

基于微纳光纤倏逝场效应气体传感器的研究进展

马成举 徐卫锋 李佳美 杨梅 刘柯阳 李梦婷

西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065

摘要 对基于微纳光纤倏逝场效应气体传感器的研究进展进行了综述,同时也阐述了其原理及面临的问题。着重介绍了3种微纳光纤气体传感器,包括直接基于微纳光纤倏逝场效应气体传感器、微纳光纤表面涂覆敏感薄膜的气体传感器和微纳光纤与其他光学微结构相结合的气体传感器。虽然,这些研究取得了一些成果,但还面临诸多问题和挑战。相信随着研究的不断深入,基于微纳光纤倏逝场效应气体传感器仍有可能凭借其独特的性能优势成为现存气体传感器的有力竞争者。

关键词 光纤光学;微纳光纤;气体传感器;倏逝场;有效穿透深度

中文分类号 TP212.1; TP212.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP52.100003

Research Progress of Gas Sensor Based on Microfiber Evanescent Field Effects

Ma Chengju Xu Weifeng Li Jiamei Yang Mei Liu Keyang Li Mengting

School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract The research progresses of the gas sensors based on microfiber evanescent field effects are summarized. Meanwhile, the sensing principle and faced problems are explained. The research progresses of three kind structures gas sensors based on microfiber evanescent field effects, such as just depending on microfiber evanescent field effects, coating sensitive film on the microfiber surface, and combing with other optical microstructure, are focused. Although some research results have been achieved, many problems and challenges are facing. We believe that with developing of the research, owing to their unique performance advantages, the gas sensors based on the microfiber evanescent field effects are still possible to become a strong competitor for the existing gas sensors.

Key words fiber optics; microfiber; gas sensors; evanescent field; effective penetration depth

OCIS codes 060.2340; 230.3990; 280.4788

1 引言

随着石油、化工、煤炭、冶金等工业的迅猛发展,在此过程中产生的各种有毒、有害、易燃、易爆气体也随之增加,由此造成的气体中毒、环境污染及气体爆炸事故也与日俱增。因此,气体传感技术在矿井安全生产、大气污染检测、工业废气排放监控及居住环境质量监测等方面具有举足轻重的作用。

在气体检测系统中,核心元件是气体传感器。气体传感器是采集气体的某些信息(如浓度、种类、成分等),并把采集到的信息转化成容易识别的信号(如:电信号、光信号、声信号等)的装置或功能部件。目前,气体传感器主要有以下几类:半导体气体传感器、电化学气体传感器、固体电解质气体传感器、接触燃烧式气体传感器和光学气体传感器等。

半导体气体传感器具有制造工艺简单、成本低、灵敏度高等优点,现已是产量较大、应用较广的气体传感器;其主要缺点为:选择性差、寿命短、交叉灵敏度高、易受环境温度影响等。电化学气体传感器的优点是:体积小、耗电小、线性度和重复性好、分辨率高、温度适应性较宽;其缺点是:使用寿命较短。固体电解质

收稿日期: 2015-03-31; 收到修改稿日期: 2015-04-29; 网络出版日期: 2015-08-25

基金项目: 陕西省教育厅科研计划项目(15JK1578)、西安石油大学博士科研启动项目、西安石油大学大学生科研训练计划资助项目、西安石油大学科技基金(Z07077)

作者简介: 马成举(1977—),男,博士,讲师,主要从事光纤传感及微纳光子学方面的研究。

E-mail: chengjuma@xsyu.edu.cn

气体传感器具有电导率高、选择性好、灵敏度高等优点,并在冶金、石化、能源、环保等领域均得到了广泛的应用;其不足之处在于响应时间较长。接触燃烧式气体传感器优点是:响应速度快、计量准确、结构简单;缺点是:易受有机硅类化合物、含铅化合物、卤代烃等物质的影响,出现传感器中毒现象,大大降低传感器的检测性能。电学气体传感器普遍存在一个显著的缺点是电流容易引起易燃、易爆气体的燃烧爆炸。

