动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.04.002

光子晶体光纤的设计与应用研究综述

赵丽娟，梁若愚，徐志钮*

（华北电力大学 电气与电子工程学院，河北 保定 071003）

摘 要： 光子晶体光纤具有较强的可设计性，一般通过改变光子晶体光纤包层中空气孔的大小、形状或者排列方式对光纤的传输特性进行调节，以此实现高双折射、高非线性、平坦色散及低限制性损耗等特性。光子晶体光纤的传输特性在不同领域中具有较大的应用价值，如分布式传感、飞秒激光器和气体传感器等。文章首先介绍了光子晶体光纤的结构特征以及与普通单模光纤的区别，在此基础上针对各种典型的光子晶体光纤结构分析了其色散和非线性等传输特性。详细介绍了基于光子晶体光纤的分布式光纤传感、飞秒激光器和气体传感器的传感机理以及达到的传感性能，并与非基于光子晶体光纤的传感器的传感性能进行了比较，验证了基于光子晶体光纤传感器的优异性能。最后对光子晶体光纤的发展及应用进行了总结与展望。

关键词： 光子晶体光纤；结构优化；分布式光纤传感；飞秒激光器；气体传感器

中图分类号： TN253 **文章编号：** 1001－5868(2020)04－0464－08

Review of Designs and Applications of Photonic Crystal Fiber

ZHAO Lijuan, LIANG Ruoyu, XU Zhiniu

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN)

Abstract: Photonic crystal fiber (PCF) can be designed flexibility. In general, the propagation properties of the PCF are adjusted by changing the sizes, shapes or arrangement of the air holes, and then the PCF with high birefringence, high nonlinearity, flattened dispersion and low confinement loss can be obtained. PCF has potential applications in different fields, such as distributed optical fiber sensor, femtosecond laser, gas sensor and so on. In this paper, firstly, the structure characteristics of PCF and the difference between the traditional single-mode fiber (SMF) and the PCF are introduced. Secondly, their typical structures and propagation properties are analyzed. Thirdly, the sensing mechanisms and performance of distributed optical fiber sensor, femtosecond laser and gas sensor based on the PCF are introduced in detail. The results show that compared with the traditional SMF, the PCF can achieve more excellent performance in applications. Finally, the developments and applications of PCF are summarized and prospected.

Key words: photonic crystal fiber; structure optimization; distributed optical fiber sensor; femtosecond laser; gas sensor

收稿日期：2020－02－08.

基金项目：国家自然科学基金项目(51607066,61377088)；河北省自然科学基金项目(E2019502177)；中央高校基本科研业务费专项资金项目(2020YJ005，2019MS090，2019MS085).

* **通信作者：**徐志钮 **E-mail：** wzcnjxx@sohu.com

0　引言

光子晶体光纤(Photonic Crystal Fiber，PCF)的概念在 1992 年由 Russel 首次提出，其结构与常规光纤具有很大的不同，传统光纤为实体的纤芯和包层，且材料通常均为二氧化硅，而光子晶体光纤的包层引入了按一定规则排列的空气孔。它具有传统光纤不能实现的“奇异”特性，例如抗弯曲、灵活的色散特性、非线性特性和耐辐照特性等。在光通信、光器件、光传感以及激光领域具有广阔的应用前景。

1996 年，英国南安普顿大学光电子学研究中心的 Knight 等[1]利用堆砌法制作出第一根光子晶体光纤，随后，又制作出第一根光子带隙型光子晶体光纤[2]。光子带隙型光子晶体光纤的出现使光子晶体与光纤光学相结合，从此光纤光学的内容有了新的发展。

光子晶体具有优异的可设计性，随着空气孔大小和间距的变化，光子晶体光纤的各种传输特性也会随之改变。从第一根光子晶体光纤问世至今，对于光子晶体的研究已经从理论学习转向结构设计与实际应用，并取得了许多进展。光子晶体光纤的双折射特性、负平坦色散以及非线性效应等传输特性都有很大程度的提高。2019 年，于锦华等[3]报道的内包层椭圆孔光子晶体光纤在波长 1 550 nm 处获得高达 4.22×10^{-2} 的双折射系数，109.65 $(W\cdot km)^{-1}$ 的高非线性系数和低至 −14 ps/(nm·km)的色散值；2020 年，Sun 等[4]报道的光子晶体光纤在波长 1 550 nm 处双折射系数为 3.72×10^{-2}，色散值低至 −1 343.46 ps/(nm·km)，并且具有宽的色散平坦特性。光子晶体光纤在许多应用领域都展现了比普通光纤更为优异的性能，如光纤通信、光纤传感、光器件制作和激光器制造等。

本文分析了光子晶体光纤与普通单模光纤的区别，针对各种典型的光子晶体光纤结构分析了其色散和非线性等传输特性。然后详细介绍了基于光子晶体光纤的分布式光纤传感、飞秒激光器和气体传感器的传感机理以及达到的传感性能，并与非基于光子晶体光纤的传感器的传感性能进行了比较，验证了基于光子晶体光纤传感器的优异性能。最后对光子晶体光纤未来的发展进行了展望，为其进一步的研究提供了理论基础，具有重要的参考价值。

