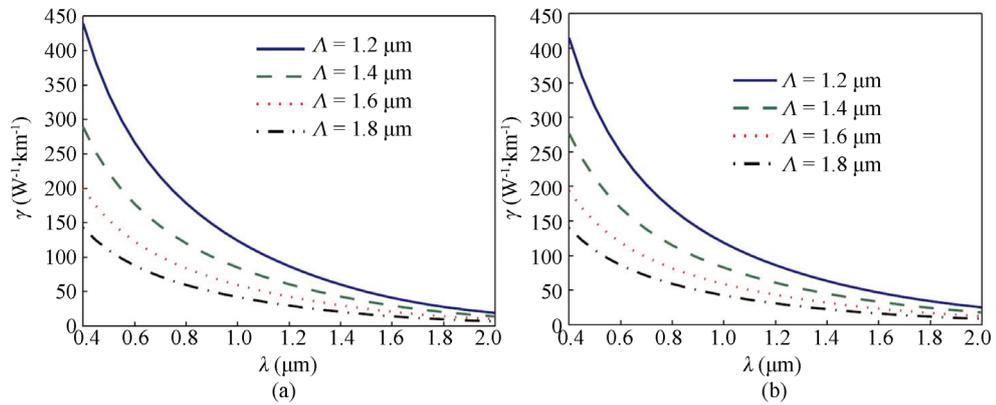
$B$  即是两个正交偏振模的有效折射率之差, 差值越大保偏性能越好。PCF 中获得高双折射一般通过提高几何尺寸的非对称程度或改变某一方向的应力等方式。提高非对称性的方法有: 改变纤芯附近的空气孔的形状、尺寸或排列, 改变包层空气孔的形状、尺寸或排列。提高某一偏振方向上的应力的方法有: 在空气孔中填充各向异性材料。传统光纤的双折射一般在  $10^{-4}$  的量级上, 而光子晶体光纤已经到了  $10^{-2}$  的量级[32], 具有优越的保偏性能。这与 PCF 特殊的纤芯和包层的结构参数有关, 如椭圆形单实纤芯三角形 PCF, 纤芯椭圆率  $\eta = d_y/d_x = 1$  ( $d_x$  和  $d_y$  为椭圆的短轴和长轴)时, 即为圆形, 双折射  $B = 0$ , 当  $\eta$  偏离 1 时, 双折射不断增大, 并且随着纤芯面积  $S$  的减小, 双折射  $B$  越大[48]。当纤芯的形状和大小不变, 改变包层孔径  $d$  和孔间距  $\Lambda$  的大小, 双折射也会相应的变化, 同一波长在不同的孔间距具有不同的双折射, 且每一模式下双折射曲线都有一个峰值[48]。

#### 4.5. 非线性效应

PCF 可以实现超连续谱的产生、光孤子效应和波长变化等非线性效应。非线性系数是光纤性能的重要参数, 其计算公式如下:

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{eff}}} \quad (15)$$

(15)式中,  $n_2$  是背景材料的非线性折射率系数,  $A_{\text{eff}}$  是有效模场面积。传播光波长一定时, 一般通过增大  $n_2$  或者减小  $A_{\text{eff}}$  来增大非线性系数。上面已经提到  $A_{\text{eff}}$  与孔径  $d$  和孔间距  $\Lambda$  有关, 所以  $\gamma$  与  $d$  和  $\Lambda$  也有关系, 在背景材料和  $\lambda$  确定的情况下, 非线性系数  $\gamma$  与  $A_{\text{eff}}$  成反比。如图 5 所示, 当空气孔径不变时, 非线性系数随波长和孔间距变大而减小[49]。



**Figure 5.** Relationship between nonlinear coefficient and wavelength  
**图 5.** 不同孔间距下非线性系数与波长的关系

### 4.6. 色散

在光纤通信中，光纤色散会直接导致光脉冲展宽，从而导致信号的失真，所以色散是衡量光纤性能的一个重要参数。PCF 的总色散可近似为[47]：

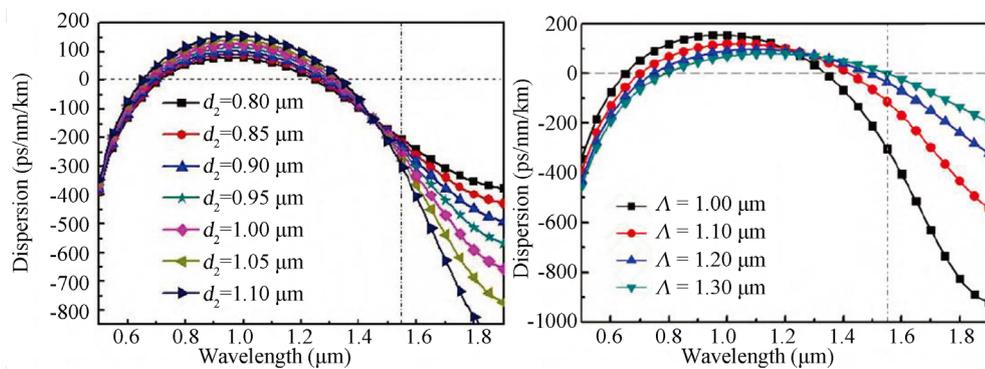
$$D \approx D_m(\lambda) + D_w(\lambda) \tag{16}$$

(16)式中  $D_m(\lambda)$ 为材料色散， $D_w(\lambda)$ 为波导色散，计算公式如下[47]：

$$D_m(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_M}{d\lambda^2} \tag{17}$$

$$D_w(\lambda) = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2} \tag{18}$$

材料色散与光纤的结构无关，一旦背景材料确定，其材料色散就确定下来，可通过 Sellmeier 公式求得。而波导色散与  $n_{\text{eff}}$ 的实部有关，前面提到  $n_{\text{eff}}$ 与包层的参数有关，所以  $D_w(\lambda)$ 与包层结构参数  $d$  和  $\Lambda$  有关，即光纤总色散  $D$  与 PCF 结构参数相关。2017 年邹辉等人在三角形 PCF 中引入类矩形栅格和三角形栅格排列两种圆形空气孔，通过改变矩形栅格大空气孔径  $d_2$  和小空气孔的间隔  $\Lambda$ ，得到 X 偏振态的色散系数与波长的关系，如图 6，可以看出该光纤的 X 偏振态具有两个零色散点，并且通过改变包层结构参数，在同一波长下，可获得不同的色散系数[12]。



(图片来自《激光与光电子学进展》，2017，54(12)：1-12。)

**Figure 6.** Relationship between dispersion coefficient and wavelength  
**图 6.** 不同孔径和间隔下色散系数与波长的关系

## 5. 光子晶体光纤的理论分析方法

如上所述,与传统光纤的设计不同,PCF 是一种全新的波导,其特性与光纤内部灵活多变的复杂结构息息相关,如果想获得具有一定特性的光子晶体光纤,首先要设计这些空气孔的位置、大小、间距及占空比等波长量级的特征参数,再根据电磁场理论研究方法对其结果分析,但正是由于其自身的结构复杂性,使得这样操作比较困难。所以,为了精确地对其分析和计算,以便快速地获得目标特性的 PCF,一般先采用数值研究的方法来模拟计算。数值研究方法主要有时域有限差分法、有限元法、光束传播法等通用性强和结果可靠的数值方法,以及有效折射率法、多极法、平面波展开法等针对性强的数值方法。

时域有限差分法(FDTD)是在 Yee 氏网格空间中,将带有时间变化的麦克斯韦方程转变为有限差分的形式,网格上的电磁场分量只与其相连网格上的电磁场分量有关。此法可直接模拟电磁波的传播及电磁波与物体的相互作用过程,简单直接,易于编程,并且可减少计算量,但不太适用于晶格结构复杂的 PCF 的计算。

有限元法(FD)是以有限元原理为基础而产生的数值研究方法,即将研究区域网格化,然后取得对应的插值函数,使得研究域转化为一定数目的单元格子,然后利用边界条件解决研究问题,所以研究的准确度与格子的数目相关,但格子数目过多会导致计算量的大幅提升。此法从部分到整体,极大地简化了分析过程,并且合理的划分网格数目与边界条件结合,能够解决大部分电磁场中的研究问题,也能提高计算速度,广泛地吸引了各国研究者的注意。

光束传播法(BPM)是在给定初始场的前提下,逐步地计算出各个传播截面上的场分量,最初是以快速傅里叶变换,对标量波动方程进行计算,获得标量场,但不能分辨出场面的不同偏振以及场之间的耦合。后来 Yevick 等提出了有限差分光束传播法,将波导截面分成很多格子,用差分方程表示每个格子的场,带入边界条件,就得到整个横截面的场分布,不断重复上述步骤,即可得到整个波导的场分布。

有效折射率法将 PCF 的包层等效为单一材料,与纤芯的折射率不同,此法可将复杂的问题简单化,并可使用常规光纤的研究方法来对 PCF 研究。此种方法计算简便,易被理解,但不能精确地预测色散、偏振等模式特性。

平面波展开法是利用线性叠加的平面波代替所要研究的电磁场,根据对其处理获得所需的本征方程,通过求解本征方程可以取得研究区域电磁场的整体分布情况,进而获得禁带范围。此法精确度很大程度上取决于平面波叠加式中的项数,但过多的项数会大幅提高计算量。