与以上传统的气体传感器相比,光纤气体传感器具有许多不可替代的优点:1)抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀,这使得光纤气体传感器在煤炭、石油化工、冶金等有强电磁干扰、易燃、易爆、强腐蚀的环境中能有效地发挥作用;2)便于复用、容易形成分布式传感网络,便于与中心计算机连接,实现多功能和智能化的要求,这为光纤气体传感器应用于物联网技术提供了很好的基础;3)体积小、重量轻、外形可变;4)灵敏度高、频带宽;5)光纤不仅可以作为光信号的传输介质,也可以作为气体探测的敏感元件;6)光纤是无源器件,对被检测气体不产生附加影响。光纤气体传感器主要有光谱吸收型、荧光型、染料指示型、折射率变化型和倏逝场型等。光谱吸收型光纤气体传感器的传感测量系统较复杂、光学元件较多、成本较高、稳定性较差;荧光型光纤气体传感器信号微弱,检测系统复杂,系统成本较高;染料指示剂型光纤气体传感器易受化学反应速度限制,对环境温度和湿度敏感,可逆性差;折射率变化型光纤气体传感器易受其他气体影响需经常调校,其可靠性和稳定性较差。在这几种已报道的光纤气体传感器中,基于倏逝场效应的光纤气体传感器是一种具有结构简单、成本低廉、可交叉分辨、可分布式传感、可实现“传”和“感”合为一体等优点的功能型气体传感器。因此,基于倏逝场效应的光纤气体传感技术受到了人们的重视,已成为光纤气体传感技术一个重要的研究方向。

2003年,浙江大学的Tong等^[1]在Nature杂志上报道了一种利用蓝宝石棒辅助的二步拉伸法得到的直径达50 nm的超细径微纳光纤(微纳光纤是指直径接近或者小于微米量级的导光纤维,即OMNF),其长度可达数十毫米。并在文献[2]实验观测了光在这种微纳光纤中的低损耗传输,实验测得其传输损耗只有0.1 dB/mm。2004年,Leon-Saval等^[3]也成功制备了氧化硅微纳光纤,实验测得其传输损耗可以达到0.001 dB/mm。随后,人们研究了不同直径微纳光纤的损耗、制备工艺及应用^[4-6]。低损耗微纳光纤的成功制备,为制作基于微纳光纤的微型化光学元件打下了良好的基础。另外,微纳光纤具有以下独特的优点:1)微纳光纤是采用低损耗的玻璃材料高温拉制而成,其表面粗糙度可低至原子尺度,直径可以非常均匀,光传输损耗远低于其他方法制作的同等尺度光波导;2)利用光纤高温拉制的微纳光纤,两端锥区与普通光纤自然连接,这不仅方便光波的耦合输入输出,而且光耦合损耗非常低;3)制作工艺简单,可以方便地拉制出长度在几十甚至上百毫米的微纳光纤;4)微纳光纤具有强的光场约束能力和大比例倏逝场传输特性;5)微纳光纤具有很好的柔韧性和机械强度。微纳光纤具有的这些优良的机械和光学特性^[7],使其对周围环境参量的变化非常敏感。研究人员基于微纳光纤倏逝场特性,探索研究了各种基于微纳光纤倏逝场效应的光纤气体传感器,为光纤气体传感器向微型化、高灵敏度、集成化方向发展提供了一个崭新的研究思路。

本文主要介绍了基于微纳光纤倏逝场效应气体传感器的基本原理、国内外研究进展及其面临的问题和挑战。

2 基于微纳光纤倏逝场效应气体传感器的基本原理

微纳光纤倏逝场是指当光在微纳光纤中传输时,在微纳光纤(纤芯)和空气或被检测气体(包层)的分界面处发生全反射传输,会有一部分光渗透到包层介质中,形成一种趋向于指数衰减的电磁场,如图1所示。

