

·特邀综述·

微结构和集成式功能光纤的制备和潜在应用

廉正刚^{1*}, 陈翔¹, 王鑫², 娄淑琴², 郭臻¹, 皮亚斌¹

¹武汉长盈通光电技术有限公司, 湖北 武汉 430205;

²北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044

摘要 光纤作为光信息和光能量的传输元器件已成为基础建设不可或缺的组成部分。针对功能光纤进行概括性介绍。着重介绍了微结构光纤的导光机理以及制备方案。微结构光纤由于其实现了灵活的预制棒制备方式、空芯传输以及理论上的超低衰耗, 广泛地应用于光电传感和激光器应用。未来光纤发展的趋势将是光、电功能集成于一根光纤中, 详细介绍了纳米机械光纤的制备和潜在应用, 为全光器件和光集成技术发展提供重要的研究方向。

关键词 光纤光学; 光纤设计与制造; 微结构光纤; 光子晶体光纤; 光微机电器件

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170615

Preparation and Potential Applications of Microstructured and Integrated Functional Optical Fibers

Lian Zhenggang^{1*}, Chen Xiang¹, Wang Xin², Lou Shuqin², Guo Zhen¹, Pi Yabin¹

¹Yangtze Optical Electronic Co. Ltd., Wuhan, Hubei 430205, China;

²School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China

Abstract Recently, fiber optics have become indispensable infrastructural components for the transmission of optical signals and energy. We provide an overview of functional fibers. The light guiding mechanism and preparation scheme of microstructure optical fibers (MOFs) are introduced. The usage of MOF has emerged in optoelectronic sensing and laser applications because of its flexible preform preparation, hollow core transmission ability, and ultralow theoretical attenuation. Because the development of optical fibers is progressing toward the integration of multi-functional units into single fibers, the preparation and potential applications of a nanomechanical optical fiber are introduced in detail. This new type of optical fiber represents a crucial research direction for the development of all-optical devices and optical integration technologies.

Key words fiber optics; fiber design and fabrication; microstructured fibers; photonic crystal fibers; optical microelectromechanical devices

OCIS codes 060.2310; 060.2280; 060.4005; 060.5295; 230.4685

1 引言

一根细细的玻璃纤维可以把等同于上千本书的信息几乎瞬时地传输到数百千米之外。在现代通信行业中, 它早已取代了铜线, 成为长距离信号传输的载体。光纤自 1966 年问世以来, 追求的目标是尽可能地降低损耗^[1]。20 世纪 70 年代末, 光纤的能量损耗仅有 4%~5% (0.2 dB/km), 光信号可以传输几十千米^[2]。到 20 世纪 80 年代后期,

随着科技的发展, 特别是掺铒光纤放大器 (Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA) 的面市^[3], 光信号可以在传输过程中得到增强, 完全解决了光纤损耗这一历史性难题, 实现了跨洋超长距离信息传输。拥有“光纤之父”美誉的华裔科学家高锟在 2009 年荣获诺贝尔物理学奖。自 1990 年以来, 由于网络数据通信业务的快速增长, 人们对传统通信系统的要求不断提升, 更大容量、更高速率、更长传输距离的光纤通信系统随之出现。传统的光

收稿日期: 2019-05-27; 修回日期: 2019-06-20; 录用日期: 2019-07-02

* E-mail: zg_lian@126.com

纤系统中存在着诸如色散、非线性和下一代全光网络中逻辑器件功能简单(如光开关)的问题,这就需要新的光纤技术和器件作支撑。根据应用和产业化成熟度,可将光纤分为通信光纤和功能光纤,通信光纤的发展已经非常成熟,本文不多介绍。功能光纤应用广泛并且其多项技术已经成功实现产业化,本研究将重点介绍功能光纤。

功能光纤可细分为微结构光纤、集成式光纤和新材料光纤。近 20 年关于微结构光纤的研究较多,通过灵活设计微结构光纤,可巧妙地把玻璃材料和空气孔相结合,该结构不仅可以用于无尽单模光信号传输,也可以实现空芯低损耗传输等。典型光纤包括:全内反射导光型微结构光纤^[4]、反谐振型微结构光纤^[5]、光子带隙导光型微结构光纤^[6]。集成式光纤结合光纤的大带宽、柔性、细长、成本低廉等优势,在通信、激光器等技术领域应用中可将越来越多的电子功能集成到光纤设计中,如微机械系统(MEMS)、半导体技术等。尤其近几年,英国南安普顿大学、德国马克思普朗克研究所几乎同时开发出纳米机械光纤,这一类功能光纤集微结构光纤和 MEMS 功能于一体,在光信号传输时,每个纤芯可以作纳米量级的机械振动,这种机械运动使得纤芯可以感知外界的环境,同时也可以通过对纤芯的调制实现光缓存或者光开关的应用。因此这类光纤在传感、光运算等领域展现出了强大的作用。新型材料科学是光纤技术的支柱,光纤功能的不断提升基于研究人员长期对其材料的提纯和优化。光纤除了使用常见的石英玻璃外,还可选择硫系玻璃、多组分玻璃甚至塑料材料等来构成第三类特殊材料光纤,以满足中红外波段传输、深紫外波段传输、耐高温环境应用等特殊要求。同时,涂层材料的正确选择也有助于提高光纤的强度和适应性,如聚丙烯酸树脂、聚酰亚胺、金属涂层等。不同折射率的高分子材料也广泛应用于增益双包层光纤。本文综述重点介绍了微结构光纤和纳米机械光纤的导光机理、制备、性能以及潜在应用,为全光器件和光集成技术发展提供了重要的研究方向。

2 微结构光纤

微结构光纤,又称光子晶体光纤,也称为多孔光纤。本部分重点针对微结构光纤进行介绍。微结构光纤由于其灵活的预制棒制备方式、空芯传输,以及

理论上的超低衰耗,从 20 世纪 90 年代起在光电传感应用中异军突起。

2.1 光纤机理

1987 年, Yablonovitch 等科学家发现某些动物体表有周期性规律排列的细毛,这些细毛可以把某些颜色(对应一定波长)的光完全反射,而吸收其他波长,展现出艳丽的色彩,如图 1 所示孔雀的羽毛和蝴蝶的翅膀表面,并于 2001 年将此类结构命名为光子晶体^[7]。很快,这一结构在光纤领域得到了移植应用。1996 年, Knight 等^[4]成功制备出第一根光子晶体光纤(PCF),光子晶体光纤是由一簇细小的毛细管周期性排列制备而成。由于具有优良的传输特性,光子晶体光纤迅速在全球受到重视。微结构光纤发展初期,其导光机理主要是全内反射导光和光子带隙导光。近年来,人们发现空芯微结构光纤中还存在一种不同于光子带隙的导光机理——反谐振导光机理。本节将分别介绍这三种导光机制。