1　光子晶体光纤结构及设计

1.1　光子晶体光纤介绍

光子晶体光纤在光纤包层中具有二维周期性排列的空气孔，包层材料一般为固体硅。光子晶体光纤具有实芯和空芯两种结构，按照导光机理还可以分为折射率导光型和带隙引导型。一般来说，实芯光子晶体光纤采用的是全折射率导光机制，空芯光纤采用的是光子带隙导光机制[5]。

Knight 等拉制出了历史上第一根光子晶体光纤，其导光机制与传统光纤的全内反射导光机制类似，并且具有无截止单模传输特性[6-7]，使光纤的发展有了新的突破。光子带隙型光子晶体光纤的出现极大推动了非线性光纤光学的发展，其依靠光子带隙原理进行导光。与普通单模光纤相比，光子晶体光纤可以灵活地改变包层结构，用来削弱或加强光纤的非线性效应，灵活地设计色散和色散斜率，提供宽带色散补偿，它还可以在较大频率范围内支持光纤单模传输，具有更优异的性能。

1.2　光子晶体光纤结构优化

光子晶体光纤的传输特性会随着光纤包层空气孔的形状、排列方式和包层材料的变化而变化。由于制作工艺的限制，目前光子晶体光纤的设计主要围绕改变空气孔的形状和排列方式进行。光子晶体光纤的六角对称性越低，得到的光纤双折射系数越高。在实际制造过程中横截面中的圆形空气孔并不是理想的圆，光纤内部由于应力不均匀也会引起折射率分布不均匀，导致 HE11 模在不同的偏振方向具有不同的传播速度，从而出现双折射现象。双折射效应可以有效防止光信号的两种偏振模式在传播过程中的能量耦合[8]，在传统保偏光纤中也可以观察到双折射效应，但是传统保偏光纤的双折射系数多为 $10^{-5}\sim10^{-4}$ 量级，而光子晶体光纤的双折射系数通常可达 10^{-2} 量级[9-14]。2000 年英国 Bath 大学设计了一种光子晶体光纤，这种光子晶体光纤由于减少了一排空气孔使得光纤的双折射系数首次达到 10^{-3} 量级。2019 年于锦华等[3]设计了一种内包层椭圆孔光子晶体光纤，其结构如图 1 所示。该结构在靠近纤芯处引入了椭圆空气孔，使得光子晶体光纤在波长 1 550 nm 处的双折射系数高达 4.22×10^{-2}。此种高双折射光纤可以广泛应用于波分复用及偏振可控的精密光纤传感器和光纤通信等领域。

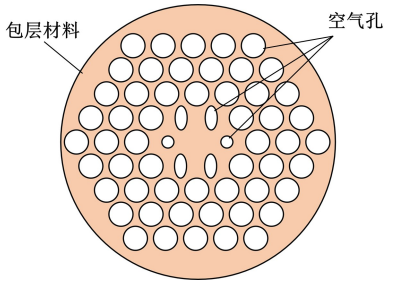


图 1 内包层椭圆光子晶体光纤结构示意图

除双折射之外，光子晶体光纤的色散、限制性损耗以及非线性效应等奇异特性也是衡量光子晶体光纤的主要指标[15]。光能量在光纤中传输时，会出现不同的传输速度，引起色散。光纤的色散会导致光脉冲在传输过程中出现脉冲展宽，从而引起码间串扰，影响通信质量，大大降低光纤的通信容量和通信距离。在设计光子晶体光纤时通过改变光纤的内部结构可以调节光纤的色散[16-18]。例如改变光子晶体光纤的纤芯直径可以在极宽的波长范围内调节零色散点，通过减小包层中空气孔的大小可以减小零色散点处群速度色散的斜率[19-20]。2020 年，Sun 等[4]设计了一种由椭圆空气孔组成的压缩三角晶格光子晶体光纤，在 S+C+L+U 的波长带上具有低至 −1 343.46±6.74 ps/(nm·km)的平坦色散，相较于其他设计的光纤结构，具有更低的色散值和更宽的色散平坦，其结构如图 2 所示。

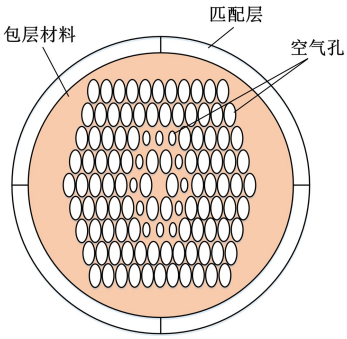


图 2 压缩三角晶格光子晶体光纤结构

此种光子晶体结构在 1 450～1 700 nm 波长范围内具有较大的负色散平坦特性。平坦色散光纤可使光信号的传输距离增长，在密集波分复用光通信系统中具有应用价值。另外负色散可以应用于超宽色散补偿、短波长光孤子传输、超短脉冲激光器/放大器、高功率光传输、高功率 PCF 激光器、极短拍长的偏振保持光纤、光纤传感器和光开关等。

