

光子晶体光纤气体传感器*

边 静

(唐山学院基础教学部 河北 唐山 063000)

(收稿日期:2017-03-02)

摘 要: 光纤传感器因其具有体积小、抗电磁干扰、灵敏度高、可以形成分布式测量等优势,成为传感领域研究的热点之一. 介绍了光子晶体光纤气体传感器的基本原理、分类及最新研究进展,并指出了今后研究需要解决的问题.

关键词: 光子晶体光纤 气体传感器 折射率

光纤传感技术是以石英光纤或塑料光纤作为信息的传输媒介,信号光作为信息的载体,利用外界环境因素的改变使得光在光纤中传播的波长(或频率)、光强及相位等特征物理参量发生改变,从而对外界因素进行传感测量的技术^[1]. 相比于传统的电化学传感,光纤传感器拥有许多优越的性能,如体积小、耐腐蚀、抗电磁干扰、可用于易燃易爆等危险环境,能进一步满足远距离测量需要,并可以实现分布式传感. 光纤传感器有极为广泛的应用范围,适用于工业过程控制、环境保护、安全生产、国防及航天等领域的多物理量检测.

1 传统光纤和光子晶体光纤

1970年,康宁公司率先研制出了世界上第一根衰减低于20 dB/km的石英玻璃光纤,从此拉开了光纤研制和光纤通信研究的序幕. 这种传统光纤的纤芯为石英掺杂材料,其折射率为 n_1 ,包层为纯石英材料,其折射率为 n_2 ($n_1 > n_2$). 当光在光纤内传输时,传导模的模式有效折射率表示为 n_{eff} , n_{eff} 必须满足条件: $n_2 < n_{\text{eff}} < n_1$,这样激光才能满足全反射定律而被束缚在纤芯中传播.

20世纪末,在二维光子晶体基础上发展起来一种新型光纤——光子晶体光纤. 光子晶体光纤(Photonic crystal fiber, PCF)又称微结构光纤或多孔光纤,它通过层中沿轴向排列的微小空气孔对光进行约束,从而实现光的轴向传输^[2]. 独特的波导结构与导光特性,使得光子晶体光纤相比于常规光纤

具有许多无可比拟的传输特性. 光子晶体光纤根据导光机理的不同,可以分为折射率引导型光子晶体光纤和带隙型光子晶体光纤. 折射率引导型光子晶体光纤包层由空气孔和石英形成,纤芯为石英,其包层有效折射率低于纤芯的折射率,因而能够满足全内反射原理. 与实芯光子晶体光纤不同,空芯光子晶体光纤的纤芯折射率比包层的折射率要低,无法满足全内反射要求,但是由于光子带隙效应,仍然可以将光限制在低损耗的空气纤芯内传播.

2 光子晶体光纤气体传感器的优势

传统光纤由折射率不同的纤芯和包层组成,基于传统光纤的气体传感器,要用化学蚀刻、机械抛光、光纤拉锥等工艺对光纤进行加工,去除部分包层,实现导光与被检测物质的反应,从而改变光波参数,实现光纤传感^[7~10]. 这些光纤处理技术会损伤光纤,且被测量样品与光纤模场倏逝波的相互作用比较微弱,难以制作高灵敏度的传感器.

与传统光纤相比,空芯带隙光子晶体光纤可将光波限制在中心空气孔内进行传播,光纤空芯孔区域的光功率可达95%以上. 待测气体经过扩散或者其他方法填充在光子晶体光纤中心的空气孔区域,吸收光纤内的激光,改变输出的光强. 人们通过检测光信号的变化,可以测量气体的浓度. 由于光子晶体光纤具损耗低、易弯曲,可以用于长距离光信号的传输,这是其相对于传统光纤最大的优势.

* 唐山学院2015年科研项目,项目编号:15008B

3 光子晶体光纤气体传感的研究进展

光子晶体光纤传感器可以测量多个物理参量的变化,如声、磁场、电流、气体或液体的折射率、温度、浓度、静压力和张力等.近年来,已有多个课题组进行了基于光子晶体光纤的气体传感器的研究,实现了对甲烷、硫化氢、二氧化碳和乙炔等气体的传感测量^[3~7].

