

# 大模场光子晶体光纤研究进展

易昌申 张培晴 戴世勋 王训四 许银生 徐铁峰 聂秋华

(宁波大学信息科学与工程学院红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211)

**摘要** 大模场光子晶体光纤具有无截止单模运转和大模场面积特性,可以克服由激光功率密度过高引起的非线性效应对高功率系统尤其是超快脉冲系统的限制。近年来它在大功率光纤激光器、大功率光纤放大器、大功率能量传输以及高灵敏度传感器等领域引起广泛关注。回顾了大模场光子晶体光纤的研究历程,从大模场光子晶体光纤的特征参数、结构设计方法和应用热点等方面总结了大模场光子晶体光纤的研究现状,最后对其发展前景进行了展望。

**关键词** 光纤光学;光子晶体光纤;大模场面积;大功率光纤激光器;大功率光纤放大器

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.100001

## Research Progress of Large-Mode Area Photonic Crystal Fibers

Yi Changshen Zhang Peiqing Dai Shixun Wang Xunsi Xu Yinsheng  
Xu Tiefeng Nie Qiuhua

(Laboratory of Infrared Materials and Devices, College of Information Science and Engineering,  
Ninbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

**Abstract** Large mode area (LMA) photonic crystal fibers have characteristics of endlessly single mode and large mode area. These characteristics overcome the limit of high power systems caused by nonlinearity due to the high power density, especially the ultrafast pulse systems. The excellent characteristics of the LMA photonic crystal fibers make them have a subject of enormous interest in areas such as high-power fiber laser, fiber amplifier, high-power energy transmission, and high sensitivity sensor. The research of LMA photonic crystal fiber is reviewed in terms of the characteristic parameters, design methods, applications, and so on. Their development prospects are also discussed.

**Key words** fiber optics; photonic crystal fiber; large-mode-field area; high-power fiber laser; high-power fiber amplifier

**OCIS codes** 060.5295; 060.2280; 060.2270

## 1 引言

光纤激光器具有结构简单、散热效果好、转换效率高、光束质量高以及维护方便等优点,成为目前国内外激光研究领域的最大热点之一。近年来随着包层抽运、抽运耦合和光束整形等技术的发展,光纤激光器的输出功率迅速提高。2004年,Jeong等<sup>[1]</sup>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。到2010年,已实现了单根光纤10 kW近衍射极限的激光输出<sup>[2]</sup>。光纤激光器功率的提升使得它的应用从光纤通信、光纤传感、光谱学分析等方面进一步扩展到如工业加工、激光医疗和空间通信等领域。

**收稿日期**: 2012-05-21; **收到修改稿日期**: 2012-06-17; **网络出版日期**: 2012-07-20

**基金项目**: 国家自然科学基金(61177087, 60978058)、教育部新世纪优秀人才计划(NCET-10-0976)、浙江省杰出青年基金(R1101263)、浙江省自然科学基金(LQ12F05004)、宁波市新型光电功能材料及器件创新团队项目(2009B21007)和宁波大学王宽诚幸福基金资助课题。

**作者简介**: 易昌申(1987—),男,硕士研究生,主要从事大模场光子晶体光纤方面的研究。

E-mail: yichangshen@126.com

**导师简介**: 戴世勋(1974—),男,博士,研究员,主要从事光功能玻璃材料及器件等方面的研究。

E-mail: daishixun@nbu.edu.cn

尽管光纤激光器的输出功率提高很快,但是受光纤的非线性效应、光损伤及热损伤等物理机制的限制<sup>[3,4]</sup>,欲更大幅度地提高单个激光器的功率已经相当困难。然而,光纤的非线性效应与光纤的模场面积成反比<sup>[5]</sup>,模场面积越大非线性效应越弱,非线性阈值越高。因此,大模场光纤是解决光纤激光器功率提升面临的非线性效应及光纤损伤的一种最直接有效的途径<sup>[4,6~8]</sup>。然而,为保证输出激光的光束质量,在要求大模场面积(LMA)的同时,必须使光纤能够单模运转。而传统的单模光纤的纤芯直径很小,难以实现大模场面积;增大纤芯直径则不可避免地会造成多横模竞争,影响输出光束质量。

光子晶体光纤(PCF)是实现大模场最有前途的一种光纤结构。相比于传统的光纤,光子晶体光纤具有许多奇特的光学性质<sup>[9,10]</sup>,如无截止单模、低限制损耗、色散可调、高双折射、大模场面积和大数值孔径等,可以克服传统光纤激光器的诸多难题。首先,光子晶体光纤可实现单模大模场面积,在保证激光传输质量的同时,显著降低光纤中的激光功率密度,减小光纤中的非线性效应,提高光纤材料的损伤阈值;其次,光子晶体光纤可以实现较大的内包层数值孔径,从而提高抽运光的耦合效率,可采用长度相对较短的光纤实现高功率输出<sup>[11,12]</sup>。

大模场光子晶体光纤的诸多优良特性,使它成为光纤激光器中一个新的研究热点,在高功率光纤激光器的研究和应用中发挥越来越重要的作用。本文回顾了大模场光子晶体光纤的研究历程,从大模场光子晶体光纤特征参数、设计方法和应用热点等方面概括了大模场光子晶体光纤的研究现状,最后对其发展进行了展望。

## 2 大模场光子晶体光纤研究历程

1998年英国 Bath 大学的 Knight 等<sup>[6]</sup>首次提出光子晶体光纤是一种制造单模大模场光纤的新方法,并成功制备出模场直径为  $22\ \mu\text{m}$ 、模场面积为  $380\ \mu\text{m}^2$  的大模场光子晶体光纤[图 1(a)]。然而,由于大模场光子晶体光纤结构设计和预制棒制备工艺的复杂性,在随后的几年里其研究进展缓慢。直到德国 Jena 大学的 Limpert 等<sup>[11]</sup>通过实心棒取代空气孔微结构包层内环若干数量空气孔的方法,增大纤芯直径,获得了模场面积超过  $1000\ \mu\text{m}^2$  的单模光子晶体光纤。2005 年以后,大模场光子晶体光纤的设计和制备方法开始多样化,出现了各种形状的大模场光纤结构,包括泄漏通道光子晶体光纤[图 1(b)]、棒状光子晶体光纤[图 1(c)]<sup>[11]</sup>、多芯光子晶体光纤[图 1(e)]<sup>[13~15]</sup>等。光纤的模场面积也相应地得到极大提高。2007 年美国 IMRA 公司的 Dong 等<sup>[16]</sup>利用泄漏通道结构获得了模场面积达  $3160\ \mu\text{m}^2$  的光子晶体光纤[图 1(d)],随后又用该方法将光纤的模场面积提高到  $14000\ \mu\text{m}^2$ [图 1(f)]。2009 年研究者又设计出一种获得大模场光子晶体光纤的新方法——应力诱导低折射率差法。美国 IMRA 公司的 Fu 等<sup>[17]</sup>利用光纤拉丝冷却后形成的压力场诱导纤芯