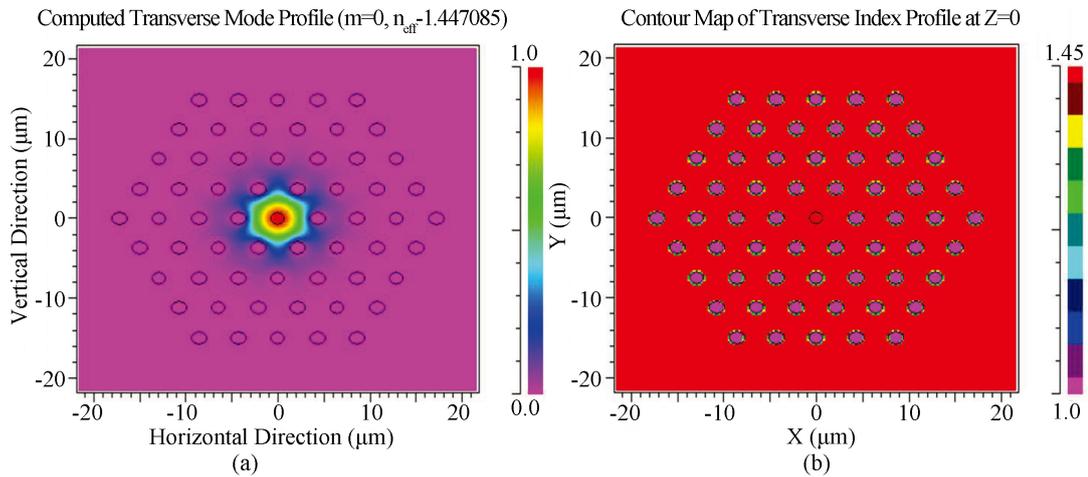
多极法以傅里叶-贝塞尔函数为基础,利用该函数展开的模场和合理的边界条件,再联立独立空气孔对应的函数,即可取得电磁波的传播常数。此法只适用于圆空气孔的 PCF 的计算,能够获得复数形式的传播常数,其实部和虚部能够分别用来研究限制损耗和色散特性,如果气孔数较少,此法速度很快,且准确性也很高。

利用上述方法编写的分析 PCF 的仿真软件很多,例如 CUDOS、BeamPROP、COMSOL 等仿真应用软件。CUDOS 仿真软件是悉尼大学利用多极法编写的,在该软件中,可通过编程给出光纤结构、材料的折射率和入射波长等参数,计算出基模场、基模等效折射率等;BeamPROP 是由 Rsoft 公司开发的,不仅能仿真出 PCF 中传播的基模和高阶模,也能给出传播方向上光的传输和耦合情况。如图 7 所示,是利用 BeamPROP 软件模拟的单芯六角石英 PCF 的基模模场和折射率分布的端面图。COMSOL 仿真软件由中仿科技公司开发,该软件利用有限元法对 PCF 的传输特性进行仿真。

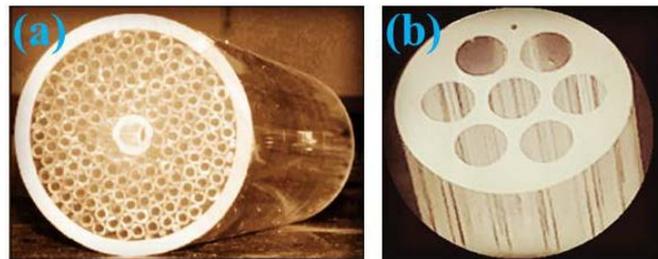
## 6. 光子晶体光纤的制备方法

光纤制备方法的发展进步是影响 PCF 实用化的基础,从光子晶体光纤的诞生开始,人们就在不断地

改进和发明制备 PCF 的新方法, 寻求操作简单的 PCF 制备方法。较为常见的方法有堆积法、挤压法[50]、溶凝胶制造法[51]、模具铸造法、钻孔法等。下面就对这几种方法进行介绍。



**Figure 7.** (a) Fundamental mode profiles; (b) Refractive index profiles  
**图 7.** (a) PCF 端面的基模模场分布; (b) PCF 端面的折射率分布



**Figure 8.** (a) Preform by stacking-capillary method; (b) Preform by drilling method

**图 8.** (a) 堆积法制备的预制棒; (b) 钻孔法制备的预制棒端面

堆积法较为简单, 世界上第一根 PCF 就是利用手工堆积毛细管完成的[5]。堆积法也是现阶段制备 PCF 的最主要和常用的方法。其制作可分为三个步骤: 第一步, 根据性能要求设计光纤结构、毛细管的数量和尺寸等; 第二步, 用光纤拉丝塔将石英管和石英棒拉制成具有精确外径的毛细管和细棒, 把这些毛细管按合适的长度截断, 按照预先设计的形状排列, 并用特殊的粘合剂将它们固定, 用准备好的棒或管并替换其中的一根或几根毛细管作为纤芯, 然后放到一根粗的石英管内, 制成预制棒, 如图 8(a) [52]; 第三步, 将 PCF 预制棒放到光纤拉丝塔上, 设置好参数进行拉丝。

挤压法与堆积法类似, 也是根据预制棒的制作方法命名的。首先根据 PCF 的结构, 设计相应的模具, 然后将要制作光纤的基质材料加热到熔融状态, 灌入模具中, 在高温高压下, 将熔融的玻璃或塑料通过模具挤压出 PCF 预制棒。挤压法已成功应用到制作 PCF 中[53]。

溶胶-凝胶法最早由美国 OFS 公司提出, 其方法如下: 首先根据 PCF 性能制作铸造模型, 内有一系列金属棒, 再填充高 pH 值纳米尺寸的硅胶颗粒; 随 pH 值降低发生从溶胶到凝胶的变化; 在凝胶过程中, 抽走金属棒, 则在凝胶体内留下圆柱形的空气孔; 用热化学方法处理凝胶体以消除水蒸气、有机物和金属污染; 在约 1600°C 的温度下, 将干燥的多孔凝胶体烧结成粘性玻璃, 最后送入拉丝塔拉制成光纤。

模具铸造法的制作过程也较为简单, 早在 2001 年时, Choi 等就通过浇铸法制备出按六方排列 3 层的

聚合物 PCF [54]。通常是先根据设计的 PCF 的结构制作模具，然后将加热至熔融态的背景材料注入模具中，等到冷却定型后，将模具拆掉获得 PCF 预制棒，最后将预制棒送入拉丝塔中进行拉丝[55]。燕山大学的周桂耀等在 2006 年报道了一种无间隙孔的玻璃光纤制造新模具铸造方法，此方法不但可有效地阻止高温时 PCF 包层孔形变，也提供了一种无间隙孔 PCF 的制作方法且适宜于大批量的生产[56]。

钻孔法也是一种制备预制棒较为直接的方法。该方法一般与超声波技术结合，使打孔时钻头对玻璃摩擦力和挤压力较小。首先是设计 PCF 的结构，然后编程输入机床的控制系统，之后在机床上对准备好的圆柱形背景材料进行打孔来获得预制棒。2005 年南安普顿大学的 Feng 等人用钻孔法制作了 SF6 玻璃的 PCF 预制棒[57]。图 8(b)为使用钻孔法制得的预制棒。

制备 PCF 的方法很多，但对于不同背景材料的 PCF，其预制棒的制作方式也不相同，且各有优缺点，如表 1 所示。

**Table 1.** Preparation methods of PCF

**表 1.** 各种 PCF 制备方法的对比

方法名称	优点	缺点
堆积法	大部分背景材料都适用，预制棒制作简单，传统拉丝设备就可满足要求，无需其它特殊设备	无法制备大空芯或复杂结构 PCF，预制棒的制作时间长，无法满足大规模、标准化生产
挤压法	可反复利用模具，适合大规模生产	不同结构 PCF 需要不同的模具，只限于软化温度低的背景材料，不适用于制备结构复杂、空芯较小的 PCF
溶胶-凝胶法	原材料成本低，尺寸精确，光纤损耗较低	工序复杂，实现难度大
模具铸造法	模具可反复利用，适合大规模生产	不同结构 PCF 需要不同的模具，要求背景材料的熔点要较低
钻孔法	可随意制备不同结构的 PCF 预制棒	不适用孔数较多间距较小的 PCF 预制棒，加工所需时间长，无法实现长预制棒的加工

## 7. 不同材料及结构光子晶体光纤的特点

第一根 PCF 使用石英制作，随后也出现了大量的不同结构和不同特性的 PCF，但背景材料一般都是以二氧化硅为主，随着科技的进步，单一石英材料 PCF 的性能显现出自身的局限性：较窄的光学透过窗口(仅覆盖 0.3~2.5  $\mu\text{m}$ )、小的三阶非线性系数、较大的声子能量等。所以其已不能满足科学发展的需要，而且随着近年来 PCF 制备工艺技术的改进和成熟，人们开始尝试使用其它材料来制作 PCF，来寻求更新奇的性能，以应对更高需求的应用。这些不同材料大部分也是按照传统光纤的制备材料来分类的，如磷酸盐玻璃、碲酸盐玻璃、硫化物玻璃、硼酸盐、铝硅酸盐、肖特(SCHOTT)玻璃、聚合物玻璃、铋玻璃等等。除了上述的这些材料，人们还在一些不同结构 PCF 中填充各类气体、液体和固体等材料，以及制作或集成多芯 PCF，来实现一些特殊的功能。下面就几种常用材料制作的 PCF 的性能特征和应用进行介绍。

