

文章编号 1004-924X(2021)10-2316-14

光子晶体光纤气体吸收光谱探测技术研究进展

李 晋^{1,2,3*}, 闫 浩¹, 孟 杰¹

(1. 东北大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

3. 河北省微纳精密光学传感与测量技术重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:为了研制结构紧凑、低功耗和本质安全的激光吸收光谱气体检测系统,光子晶体光纤气体检测技术受到广泛关注。通过对光子晶体光纤结构参数的优化,可将 90% 以上的光场模式束缚在纤芯附近,从而将气体检测的相对灵敏度提升到 60% 以上,限制损耗降低到 10^{-8} dB/m。对光学模式的调控依赖于纤芯微结构参数和包层光子晶体空气孔的阵列排布的优化,以期获得更高的相对检测灵敏度和更低的光学损耗;接着,针对端头反射式、光纤光栅波长调制型和不同光纤复合型的气体检测技术进行了分析。端头反射式结构最为简单,然而难以保证气体分子的高效交换。结合 Bragg 光栅和长周期光栅等特种光纤结构可以构建光学谐振腔,有效增强光信号与气体分子的吸收光程。结合不同类型光纤和气体敏感材料的复合光纤结构气体探头的设计,极大地优化了气体传感的选择性和灵敏度等特性。延长光纤至 1 m 以上,或采用环形嵌入方式可有效增加光程,获得 10^{-12} 量级的检测限。掺铒光纤的引入可有效补偿光纤环内的光学损耗。最后,分析了多孔环形和柚子型等大空芯直径光子晶体光纤的气体检测性能和未来研究方向。针对光子晶体光纤气体激光光谱吸收检测技术,未来需要在性能优化、系统集成和环境适应性方面开展研究,从而为冶金化工等行业中危险气体实时监测仪器的研制提供技术保障。

关键词:光子晶体光纤;气体检测;激光光谱吸收;光纤传感;空芯光纤

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.2021.0021

Research progress of gas absorption spectrum detection technology based on photonic crystal fiber

LI Jin^{1,2,3*}, YAN Hao¹, MENG Jie¹

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. Hebei Key Laboratory of Micro-Nano Precision Optical Sensing and Measurement Technology, Qinhuangdao 066004, China)

* Corresponding author, E-mail: lijn@ise.neu.edu.cn

Abstract: Photonic crystal fiber gas detection technology is of particular interest for developing a compact, low power consumption, and intrinsically safe laser absorption spectrum gas detection system.

收稿日期:2021-01-10;**修订日期:**2021-02-26.

基金项目:国家重点研发计划课题(No. 2019YFB2006001);教育部基本科研业务费资助项目(No. N2004007);河北自然科学基金资助项目(No. F2020501040)

First, by optimizing the structural parameters of photonic crystal fibers, over 90% of the optical field modes can be bound near the fiber core, and the relative gas detection sensitivity can be increased to more than 60%. Further, the limitation loss is reduced to 10^{-8} dB/m. To obtain higher relative detection sensitivity and lower optical loss, the optical mode can be optimized by adjusting the core microstructure parameters and the array arrangement of the cladding photonic crystal air holes. Then, the gas detection technologies of the end reflection type, fiber grating wavelength modulation type, and different fiber composite types are analyzed. However, it is difficult to ensure the efficient exchange of gas molecules. Combined with special fiber structures such as Bragg grating and long-period grating, an optical resonator can be constructed to effectively enhance the absorption path of optical signal and gas molecules. The design of a composite optical fiber gas probe with different types of optical fiber and gas sensing materials significantly optimizes the selectivity and sensitivity of gas sensing. The optical path can be increased effectively by expanding the optical fiber to > 1 m or using the ring embedding method, resulting in a detection limit up to the ppb level. Moreover, the introduction of erbium-doped fiber can effectively compensate for the optical loss in the fiber ring. Finally, the gas detection performance and future research direction of the porous ring and grapefruit photonic crystal fiber with a large hollow core diameter are analyzed. In the future, to provide technical support for the development of real-time monitoring instruments for hazardous gases in metallurgical and chemical industries, it is necessary to research the performance optimization, system integration, and environmental adaptability of photonic crystal fiber gas laser absorption detection technology.

Key words: photonic crystal fiber; gas detection; laser spectrum absorption; fiber sensing; hollow fiber

1 引 言

冶金化工、煤矿和石油化工领域中,对易燃易爆危险气体预混测试、环境实时监测、浓度控制及早期预警对生产安全和生命财产保障至关重要^[1]。低功耗、结构紧凑、本质安全、高性能的气体传感技术在工业生产过程监测和环境污染治理方面的需求极为迫切。基于石英音叉和声表面波的声光光谱技术、半导体纳米材料的催化吸收和阻抗变化、材料增敏微机电系统(Micro-Electromechanical System, MEMS)和纳机电系统(Nano-Electromechanical System, NEMS)、光子晶体(Photonics Crystal, PC)微腔和光纤传感技术在气体探测方面均表现出了优异的性能和产品化的潜力^[2-4]。特别是激光光谱、光纤传感等光学技术,更有利于在易燃易爆、高温有害等苛刻环境条件下实现对气体的原位、实时和组网监测^[5]。激光吸收光谱技术除了可用于近海海面、大气环境及工况空间等大尺寸区域内气体浓度的遥感探测,还可实现对特定位置气体浓度和组分原位检测和分析^[6]。通过光纤传导和激光信

号收集,能极大地简化气体光谱检测系统^[7]。光子晶体光纤(Photonics Crystal Fiber, PCF)具备周期性空气孔洞,在高效传输光信号的同时,也为气体激光吸收光谱检测提供了天然气池,可以基于吸收光谱、拉曼光谱、光热光谱及声光光谱等机理实现气体探测^[8]。比尔-朗伯定律常用于描述气体分子光谱吸收,当空气孔充满气体时,其等效折射率增大,纤芯和包层的折射率差减小,光场会进入包层空气孔中与气体作用,有效增大气体分子光谱吸收的作用面积,使光谱吸收强度的变化更为明显^[9]。因此,可以显著提升检测灵敏度^[10]。

类似于平面PC结构的色散结构或介质,PCF内部可以产生慢光效应,通过减慢光信号的群速度来增加光与气体分子的作用距离,实现等效作用光程的延长,以提高气体检测的灵敏度^[11]。2019年,THz-PCF被提出用于实现对氰化氢(HCN)浓度的检测,并通过理论模型计算在1 239.9 GHz频率处观察到明显的吸收窗口,检测限可以达到 2×10^{-6} ^[12]。表面等离子体结构的引入可有效提高PCF传感器的灵敏度,如其在空

气孔内壁选择性涂覆金属膜和填充微纳米金属线,以及端面和侧面制作金属纳米膜和微纳结构等^[13]。气体受激拉曼散射强度的变化可以直接反映气体压力和浓度的变化信息,同时具备在强度和频移等多维度实现对不同种类气体检测的潜力^[14]。PCF 可以实现对其内部灌注液体的光学泵浦和荧光信号的高效收集,有望用于研制低功耗生物荧光检测芯片^[15]。Jochum 等人利用 PCF 的拉曼光谱增强效应,同时监测成熟水果散发的 O_2 , CO_2 , NH_3 和 C_2H_4 气体,实现对水果贮存状态的实时监测及腐烂预警功能。4 种气体的拉曼吸收光谱位置可明显区分,对比样品气体,其检测误差小于 3%^[16]。PCF 一方面可以利用其内部气孔构建光学、气体、流体通道,用于研制“纤内”一体化传感探头,或者与其他类型光纤熔接构建多功能紧凑型光纤结构;另一方面,也可以被加工成 D 型表面、长周期光栅、双锥形微光纤,融合其他光纤结构与 PCF 特点,开发新型的光学器件^[17]。