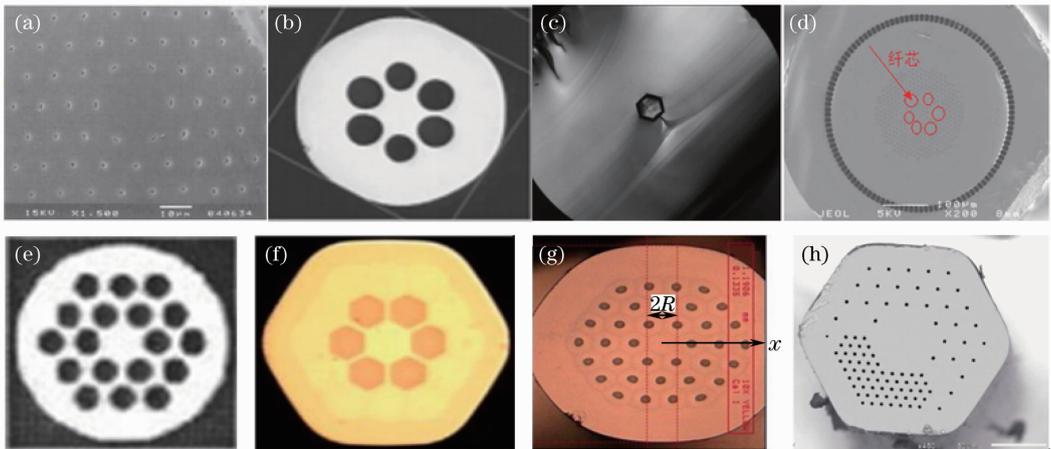


图 1 各种结构的大模场 PCF。(a)第一根大模场 PCF;(b)泄漏型 PCF;(c)棒状 PCF;(d)多纤芯 PCF;(e)具有两环空气孔的泄漏型 PCF;(f)氟掺杂的全玻璃泄漏型 PCF;(g)应力诱导型 PCF;(h)抗弯曲 PCF

Fig. 1 Large-mode area PCF with different structures. (a) The first LMA PCF; (b) leakage channel PCF; (c) rod-type PCF; (d) multi-core PCF; (e) leakage channel PCF of two rings of holes; (f) fluorine-doped leakage channel all-glass PCF; (g) stress-induced PCF; (h) PCF of bend resistance

和低折射率沟道形成微小的折射率差 $[\Delta n \approx 6(\pm 1) \times 10^{-5}]$ ,分别实现了模场面积为 $17400 \mu\text{m}^2$ (对应波长 $1.03 \mu\text{m}$ )和模场面积为 $31600 \mu\text{m}^2$ (对应波长 $1.55 \mu\text{m}$ )的单模低损耗光子晶体光纤[图 1(g)]。近年来研究者在大模场光纤设计和制备方面进行了大量的研究工作,还报道了抗弯曲光子晶体光纤[图 1(h)]<sup>[18~20]</sup>,以及其他大模场光子晶体光纤的设计方法<sup>[21,22]</sup>。

自 2001 年英国 Bath 大学 Wadsworth 等<sup>[23]</sup>采用掺  $\text{Yb}^{3+}$  大模场光子晶体光纤实现激光输出以来,稀土离子掺杂的大模场光子晶体光纤开始广泛应用于光纤激光器,激光输出功率也从最初的 315 mW 提高到目前的 2.5 kW 以上。有研究者预测大模场光子晶体光纤激光器单根光纤激光输出可达 36 kW,因此大模场光子晶体光纤激光器的激光输出功率还有很大的提升空间。与此同时,大模场光子晶体光纤在脉冲激光器、光纤放大器领域的应用也处于快速发展中,并取得重大进展,目前脉冲宽度已达到亚飞秒级,峰值功率不断提高。2003 年以后,有关大模场光子晶体光纤色散特性<sup>[24,25]</sup>、偏振特性<sup>[26,27]</sup>、损耗等特性<sup>[25,28]</sup>以及它在光纤通信系统中高速信号传输<sup>[24,29]</sup>、超连续谱产生<sup>[30]</sup>和高灵敏度传感器<sup>[31]</sup>等方面的探索性应用研究相继报道。

国内在大模场光子晶体光纤方面的研究起步虽晚,其商业化进程也相对缓慢,然而近年来燕山大学、天津大学、南开大学、武汉邮电科学研究院、中国科学院上海光学精密机械研究所(以下简称中科院上海光机所)、华中科技大学和烽火通信公司等研究机构和厂商在大模场光子晶体光纤的设计与制备、高功率光纤激光器、放大器等方面取得了丰富的研究成果,部分工作已达国际先进水平。国内的大模场光子晶体光纤激光器的输出功率已从几瓦提升到近千瓦量级<sup>[32~34]</sup>。在脉冲激光放大器方面,脉冲宽度也已达亚百飞秒量级,2008 年天津大学刘博文等<sup>[35]</sup>将光纤激光器的输出经光栅对压缩后,得到 85 fs 超短脉冲。在大模场光子晶体光纤设计和制备方面,2010 年燕山大学郭艳艳等<sup>[36]</sup>采用多极法设计了一种新型的全固态八边形大模场低损耗掺镱石英光子晶体光纤,且可实现单模传输,在  $1.064 \mu\text{m}$  处模场面积可达  $2000 \mu\text{m}^2$ 。同年,燕山大学耿鹏程等<sup>[37]</sup>采用多极法和有限差分光束传播法设计了一种大模场掺镱的七芯光子晶体光纤,其模场面积高达  $3703 \mu\text{m}^2$ 。2010 年中科院上海光机所的周秦岭等<sup>[38]</sup>采用全矢量有限差分法设计了一种大模场面积平顶模场光子晶体光纤,模场面积超过  $2000 \mu\text{m}^2$ ,与相同模场面积的其他类型光子晶体光纤相比,其损伤阈值和非线性阈值明显提高,有利于提高大模场光纤激光器及放大器的输出功率。中科院上海光机所和烽火通信有限公司在大模场光子晶体光纤的制备方面做出了巨大贡献,2006 年烽火通信公司制备了模场面积为  $167 \mu\text{m}^2$  的掺镱宽频单模大模场光子晶体光纤<sup>[39]</sup>,2009 年该公司又制备了  $1465.7 \mu\text{m}^2$  的大模场光子晶体光纤<sup>[40]</sup>。2012 年中科院上海光机所的冯素雅等<sup>[41]</sup>制备了纤芯直径为  $260 \mu\text{m}$  的准单模大模场光子晶体光纤,这是目前国内报道的最大纤芯的光子晶体光纤。