1) 全内反射导光机理

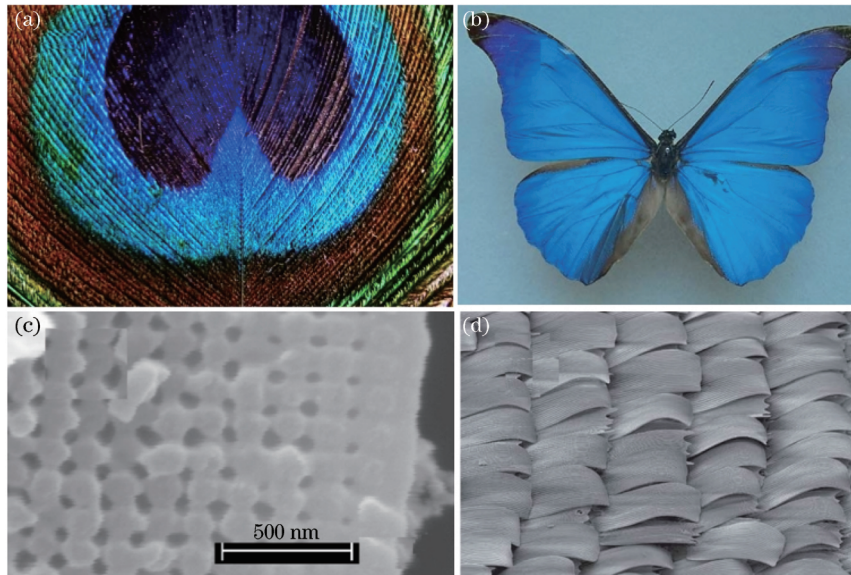
如图 2(a)所示的光子晶体光纤,其纤芯为实心芯区,其包层中虽然引入了周期性排布的空气孔,但并未形成有效的光子禁带,由于芯区的折射率大于包层的等效折射率,因此,光在纤芯中是以类似传统阶跃光纤的全内反射形式进行传导。这类基于全内反射导光机理导光的光子晶体光纤也称为折射率导光型光子晶体光纤。由于该类光纤对包层结构的周期性要求并不严格,空气孔的引入只是起到降低并调控包层等效折射率的作用,因此工艺上易于实现,早期报道的光子晶体光纤大多是基于全内反射机理导光。

2) 光子带隙导光机理

如图 2(b)所示的光子晶体光纤^[8],包层为周期性排布的空气孔,其导光机理为二维光子晶体的光子带隙,即当包层空气孔间距和直径满足一定条件时,其频率处于带隙范围内的光波被禁止向包层方向传播,只在缺陷纤芯中沿着缺陷的方向进行传播。由于光子带隙导光机理为包层光子带隙,因此对于纤芯的折射率没有太大限制,使得空芯导光成为了可能,但是带隙型导光对光纤包层结构的周期性要求非常严格,以确保形成有效的光子带隙,因此对制作工艺水平要求很高。

3) 反谐振导光机理

反谐振导光机理是近年来人们在研究空芯光纤



1 (a)孔雀的彩色羽毛;(b)通过电子显微镜看到的放大的孔雀羽毛;(c)蓝色蝴蝶;(d)通过电子显微镜看到的蝴蝶翅膀细节
 ig. 1 (a) Colorful feathers of peacock; (b) magnified peacock feathers observed by electron microscope; (c) blue butterfly; (d) details of butterfly wing observed by electron microscope

时发现的一种不同于光子带隙的导光机理。反谐振的概念来源于1986年Duguay等^[9]提出的反谐振式平面波导(ARROW)。反谐振导光机理即通过增强入射光在遇到包层薄壁时的反射,将光尽可能地束缚在纤芯中。如图2(c)所示的空芯光纤^[10],纤芯中能够约束的光主要由包层中的石英壁厚决定。当石英壁厚度满足一定谐振条件时,位于谐振频率附近的光会发生泄漏,而其他频率的光均可在纤芯中实现低损耗传输。高损耗芯模对应的谐振频率 f 表示为^[11]

$$f = \frac{mc}{2t \sqrt{n^2 - 1}}, \quad (1)$$

式中: m 为正整数, t 为石英壁厚度, c 为真空中的光速, n 为包层介质壁的折射率。

原则上,不发生谐振耦合的波长都可以导光,因此,该类光纤并不要求包层具有严格的周期性排布,从机理上克服了带隙导光型光子晶体光纤带宽过窄的缺陷。早期的反谐振式空芯光纤采用的是图2(c)所示的Kagome结构,其在结构上沿袭了光子带隙光纤的周期性包层结构设计。随着对导光机理研究的深入,人们意识到决定光纤特性的关键是纤芯壁,而非包层结构,因此在后期的研究中,人们开始倾向于单层少节点^[12]或者单层无节点的结构^[13]。

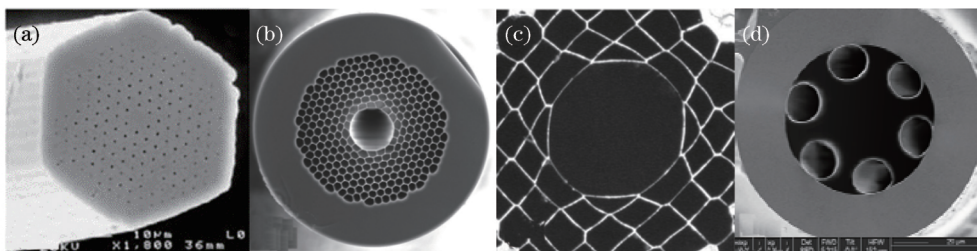


图2 不同导光机理的光子晶体光纤。(a)折射率导光型光子晶体光纤;(b)光子带隙光纤;
 (c)反谐振导光光纤;(d)单层无节点反谐振光纤

Fig. 2 Photonic crystal fibers with different light guiding mechanisms. (a) Refractive index light-guided photonic crystal fiber; (b) photonic bandgap fiber; (c) anti-resonant light-guided fiber; (d) single-layer nodeless anti-resonant fiber

2.2 光子晶体光纤的制备方式

光纤的制备工艺一般采用两步法:1)制备光纤预制棒;2)拉制光纤,在拉制过程中处理光纤涂

层。通信单模光纤预制棒制备方法是化学气相沉积法,制备一根预制棒往往需要几小时到几十小时^[14],而且会产生有害气体。光子晶体光纤不需

要使用化学沉积等大型设备即可完成预制棒的制备。绝大多数光子晶体光纤预制棒是基于毛细管排管法完成的,即将数十根或上百根毛细管按照蜂窝状排列成型^[4]。图3(a)给出一张空芯微结构光纤预制棒端面的照片,展示出光纤预制棒由超

过100根直径为1 mm左右的石英材料毛细管堆叠而成。毛细管堆积而成的预制棒整体套入外层套管。光子晶体光纤的制备工艺灵活,适合的光纤结构也多种,如实芯光纤、空芯带隙光纤和多芯光纤等。

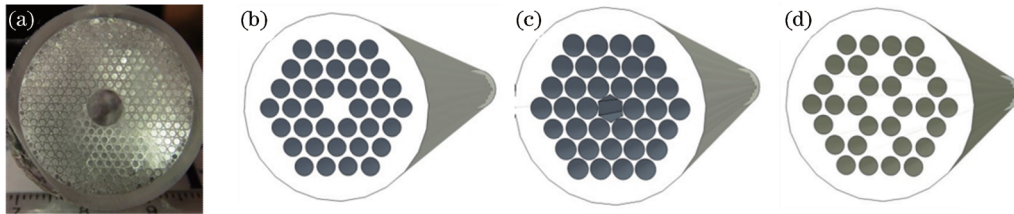


图3 毛细管堆叠技术。(a)空芯微结构光纤预制棒端面的照片;(b)实芯光纤;(c)空芯带隙光纤;(d)多芯光纤

Fig. 3 Capillary stacking technology. (a) Cross section of hollow core microstructure optical fiber preform;