光子晶体光纤的非线性效应对于光脉冲的传输具有一定的影响。光子晶体光纤模场面积越小，非线性效应越强。当光脉冲在高非线性光纤中传输时，在光纤色散和非线性的共同作用下其光谱宽度被扩展上百倍，产生超连续谱[21]。超连续谱在超短脉冲压缩、激光光谱学等方面具有较大的应用潜力。

图 3 为 Liao 等[22]设计的高非线性光子晶体光纤结构示意图。该结构改变了空气孔的排列方式，加入了椭圆形软玻璃棒(SF57)，使其获得了较高的非线性系数，当前已设计出的光子晶体光纤的非线性系数在 1 550 nm 处基本处于 100 (W·km)$^{-1}$ 以下，而图 3 所示的光纤结构非线性系数达到 300 (W·km)$^{-1}$ 以上，具有较高的非线性效应。此种高非线性光子晶体光纤可应用于光谱测量、光传感、干涉测量、飞秒激光器以及密集波分复用通信系统等领域，具有较高的应用价值。

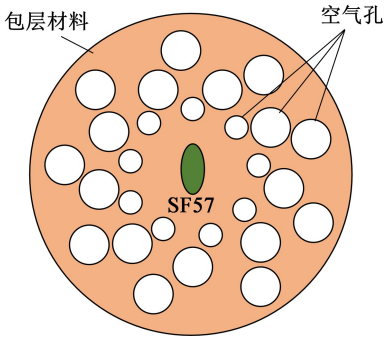


图 3 非线性较高的光子晶体光纤结构

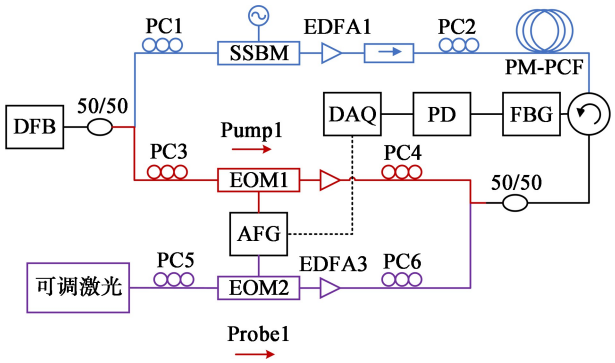
2 光子晶体光纤的典型应用

2.1 分布式传感

分布式光纤传感系统是一种利用光纤作为传感敏感元件和传输信号介质的传感系统[23-24]，可以对光纤成千上万个点的温度和应变信息进行测量[25-26]。目前基于布里渊散射的分布式光纤传感技术的传感点数已经超过 100 万个，与传统的点式光纤传感器相比，分布式传感具有体积小、测量精度高、抗电磁干扰等优势。目前分布式光纤传感主要围绕应力和温度两方面，当外界温度和应力发生变化时，作为敏感元件的光纤的反射谱参数会随之改变。通过测量反射谱的相关特性，会得到外界因素的变化情况。虽然分布式传感以单模光纤为主，但光子晶体光纤在结构和传输特性上具有独特优点，导致其在传感精度和范围上具有一定优势。

2017 年，Teng 等[27]成功利用薄直径纯二氧化硅光子晶体光纤设计了一种分布式静水压力传感系统，此系统通过温度补偿排除了温度干扰，实现了静

水压力传感。其实验装置如图 4 所示[27]。



DBF：分布反馈式激光器；PC：偏振控制器；SSBM：单边带调制器；EOM：电光调制器；EDFA：掺铒光纤放大器；DAQ：数据采集；PD：光电探测器；FBG：光纤布拉格光栅；PM－PCF：保偏光子晶体光纤；AFG：模拟函数发生器；Pump：泵浦光；Probe：探测光

图 4　静水压力传感实验装置

图 4 中 PM-PCF 表示采用的是保偏光子晶体光纤，与普通保偏光纤相比，光子晶体光纤具有更低的温度系数，不易受周围环境影响[28]，另外 PM-PCF 具有多孔结构，更容易受到气压的影响发生形变，从而引起双折射发生较大变化。因此，通过检测双折射频移的变化可以测量气压的变化。在 PM-PCF 上设置的两个测量点的双折射频移 Δf_B (Birefringence-Induced Frequency Shift，BireFS)随压力 p 变化的拟合曲线如图 5[27]所示。

