



DOI: 10.12086/oe.2018.180151

空芯光子带隙光纤及其传感技术

汪超^{1,2}, 黄贺勇¹, 孟冬辉³, 张景川³, 何海律², 靳伟^{2*}¹ 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072;² 香港理工大学电机工程学系, 香港 999077;³ 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094

摘要: 本文综述了空芯光子带隙光纤的独特性质, 并介绍了近年来这类光纤在传感领域应用的新进展。光波在空气纤芯中低损耗传输是空芯光子带隙光纤的重要特性, 它带来了长距离、大能量密度的光与物质相互作用通道, 降低了光纤材料属性对传输光的影响(如中红外吸收、热光效应), 为诸如痕量气体/液体探测、高精度光纤陀螺仪等传感应用提供了高效的新平台。空芯光子带隙光纤内部精细的微结构具有新颖的机械性能和热性能, 有利于诸如声波、振动探测等传感应用; 还可结合光纤后期热处理、选择性填充等技术, 对多孔包层进行结构修改或材料填充, 获得进一步的性能和功能扩展。这些灵活性已用于开发具有新特性的光纤器件, 例如光栅、起偏器和偏振干涉仪。目前, 空芯光子带隙光纤传感技术的发展已大大扩展了光纤的环境感知能力和应用范围, 是全光器件和光集成技术发展的重要方向。

关键词: 空芯光纤; 光子带隙光纤; 光纤传感器; 气体传感器; 分布式气体传感

中图分类号: O436.3; TN253

文献标志码: A

引用格式: 汪超, 黄贺勇, 孟冬辉, 等. 空芯光子带隙光纤及其传感技术[J]. 光电工程, 2018, 45(9): 180151

Hollow-core photonic bandgap fibers: properties and sensing technology

Wang Chao^{1,2}, Huang Heyong¹, Meng Donghui³, Zhang Jingchuan³, Ho Hoi Lut², Jin Wei^{2*}¹School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;²Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;³Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China

Abstract: In this paper, the unique properties of the hollow-core photonic bandgap fiber (HC-PBF) are reviewed, and a variety of sensing and device applications of this type of fiber in recent years are introduced. Low-loss light transmission in air core is an important characteristic of the HC-PBF, which provides light-matter interaction channel with high energy density and long interaction distance. In addition, the air-propagation of the light in fiber also reduces the impacts of fiber material properties (such as infrared absorption, thermos-optical effect) on propagating light, hence offers an efficient platform for the sensing applications such as trace gas / liquid detection, optical fiber gyro sensing. The fine micro-structure in HC-PBF exhibits novel mechanical and thermal properties, which would be beneficial to the sensing applications such as sound wave and vibration detection. The HC-PBF's porous structure can also be locally modified by using various post-processing techniques, such as local heat treatment, micromachining and selective filling, which would enable further function extension or performance enhancement. The flexibility of the

收稿日期: 2018-02-09; 收到修改稿日期: 2018-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61535004); CAST-BISEE 创新基金资助项目(CAST-BISEE2017-015); 中央高校基本科研业务费资助

作者简介: 汪超(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光纤及其传感技术的研究。E-mail: eecwang@whu.edu.cn

通信作者: 靳伟(1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事光纤及其传感技术的研究。E-mail: eewjin@polyu.edu.hk

fiber has been used to develop new optical fiber devices, such as grating, polarizer and polarization interferometer. At present, the development of HC-PBF sensing technology has greatly expanded the sensing ability and application range of optical fiber. It is an important direction for the development of all-optical devices and optical integration technology.

Keywords: hollow-core fiber; photonic bandgap fiber; optical fiber sensor; gas sensor; distributed gas sensing

Citation: Wang C, Huang H Y, Meng D H, *et al.* Hollow-core photonic bandgap fibers: properties and sensing technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(9): 180151

1 引言

传统光纤作为光传输载体,主要是基于全内反射(total internal reflection, TIR)原理导光。最典型 TIR 型光纤是图 1(a)~图 1(b)所示的阶跃或渐变折射率结构光纤,这种光纤通过在高透光材料(如熔石英、聚合物)中掺杂形成高折射率的纤芯区域,使传输光在纤芯-包层界面受 TIR 约束而保持轴向传输。通讯中常用的单模、多模光纤均属于这种类型。由单一材料也可制成图 1(c)~图 1(d)所示的光子晶体光纤(photonic crystal fiber)和悬挂芯光纤(suspended-core fiber),这些光纤通过多层微孔结构降低了包层平均折射率,或直接以较大尺寸微孔作为包层,束缚纤芯中光波的横向传输/泄漏,而保持轴向传输,其原理仍然是 TIR 或近似 TIR^[1]。这些 TIR 型光纤实现导光的基本条件是纤芯区域要具有相对较高的折射率,因此也被称为折射率传导光纤。

空芯光纤的导光原理与上述 TIR 型光纤完全不同,是以特殊微结构形成的光子禁带或反谐振效应来抑制纤芯中光的横向泄漏,实现低折射率纤芯中的轴向光传输。相比于 TIR 型光纤,空芯光纤中绝大部分光能量(95%以上)在空气芯中传输,因此光传输受光纤材料吸收影响少,非线性效应和延迟较小,损伤阈值

高,热稳定性好,而且可以作为光与物质相互作用的高效平台^[1-2]。图 2 所示为比较有代表性的三种空芯光纤,它们分别基于(一维)布拉格、光子带隙和反谐振结构。

各种结构的空芯光纤中,图 2(b)所示的光子带隙型空芯光纤(hollow-core photonic bandgap fiber, HC-PBF)由于具有传输、弯曲损耗小,易与单模光纤连接,以及商业化产品丰富等优点,自 1999 年首次成功制备^[3]以来一直被广泛地关注和研究。本文将在第 2 部分对这种光纤的基本结构和特性进行简要综述,并在第 3 部分介绍它在传感领域几个较有特点的应用,最后第 4 部分是全文的总结。

2 空芯光子带隙光纤的基本性质

2.1 基本结构

HC-PBF 中通过轴向延伸的周期性微孔结构形成光子带隙效应,使特定波长/频率的光波在光纤横向上受光子带隙结构的束缚,而只能在纤芯(带隙缺陷)中沿轴向传输。光子带隙效应可以认为是微孔交界处形成的亚波长尺度、相互靠近(模式交叠)且周期性分布的节点波导阵列的整体效果^[4]。这些节点波导的分布和形状决定了最终光子带隙的性质。实际 HC-PBF 中,

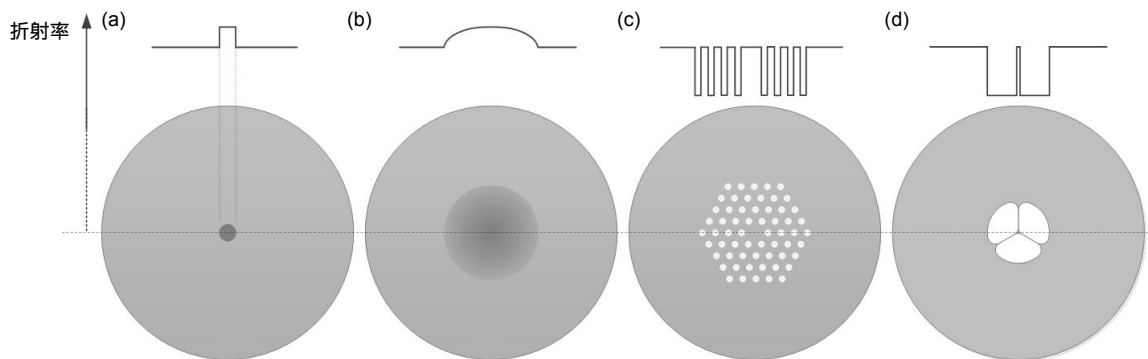


图 1 基于 TIR 原理的光纤折射率分布及截面结构示意图。(a) 阶跃折射率光纤; (b) 渐变折射率光纤; (c) 光子晶体光纤; (d) 悬挂芯光纤

Fig. 1 The cross-sectional schematics and refractive-index distributions of the optical fibers based on TIR principle. (a) Step-index fiber; (b) Gradient index fiber; (c) Photonic crystal fiber; (d) Suspended-core fiber

构成光子带隙的节点波导阵列通常由周期性堆叠的微管外壁在软化状态下通过精确的气压、轴向拉速等参数控制拉制而成^[1]。图 2(b)所示空芯光子带隙光纤的局部结构如图 3(a)所示,是一种三角形微孔分布的光子带隙结构。该结构形成光子带隙的归一化带宽(禁带宽度除以中心波长)主要由微孔直径 d 和孔间距 Λ 的比值决定,对于 d/Λ 为 0.95~0.97 的光子带隙,其归一化带宽约为 0.1~0.15,即在通讯波段带宽约为 100 nm~200 nm。此外光子带隙的归一化带宽还可以通过节点半径 r 进行优化调节^[5]。

除了上述三角形微孔分布,光子带隙结构还有矩形微孔分布,三角形节点分布等结构^[5],但实际中最常见的还是三角形微孔分布的光子带隙光纤。目前带隙(传输窗口)中心波长位于 440 nm~2050 nm 范围内的多种商业化 HC-PBF 均采用这种结构。图 3(b)中黑色曲线为一种在通讯波段导光的商用 HC-PBF 的传输谱,其在中心波长 1530 nm 附近的损耗约为 10 dB/km,陡峭的传输窗口边缘对应了光子带隙的边缘。受限于实际制作中带隙微结构的表面粗糙度,以及中

红外波段的材料吸收,HC-PBF 目前实现的最低传输损耗在通讯波段约为 1.2 dB/km^[7],虽然低于传统 TIR 型单模光纤(同波段约 0.2 dB/km),但对于许多对长度要求相对较短的光纤传感应用而言是足够的。