相对石英玻璃，磷酸盐玻璃具有较高的稀土溶解度，所以瓦级功率输出所使用的磷酸盐光子晶体光纤(Phosphate Glass PCF)甚至不到 10 cm，较短的光纤长度也降低了非线性效应，并在在结构紧凑、小巧灵活的激光器应用中有着很大的发展前景。自 2005 年 Li 等第一次使用磷酸盐 PCF 设计激光器获得了 3 瓦的输出功率后[58]，Franczyk 等人在 2014 年仅用了 6 cm 长的掺 6 mol%磷酸盐 PCF 将斜效率提高到了 36.2%，实现了 9 W (150 W/m)的激光输出[59]，这是当时单模磷酸盐光纤激光器里的最高值。中国科学院上海光学精密机械研究所也在 2011 年利用堆积法制做出了大芯径磷酸盐 PCF [60]，并在 2014 年首次提出了掺稀土离子的软玻璃全固态光纤概念[61] [62]。该方案利用低折射率的磷酸盐玻璃取代了空气孔，避免了空气孔的存在带来的缺陷，使得全光纤激光器成为可能，同时磷酸盐玻璃的使用也显著地提高了

光纤的泵浦吸收率和非线性阈值。2015年 Wang 等人利用自行制备的 6 wt% 掺镱的高质量磷酸盐玻璃, 成功制备了纤芯直径为 17  $\mu\text{m}$  单模输出、保偏的磷酸盐全固态 PCF, 在  $\sim 40$  cm 的光纤中实现了 13.8 W 的激光输出, 同时通过改变光纤对称性, 实现了该种光纤的保偏输出, 保偏度达 85%, 该研究结果发表在 Scientific Reports [62]。

碲酸盐玻璃具有宽的增益带宽、大的透光区域(0.35~6  $\mu\text{m}$ )、较低的声子能量( $\sim 750$   $\text{cm}^{-1}$ )、高稀土离子掺杂浓度、高非线性系数、较好的热稳定性和化学稳定性。因此碲酸盐光子晶体光纤(Tellurite Glass PCF)在放大器、偏振分束器和红外波段超连续谱光源等器件上有着重要的应用。第一根碲酸盐 PCF 由英国巴斯大学制备出, 该光纤在 1550 nm 处的非线性系数为 47.8  $\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$  [50]。Feng 和 Monro 等人制作了第一根单模碲酸盐 PCF, 其在 1550 nm 处的非线性系数达到了 580  $\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$ , 是标准石英光纤的 580 多倍[63]。在 2014 年, Wei 等人用椭圆形碲酸盐玻璃作纤芯, 在 1550 nm 获得了高的双折射为  $7.66 \times 10^{-2}$  和非线性系数达到了 3400  $\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$  的光子晶体光纤[64]。美国塔夫茨大学的 Domachuk 和英国巴斯大学的 Cordeiro 等人在 2008 年用脉宽为 100 fs 的 1550 nm 激光器作泵浦源, 在一段 0.8 cm 长、芯径为  $\sim 2.7$   $\mu\text{m}$  的碲酸盐微结构光纤中获得了带宽为 4080 nm 的 SC 光源, 其光谱覆盖 789~4870 nm [65]。燕山大学的刘等人对基于碲酸盐制作的偏振分束器进行了一系列的研究, 发现随着光纤长度的缩短, 消光的带宽增加( $>284$  nm), 当长度小于 510  $\mu\text{m}$ , 在 1.55  $\mu\text{m}$  处消光比 20 dB, 可应用在大容量、宽带宽和集成的光通信系统中[66]。

硫系玻璃光子晶体光纤(Chalcogenide PCF)由于其材料具有优良的中远红外透过性能(约 0.5~25  $\mu\text{m}$ )、高折射率(约  $2\sim 3.5 \times 10^{-2}$ )和极高的非线性折射率( $n_2$  约为  $2\sim 20 \times 10^{-18}$   $\text{m}^2/\text{W}$ ) [67]等特性, 利用这些特性, 硫系玻璃 PCF 可应用在超连续谱、拉曼放大、中红外传感、中红外激光器等领域。第一根硫系 PCF 是由南安普顿大学于 2000 年报道的, 基于 Ga-La-S 玻璃制作成的[68]。随后人们发展了各式各样结构的硫系 PCF, 但都是在不断探索和发展其特性。例如超连续谱在光学、医学及度量学等领域有着重要的应用, 人们已经利用硫系 PCF 在中红外产生很多范围超连续谱[69] [70] [71]: 用不同波长脉冲激光器抽运  $\text{As}_2\text{S}_3$ 、 $\text{As}_2\text{Se}_3$ 、 $\text{Ge}_{15}\text{Sb}_{20}\text{S}_{65}$  等硫系 PCF, 已获得了 0.7~1.7  $\mu\text{m}$ 、2.1~3.2  $\mu\text{m}$ 、2.9~4.6  $\mu\text{m}$  和 8.5~11.6  $\mu\text{m}$  的超连续谱。硫系 PCF 借助其极高的折射率, 使自身具有很高的非线性系数, Fatome 等人制备的  $\text{As}_{40}\text{Se}_{60}$  PCF 的非线性系数高达 2000  $\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$  [70]。宁波大学的曹凤珍等人利用硫系光子晶体光纤色散可控特性, 设计了在 3~5  $\mu\text{m}$  宽波段实现色散平坦, 且色散绝对值低于 3.8  $\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}\text{km}^{-1}$  [72]。

聚合物光子晶体光纤(Polymer PCF)可以由聚甲基丙烯酸甲酯、聚碳酸酯(Polycarbonate, PC)、聚苯乙烯(Polystyrene, PS)、COC (Cyclic Olefin Copolymer)和全氟树脂等多种光学聚合材料制备, 制备材料的多样性正是聚合物 POF 的优点之一。不同聚合物材料的玻璃化温度、透光率阿贝数、密度、折射率、热膨胀系数、吸水率以及机械性能各异, 可以满足各种不同的应用需求[73]。第一根 Polymer PCF 是由澳大利亚悉尼大学光纤技术中心的 Van Eijkelenborg 等人于 2001 年用聚合物材料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)制备的, 测试结果表明该光纤可以实现单模传输[74]。聚合物 PCF 与石英 PCF 相比, 一个最大的优点就是制备方法灵活多样[52]: 钻孔法、挤出法、模具浇注聚合法、注塑法等多种工艺均可。而近年来聚合物 PCF 在传输、生物、传感、降低损耗和太赫兹波等方面也屡见报道: Shi 等人在 50 m 长的聚合物 POF 上获得了 7.3 Gb/s 的传输[75]; Woyessa, 等人 2017 年报道了基于 PMMA 制作的温度和湿度布拉格光栅微结构光纤传感器, 测量范围在 10%~90%RH 和 20 $^{\circ}\text{C}$ ~80 $^{\circ}\text{C}$ , 均方根偏差分别为 0.8% RH 和 0.6 $^{\circ}\text{C}$  [76]; Ren 等人报道了一种基于聚合物 POF 的高灵敏度和无需标记的生物传感器, 在 600~840 nm 的区域内的生物膜层的分辨率高达 0.012~0.015 nm [77]; 空芯聚合物 PCF 实现了在 850~1750 nm 波长区域低损耗传输, 像 PC 基质的 Kagome 型聚合物 PCF 在 1550 nm 处实现了 3.1 dB/m 的“超低损耗” [78]; 而结合聚合物在太赫兹波段良好的传输性能和微结构光纤的结构特性, 使得聚合物 PCF 用于太赫兹波导成为研究

热点[79]。

PCF 由于其结构灵活多变,表现出无截止单模传输、色散可调和高双折射等新颖的特性。近些年,人们在 PCF 包层或纤芯中的空气孔中掺杂或选择性填充材料(例如气体、液体和固体)来实现一些功能或开发具有独特性能的器件。气体和液体相比固体较容易注入 PCF 中,也使得充入气体和液体的 PCF 得以较早地发展,并且报道相对较多。Trabold 等通过受激拉曼散射在填充氢气的空心芯 PCF 上实现了高阶模的放大[80]。Rodrigues 等利用气体填充的 Kagome PCF,通过改变气体压力和输入脉冲特性,可产生高功率可谐调的相干紫外光[81]。Yang 等人设计了一种温度传感器,在折射率引导型 PCF 中填充高折射率溶液,形成类似带隙效应,使其同时成为激光滤波器和探头。该传感器随着温度的增加,发射光波向短波偏移,而输出光强度随着带隙的运动而增高,从而实现温度的测量,通过波长调制和强度调制分别获得了较高的温度灵敏度  $1.747 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  和  $0.137 \text{ dB}/^\circ\text{C}$  [82]。研究人员用磁流体填充在 PCF 中,磁流体有效折射率随着外界磁场、温度的变化而改变,通过光谱仪检测 PCF 的输出损耗的改变,从而得出外界磁场或者温度的数值[83]。一般在 PCF 中填充固体材料多为金属[84]、聚合物[85]等功能性材料,而一些新的材料近年来也被不断地填充到 PCF 中。例如,Zhao 等人于 2013 年首次展示了基于包层填充石墨烯 PCF 的饱和吸收特性,是通过光和包层填充的石墨烯层之间的倏逝波耦合作用产生的[86]。