2001年,香港理工大学首次报道了运用全固态光子晶体光纤倏逝波检测乙炔气体的实验^[3],采用直接吸收光谱技术,由于此类光纤中模场分布主要集中在二氧化硅中,未能取得理想的实验结果,气体检测灵敏度低至5%.

2004年,Y. L. Hoo等人报道了空芯光子带隙光纤中乙炔气体扩散测量实验^[4],根据气体分子吸收光谱原理,通过测量光纤中光强曲线,监测光纤空芯内的气体浓度.实验结果表明,气体在10 cm长度的空芯光纤自由扩散,浓度达到90%的响应时间约1 min,这一响应速度难以实现气体传感的实时监测.为解决这一难题,该课题组进行了多年研究.

2010年,Y. L. Hoo课题组取得突破性进展,报道了一种快速响应和高度敏感的空心光纤甲烷传感器^[4].运用飞秒激光加工技术在空芯光子晶体光纤的侧面打孔,使得气体进入孔洞与纤芯直接接触,将响应时间减小至3 s,克服了该类气体传感器实时性差的缺点,且所开微孔尺寸很小,不会引起大的损耗,也可适用于长光纤传感.

2011年,Kyung Shik Lee等人在带隙型光子晶体光纤上刻录光栅^[5],并运用波长调制技术,将激光波长调制到特定的乙炔气体吸收谱线上,通过观察乙炔衍射光谱的变化,反映气体温度、浓度的变化.

2012年,Shavrin I等人报道了基于PCF的Mach-Zehnder干涉型的气体传感器^[6],将干涉仪的两个臂分别连接单模光纤与空芯光子晶体光纤,在空芯光子晶体光纤内充入气体,通过干涉条纹的变化测得的折射率分辨率高达 4×10^{-7} .

2015年,香港理工大学靳伟课题组报道了基于光子晶体光纤和光热光谱分析法的超灵敏、大动态范围全光纤的气体传感技术^[7].该方法基于气体分子吸收产生的光热效应,利用其引起的周期性相位调制,结合先进的光纤干涉仪相位解调技术,实现了对气体浓度的检测.该实验为探索光纤气体传感开

阔了新的思路.

4 光子晶体光纤气体传感的关键技术

为了提高光子晶体光纤气体传感器的性能,需要解决以下关键问题:

(1) 提高响应速度.可行的方法有采取泵浦法促进气体扩散,采用多段光子晶体光纤连接,采用飞秒激光加工技术对光纤进行侧面开孔,采用动态气体流通的方法.

(2) 光纤处理技术.如何在低损耗情况下实现单模光纤与光子晶体光纤的连接,以及对光纤接头的保护层进行处理.

(3) 高稳定光源及其驱动技术.尽量采用高稳定性激光器驱动器,减少光路抖动产生的误差.

(4) 信号处理技术.采用波长调制技术与锁相放大技术,可以有效地抑制噪声,提高气体检测灵敏度.

(5) 单模空芯光子晶体光纤制备技术.模间干涉会影响传感器的稳定性及检测灵敏度,是导致测量误差的主要因素.

5 结束语

光纤气体传感器有着更为广阔的应用前景,需要人们不断探索.如何利用现有的数字信号处理技术,进一步降低光学噪声,提高光路稳定性,缩短实验的响应时间,提高光子晶体光纤气体传感系统的性能,成为今后国内外科研机构的主要研究方向.

参考文献

- 1 张丽.光子晶体光纤传感器的传感特性研究:[学位论文].天津:天津理工大学,2014.1~56
- 2 沈修锋.光纤传感器的制作工艺及工程应用研究:[学位论文].北京:北京理工大学,2015.1~67
- 3 周金龙.新型光纤光栅技术及其在光通信与光纤传感方面应用的研究:[学位论文].厦门:厦门大学,2008.1~118
- 4 赵娜等.基于光纤粗锥型马赫-曾德尔干涉仪的高灵敏度温度传感器的研制.光谱学与光谱分析,2014,34(6):1722~1726
- 5 李涛.光纤光栅湿度传感器的研究:[学位论文].杭州:中国计量学院,2012.1~67
- 6 陈金平.基于Mach-Zehnder干涉的光纤传感器的特性研究:[学位论文].宁波:宁波大学,2014.1~56
- 7 黄小亮.基于光子晶体光纤和红外吸收光谱的气体传感系统的研究:[学位论文].长春:吉林大学,2016.1~88