本文从 PCF 结构参数的优化设计出发,综述近年来基于不同 PCF 结构的气体激光光谱吸收检测技术的发展进展,其中包括通过 PCF 结构参数的优化提高气体检测的相对灵敏度和降低光学传输损耗;利用 PCF 设计端头反射型、光栅波长调制型和复合型光纤探头;借助大长度及大孔径 PCF 提高气体分子与光信号的作用效率等。

2 PCF 的结构参数优化

如图 1 所示,PCF 的包层气孔可以是六边形、圆形和椭圆形等结构,分布形式可以为均匀分布、辐射分布和螺旋型分布等。根据纤芯内部结构的差异,PCF 可以初步分为高折射率反射型的普通 PCF 和折射率导引型 PCF,前者原理类似传统光纤,光信号在中心纤芯内全反射传输;后者又称光子带隙光纤 (Photonics Band-Gap PCF, PBG-PCF),它利用光子带隙效应,将光场局限在低折射率的空芯纤芯内传输。此外,纤芯结构还可以设计为非对称型的复杂结构,以实现

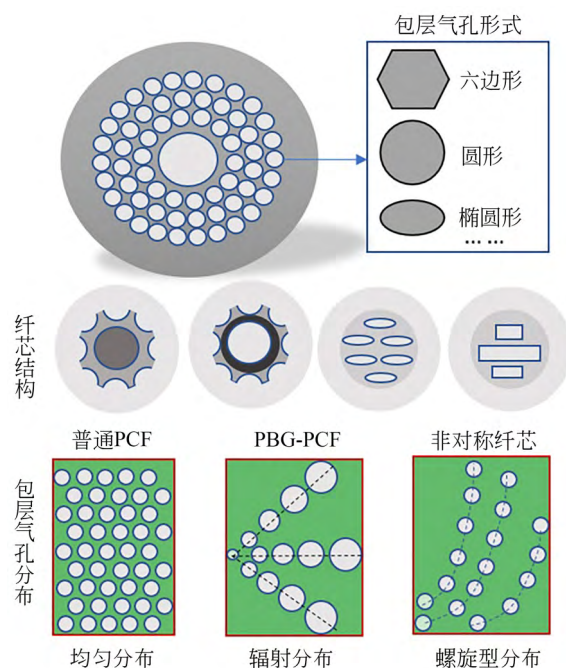


图1 PCF 的纤芯,包层气孔结构及分布形式示意图
Fig.1 Schematic diagram of core, cladding pore structure and distribution of PCF

在优化 PCF 结构参数时,要根据不同的光纤类型和包层结构分布形式进行精细地调控,以检验不同参数下的光学模场分布效果。

2.1 常规 PCF 结构参数优化

PCF 气体传感探头的性能讨论主要集中在 PCF 关键几何结构参数的优化上,目标一方面是提升气体检测的相对灵敏度^[18]:光纤内光学模式与气体分子的有效作用面积和整个模场截面的面积比;另一方面是改善孔径对光信号的限制损耗^[19]:表征 PCF 包层对光场的限制能力,用光场经过单位长度 PCF 后的功率损失。然而,跨越微米尺度的超精细纳米结构 PCF 的设计大多也只存在于理论仿真阶段。在 PCF 几何结构参数的设计和优化过程中,最简单的方式是改变纤芯及其周围不同级次环形结构上的空气孔直径或周期,PCF 纤芯的几何结构及占空比的优化,可以有效提升气体检测的相对灵敏度^[20-21]。

根据紧密排列环形、六边蜂巢型、八角形、十角形等单一构型或者多种构型混合,可以构建结构规则、中心对称的光子晶体结构。它们也更容易采用传统堆栈-拉伸技术直接获得^[22]。采用八角阵列结构 PCF,气体检测相对灵敏度从 5.09%

提高到了9.33%,限制损耗降低到 10^{-4} 量级^[23]。Morshed等人在针对CH₄和HF气体传感特性分析的PCF仿真模型中,将限制损耗降低到 10^{-8} dB/m量级^[24]。

将PCF的包层部分设计成螺旋结构,可以表现出更显著的模式限制作用,有效减小光纤结构对光学模式的限制损耗^[25-26]。在此基础上,可通过调节内部光子晶体单元形状和分布获得高双折射,拓展工作波段,提高气体检测的相对灵敏度。通过在环形PCF结构中引入数层螺旋形多空区域围绕纤芯,理论上在1.33 μm 处获得了高达72.04%的相对灵敏度,对应的有效模面积为10.04 μm^2 ,工作波长可以覆盖1~1.8 μm ^[27]。但是,该PCF空气孔的结构参数必须严格控制,其直径在50 nm范围的差异会导致相对灵敏度在10%的范围内变化,其他影响因素还包括孔洞周期、螺旋环结构层数、光波波长及偏振特性。

Paul等人通过仿真建模计算,首次在常规PCF的周期性结构中引入准晶体(Quasi-crystal)结构,有效抑制了非线性光学效应,降低了传输损耗(10^{-6} 量级),获得了高质量的单模传输(1~1.8 μm)和高相对灵敏度(64.69%)的气体传感效果^[28]。除了传统圆形截面纤芯结构以外,纤芯部分还被设计成3个矩形平面堆栈型结构。这3个平面的相对位置和角度的变化会直接影响不同偏振方向光信号的模场光斑。该结构在1.3~2.2 μm 波段表现出完美的线性响应,对应的相对灵敏度为48.26%^[29]。

2.2 PBG-PCF结构参数优化

PBG-PCF借助内部空气孔周期晶体来传导光学信号,其中94%~95%的传输光被束缚在纤芯内,总的模式空气重叠比率高达98%~99%,可以作为一种绝佳的气体光谱吸收池。例如,在其中空纤芯内灌注乙炔气体后熔接到单模光纤上,用于构建紧凑型的参考样品池^[30]。PBG-PCF光纤结构参数优化用于提升CO检测过程中提高纤芯内光场的传输率 $>90\%$ ^[31]。

PBG-PCF对激光光源的波长有严格要求,必须落入其带隙范围,才能保证将70%~90%的光学模场功率局限在空芯纤芯内,以实现与气体

分子的高效作用^[32]。Arman等人采用COMOSL Multiphysics设计了PBG-PCF,当空纤芯直径从5.3 μm 增大到5.8 μm 的过程中,仿真获得其最高相对灵敏度为96.53%,对应的光场模式分布也显示出了最低的限制损耗^[33]。类似于经典保偏光纤对不同偏振方向光信号的调节作用,也可以在PBG-PCF结构内部引入椭圆形孔来增强双折射效应。椭圆孔的快轴、慢轴、周期和结构分布会影响 x,y 方向偏振光的模场分布。结构参数优化后非对称性分布椭圆孔的最高相对灵敏度为53.07%,明显高于对称型椭圆孔(2 $\times$ 4,约为48%)和正六边形圆孔结构(约为42%)^[34]。