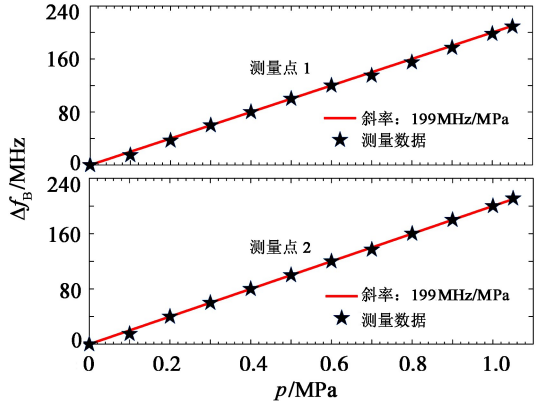
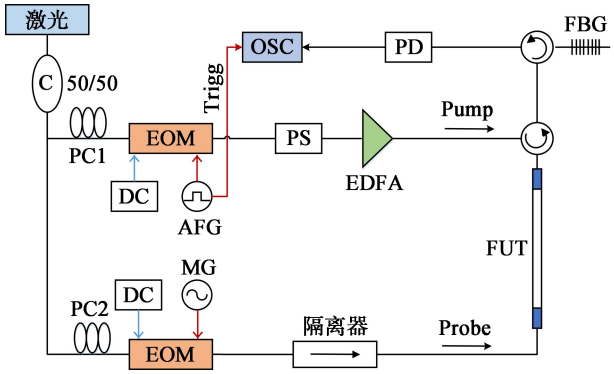


图 5　PM-PCF 双折射频移随压力的变化拟合曲线

从图 5 中可以看出，得到的拟合结果显示此静水压力传感系统的灵敏度约为 199 MHz/MPa。此外该分布式光纤传感系统得到了 20 cm 的空间分辨率，测量精度高达 0.025 MPa，此分布式静水压力传感系统排除了温度的干扰，测量环境温度可达几百摄氏度，适用于油井监测，提高采油效率。

除了分布式压力传感，基于光子晶体光纤还可以实现分布式温度或应变传感。在分布式温度传感系统中，普通单模光纤可以有效测量 1 100 ℃高温，但是当温度升高至 1 200 ℃时，普通单模光纤的损耗立即增大，使传感精度严重下降。2018 年，徐鹏柏[29]设计了一种利用光子晶体光纤（NKT Photonics Ltd，LMA-10）作为传感元件的分布式高温测量系统，图 6 为该系统实验装置示意图[28]。



C：耦合器；PC：偏振控制器；EOM：电光调制器；DC：直流电源；AFG：任意函数发生器；MG：微波源；PS：扰偏器；EDFA：掺铒光纤放大器；FUT：待测光纤；FBG：光纤布拉格光栅；PD：光电探测器；OSC：示波器

图 6　分布式光纤高温测量实验装置

图 6 所示的分布式光纤高温测量系统在 0～1 000 ℃温度范围内温度系数 σ 为 1.42 MHz/℃，在 1 000～1 200 ℃温度范围内多次测量曲线重合度较好，说明光子晶体光纤在 1 000 ℃以上的高温传感中可以不用退火直接使用。与普通单模光纤(SMF)实验结果的比较如图 7[28]所示。从图中可以看出，光子晶体光纤在分布式高温传感系统中具有比普通单模光纤更高的可应用性，适用于高温传感，且精度更高。

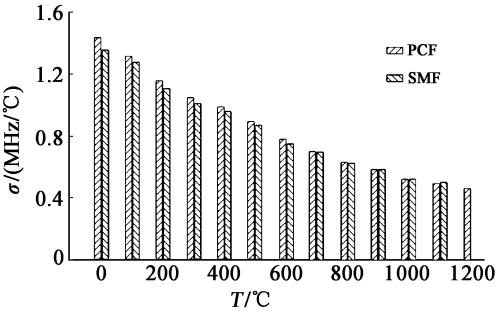


图 7　PCF 与 SMF 温度系数的比较

2.2　飞秒激光技术

飞秒激光是一种以脉冲形式运转的激光，具有

持续时间短、瞬间功率高、在超细微空间可以精确聚焦定位等特点。从目前的发展来看，飞秒激光技术的发展关键是提高激光器输出的单脉冲能量以及平均功率。基于普通单模光纤的飞秒激光器由于光纤纤芯面积的限制，超短激光脉冲在光纤中传输时受到非线性效应和光纤色散的影响，会导致脉冲畸变从而限制输出功率。而光子晶体光纤由于自身灵活的可设计性，可以实现比普通单模光纤高两个数量级以上的大模场面积和更低的非线性效应，同时可以灵活地调节零色散点以及色散斜率，达到提高单脉冲能量和平均功率的目的[30-31]。此外，掺杂稀土元素离子的光子晶体光纤作为增益介质，具有增益谱线宽、转换效率高、散热效果好的优点，同时可以将激光光束封闭在纤芯内，不受外界环境影响，能够适应多变的环境。与普通固体飞秒激光器[32]相比，光纤飞秒激光器还具有成本低、结构紧凑、散热性能好的优势，更加适用于激光领域。

2007 年，Ortac 等[33]利用一根掺杂的光子晶体光纤实现孤子锁模，获得了平均功率为 880 mW、单脉冲能量为 16.5 nJ、脉冲宽度为 500 fs 的稳定锁模输出；之后，又采用一根掺 Yb^{3+} 光子晶体光纤作为增益介质，获得了平均功率为 2.7 W、单脉冲能量为 265 nJ、脉冲宽度为 400 fs 的稳定锁模输出[34]。