2.2 模式特性

在 HC-PBF 中,纤芯是由周期性光子带隙结构中刻意引入的缺陷形成的。通常的纤芯缺陷结构是在制备排管时移取中心位置的 3 个、7 个或 19 个微管后拉制形成的,对应常称为 3 单元(3-cell)、7 单元或 19 单元 HC-PBF。对于通讯波段的 HC-PBF,这些类型纤芯的尺寸范围从 5 μm 到 50 μm ,支持如图 4 所示的单个(3 单元 HC-PBF)或多个(7 及 19 单元 HC-PBF)空气传输模式^[8]。HC-PBF 最大可支持的纤芯模式数可以通过纤芯直径、工作波长以及带隙边缘参数进行估算^[9]。

上述 HC-PBF 中,7 单元 HC-PBF 由于较容易设计成具有与单模光纤近似的模场形态,因而更容易与已广泛使用的单模光纤系统和光纤器件连接,是目前用于搭建传感系统的常用 HC-PBF 结构。通过在光子

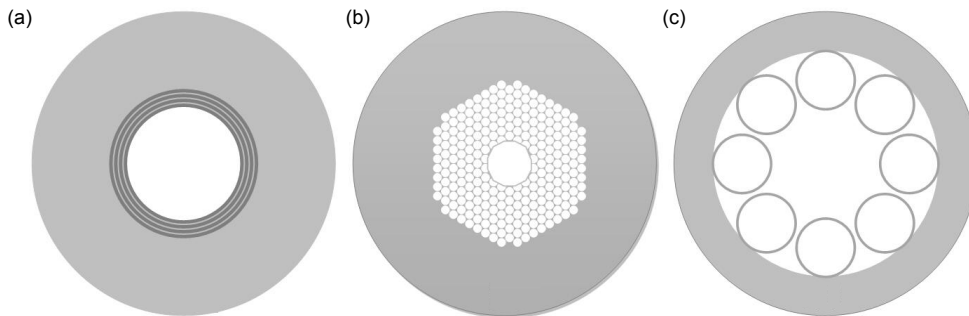


图 2 基于(a)一维布拉格, (b)光子带隙和(c)反谐振结构的空芯光纤截面结构示意图
Fig. 2 The cross-sectional schematics of hollow-core fibers with (a) 1-dimensional Bragg, (b) photonic bandgap and (c) anti-resonant structure

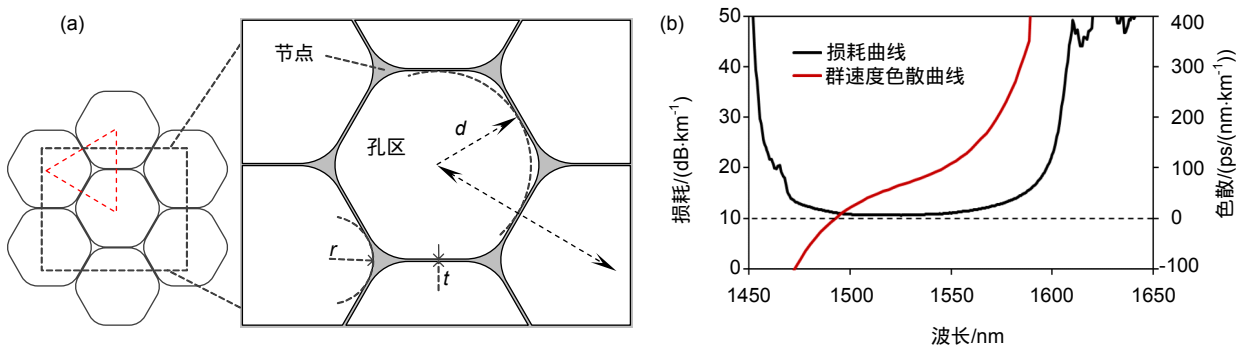


图 3 (a) 三角形微孔分布的光子带隙结构及其微孔单元示意图; (b) 商业空芯光子带隙光纤 HC-1550-04 的传输损耗和色散曲线^[6]

Fig. 3 (a) Photonic bandgap structure with triangular hole-distribution; (b) The transmission spectrum and dispersion curve of a commercial available HC-PBF (model HC-1550-04 from NKT photonics)^[6]

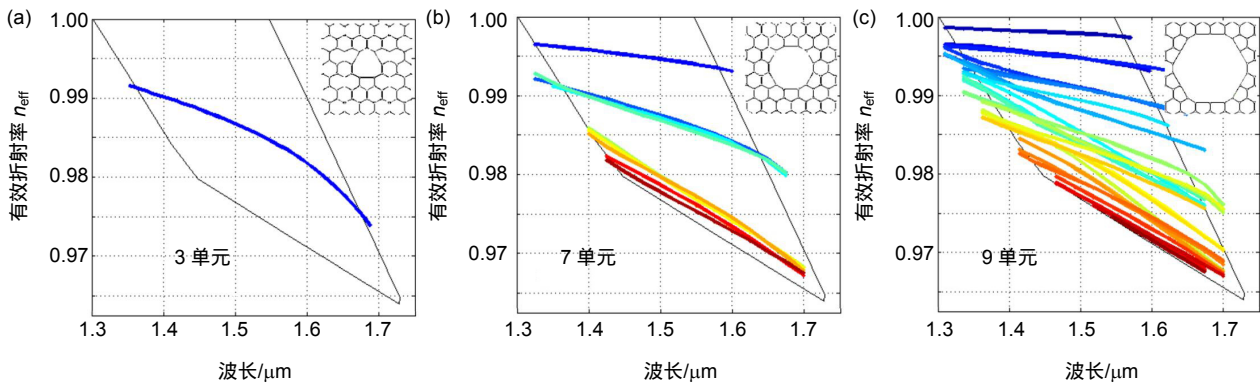


图 4 (a)、(b)和(c)分别为 3、7 和 19 单元 HC-PBF 中空气传输模式的色散曲线计算结果。黑色细线为带隙边缘，彩色粗线为 HC-PBF 中支持的空气模式，右上角插图为各种 HC-PBF 的空芯及其附近结构图^[8]

Fig. 4 (a), (b) and (c) are the calculated dispersion curves of the hollow-core modes in 3-, 7- and 19-cell HC-PBFs respectively^[8]

带隙结构中空气纤芯的附近设计额外的缺陷，来形成对高阶纤芯模式的耦合“过滤”效果，还可以制备单模甚至单模保偏的大芯径 HC-PBF^[10]。

HC-PBF 中的纤芯模式具有与标准阶跃折射率光纤形态相似的模场分布，通常可以用阶跃折射率光纤的模式标记方法(LP₀₁、LP₁₁等)来进行标记^[11]。对于基模(HE₁₁ 或 LP₀₁)虽然模场分布在不同方位角上有一定不对称性，但其主体部分形态仍然可以用高斯强度分布来近似表征，以及用类似传统光纤的方法定义模场的半径、有效面积和发散角等参数。在多数应用情况下，这些基模参数随光波频率的变化很小^[9]。

图 5(a)、图 5(c)为一段 5 m 长的 7 单元 HC-PBF 中 LP₀₁、LP₁₁ 模式的实测模场分布图。图中除了可以观察到空芯区域的模式，在纤芯/包层界面附近还可以观察到较弱的零星能量分布，它们对应着 HC-PBF 中另一种可能存在的传导模式：表面模。HC-PBF 系统中，纤芯导模和表面模的混合干涉会引入较大的模式噪声而影响光纤的传输损耗和带宽^[12]，以及传感系统

的探测灵敏度^[13]，需要从光纤、光路设计或后处理等方式来进行优化。由于表面模能量更多位于包层微结构中传输，因而更容易受到与光纤微结构表面粗糙度有关的散射损耗影响，以及与辐射模式发生耦合而产生损耗。因此，通过图 5(a)和图 5(b)的对比可以看出，在较长的 HC-PBF 中表面模将明显减少。但对于通常长度 10 m 以内的 HC-PBF 传感应用，还需要其它的方法来抑制表面模：通过合理设计纤芯的尺寸、形状可以形成表面模抑制效果的光纤^[12,14]，但这增加了 HC-PBF 制作的复杂程度；表面模与纤芯模式尤其是低阶模式有较大的折射率差(10⁻² 以上)，通常在传输过程中较少发生相互耦合，而主要是在光波输入光纤时激发的。因此可以通过在 HC-PBF 输入端进行模式过滤来抑制表面模的激发^[13]。

2.3 双折射

理想的 HC-PBF 中纤芯(带隙缺陷)结构对称，两个正交线偏振基模(HE_{11,x}, HE_{11,y})是简并的，即有效折

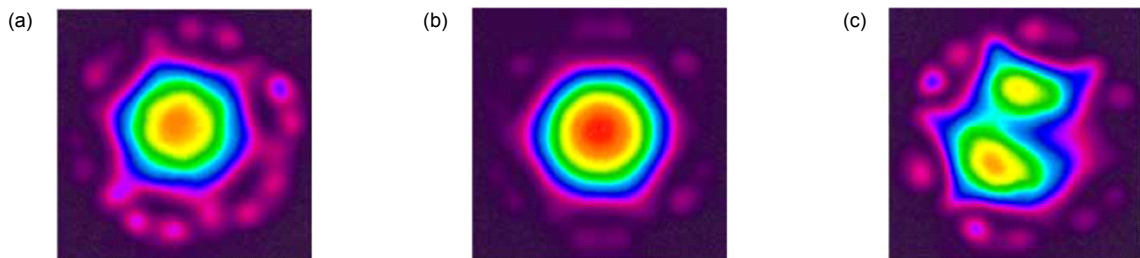


图 5 实测 7 单元 HC-PBF 在不同光纤长度和入射偏移时的输出模场形态。(a) 长 $L=5$ m, 相对偏移 $\Delta\xi=0$; (b) 长 $L=35$ m, 相对偏移 $\Delta\xi=0$; (c) 长 $L=5$ m, 相对偏移 $\Delta\xi\approx 0.5$ 。相对偏移 $\Delta\xi$ 定义为绝对偏移量除以空芯尺寸^[8]

Fig. 5 The measured mode distribution of 7-cell HC-PBFs with different fiber length and incident offsets. (a) Fiber length $L=5$ m, relative offset $\Delta\xi=0$; (b) Fiber length $L=35$ m, relative offset $\Delta\xi=0$; (c) Fiber length $L=5$ m, relative offset $\Delta\xi\approx 0.5$ ^[8]