多芯 PCF 是在同一根 PCF 的中心区域同时移除一些气孔,形成多个同时导光的纤芯。基于其设计更灵活、显著的非线性效应、大模场面积以及纤芯耦合等优势,在产生高功率超连续谱、制作高功率光纤激光器、制作传感器件、制作光器件和通信上,相对于单芯 PCF 更具优势。早在 2000 年,Blanchard 等就报道了利用设计的三芯 PCF 制作了弯曲敏感的传感器,相比传统的传感器降低了成本[87]。2006 年,Taylor 等人利用多芯 PCF 演示了低串扰、高密度通道的通信方法[88]。2012 年,重庆大学的刘敏等人设计了一种全内反射和光子带隙效应两种导光机制的混合双芯 PCF,并制作了长度为 5.2 mm 的偏振分束器,在 31 nm 和 60 nm 的带宽范围内,分光比分别小于 -30 dB 和 -20 dB,综合性能较好[89]。2014 年,燕山大学陈月娥等人报道了一种双包层七芯 PCF,该光纤能够实现高功率、高光束质量的激光,这为制作高功率光纤激光器提供了新的解决方案[43]。2016 年,Wei 等人制作了七芯的双包层 PCF,并利用该七芯 PCF 建立了一个转效率为 74.3% 的百瓦级的超连续光源[90]。2017 年,Liu 等人设计了纤芯掺杂液晶的七芯 PCF,并第一次利用七芯 PCF 制作温度传感器,利用全矢量有限元法分析了有效模场、色散、限制损耗与温度的关系,结果显示该七芯 PCF 在制作温度传感器方面具有显著优势[91]。

空芯反谐振光纤是通过泄漏模导光的,当纤芯中掠入射光的横向传播常数与包层壁不发生谐振时,可看作是一个宽带导光窗口。这种光纤的结构尺寸一般较大,包层结构简单。最早由 Benabid 等提出 kagome 包层结构的空芯光纤,但是该空芯微结构光纤没有完整带隙特性,与光子带隙型光子晶体光纤的导光机理不同[92]。近年来,由于设备的完善和制作技术的进步,反谐振微结构光纤得到了较多的研究。2014 年,Belardi 等成功的制备了无节点空芯反谐振光纤,该光纤弯曲半径为 2.5 cm 时,在  $3.35 \mu\text{m}$  处的弯曲损耗仅为 0.25 dB [93]。王璞课题组在 2016 年报道了自制的高性能无节点空芯反谐振光纤,从 1050 nm 到 1900 nm 的波段范围内损耗为 200 dB/km [94]。由于光在空气中传播对环境温度不敏感, Van Newkirk 等利用这个特性,用空芯反谐振光纤代替传统光纤,降低了由于温度造成的时延敏感度[95]。2017 年,Wheeler 等制备了具有低损耗、宽工作带宽和高模态纯度的空芯反谐振光纤,测得三种不同的优化的光纤在  $1.0 \mu\text{m}$ 、 $1.55 \mu\text{m}$  和  $2.5 \mu\text{m}$  处的损耗分别为 12.3 dB/km、13.9 dB/km 和 9.6 dB/km [96]。

## 8. 光子晶体光纤的应用

PCF 包层区域中以波长量级周期性或准周期性分布的空气孔使其具有传统光纤所无法比拟的特性,作为新一代优异的光学介质,它在激光器、传感、医疗、超连续光源、光纤通信等方面具有广泛的应用

前景。

PCF 在激光器中不仅可直接作为增益介质,也可起色散补偿和传输光能量等作用。并且由于具有大模面积、色散可调、数值孔径灵活可调、结构紧凑等特性,PCF 光纤激光器具有更广泛的应用前景。自第一台大模场光子晶体光纤激光器问世以来[97],大模场 PCF 可显著降低功率密度,减小非线性效应和提高损伤阈值等,使它成为光纤激光器中的一个新的研究热点。2008 年,丹麦 Crystal Fiber 公司采用 100  $\mu\text{m}$  纤径和 3957  $\mu\text{m}^2$  模场面积的棒状双层包层 PCF,获得了  $M^2 < 1.1$ ,功率为 2.53 kW 的单模激光输出。通过对该光纤的进一步研究,发现提高泵浦光源功率,可获得 10 kW 的激光输出。2012 年,天津大学的 Zhang 等报道了脉冲重复率为 55 MHz、脉冲宽度 494 fs 至 1.24 ps、最大脉冲能量为 49 nJ 的大模场可调谐超短脉冲光子晶体光纤激光器[98]。2013 年,上海光学精密机械研究所首次报道了基于溶胶-凝胶法制作的  $\text{Yb}^{3+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  和  $\text{P}^{5+}$  共掺石英玻璃的大模场 PCF,在 1040 nm 处获得了 34.6 W 的输出[99]。接着,2015 年在 Scientific Reports 上报道了大模场单模掺钕石英玻璃全固态 PCF,该光纤纤芯直径 45  $\mu\text{m}$ ,在 1064 nm 处获得了 0.8 W 的  $M^2$  为 1.18 的单模激光输出[100]。PCF 的色散灵活可调特性可应用于脉冲锁模激光器,能有效地补偿谐振腔的色散并将脉冲进行压缩。早在 2003 年, Sudmeyer 等人利用 PCF 将 Yb:YAG 激光器输出 880 fs 脉冲压缩至 30 fs [101]。Abedin 等人利用长度为 20 cm 的零色散波长位于 1065 nm 的 PCF 压缩脉冲,得到了中心波长 1070 nm、脉冲宽度为 20 fs 的脉冲输出[102]。如今的超快脉冲 PCF 激光器已达几十飞秒的脉冲宽度。除上述报道,利用 PCF 的特殊性在结构紧凑、小巧灵活和体积小的激光器或在长度较短的光纤激光器实现高功率输出的应用中也都有着很大的发展前景[58] [103]。

近年来 PCF 的制作工艺的越来越成熟,基于 PCF 的传感技术的发展,使得其在温度、应变、压力、折射率等参数的传感测量方面,比传统光纤具有更高的灵敏性和精度,被用于研制气体、液体、生物、压力等各类传感器,并且已在环境检测和生物传感等领域得到广泛应用。目前 PCF 传感器按原理一般分为以下几类:吸收型 PCF 传感器,PCF 光栅传感器,干涉型 PCF 传感器,荧光 PCF 传感器。吸收型 PCF 传感器一般是将气体或液体等介质填充在 PCF 的孔洞中,光在通过 PCF 后,透射光强度会衰减,或者随外界环境的变化,透射光发生改变,通过强度探测或光谱分析来测量介质的浓度和成分或者测量外界环境的变化量。例如,香港理工大学的 Hoo 和 Jin 等人在 PBG-PCF 中填充气体,通过监测通过气体的光的衰减来测定气体的浓度,由于 PBG-PCF 中约 95.45%的光功率与气体相互作用,所以相比 TIR-PCF 具有更高的灵敏度[104];深圳大学的 Yu 等人设计了一种乙醇填充的温度传感器,当外界温度变化,透射光的强度随之而变,可实现温度的测量,实验上用 10 cm 长的 PCF 传感器获得了 0.315 dB/°C 的灵敏度[103]。PCF 光栅传感器利用光纤光栅的传光性能随外界条件(温度、折射率和应变等)的变化而变化。例如 Martelli 等人利用光纤布拉格光栅长度随温度和应变的变化,来改变传光性能,从而制成 PCF 光栅温度和应变传感器[105];Maity 等人于 2014 年提出了超灵敏长周期 PCF 光栅传感器,通过测量该长周期光栅的两个谐振波长峰之间的差随温度、应变和折射率的变化,来确定被测物理量的大小,可制成高性能多参数传感器[106]。干涉型 PCF 传感器大多是基于纤芯基模和包层模式之间的干涉,一束光分成两部分分别在纤芯和包层传播,并在汇合时发生干涉。Zhou 等人报道了一种折射率计,该传感器是基于双芯 PCF 的 Michelson 干涉仪,可在 1.34~1.37 的折射率范围内实现 800 nm/RIU 的分辨率[107]。荧光 PCF 传感器基于 PCF 的截面可灵活设计,增加荧光的吸收面积和接收角,荧光经 PCF 传输,通过探测器检测,实现对样品的定量分析。Konorov 等人报道了一种非接触式荧光检测方法,用半导体激光通过 PCF 纤芯照射在样品上激发出荧光,然后利用较大的薄层区域收集荧光,反向传输到监测装置上,可以测量样品的性质或通过荧光的变化来测量外界环境参量[108]。总之,PCF 由于其光子带隙的独特性,使 PCF 传感元件具有许多传统光纤无法比拟的特性,在光纤传感中的应用越来越广泛。