(b) solid core fiber; (c) hollow core bandgap fiber; (d) multicore fiber

2.3 光子晶体光纤的主要应用

光子晶体光纤灵活多变的结构设计赋予其传统光纤无法比拟的优越特性,如无截止单模特性、大模场面积特性、高双折射特性、色散可控特性、高非线性特性等,为制约航天、国防、通信、工业、生物和医疗等领域发展的瓶颈问题提供强有力的解决方案,尤其对光纤激光器、光纤传感器、光纤通信、非线性光学以及新型光器件等技术方向的发展具有强有力的推动作用,本节重点介绍近年来光子晶体光纤的主要应用领域。

2.3.1 高功率光纤激光技术

受工业制造和军事应用的需求驱动,近年来,高功率光纤激光技术飞速发展。大模场面积光纤作为抑制非线性效应以及提高光纤的损伤阈值和功率容限最直接有效的手段,是高功率光纤激光器的必然选择。传统阶跃光纤受结构和制作工艺限制,难以解决大模场面积与单模特性的矛盾^[15]。光子晶体光纤凭借其灵活的结构设计、优异的光学特性,为大模场面积光纤中大模场面积与单模特性矛盾的解决提供了一个新的实现途径。自1998年,Knight等首次研制出纤芯直径为 $22\ \mu\text{m}$ 、模场面积为 $380\ \mu\text{m}^2$ 的大模场面积光子晶体光纤以来,多种新颖结构的大模场面积光子晶体光纤不断涌现,最具代表性的有棒状光子晶体光纤^[16-18]、泄漏通道型光子晶体光纤^[19-21]、多沟槽型光子晶体光纤^[22-24]等。虽然棒状光子晶体光纤和多沟槽型光子晶体光纤在单模条件下的模场面积已突破 $10000\ \mu\text{m}^2$,但大尺寸的外径使其在应用中仅能保持平直状态,无法弯曲,限制了其在小型化激光器中的应用发展。因此,大模场面

积光子晶体光纤的抗弯曲特性成为了近年来的重点研究方向。非对称包层结构^[25-26]、微芯结构^[27-28]、矩形晶格结构^[29]、三角芯结构^[30]等多种设计被用来降低弯曲损耗和弯曲方向敏感度以及提升单模特性。

除作为增益光纤外,光子晶体光纤还为高功率激光传输提供了解决方案。空芯光子晶体光纤可以将传输光的绝大部分能量集中在空芯中传输,从而摆脱了材料损伤阈值的限制;由于空芯中空气均匀、各向同性、色散平坦且非线性系数小,可以极大地降低传输损耗,消除材料色散及非线性效应的不利影响,这对于超短脉冲激光传输非常重要。早在2004年,英国Heriot Watt大学Shepherd等^[31]就开始尝试将空芯光子带隙光纤用于传输高功率激光脉冲,该课题组采用如图4(a)所示模场直径仅为 $6.5\ \mu\text{m}$ 的空芯光子带隙光纤,进行波长为 $1064\ \text{nm}$ 、脉冲能量为 $380\ \mu\text{J}$ 的激光传输。受系统元件与耦合效率的限制,实验所能实现的最大峰值功率可以达到 $6\ \text{kW}$,但光纤在传输 $6\ \text{kW}$ 的高功率激光脉冲情况下,光纤端面未见损伤,脉冲传输前和脉冲传输后端面对比如图4(b)和图4(c)所示。相比于传统阶跃光纤,激光脉冲能量为 $5\ \mu\text{J}$ 、峰值功率为 $600\ \text{W}$ 时会对空芯光子带隙光纤造成损伤^[32],空芯光子带隙光纤的光损伤阈值及功率容限均大大提高。2014年,Jones等^[33]在空芯光子带隙光纤中实现了 $160\ \text{W}$ 的连续激光传输。2016年,Michieletto等^[34]在反谐振式空芯光纤实现了峰值功率为 $318\ \text{kW}$ 的激光脉冲传输。上述成果体现了空芯光子晶体光纤在高功率激光传输领域明显的优势和巨大的发展前景。

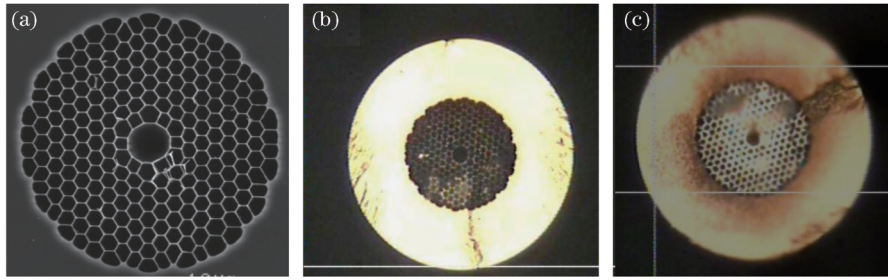


图4 (a)空芯光子带隙光纤截面图;(b)脉冲传输前光纤截面图;(c)脉冲传输后光纤截面图

Fig. 4 (a) Cross section of hollow core photonic bandgap fiber; (b) cross section of fiber before pulse transmission; (c) cross section of fiber after pulse transmission

2.3.2 高灵敏度光纤传感

在光纤传感方面,通过灵活的结构设计,实现光子晶体光纤不同的光学特性,例如悬浮芯光子晶体光纤、多芯光子晶体光纤、侧漏光子晶体光纤等,结合写入光栅、空气孔介质填充、拉锥、熔接等方式,可以对外界温度、应力、弯曲、扭转、折射率等参量实现高灵敏度、高稳定性的测量,为研制新型光纤传感器提供了广阔的发展空间。

图5 中所示为 Wang 等^[35] 利用所研制的侧漏光子晶体光纤构建的 Sagnac 干涉仪传感器。侧向泄漏通道的引入,一方面可增大高阶模式的泄漏损耗,有助于光纤单模传输特性的实现;另一方面可改善光纤的双折射特性,同时增大光纤对外界参量的敏感性。基于该侧漏光纤的传感器,对光纤扭转、弯曲曲率、温度以及应力等参量均具有高灵敏度、线性响应,并且可以实现温度-应力-扭转角度多参量的同时测量。