射率相等 $n_x=n_y$ 。但由于制备中空气纤芯结构或多或少的不对称性, 以及环境/结构缺陷扰动等因素的存在, 在对 HC-PBF 的实际测量中, 可以观察到较明显的与波长相关的双折射, 以及偏振相关的损耗、空芯模式与表面模的交叉耦合等现象^[15-17]。

在高精度的光纤传感应用(如干涉仪)中, 通常需要用偏振保持(保偏)光纤来避免光纤偏振模色散, 或模式偏振在环境因素作用下随机抖动带来的噪声。保偏光纤具有明确定义的偏振主轴, 通常相互垂直的两个主轴之间的折射率差越大, 模式的两个偏振态之间的串扰越小, 光纤的保偏效果越好。普通商业化 7 单元的 HC-PBF 的群双折射约为 2×10^{-5} ^[18], 已具备一定的保偏效果, 但通常并没有给出主轴位置。Chen 等人^[19]和 Alam 等人^[19]分别通过在三角形微孔分布的光纤光子带隙结构中引入 4 单元缺陷, 制备出图 6(a)所示具有椭圆形空芯的 HC-PBF。这种光纤的群双折射在某些波段可达 10^{-2} 量级, 比传统保偏光纤高 1~2 个量级, 但它的纤芯支持多模, 且基模在某些波长下会与表面膜发生强烈耦合。Roberts 等人^[20]提出一种对普通 7 单元 HC-PBF 的改进: 在空气纤芯外壁上引入图 6(b)所示的微节点, 这能有效减少空气传输模式与光纤材料的交叠, 同时有助于双折射的提升。Fini 等人^[10]提出了更实用的保偏单模 HC-PBF 结构。如图 6(c)所示, 他们在空气纤芯(缺陷)两侧的光子带隙结构中引入两个对称的缺陷孔, 通过调节对称缺陷孔的位置和形态, 以及纤芯的形态, 可以实现纤芯高阶模与对称的缺陷孔模式间的高效耦合(即滤除高阶模), 并在通讯波段达到接近 10^{-1} 量级的双折射。

2.4 弯曲损耗

HC-PBF 的弯曲损耗要显著小于传统光纤, 即使

在直径 4 mm 的微小弯曲情况下, 其传输谱除了在光子带隙的短波边缘出现较小红移(带隙变窄), 其它透光窗口内的弯曲损耗极小且与波长无明显关系^[21]。这种优良的弯曲性能可以通过 HC-PBF 由光子带隙上下边缘波数决定的数值孔径(numerical aperture, NA)来解释: HC-PBF 在传输窗口内 NA 较大(相当宽的范围)内可达 0.35 以上, 因此在弯曲时能很好地束缚纤芯的模式; 另外, 不同于传统光纤的缓变弯曲损耗谱, HC-PBF 的 NA 在短波长方向上的带隙边缘附近会出现陡降, 因此在较小弯曲时 HC-PBF 损耗谱初始变化通常为短波带隙边缘的红移^[9]。

2.5 光纤材料对传输特性的影响

HC-PBF 中绝大部分的光能量在空气中传输, 因此光纤材料的各种线性或非线性效应(延迟、吸收、热光、克尔等)对传输光的影响远小于实心光纤。这使得 HC-PBF 中的光传输具有延迟小、中红外窗口范围宽、热光调制弱、损伤阈值高等特点。

HC-PBF 中光波在空气纤芯中的传输速度比传统石英光纤中快约 40%, 可以实现接近 99.7%真空光速的长距离低损耗光通讯, 每千米光信号传输加快约 $1.54 \mu\text{s}$ ^[2]。由于常规光纤材料石英的中红外吸收强, 传统光纤通常难以在 $2.5 \mu\text{m}$ 以上的中红外波段长距离传输, 而需要用到其它特殊材料(如硫系玻璃), 但通常它们的温度、强度等性能不如石英光纤。具有中空纤芯的 HC-PBF 可以很好地避开这个材料吸收的问题, 实现基于石英材料的中红外光纤。对于中红外波段, 带隙光纤的微结构尺寸较大, 这使该波段 HC-PBF 在制备上相对近红外和可见光波段更容易。目前, 在 $3.1 \mu\text{m} \sim 3.7 \mu\text{m}$ 的中红外波段, HC-PBF 已实现了损耗低至 0.05 dB/m 的光传输^[22]。

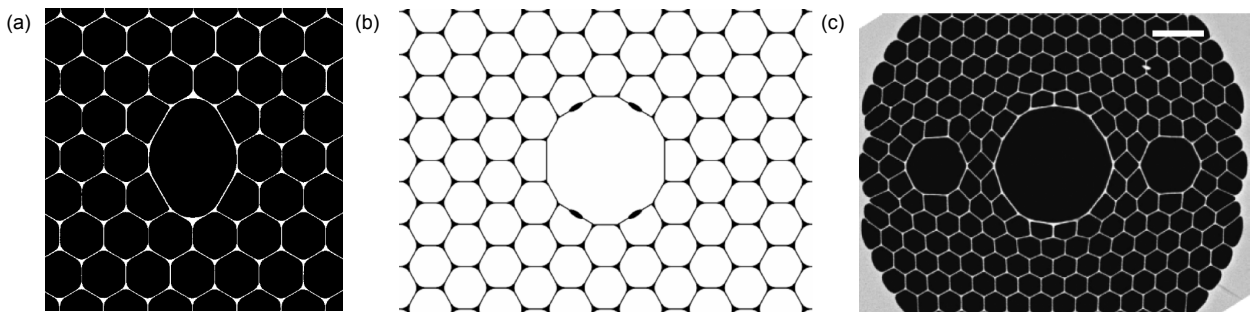


图 6 (a) 4 单元高双折射空芯光子带隙光纤^[19]; (b) 改进 7 单元高双折射空芯光子带隙光纤^[20]; (c) 保偏单模的大孔径空芯光子带隙光纤 (比例尺长度 $10 \mu\text{m}$)^[10]

Fig. 6 (a) 4-cell HC-PBF with high birefringence^[19]; (b) Modified 7-cell HC-PBF with high birefringence^[20]; (c) Single-mode and highly birefringent HC-PBF with large aperture^[10]

HC-PBF 微结构中气体的热过程比较复杂,涉及气体密度、压力分布变化,分子扩散等过程,但整体对波导有效折射率的影响远小于传统全固光纤由于材料热膨胀和热光效应带来的影响。一般情况下,HC-PBF 的温度响应主要来自光纤材料(石英)热形变引起的光纤带隙结构和长度变化。通讯波段 19 单元 HC-PBF 的热相位灵敏度测量值为 $\sim 2 \text{ rad}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,这比普通单模光纤小约 18.5 倍^[23]。通过在 HC-PBF 外涂覆与光纤材料具有反向热膨胀系数的材料,HC-PBF 的热稳定性还可获得进一步提高^[24]。

由于传输光与光纤材料的交叠区域小,因此 HC-PBF 还有光纤损伤阈值高的特点,能进行高光能量的光传输。标准单模光纤的损伤阈值约为 870 mW,更高功率的光传输通常需要用到大模场面积和高阈值材料的光纤。而与单模光纤模场面积相近的 7 单元 HC-PBF 已能实现 100 W 的连续激光传输^[25],在高能激光应用领域优势明显。

3 空芯光子带隙光纤传感技术

HC-PBF 不但可以用于温度、压力、应变等常规参数的传感,其精细的微孔结构为多种物质填充提供了可能性,有利于传感功能的扩展;另外,HC-PBF 的纤芯中,传输光可以以较大的能量密度在空芯区域长距离的传输,是高效的光与物质相互作用的平台。

3.1 高灵敏度气体传感

HC-PBF 可以将光学模式和气相材料同时限制在中空纤芯内,这为气体传感提供了一个很好的光与气相互作用平台。目前商用 1550 nm HC-PBF,传输窗口宽度约为 200 nm,能覆盖多种重要工业和生活气体(如 NH_3 , H_2S , C_2H_2 , CH_4)的吸收谱线。采用不同波段的 HC-PBF,还能获得更宽的光谱覆盖范围。目前利用光谱学技术的 HC-PBF 气体传感系统已能实现 ppb 量级的高精度气体传感^[26]。

早在 HC-PBF 首次被报道时,Cregan 等人就提出了使用 HC-PBF 进行气体传感的预言^[3]。2004 年,Hoo 等人^[27]利用气体光谱吸收测量了乙炔(C_2H_2)气体在 HC-PBF 内的扩散过程,获得了 HC-PBF 中的扩散系数 $0.17552 \text{ cm}^2/\text{s}$,扩散速度略小于开放空间中的气体扩散。同年 Ritari 等人^[28]使用 10 m 长的 HC-PBF 清楚地观测到了多种气体(C_2H_2 , HCN , CH_4 和 NH_3)的近红外吸收线。随后多家单位开展了基于 HC-PBF 对 C_2H_2 , CO_2 , CH_4 等气体更深入的传感技术研究^[29-32],

但使用的主要是直接测量光谱吸收的技术。受光纤中多路径干涉等噪声因素的影响,基于直接吸收光谱技术的 HC-PBF 气体探测系统的浓度检测下限难以突破 ppm(百万分之一)量级^[13],在应用上也存在一些实际的问题。

比如,搭建 HC-PBF 气体传感系统时,通常需要与其它类型的光纤进行连接,以利用传统光纤上成熟的器件形成全光纤探测系统。然而应用常规光纤熔接参数进行熔接时,HC-PBF 中精细的微结构在高温下容易坍塌而引起较大损耗^[33]。通过优化参数的偏移熔接技术^[34],可以将 HC-PBF 低损耗地接入单模光纤系统构成光子微单元(photonic microcell)结构,用于全光纤气体探测以及气相器件的制备^[35]。在这样的系统中使用较长的 HC-PBF,将增加光与气体相互作用效果的累积,有助于实现更高的气体探测灵敏度。但将较长的 HC-PBF 直接用于气体探测,存在着气体进出速度慢的问题,影响传感器的响应时间。