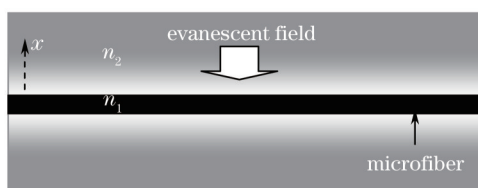


图1 微纳光纤倏逝场示意图

Fig.1 Diagram of microfiber evanescent field

假设光波在纤芯和包层分界面反射点附近的局部区域,沿着微纳光纤轴向传输,这时倏逝场光波可以近似为局部平面光波来处理,利用Snell定律、全反射条件和电磁场边界条件,求出倏逝场在包层中的有效穿透深度^[8-10]表达式为

$$d_x = \frac{\lambda_1}{2\pi \sqrt{\sin^2 \theta_1 - (n_2/n_1)^2}}, \quad (1)$$

式中 d_x 为微纳光纤倏逝场的有效穿透深度, n_1 和 n_2 分别为纤芯(传感区域处微纳光纤)和包层(被检测气体或空气)的折射率。其中, n_2 与被检测气体类型、成分、浓度等有关, λ_1 为微纳光纤 n_1 中的光波波长。

从(1)式可以看出,当微纳光纤与不同种类、不同浓度、不同成分的气体相互作用时,微纳光纤周围的折射率不同,其倏逝场的穿透深度也不同。这表明,当被检测气体种类、成分和浓度发生变化时,将导致2个方面的效应:1) 被检测气体对光波的吸收和散射特性将发生变化,对其输出光强产生调制作用;2) 当气体种类、浓度和成分发生变化时,又会调制微纳光纤中传输光波的输出特性。因此,可以通过解调输出信号来获知被检测气体的种类、成分和浓度等相关信息。为了优化这种基于微纳光纤倏逝场效应气体传感器的灵敏度、响应时间、检测范围等性能参数,可以给微纳光纤表面涂覆气体敏感薄膜或与其他光学微结构相结合。这种改进的基于微纳光纤倏逝场效应气体传感器的传感机理,应该在以上所阐述原理的基础上进行修正,以适应具体的传感器结构。

3 国内外研究进展

微纳光纤的倏逝场强、柔韧性好、损耗小、容易制备等优点,使其在开发高灵敏度、微型化、分布式光纤气体传感器方面具有潜在的应用前景,备受研究者的关注。基于微纳光纤优良的光学和机械特性,人们探索了不同结构的基于微纳光纤倏逝场效应气体传感器。从结构来看,主要有直接基于微纳光纤倏逝场效应的气体传感器、微纳光纤表面涂覆敏感薄膜的气体传感器、微纳光纤与其他光学微结构相结合的气体传感器等。

较早报道直接基于微纳光纤倏逝场效应光纤气体传感器的是日本东京煤气有限公司的 Tai 等^[11],他们在1987年报道了利用锥形微纳光纤倏逝场效应,实验上实现了甲烷(CH_4)气体浓度检测。实验中,利用纤芯直径为 $50 \mu\text{m}$ 、包层直径为 $125 \mu\text{m}$ 的多模光纤,用加热拉锥的方法制备成锥形微纳光纤,其结构如图2所示,作为气体传感敏感单元。将中心波长为 $3.392 \mu\text{m}$ 的 He-Ne 激光器发出的激光用斩波器调制成 225 Hz 的入射光,用 CaF_2 (氟化钙)透镜耦合进入锥形微纳光纤一端的单模光纤(SMF),微纳光纤另一端 SMF 输出的信号光用 InAs 光电探测器进行探测,并用锁相放大器进行微弱信号处理,从而得到了被检测甲烷气体的浓度信息。在实验中,他们用腰区直径不同的锥形微纳光纤,对不同浓度甲烷气体进行了浓度检测。发现当锥形微纳光纤腰区直径为 $2.8 \mu\text{m}$ 、长度为 10 mm 时,该系统对甲烷气体浓度探测灵敏度约为 10% ;当锥形微纳光纤的腰区直径为 $1.8 \mu\text{m}$ 、长度为 10 mm 时,甲烷的最低检测灵敏度为 1% (低于甲烷的最低爆炸体积分数为 5%)。最后,他们还指出可以通过进一步减小锥形微纳光纤的腰区直径,来提高这种微纳光纤气体传感器的灵敏度。