此外,虽然已报道的大模场光子晶体光纤的基质材料大都集中于石英材料,而基于一些新玻璃基质(如碲酸盐玻璃<sup>[42]</sup>、磷酸盐玻璃<sup>[43]</sup>和硫系玻璃<sup>[44,45]</sup>)的大模场光子晶体光纤近年来也开始相继报道。

### 3 光子晶体光纤的特征参数

在光子晶体光纤的应用中,光纤的传输模式、损耗、色散和模场面积等是决定其性能的重要参数。光子晶体光纤的许多应用要求其单模传输,单模传输特性可保证光子晶体光纤输出光束的质量,这对信号传输系统、光纤放大器、激光器尤其是超快脉冲激光器的应用极为重要。光纤的损耗决定了光信号的传输距离,在实际系统中损耗过大,则不可避免地需要增加信号放大器,既增加了系统的复杂度又提高了运营成本。色散是衡量光纤性能的另一个重要参数,对于信号传输、超连续谱发生、谐波的产生和孤子传输等有重要影响。非线性效应是高功率光纤系统进一步发展的最大障碍,为了突破非线性效应的限制,各国研究者付出了艰辛的努力。在研究大模场光子晶体光纤的特性及应用时,必须综合考虑上述各影响参数。与传统光纤类似,为了光子晶体光纤设计和性能表征的方便,研究者引入归一化频率  $V$ 、模场面积  $A_{\text{eff}}$ 、限制损耗  $L_c$  和色散  $D$  等特征参数。

#### 3.1 归一化频率

光子晶体光纤相比传统光纤的一大优点是存在无截止单模。对实芯光子晶体光纤而言,归一化频率  $V$  表示为<sup>[7]</sup>

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

式中  $a$  为光子晶体光纤的纤芯半径,  $n_{\text{co}}$  和  $n_{\text{cl}}$  分别为纤芯和包层的折射率。当  $V < \pi$  时, 光子晶体光纤以单模传输。决定光子晶体光纤传输特性的主要参数包括空气孔直径  $d$ 、孔间距  $\Lambda$ 、光纤直径  $D$  及纤芯直径  $D_{\text{core}}$ 。可以通过调节包层中空气孔的大小, 精确地控制光子晶体光纤包层和纤芯的折射率差  $\Delta n$ , 使其达到极小值, 从而实现光纤无截止单模传输, 同时  $\Delta n$  的减小还可有效增大模场面积。光子晶体光纤的无截止单模特性与光纤结构的绝对尺寸无关, 当改变光纤结构尺寸时, 光子晶体光纤仍可保持单模传输, 这就提供了一种实现大模场面积光纤的有效途径。

丹麦 Crystal Fiber 公司研究人员通过分析二阶模的模场面积, 确定二阶模的截止波长来分析光子晶体光纤的单模传输情况<sup>[5]</sup>。图 2 即为采用该方法得到的无截止单模及单模工作“相图”。

### 3.2 模场面积

模场面积  $A_{\text{eff}}$  与光纤的泄漏损耗、宏弯损耗、数值孔径和非线性系数等密切相关<sup>[5]</sup>。光子晶体光纤的模场面积可定义为<sup>[25]</sup>

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left( \iint |E|^2 dx dy \right)^2}{\iint |E|^4 dx dy}. \quad (2)$$

$E$  为光子晶体光纤的横向电场分量, 可以在完全匹配包层条件下解矢量方程求得<sup>[25]</sup>:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 n^2 \mathbf{E} = 0, \quad (3)$$

式中  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为真空中的波数,  $\lambda$  为工作波长,  $n$  为介质的折射率。(2) 式描述了光子晶体光纤的模场面积与电场分布之间的关系。当光子晶体光纤输出的光场为近高斯分布时, 光斑的半宽度为  $w$  (光强度为最高光强的  $1/e^2$  时对应的宽度), 则模场面积为  $A_{\text{eff}} = \pi w^2$ , 即光子晶体光纤截面的横向电场分布越广阔, 光子晶体光纤的模场面积越大, 这对于设计大模场光子晶体光纤具有重要的指导意义。

欲设计和制备大模场光子晶体光纤, 可以扩大光子晶体光纤截面的横向电场分布。光子晶体光纤截面的横向电场分布与其结构参数如空气孔直径  $d$ 、空气孔间距  $\Lambda$ 、空气填充率  $d/\Lambda$  等有关。研究表明: 空气填充率  $d/\Lambda$  越小, 纤芯和空气孔包层折射率差  $\Delta n$  越小, 越有利于扩大光纤截面横向电场的分布, 因此有利于扩展光子晶体光纤的模场面积, 这与(1) 式分析的结果一致。减小空气填充率的方法包括增大空气孔间距  $\Lambda$  和减小包层空气孔直径  $d$ 。然而, 减小光纤的空气孔填充率  $d/\Lambda$ , 光纤的模场面积增大, 光纤的损耗也相应增大, 因此要求合理地选择空气孔填充率  $d/\Lambda$ , 既有助于增大光纤的模场面积又可将损耗控制在合理水平。

### 3.3 限制损耗

通常包层空气孔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的间隙泄漏到包层, 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<sup>[25]</sup>

$$L_c = \frac{40\pi}{\ln 10\lambda} \text{Im } n_{\text{eff}} \text{ (dB/m)}, \quad (4)$$

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。

### 3.4 色散

光子晶体光纤在高速信息传输、波分复用系统宽带光传输等方面具有巨大的潜在应用。光子晶体光纤的色散和四波混频限制了其在高速信息传输和宽带光传输方面的优异性能, 因此, 色散是光子晶体光纤必须研究的性能指标。光子晶体光纤的色散可定义为<sup>[19,21]</sup>

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 \text{Re } n_{\text{eff}}}{\partial \lambda^2}, \quad (5)$$

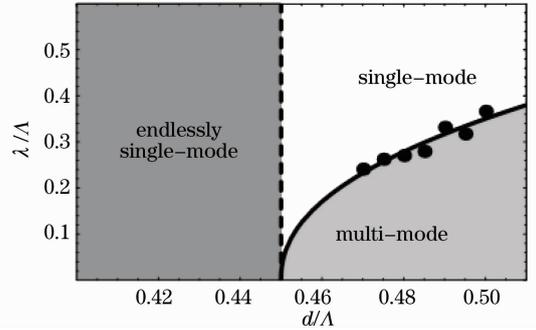


图 2 光子晶体光纤单模和多模工作“相图”  
Fig. 2 Diagram illustrating "phase" with single-mode and multi-mode operation of PCF