超连续谱是通过高功率皮秒或飞秒脉冲耦合进光纤中,激发多重光学非线性效应(四波混频、自相位

调制、交叉相位调制、拉曼效应、光孤子自频率频移等)而实现的激光频谱展宽。超连续谱光源应用领域广泛,尤其是在生物医学中,已作为医学领域中各分析仪器(流式细胞仪,荧光显微成像,光学相干层析、共焦显微生物医学分析等)的一种主要的光学器件,其提供了强有力的技术支持。PCF 中产生的超连续谱具有光谱范围宽、色散平坦、损耗低、功率高、容易实现零色散等优势: Belli, F.利用充氢气的 kagome PCF 实现了从 124~1200 nm 的超连续谱[31];天津大学姚建铨课题组在 2005 年用钛宝石 OPA 对 PCF 泵浦,获得了 300~1350 nm 的超连续谱,同时发现如果泵浦波长靠近 PCF 的零色散波长,超连续谱的平坦性越好、宽度越宽[109]; Ebnali-Heidari 等人在 PCF 中填充光学流体来控制色散,实现了低损耗、超平坦色散,通过模拟发现用中心波长位于 1250~1625 nm 的飞秒脉冲可实现 640~1180 nm 的超平坦超连续谱[110];2014 年国防科学技术大学谯鸿伟等人报道了用七芯 PCF 实现了百瓦量级超连续谱,谱宽为 750~1700 nm,平均功率为 104.2 W [111]。如上所述,PCF 超连续谱具有如此多的优异特性,自超连续谱在 PCF 中产生以来,在生物医学领域迅速推广和发展。Nagahara 等人在 2004 年用钛宝石激光器对 PCF 泵浦,将获得的超连续谱耦合进扫描近场显微镜的光学探针中,实现了宽谱段扫描近场光学成像和样品吸收透射光谱测量,并且在 740~830 nm 探针脉冲的时间精确度为 1~2 ps [112]。Isobe 等人用钛宝石飞秒激光器对 4.5 mm 长的 PCF 泵浦获得近红外波段的超连续谱光源,该波段同时涵盖了三种荧光染料的最优激发波长,从而达到三波长双光子荧光同步显微成像[113]。采用 PCF 产生的超连续光谱也被人们用于荧光寿命成像显微,并可通过调节泵浦源来调节超连续谱光源。光学相干层析成像是一种三维层析成像技术,在医学细胞、血液分析中具有重要作用。Humbert 等人在 2006 年将 PCF 产生的超连续谱作为光源引入光学相干层析成像系统中,并在没有使用滤光片的条件下,中心波长位于 809 nm,在自由空间得到了 1.5  $\mu\text{m}$  的纵向分辨率[114]。

PCF 众多的优异性和独特的结构,不仅在激光、医学和传感领域广泛应用,PCF 还作为一种新型的光器件和光传输介质为光纤通信带来了新的活力。2003 年,日本电报电话公司(NTT)就在光纤通信(OFC)会议上报道了他们研制的长度 10 km、损耗为 0.37 dB/km 的 PCF,其研究人员随后进行了波分复用实验,传输速率达到 80 Gbit/s。2007 年 Anonymous 利用 PCF 在可见光波段实现了 10 Gbit/s 的传输速率[115]。2006 年,Kwok 等人报道了利用平坦色散 PCF 获得了超宽带宽(>100 nm)全光波转换,转换速率为 10 Gbit/s [116]。西安邮电大学的 Hui 等人于 2014 年基于平坦色散高非线性 PCF 中的自相位调制原理,实现了 1 至 8 个不同光波同时多点传送,速率为 20 Gbit/s [117]。2016 年他们又基于单模、色散平坦、高非线性的 PCF 中的四波混频和交叉相位效应,通过实验实现了速率为 10 Gbit/s、1 至 4 个不同光波多点传送的非归零码到归零码的光调制格式转换[118]。PCF 在光纤通信中各种功能的应用实现的同时,人们也在不断降低 PCF 的损耗,通过色散补偿、平坦、单模等特性,期望实现 Tbit/s 超高速率的光纤通信。

PCF 应用广泛,涉及领域之多,除了上面介绍的几种应用,利用 PCF 还可制作放大器、保偏器、光开关、定向耦合器、波长转换器、化学反应器等。总之,PCF 灵活的结构,造就了 PCF 的广泛应用,而且近来随着光子晶体光纤制备工艺的成熟和理论的完善,PCF 的应用可谓“随处可见”,也促使其不断地向未知的技术和新领域拓展,相信 PCF 在不久的将来会在诸多领域起到举足轻重的作用。

## 9. 总结与展望

本文对 PCF 的发展历史、设计参数和特性、制备方法、不同材料的 PCF 及应用作了介绍。光子晶体光纤的无截止单模特性、高保偏性、高非线性、超宽波段的低色散和低损耗等性能,或利用其制作的传输光纤都已超越了传统光纤。特别,通过 PCF 制作的激光器、超连续谱光源、传感器、起偏器、放大器、光纤光栅和密集波分复用系统等,在激光、通信、生命科学等领域发挥了极其重要的作用,这些都体现了 PCF 与众多不同领域技术结合的可能。所以,在将来发展光子晶体光纤更多新的特性与应用也是顺

其自然的。现在 PCF 的制备工艺多样、相对成熟，已经可以开发生产各类 PCF，但还需继续优化老工艺和开拓新工艺，降低生产成本，制备更多类型和性能更优异的 PCF。目前大部分器件的尾纤都是传统光纤，所以 PCF 与器件的连接和熔接技术需要更进一步开发研究，让 PCF 获得更多的应用。可以预料，由于 PCF 自身的独特性，必定推动其在更多领域的发展，而且未来仍然是各领域研究的热点。

## 参考文献

- [1] Jeong, Y., Sahu, J.K., Payne, D.N., *et al.* (2004) Ytterbium-Doped Large-Core Fiber Laser with 1.36 kW Continuous-Wave Output Power. *Optics Express*, **12**, 6088-6092. <https://doi.org/10.1364/OPEX.12.006088>
- [2] Nilsson, J. and Payne, D.N. (2011) High-Power Fiber Lasers. *Science*, **332**, 921-922. <https://doi.org/10.1126/science.1194863>
- [3] Limpert, J., Schreiber, T., Liem, A., *et al.* (2003) Thermo-Optical Properties of Air-Clad Photonic Crystal Fiber Lasers in High Power Operation. *Optics Express*, **11**, 2982-2990. <https://doi.org/10.1364/OE.11.002982>
- [4] Mortensen, N.A. (2002) Effective Area of Photonic Crystal Fibers. *Optics Express*, **10**, 341-348. <https://doi.org/10.1364/OE.10.000341>
- [5] Knight, J.C., Birks, T.A., Cregan, R.F., *et al.* (1998) Large Mode Area Photonic Crystal Fibre. *Electronics Letters*, **34**, 1347-1348. <https://doi.org/10.1049/el:19980965>
- [6] Birks, T.A., Knight, J.C. and Russell, P.S. (1997) Endlessly Single-Mode Photonic Crystal Fiber. *Optics Letters*, **22**, 961-963. <https://doi.org/10.1364/OL.22.000961>
- [7] Kuhlmeiy, B.T., McPhedran, R.C. and de Sterke, C.M. (2002) Modal Cutoff in Microstructured Optical. *Optics Letters*, **27**, 1684-1686. <https://doi.org/10.1364/OL.27.001684>
- [8] Kuhlmeiy, B.T., McPhedran, R.C., de Sterke, C.M., *et al.* (2002) Microstructured Optical Fibers: Where's the Edge? *Optics Express*, **10**, 1285-1290. <https://doi.org/10.1364/OE.10.001285>
- [9] Mortensen, N.A., Folkner, J.R., Nielsen, M.D., *et al.* (2003) Modal Cutoff and the V Parameter in Photonic Crystal Fibers. *Optics Letters*, **28**, 1879-1881. <https://doi.org/10.1364/OL.28.001879>
- [10] Cucinotta, A., Selleri, S., Vincetti, L., *et al.* (2002) Perturbation Analysis of Dispersion Properties in Photonic Crystal Fibers through the Finite Element Method. *Journal of Lightwave Technology*, **20**, 1433-1442. <https://doi.org/10.1109/JLT.2002.800792>
- [11] An, L., Zheng, Z., Li, Z., Zhou, T. and Cheng, J.T. (2009) Ultrahigh Birefringent Photonic Crystal Fiber with Ultralow Confinement Loss Using Four Airholes in the Core. *Journal of Lightwave Technology*, **27**, 3175-3180. <https://doi.org/10.1109/JLT.2008.2009074>
- [12] 邹辉, 马雷, 熊慧. 具有高双折射双零色散波长的光子晶体光纤[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 1-12.
- [13] Broderick, N.G.R., Monro, T.M., Bennett, P.J. and Richardson, D.J. (1999) Nonlinearity in Holey Optical Fibers: Measurement and Future Opportunities. *Optics Letters*, **24**, 1395-1397. <https://doi.org/10.1364/OL.24.001395>
- [14] Laegsgaard, J., Mortensen, N.A., Riishede, J. and Bjarklev, A. (2003) Material Effects in Air-Guiding Photonic Band-gap Fibers. *Journal of the Optical Society of America B—Optical Physics*, **20**, 2046-2051. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.20.002046>
- [15] Petropoulos, P., Monro, T.M., Belardi, W., Furusawa, K., Lee, J.H. and Richardson, D.J. (2001) 2R-Regenerative All-Optical Switch Based on a Highly Nonlinear Holey Fiber. *Optics Letters*, **26**, 1233-1235. <https://doi.org/10.1364/OL.26.001233>
- [16] Lee, J.H., Yusoff, Z., Belardi, W., *et al.* (2003) A Tunable WDM Wavelength Converter Based on Cross-Phase Modulation Effects in Normal Dispersion Holey Fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, **15**, 437-439. <https://doi.org/10.1109/LPT.2002.807927>
- [17] Peucheret, C., Zsigri, B., Andersen, P.A., *et al.* (2003) 40 Gbit/s Transmission over Photonic Crystal Fibre Using Mid-Span Spectral Inversion in Highly Nonlinear Photonic Crystal Fibre. *Electronics Letters*, **39**, 919-921. <https://doi.org/10.1049/el:20030585>
- [18] Yablonovitch, E. (1987) Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Physical Review Letters*, **58**, 2059-2062. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2059>
- [19] John, S. (1987) Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices. *Physical Review Letters*, **58**, 2486-2489. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2486>
- [20] Russell, P.S. (1992) Photonic Band Gaps. *Physics World*, **5**, 37-42. <https://doi.org/10.1088/2058-7058/5/8/31>
- [21] Knight, J.C., Broeng, J., Birks, T.A. and Russell, P.St.J. (1998) Photonic Band Gap Guidance in Optical Fibers.