除了纤芯形状以外,PBG-PCF气体检测的相对灵敏度和限制损耗与高折射率GeO₂-SiO₂纤芯环和围绕其周围的第一环空芯孔的结构参数相关。在PBG-PCF结构中引入掺Ge缺陷环结构,可以借助其绝热模式转换特性极大地降低与单模光纤间的熔接损耗(0.22 dB)^[35]。大直径的空心孔可以有效提高相对灵敏度,降低限制损耗。通过将第一环空芯孔的形状由圆形变为六边形,可将更多光学能量束缚在纤芯环和第一环空芯孔内传播,并且甲烷在1.33 μm 波长位置的光谱吸收效率增加了4倍(从3.25%~13.23%),限制损耗减低了265倍^[36]。

针对以上评述的研究工作中所应用的空芯微结构光纤的典型结构特点,本文对比分析了其相对灵敏度、传输损耗和最佳工作波长位置,如表1所示。从近年来的相关研究进展和相应光纤结构的光学性能对比可以看出,常规PCF光纤的相对灵敏度的提高程度有限,并且大多数光信号截面被实心的光纤纤芯覆盖,应用于实际气体传感时难以得到理想的传感灵敏度。尽管通过调制其包层多层晶体孔的结构,获得了72.04%的相对灵敏度增强,然而却对PCF光纤提出了更为苛刻的要求;PBG-PCF的纤芯为空芯型,近年来相关结构的相对灵敏度最高可以达到96.57%,也有个性化设计的纤芯结构形式被提出,然而结构参数的精细化程度要求更高,实验和理论计算的偏差需要更深入的研究及论证。

表 1 不同结构 PCF 的光学特性对比
Tab. 1 Comparison of optical properties of PCF with different structures

纤芯结构	相对灵敏度/%	限制损耗/(dB·m ⁻¹)	中心波长/μm	参考文献
单气孔	76	~1.14×10 ⁻³	1.5	[19]
多孔微结构	42.27	~4.78×10 ⁻⁶	1.33	[20]
双环孔	13.94	2.74×10 ⁻⁴	1.5	[22]
环形孔	9.33	6.8×10 ⁻⁴	1.5	[23]
悬挂圆环	27.58	~1.77×10 ⁻⁸	1.33	[24]
微结构空气孔+螺旋环包层	57.61	7.53×10 ⁻³	1.33	[25]
	55.1	7.23×10 ⁻³	1.33	[26]
	72.04	—	1.33	[27]
准晶体结构	64.69	4.38×10 ⁻⁶	1.55	[28]
矩形堆栈	48.26	1.26×10 ⁻⁵	1.33	[29]
三角分布纤芯	91.7	—	1.567	[31]
空芯圆孔带隙型	86	—	1.65	[32]
	96.57	—	1.55	[33]
椭圆孔阵列	53.07	3.21×10 ⁻⁶	1.33	[34]
空芯高折射环	5.09	1.25	1.5	[35]
	13.23	3.77×10 ⁻⁶	1.33	[36]

3 表面吸收型 PCF 气体传感器

基于 PCF 设计的气体激光光谱吸收传感探头可大致分为端头反射式、光纤侧面吸收等表面吸收型,如图 2 所示。

最简单的干涉型 PCF 气体检测探头,将一段 PCF 熔接在普通光纤尾端的 Fabry-Perot 反射腔结构,其端面通常需要涂覆反射透气型膜层(图 2(a));另一类为透射型结构,一段 PCF 熔接在两段普通光纤中间(图 2(b)),可以借助光纤 Bragg 光栅(Fiber Bragg Grating, FBG,也被称作一维光子晶体结构)(图 2(c))、长周期光纤光栅(Long Period Grating, LPG)(图 2(d))或熔融拉伸处理的双锥型 PCF 光纤的倏逝场(图 2(e))实现气体检测功能。

3.1 端面反射干涉型气体探头

气体分子光谱吸收过程中,光谱吸收强度主要依靠观测特定波长位置的激光功率衰减强度实现对气体浓度的标定,结合一次谐波和二次谐波的谐波检测技术可以有效消除部分噪声干扰^[37],降低检测误差,但仍然难以摆脱强度检测方法的弊端,检测精度的提高程度有限。当 DFB 光源使用正弦波形调制时,由朗伯-比尔定律可

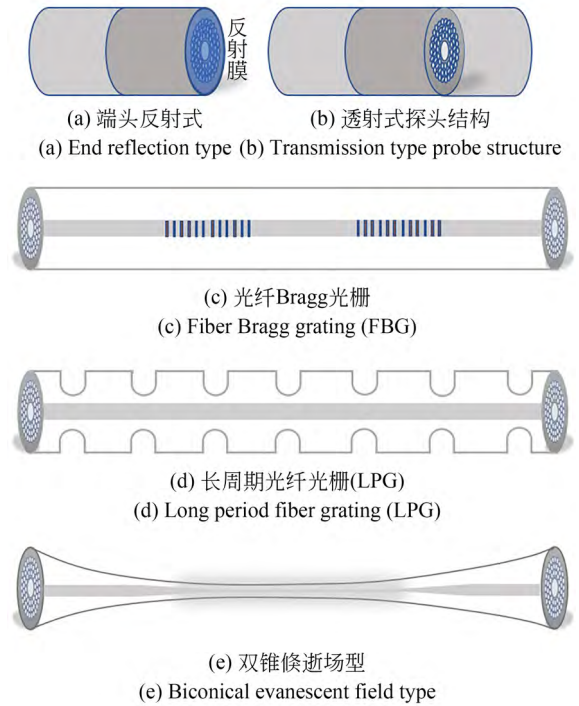


图 2 用于气体表面吸收的不同 PCF 结构

Fig. 2 Different PCF structures for gas surface absorption

以推导出,气体分子光谱吸收强度的二次谐波分量正比于气体浓度,因此可以在二次谐波分量的强度幅值达到最大时,确定 DFB 激光器的最佳

调制频率^[38]。该过程往往伴随局部温度、密度和压力的变化,可构建干涉型气体吸收池,通过干涉光谱的相位变化信息实现对气体浓度的检测,有效消除激光功率不稳定及环境因素影响引入的背景噪声。最简单的干涉型结构是将一小段 PCF 熔接到单模光纤端面构成反射式气体探头,气体通过开放的光子晶体空气孔与光信号作用^[39]。实验表明,它对气体的检测能力接近 nmol 量级^[40],可实现对 10^{-12} 级挥发性有机物气体的快速检测(检测时间 < 20 s)^[41]。基于光谱吸收原理 PCF 气体探头的灵敏度一般与占空比成正比,但是干涉型 PCF 结构中的多模干涉一般是由基模和二阶模产生的,更高阶次模式损耗极大,因此结构优化设计中占空比又不宜过大。反射型 PCF 的端头反射可以通过熔接其他实心光纤^[42]或者涂覆反射膜层进行设计,某些气体敏感材料可以充当反射膜层或者膜层掺杂材料,以实现对外界环境的选择性检测。