式中  $c$  是真空中光速,  $\text{Re } n_{\text{eff}}$  是传输模式的有效折射率的实部。

## 4 大模场光子晶体光纤结构设计方法

目前大模场光子晶体光纤结构设计方法主要包括:大芯径光子晶体光纤、棒状光子晶体光纤、泄漏通道光子晶体光纤和压力诱导光子晶体光纤等。

### 4.1 大芯径光子晶体光纤

大芯径法是实现大模场面积最简单有效的方法。它主要通过使用实心棒取代光子晶体光纤内环若干个空气孔以形成纤芯区来增大纤芯直径。目前取代 1 孔、3 孔、7 孔、19 孔的光子晶体光纤均有报道<sup>[7,46,47]</sup>。研究表明若保持光纤结构及参数相同,相比于取代 1 孔的光子晶体光纤,取代 3 内环空气孔的光子晶体光纤的模场面积可增加 30%,取代 7 空气孔的光子晶体光纤模场直径可达到  $35 \mu\text{m}$ ,甚至  $45 \mu\text{m}$ <sup>[7]</sup>。此外,光子晶体光纤的无截止单模特性与光纤结构的绝对尺寸无关,当改变结构尺寸时,光子晶体光纤仍可保持单模传输,这就提供了一条实现大模场面积光纤的途径,即可通过扩大光子晶体光纤的尺寸以增大纤芯直径。图 3 为实心棒取代 1 孔、3 孔、7 孔的光子晶体光纤的显微截面图。

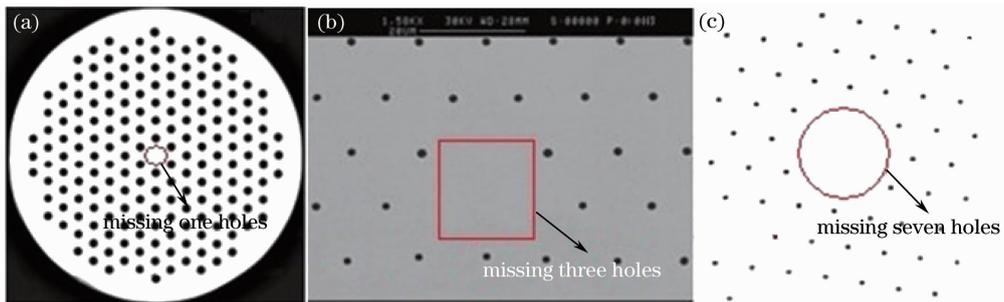


图 3 实心棒取代若干内层空气孔的光纤结构中(a) 1 孔、(b) 3 孔、(c) 7 孔的光子晶体光纤的显微图像

Fig. 3 Microscope images of PCF with (a) one, (b) three and (c) seven missing holes replaced by solid rod

### 4.2 棒状光子晶体光纤

棒状光子晶体光纤是 Limpert 等<sup>[11,12]</sup>为进一步提高光子晶体光纤激光器输出功率,并免受高功率导致的受激拉曼散射、自相位调制等非线性效应限制而提出的一种新型大模场光子晶体光纤。这种棒状光纤由毫米量级的大尺寸棒状外包层、空气孔微结构内包层和大直径实心纤芯构成。光纤中存在两个重要的波导结构:一个用来传输抽运光,另一个可用来传输激光,具有棒状和光纤增益介质的双重优点。2005 年 Limpert 等<sup>[11]</sup>报道了  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂外包层直径为  $1.7 \text{ mm}$ 、内包层直径为  $117 \mu\text{m}$ 、模场直径为  $35 \mu\text{m}$ 、长度为  $48 \text{ cm}$  的单模大内包层数值孔径的棒状光子晶体光纤,并且采用  $976 \text{ nm}$  的激光抽运,得到了近衍射极限输出功率为  $120 \text{ W}$  的连续激光输出。随后,他们又制备出模场直径分别为  $60 \mu\text{m}$  和  $100 \mu\text{m}$  的有源、无源单模光子晶体光纤,如图 4 所示。

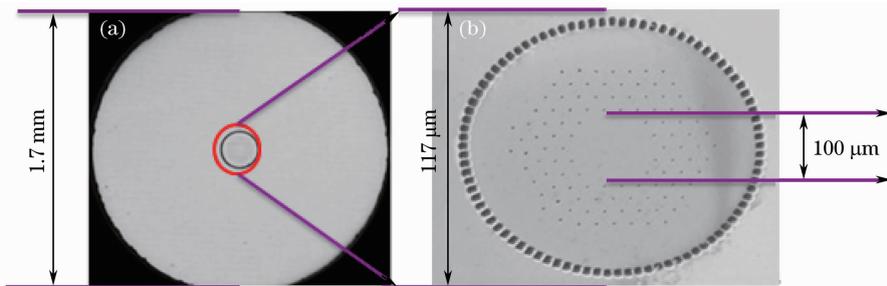


图 4 棒状光子晶体光纤结构。(a)棒状光子晶体光纤端面显微图像;(b)微结构区域扫描电镜照片

Fig. 4 Structure of rod-type PCF. (a) Micro-image of the extended-mode-area rod-type PCF;

(b) SEM picture of the selected region in (a)

### 4.3 泄漏通道光子晶体光纤

为了打破传统光子晶体光纤中严格单模、低损耗、抗弯曲要求对模场直径的限制,2005 年,美国 IMRA

公司的 Dong 等<sup>[16,48]</sup>提出了一种新型抗弯曲严格单模大模场光子晶体光纤的设计方法:泄漏通道型光子晶体光纤。这种光子晶体光纤由一环或几环大直径空气孔和大直径纤芯构成,同时合理地选择空气孔的几何分布并采用大孔间距  $\Delta$ 。研究表明大纤芯直径可提高模场面积,大直径空气孔使得纤心和空气孔形成很大折射率差,光纤对基模具有很强的限制作用,大孔间距  $\Delta$  使得高阶模能够从大孔间通道泄漏出去。泄漏通道光子晶体光纤中基模的损耗很小(小于 0.1 dB/m),高阶模的损耗很大(大于 1 dB/m),因此可严格单模或近单模工作。这种光纤的出现对高功率光纤激光器和光纤放大器等光器件的发展形成了极大的推动作用。2005 年 Wong 等<sup>[48]</sup>制备出模场面积为  $1417 \mu\text{m}^2$  单模低损耗泄漏通道光子晶体光纤,研究表明,当纤芯直径增大到  $100 \mu\text{m}$  时,这种光纤仍能单模工作。2007 年制备出模场面积为  $3160 \mu\text{m}^2$  的掺  $\text{Yb}^{3+}$  低损耗单模泄漏通道光纤和模场面积为  $1400 \mu\text{m}^2$  的偏振保持泄漏通道光纤<sup>[16]</sup>,实验验证了该光纤优异的抗弯曲特性。图 5 为泄漏通道光子晶体光纤的横截面显微图像。