通常,在接入光纤系统的 HC-PBF 两端,预留一定的缝隙作为气体进出通道。可以采用气压驱动的方式改善 HC-PBF 中气体进出速度^[31]。但对于几米甚至更长的 HC-PBF,由于微孔通道的管壁效应,气压驱动对响应速度的提升效果仍然有限。可以把较长 HC-PBF 分成较短的多段,如图 7(a)所示,每段之间通过精密的夹持具进行耦合并引入气体进出口^[30]。这种方法增加了气体进出通道数目,能较有效地提高系统响应时间,只是各段之间的耦合损耗会限制光纤段的总数量。另外,维持各光纤段之间的精确对准可能影响传感器的紧凑性和稳定性。使用飞秒激光、紫外激光或聚焦离子束刻蚀等技术可以直接在 HC-PBF 上制备气体进出口^[36-38]。图 7(b)为直接在 HC-PBF 上制备气体进出口(微孔)结构示意图及用飞秒激光制备的微孔横截面照片。这种从光纤表面直达纤芯的微孔已被证实能显著地提升气体探测的响应时间,同时仅引起极小的插入损耗^[39-40]。通过加工流程和参数的优化,目前微通道的损耗可减小到 $\sim 0.01 \text{ dB/孔}$,使在长距离 HC-PBF 上大规模制备成为可能。

商业 7 单元 HC-PBF 与普通单模光纤的模场形态相近,因此较容易实现低损耗连接。但这种 HC-PBF 并不是真正的单模传输,光纤中基模与高阶模、表面模之间的干涉将导致输出信号长时间的波动以及噪声基底的升高,从而影响传感的灵敏度^[30]。对于这个问题可以从多方面尝试解决或优化:首先,可以直接使

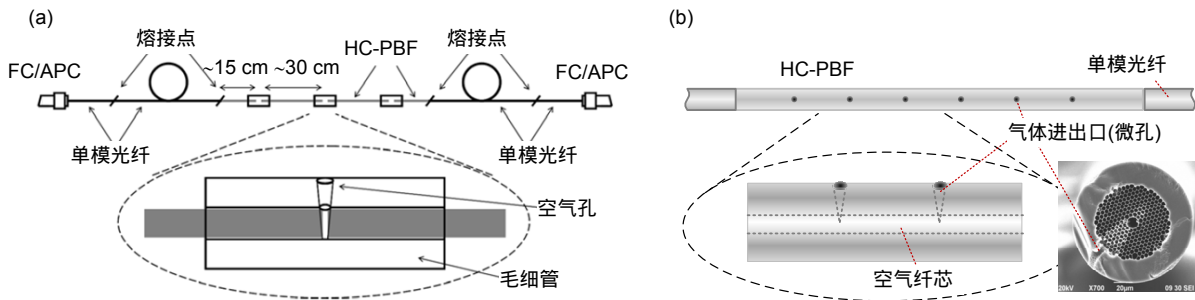


图 7 (a) 对较长空芯光子带隙光纤的分段组装方式^[30]; (b) 从空芯光子带隙光纤表面直达纤芯的微孔, 插图: 飞秒激光制备微孔截面 SEM 照片^[36]

Fig. 7 (a) Piecewise assembly method for long HC-PBF^[30]; (b) Micro-channels that go straight to the core from the surface of HC-PBF^[36]

用单模 HC-PBF(如 3 单元 HC-PBF 等),但这种光纤与单模光纤直接连接通常存在损耗大的问题,而且目前商业化产品极少;其次,可以通过优化输入方式使光波尽可能多地耦合到 HC-PBF 基模传输。通过调整单模光纤与 HC-PBF 间隙大小,加入模式过滤光纤等方法能一定程度地抑制高阶模和表面模的激发^[13,40];另外,还可以使用新颖的探测原理和信号处理技术来降低噪声对测量系统的影响,获得高性能气体传感器。

基于 HC-PBF 和气体光谱吸收的光热干涉气体探测技术是近年出现的一种新型气体探测技术,它的气体探测灵敏度和动态范围比基于光谱直接吸收的光纤气体探测技术提升了近 3 个量级^[26]。图 8 为一套基于 7 单元 HC-PBF 和光纤马赫-曾德尔(Mach-Zehnder, MZ)干涉仪搭建的光热干涉系统。该系统通过对准气体光谱吸收线的泵浦光(分布式反馈布拉格激光,

distributed feed-back, DFB)来激发 HC-PBF(气体探头)中的待测气体来形成光热信号;通过探测另一束远离气体吸收线的探测光(外腔二极管激光(external cavity diode laser, ECDL))的相位,来实现对 HC-PBF 中光热效应引起有效折射率变化的测量。探测光受到光热调制的相位变化将被 MZ 干涉仪转化为强度并被光探测器探测。系统中还采用了反馈控制来锁定 MZ 的最佳工作点,使用锁相放大来提高系统对光热小信号的探测能力。

系统中用于探测不同浓度气体光热信号的探测光,在通过 HC-PBF 后的相位变化可以描述为

$$\Delta\phi \propto \frac{P_{\text{pump}}}{\pi w^2} L\alpha(\lambda)C, \quad (1)$$

其中: P_{pump} 为泵浦光功率, w 为模场半径, L 为光纤长度, α 为气体在特定波长 λ 下的吸收系数, C 为气

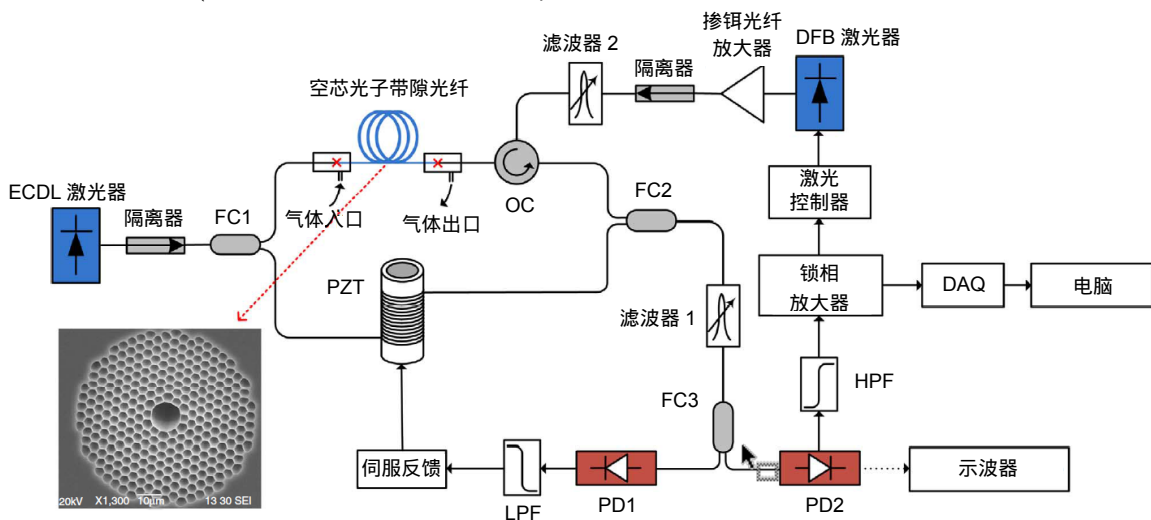


图 8 基于空芯光子带隙光纤的光纤光热干涉气体探测系统。OC: 环行器; FC: 耦合器; PD: 光探测器; HPF/LPF: 高/低通滤波器; DAQ: 数据采集卡; PZT: 压电陶瓷驱动环^[26]

Fig. 8 Fiber optic thermal interference gas detection system based on HC-PBF. OC: optical circulator. FC: fiber coupler. PD: power detector. HPF/LPF: high/low pass filter. DAQ: data acquisition device. PZT: piezoelectric element^[26]

体浓度。HC-PBF 中泵浦光能以较高的能量密度(较小的 w)激发待测气体的光热效应,同时能在较长的距离 L 上累积效应效果,因此具有较高的灵敏度。应用一段 10 m 长的 HC-PBF,在 15.3 mW 的泵浦光激励下,可以实现噪声等效探测灵敏度 ~ 2 ppb 以及近 6 个数量级的动态范围的乙炔气体测量。当在系统中使用不同类型的 HC-PBF,其中光热的激发和消散过程会有差别,可以通过调整泵浦光的调制参数,或采用适当的脉冲参数等方法来获得最优的性能^[41]。

在 HC-PBF 的一端应用高反射光纤端面镜,可以在一根 HC-PBF 上获得加倍的光与气体作用距离,有利于气体传感系统灵敏度的提高^[38]。进一步在 HC-PBF 两端应用高反镜可以构成对特定波长光产生多次反射的光学共振腔,使单根传感光纤中的光与气体作用距离获得更大提升。从而应用较短的 HC-PBF 也能获得较高的探测灵敏度。Tan 等人基于一段 9.4 cm 长的 7 单元 HC-PBF 和端面镀有介质膜的单模光纤制备了如图 9 所示的全光纤光学腔。该光学腔的精细度(finesse)为 68,作为气室的等效光程长度约 4.1 m,用于波长调制二次谐波的气体探测系统,获得了 ~ 7 ppm 乙炔气体的噪声等效探测下限。制备更高锐度的光纤光学腔可进一步提高这类探测系统的灵敏度。

以上所述的气体探测技术大都是基于气体的光谱

吸收的探测,对于在光纤传输窗口不存在吸收线或吸收线极弱的气体(如 H_2 、 N_2 等),还可以用拉曼技术来进行探测^[43]。

3.2 分布式气体传感

分布式传感能力是光纤传感器的主要优点之一,可以利用一根光纤获得长距离或密集的多点传感数据。基于单模光纤的瑞利、拉曼和布里渊散射的分布式应变、温度传感器已经得到很好的发展和应用^[44]。然而,对气体的分布式检测技术仍然研究较少。