3.2 光栅波长调制型气体探头

PCF 气体吸收池也可以借助微纳加工和镀膜工艺进行设计和制作。不同气体对应的吸收波长除了由特定的激光器提供,也可以通过在空芯光纤结构内部刻蚀特定周期的 FBG,以得到特定波长位置的光谱增强,实现对纤芯传输基模光信号的波长调控,同时借助高阶模式传输特性及二者间的多模干涉效应可实现多参数信息的同时感知,以提高探头的选择性^[43]。FBG 也可以充当光反射镜,用于构建气体分子吸收谐振腔,有效提高气体检测的灵敏度^[44]。Yan 等人结合 FBG 和 PCF-FBG 结构构建了谐振腔型气体吸收光谱检测探头,实现了对乙炔气体的检测,得到的灵敏度为 0.022 dB/%(即气体浓度每增加 1% 对光功率的吸收损耗会增加 0.022 dB)。单模光纤和 PCF 纤芯上需要采用准分子激光器和掩膜版刻蚀相同周期的 FBG 结构^[45]。

PCF 用 CO_2 激光器热熔法制备 LPG,气体通过熔接在 PCF 和单模光纤间空芯毛细管上的孔进入 PCF,实现对 0~10 MPa 气体压力的检测^[46]。郑世杰等采用 CO_2 激光器在 PCF 纤芯上刻蚀 LPG 来消除纤芯模式,将更多激光能量分离到包层空气孔中,增加激光-气体分子的作用面积^[47],同时在 PCF 端面镀银膜,与长周期光栅一

起形成气体吸收腔,进一步提高了气体光谱吸收的作用距离。将上述结构引入到掺铒光纤激光环形激光器中,氨气检测灵敏度提高至 $17.3 \text{ nW}/10^{-6}$ 。该工作中气体吸收池的设计方法可为微小、紧凑的一体化光纤气体探头的研制提供借鉴。单亚锋等人首次在实验室环境搭建了实用化的分布式 PCF-LPG 瓦斯气体传感系统,PCF-LPG 可以有效增强 PCF 光纤探头的温度稳定性,提高检测精度,测试结果误差低于 10%^[48]。

3.3 复合式结构

通过加热熔融拉锥或熔接技术可以设计多种新型的多光纤复合型结构,这种设计可以归纳为级联光纤结构,除了需要对 PCF 自身结构参数进行优化外,还须考虑熔接光纤的类型、结构、涂覆膜层的材料及封装方式等^[49]。熔融拉锥技术可用于制作双锥形微米 PCF,作为一种开放型光纤探头,它可以借助光学倏逝场实现对外界环境的感知,并且可通过石墨烯、金属纳米粒子修饰进行增敏^[50]。经过高温熔融拉锥处理后,PCF 的空气孔会塌陷,光纤内部的光信号会以倏逝场的形式逸出到光纤表面。通过将双锥形 PCF 与单模光纤连接并修饰上石墨烯涂层,Feng 等人研究了 H_2S 气体浓度从 $0 \sim 45 \times 10^{-6}$ 变化时透射光谱的相位,得到的灵敏度为 $0.03143 \text{ nm}/10^{-6}$ ^[51]。然而,此结构中的光子晶体结构完全塌陷,不能合理地利用其内部孔洞结构传导气体分子和束缚光场。

PCF 与单模光纤熔接构建微型马赫-增德尔干涉仪,依靠 PCF 两端熔接点凸锥结构实现光信号的分离和合束,通过纤芯基模与包层高阶模式干涉得到干涉光谱。PCF 表面涂覆的金属纳米粒子和石墨烯功能膜层与气体作用后的折射率改变量作用于包层高阶模式影响干涉光谱相位,实现对气体浓度的检测,实验结果表明对 H_2S 浓度的检测限可以达到 3.85×10^{-6} ^[52]。通过将两个不同臂长的光纤干涉仪串联熔接,可以获得周期不同、叠加在一起的干涉光谱,进而借助游标效应分析二者差异,极大地提高光纤传感器的灵敏度。这种紧凑稳定的 PCF 熔接光纤结构已被证明具有极高的折射率传感灵敏度($> 30\,000 \text{ nm}/\text{RIU}$)^[53],也为未来低检测限光纤气体传感器的研制提供了借鉴。典型的 PCF 气体传感特性对比见表 2。

近年来的相关研究表明,将 PCF 熔接在普通单模光纤端头,或者采用机械结构实现 PCF 和普通单模光纤的低损耗耦合,形成一种极为简易的气体传感探头。它的优点是无需对光纤进行侧壁开孔,大大降低了工艺难度,然而却存在结构不稳定,气体分子难以自由逸出等弊端。光栅结构的引入,可以在 PCF 内部构建光学谐振腔,极大地提高气体吸收效率和检测灵敏度,但是光栅的制作必须依赖 CO₂ 和飞秒激光等高精密加工

技术。复合型光纤结构主要是借助不同类型光纤结构和气体敏感材料的特点,将多种光纤结构级联以构建高效率的气体光谱吸收腔,通过气体敏感材料涂覆提高气体检测的灵敏度和选择性,为 PCF 型气体探头的灵活设计提供了重要的技术实现途径。该类结构的精细化设计则主要依赖于光纤探头设计过程中对各种类型光纤结构参数,以及对修饰材料特性和膜层结构的精确控制。

表 2 表面吸收型 PCF 气体传感器性能比较

Tab. 2 Performance comparison of surface absorption PCF gas sensors

光纤种类及结构		测量气体	灵敏度/分辨率	工作范围	参考文献		
微结构光纤端面反射型	无熔接对准耦合	乙炔	0.02 %	0~0.5 %	[37]		
		甲烷	—	5%	[38]		
		VOCs	~10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻⁷ mol	—	[40]		
	单端熔接反射	乙醇	~10 ⁻² pm/10 ⁻⁶	0.5~2.5 %	[41]		
		甲醇丙酮		0.2~1.6 %			
			氢气	0.25 nm/%	0~5 %	[42]	
光栅波长调制型	PCF 纤芯刻蚀 FBG 型		甲烷	14.6 %	0~200 mol/IL	[43]	
	空芯 Bragg 光纤		甲烷	26×10 ⁻⁶	0~0.5 %	[44]	
	PCF-Bragg 光栅+反射 FBG	乙炔	0.022 dB/%	0~10 %	[45]		
		PCF 刻蚀 LPG		气压	1.68 nm/MPa	0~10 MPa	[46]
		PCF-Bragg 光栅及银膜		氨气	17.3 nW/10 ⁻⁶	0~400×10 ⁻⁶	[47]
		级联光纤			7.3 pm/10 ⁻⁶	0~30×10 ⁻⁶	[49]
复合式结构	石墨烯涂覆 PCF 锥	硫化氢		~0.04 nm/10 ⁻⁶	0~60×10 ⁻⁶	[50]	
				~0.03 nm/10 ⁻⁶	0~45×10 ⁻⁶	[51]	
				8.5 pm/10 ⁻⁶	0~80×10 ⁻⁶	[52]	
			毛细管+PCF	空气	30 899 nm/RIU	1.002 77~1.003 72	[53]

4 长光程气体检测系统设计

长光程 PCF 气体检测技术研究主要需要考虑气体分子的交换效率问题,以缩短检测时间。常用的光纤结构如图 3 所示,可以直接采用超长的 PCF 光纤实现多种气体的填充和测量,但是需要在如图 3(a)所示的大长度 PCF 光纤上多位置打孔,或如图 3(b)中将多段 PCF 光纤串联。此外,还可以通过图 3(c)的大空气孔结构来加快气体分子在光纤内的扩散速度,包括圆孔阵列型、柚子型和单孔空芯毛细管型空芯微结构光纤。