- Science*, **282**, 1476-1478. <https://doi.org/10.1126/science.282.5393.1476>
- [22] Cregan, R.F., Mangan, B.J., Knight, J.C., *et al.* (1999) Single-Mode Photonic Band Gap Guidance of Light in Air. *Science*, **285**, 1537-1539. <https://doi.org/10.1126/science.285.5433.1537>
- [23] Ortigosa-Blanch, A., Knight, J.C., Wadsworth, W.J., *et al.* (2000) Highly Birefringent Photonic Crystal Fibers. *Optics Letters*, **25**, 1325-1327. <https://doi.org/10.1364/OL.25.001325>
- [24] Ranka, J.K., Windeler, R.S. and Stentz, A.J. (2000) Visible Continuum Generation in Air-Silica Microstructure Optical Fibers with Anomalous Dispersion at 800 nm. *Optics Letters*, **25**, 25-27. <https://doi.org/10.1364/OL.25.000025>
- [25] Russell, P. (2003) Photonic Crystal Fibers. *Science*, **299**, 358-362. <https://doi.org/10.1126/science.1079280>
- [26] Knight, J.C. (2003) Photonic Crystal Fibres. *Nature*, **424**, 847-851. <https://doi.org/10.1038/nature01940>
- [27] Tajima, K., Zhou, J., Nakajima, K. and Sato, K. (2004) Ultralow Loss and Long Length Photonic Crystal Fiber. *Journal of Lightwave Technology*, **22**, 7-10. <https://doi.org/10.1109/JLT.2003.822143>
- [28] Schmidt, M.A., Prill Sempere, L.N., Tyagi, H.K., Poulton, C.G. and Russell, P.St.J. (2008) Waveguiding and Plasmon Resonances in Two-Dimensional Photonic Lattices of Gold and Silver Nanowires. *Physical Review B*, **77**, Article ID: 033417. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.77.033417>
- [29] Vogel, M.M., Abdou-Ahmed, M., Voss, A. and Graf, T. (2009) Very-Large-Mode-Area, Single-Mode Multicore Fiber. *Optics Letters*, **34**, 2876-2878. <https://doi.org/10.1364/OL.34.002876>
- [30] Buczynski, R., Bookey, H.T., Pysz, D., *et al.* (2010) Supercontinuum Generation up to 2.5  $\mu\text{m}$  in Photonic Crystal Fiber Made of Lead-Bismuth-Galate Glass. *Laser Physics Letters*, **7**, 666-672. <https://doi.org/10.1002/lapl.201010039>
- [31] Belli, F., Abdolvand, A., Chang, W., Travers, J.C. and Russell, P.St.J. (2015) Vacuum-Ultraviolet to Infrared Supercontinuum in Hydrogen-Filled Photonic Crystal Fiber. *Optica*, **2**, 292-300. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.2.000292>
- [32] De, M., Gangwar, R.K. and Singh, V.K. (2017) Designing of Highly Birefringence, Dispersion Shifted Decagonal Photonic Crystal Fiber with Low Confinement Loss. *Photonics and Nanostructures—Fundamentals and Applications*, **26**, 15-23. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2017.06.002>
- [33] 李曙光, 刘晓东, 侯蓝田. 光子晶体光纤进展及其应用[J]. 世界科技研究与发展, 2001, 23(6): 7-11.
- [34] 倪屹, 彭江得, 柯亚杰, 等. 大芯区的单模光子晶体光纤[J]. 中国激光, 2003, 30(10): 901-903.
- [35] 栗岩峰, 胡明列, 王清月. 光子晶体光纤的超连续光谱及其应用[J]. 光电子·激光, 2003, 14(11): 1240-1243.
- [36] 王智, 任国斌, 姜淑琴, 等. 光子晶体光纤器件研究进展[C]//中国光学学会. 全国第十一次光纤通信暨第十二届集成光学学术会议(OFCIO'2003)论文集: 2003年卷. 南京: 人民邮电出版社, 2013: 437-441
- [37] 宋俊峰, 王海嵩, 张健, 等. 利用模式的对称性研究光子晶体光纤的色散[J]. 光学学报, 2003, 23(7): 800-803.
- [38] Chi, H., Zeng, Q.J., Zhao, H.D., *et al.* (2003) Analysis on Dispersion Characteristics of Photonic Crystal Fiber. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, **22**, 149-153.
- [39] 刘兆伦, 王伟, 赵兴涛, 等. 宽带色散平坦光子晶体光纤的优化设计与特性分析[J]. 半导体光电, 2007, 28(1): 104-107.
- [40] 陈月娥, 侯蓝田.  $\text{Yb}^{3+}$ 掺杂双包层光子晶体光纤制备研究[J]. 光电工程, 2009, 36(2): 62-66.
- [41] Du, Y., Li, S.G., Liu, S., Zhu, X.-P. and Zhang, X.-X. (2012) Polarization Splitting Filter Characteristics of Au-Filled High-Birefringence Photonic Crystal Fiber. *Applied Physics B*, **109**, 65-74. <https://doi.org/10.1007/s00340-012-5163-x>
- [42] Xue, J.R., Li, S.G., Xiao, Y.Z., *et al.* (2013) Polarization Filter Characters of the Gold-Coated and the Liquid Filled Photonic Crystal Fiber Based on Surface Plasmon Resonance. *Optics Express*, **21**, 13733-13740. <https://doi.org/10.1364/OE.21.013733>
- [43] 陈月娥, 邵秋峰, 王金生. 多芯光子晶体光纤的相干组束集成[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1454-1457.
- [44] 吴宵宵, 范万德, 廖文英, 等. 石墨烯包层结构光子晶体光纤的高双折射特性[J]. 光子学报, 2016, 45(1): 47-50.
- [45] 郭艳艳, 侯蓝田. 光子晶体光纤数值孔径的测量和数值研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(7): 1908-1912.
- [46] Finazzi, V., Monro, T.M. and Richardson, D.J. (2003) The Role of Confinement Loss in Highly Nonlinear Silica Holey Fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, **15**, 1246-1248. <https://doi.org/10.1109/LPT.2003.816702>
- [47] Haxha, S. and Ademgil, H. (2008) Novel Design of Photonic Crystal Fibres with Low Confinement Losses, Nearly Zero Ultra-Flatted Chromatic Dispersion, Negative Chromatic Dispersion and Improved Effective Mode Area. *Optics Communications*, **281**, 278-286. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2007.09.041>
- [48] 杨天宇. 光子晶体光纤的特性研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [49] 王二垒, 姜海明, 谢康, 等. 一种高双折射高非线性多零色散波长光子晶体光纤[J]. 物理学报, 2014, 63(13): 199-204.