图 10 是一个基于光谱吸收的 HC-PBF 分布式气体探测系统^[45]。该系统的核心是一套光学时域反射(optical time domain reflectometer, OTDR)系统,系统中以 HC-PBF 作为探测光纤,以波长对准待测气体光谱吸收线的 DFB 激光。在 HC-PBF 沿线通过微加工技术制备一系列如图 7(b)所示从光纤表面直达纤芯的微孔作为气体进出口。当待测气体从某个或几个微孔中进入 HC-PBF 时,会由于光谱吸收效应而引起光纤芯中传输光的衰减,并反映为反射光波的强度变化,被探测器探测到。这些微孔间距和激光脉冲宽度共同决定着系统的空间分辨率。图 11 是用一段 75 m 长 HC-PBF 对 10%浓度乙炔气体进行分布式探测的实验结果。初步展示了系统对乙炔气体的定位和测量能力,

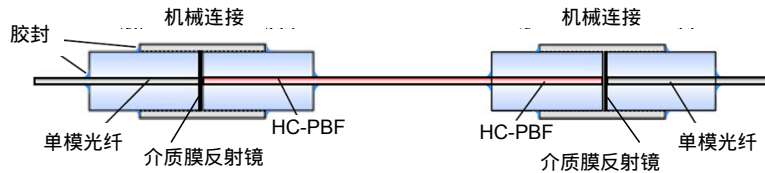


图 9 基于 HC-PBF 的光纤光学腔气室^[42]

Fig. 9 Optical fiber optic cavity gas chamber based on HC-PBF^[42]

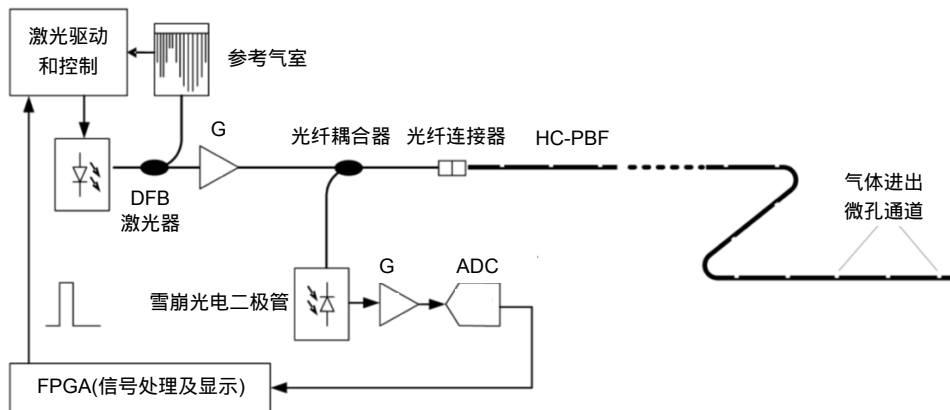


图 10 基于 OTDR 和光谱吸收的分布式气体检测系统的示意图。G: 放大器, ADC: 模数转换器^[45]

Fig. 10 Schematic diagram of distributed gas detection system based on OTDR and spectral absorption^[45]

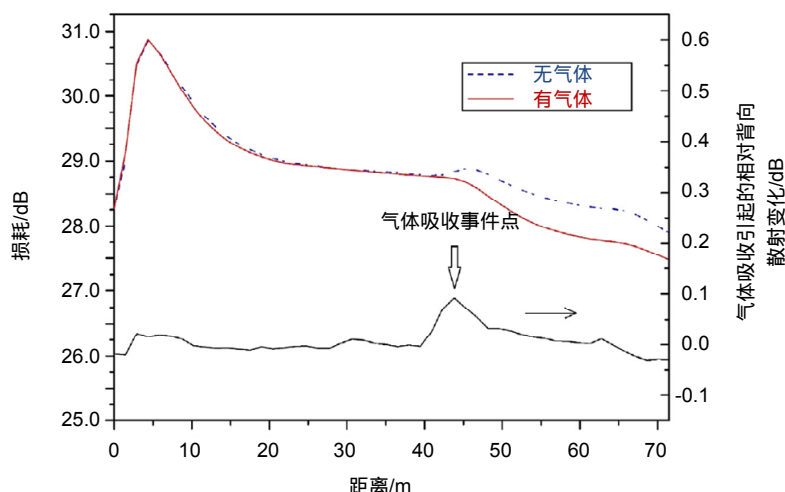


图 11 一段 75 m 长 HC-PBF 对 10% 浓度乙炔气体的分布式测量结果。乙炔气体施加在 HC-PBF 约 44 m 处^[45]

Fig. 11 Distributed measurement results of 10% acetylene gas with a 75-m-length HC-PBF. Acetylene gas was applied at the position of 44 m^[45]

随着空芯光纤技术的发展和先进的信号源和信号处理技术的应用,分布式传感器的系统性能有望得到改善。除了实验采用的乙炔气体,该系统还可用于其它在光纤传输窗口有吸收谱线的气体。

将光热技术用于分布式气体探测可以获得更高性能的光纤分布式系统。Lin 等人^[46]以 7 单元 HC-PBF 为探测光纤,提出了图 12(a)分布式和图 12(b)准分布式气体探测方案。该方案用对准待测气体光谱吸收线的泵浦光来激发光纤中气体产生光热效应,并用远离吸收线的探测光和双脉冲外差相敏 OTDR 技术来检光纤中气体光热效应引起的相位变化。对应图 12(a)方案,一段 200 m 长 HC-PBF 搭建的分布式气体探测系统,以 498 ppm 乙炔气体(氮气背景)进行了验证实验。在 62.5 mW 峰值功率的光泵浦下,可以获得最小的噪声等效探测下限约为 5 ppm/(Hz)^{1/2}。该系统的空间分

辨率在 50 ns 探测光脉冲宽度和 36 m 延迟光纤长度情况下约为 30 m,还有较大的提升空间。对图 12(b)的准分布式气体探测方案,使用串联接入单模光纤光路的两段 28 m 长 HC-PBF 来进行验证。在功率 55 mW 的光泵浦下,系统对乙炔气体浓度的噪声等效探测下限可达 100 ppb/(Hz)^{1/2}^[46]。

3.3 液体填充的传感器

在 HC-PBF 的微孔中填入液体或聚合物等材料,可以改变光纤性质,获得具有新型传感特性的光纤。对 HC-PBF 的填充,可以直接将光纤一端浸入液体,通过微孔管壁的毛细作用将液体吸入孔中。这种方法操作简单,但光纤的填充长度取决于诸多因素,如液体的黏度、孔的大小和填充时间等。对于黏度大的液体,可以通过施加压力差来辅助填充。此外,还可以

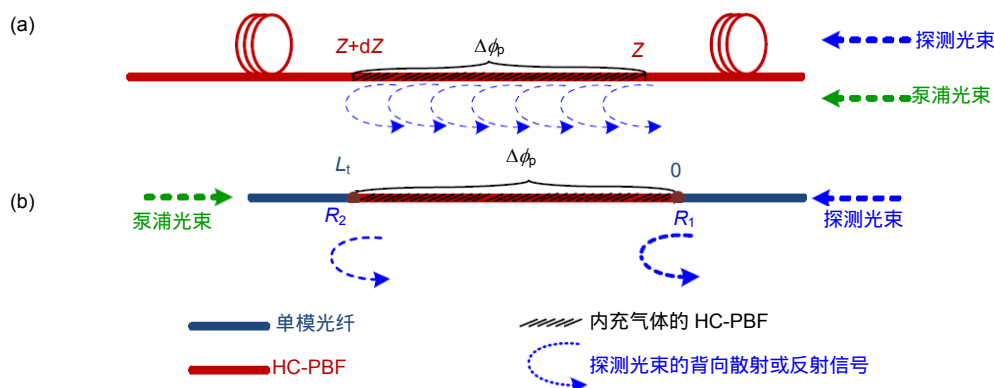


图 12 基于 HC-PBF 的(a)分布式和(b)准分布式气体探测方案^[46]

Fig. 12 (a) Distributed and (b) quasi-distributed gas sensing based on HC-PBFs^[46]

通过多种方法,对 HC-PBF 中的部分微孔进行选择性填充。对 HC-PBF 纤芯或整个包层带隙区的选择性填充可以利用 HC-PBF 中不同直径微孔在放电高温下的塌陷程度不同,或者液体毛细现象中吸入深度的不同来实现^[47-49]。

当用折射率大于光纤材料(石英)的液体同时填充 HC-PBF 的纤芯和包层孔,或用任意折射率液体只对 HC-PBF 的纤芯进行填充时,该 HC-PBF 的纤芯具有相对包层较高的折射率,而变为一种折射率传导型光纤。由于液体可供选择的折射率范围宽,这些填充液体的 HC-PBF 的波导参数(如模式数量、数值孔径等)可以通过填充材料和方式的选择进行灵活调节。基于液体/胶体丰富的材料性质(如热光、电光等),这类填充光纤可用于制备高灵敏度的传感器^[50-51]。这类技术还可以直接用于对液体的测量,形成基于吸收、荧光或拉曼原理的液体传感器^[49,52]。

当用折射率小于光纤材料的液体同时填充 HC-PBF 的纤芯和包层,或用任意折射率液体只对 HC-PBF 的包层带隙结构微孔进行填充时,该 HC-PBF 仍然保持光子带隙的导光原理。图 13 描绘了 HC-1550-02 型 HC-PBF 在具有不同折射率的液体全部填充的情况下光子带隙的变化^[53]。类似上述折射率传导型填充的 HC-PBF,这种填充光纤也将根据所采用液体的性质而具有新的特性,展现出较大的应用潜力,例如水基化学和生物传感器。当填充液体材料折射率接近光纤材料时,HC-PBF 的光传导类型(折射率或带隙型)还可能在不同的波长或不同温度下发生转变,其潜在的应用包括高消光比的光开关/衰减器和温度传

感器。

当用具有不同折射率的液体分别填充 HC-PBF 的纤芯和包层微孔,或者对包层微孔进行部分填充时,这种填充型波导的性质将具有更多的灵活性^[54-55]。

3.4 声压传感器

真空波长为 λ 的光波通过长度为 L 的光纤后的累积相位可以表示为

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} L, \quad (2)$$

其中: n_{eff} 是模式的有效折射率, λ 是真空中光信号的波长。随着环境(温度,压力,应力等)的变化,光纤长度 L 和有效折射率 n_{eff} 将受光纤横向尺寸和构成光纤的材料折射率的影响而反射改变,从而导致相位信号发生改变。每单位长度光纤的相位变化量 ($d\phi/dx$) 主要包括对光纤在环境因素(温度、压力等)作用下 L 和 n_{eff} 两部分变化的响应^[24]。