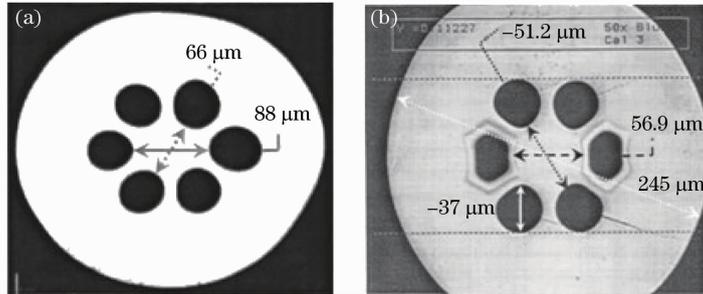


图 5 泄漏通道光子晶体光纤结构。(a)  $\text{Yb}^{3+}$  掺杂的泄漏型光纤横截面;(b)偏振保持泄漏型光纤横截面

Fig. 5 Structure of leakage channel PCF. (a) Cross section of  $\text{Yb}^{3+}$ -doped leakage channel PCF; (b) cross section of polarization maintaining leakage channel PCF

#### 4.4 应力诱导型光子晶体光纤

根据单模传输条件,当纤芯直径  $D_{\text{core}}$  很大时,要保持光纤严格单模传输就必须降低光纤的数值孔径  $NA$ 。由于传统光纤气相沉积过程中掺杂控制精度的限制,传统单模光纤的数值孔径通常为  $NA > 0.06$ ,进一步降低数值孔径难度非常大,所以传统单模光纤的模场面积有限。为解决  $NA$  值难于进一步降低的问题,Fu 等<sup>[17]</sup>提出了应力诱导型光子晶体光纤。与传统空气孔微结构光子晶体光纤不同,应力诱导型光子晶体光纤是由两种热膨胀系数不同(但相差不大)的玻璃材质组成,以高折射率石英玻璃为背景,低折射率石英玻璃棒按照一定的规律分布在高折射率棒中,形成与空气孔微结构类似的等效低折射率玻璃棒微结构包层。在光纤的拉制过程中,由于扩散、气氛影响及其他表面效应,低折射率玻璃棒的表面比内部有更高的膨胀系数,当光纤缓慢冷却时在石英棒的周围产生了低折射率的沟道,沟道与纤心区的折射率差为  $10^{-5}$  量级,因此应力诱导型光子晶体光纤可实现大直径纤芯,并同时保持严格单模运转。2009 年 Fu 等<sup>[17]</sup>首次制造出包层尺寸为  $1.2 \text{ mm}$ 、纤芯直径为  $252 \mu\text{m}$ 、模场面积分别为  $17400 \mu\text{m}^2$  (对应波长为  $1.03 \mu\text{m}$ ) 和  $31600 \mu\text{m}^2$  (对应波长为  $1.5 \mu\text{m}$ ) 的应力诱导型光子晶体光纤,其横截面的显微结构及折射率分布如图 6 所示。图 6(a) 中应

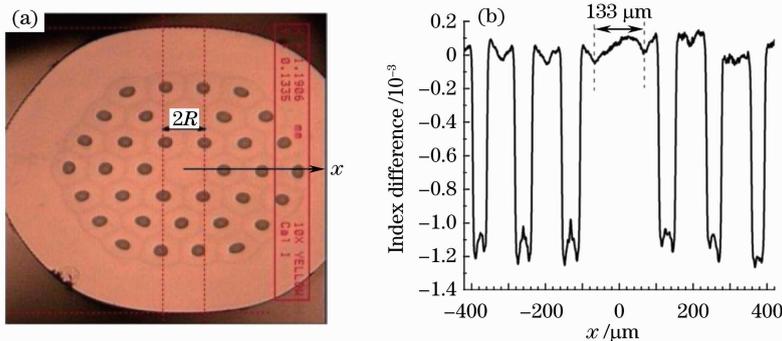


图 6 (a)应力诱导型 PCF 截面显微图像;(b)应力诱导型 PCF 截面的折射率分布

Fig. 6 (a) Cross section of stress-induced PCF under optical microscope; (b) refractive-index distribution along the  $x$  direction of the stress-induced PCF

力诱导型 PCF 横截面上灰色点代表氟掺杂的石英玻璃棒,按三角格子排列在纯石英玻璃中,灰色的六边形为低折射率的沟道,沟道和纤芯的折射率差为  $6(\pm 1) \times 10^{-5}$ 。

综上所述,以上各种方法各有优缺点:大芯径法是实现大模场光子晶体光纤最直接有效的方法,是其他方法的基础;棒状光子晶体光纤的纤芯直径和外径均较大,既可提高光纤的散热性能又可增加光纤的机械性能,可以免去有机聚合物涂覆层,提高了光纤的热损伤阈值;泄漏型光子晶体光纤的尺寸通常与棒状光子晶体光纤相当,但是其结构简单,更易于制备,可采用挤压、钻孔等方法获得;相比于以上几种方法,应力诱导型光子晶体光纤的纤芯与低折射率沟道折射率差极小,可更大程度地增大纤芯直径,同时保持单模运转,然而其折射率精度控制要求极高,制备比较困难。

除以上几种常见方法外,实现大模场光子晶体光纤的方法还有多纤芯光子晶体光纤法<sup>[13,15]</sup>、纤芯分层掺杂法<sup>[19]</sup>和抗弯曲法<sup>[19,49]</sup>等。

## 5 研究热点和应用

大模场光子晶体光纤具有大模场面积、良好的散热能力、精确偏振控制以及宽波长范围单模运转等优点,使其对实现高功率、高光束质量的激光输出有着独特的优势。与传统光纤激光器相比,大模场光子晶体光纤激光器有望将输出功率提高一个数量级。大模场光子晶体光纤在光纤激光器中的优异特性受到研究者的广泛关注。2000 年英国 Bath 大学的 Wadsworth 等<sup>[50]</sup>利用钛宝石激光器(970 nm)抽运 81 mm 长的掺 Yb<sup>3+</sup> 光子晶体光纤,获得了 1040 nm 的激光输出,标志着第一台光子晶体光纤激光器的问世。自此,大模场光子晶体光纤激光器成为光子晶体光纤领域最大的研究热点之一。经过十余年的发展,大模场光子晶体光纤激光器的研究已经取得重大进展。

### 5.1 单模高功率连续激光器

单模高功率连续激光器在光纤通信、激光空间远距离通信、工业制造、军事和国防安全等方面具有重要应用,近年来成为大模场光子晶体光纤最热门的研究方向之一。根据已报道文献,我们总结了近 10 年来大模场连续光纤激光器输出功率发展情况,如图 7 所示,可见激光器功率已由早期的毫瓦量级提升到目前的千瓦量级。