- [50] Kumar, V., George, A.K., Knight, J.C. and Russell, P.St.J. (2003) Tellurite Photonic Crystal Fiber. *Optics Express*, **11**, 2641-2645. <https://doi.org/10.1364/OE.11.002641>
- [51] Bise, R.T. and Trevor, D.J. (2005) Sol-Gel Derived Microstructured Fiber: Fabrication and Characterization. *IEEE Optical Fiber Communication Conference*, Anaheim, CA, 6-11 March 2005, 3.
- [52] 汪舰, 魏建平, 杨波, 等. 微结构聚合物光纤制备方法的研究进展[J]. 功能材料, 2013(S2): 171-175.
- [53] Wang, J., Yang, X.H. and Wang, L.L. (2008) Fabrication and Experimental Observation of Monolithic Multi-Air-Core Fiber Array for Image Transmission. *Optics Express*, **16**, 7703-7708. <https://doi.org/10.1364/OE.16.007703>
- [54] Choi, J., Kim, D.Y. and Paek, U.C. (2001) Fabrication and Properties of Polymer Photonic Crystal Fibers. *Proceedings of the Plastic Optical Fiber Conference*, 355-360.
- [55] Zhang, Y.N., Li, K., Wang, L.L., et al. (2006) Casting Preforms for Microstructured Polymer Optical Fibre Fabrication. *Optics Express*, **14**, 5541-5547. <https://doi.org/10.1364/OE.14.005541>
- [56] Zhou, G.Y., Hou, Z.Y., Li, S.G. and Hou, L.T. (2006) Fabrication of Glass Photonic Crystal Fibers with a Die-Cast Process. *Applied Optics*, **45**, 4433-4436. <https://doi.org/10.1364/AO.45.004433>
- [57] Feng, X., Mairaj, A.K., Hewak, D.W. and Monro, T.M. (2005) Nonsilica Glasses for Holey Fibers. *Journal of Lightwave Technology*, **23**, 2046-2054. <https://doi.org/10.1109/JLT.2005.849945>
- [58] Li, L., Schülzgen, A., Temyanko, V.L., et al. (2005) Short-Length Microstructured Phosphate Glass Fiber Lasers with Large Mode Areas. *Optics Letters*, **30**, 1141-1143. <https://doi.org/10.1364/OL.30.001141>
- [59] Franczyk, M., Stepien, R., Pysz, D., Kujawa, I. and Buczynski, R. (2014) Phosphate Yb<sup>3+</sup> Photonic Crystal Fiber Single-Mode Laser with Enormous High Pump Absorption. *Laser Physics Letters*, **11**, Article ID: 085104. <https://doi.org/10.1088/1612-2011/11/8/085104>
- [60] 张光, 周秦岭, 胡丽丽, 等. 堆积法制作大芯径磷酸盐光子晶体光纤[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 171-174.
- [61] Wang, L.F., Liu, H., He, D.B., et al. (2014) Phosphate Single Mode Large Mode Area All-Solid Photonic Crystal Fiber with Multi-Watt Output Power. *Applied Physics Letters*, **104**, 1547-1549. <https://doi.org/10.1063/1.4870630>
- [62] Wang, L.F., He, D.B., Feng, S.Y., et al. (2015) Phosphate Ytterbium-Doped Single-Mode All-Solid Photonic Crystal Fiber with Output Power of 13.8 W. *Scientific Reports*, **5**, Article No. 8490. <https://doi.org/10.1038/srep08490>
- [63] Feng, X., Monro, T.M., Finazzi, V., et al. (2005) Extruded Singlemode, High-Nonlinearity, Tellurite Glass Holey Fibre. *Electronics Letters*, **41**, 835-837. <https://doi.org/10.1049/el:20051501>
- [64] Wei, S., Yuan, J.H., Yu, C.X., et al. (2014) Design on a Highly Birefringent and Highly Nonlinear Tellurite Ellipse Core Photonic Crystal Fiber with Two Zero Dispersion Wavelengths. *Optical Fiber Technology*, **20**, 320-324. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2014.03.007>
- [65] Domachuk, P., Wolchover, N.A., Cronin-Golomb, M., et al. (2008) Over 4000 nm Bandwidth of Mid-IR Supercontinuum Generation in Sub-Centimeter Segments of Highly Nonlinear Tellurite PCFs. *Optics Express*, **16**, 7161-7168. <https://doi.org/10.1364/OE.16.007161>
- [66] Liu, Q., Li, S.G., Gao, X.Y. and Feng, X.X. (2017) Simulation of a Short and Broadband Polarization Splitter Based on Photonic Crystal Fiber Filled with Tellurite Glass. *Optical and Quantum Electronics*, **49**, 60. <https://doi.org/10.1007/s11082-017-0896-8>
- [67] Smektala, F., Brilland, L., Chartier, T., et al. (2006) Recent Advances in the Development of Holey Optical Fibers Based on Sulphide Glasses. *Proceedings of the SPIE*, **6128**, 106-113.
- [68] Monro, T.M., West, Y.D., Hewak, D.W., et al. (2000) Chalcogenide Holey Fibres. *Electronics Letters*, **36**, 1998-2000. <https://doi.org/10.1049/el:20001394>
- [69] Traynor, N.J., Monteville, A., Provino, L., et al. (2009) Fabrication and Applications of Low Loss Nonlinear Holey Fibers. *Fiber & Integrated Optics*, **28**, 51-59. <https://doi.org/10.1080/01468030802272526>
- [70] Fatome, J., Fortier, C., Nguyen, T.N., et al. (2009) Linear and Nonlinear Characterizations of Chalcogenide Photonic Crystal Fibers. *Journal of Lightwave Technology*, **27**, 1707-1715. <https://doi.org/10.1109/JLT.2009.2021672>
- [71] El-Amraoui, M., Gadret, G., Jules, J.C., et al. (2010) Microstructured Chalcogenide Optical Fibers from As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> Glass: Towards New IR Broadband Sources. *Optics Express*, **18**, 26655-26665. <https://doi.org/10.1364/OE.18.026655>
- [72] 曹凤珍, 张培晴, 戴世勋, 等. 3~5 μm 宽带超低色散平坦硫系光子晶体光纤[J]. 光子学报, 2014, 43(6): 606003.
- [73] Argyros, A. (2009) Microstructured Polymer Optical Fibers. *Journal of Lightwave Technology*, **27**, 1571-1579. <https://doi.org/10.1109/JLT.2009.2020609>
- [74] Van Eijkelenborg, M.A., Large, M.C.J., Argyros, A., et al. (2001) Microstructured Polymer Optical Fibre. *Optics Express*, **9**, 319-327. <https://doi.org/10.1364/OE.9.000319>
- [75] Shi, Y., Okonkwo, C.M., Argyros, A., et al. (2012) 7.3-Gb/s Transmission over Microstructured Polymer Optical Fiber

- for In-Home Networks. *IEEE Photonics Technology Letters*, **24**, 1257-1259. <https://doi.org/10.1109/LPT.2012.2201931>
- [76] Woyessa, G., Pedersen, J.K.M., Fasano, A., *et al.* (2017) Zeonex-PMMA Microstructured Polymer Optical FBGs for Simultaneous Humidity and Temperature Sensing. *Optics Letters*, **42**, 1161-1164. <https://doi.org/10.1364/OL.42.001161>
- [77] Ren, N.F., Sun, B., Chen, M.Y. (2015) Label-Free Optical Biosensor Based on a Dual-Core Microstructured Polymer Optical Fiber. *Optik*, **126**, 2930-2933. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.07.019>
- [78] Van Eijkelenborg, M.A., Argyros, A. and Leon-Saval, S.G. (2008) Polycarbonate Hollow-Core Microstructured Optical Fiber. *Optics Letters*, **33**, 2446-2448. <https://doi.org/10.1364/OL.33.002446>
- [79] Cho, M., Kim, J., Park, H., *et al.* (2008) Highly Birefringent Terahertz Polarization Maintaining Plastic Photonic Crystal Fibers. *Optics Express*, **16**, 7-12. <https://doi.org/10.1364/OE.16.000007>
- [80] Trabold, B.M., Abdolvand, A., Euser, T.G., *et al.* (2013) Amplification of Higher-Order Modes by Stimulated Raman Scattering in H<sub>2</sub>-Filled Hollow-Core Photonic Crystal Fiber. *Optics Letters*, **38**, 600-602. <https://doi.org/10.1364/OL.38.000600>
- [81] Rodrigues, S.M.G., Facao, M. and Ferreira, M.F.S. (2015) Ultraviolet Light Generation in Gas-Filled Kagome Photonic Crystal Fiber. *Fiber and Integrated Optics*, **34**, 76-89. <https://doi.org/10.1080/01468030.2014.1001092>
- [82] Yang, X.C., Lu, Y., Liu, B.L. and Yao, J.Q. (2017) Fiber Ring Laser Temperature Sensor Based on Liquid-Filled Photonic Crystal Fiber. *IEEE Sensors Journal*, **17**, 6948-6952. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2754640>
- [83] Zhao, Y. and Zhang, Y.Y. (2014) Research on Temperature and Magnetic Field Sensing Characteristics of Photonic Crystal Fiber Filled with Magnetic Fluid. *Microwave and Optical Technology Letters*, **56**, 831-834. <https://doi.org/10.1002/mop.28213>
- [84] Liu, Q., Li, S.G., Fan, Z.K., *et al.* (2015) Numerical Analysis of Ultrabroadband Polarization Splitter Based on Gold-Filled Dual-Core Photonic Crystal Fiber. *Optics Communications*, **334**, 46-50. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.08.019>
- [85] Naeem, K., Kim, B.H., Kim, B. and Chung, Y. (2015) High-Sensitivity Temperature Sensor Based on a Selectively-Polymer-Filled Two-Core Photonic Crystal Fiber In-Line Interferometer. *IEEE Sensors Journal*, **15**, 3998-4003. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2405911>
- [86] Zhao, J.Q., Ruan, S.C., Yan, P.G., *et al.* (2013) Cladding-Filled Graphene in a Photonic Crystal Fiber as a Saturable Absorber and Its First Application For Ultrafast All-Fiber Laser. *Optical Engineering*, **52**, Article ID: 106105. <https://doi.org/10.1117/1.OE.52.10.106105>
- [87] Blanchard, P.M., Burnett, J.G., Erry, G.R.G., *et al.* (2000) Two-Dimensional Bend Sensing With a Single, Multi-Core Optical Fibre. *Smart Materials & Structures*, **9**, 132-140. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/9/2/302>
- [88] Taylor, D.M., Bennett, C.R., Shepherd, T.J., *et al.* (2006) Demonstration of Multi-Core Photonic Crystal Fibre in an Optical Interconnect. *Electronics Letters*, **42**, 331-332. <https://doi.org/10.1049/el:20064382>
- [89] 刘敏, 董传培, 简多, 等. 混合导光双芯光子晶体光纤及分束器[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1836-1841.
- [90] Wei, H.F., Chen, S.P., Hou, J., Chen, K.-K. and Li, J.-Y. (2016) A Double-Cladding Seven-Core Photonic Crystal Fiber for Hundred-Watts-Level All-Fiber-Integrated Supercontinuum Generation. *Chinese Physics Letters*, **33**, Article ID: 064202. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/33/6/064202>
- [91] Liu, M., Zhao, B.Y., Yang, X., *et al.* (2017) Seven-Core Photonic Liquid Crystal Fibers for Simultaneous Mode Shaping and Temperature Sensing. *Chinese Optics Letters*, **15**, Article ID: 060601.
- [92] Benabid, F., Knight, J.C., Antonopoulos, G. and Russell, P.St.J. (2002) Stimulated Raman Scattering in Hydrogen-Filled Hollow-Core Photonic Crystal Fiber. *Science*, **298**, 399-402. <https://doi.org/10.1126/science.1076408>
- [93] Belardi, W. and Knight, J. C. (2014) Hollow Antiresonant Fibers with Low Bending Loss. *Optics Express*, **22**, 10091-10096. <https://doi.org/10.1364/OE.22.010091>
- [94] Gao, S., Wang, Y., Liu, X., *et al.* (2016) Low Bending Loss Nodeless Hollow-Core Anti-Resonant Fiber. *OSA Technical Digest*, paper SW11.4. [https://doi.org/10.1364/CLEO\\_SI.2016.SW11.4](https://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2016.SW11.4)
- [95] Van Newkirk, A., Lopez, J.E.A., Correa, R.A., Schulzgen, A. and Mazurowski, J. (2017) Anti-Resonant Hollow Core Fiber for Precision Timing Applications. *Proceedings of the SPIE*, **10382**, Article ID: 103820E.
- [96] Wheeler, N.V., Bradley, T.D., Hayes, J.R., *et al.* (2017) Low-Loss Kagome Hollow-Core Fibers Operating from the Near-to the Mid-IR. *Optics Letters*, **42**, 2571-2574. <https://doi.org/10.1364/OL.42.002571>
- [97] Wadsworth, W.J., Knight, J.C. and Russell, P.S.J. (2001) Large Mode Area Photonic Crystal Fibre Laser. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, Baltimore, MD, 11 May 2001, 319. <https://doi.org/10.1109/CLEO.2001.947858>
- [98] Zhang, C., Zhang, Y.Y., Hu, M.L., *et al.* (2012) Wavelength Tunable, High Energy Femtosecond Laser Pulses Directly