同时国内也开展了对基于光子晶体光纤的飞秒激光器的设计研究，天津大学首先设计出第一台全 PCF 飞秒激光放大系统[35]，实现了 39 fs 的脉宽；张玉颖等[36]设计了一种自由耦合输出的高功率全正色散光子晶体光纤飞秒激光器，采用一段 1.5 m 长、掺杂了 Yb^{3+} 的大模场面积光子晶体光纤作为激光增益介质，其实验装置图[35]如图 8。图中的 SESAM 为高调制深度半导体可饱和吸收镜[37]。此装置将光子晶体光纤作为激光增益介质，最终得到平均功率为 2.5 W、脉冲宽度为 2 ps 的高功率超短脉冲，对应单脉冲能量为 44 nJ，脉冲经腔外压缩至 430 fs，具有自由耦合输出且输出稳定的特点。

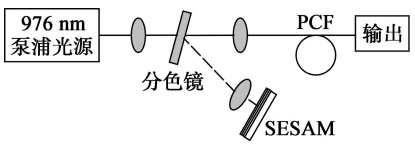


图 8 飞秒激光器实验装置图

2.3 气体传感器

气体传感器的关键指标是传感器响应速度以及传感精度。与普通单模光纤相比，基于光子晶体光纤的气体传感器可以根据功能需求对光纤中的气孔进行设计，增强光与物质的作用效果，提高传感器的灵敏度[38]。目前，基于光子晶体光纤的气体传感器主要分为干涉型、光栅型、光谱吸收型和表面等离子体共振型。

2004 年，Ritari 等[39]首次将光子晶体光纤与气体传感相结合，其系统装置示意图如图 9[40]。

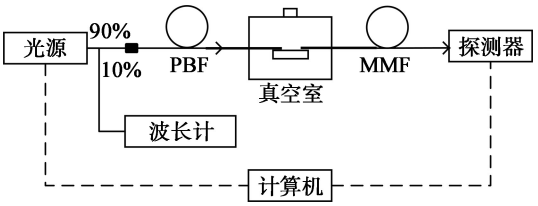


图 9 光谱吸收型气体检测实验装置图

如图 9 所示，将空芯光子晶体光纤连接在两根普通单模光纤之间作为吸收池，气体可以通过连接缝隙进入纤芯区域，Ritari 等利用此装置测得了吸收池中乙炔气体吸收光谱的特征吸收峰，这为气体检测提供了新的思路和方向。同时，国内也设计出了基于光子晶体光纤的气体传感器，杨远洪等[41]提出了一种基于 Sagnac 干涉仪的干涉型保偏光子晶体光纤氢气传感器，利用钯吸氢后体积膨胀这一特性，在光纤表面涂覆一层钯银合金氢敏膜，氢敏膜受氢气浓度影响，体积产生变化，挤压保偏光子晶体光纤，调制其双折射，进而改变光纤透射光谱的波长，再通过测量 Sagnac 干涉仪输出光谱中特定波谷的波长值实现氢气传感。此传感器在氢气浓度为 0%～1%时灵敏度为 1.037 nm/%，在氢气浓度为 1%～4%时灵敏度为 0.133 nm/%。2017 年，杨建春等[42]设计的长周期光栅型甲烷传感器在光纤内表面涂覆一层由 cryptophane-A-6Me 与聚丙烯酸碳-纳米管/聚丙烯胺盐酸盐构建的敏感薄膜，当薄膜接触到的甲烷浓度发生变化时，会引起薄膜折射率发生变化并使得光纤透射光谱的共振波长发生蓝移，进而实现对甲烷气体浓度的传感，最终达到的甲烷浓度传感灵敏度为 1.078 nm/%。然而干涉型、光谱吸收型和光栅型气体传感器检测灵敏度较低且制造工艺较复杂，而表面等离子体共振（Surface Plasmon Resonance，SPR）气体传感器具有较高的灵敏度和稳定性，更适用于多变环境的传感。

表面等离子体效应是指当偏振光以一定角度入射到棱镜端面，在棱镜与金属交界处会产生表面等离子波，一旦入射波与上述表面等离子波相遇，如果

满足相位匹配条件，此时金属膜内的自由电子就会发生共振[43-44]。

在光子晶体光纤气体传感器中，会在包层中特定的空气孔内镀上一层金属薄膜并填充气体样品，当光波在光子晶体光纤中传播时，部分光会从纤芯泄露到包层中，进而产生限制性损耗，当产生表面等离子体共振效应时，光纤中光传输的能量衰减达到最大，即限制性损耗达到最大，根据不同波长下的限制性损耗大小，绘制出曲线图，便可以得到损耗光谱图。在损耗光谱图中，可以通过损耗曲线判断表面等离子体的强度，继而得到共振波长，而共振波长的强度受到待测样品折射率的影响，介质改变会影响共振峰的移动，通过计算便可以得到待测气体折射率的变化，从而实现气体传感[45]。