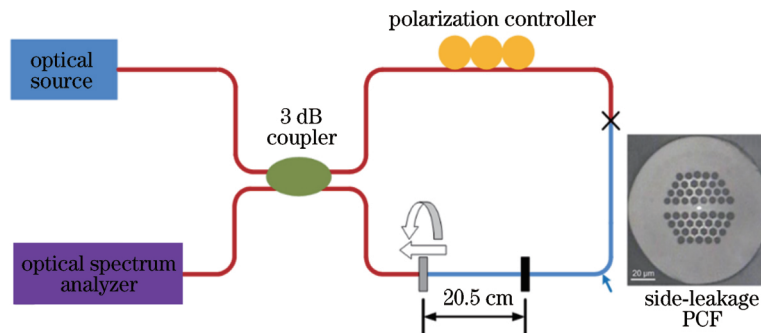


图5 基于侧漏光子晶体光纤的 Sagnac 干涉仪传感器

Fig. 5 Sagnac interferometer sensor based on side-leakage photonic crystal fiber

近年来,随制备工艺水平的提升,空芯光子带隙光纤发展进程加快,进一步拓展了光子带隙光纤在光纤传感领域的应用范围。空芯光子带隙光纤独特的空芯结构可以作为光学吸收腔,利用光谱吸收原理进行气体传感,其优点是灵敏度高、气体选择性强、响应速度快以及可进行无损监测等。2009 年英国南安普顿大学光电研究中心 Austin 等^[36] 将空芯光子带隙光纤首次应用于相干光谱的气体传感研究,传感单元容积小于 $5 \mu\text{L}$,大大降低了填充爆炸性或有损性危险。2014 年,南安普顿大学光电研究中心 Petrovich 等^[37] 利用所制备的空芯光子带隙光纤进行光谱吸收研究,首次实现了乙炔和乙烷中红外波段的高灵敏度检测,极限灵敏度可达 $0.9 \times 10^{-6} \text{ V}$ 。随着光纤传感器应用范围的不断推广,基

于光子晶体光纤的生物传感器已经成为生命医学、生物工程、环境监测等领域的热点方向。例如, Passaro 等^[38] 利用水溶液将 DNA 分子注入到空芯布拉格光纤空气孔中,在杂交过程中 DNA 分子堆积在空气孔壁上,导致孔大小结构参数发生变化,从而改变了光纤的导光特性,引起波长的漂移,最终根据漂移确定分子杂交是否完成。研究表明,该生物传感器具有良好的敏感性,在杂交完成前后共引起了 100 nm 的波长漂移和 3 dB 的传输损耗增加。

2.3.3 超连续谱产生

超连续谱产生作为非线性光纤光学领域的研究热点,近年来受到了广泛关注。光子晶体光纤的有效模场面积比常规高非线性光纤至少减小一个数量级,因此可获得很大的非线性系数,同时结合光子晶体光

纤可控的色散特性,合理地设计零色散点和色散曲线,对光纤的非线性特性应用更为有利。例如 Wang 等^[39]提出的高非线性光子晶体光纤,在 1400~1625 nm 波长范围内的非线性系数大于 $33 \text{ W}^{-1}/\text{km}$,同时色散值介于 $-1.38 \sim 0.986 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}^{-1})$,在保持较大的非线性系数的同时具有超平坦的近零色散,对于研制高性能的超连续谱光源具有重要意义。

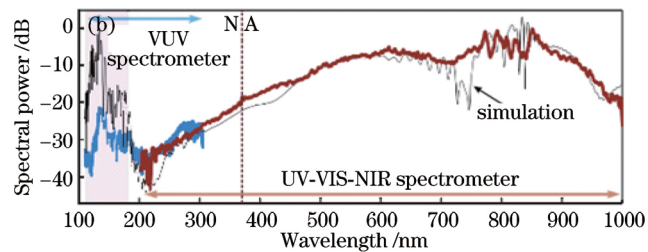
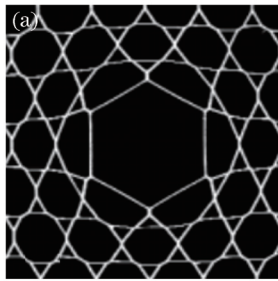


图 6 空芯微结构光纤用于超连续谱产生。(a)空芯微结构光纤截面;(b)超连续光谱

Fig. 6 Hollow core microstructure fiber used for supercontinuum generation. (a) Cross section of hollow core microstructure fiber; (b) supercontinuum spectrum

2.3.4 大容量低延迟数据通信

光子晶体光纤突破了传统光纤的全内反射导光机理,使得空芯导光成为可能。空芯光纤不但可以实现近真空光速的传输速率,而且具有空芯中空气均匀、各向同性、色散平坦且非线性系数小等优势,可以消除材料色散及非线性效应的不利影响,减小信道之间的串扰。相比于实芯光纤,无论是光纤的传输速度还是信号的传输质量都有很大的提高,是理想的高速、低延迟传输介质。随着制备工艺的成熟,空芯光子带隙光纤的传输损耗已降至 $1 \text{ dB}/\text{km}$,其在数据通信领域的应用研究也逐渐开展。2013 年, Poletti 等^[41]在 *Nature Photonics* 上报道了采用

此外,空芯光子带隙光纤中空气孔的存在,为后续修饰应用的研究提供了平台。通过在空气孔中充入气体、液体或镀膜,可有效延长光与物质的相互作用距离,增强非线性作用效果,降低非线性效应阈值。例如,2015 年, Ermolov 等^[40]在图 6 所示的空芯 Kagome 光纤纤芯中填充氦气,获得了 $113 \sim 1000 \text{ nm}$ 的真空超紫外连续谱产生。

260 m 长的空芯光子带隙光纤(图 7(a))实现了 $1.48 \text{ Tbit}/\text{s}$ 、近光速的数据传输,该传输速率为传统实芯光纤中的 1.46 倍,并且传输延迟比传统实芯光纤低 $1.54 \mu\text{s}/\text{km}$ 。同年, Jung 等^[42]利用 310 m 长的空芯光子带隙光纤(图 7(b))首次实现了 $73.7 \text{ Tbit}/\text{s}$ 的数据传输。2015 年,在光通信领域著名的美国光纤通讯博览会及研讨会(OFC)上, Chen 等^[43]报道了利用 11 km 长的空芯光子带隙光纤(图 7(c))成功进行零误码数据传输的实验。因此,空芯光纤可以实现长/短距离、宽带、低延迟、近光速的数据通信,为解决困扰超大规模计算集群、数据中心内部及数据中心之间的海量数据传送问题提供了一条可行途径。

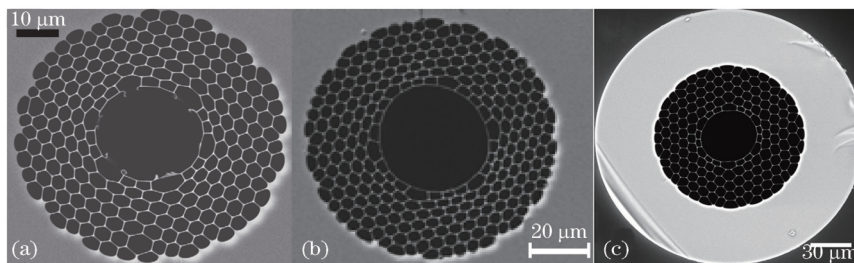


图 7 空芯光子带隙光纤。(a) $1.48 \text{ Tbit}/\text{s}$ 数据传输的空芯光子带隙光纤;(b) $73.7 \text{ Tbit}/\text{s}$ 数据传输的空芯光子带隙光纤;(c) 11 km 长的空芯光子带隙光纤

Fig. 7 Hollow core photonic bandgap fiber. (a) Hollow core photonic bandgap fiber with data transmission rate of $1.48 \text{ Tbit}/\text{s}$; (b) hollow core photonic bandgap fiber with data transmission rate of $73.7 \text{ Tbit}/\text{s}$; (c) hollow core photonic bandgap fiber with length of 11 km