Generated from Large-Mode-Area Photonic Crystal Fiber. *Optics Communications*, **285**, 2715-2718.

<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.02.011>

- [99] Wang, S.K., Feng, S.Y., Wang, M., *et al.* (2013) Optical and Laser Properties of Yb<sup>3+</sup>-Doped Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SiO<sub>2</sub> Large-Mode-Area Photonic Crystal Fiber Prepared by the Sol-Gel Method. *Laser Physics Letters*, **10**, Article ID: 115802. <https://doi.org/10.1088/1612-2011/10/11/115802>
- [100] Li, W.T., Chen, D.P., Zhou, Q.L. and Hu, L.L. (2015) Large-Mode-Area Single-Mode-Output Neodymium-Doped Silicate Glass All-Solid Photonic Crystal Fiber. *Scientific Reports*, **5**, Article No. 12547. <https://doi.org/10.1038/srep12547>
- [101] Südmeyer, T., Brunner, F., Innerhofer, E., *et al.* (2003) Nonlinear Femtosecond Pulse Compression at High Average Power Levels by Use of a Large-Mode-Area Holey Fiber. *Optics Letters*, **28**, 1951-1953. <https://doi.org/10.1364/OL.28.001951>
- [102] Abedin, K.S. and Kubota, F. (2004) 10 GHz, 1 ps Regeneratively Modelocked Fibre Laser Incorporating Highly Nonlinear and Dispersive Photonic Crystal Fibre for Intracavity Nonlinear Pulse Compression. *Electronics Letters*, **40**, 58-60. <https://doi.org/10.1049/el:20040051>
- [103] Yu, Y., Li, X., Hong, X., *et al.* (2010) Some Features of the Photonic Crystal Fiber Temperature Sensor with Liquid Ethanol Filling. *Optics Express*, **18**, 15383-15388. <https://doi.org/10.1364/OE.18.015383>
- [104] Hoo, Y.L., Jin, W., Ho, H.L., Ju, J. and Wang, D.N. (2005) Gas Diffusion Measurement Using Hollow-Core Photonic Bandgap Fiber. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **105**, 183-186. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.05.059>
- [105] Martelli, C., Canning, J., Groothoff, N. and Lyytikäinen, K. (2005) Strain and Temperature Characterization of Photonic Crystal Fiber Bragg Gratings. *Optics Letters*, **30**, 1785-1787. <https://doi.org/10.1364/OL.30.001785>
- [106] Maity, A. and Varshney, S.K. (2014) Ultrasensitive Properties of a Long-Period Grating Inscribed in a Dual-Mode Photonic Crystal Fiber. *IEEE Sensors Journal*, **14**, 2833-2840. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2317877>
- [107] Zhou, A., Zhang, Y., Li, G., *et al.* (2011) Optical Refractometer Based on an Asymmetrical Twin-Core Fiber Michelson Interferometer. *Optics Letters*, **36**, 3221-3223. <https://doi.org/10.1364/OL.36.003221>
- [108] Konorov, S.O., Zheltikov, A.M. and Scalora, M. (2005) Photonic-Crystal Fiber as a Multifunctional Optical Sensor and Sample Collector. *Optics Express*, **13**, 3454-3459. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.003454>
- [109] 于永芹, 阮双琛, 曾剑春, 等. 泵浦波长对光子晶体光纤产生超连续谱的影响[J]. 光子学报, 2005, 34(9): 1293-1296.
- [110] Ebnali-Heidari, M., Saghaei, H., Koochi-Kamali, F., *et al.* (2014) Proposal for Supercontinuum Generation by Optofluidic Infiltrated Photonic Crystal Fibers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **20**, Article No. 7500408. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2014.2307313>
- [111] 湛鸿伟, 韦会峰, 刘通, 等. 七芯光子晶体光纤中百瓦量级超连续谱的产生[J]. 物理学报, 2014, 63(4): 5-9.
- [112] Nagahara, T., Imura, K. and Okamoto, H. (2004) Time-Resolved Scanning Near-Field Optical Microscopy with Supercontinuum Light Pulses Generated in Microstructure Fiber. *Review of Scientific Instruments*, **75**, 4528-4533. <https://doi.org/10.1063/1.1804371>
- [113] Isobe, K., Watanabe, W., Matsunaga, S., *et al.* (2005) Multi-Spectral Two-Photon Excited Fluorescence Microscopy Using Supercontinuum Light Source. *Japanese Journal of Applied Physics*, **44**, L167-L169.
- [114] Humbert, G., Wadsworth, W., Leon-Saval, S.G., *et al.* (2006) Supercontinuum Generation System for Optical Coherence Tomography Based on Tapered Photonic Crystal Fibre. *Optics Express*, **14**, 1596-1603. <https://doi.org/10.1364/OE.14.001596>
- [115] Anonymous (2007) Photonic-Crystal Fiber Achieves 10 Gbit/s Transmission in the Visible. *Laser Focus World*, **43**, 11.
- [116] Kwok, C.H., Chow, C.W., Tsang, H.K., Lin, C. and Bjarklev, A. (2006) Nonlinear Polarization Rotation in a Dispersion-Flattened Photonic-Crystal Fiber for Ultrawideband (>100 nm) All-Optical Wavelength Conversion of 10 Gbit/s Nonreturn-to-Zero Signals. *Optics Letters*, **31**, 1782-1784. <https://doi.org/10.1364/OL.31.001782>
- [117] Hui, Z.Q. (2014) All-Optical 1-to-8 Wavelength Multicasting at 20 Gbit/s Exploiting Self-Phase Modulation in Dispersion Flattened Highly Nonlinear Photonic Crystal Fiber. *Scientific World Journal*, **2014**, Article ID: 828179. <https://doi.org/10.1155/2014/828179>
- [118] Hui, Z.Q., Zhang, B. and Zhang, J.G. (2016) All-Optical NRZ-to-RZ Format Conversion at 10 Gbit/s with 1-to-4 Wavelength Multicasting Exploiting Cross-Phase Modulation & Four-Wave-Mixing in Single Dispersion-Flattened Highly Nonlinear Photonic Crystal Fiber. *Journal of Modern Optics*, **63**, 724-734. <https://doi.org/10.1080/09500340.2015.1094149>

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7567，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[app@hanspub.org](mailto:app@hanspub.org)