2018 年，Liu 等[46]设计了一种基于光子晶体光纤的表面等离子体共振传感器，传感器横截面如图 10 所示。

图中标号为 1，2 的空气孔内层分别涂覆了甲烷和氢气的敏感材料和一层金属薄膜，此气体传感器成功检测到了甲烷和氢气的混合气体。其甲烷气体的检测灵敏度为 −1.99 nm/%，氢气的检测灵敏度为 −0.19 nm/%，可用于特殊环境下的气体检测。

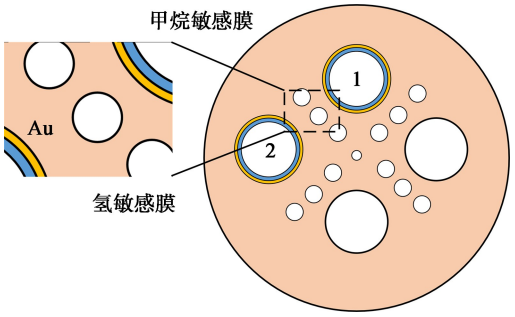


图 10　基于 PCF 的气体传感器横截面示意图

与传统的气体传感器相比，基于光子晶体光纤的气体传感器成本低、可设计性高、抗电磁干扰能力强，同时具有较高的检测灵敏度和可实时监测和免标记等特点，在气体传感方面具有优异的性能。

3　结论及展望

本文介绍了光子晶体光纤的发展过程，对比分析了其与普通光纤的区别，根据不同传输特性给出了当前光子晶体光纤设计中性能最好的设计结构。在目前研究中，双折射系数最高达 4.22×10^{-2}，非线性系数最高达 900 $(W\cdot km)^{-1}$，负色散低至 −1 343.46±6.74 ps/(nm·km)，且在 1 450～1 700 nm 范围内具有较大范围的负色散平坦特性。然后着重介绍了光子晶体光纤在分布式传感、飞秒激光器和气体传感器等领域的基本原理、应用实例和达到的性能。可以看出，与普通光纤相比，光子晶体光纤自身的可设计性及其优异的传输特性使其在传感及光器件制造方面具有更大的应用价值。今后可以在光纤材料选择和结构方面作进一步研究以提高其传感精度、拓展传感领域。

参考文献：

[1] Knight J C, Birks T A, Russell P St J. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. Opt. Lett., 1996, 21(19): 1547-1549.

[2] Knight J C, Broeng J, Birks T A. Photonic band gap guidance in optical fibers[J]. Science, 1998, 282(5393): 1476-1478.

[3] 于锦华，励强华，于程程. 内包层椭圆孔光子晶体光纤光学特性分析[J]. 光通信研究，2019，4(7)：36-39.
Yu Jinhua, Li Qianghua, Yu Chengcheng. Optical properties analysis of photonic crystal fiber based on inner elliptical holes [J]. Study on Optical Communications, 2019, 4(7): 36-39.

[4] Sun C, Wang W, Jia H. A squeezed photonic crystal fiber for residual dispersion compensation with high birefringence over S+C+L+U wavelength bands[J]. Opt. Commun., 2020, 458: 124757.

[5] 周灵德，李小甫，余海湖，等. 光子晶体光纤研究与应用[J]. 功能材料，2014，12(45)：12006-12018.
Zhou Lingde, Li Xiaofu, Yu Haihu, et al. Research progress and applications of photonic crystal fiber[J]. J. of Functional Materials, 2014, 12(45): 12006-12018.

[6] Birks T A, Knight J C, Russell P St J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. Opt. Lett., 1997, 22(13): 961-963.

[7] Monro T M, Bennett P J, Broderick N G R, et al. Holey fibers with random cladding distributions[J]. Opt. Lett., 2000, 25(4): 206-208.

[8] 曹合心，张　瀚，吕辅勇，等. 保偏光纤双折射压力敏感性分析[J]. 系统仿真技术，2019，15(2)：87-92.
Cao Hexin, Zhang Han, Lv Fuyong, et al. Pressure sensitivity analysis of polarization-maintaining fiber birefringence [J]. System Simulation Technol., 2019, 15(2): 87-92.

[9] 陈　纯. 高双折射光子晶体光纤特性及应用研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2017.
Chen Chun. High birefringence properties of photonic crystal fiber and its application [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.

[10] Jiang G, Fu Y, Huang Y. High birefringence rectangular-hole photonic crystal fiber [J]. Optical Fiber Technol.,

2015, 8(10): 163-171.

[11] Liu Q, Liu Q, Sun Y, et al. A high-birefringent photonic quasi-crystal fiber with two elliptical air holes[J]. Optik, 2019, 184: 10-15.

[12] 杨天宇, 姜海明, 王二垒, 等. 一种近红外波段的高双折射高非线性光子晶体光纤[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(3): 350-354.