2001 年 Wadsworth 等<sup>[23]</sup>报道了第一台大模场面积(176  $\mu\text{m}^2$ )的掺 Yb<sup>3+</sup> 光子晶体光纤激光器,采用 915 nm 的钛宝石激光器进行双程后向抽运,获得了输出波长为 1040 nm 的 315 mW 单模激光输出。2003 年起大模场光子晶体光纤激光器研究取得突破性进展,输出功率爆炸式增长。Limpert 等<sup>[51]</sup>根据双包层和大模场面积技术制备出大功率 Yb<sup>3+</sup> 掺杂光子晶体光纤激光器,利用 2.3 m 长的双包层光子晶体光纤(模场面积为 350  $\mu\text{m}^2$ )在波长 1070 nm 处实现了 80 W 近衍射极限的激光输出,图 8(a)和(b)分别为该大模场光子晶体光纤激光器激光输出特性(斜率效率)及输出激光的强度分布。随后,他们又利用 4 m 光子晶体光纤激光器获得了 260 W 的激光输出,并预计此光纤具备千瓦级的输出潜力。2005 年德国 Jena 大学 Bonati 等<sup>[52]</sup>采用纤芯直径为 50  $\mu\text{m}$  的大模场(1589.6  $\mu\text{m}^2$ )光子晶体光纤实现了 1.53 kW 的高光束质量( $M^2 < 3$ )激光输出,预计进一步增大抽运功率,有望实现 4.6 kW 高光束质量连续激光输出,这是大模场光子晶体光纤激光器的输出功率首次提高到千瓦级,在大模场光子晶体光纤激光器的发展中具有里程碑的意义。2008 年丹麦 Crystal Fiber 公司采用棒状双包层大纤芯光子晶体光纤(纤芯直径为 100  $\mu\text{m}$ ,模场面积为 3957  $\mu\text{m}^2$ )将激光输出功率提升到 2.53 kW,获得了  $M^2 < 1.1$  的单模激光输出,激光器的斜率效率也达 80.7%。对该光纤的进一步研究表明,使用更高功率的抽运光源,此光纤激光器有望获得大于 10 kW 的激光输出<sup>[53]</sup>,但迄今为止输出功率超过 10 kW 的连续输出光子晶体光纤激光器还未见报道。

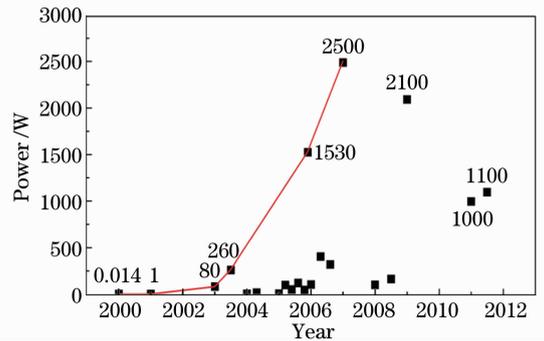


图 7 近 10 年来大模场连续光纤激光器的输出功率发展情况

Fig. 7 Power evolution of continuous-wave LMA PCF with nearly diffraction-limited beam quality in the the last decade

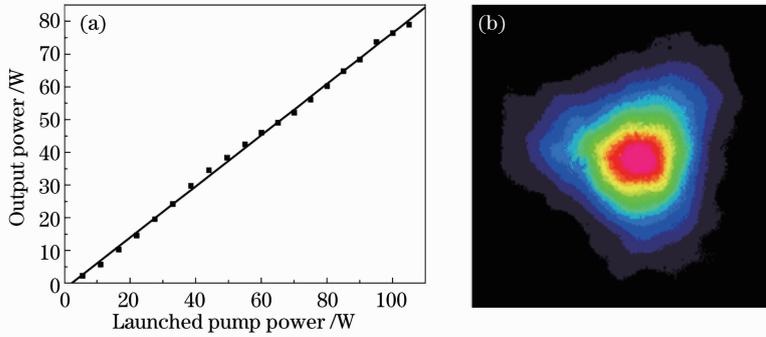


图 8 (a)大模场高功率光子晶体光纤激光器的激光特性;(b)输出激光强度分布

Fig. 8 (a) Laser characteristics of the high power LMA PCF laser; (b) intensity distribution of the emitted laser beam

## 5.2 高功率脉冲激光器

高功率脉冲激光器在激光雷达、遥感、测距和强场物理等领域具有广泛应用,因而成为大模场光子晶体光纤领域的又一研究热点。大模场面积克服了脉冲激光器超高峰值功率密度引起的非线性效应,有利于进一步提高单脉冲能量和脉冲峰值功率。2002年Lim等<sup>[54]</sup>使用色散补偿光子晶体光纤获得了脉冲能量为1 nJ的100 fs超短脉冲激光输出。2008年天津大学的宋有健等<sup>[55]</sup>报道了基于掺Yb<sup>3+</sup>双包层大模场(单模模场面积为660 μm<sup>2</sup>)偏振光子晶体光纤的高功率飞秒激光器,利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)实现了全正色散自启动锁模,获得平均功率为2.5 W(单脉冲能量为50 nJ),脉冲宽度为4.2 ps的锁模脉冲输出,经腔外色散补偿,脉宽压缩到410 fs。由于使用了偏振结构的光子晶体光纤,有效抑制了外部环境造成的随机双折射,使得激光器具有很好的环境稳定性。他们还采用光栅对压缩技术,获得了平均功率为25 W、重复频率50 MHz、峰值功率为5 MW的100 fs脉冲激光输出<sup>[35]</sup>。2011年,该课题组又获得了脉冲重复率为55 MHz、脉冲宽度从494 fs到1.24 ps的大模场可调谐超短脉冲光子晶体光纤激光器<sup>[56]</sup>。

此外,大模场光子晶体光纤还可用于高功率光纤放大器。英国的Bath大学和南安普顿大学、德国的Jena大学以及国内的清华大学、天津大学等著名研究机构纷纷开展了相关研究。2005年Shirakawa等<sup>[46]</sup>报道了基于掺Yb<sup>3+</sup>双包层大模场(模场面积为530 μm<sup>2</sup>)光子晶体光纤的高功率飞秒放大器。利用该放大器对700 fs、47 MHz的脉冲进行了脉冲压缩和功率放大,得到了100 fs(脉冲功率54 kW)的超短脉冲,如图9所示。