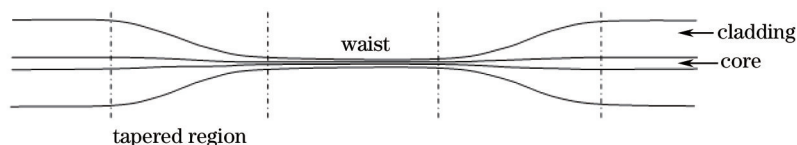


图2 锥形微纳光纤结构示意图

Fig.2 Diagram of tapered microfiber structure

为了进一步提高这种基于锥形微纳光纤倏逝场效应气体传感器的灵敏度,科研人员研究了给锥形微纳光纤腰区镀上对气体敏感的金属薄膜。2003年, Villatoro 等^[12]给拉锥微纳光纤腰区表面镀上一层钯膜,构成了一种锥形微纳光纤氢气传感器。研究发现这种光纤气体传感灵敏度与锥形微纳光纤的腰区直径、作用长度、光波波长等密切相关。当该传感器置于体积分数低于 4% 的氢气中时,其传感器输出光功率变化了 60% 。2005年, Villatoro 等^[13]报道了利用锥形微纳光纤表面涂覆超薄钯膜的小型化氢气传感器,实现了响应时间约为 10 s 的低浓度氢气探测。同年, Moreno 等^[14]将热塑性聚氨酯涂覆于 $200/225 \mu\text{m}$ 的塑料包覆硅(PCS)光纤的纤芯上,当氨气体积分数为 $0.03\% \sim 1\%$ 时,传感器在 600 nm 处的最大输出变化约为 6 dB ,恢复时间小于 5 s 。2006年, Zalvidea 等^[15]实验制作了腰区直径为 $25 \mu\text{m}$ 、长度为 8 mm 、涂覆钯膜的锥形光纤气体传感器,在 $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境下实现了对体积分数为 4% 氢气的快速响应和探测,并且,重复 40 次后,传感器的性能无衰减。该传感器已应用于临界温度下氢气的泄露检测。2012年, Jarzebinska 等^[16]通过给锥形微纳光纤表面涂覆人工材料,实现了体积分数为 $10 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ 的氨气检测,响应时间小于 100 s 。

为了设计出灵敏度高、结构简单、微型化的气体传感器, 研究者们探索将微纳光纤与其他结构相结合来实现气体传感。2012年, 香港理工大学的Cao等^[17]报道了一种基于锥形微纳光纤倏逝场效应的石英增强倏逝场光声光谱气体传感器(QE-EPAS), 其结构如图3所示。锥形微纳光纤是用火焰加热SMF拉锥而成, 其损耗低于0.2 dB。把锥形微纳光纤放置在微石英音叉(QTF)2个叉中间的间隙内。分布式反馈激光器(DFB)作为光源, 从锥形微纳光纤一端的SMF进入, 在锥形微纳光纤的腰区形成倏逝场并被待检测气体吸收产生声压波, 产生的声压波被微石英音叉探测。通过研究, 发现该气体传感器的灵敏度和吸收型气体传感器的灵敏度基本相同, 但是, 这种气体传感器具有容易对准、插入损耗小、便于复用等优点。

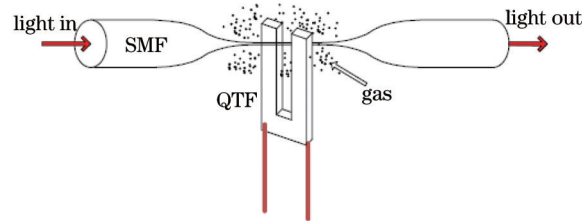


图3 基于锥形微纳光纤的石英增强倏逝场光声光谱气体探测器结构示意图

Fig.3 Schematic of QE-EPAS with an OMNF

2014年, 北京理工大学的Cao等^[18]报道了通过用飞秒激光加工锥形微纳光纤尖端形成微型沟槽, 如图4所示, 使其产生多模干涉, 实现了在50 °C~500 °C环境下气体折射率的检测。其传感原理为: 当光纤微纤芯中的基模与包层模发生干涉时, 气体与倏逝场相互作用, 对该干涉光谱具有调制作用, 通过检测其干涉光谱的变化情况, 可以得到被检测气体的折射率信息。在实验中, 对SMF进行加热拉锥, 形成微纳光纤锥; 用蓝宝石激光器产生脉宽为35 fs、重复频率为1 kHz、光束直径为1 μm的飞秒光脉冲来加工微纳光纤锥使其形成微型沟槽。再用该具有微型沟槽的微纳光纤锥进行气体折射率传感。用长为373.4 μm的微纳光纤锥进行气体折射率传感, 测得其传感灵敏度约为669.502 nm/RIU, 其中RIU为折射率单位。