4.1 大长度光纤气体吸收池

在基于空芯光纤(Hollow Fiber, HF)或者 PCF 的透射型一体化光纤气体探头的设计中,需要借助飞秒激光器或者二氧化碳激光器在光纤侧壁加工气体交换孔。PCF 可以在 0.1 s 内实现对约为 8.7×10^{-6} 低浓度的 CH₄ 气体的快速响应。如果对检测速度要求不高,该检测下限可以降低到 1.4×10^{-6} ,对应的平均响应时间为 10 s。HE 等还提出通过在一长段的 PBGF 打孔或者将多段短 PBGF 耦合串联可以加快气体扩散速度^[54]。Lehmann 等人采用飞秒激光在空芯光纤带隙光子晶体光纤(HC-PBGF)上加工微孔以构

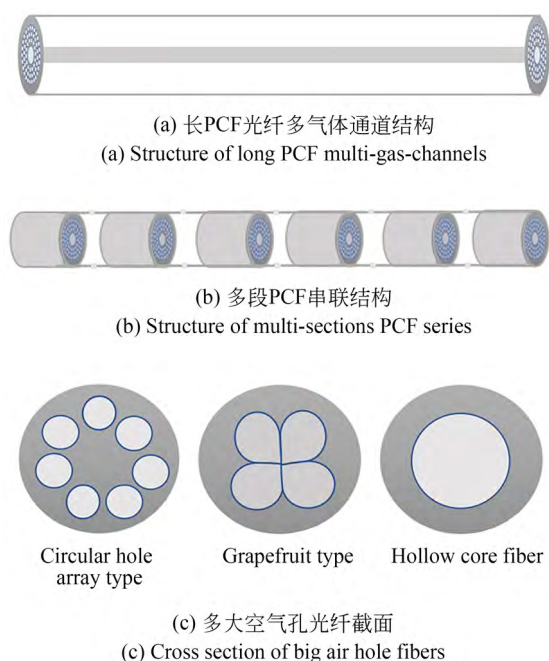


图3 长光程气体检测技术的PCF结构

Fig. 3 PCF structures for long-path gas detection technology

建气体进出通道,其中需要注意飞秒激光的带宽、功率、作用时间,以及光纤的固定、位置调节和透射功率的实时监测等^[55]。Hoo等人最早提出采用周期开窗PCF串联结构,可以在约1 min内实现对浓度小于 6×10^{-6} 乙炔气体的快速检测。然而,实际结构的制作和传感器设计过程中,还必须解决PCF与单模光纤的低损耗熔接、PCF开窗加工精度、开窗孔的气体扩散膜设计等关键技术问题^[56]。

结构开放的C型光纤直接熔接在单模光纤和PCF之间充当气体交换通道,从而有效提高此种探头的结构稳定性和制作重复性。Kassani等人通过实验证明,采用悬挂环芯型PCF的乙炔气体检测灵敏度是传统PCF的4倍^[57]。并且,气体检测的响应时间和测量分辨率也得到显著增加,悬挂环内的圆形空气孔表现出最佳的检测性能。当其形状为椭圆形时,对浓度约为0.5%乙炔气体的响应时间为18.3 min,略低于圆形结构的16.4 min^[58]。

采用785 nm的激发光和一段30 cm长的PCF,通过分析拉曼光谱变化可以实现对多种气体浓度(0.04%浓度的CO₂和甲苯)的有效检测^[59]。这种方式提供了一种最简单的气体探头

(仅是一段PCF)和更接近可见光波长的气体传感技术。但是拉曼光谱分析技术极大地拉高了该器件的成本,难以实现低成本原位气体监测应用。

大长度光纤传感系统的设计中,多种附加因素的引入会严重影响光谱信号的信噪比。首先,长程PCF加工的多个气体交换通道,或者多段PCF探头串联结构的设计将极大地削弱光信号强度。在不同光纤熔接位置引入的光学耦合功率损耗方面,冯巧玲等人通过将5 m长的PCF与单模光纤熔接设计了低压填充氨气参考气体吸收池,得到的功率损耗低于3.5 dB^[60]。王海宾等人设计了长度为20 m的PCF低压CO₂气体腔,通过单模光纤熔接和大数值孔径的多模光纤接收信号光,有效地将功率损耗降低到3.5 dB^[61]。其次,仅仅采用PCF气体光纤探头与传统的空间光路集成的光学系统存在多个光学耦合部件,极易受到环境气体扰动的影响,需要借助系统的全光纤化设计来优化传感系统的性能。Piotr等人首次将1 m长的七孔PCF(单孔直径约为55 μm)引入到TDLAS系统代替传统笨重的光学吸收池,实现了对CH₄和CO₂的同时检测,对应的光谱吸收峰位置分别为3.334 μm和1.574 μm,实验测得的检测下限分别为 24×10^{-12} 和 144×10^{-6} ^[62]。该工作中详细分析和讨论了PCF用于气体检测的多模干涉效应和气体吸收光程过短等问题。

4.2 探头嵌入式光纤环吸收气池

Zhang等人最早在2004年采用掺铒光纤环激光器(Erbium Doped Fiber Ring Laser, ED-FRL)搭建光纤相干光谱气体传感器,来代替传统的激光光谱吸收空间光路系统^[63]。该环形结构内还可以引入Fabry-Perot滤波器和FBG,PCF用来有效提高气体与激光作用距离。实验结果表明,该结构的气体吸收灵敏度相对于单程腔可提高91倍。相对单波长工作模式,双波长EDFRL经实验验证可以将乙炔检测的灵敏度增加6.44倍,得到了 10.42×10^{-6} V的检测下限^[64]。Sagnac环滤波被首次应用到环形光纤激光系统中,用于串联多个PCF探头实现多点探测功能。基于干涉光谱的模式补偿效应,在1 532.83 nm和1 534.10 nm处实现了对浓度为1%乙炔的激

光吸收光谱的实时监测,对应的探测灵敏度分别为 $398 \times 10^{-6} \text{ V}$ 和 $1\,905 \times 10^{-6} \text{ V}$ ^[65]。Sagnac 及光纤环反射镜等环形结构的引入,可以极大地增加气体分子的等效吸收光程,在保证气体传感性能的同时简化全光纤气体激光光谱吸收系统。掺铒光纤则进一步保证了环形结构内的光信号强度,补偿长距离光纤传输的损耗。

4.3 大空气孔径光纤气体传感器

PCF 内部空气孔过小和长度过长,均会降低气体分子的扩散速度。陆维佳等人结合理论分析和实验检测对比了自由扩散和压差作用下 CH_4 气体的响应时间,进一步完善了相关理论模型。PCF 气体检测系统的设计还需要考虑所使用激光器的光束发散角、输出功率,以及光纤结构设计及光学性能优化等问题^[66]。