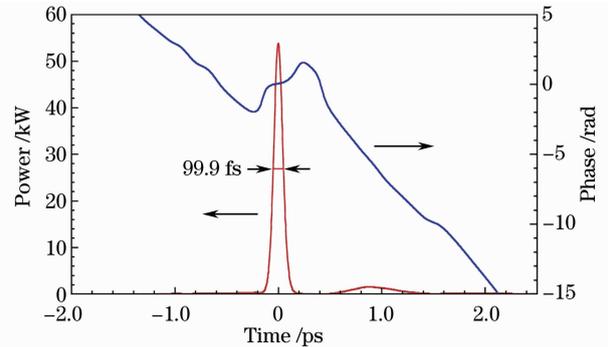


图 9 利用大模场光子晶体光纤获得超短脉冲输出

Fig. 9 Output of ultrashort pulse from LMA PCF laser

## 6 存在的问题

虽然大模场光子晶体光纤及其激光器、放大器研究已有近14年历史,其研究和应用发展迅猛,但总体而言还存在许多不足以及亟待解决的问题:1)大模场光纤的结构一般不同于常规光纤的结构,不仅芯径偏大、数值孔径偏低,而且还采用特殊的折射率分布(如复合型的折射率分布)或特殊的纤芯几何形状,这些对预制棒制备和光纤拉丝都提出了较高的要求。目前光纤的制备控制精度与大模场光纤的设计有一定差距,使光纤的性能受到限制,这也是大模场光纤实现的困难所在。当前普遍采用堆积法,此方法很难制造低损耗的光纤,因此,改进或探索新的制造工艺并设计工艺易于实现的高性能大模场光子晶体光纤仍是未来研究者重要的工作。2)目前有源大模场光子晶体光纤涉及的稀土离子仅有Nd<sup>3+</sup>、Er<sup>3+</sup>、Yb<sup>3+</sup>、Tm<sup>3+</sup>,且大部分集中于Yb<sup>3+</sup>和Er<sup>3+</sup>离子,其他稀土离子掺杂尚未涉及。3)大多数大模场光子晶体光纤研究还只停留在实验阶段,真正应用到现实大功率光纤激光器、放大器中仍存在许多理论和实际应用方面的技术难题。4)大模场光子晶体光纤与传统光纤、波导等光器件的耦合和集成兼容问题也是制约光子晶体光纤及器件在光通信、激光加

工、传感等领域商业应用的关键。

## 7 结束语

随着对信息容量、信息传输速度以及高功率需求的快速增长,大模场光子晶体光纤以其大模场面积、单模传输、低损耗和可控色散等特性在高功率光纤激光器、高功率光纤放大器、高功率高速信息传输、高功率能量传输及高灵敏度传感器等领域有着广泛的发展前景。目前大模场光子晶体光纤研究总体水平还处于实验室阶段,但是随着相关制备工艺和耦合技术的不断改进和完善以及许多关键技术的不断突破,大模场光子晶体光纤必将有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Y. Jeong, J. Sahu, D. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 2 J. Nilsson, D. N. Payne. High-power fiber lasers[J]. *Science*, 2011, **332**(6032): 921~922
- 3 A. Carter, B. N. Samson, K. Tankala *et al.*. Damage mechanisms in components for fiber lasers and amplifiers[C]. *SPIE*, 2005, **5647**: 561~571
- 4 J. Limpert, T. Schreiber, A. Liem *et al.*. Thermo-optical properties of air-clad photonic crystal fiber lasers in high power operation[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(22): 2982~2990
- 5 N. A. Mortensen. Effective area of photonic crystal fibers[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(7): 341~348
- 6 J. C. Knight, T. A. Birks, R. F. Cregan *et al.*. Large mode area photonic crystal fibre[J]. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(13): 1347~1348
- 7 J. Limpert, A. Liem, M. Reich *et al.*. Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(7): 1313~1319
- 8 N. A. Mortensen, M. D. Nielsen, J. R. Folkenberg *et al.*. Improved large-mode-area endlessly single-mode photonic crystal fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(6): 393~395
- 9 P. Russell. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358~362
- 10 Wang Wei, Hou Lantian. Present situation and future development in photonic crystal fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(2): 43~58  
王 伟, 侯蓝田. 光子晶体光纤的现状和发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(2): 43~58
- 11 J. Limpert, N. Deguil-Robin, I. Manek-Hönninger *et al.*. High-power rod-type photonic crystal fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(4): 1055~1058
- 12 J. Limpert, O. Schmidt, J. Rothhardt *et al.*. Extended single-mode photonic crystal fiber lasers[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7): 2715~2720
- 13 L. Michaille, D. M. Taylor, C. R. Bennett *et al.*. Characteristics of a Q-switched multicore photonic crystal fiber laser with a very large mode field area[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(1): 71~73
- 14 M. Hu, X. Fang, B. Liu *et al.*. Multicore photonic-crystal-fiber sources of ultrashort pulses[C]. *CLEO/Europe*, 2011. CJ9\_6
- 15 Y. Huo, Peter K. Cheo. Analysis of transverse mode competition and selection in multicore fiber lasers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(11): 2345~2349
- 16 L. Dong, X. Peng, J. Li. Leakage channel optical fibers with large effective area[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(8): 1689~1697
- 17 L. Fu, H. A. McKay, L. Dong. Extremely large mode area optical fibers formed by thermal stress[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(14): 11782~11793
- 18 M. Napierala, T. Nasilowski, E. Beres-Pawlik *et al.*. Large-mode-area photonic crystal fiber with double lattice constant structure and low bending loss[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(23): 22628~22636
- 19 H. Ademgil, S. Haxha. Bending insensitive large mode area photonic crystal fiber[J]. *Optik*, 2011, **122**(21): 1950~1956
- 20 D. J. J. Hu, F. Luan, P. P. Shum. All-glass leakage channel fibers with triangular core for achieving large mode area and low bending loss[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(7): 1811~1814
- 21 I. Abdelaziz, F. Abdel Malek, H. Ademgil *et al.*. Enhanced effective area photonic crystal fiber with novel air hole design [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(19): 2810~2817