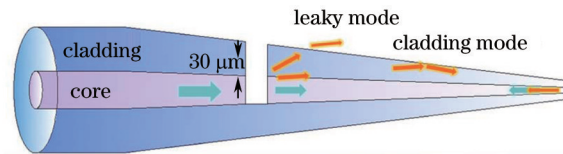


图4 具有微型沟槽的微纳光纤锥结构示意图

Fig.4 Schematic of the microfiber taper with trench-embedding

在基于微纳光纤倏逝场效应的气体传感技术方面, 成都电子科技大学饶云江教授课题组进行了大量的研究探索。2012年, 该课题组的Jia等^[19]在第3届亚太光学传感器会议上, 报道了微纳光纤表面结合碳纳米管薄膜制成的气体传感器。实验中, 他们用火焰加热SMF进行拉锥, 形成腰区直径在3~5 μm的微纳光纤, 再用化学气相沉积的方法给其表面结合一层碳纳米管薄膜, 形成气体传感器。他们在实验中探测了丙酮和二甲苯的浓度变化。2014年, 该课题组的Wu等^[20]又把光纤布拉格光栅(FBG)用氢氟酸进行化学腐蚀, 制成直径只有11 μm的微纳光纤布拉格光栅(MFBG)。把MFBG固定到折射率较低的氟化镁MgF₂晶体衬底上面, 利用化学气相沉积的方法生长石墨烯, 再将石墨烯转移到MFBG, 形成石墨烯微纳光纤布拉格光栅(GMFBG), 其结构如图5所示。

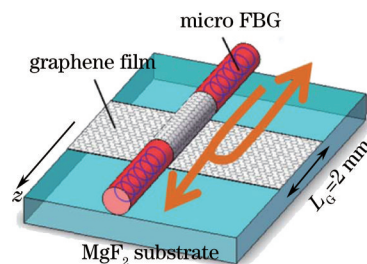


图5 GMFBG结构示意图

Fig.5 Structure diagram of the GMFBG

MFBG表面结合石墨烯可以提高该气体传感器的灵敏度。这是由于: 1) 石墨烯的折射率较高, 可以有

效地增强 MFBG 表面的倏逝场强度;2) 石墨烯薄膜对极性分子非常敏感。实验中,用波长 1547~1567 nm 可调节的可调谐激光器作为输入光源,GMFBG 的反射光信号用光谱分析仪监测。通过实验研究,他们发现这种基于石墨烯的 GMFBG 气体传感器,具有很高的气体传感灵敏度。他们对氨气进行探测并获得约为 0.2×10^{-6} 的传感灵敏度,这种气体传感器的灵敏度是普通 MFBG 气体传感器的 10 倍左右。他们还认为通过增加石墨烯的包裹长度,可以进一步提升这种光纤气体传感灵敏度。同一年,哈尔滨工业大学的 Zhang 等^[21]报道了一种在微型孔中放置微纳光纤,利用微纳光纤倏逝场效应实现的分布式气体传感。

随着光纤气体传感技术的不断发展,研究人员提出了不同结构的基于微纳光纤倏逝场效应的光纤气体传感器^[22]。但是,在研究这种基于微纳光纤倏逝场效应气体传感器的过程中,也面临着一系列问题和挑战。

4 面临的问题及挑战

从已报道的各种基于微纳光纤倏逝场效应气体传感器的结构和实验结果来看,这种气体传感器的优点是:体积小、空间分辨率高、可实现分布式传感、灵敏度高、价格低廉等。但是,要实现这种光纤气体传感器在石油、化工、煤炭、冶金等工业的应用,还面临着一系列的问题及挑战:

1) 现有的微纳光纤制备技术很难制备出结构参数和性能完全相同的多根微纳光纤,给批量生产带来了很大的困难;