Yang Tianyu, Jiang Haiming, Wang Erlei, et al. Photonic crystal fibers with large birefringence and high nonlinearity in near-infrared band[J]. J. of Infrared and Millimeter Waves, 2016, 35(3): 350-354.

[13] 刘 敏, 侯静云, 杨 虚, 等. Design of photonic crystal fiber with elliptical air holes to achieve simultaneous high birefringence and nonlinearity[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(1): 389-393.

Liu Min, Hou Jingyun, Yang Xu, et al. Design of photonic crystal fiber with elliptical air holes to achieve simultaneous high birefringence and nonlinearity[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(1): 389-393.

[14] 盛 勇, 陆 驹, 姚高峰, 等. 椭圆空气孔矩形结构光子晶体光纤的高双折射及限制损耗分析[J]. 光子学报, 2014, 43(1): 50-53.

Sheng Yong, Lu Ju, Yao Gaofeng, et al. Analysis of high birefringent and confinement loss of elliptical air-holes rectangular photonic crystal fiber[J]. Acta Photonic Sinica, 2014, 43(1): 50-53.

[15] 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.

Wang Wei, Hou Lantian. Present situation and future development in photonic crystal fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(2): 43-58.

[16] 李绪友, 许振龙, 凌卫伟, 等. 高非线性色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 119-124.

Li Xuyou, Xu Zhenlong, Ling Weiwei, et al. Numerical simulation and analysis of photonic crystal fiber with high nonlinearity and flattened chromatic dispersion[J]. Chinese J. of Lasers, 2014, 41(5): 119-124.

[17] 葛祥友, 李 平, 王效杰, 等. 新型高双折射及色散平坦光子晶体光纤研究[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 332-335.

Ge Xiangyou, Li Ping, Wang Xiaojie, et al. Study on a new type high birefringence and flattened dispersion photonic crystal fiber[J]. J. of Appl. Opt., 2006, 27(4): 332-335.

[18] 鞠晓丹, 刘兆伦, 倪正华, 等. 光子晶体光纤在光通信中的色散补偿应用[J]. 光通信技术, 2004, 7(7): 26-28.

Ju Xiaodan, Liu Zhaolun, Ni Zhenghua, et al. Application of dispersion compensation of photonic crystal fibers for modern communication systems[J]. Optical Communication Technol., 2004, 7(7): 26-28.

[19] Knight J C, Arriaga J, Birks T A. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2000, 12(7): 807-809.

[20] Ferrando A, Silvestre E, Miret J J. Nearly zero ultraflattened dispersion in photonic crystal fibers[J]. Opt. Lett., 2000, 25(11): 790-792.

[21] 刘 来. 特种光纤中的非线性效应及其应用研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2014.

Liu Lai. Study on nonlinear effects in specialty optical fibers and their applications[D]. Jilin: Jilin University, 2014.

[22] Liao J, Huang T, Xiong Z, et al. Design and analysis of an ultrahigh birefriengent nonlinear spiral photonic crystal fiber with large negative flattened disperison[J]. Optik, 2017, 1(54): 42-49.

[23] 张智娟, 陈飞飞, 徐志钮, 等. 分布式光纤传感中布里渊动态光栅研究现状与发展趋势[J]. 半导体光电, 2018, 39(4): 455-461.

Zhang Zhijuan, Chen Feifei, Xu Zhiniu, et al. Research status and development trends of Brillouin dynamic grating in distributed optical fiber sensing [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(4): 455-461.

[24] Xu Z, Zhao L. Estimation of error in Brillouin frequency shift in distributed fiber sensor[J]. IEEE Sensors J., 2020, 20(4): 1829-1837.

[25] Xu Zhiniu, Zhao Lijuan. Accurate and ultra-fast estimation of Brillouin frequency shift for distributed fiber sensors[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 303: 111822.

[26] 徐志钮,胡宇航,赵丽娟,等.基于单斜坡法的光电复合海缆温度、应变快速测量方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(5): 202-208.

Xu Zhiniu, Hu Yuhang, Zhao Lijuan, et al. Rapid temperature and strain measurement method for optic-electric composite submarine cable based on slope-assisted method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 202-208.

[27] Teng L, Zhang H, Dong Y, et al. Temperature-compensated distributed hydrostatic pressure sensor with a thin-diameter polarization-maintaining photonic crystal fiber based on Brillouin dynamic gratings[J]. Opt. Lett., 2016, 41(18): 4413-4416.

[28] 滕 雷. 基于布里渊动态光栅的高精度分布式横向压力传感器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

Teng Lei. High sensitive distributed transverse load sensor based on Brillouin dynamic gratings[D]. Harbin: Harbin Institute of Technol., 2015.

[29] 徐鹏柏. 基于特种光纤布里渊散射效应的分布式传感技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

Xu Pengbai. Distribution optical fiber sensing based on stimulated Brillouin scattering in special optical fibers[D]. Harbin: Harbin Institute of Technol., 2018.

[30] 胡明列, 宋有建, 刘博文, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展及其前沿应用[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1660-1670.