除上述主要应用外,光子晶体光纤还在光开关、光放大、波分复用、波长转换以及光纤陀螺^[44]、涡旋

光束产生^[45]、新型光电器件^[46]等领域有着广泛应用。

3 纳米机械光纤

3.1 纳米机械光纤的结构

随着制备工艺的优化,单模芯/包结构的石英光纤的光纤损耗持续降低;无论长距离传输还是数据中心的大带宽应用都已经非常成熟。多家研究机构提出多芯光纤^[47]和少模光纤^[48]的应用,以继续增大光纤的带宽。然而,光通信发展的另一个瓶颈是光电转换,即通过光来计算,例如利用光开关、光延迟、光缓存等技术实现全光网络,从而提升信息处理速率。与此同时,有研发人员提出基于光纤的光开关和光缓存,可以实现全光纤网络。

英国南安普顿大学和德国马克思普朗克研究所几乎同时提出一种全新的双悬浮芯光纤^[49-50]。纳米机械光纤每个纤芯的尺寸为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$,两个纤芯悬挂在光纤正中。两个纤芯的间距小于传输波长,光在纤芯传输过程中出现的隐失波会在两个纤芯间耦合。玻璃片的厚度约为 $200\ \text{nm}$,使得纤芯实现纳米量级的振动,因此实现了纤芯的MEMS或纳机械系统(NEMS)功能,如图8所示。英国南安普顿大学研制的光纤(图9(a)-(d))与德国马克思普朗克研究所研制的光纤(图9(e)-(g))的不同之处在于:英国南安普顿大学提出的光纤有明显的纤芯,便于耦合,也降低了传输损耗。

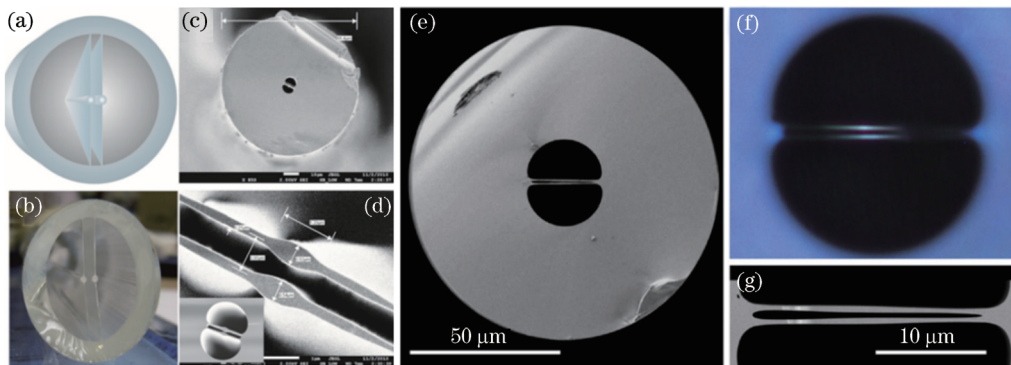


图8 双芯纳米机械光纤。(a)~(d)南安普顿大学的双芯光纤;(e)~(g)德国马克思普朗克研究所的双平行玻璃片光纤
Fig. 8 Dual-core nanomechanical optical fiber. (a)-(d) Dual-core nanomechanical optical fiber from the University of Southampton; (e)-(g) dual-parallel-glass fiber from the Max Planck Institute in Germany

3.2 纳米机械光纤的制备工艺

纳米机械光纤结构较为特殊,图9给出纳米机械光纤预制棒制备方案,如毛细管排列法、热挤压(Extrusion)工艺和平板排列法等。2.1节已经介绍,毛细管排列在石英玻璃光子晶体光纤制备中是非常成熟的技术。这一技术也同样适用于双芯纳米机械光纤。热挤压工艺是软玻璃光纤制备的主流方案之一,如硫系玻璃光纤^[51]、多组分玻璃光纤^[52-53]等。热挤压工艺是通过加热玻璃原材料,在压力条件下软化的玻璃流过预先准备的磨具后固化成型。磨具的设计确定了预制棒的结构。为了使得纤芯尺寸与传输波长匹配,预制棒一般拉伸成中间体,再应用套管(Rod-in-tube)方案拉制光纤。平板排列预制棒方案是由薄玻璃片支撑着纤芯,玻璃片卡在外套管上,通过热处理固定结构,再拉伸为中间体。这一方案简单易行,使得光纤纤芯有更广泛的选择^[54],如纤芯可以采用增益材质,也可采用被动材质,也可以实现更多纤芯平行排列的结构等。

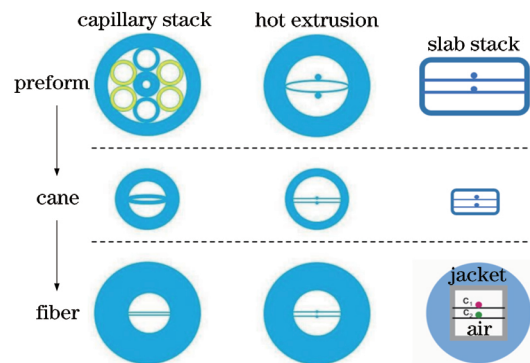


图9 纳米机械光纤预制棒制备方案
Fig. 9 Preparation scheme of nanomechanical optical fiber preform

3.3 纳米机械光纤的性能以及潜在应用

通信中使用的多芯单模光纤已经非常成熟,但是其功能仅仅是增加信道数量;然而双芯纳米机械光纤的设计让原本固定的光纤结构拥有了纤芯可以在纳米量级运动的特性,即纤芯的相对间距可以发生变化。这一功能增加了光纤在通信、传感甚至显示器方面应用的可能性。

3.3.1 通信应用中光纤延迟线

类似硅半导体 MEMS 技术,双芯纳米机械光纤可以通过应用静电场力驱动,对纤芯间距进行精准调制。在通信领域的应用中,基于光纤的光缓存非常重要。双芯光纤的纤芯设计小于传输光波长(通信中一般是 1550 nm 波长),因此光场主要集中在纤芯之间的空气中,光信号的传播速度接近于光在空气中的传播速度;如果把两个纤芯的间距拉近,双芯的相对折射率增大,传输信号能够更好地在玻璃

材料中传输,传输速度降低,这时双芯光纤就更像一个传统通信光纤。

Horak 等^[55]模拟了这一技术,图 10 展示的两个灰色区域代表两个纤芯,随着纤芯间距的调整,当纤芯距离相对较大时,光场在空气中传输;缩小纤芯的间距,光场也发生变化;当两个纤芯相触,光在玻璃中传输,这时的相对折射率最高,光速也是最低的,实现了光速调制。这一结果对光纤的制备工艺要求比较高。

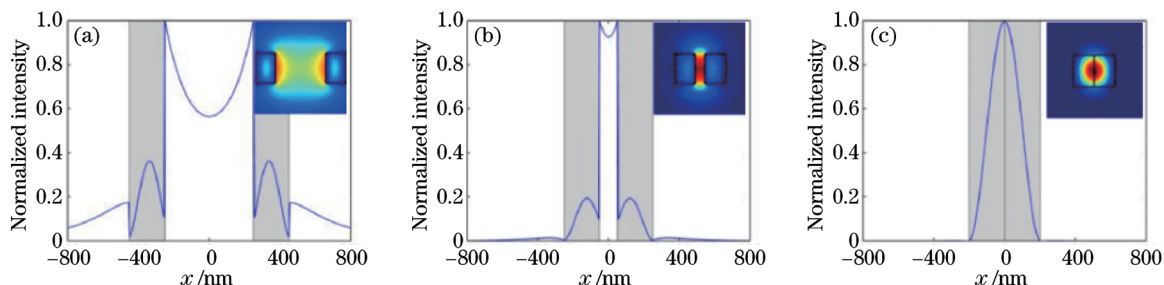


图 10 可调光缓存设计。(a)纤芯距离较大;(b)纤芯距离较小;(c)两个纤芯相触

Fig. 10 Tunable optical cache design. (a) Dual-core with large distance; (b) dual-core with small distance; (c) dual-core in contact