2) 由于微纳光纤表面很容易被污染,从而其导光性能将变差,这就导致这种气体传感器的除尘系统要求很高,可重复使用性不是很理想;

3) 从上面的分析报道可以看出,高灵敏度气体传感的实现需要大比例的倏逝场或高敏感增敏薄膜。这就要求有直径更细的微纳光纤和更薄的薄膜制备技术,给微纳光纤制备和镀膜提出了很高的技术要求;

4) 由于微纳光纤的直径在微纳米量级,所以,制备这种光纤气体传感器,要在超净环境显微镜监测下进行微纳米量级的微操纵,给制备环境和制作条件提出了苛刻的要求;

5) 当微纳光纤的直径达到微纳米量级时,在微操纵系统上进行操纵时很容易断裂和损坏,所以,现报道的这种基于微纳光纤气体传感器的制备成功率较低;

6) 由于这种气体传感器的传感原理是基于其倏逝场对于外界折射率变化敏感特性来工作的,所以,对于气体检测选择性不是很好^[23]。当然,可以在微光纤上镀特定膜,对其传感特性能够进行改善;

7) 基于微纳光纤倏逝场效应的光纤气体传感器的响应速度较慢;

8) 基于微纳光纤倏逝场效应的气体传感器封装困难,是该气体传感器应用面临的一个重要问题。

随着研究人员对基于微纳光纤光子器件的开发和研究^[24-27]及科学技术的不断革新,基于微纳光纤气体传感技术会不断发展和成熟。

5 结束语

基于微纳光纤倏逝场效应的气体传感器,从传感原理、国内外研究进展及面临的问题等方面进行了介绍。从上面的分析介绍来看,由于微纳光纤所具有的倏逝场强、柔韧性好、损耗小、容易制备等优点,在开发高灵敏度、微型化、分布式光纤气体传感器方面具有潜在的应用前景,但是,也面临一系列问题和挑战。但随着微纳光纤的制备技术、微操纵技术、镀膜技术、除尘技术的不断发展和革新,这种基于微纳光纤倏逝场效应气体传感器必将得到很大的发展和应用。

参考文献

- 1 L M Tong, R R Gattass, J B Ashcom, *et al.*. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. *Nature*, 2003, 426(6968): 816-819.
- 2 L M Tong, J Lou, Z Ye, *et al.*. Self-modulated taper drawing of silica nanowires[J]. *Nanotechnology*, 2005, 16(9): 1445-1448.
- 3 S G Leon-Saval, T A Birks, W J Wadsworth, *et al.*. Supercontinuum generation in submicron fibre waveguides[J]. *Opt Express*, 2004, 12(13): 2864-2869.
- 4 Liu Hongjuan. Fabrication of Submicro-Diameter Fiber and Stimulated Raman Scattering Effect in It[D]. Jiangxi: Jiangxi Normal University, 2005.