HC-PBF 中传输的基模,大多数能量在空气中传播,因此光纤材料弹光效应带来的有效折射率变化远小于长度变化。此外,HC-PBF 在多孔包层区域的机械等性质是不均匀的,该区域的等效杨氏模量通常表示为空气填充率 η 的函数,随 η 的增大而显著减小^[56]。这意味着光纤在外力(压力、压强等)的作用下,其各方向机械响应不一样,因此对光纤中传输光相位的影响也不一样。通过对 HC-PBF 的纤芯尺寸、光子带隙包层填充率 η 、石英外包层厚度、涂覆层材料和厚度等方面的综合设计,有望获得高性能的振动、声波传感器。

Pang 等人^[57]对 HC-1550-02 型 HC-PBF 用于声压

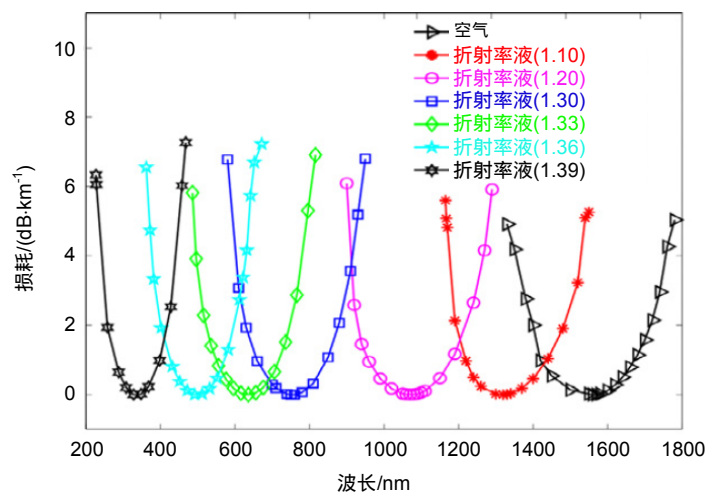


图 13 计算得到的一种 HC-PBF 中微孔全部填充不同折射率液体时的传输谱漂移^[53]

Fig. 13 The calculated transmission spectrum drift of a HC-PBF filled with different refractive index liquids^[53]

探测的相位灵敏度进行了仿真计算和实验测量，在 200 Hz 至 1000 Hz 的频率范围内 HC-PBF 的平均灵敏度(归一化响应度)约为 $-334.4 \text{ dB re } \mu\text{Pa}^{-1}$ ，与图 14 所示仿真预测的结果相近，比普通单模光纤高约 15 dB。此外，随着 HC-PBF 外层石英包层的厚度($c \sim b$)的进一步减小(接近 0)，对于大的空气填充率(如 $\eta=97\%$)的 HC-PBF，归一化响应度可再提高约 20 dB，优化至约 $-310 \text{ dB re } \mu\text{Pa}^{-1}$ 的最高值。进一步，通过在减薄石英包层的 HC-PBF 外包裹一层聚合物涂覆层，光纤归一化响应度可进一步提高，同时还有助于保护石英包层减薄的敏感光纤区。Yang 等人^[58]通过氢氟酸腐蚀的方法制备了一段 37 cm 长石英包层厚度仅为 $7 \mu\text{m}$ 的 HC-PBF，并在外面通过蒸镀形成 $100 \mu\text{m}$ 厚聚对二甲苯涂覆层，该样品的归一化响应度比未处理 HC-PBF 提高了 10 dB。该方案的进一步优化，可用于制备高性能的干涉型光纤水听器和压力传感器。

3.5 长周期光栅及偏振器件

沿着 HC-PBF 轴向使用 CO_2 激光器周期性地使光纤中空气孔产生局部变形，如图 15(a)、图 15(b)所示，可以形成光纤纤芯基模到高阶损耗模的耦合，形成 HC-PBF 上的长周期光栅(long period grating, LPG)^[59]。除了 CO_2 激光，还可以使用电弧放电来加工这种 LPG^[60]。图 15(a)为一个用 CO_2 激光制备 40 节点(凹槽)HC-PBF LPG 样品过程的透射光谱图，伴随着 CO_2

激光重复加工次数 K 的增加，光栅谱逐渐加深，并在 50 周期时达到 $\sim 12 \text{ dB}$ 的极限。这种 LPG 样品的应变灵敏度约为 $-0.83 \text{ pm}/\mu\epsilon$ ，具有温度灵敏度低($\sim 2.9 \text{ pm}/^\circ\text{C}$)，偏振相关损耗高(可达 $\sim 30 \text{ dB}$)，对弯曲和外部折射率不敏感等特点。此外，由于这种 LPG 是结构性光栅，因此可在较高的温度下工作而不会产生退化。

应用类似的方法还可以制备基于 HC-PBF 的起偏器^[61]。通过 CO_2 激光在 HC-PBF 上加工一段 6 mm 的塌陷区域，可以形成偏振消光比 30 dB 以上、带宽 50 nm 的高性能起偏器件。进一步，在同一根 HC-PBF 上制备两个串联的起偏器可以构成全光纤的偏振计(或偏振干涉仪)。

图 16(a)为这种全光纤偏振计结构示意图，图 16(b)~图 16(d)为构成偏振计的单个光纤起偏器样品照片，及样品在加工和微加工部位的截面照片。图 16(e)为一个间距 $L=531 \text{ mm}$ 的偏振仪在制备过程中干涉条纹的变化情况。在 40 个加工周期内，随着每次加工引起 HC-PBF 局部塌陷程度的加深，干涉对比度也逐步增加。一个间距 L 为 230 mm 偏振计样品，干涉条纹的应变和温度灵敏度分别约为 $-0.6 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 和 $5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。HC-PBF 偏振计还表现出对扭曲率的线性和方向性响应，一个 147 mm 间距的偏振计样品在波长 1628 nm 附近的扭曲响应如图 16(f)所示，灵敏度约 $70 \text{ pm}/(\text{rad}\cdot\text{m}^{-1})$ 。当减小工作波长时，该样品的扭曲灵敏度还可进一步提高^[62]。

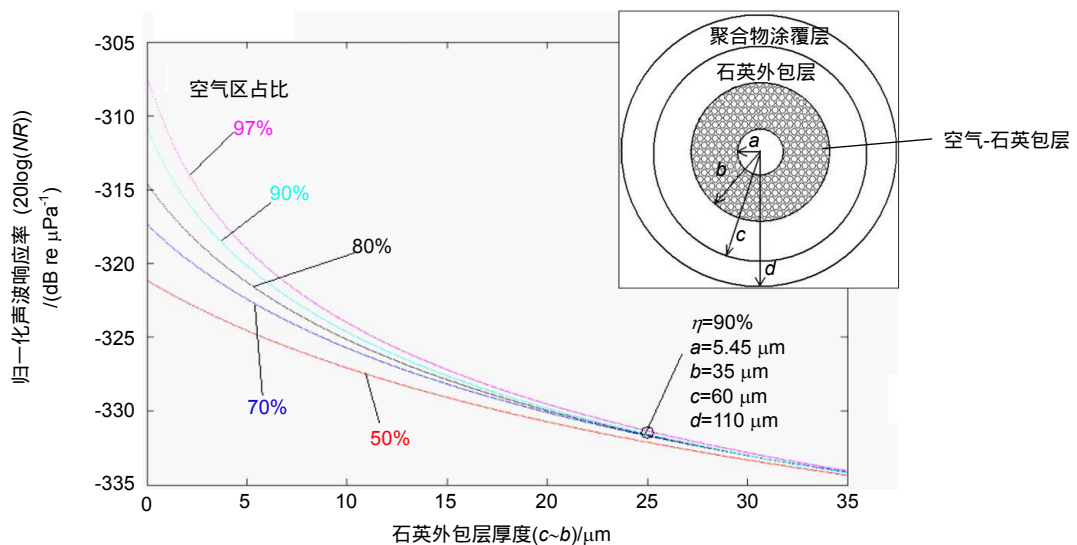


图 14 对具有不同空气填充率的 HC-PBF，归一化声波响应率与石英外包层厚度($c \sim b$)关系的仿真结果。插图：HC-PBF 截面结构图^[57]

Fig. 14 Simulation results on the relationship between normalized acoustic response rate and the thickness of quartz outer layer ($c \sim b$) for HC-PBF with different air-filling rates^[57]

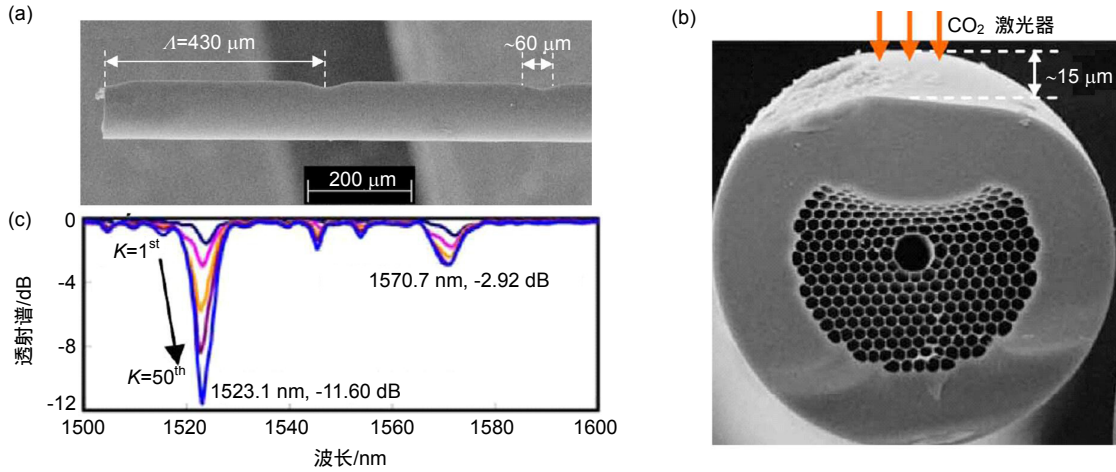


图 15 (a) HC-PBF 上用二氧化碳激光制备的周期 430 μm 的 LPG 局部侧视图; (b) HC-PBF LPG 在节点(凹槽)处的截面图; (c) 一个 HC-PBF LPG 样品透射谱的增长图^[59]