3.3.2 通信应用中的可控光开关

纳米机械光纤中两个纤芯的相对间距小于传输波长,因此相当于一个基于光纤内部的耦合器,光信号从一个纤芯耦合到另一个纤芯。耦合拍长由纤芯的材料折射率、纤芯结构和间距等决定。根据这一功能,调整双芯光纤的纤芯设计,纳米机械光纤可以应用在光开关器件中^[56]。图 11 中双芯的设计尺寸是 $0.6 \mu\text{m} \times 1.2 \mu\text{m}$,按照这个纤芯尺寸,纤芯间距

大于 $1.5 \mu\text{m}$ 时,耦合效果会比较弱,因此间距需要小于 $1 \mu\text{m}$,但是这将给光纤拉制工艺提出更高的要求。纤芯运动的驱动方式有很多,以静电力驱动为例,光从一个纤芯完全耦合到另一个纤芯, TM_{00} 模式需要 $\pm 35 \text{ V}$ 的驱动电压; TE_{00} 模式需要 $\pm 55 \text{ V}$ 的驱动电压,分别对应 0.5 nm 和 1.2 nm 纤芯间距变化。模拟结果显示的 100% 光耦合是基于两个纤芯完美一致。这一设计中光纤长度约为 10 cm 。

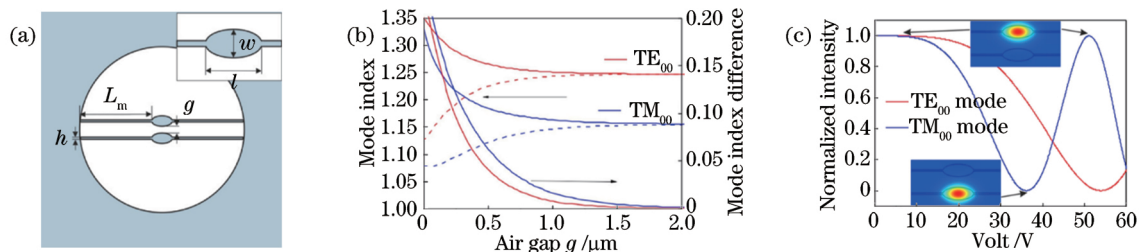


图 11 基于纳米机械光纤的光开关设计。(a)光纤的示意图;(b)纤芯模式耦合;(c)以静电力驱动纤芯运动

Fig. 11 Optical switch design based on nanomechanical fiber. (a) Diagram of optical fiber, (b) mode coupling in dual-core; (c) core movement driven by electrostatic force

3.3.3 传感应用中的气压传感器

Lian 等^[50]通过对纳米机械光纤侧面开槽的方案,实现了气压传感,并计算出气压改变双芯相对间距的精准尺寸,即 1 mBar 可改变 0.08 nm 的距离,其中 $1 \text{ mBar} = 0.1 \text{ kPa}$ 。图 12(a)中展示出纳米机械光纤经过侧面开槽前、后的端面照片。在光纤拉制时,双芯光纤的槽侧面还有 $2 \mu\text{m}$ 左右的

玻璃壁,通过氢氟酸腐蚀的方法,把这层玻璃壁移除,光纤的一个纤芯暴露在外部环境中。把腐蚀的光纤部分(约 2 cm)放入压力腔内。光纤一端把 1550 nm 波长光斑耦合在其中一个纤芯中;另外一端利用红外相机拍摄光强变化。在图 12(b)中,顶部一组照片是通过红外相机拍摄双芯的光强随压强变化的效果。可以看出,光强呈周期性变化,采

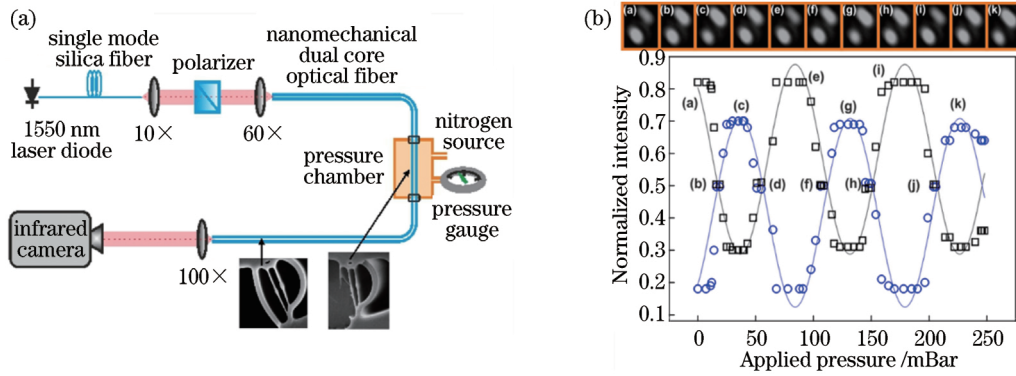


图 12 纳米机械光纤的气压传感实验。(a)实验装置结构图;(b)光强变化随着压强变化

Fig. 12 Barometric sensing experiments of nanomechanical fibers. (a) Diagram of experimental device; (b) variation in light intensity with pressure

样处理后光强变化随压强变化的周期为 100 mBar。

3.3.4 传感应用中的电压传感器

光纤的柔性制备技术在纳米机械光纤这一新概念光纤上展示得淋漓尽致。纳米机械光纤通过毛细管排列方法制备时,可在周围毛细管中插入金属丝,通过玻璃-金属多材料共拉制技术,将金属丝嵌入光纤结构,完成电压传感。Lian 等^[57]通过在预制棒中对双芯纳米机械光纤的中间体和预埋金属材料进行共拉制,将金属丝对称分布的纳米机械光纤,该实验单次可以拉制超过百米的光纤。图13(a)中展示了

预制棒端面,双芯纳米机械光纤的中间体位于预制棒正中,周围预埋金属材料。图 13(b)中利用多材料共拉制工艺,使双芯光纤周围对称分布金属丝,该图是通过 X 光透射拍摄的^[58],其金属丝的颜色是后期图像处理时修改的。图 13(c)中把对称结构的金属丝与电极相连,金属丝的上下连接正极,左右连接负极,一端将 1550 nm 波长的光斑耦合到纤芯中,另一端通过红外相机拍摄出射光斑。图 13(d)给出采样后光强随着电功率周期变化的曲线图,由图可以看出约 1 W 的电功率可以使光强完成一次完整的周期变化。