大孔径的气体传输和检测通道更有利于实时监测过程中的气体交换。Gui 等人选用的柚子型 PCF^[67],其空芯直径和周围六孔直径分别为 $33 \mu\text{m}$ 和 $73 \mu\text{m}$,采用飞秒激光贯穿光纤侧壁到外围的 6 个孔洞,可以分别构建 6 条独立的气体传输通道。实验结果表明,该探头可以在 15 s 内实现对 0~5% 乙炔气体的实时检测,单位气体浓度变化引起的特征波长位置的光功率变化率为 $2.27 \times 10^{-3} \text{ dB}/10^{-6}$ 。进一步,通过空分复用技术和 8 个光电开关设计了 5 个位点不同浓度气体的分布式检测系统。类似的微结构光纤可称为 Kagome 型结构,也在其他工作中被多次应用^[68]。Yao 等人将单环 8 毛细管阵列微结构光纤引入 TDLAS 系统实现了 CO 的高灵敏度检测^[69],响应时间缩短到 5 s 以内。然而,以上系统的实质仍为独立、并列工作的单点气体探头的简单集成,多个单头实际是无法同时工作的。Zhao 等人采用类似的 7 毛细管阵列微结构光纤完成了全光纤乙炔传感系统的设计和验证^[70]。Hansel 等人也提出了全光纤集成的氨气传感系统^[71],将光电探测器、光源和集成电路通过各种光学耦合器和复用器连接起来,为全光纤 TDLAS 系统的设计提供了借鉴。

在大空气孔光纤气体传感器的设计及系统集成方面,需要通过单光纤多通道融合和多光谱

分析技术来研制更为紧凑的高性能、一体化分布式气体探头,如通过在多个通道的不同位置加工气体交换通道,以及不同气体通道的内壁选择性材料修饰来获得多种气体或多种浓度气体的分布式监测。

5 结 论

PCF 可以作为光流体通道,实现对光场模式的高效束缚,同时其天然的空气孔结构沿光信号传输方向提供了气体流动通道,是未来紧凑型、集成化气体激光光谱检测传感器的主要研究对象。本文综述了近年来 PCF 气体检测技术的相关研究进展,主要从 PCF 自身结构参数优化(晶体结构、尺寸及分布形式)、PCF 气体传感探头设计(检测原理、探头结构及光学模式调控)和整体气体检测系统优化(系统噪声、应用环境及分布式传感)等角度进行分析和讨论。在 PCF 结构或探头设计上,需要综合考虑光纤弯曲曲率、长度、内径、待测气体浓度、光源发散角及光场能量分布等对检测效果的影响。在系统层面对 PCF 类气体传感器的优化,还应考虑光电器件零点漂移对传感性能的影响。多探头差分检测可以有效消除温度、湿度等非其他环境因素的干扰,提高检测结果精确度。未来,有望采用 mm 级和 $125 \mu\text{m}$ 的变径光纤实现大孔径 PCF 光纤与传统单模光纤的熔接,以构建光纤一体化气体探头。PCF 气体激光光谱检测技术仍然需要依赖理论层面的结构设计和优化,确保纤芯光场模式 $>90\%$ 束缚传输;以及实验方面的传感性能改善,包括将其相对灵敏度提高到 $>60\%$,提高对多组分气体的选择性检测。同时,在检测系统角度需要进一步提高气体交换效率,以获得 $<10 \text{ s}$ 的响应速度,满足对气体的实时监测需求。此外,还必须解决气体检测系统的全光纤化设计,便于系统与常规 $125 \mu\text{m}$ 直径单模光纤间的熔接,搭建全光纤监测网络。在检测信号的有效提取方面,需要结合谐波探测技术、干涉光谱相位解调技术和差分结构设计来有效消除环境噪声的干扰。

参考文献:

- [1] 胡洋,尹尚先,ARNTZENJ B,等. 矿井瓦斯/空气预混气体爆燃的激光纹影测试系统设计[J]. 光学精密工程, 2019, 27(5): 1045-1051.
HU Y, YIN SH X, ARNTZENJ B, *et al.* Design of laser schlieren test system for mine gas/air pre-mixed gas deflagration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(5): 1045-1051. (in Chinese)
- [2] NAZEMI H, JOSEPH A, PARK J, *et al.* Advanced micro- and nano-gas sensor technology: a review[J]. *Sensors*, 2019, 19(6): 1285.
- [3] QIN X, FENG W L, YANG X Z, *et al.* Molybdenum sulfide/citric acid composite membrane-coated long period fiber grating sensor for measuring trace hydrogen sulfide gas[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 272: 60-68.
- [4] LI J, YAN H, DANG H T, *et al.* Structure design and application of hollow core microstructured optical fiber gas sensor: a review[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135: 106658.
- [5] 王书涛,王昌冰,潘钊,等. 光学技术在气体浓度检测中的应用[J]. 光电工程, 2017, 44(9): 862-871, 939.
WANG SH T, WANG CH B, PAN ZH, *et al.* Applications of optical technology in gas concentration detection [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(9): 862-871, 939. (in Chinese)
- [6] 李明星,陈兵,阮俊,等. 近海大尺度区域二氧化碳的激光在线探测技术[J]. 光学精密工程, 2020, 28(7): 1424-1432.
LI M X, CHEN B, RUAN J, *et al.* On-line detection of carbon dioxide in large scale offshore by laser technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(7): 1424-1432. (in Chinese)
- [7] 穆青青,刘晓波,刘伟. 多层 Au-Pd 核壳纳米颗粒膜增敏的光纤氢气传感器[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1681-1687.
MU Q Q, LIU X B, LIU W. Sensitivity-enhanced optical fiber hydrogen sensor based on multilayer Au-Pd core-shell nanoparticle film [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(8): 1681-1687. (in Chinese)
- [8] YU R W, CHEN Y X, SHUI L L, *et al.* Hollow-core photonic crystal fiber gas sensing[J]. *Sensors*, 2020, 20(10): 2996.
- [9] 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 Y F, ZHOU Y, YANG Y, *et al.* Design and implementation of gas sensing system based on photonic crystal fiber[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, 36(5): 811-814. (in Chinese)
- [10] OLYAEE S, NARAGHI A. Design and optimization of index-guiding photonic crystal fiber gas sensor[J]. *Photonic Sensors*, 2013, 3(2): 131-136.
- [11] EBNALI-HEIDARI M, KOOHI-KAMALI F, EBNALI-HEIDARI A, *et al.* Designing tunable microstructure spectroscopic gas sensor using optofluidic hollow-core photonic crystal fiber[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2014, 50(12): 1-8.
- [12] QIN J Y, ZHU B, DU Y, *et al.* Terahertz detection of toxic gas using a photonic crystal fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 52: 101990.
- [13] RIFAT A A, AHMED R, YETISEN A K, *et al.* Photonic crystal fiber based plasmonic sensors [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 243: 311-325.
- [14] 刘盼,张天舒,范广强,等. 气体受激拉曼散射系统的分析与优化[J]. 光学精密工程, 2019, 27(12): 2509-2516.
LIU P, ZHANG T SH, FAN G Q, *et al.* Analysis and optimization of gas stimulated Raman scattering system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(12): 2509-2516. (in Chinese)
- [15] KONOROV S O, ZHELTIKOV A M, SCALORA M. Photonic-crystal fiber as a multifunctional optical sensor and sample collector[J]. *Optics Express*, 2005, 13(9): 3454-3459.
- [16] JOCHUM T, RAHAL L, SUCKERT R J, *et al.* All-in-one: a versatile gas sensor based on fiber enhanced Raman spectroscopy for monitoring postharvest fruit conservation and ripening[J]. *The Analyst*, 2016, 141(6): 2023-2029.
- [17] DE M, GANGOPADHYAY T K, SINGH V K. Prospects of photonic crystal fiber for analyte sensing applications: an overview [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(4): 042001.
- [18] WANG Q, WU D, BAI L, *et al.* Improved sensitivity of a photonic crystal fiber evanescent-wave gas sensor[J]. *Instrumentation Science & Technol-*