- 22 F. Stutzki, F. Jansen, C. Jauregui *et al.*. Non-hexagonal large-pitch fibers for enhanced mode discrimination[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(13): 12081~12086
- 23 W. J. Wadsworth, J. C. Knight, P. St. J. Russell. Large mode area photonic crystal fibre laser[C]. CLEO, 2001, CWC1
- 24 T. Matsui, J. Zhou, K. Nakajima *et al.*. Dispersion-flattened photonic crystal fiber with large effective area and low confinement loss[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(12): 4178~4183
- 25 S. Haxha, H. Ademgil. Novel design of photonic crystal fibres with low confinement losses, nearly zero ultra-flattened chromatic dispersion, negative chromatic dispersion and improved effective mode area[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(2): 278~286
- 26 O. Schmidt, J. Rothhardt, T. Eidam *et al.*. Single-polarization ultra-large-mode-area Yb-doped photonic crystal fiber[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(6): 3918~3923
- 27 T. Schreiber, F. Röser, O. Schmidt *et al.*. Stress-induced single-polarization single-transverse mode photonic crystal fiber with low nonlinearity[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19): 7621~7630
- 28 M. Napierala, T. Nasilowski, E. Beres-Pawlik *et al.*. Extremely large-mode-area photonic crystal fibre with low bending loss[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(15): 15408~15418
- 29 N. Florous, K. Saitoh, M. Koshiba. The role of artificial defects for engineering large effective mode area, flat chromatic dispersion, and low leakage losses in photonic crystal fibers: towards high speed reconfigurable transmission platforms[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(2): 901~913
- 30 G. Genty, T. Ritari, H. Ludvigsen. Supercontinuum generation in large mode-area microstructured fibers[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(21): 8625~8633
- 31 W. Shin, Y. L. Lee, B.-A. Yu *et al.*. Highly sensitive strain and bending sensor based on in-line fiber Mach-Zehnder interferometer in solid core large mode area photonic crystal fiber[J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(10): 2097~2101
- 32 Zhou Jun, Lou Qinghong, Zhu Jianqiang *et al.*. A continuous-wave 714 W fiber laser with China-made large-mode-area double-clad fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1119~1120  
周 军, 楼祺洪, 朱健强 等. 采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1119~1120
- 33 Zhang Wei, Li Yigang, Yan Peiguang *et al.*. Large mode area double cladding Yb<sup>3+</sup>-doped photonic crystal fiber laser[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(4): 418~420  
张 炜, 李乙钢, 闫培光 等. 大模面积双包层掺 Yb<sup>3+</sup> 光子晶体光纤激光器[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(4): 418~420
- 34 Ruan Shuangchen, Yang Bing, Zhu Chunyan *et al.*. The research of photonic crystal fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 126~128  
阮双琛, 杨 冰, 朱春艳. 3.4 W 光子晶体光纤激光器的研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(1): 126~128
- 35 Liu Bowen, Hu Minglie, Song Youjian *et al.*. Sub-100 fs high power Yb-doped single polarization large-mode-area photonic crystal fiber laser amplifier[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(11): 6921~6925  
刘博文, 胡明列, 宋有建 等. 亚百飞秒高功率掺镱大模面积光子晶体光纤飞秒激光放大器的实验研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(11): 6921~6925
- 36 Guo Yanyan, Hou Lantian. Design of all-solid octagon photonic crystal fiber with large mode area[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(6): 4036~4041  
郭艳艳, 侯蓝田. 全固态八边形大模场光子晶体光纤的设计[J]. *物理学报*, 2010, **59**(6): 4036~4041
- 37 Geng Pengcheng, Hou Lantian, Han Weitao *et al.*. Design of large mode area Yb<sup>3+</sup>-doped seven-core photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2719~2723  
耿鹏程, 侯蓝田, 韩伟涛 等. 大模面积掺 Yb<sup>3+</sup> 七芯光子晶体光纤的设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2719~2723
- 38 Zhou Qinling, Lu Xingqiang, Zhang Guang *et al.*. Mode characteristics of a large mode area flattened-mode photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1497~1500  
周秦岭, 卢兴强, 张 光 等. 大模面积平顶模场光子晶体光纤模式分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1497~1500
- 39 Chen Wei, Li Jinyan, Li Shiyu *et al.*. Design and fabrication of large mode-field wide-frequency single-mode photonic crystal fibers[J]. *Study on Opt. Commun.*, 2006, **32**(4): 57~59  
陈 伟, 李进延, 李诗愈 等. 大模场宽频单模光子晶体光纤的设计与制备[J]. *光通信研究*, 2006, **32**(4): 57~59
- 40 Chen Wei, Li Shiyu, Wang Yanliang *et al.*. Design and fabrication of high numerical aperture and large mode-field ytterbium-doped photonic crystal fibers[J]. *Study on Opt. Commun.*, 2009, **35**(2): 45~46  
陈 伟, 李诗愈, 王彦亮 等. 国产化大模场掺镱光子晶体光纤的设计与制备[J]. *光通信研究*, 2009, **35**(2): 45~46

- 41 Feng Suya, Wang Meng, Yu Chunlei *et al.*. 260  $\mu\text{m}$  core single-mode ultra-large mode area photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0205004  
冯素雅, 王 孟, 于春雷 等. 260  $\mu\text{m}$  芯径超大模场光子晶体光纤实现准单模传输[J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0205004
- 42 X. Feng, W. H. Loh, J. C. Flanagan *et al.*. Single-mode tellurite glass holey fiber with extremely large mode area for infrared nonlinear applications[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(18): 13651~13656
- 43 A. Schülzgen, L. Li, V. L. Temyanko *et al.*. Single-frequency fiber oscillator with watt-level output power using photonic crystal phosphate glass fiber[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(16): 7087~7092
- 44 J. Troles, L. Brilland, F. Smektala *et al.*. Chalcogenide photonic crystal fibers for near and middle infrared applications [C]. Proceedings of the International Conference on Transparent Optical Networks, 2007, **2**: 297~300
- 45 Dai Shixun, Yu Xingyan, Zhang Wei *et al.*. Reseach progress of chalcogenide glass photonic crystal fibers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(9): 090602  
戴世勋, 於杏燕, 张 巍 等. 硫系玻璃光子晶体光纤研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(9): 090602
- 46 A. Shirakawa, J. Ota, M. Musha *et al.*. Large-mode-area erbium-ytterbium-doped photonic-crystal fiber amplifier for high-energy femtosecond pulses at 1.55  $\mu\text{m}$ [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(4): 1221~1227
- 47 P. M. Agruzov, K. V. Dukel'skii, I. V. Il'ichev *et al.*. Guidance properties of few-mode large-mode-area microstructured fibres[J]. *Quant. Electron.*, 2010, **40**(3): 254~258
- 48 William S. Wong, X. Peng, Joseph M. McLaughlin *et al.*. Breaking the limit of maximum effective area for robust single-mode propagation in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(21): 2855~2857
- 49 M. Y. Chen, Y. K. Zhang. Bend insensitive design of large-mode-area microstructured optical fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(15): 2216~2222
- 50 W. J. Wadsworth, J. C. Knight, W. H. Reeves *et al.*. Yb<sup>3+</sup> doped photonic crystal fibre laser[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(17): 1452~1454
- 51 J. Limpert, T. Schreiber, S. Nolte *et al.*. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(7): 818~823
- 52 G. Bonati, H. Voelckel, T. Gabler *et al.*. 1.53 kW from a single Yb-doped photonic crystal fiber laser[R]. Photonics Conf. West, San Jose, CA, 2005, Session 5709-2a
- 53 K.-P. Hansen, C. B. Olausson, J. Broeng *et al.*. Airclad fiber laser technology[C]. *SPIE*, 2008, **6873**: 687307
- 54 H. Lim, F. Ilday, F. Wise. Femtosecond ytterbium fiber laser with photonic crystal fiber for dispersion control[J]. *Opt. Express*, 2002, **10**(25): 1497~1502
- 55 Song Youjian, Hu Minglie, Zhang Chi *et al.*. High power large-mode-area photonic crystal fiber femtosecond laser[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2008, **53**(13): 1511~1515  
宋有建, 胡明列, 张 弛 等. 高脉冲能量大模场面积光子晶体光纤飞秒激光器[J]. *科学通报*, 2008, **53**(13): 1511~1515
- 56 C. Zhang, Y. Zhang, M. Hu *et al.*. Wavelength tunable, high energy femtosecond laser pulses directly generated from large-mode-area photonic crystal fiber[J]. *Opt. Commun.*, 2012, **285**(10-11): 2715~2718