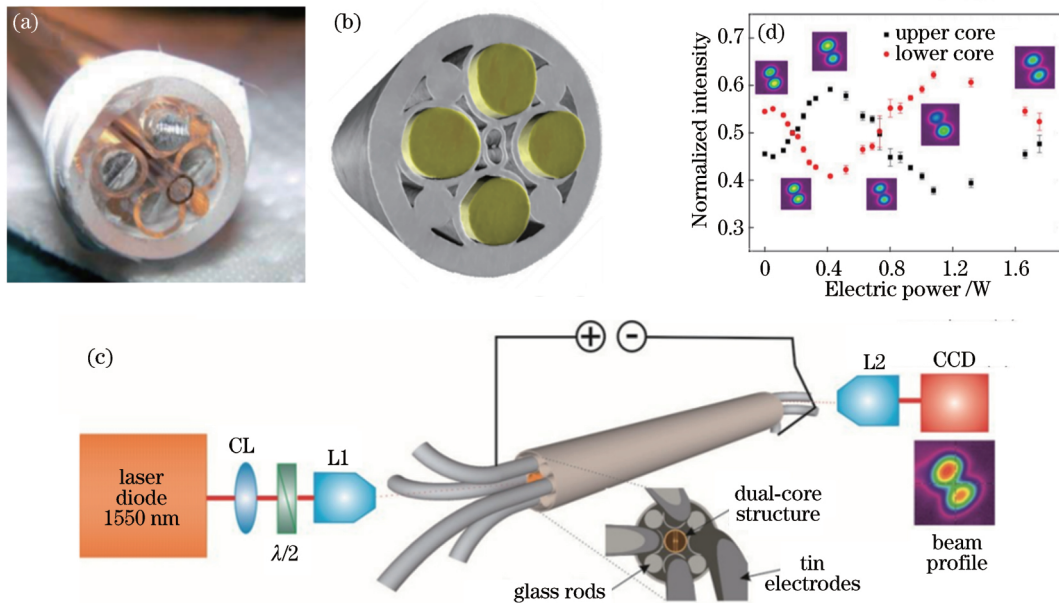


图 13 基于纳米机械光纤的电压传感。(a)预制棒端面;(b)金属纳米机械光纤;(c)电压传感实验结构图;(d)光强变化随着电功率的变化

Fig. 13 Voltage sensing based on nanomechanical fiber. (a) Cross section of preform; (b) metal nanomechanical fiber; (c) diagram of voltage sensing experiment; (d) variation in light intensity with electrical power

4 结束语

光纤发展了超过 50 年,在通信领域的成功运用为生活带来无尽的便利。成熟的光纤技术逐渐从研究所转向产业,全球与光纤相关的上市公司已经不计其数。光纤的低成本、柔韧易弯曲、化学性能稳定、小巧轻便等优势依然吸引着更广泛的行业,如光电传感、激光器、医疗等行业。因此未来非通信标准的功能光纤是光电子研究的重点方向。综述重点介绍了微结构光纤和纳米机械光纤,两类型功能光纤都已经为传感器和激光器提供潜在解决方案。伴随着材料科学的进展和光纤开发能力的提升,更多功能逐渐集成于单根光纤中,可进一步提升光纤的应用范围。当然,每一款新型功能光纤的开发,都伴随有光纤后处理技术的同步提升,比如微结构光纤的耦合技术依然不成熟,大量科研还在持续跟进。

有应用牵引,就会有新的研发技术跟进。科研人员将从应用出发研制更多功能性光纤,如:在新涂层方面,面向恶劣环境开发耐高温光纤涂层材料、针对介入式治疗研制无人体排异涂层光纤;在新导光材料方面:研制多组分红外玻璃材料光纤、深紫外玻璃光纤、蓝宝石光纤、高分子材料抗弯光纤等。

参 考 文 献

- [1] Kao K C, Hockham G A. Dielectric fibre surface waveguide for optical frequencies[M] // Brown J. Electromagnetic wave theory. Netherlands: Elsevier, 1967: 441-444.
- [2] Miya T, Terunuma Y, Hosaka T, *et al.* Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55 μm [J]. Electronics Letters, 1979, 15(4): 106-108.
- [3] Mears R J, Reekie L, Jauncey I M, *et al.* Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μm [J]. Electronics Letters, 1987, 23 (19): 1026-1028.
- [4] Knight J C, Birks T A, Russell P S J, *et al.* All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. Optics Letters, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [5] Kolyadin A N, Kosolapov A F, Pryamikov A D, *et al.* Light transmission in negative curvature hollow core fiber in extremely high material loss region[J]. Optics Express, 2013, 21(8): 9514-9519.
- [6] Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N, *et al.* Photonic crystals: molding the flow of light[M]. 2nd ed. New York: Princeton University Press, 2011.
- [7] Yablonovitch E. Photonic crystals: semiconductors of light[J]. Scientific American, 2001, 285(6): 46-55.
- [8] Mangan B J, Farr L, Langford A, *et al.* Low loss (1.7 dB/km) hollow core photonic bandgap fiber[C] // Optical Fiber Communication Conference 2004, February 23-27, 2004, Los Angeles, California, United States. Washington, DC: Optical Society of America, 2004: PD24.
- [9] Duguay M A, Kokubun Y, Koch T L, *et al.* Antiresonant reflecting optical waveguides in SiO_2 -Si multilayer structures[J]. Applied Physics Letters, 1986, 49(1): 13-15.
- [10] Argyros A, Leon-Saval S G, Pla J, *et al.* Antiresonant reflection and inhibited coupling in hollow-core square lattice optical fibres[J]. Optics Express, 2008, 16(8): 5642-5648.
- [11] Litchinitser N M, Abeeluck A K, Headley C, *et al.* Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides[J]. Optics Letters, 2002, 27(18): 1592-1594.
- [12] Yu F, Wadsworth W J, Knight J C. Low loss silica hollow core fibers for 3 - 4 μm spectral region[J]. Optics Express, 2012, 20(10): 11153-11158.
- [13] Gao S F, Wang Y Y, Liu X L, *et al.* Low bending loss nodeless hollow-core anti-resonant fiber [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, June 5-10, 2016, San Jose, California, United States. Washington, DC: Optical Society of America, 2016: SW11.4.
- [14] Macchesney J B, O'connor P B. Optical fiber fabrication and resulting product: US4909816 [P/OL]. 1990-03-20 [2019-07-15]. <https://xs.zbwelding.com/patent/US4909816A/en>.
- [15] Li M J, Chen X, Liu A P, *et al.* Limit of effective area for single-mode operation in step-index large mode area laser fibers [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(15): 3010-3016.
- [16] Limpert J, Liem A, Reich M, *et al.* Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier[J]. Optics Express, 2004, 12(7): 1313-1319.
- [17] Eidam T, Rothhardt J, Stutzki F, *et al.* Fiber chirped-pulse amplification system emitting 3.8 GW peak power[J]. Optics Express, 2011, 19(1): 255-260.
- [18] Stutzki F, Jansen F, Liem A, *et al.* 26 mJ, 130 W Q-switched fiber-laser system with near-diffraction-