Hu M, Song Y, Liu B, et al. Development and advanced

applications of femtosecond photonic crystal fiber laser technique[J]. Chinese J. of Lasers, 2009, 36(7): 1660-1670.

[31] 王清月，胡明列，宋有建，等. 用大模场光子晶体光纤获得高功率飞秒激光[J]. 中国激光，2007，34(12)：1603-1606.
Wang Qingyue, Hu Minglie, Song Youjian, et al. Large mode area photonic crystal fiber laser output high average power femtosecond pulses[J]. Chinese J. of Lasers, 2007, 34(12): 1603-1606.

[32] 于　晨，田文龙，朱江峰，等. 高功率掺镱全固态飞秒激光器[J]. 红外与激光工程，2019，48(11)：40-46.
Yu Chen, Tian Wenlong, Zhu Jiangfeng, et al. High power Yb-doped all-solid-state femtosecond lasers[J]. Infrared and Laser Engin., 2019, 48(11): 40-46.

[33] Ortag B, LimPert J, Tunnermann A. High-energy femtosecond Yb-doped fiber laser operating in the anomalous dispersion regime[J]. Opt. Express, 2007, 32(15): 2149-2151.

[34] Ortac B, Schmidt O, Schreiber T, et al. High-energy femtosecond Yb-doped dispersion compensation free fiber laser[J]. Opt. Express, 2007, 15(17): 10725-10732.

[35] Liu B W, Hu M L, Fang X H, et al. High-power wavelength tunable photonic crystal fiber based oscillator amplifier frequency shifter femtosecond laser system and its applications for material microprocessing[J]. Laser Phys. Lett., 2009, 6(1): 44-48.

[36] 张玉颖，张　驰，胡明列，等. 自由耦合输出的高功率全正色散光子晶体光纤飞秒激光器[J]. 中国激光，2010，37(1)：64-67.
Zhang Yuying, Zhang Chi, Hu Minglie, et al. Free output coupler high-power all normal dispersion femtosecond photonic crystal fiber laser[J]. Chinese J. of Lasers, 2010, 37(1): 64-67.

[37] 张海鹃，崔雪龙，徐金龙，等. 基于半导体可饱和吸收镜锁模的 Yb：$NaY(WO_4)_2$ 飞秒激光器[J]. 中国激光，2012，39(11)：10-12.
Zhang Haikun, Cui Xuelong, Xu Jinlong, et al. CW mode locked Yb：$NaY(WO_4)_2$ femtosecond laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. Chinese J. of Lasers, 2012, 39(11): 10-12.

[38] 阴亚芳，周　圆，杨　祎，等. 基于光子晶体光纤的气体传感系统设计与实现[J]. 半导体光电，2015，36(5)：811-814.
Yin Yafang, Zhou Yuan, Yang Yi, et al. Design and implementation of gas sensing system based on photonic crystal fiber[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(5): 811-814.

[39] Ritari T, Niemi T, Ludvigsen H, et al. Polarization-mode dispersion of large mode-area photonic crystal fibers[J]. Optics Communications, 2003, 226(1): 233-239.

[40] 景　磊. 新型光子晶体光纤气体传感器研究[D]. 天津：天津大学，2012.
Jing L. Research on novel gas sensors with photonic crystal fibers[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

[41] 杨远洪，王　欢，杨福玲，等. 基于 Sagnac 干涉仪的保偏光子晶体光纤氢气传感器[J]. 光学学报，2014，34(8)：85-89.
Yang Y, Wang H, Yang F, et al. Polarization maintaining photonic crystal fiber hydrogen sensor based on Sagnac interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 85-89.

[42] Yang J C, Xin C, Shen R, et al. High sensitivity photonic crystal fiber long period grating methane sensor with cryptophane-A-6Me absorbed on a PAA-CNTs/PAH nanofilm[J]. Opt. Express, 2017, 25(17): 20258-20267.

[43] Dash J N, Jha R. SPR biosensor based on polymer PCF coated with conducting metal oxide[J]. IEEE Photonics Technol. Lett., 2014, 26(6): 595-598.

[44] Dash J N, Jha R. Highly sensitive D shaped PCF sensor based on SPR for near IR[J]. Optical & Quantum Electronics, 2016, 48(2): 1-7.

[45] 王　猛. 光子晶体光纤 SPR 气体传感机理及关键技术研究[D]. 江苏：中国矿业大学，2019.
Wang Meng. Research on mechanism and key technologies of photonic crystal fiber SPR gas sensing[D]. Jiangsu: China University of Mining and Technol., 2019.

[46] Liu H, Wang M, Wang Q, et al. Simultaneous measurement of hydrogen and methane based on PCF-SPR structure with compound film-coated side-holes [J]. Optical Fiber Technology, 2018, 5(7): 1-7.

作者简介：

赵丽娟(1981—)，女，博士，副教授，主要研究方向为光纤传感与光纤通信；

徐志钮(1979—)，男，博士，副教授，主要研究方向为分布式光纤传感及其在电气设备状态监测和故障诊断中的应用。