Fig. 15 (a) Side-view image of a 430 μm-pitch HC-PBF LPG made by CO₂ laser; (b) The cross-sectional image of a HC-PBF LPG at the grooves; (c) The growth of the transmission spectrum of a HC-PBF LPG sample during fabrication^[59]

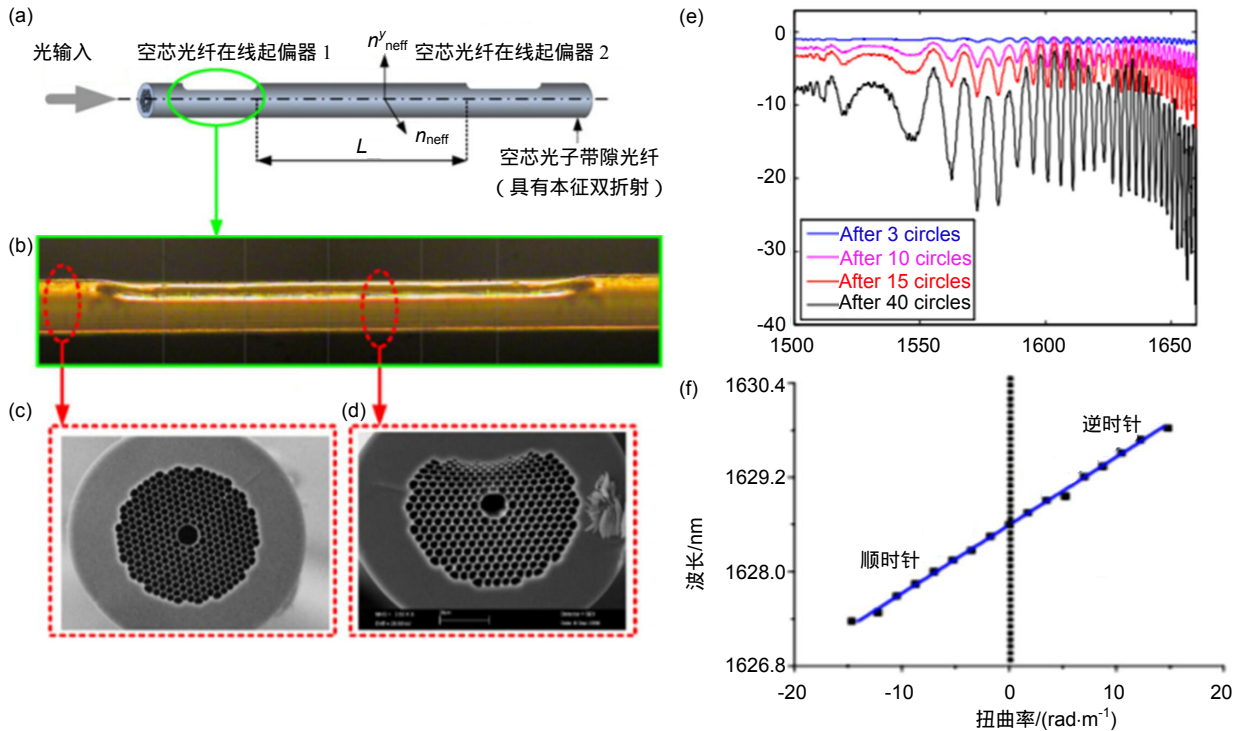


图 16 (a) 全光纤偏振计结构示意图; (b) HC-PBF 上光纤起偏器样品侧视照片, 及对应 HC-PBF 上(c)未加工和(d)加工位置处的截面照片; (e) 531 mm 长偏振计的透射光谱; (f) 147 mm 长偏振计对扭曲率的响应^[62]

Fig. 16 (a) Schematic structure of an all fiber polarimeter; (b) The side-view photo of a optical fiber polarizer in a HC-PBF polarimeter, and the cross-section photos corresponding to (c) the unprocessed and (d) the processed positions; (e) The transmission spectra of a 531-mm-length polarimeter; (f) The response of a 147 mm long polarimeter to the twist rate^[62]

3.6 其它传感应用

3.6.1 飞行粒子传感器

HC-PBF 的中空纤芯还作为微粒子的传送通道和与光相互作用的平台。Bykov 等人^[63]利用 HC-PBF 中双向共 22 mW 的传输光场的梯度力使一个直径 3 μm

的石英微球悬浮在低气压(14 mBar)的光纤中心位置, 并通过改变两个方向传输光(驱动光)的功率比来调节微球在光纤中的位置。利用这个可“飞行”到 HC-PBF 沿线任何位置的微球可实现对光纤沿线特定位置的传感功能。例如通过测量带电荷微球在电场作用下的振

动状态变化, 可以实现 HC-PBF 沿线的电场传感; 通过对微球运行速度的测量, 可以获得 HC-PBF 沿线的气体黏度分布, 推算出对应位置的温度。

3.6.2 HC-PBF 陀螺仪

Digonnet 等人^[64]对基于 HC-PBF(HC-1550-02 型) 光纤环的干涉光纤陀螺仪的性能进行了系统的研究。实验表明, 与基于常规光纤环的光纤陀螺仪相比, HC-PBF 光纤陀螺对克尔效应(Kerr)、瞬态温漂和法拉第效应的灵敏度大大降低。这有助于提高陀螺仪的长期稳定性, 和在热、磁等多种干扰环境下的精度以及系统成本的进一步降低。

Ying 等人^[65]对基于 HC-PBF 和普通单模光纤的谐振光纤陀螺的性能进行了对比分析, 发现 HC-PBF 陀螺的克尔效应, 法拉第和 Shupe 效应引起的性能限制因素分别降低 2~3, 2 和 1 个数量级。对于特定的三角波相位调制 HC-PBF 陀螺, 其克尔效应比普通单模光纤要小约 70 倍。

4 总结

独特的光子带隙原理和多孔结构使 HC-PBF 具有传统光纤所不具备的新特性。这些新特性中, 光波在光纤中空纤芯的低损耗传输尤为重要, 这提供了高效(体积小、功率密度大、距离长等)的光与物质相互作用平台, 同时还减少了光纤材料特性对波导特性的影响。HC-PBF 的微结构包层还具有新颖的机械性、热性能以及物质填充的灵活性。这些新颖的特性将有助于诸如痕量气体/液体传感器、水听器、陀螺仪等重要光纤传感器性能的提升, 以及基于新机理、新材料和新结构的光纤传感系统的形成。

参考文献

- [1] Russell P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, **299**(5605): 358–362.
- [2] 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.
- [3] Cregan R F, Mangan B J, Knight J C, et al. Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. *Science*, 1999, **285**(5433): 1537–1539.
- [4] Poletti F, Petrovich M N, Richardson D J. Hollow-core photonic bandgap fibers: technology and applications[J]. *Nanophotonics*, 2013, **2**(5–6): 315–340.
- [5] Poletti F. Hollow core fiber with an octave spanning bandgap[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(17): 2837–2839.
- [6] Hollow-core photonic bandgap fiber (model HC-1550) datasheet from website of NKT Photonics Corporation[OL]. <https://www.nktp Photonics.com/lasers-fibers/product/hollow-core-photonic-crystal-fibers/>.
- [7] Roberts P J, Couny F, Sabert H, et al. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibres[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(1): 236–244.
- [8] Petrovich M N, Poletti F, Van Brakel A, et al. Robustly single mode hollow core photonic bandgap fiber[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(6): 4337–4346.
- [9] Digonnet M J F, Kim H K, Kino G S, et al. Understanding air-core photonic-bandgap fibers: analogy to conventional fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **23**(12): 4169–4177.
- [10] Fini J M, Nicholson J W, Mangan B, et al. Polarization maintaining single-mode low-loss hollow-core fibres[J]. *Nature Communications*, 2014, **5**: 5085.
- [11] Kim H K, Shin J, Fan S H, et al. Designing air-core photonic-bandgap fibers free of surface modes[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, **40**(5): 551–556.
- [12] West J A, Smith C M, Borrelli N F, et al. Surface modes in air-core photonic band-gap fibers[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(8): 1485–1496.
- [13] Yang F, Jin W, Cao Y C, et al. Towards high sensitivity gas detection with hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(20): 24894–24907.
- [14] Fini J M, Nicholson J W, Windeler R S, et al. Low-loss hollow-core fibers with improved single-modedness[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(5): 6233–6242.
- [15] Wegmuller M, Legré M, Gisin N, et al. Experimental investigation of the polarization properties of a hollow core photonic bandgap fiber for 1550 nm[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(5): 1457–1467.
- [16] Poletti F, Broderick N G R, Richardson D J, et al. The effect of core asymmetries on the polarization properties of hollow core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(22): 9115–9124.
- [17] Bouwmans G, Luan F, Knight J C, et al. Properties of a hollow-core photonic bandgap fiber at 850 nm wavelength[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(14): 1613–1620.
- [18] Wen H, Terrel M A, Kim H K, Digonnet M J F, Fan S. Measurements of the Birefringence and Verdet Constant in an Air-Core Fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(15): 3194–3101.
- [19] Alam M S, Saitoh K, Koshiba M. High group birefringence in air-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(8): 824–826.
- [20] Roberts P J, Williams D P, Sabert H, et al. Design of low-loss and highly birefringent hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(16): 7329–7341.
- [21] Hansen T P, Broeng J, Jakobsen C, et al. Air-guiding photonic bandgap fibers: spectral properties, macrobending loss, and practical handling[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(1): 11–15.
- [22] Wheeler N V, Heidt A M, Baddela N K, et al. Low-loss and low-bend-sensitivity mid-infrared guidance in a hollow-core-photonic-bandgap fiber[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(2): 295–298.
- [23] Slavik R, Marra G, Fokoua E N, et al. Ultralow thermal sensitivity of phase and propagation delay in hollow core optical fibres[J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 15447.
- [24] Dangui V, Kim H K, Digonnet M J F, et al. Phase sensitivity to temperature of the fundamental mode in air-guiding photonic-bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(18): 6669–6684.
- [25] 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.