- limited beam quality[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(6): 1073-1075.
- [19] Dong L, Peng X, Li J. Leakage channel optical fibers with large effective area[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(8): 1689-1697.
- [20] Dong L, McKay H A, Fu L B, *et al.* Ytterbium-doped all glass leakage channel fibers with highly fluorine-doped silica pump cladding [J]. *Optics Express*, 2009, 17(11): 8962-8969.
- [21] Dasgupta S, Hayes J R, Richardson D J. Leakage channel fibers with microstructured cladding elements: a unique LMA platform[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 8574-8584.
- [22] Jain D, Baskiotis C, Sahu J K. Mode area scaling with multi-trench rod-type fibers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1448-1455.
- [23] Jain D, Jung Y M, Kim J, *et al.* Robust single-mode all-solid multi-trench fiber with large effective mode area [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(17): 5200-5203.
- [24] Jain D, Baskiotis C, May-Smith T C, *et al.* Large mode area multi-trench fiber with delocalization of higher order modes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 242-250.
- [25] Napierala M, Beres-Pawlik E, Nasilowski T, *et al.* Photonic crystal fiber with large mode area and characteristic bending properties[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(16): 1409-1411.
- [26] Wang X, Lou S Q, Lu W L. Novel bend-resistant large-mode-area photonic crystal fiber with a triangular-core[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(18): 184215.
王鑫, 娄淑琴, 鹿文亮. 新型三角芯抗弯曲大模场面积光子晶体光纤[J]. *物理学报*, 2013, 62(18): 184215.
- [27] Chen M Y, Zhang Y K. Bend insensitive design of large-mode-area microstructured optical fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(15): 2216-2222.
- [28] Chen M Y, Li Y R, Zhou J, *et al.* Design of asymmetric large-mode area optical fiber with low-bending loss[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(3): 476-481.
- [29] Wang X, Lou S Q, Lu W L. Rectangle lattice large mode area photonic crystal fiber for 2 m compact high-power fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 0903606.
- [30] Wang X, Lou S Q, Lu W L. Bending orientation insensitive large mode area photonic crystal fiber with triangular core[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(4): 7100408.
- [31] Shephard J D, Jones J D C, Hand D P, *et al.* High energy nanosecond laser pulses delivered single-mode through hollow-core PBG fibers[J]. *Optics Express*, 2004, 12(4): 717-723.
- [32] Ramachandran S, Yan M F, Jasapara J, *et al.* High-energy (nanojoule) femtosecond pulse delivery with record dispersion higher-order mode fiber[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(23): 3225-3227.
- [33] Jones D C, Bennett C R, Smith M A, *et al.* High-power beam transport through a hollow-core photonic bandgap fiber [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3122-3125.
- [34] Michieletto M, Lyngsø J K, Jakobsen C, *et al.* Hollow-core fibers for high power pulse delivery[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7103-7119.
- [35] Wang X, Lou S Q, Sheng X Z, *et al.* Simultaneous measurement of torsion, strain and temperature using a side-leakage photonic crystal fiber loop mirror[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76: 603-607.
- [36] Austin E, van Brakel A, Petrovich M N, *et al.* Fibre optical sensor for C₂H₂ gas using gas-filled photonic bandgap fibre reference cell [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2009, 139(1): 30-34.
- [37] Petrovich M N, Wheeler N V, Heidt A M, *et al.* High sensitivity gas detection using hollow core photonic bandgap fibres designed for mid-IR operation [C]//*SENSORS, 2014 IEEE*, November 2-5, 2014, Valencia, Spain. New York: IEEE, 2014: 14833726.
- [38] Passaro D, Foroni M, Poli F, *et al.* All-silica hollow-core microstructured Bragg fibers for biosensor application [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(7): 1280-1286.
- [39] Wang Y M, Zhang X, Ren X M, *et al.* Design and analysis of a dispersion flattened and highly nonlinear photonic crystal fiber with ultralow confinement loss [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(3): 292-297.
- [40] Ermolov A, Mak K F, Frosz M H, *et al.* Supercontinuum generation in the vacuum ultraviolet through dispersive-wave and soliton-plasma interaction in a noble-gas-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Physical Review A*, 2015, 92(3): 033821.
- [41] Poletti F, Wheeler N V, Petrovich M N, *et al.*

- Towards high-capacity fibre-optic communications at the speed of light in vacuum[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(4): 279-284.
- [42] Jung Y M, Sleiffer V, Baddela N, *et al.* First demonstration of a broadband 37-cell hollow core photonic bandgap fiber and its application to high capacity mode division multiplexing [C] // Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013, March 17-21, 2013, Anaheim, CA, United States. Washington, DC: Optical Society of America, 2013; PDP5A.3.
- [43] Chen Y, Liu Z, Sandoghchi S R, *et al.* Demonstration of an 11km hollow core photonic bandgap fiber for broadband low-latency data transmission [C] // Optical Fiber Communication Conference Post Deadline Papers, March 22-26, 2015, Los Angeles, California, United States. Washington, DC: Optical Society of America, 2015; Th5A.1.
- [44] Li X Y, Xu Z L, Yang H R, *et al.* Analysis of thermal properties in a polarization-maintaining air-core photonic bandgap fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0405003.
李绪友, 许振龙, 杨汉瑞, 等. 保偏空芯带隙光子晶体光纤温度特性研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0405003.
- [45] Qiao W, Gao S C, Lei T, *et al.* Transmission of orbital angular momentum modes in grapefruit-type microstructure fiber[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0406002.
乔文, 高社成, 雷霆, 等. 轨道角动量模式在柚子型微结构光纤中的传输[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0406002.
- [46] Fan Z K, Zhang Z C, Wang B Z, *et al.* Research progress of photonic crystal fiber refractive index sensors based on surface plasmon resonance effect [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(7): 070004.
范振凯, 张子超, 王保柱, 等. 基于表面等离子体共振效应的光子晶体光纤折射率传感器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(7): 070004.
- [47] Hayashi T, Taru T, Shimakawa O, *et al.* Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber[J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 16576-16592.
- [48] Winzer P J. Making spatial multiplexing a reality[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(5): 345-348.
- [49] Butsch A, Kang M S, Euser T G, *et al.* Optomechanical nonlinearity in dual-nanoweb structure suspended inside capillary fiber [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(18): 183904.
- [50] Lian Z G, Horak P, Feng X, *et al.* Nanomechanical optical fiber[J]. *Optics Express*, 2012, 20(28): 29386-29394.
- [51] Lian Z G, Li Q Q, Furniss D, *et al.* Solid microstructured chalcogenide glass optical fibers for the near- and mid-infrared spectral regions[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(24): 1804-1806.
- [52] Price J H V, Monro T M, Ebendorff-Heidepriem H, *et al.* Mid-IR supercontinuum generation from nonsilica microstructured optical fibers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 738-749.
- [53] Park J Y. Method for fabricating optical fiber preform using extrusion die: US7077900 [P/OL]. 2006-07-18[2019-07-15]. <https://xs.zb-welding.com/patent/US7077900B2/en>.
- [54] Shi J D, Feng X, Lian Z G, *et al.* Fabrication of multiple parallel suspended-core optical fibers by sheet-stacking[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(4): 395-402.
- [55] Horak P, Stewart W, Loh W H. Continuously tunable optical buffer with a dual silicon waveguide design[J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12456-12461.
- [56] Podoliak N, Lian Z G, Loh W H, *et al.* Design of dual-core optical fibers with NEMS functionality[J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 1065-1076.
- [57] Lian Z G, Segura M, Podoliak N, *et al.* Nanomechanical optical fiber with embedded electrodes actuated by Joule heating[J]. *Materials*, 2014, 7(8): 5591-5602.
- [58] Sandoghchi S R, Jasion G T, Wheeler N V, *et al.* X-ray tomography for structural analysis of microstructured and multimaterial optical fibers and preforms[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 26181-26192.