- 刘鸿娟. 亚微米直径光纤的制造及其中的受激拉曼散射效应[D]. 江西: 江西师范大学, 2005.
- 5 F X Gu, L Zhang, L M Tong, *et al.*. Polymer single-nanowire optical sensors[J]. *Nano Lett*, 2008, 8(9): 2757-2761.
- 6 Gu Fuxing. Optical Waveguiding Nanowires and Their Sensing Applications[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2012.
谷付星. 光学导波纳米线及其传感应用[D]. 浙江: 浙江大学, 2012.
- 7 G Brambilla. Optical fibre nanowires and microwires: A review[J]. *Journal of Optics*, 2010, 12(4): 043001.
- 8 Yang Jianchun, Xu Longjun, Zhang Peng. Review on optical fiber evanescent wave gas sensor[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(4): 562-567.
杨建春, 徐龙君, 章鹏. 倏逝波型光纤气体传感器研究进展[J]. *光学技术*, 2008, 34(4): 562-567.
- 9 Liu Jian. A derivation of Goos-Hänchen shift from the effective penetration depth of evanescent waves[J]. *College Physics*, 2002, 21(9): 36-37.
刘建. 利用倏逝波的有效穿透深度推导 Goos-Hänchen 位移[J]. *大学物理*, 2002, 21(9): 36-37.
- 10 Shi Shunxiang, Wang Xueen, Liu Jinsong. Physical Optics and Applied Optics[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2008: 213-216.
石顺祥, 王学恩, 刘劲松. 物理光学与应用光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008: 213-216.
- 11 H Tai, H Tanaka, T Yoshine. Fiber-optic evanescent-wave methane-gas sensor using optical absorption for the 3.392 μm line of a He-Ne laser[J]. *Opt Lett*, 1987, 12(6): 437-439.
- 12 J Villatoro, D Antonio, L C Jose, *et al.*. In-line highly sensitive hydrogen sensor based on palladium-coated single-mode tapered fibers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2003, 3(4): 533-537.
- 13 J Villatoro, D Monzón-Hernández. Fast detection of hydrogen with nano fiber tapers coated with ultra thin palladium layers[J]. *Opt Express*, 2005, 13(13): 5087-5092.
- 14 J Moreno, F J Arregui, I R Matias. Fiber optic ammonia sensing employing novel thermoplastic polyurethane membranes [J]. *Sensors and Actuators B*, 2005, 105(2): 419-424.
- 15 D Zalvidea, A Diez, J L Cruz, *et al.*. Hydrogen sensor based on a palladium-coated-fibre-taper with improved time-response[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, 114(1): 268-274.
- 16 R Jarzebinska, S Korposh, S James, *et al.*. Optical gas sensor fabrication based on porphyrin-anchored electrostatic self-assembly onto tapered optical fibers[J]. *Analytical Letters*, 2012, 45(10): 1297-1309.
- 17 Y C Cao, W Jin, L Hoi Ho, *et al.*. Evanescent-wave photoacoustic spectroscopy with optical micro/nano fibers[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(2): 214-216.
- 18 Z T Cao, J Lan, S Wang, *et al.*. Trench-embedding fiber taper sensor fabricated by a femtosecond laser for gas refractive index sensing[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(6): 1028-1032.
- 19 L Jia, Y Wu, B C Yao, *et al.*. A sensitivity enhanced gas sensor based on carbon nanotubes around microfiber[C]. *SPIE*, 2012, 8351: 835120.
- 20 Y Wu, B C Yao, A Q Zhang, *et al.*. Graphene-coated microfiber Bragg grating for high-sensitivity gas sensing[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(5): 1235-1237.
- 21 Z Tao, L J Ma, H B Bai, *et al.*. Design and fabrication of a novel core-suspended optic fiber for distributed gas sensor [J]. *Photonic Sensors*, 2014, 4(2): 97-101.
- 22 W Jin, H L Ho, Y C Cao, *et al.*. Gas detection with micro- and nano-engineered optical fibers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2013, 19(6): 741-759.
- 23 Yi Weiqi. Study of High Quality Subwavelength Microfiber Fabrication Process and Microknot Gas Sensing Property [D]. Sichuan: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
易玮琪. 高品质亚波长微纳光纤制备与微光纤环气体传感特性研究[D]. 四川: 电子科技大学, 2013.
- 24 Song Zhangqi, Wei Zhengtong, Zhang Xueliang, *et al.*. Research on sensing technologies based on optical micro-nano fiber evanescent field[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(s1): s105005.
宋章启, 卫正统, 张学亮, 等. 基于微纳光纤倏逝场的传感技术研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(s1): s105005.
- 25 Z T Wei, N Jiang, Z Q Song, *et al.*. KrF excimer laser-fabricated Bragg grating in optical microfiber made from pre-etched conventional photosensitive fiber[J]. *Chin Opt Lett*, 2013, 11(4): 040603.
- 26 Z Q Song, Y Yu, Z L Zhang, *et al.*. Optical microfiber phase modulator directly driven with low-power light[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(9): 090606.
- 27 Li Guoxiang, Wang Shanshan, Yang Hongjuan, *et al.*. Study of seawater salinity sensor based on embedded microfiber ring resonator[J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2014, 51(5): 050603.
李国祥, 王珊珊, 杨红娟, 等. 嵌入式微纳光纤环形腔的海水盐度传感研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(5): 050603.

栏目编辑: 王晓球