- ogy, 2013, 41(2): 202-211.
- [19] ISLAM M I, AHMED K, SEN S, *et al.* Design and optimization of photonic crystal fiber based sensor for gas condensate and air pollution monitoring [J]. *Photonic Sensors*, 2017, 7(3): 234-245.
- [20] MORSHED M, HASSAN M I, ROY T K, *et al.* Microstructure core photonic crystal fiber for gas sensing applications [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(29): 8637-8643.
- [21] 顾雯雯, 赵建林, 崔莉, 等. 光子晶体光纤气体传感灵敏度的有限差分法分析[J]. 光子学报, 2007, 36(1): 94-98.
- GU W W, ZHAO J L, CUI L, *et al.* Analyzing the sensitivity of a novel gas sensor based on photonic crystal fiber using finite-difference method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(1): 94-98. (in Chinese)
- [22] MORSHED M, ASADUZZAMAN S, ARIF M F H, *et al.* Proposal of simple gas sensor based on micro structure optical fiber[C]. 2015 *International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)*. May 21-23, 2015, Savar, Bangladesh. IEEE, 2015: 1-5.
- [23] NARAGHI A, OLYAEE S, NAJIBI A, *et al.* Photonic crystal fiber gas sensor for using in optical network protection systems [C]. *Proceedings of the 2013 18th European Conference on Network and Optical Communications & 2013 8th Conference on Optical Cabling and Infrastructure (NOC-OC&I)*. July 10-12, 2013, Graz, Austria. IEEE, 2013: 175-180.
- [24] MORSHED M, HASAN M I, RAZZAK S M A. Enhancement of the sensitivity of gas sensor based on microstructure optical fiber [J]. *Photonic Sensors*, 2015, 5(4): 312-320.
- [25] ISLAM I, PAUL B K, AHMED K, *et al.* Highly birefringent single mode spiral shape photonic crystal fiber based sensor for gas sensing applications [J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2017, 14: 30-38.
- [26] IBADUL ISLAM M, AHMED K, ASADUZZAMAN S, *et al.* Design of single mode spiral photonic crystal fiber for gas sensing applications [J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2017, 13: 55-62.
- [27] RABEE A S H, HAMEED M F O, HEIKAL A M, *et al.* Highly sensitive photonic crystal fiber gas sensor[J]. *Optik*, 2019, 188: 78-86.
- [28] PAUL B K, AHMED K, DHASARATHAN V, *et al.* Investigation of gas sensor based on differential optical absorption spectroscopy using photonic crystal fiber[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2020, 59(6): 5045-5052.
- [29] PAUL B K, RAJESH E, ASADUZZAMAN S, *et al.* Design and analysis of slotted core photonic crystal fiber for gas sensing application[J]. *Results in Physics*, 2018, 11: 643-650.
- [30] AUSTIN E, BRAKEL AVAN, 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.
- [31] 唐娅荔, 杨伯君. 用于 CO 传感的空芯带隙型光子晶体光纤的研究[J]. 半导体光电, 2010, 31(4): 648-651.
- TANG Y L, YANG B J. Research on the hollow core photonic bandgap fiber for CO gas sensor[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 31(4): 648-651. (in Chinese)
- [32] 程同蕾, 李曙光, 周桂耀, 等. 空芯光子晶体光纤纤芯中的功率分数及其带隙特性[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 249-254.
- CHENG T L, LI S H G, ZHOU G Y, *et al.* Relation between power fraction in the core of hollow-core photonic crystal fibers and their bandgap property[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(2): 249-254. (in Chinese)
- [33] ARMAN H, OLYAEE S. Improving the sensitivity of the HC-PBF based gas sensor by optimization of core size and mode interference suppression[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2020, 52(9): 1-10.
- [34] ASADUZZAMAN S, AHMED K. Proposal of a gas sensor with high sensitivity, birefringence and nonlinearity for air pollution monitoring[J]. *Sensing and Bio-Sensing Research*, 2016, 10: 20-26.
- [35] PARK J, LEE S, KIM S, *et al.* Enhancement of chemical sensing capability in a photonic crystal fiber with a hollow high index ring defect at the cen-

- ter[J]. *Optics Express*, 2011, 19(3): 1921-1929.
- [36] OLYAEE S, NARAGHI A, AHMADI V. High sensitivity evanescent-field gas sensor based on modified photonic crystal fiber for gas condensate and air pollution monitoring[J]. *Optik*, 2014, 125(1): 596-600.
- [37] 钱晓龙, 张亚男, 彭慧杰, 等. 基于空芯光子晶体光纤的反射式气体传感器[J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2017, 38(12): 1673-1676.
- QIAN X L, ZHANG Y N, PENG H J, *et al.* Reflective gas sensor based on hollow core photonic crystal fiber[J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2017, 38(12): 1673-1676. (in Chinese)
- [38] CHOUDHARY R, SINGH A, BHATNAGAR R. Hollow core photonic crystal fiber based methane gas sensor[C]. *Proceedings of the 13th International Conference on Fiber Optics and Photonics*, Dec 4-8, 2016, Kanpur, India, Optical Society of America, 2016: W3A.75.
- [39] 侯建平, 宁韬, 盖双龙, 等. 基于光子晶体光纤模间干涉的折射率测量灵敏度分析[J]. *物理学报*, 2010, 59(7): 4732-4737.
- HOU J P, NING T, GAI S H L, *et al.* Sensitivity analysis of refractive index measurement based on intermodal interference in photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(7): 4732-4737. (in Chinese)
- [40] VILLATORO J, KREUZER M P, JHA R, *et al.* Photonic crystal fiber interferometer for chemical vapor detection with high sensitivity[J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1447-1453.
- [41] 于永芹, 欧召芳, 李学金, 等. 基于悬芯光子晶体光纤内反射型的挥发性有机物的传感特性研究[J]. *中国科技论文*, 2015, 10(17): 2018-2021.
- YU Y Q, OU Z H F, LI X J, *et al.* Volatile organic compounds sensing properties of in-reflection sensor based on suspended-core photonic crystal fiber[J]. *China Sciencepaper*, 2015, 10(17): 2018-2021. (in Chinese)
- [42] ZHOU F, QIU S J, LUO W, *et al.* An all-fiber reflective hydrogen sensor based on a photonic crystal fiber in-line interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(4): 1133-1136.
- [43] 潘崇麟, 惠小强, 张涪梅. 用光子晶体光纤光栅实现温度、应力和气体浓度的同时传感[J]. *应用光学*, 2013, 34(2): 374-380.
- PAN C H L, XI X Q, ZHANG F M. Using photonic crystal fiber grating sensor to measure temperature, strain and gas concentration simultaneously[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(2): 374-380. (in Chinese)
- [44] 石立超, 张巍, 金杰, 等. 中红外空心 Bragg 光纤的制备及在气体传感中的应用[J]. *物理学报*, 2012, 61(5): 054214.
- SHI L C H, ZHANG W, JIN J, *et al.* Fabrication of mid-infrared hollow-core Bragg fiber and its application in gas sensing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(5): 054214. (in Chinese)
- [45] YAN G F, ZHANG A, MA G Y, *et al.* Fiber-optic acetylene gas sensor based on microstructured optical fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(21): 1588-1590.
- [46] ZHONG X Y, WANG Y P, LIAO C R, *et al.* Temperature-insensitivity gas pressure sensor based on inflated long period fiber grating inscribed in photonic crystal fiber[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1791-1794.
- [47] ZHENG S J, GHANDEHARI M, OU J P. Photonic crystal fiber long-period grating absorption gas sensor based on a tunable erbium-doped fiber ring laser[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 223: 324-332.
- [48] 单亚锋, 孙朋, 徐耀松. 基于 PCF 的气体传感技术在瓦斯监测中的应用[J]. *传感器与微系统*, 2013, 32(8): 142-145.
- SHAN Y F, SUN P, XU Y S. Application of gas sensing technology in gas monitoring based on PCF[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 32(8): 142-145. (in Chinese)
- [49] 刘敏, 冯德玖, 冯文林. 基于无芯-多模-无芯光纤结构的硫化氢气体传感性质研究[J]. *光学学报*, 2019, 39(10): 134-139.
- LIU M, FENG D J, FENG W L. Properties of hydrogen sulfide gas sensor based on no-core-multi-mode-no-core fiber structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(10): 134-139. (in Chinese)
- [50] 冯序, 杨晓占, 黄国家, 等. 基于铜离子沉积石墨烯涂层锥形光子晶体光纤的硫化氢传感器[J]. *光子学报*, 2017, 46(9): 0923002.
- FENG X, YANG X ZH, HUANG G J, *et al.*