- [26] Jin W, Cao Y C, Yang F, *et al.* Ultra-sensitive all-fibre photo-thermal spectroscopy with large dynamic range[J]. *Nature Communications*, 2015, **6**: 6767.
- [27] Hoo Y L, Jin W, Ho H L, *et al.* Gas diffusion measurement using hollow-core photonic bandgap fiber[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, **105**(2): 183–186.
- [28] Ritari T, Tuominen J, Ludvigsen H, *et al.* Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2004, **12**(17): 4080–4087.
- [29] Magalhaes F, Carvalho J P, Ferreira L A, *et al.* Methane detection system based on wavelength modulation spectroscopy and hollow-core fibres[C]//*Proceedings of 2008 IEEE SENSORS*, 2008: 1277–1280.
- [30] Parry J P, Griffiths B C, Gayraud N, *et al.* Towards practical gas sensing with micro-structured fibres[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, **20**(7): 075301.
- [31] Wynne R M, Barabadi B, Creedon K J, *et al.* Sub-minute response time of a hollow-core photonic bandgap fiber gas sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, **27**(11): 1590–1596.
- [32] Nwaboh J A, Hald J, Lyngsø J K, *et al.* Measurements of CO₂ in a multipass cell and in a hollow-core photonic bandgap fiber at 2 μm[J]. *Applied Physics B*, 2013, **110**(2): 187–194.
- [33] Benabid F, Couny F, Knight J C, *et al.* Compact, stable and efficient all-fibre gas cells using hollow-core photonic crystal fibres[J]. *Nature*, 2005, **434**(7032): 488–491.
- [34] Xiao L M, Demokan M S, Jin W, *et al.* Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: microhole collapse effect[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, **25**(11): 3563–3574.
- [35] Benabid F. Photonic microcells[C]//*Proceedings of Advanced Photonics Congress*, 2012.
- [36] Hoo Y L, Liu S J, Ho H L, *et al.* Fast response microstructured optical fiber methane sensor with multiple side-openings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(5): 296–298.
- [37] Lehmann H, Brueckner S, Kobelke J, *et al.* Toward photonic crystal fiber based distributed chemosensors[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2005, **5855**: 419–422.
- [38] Li X F, Liang J X, Oigawa H, *et al.* Doubled optical path length for photonic bandgap fiber gas cell using micromirror[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, **50**(6): 06GM01.
- [39] van Brakel A, Grivas C, Petrovich M N, *et al.* Micro-channels machined in microstructured optical fibers by femtosecond laser[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(14): 8731–8736.
- [40] Yang F, Jin W, Lin Y C, *et al.* Hollow-core microstructured optical fiber gas sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, **35**(16): 3413–3424.
- [41] Lin Y C, Wei J, Yang F, *et al.* Pulsed photothermal interferometry for spectroscopic gas detection with hollow-core optical fibre[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 39410.
- [42] Tan Y Z, Jin W, Yang F, *et al.* Hollow-core fiber-based high finesse resonating cavity for high sensitivity gas detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, **35**(14): 2887–2893.
- [43] Yang F, Jin W. All-fiber hydrogen sensor based on stimulated Raman gain spectroscopy with a 1550 nm hollow-core fiber[C]//*Proceedings of 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS)*, 2017: 4.
- [44] Bao X Y, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, **12**(7): 8601–8639.
- [45] Jin W, Ho H L, Cao Y C, *et al.* Gas detection with micro- and nano-engineered optical fibers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, **19**(6): 741–759.
- [46] Lin Y C, Liu F, He X G, *et al.* Distributed gas sensing with optical fibre photothermal interferometry[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(25): 31568–31585.
- [47] Xiao L M, Jin W, Demokan M S, *et al.* Fabrication of selective injection microstructured optical fibers with a conventional fusion splicer[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(22): 9014–9022.
- [48] Cordeiro C M B, dos Santos E M, Cruz C H B, *et al.* Lateral access to the holes of photonic crystal fibers—selective filling and sensing applications[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(18): 8403–8412.
- [49] Huang Y Y, Xu Y, Yariv A. Fabrication of functional microstructured optical fibers through a selective-filling technique[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(22): 5182–5184.
- [50] Bozolan A, Gerosa R M, de Matos C J S, *et al.* Temperature sensing using colloidal-core photonic crystal fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**(1): 195–200.
- [51] Du F, Lu Y Q, Wu S T. Electrically tunable liquid-crystal photonic crystal fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(12): 2181–2183.
- [52] Yan D, Popp J, Pletz M W, *et al.* Highly sensitive broadband Raman sensing of antibiotics in step-index hollow-core photonic crystal fibers[J]. *ACS Photonics*, 2017, **4**(1): 138–145.
- [53] Xuan H F, Jin W, Ju W, *et al.* Low-contrast photonic bandgap fibers and their potential applications in liquid-base sensors[J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, **6619**: 661936.
- [54] de Matos C J S, Cordeiro C M B, dos Santos E M, *et al.* Liquid-core, liquid-cladding photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(18): 11207–11212.
- [55] Wang Y P, Tan X L, Jin W, *et al.* Improved bending property of half-filled photonic crystal fiber[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(12): 12197–12202.
- [56] Pang M, Xuan H F, Ju J, *et al.* Influence of strain and pressure to the effective refractive index of the fundamental mode of hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(13): 14041–14055.
- [57] Pang M, Jin W. Detection of acoustic pressure with hollow-core photonic bandgap fiber[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(13): 11088–11097.
- [58] Yang F, Jin W, Ho H L, *et al.* Enhancement of acoustic sensitivity of hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(13): 15514–15521.
- [59] Wang Y P, Jin W, Ju J, *et al.* Long period gratings in air-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(4): 2784–2790.
- [60] Iadicco A, Ranjan R, Campopiano S. Fabrication and characterization of long-period gratings in hollow core fibers by electric arc discharge[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, **15**(5): 3014–3020.
- [61] Xuan H F, Jin W, Ju J, *et al.* Hollow-core photonic bandgap fiber polarizer[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(8): 845–847.
- [62] Xuan H F, Jin W, Zhang M, *et al.* In-fiber polarimeters based on hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(15): 13246–13254.
- [63] Bykov D S, Schmidt O A, Euser T G, *et al.* Flying particle sensors in hollow-core photonic crystal fibre[J]. *Nature Photonics*, 2015, **9**: 461–465.
- [64] Digonnet M, Blin S, Kim H K, *et al.* Sensitivity and stability of an air-core fiber-optic gyroscope[J]. *Measurement Science & Technology*, 2007, **18**(10): 3089–3097.
- [65] Ying D, Demokan M S, Zhang X, *et al.* Analysis of Kerr effect in resonator fiber optic gyros with triangular wave phase modulation[J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(3): 529–535.

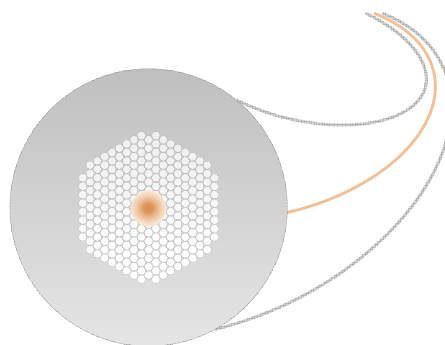
Hollow-core photonic bandgap fibers: properties and sensing technology

Wang Chao^{1,2}, Huang Heyong¹, Meng Donghui³, Zhang Jingchuan³, Ho Hoi Lut², Jin Wei^{2*}

¹School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

²Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;

³Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China



Typical structure of a hollow-core photonic bandgap fiber for optical transmission and sensing

Overview: In this paper, the unique properties and some recent sensing applications of hollow-core photonic bandgap fibers (HC-PBFs) are reviewed. Different to conventional all-solid fibers based on the principle of total internal reflection, in HC-PBF, most of light propagates in a hollow core region inside the fiber (typically > 95%). Hence, the core region of HC-PBF can be a contamination-free light-matter interaction channel with low loss, high energy density and long interaction distance. The air-propagation of light in HC-PBF would also reduce the impacts of fiber material properties (such as infrared absorption, thermooptical effect) on the propagating light, hence offers an efficient platform for the sensing applications such as trace gas/liquid detection, optical fiber gyro sensing. Many high-sensitive single point and distributed/quasi-distributed gas sensing techniques based on HC-PBFs have been developed in recent years. Based on a photothermal interferometric detection method, the near-infrared HC-PBF acetylene sensing system can reach a detection limit of few ppb (parts per billion) level in noise equivalent concentration, and a dynamic range of about six orders of magnitude. The response time of long HC-PBF gas sensing systems can be improved by drilling side-holes along the fiber by using femtosecond laser. The average loss of the holes has been optimized to about 10^{-2} dB per hole. Liquids with different properties can be filled in the core or cladding region for a functional modification or extension. For example, the bandgap of HC-PBF can be adjusted by filling the liquid with specific refractive-index into the fiber. The fine silica-structure in HC-PBF exhibits novel mechanical and thermal properties, which would be beneficial to the sensing applications such as sound wave and vibration detection. The HC-PBF's porous structure can also be locally modified by applying various post-processing techniques, such as local heat treatment, micro-machining and selective filling. This would enable building novel in-fiber devices, for example long period gratings, polarizer and polarization interferometer et al. At present, the development of HC-PBF sensing technology has greatly expanded the sensing ability and application range of optical fiber. It is an important direction for the development of all optical devices and optical integration technology.

Citation: Wang C, Huang H Y, Meng D H, *et al.* Hollow-core photonic bandgap fibers: properties and sensing technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(9): 180151

Supported by National Natural Science Foundation of China (61535004), CAST-BISEE Innovation Foundation (CAST-BISEE2017-015), and Basic Research Foundations of Wuhan University

* E-mail: eewjin@polyu.edu.hk