- Hydrogen sulfide gas sensor based on Cu ion-deposited graphene-coated tapered photonic crystal fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46 (9): 0923002. (in Chinese)
- [51] FENG X, FENG W L, TAO C Y, *et al.* Hydrogen sulfide gas sensor based on graphene-coated tapered photonic crystal fiber interferometer [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 247: 540-545.
- [52] 黄国家, 彭志清, 杨晓占, 等. 基于纳米铜/石墨烯包覆光子晶体光纤的硫化氢气体传感性能研究 [J]. 光子学报, 2019, 48(3): 0306001.
- HUANG G J, PENG ZH Q, YANG X ZH, *et al.* Sensing performance of hydrogen sulfide gas based on Cu/graphene composite membrane coated photonic crystal fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(3): 0306001. (in Chinese)
- [53] QUAN M R, TIAN J J, YAO Y. Ultra-high sensitivity Fabry-Perot interferometer gas refractive index fiber sensor based on photonic crystal fiber and Vernier effect [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4891-4894.
- [54] HE Q X, DANG P P, LIU Z W, *et al.* TDLAS-WMS based near-infrared methane sensor system using hollow-core photonic crystal fiber as gas-chamber [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2017, 49(3): 1-11.
- [55] LEHMANN H, BARTELT H, WILLSCH R, *et al.* In-line gas sensor based on a photonic bandgap fiber with laser-drilled lateral microchannels [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2011, 11(11): 2926-2931.
- [56] HOO Y L, JIN W, SHI C Z, *et al.* Design and modeling of a photonic crystal fiber gas sensor [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(18): 3509-3515.
- [57] KASSANI S H, PARK J, JUNG Y, *et al.* Fast response in-line gas sensor using C-type fiber and Ge-doped ring defect photonic crystal fiber [J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14074-14083.
- [58] KASSANI S H, KHAZAEINEZHAD R, JUNG Y, *et al.* Suspended ring-core photonic crystal fiber gas sensor with high sensitivity and fast response [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 1-9.
- [59] YANG X, CHANG A S P, CHEN B, *et al.* High sensitivity gas sensing by Raman spectroscopy in photonic crystal fiber [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 176: 64-68.
- [60] 冯巧玲, 姜萌, 王学锋, 等. 基于空芯光子晶体光纤气体参考腔的高灵敏度氨气检测 [J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0305001.
- FENG Q L, JIANG M, WANG X F, *et al.* High sensitivity ammonia gas detection with hollow-core photonic bandgap fibers reference gas cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43 (3): 0305001. (in Chinese)
- [61] 王海宾, 刘晔, 王进祖, 等. 光纤型空芯光子晶体光纤低压 CO₂ 气体腔的制备 [J]. 光学学报, 2013, 33(7): 45-49.
- WANG H B, LIU Y, WANG J Z, *et al.* Preparation of all-fiber low-pressure CO₂ gas cell based on hollow-core photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 45-49. (in Chinese)
- [62] JAWORSKI P, KOZIOŁ P, KRZEMPEK K, *et al.* Antiresonant hollow-core fiber-based dual gas sensor for detection of methane and carbon dioxide in the near- and mid-infrared regions [J]. *Sensors*, 2020, 20(14): 3813.
- [63] ZHANG Y, ZHANG M, JIN W, *et al.* Investigation of erbium-doped fiber laser intra-cavity absorption sensor for gas detection [J]. *Optics Communications*, 2004, 232(1/2/3/4/5/6): 295-301.
- [64] YANG X C, DUAN L C, ZHANG H W, *et al.* Highly sensitive dual-wavelength fiber ring laser sensor for the low concentration gas detection [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 296: 126637.
- [65] ZHANG H W, DUAN L C, SHI W, *et al.* Dual-point automatic switching intracavity-absorption photonic crystal fiber gas sensor based on mode competition [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 247: 124-128.
- [66] 陆维佳, 周佳琦, 赵华新, 等. 波导式气体吸收池时间响应特性 [J]. 光电工程, 2012, 39(4): 114-120.
- LU W J, ZHOU J Q, ZHAO H X, *et al.* Characteristics of time response for waveguide absorption cell [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39 (4): 114-120. (in Chinese)
- [67] GUI X, LI Z Y, WANG H H, *et al.* Research on distributed gas detection based on hollow-core pho-

- tonic crystal fiber[J]. *Sensors and Transducers*, 2014, 174(7): 14-20.
- [68] KRZEMPEK K, ABRAMSKI K, NIKODEM M. Kagome hollow core fiber-based mid-infrared dispersion spectroscopy of methane at sub-ppm levels[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2019, 19(15): 3352.
- [69] YAO C Y, XIAO L M, GAO S F, *et al.* Sub-ppm CO detection in a sub-meter-long hollow-core negative curvature fiber using absorption spectroscopy at 2.3 μm [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 303: 127238.
- [70] ZHAO P C, ZHAO Y, BAO H H, *et al.* Mode-phase-difference photothermal spectroscopy for gas detection with an anti-resonant hollow-core optical fiber[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 847.
- [71] HÄNSEL A, ADAMU A I, MARKOS C, *et al.* Integrated ammonia sensor using a telecom photonic integrated circuit and a hollow core fiber[J]. *Photonics*, 2020, 7(4): 93.

作者简介:



李 晋(1983—),男,山西运城人,副教授,博士生导师,2007年、2009年、2013年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事检光纤传感器件、智能感知、光电集成以及先进检测技术方面的研究。E-mail: lijn@ise.neu.edu.cn



闫 浩(1997—),男,河南洛阳人,硕士研究生,2019年于辽宁石油大学获得学士学位,主要从事气体激光光谱检测、微纳光纤传感方面的研究。E-mail: 1970773@stu.neu.edu.cn