

控制与决策

Control and Decision

面向人体健康防护的光纤生化传感技术

张亚男, 靳泼, 郑万禄, 赵勇

引用本文:

张亚男, 靳泼, 郑万禄, 赵勇. 面向人体健康防护的光纤生化传感技术[J]. *控制与决策*, 2023, 38(8): 2313–2325.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0385>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于HJB方程的无线传感器网络系统Minimax控制器设计](#)

Design of Minimax controller for wireless sensor network systems based on HJB equation

控制与决策. 2021, 36(4): 947–952 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0634>

[基于移动传感器/执行器网络的时滞分布参数系统镇定控制](#)

Stabilization control for a class of distributed parameter systems with time–delay based on mobile sensor and actuator networks

控制与决策. 2021, 36(8): 1955–1962 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1309>

[含混合储能的互联电力系统传感器容错负荷频率控制](#)

Sensor fault–tolerant load frequency control for multi–area interconnected power system with hybrid energy storage system

控制与决策. 2021, 36(5): 1069–1077 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1432>

[基于HJB方程的无线传感器网络系统Minimax控制器设计](#)

Design of Minimax controller for wireless sensor network systems based on HJB equation

控制与决策. 2021, 36(4): 947–952 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0634>

[基于操作风险的双模式传感器管理方法](#)

A dual–mode sensor management method based on operational risk

控制与决策. 2020, 35(12): 2993–2998 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1541>

面向人体健康防护的光纤生化传感技术

张亚男^{1,2,3}, 靳波^{1†}, 郑万禄¹, 赵勇^{1,2,3}

1. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819;
2. 东北大学 流程工业综合自动化国家重点实验室, 沈阳 110819;
3. 河北省微纳精密光学传感与检测技术重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 光纤生化传感器因具有不受电磁干扰、绝缘性好、安全防爆、损耗低和耐腐蚀等优点, 在人体健康防护领域表现出了良好的应用价值: 及时且有效地监测污染物可为环境污染物的有效控制提供数据支撑, 从源头上减少疾病的发生; 准确且灵敏地检测疾病标志物可诊断人体疾病的情况, 从而使得疾病的预防和早期治疗成为可能. 对应用于人体健康防护中的光纤生化传感器进行全方位地概述: 首先, 介绍其使用的光纤传感原理; 然后, 总结并分析应用于气体和水质污染物监测的光纤生化传感技术; 接着, 总结并分析应用于人体呼出气体和生物体液检测的光纤生化传感技术; 最后, 讨论光纤生化传感器在人体健康防护领域实际应用的一些限制因素以及未来的发展方向.

关键词: 光纤生化传感器; 人体健康防护; 危险气体; 水质污染物; 呼出气体; 生物体液

中图分类号: TP212 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0385

引用格式: 张亚男, 靳波, 郑万禄, 等. 面向人体健康防护的光纤生化传感技术[J]. 控制与决策, 2023, 38(8): 2313-2325.

Research on optical fiber biochemical sensing technology for human health protection

ZHANG Ya-nan^{1,2,3}, JIN Po^{1†}, ZHENG Wan-lu¹, ZHAO Yong^{1,2,3}

- (1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Synthetical Automation for Process Industries, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Hebei Key Laboratory of Micro-Nano Precision Optical Sensing and Measurement Technology, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The optical fiber biochemical sensor has the advantages of being immune to electromagnetic interference, well insulated, safe and explosion-proof, low loss and corrosion resistant. It has shown good value in the field of human health protection: Timely and effective monitoring of pollutants can provide data to support the effective control of environmental pollutants and reduce the occurrence of diseases at source; accurate and sensitive detection of disease markers can diagnose human diseases, thus making prevention and early treatment of diseases possible. This paper provides a comprehensive overview of optical fiber biochemical sensors for use in human health protection. Firstly, the article describes the principle of optical fiber sensing that it uses. Secondly, the optical fiber biochemical sensing technology applied to the monitoring of gaseous and water pollutants is summarized and analyzed. Further, the optical fiber biochemical sensing technology applied to the detection of human exhaled gases and biological fluids is summarized and analyzed. Finally, some limitations and future directions for the practical application of optical fiber biochemical sensors in human health protection are discussed.

Keywords: optical fiber biochemical sensors; human health protection; dangerous gases; water quality pollutants; exhaled gas; biological fluids

0 引言

众所周知, 我国的环境污染问题主要分为水体污染^[1]、空气污染^[2]、固体废弃物污染和噪声污染^[4]

个方面^[3]. 随着污水处理厂的技术不断迭代, 洋垃圾的禁止入境^[4], 固废填埋场的封场覆绿以及噪声污染防治法的顺利通过, 为水体的治理监测、污染土壤的

收稿日期: 2023-03-30; 录用日期: 2023-05-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62105057, 62222504); 河北省自然科学基金项目(F2020501040).

责任编辑: 孙秋野.

[†]通讯作者. E-mail: jinpo1015@163.com.

改造还原和噪声源的隔绝治理提供了完备成熟的方案.但是,空气和水体的流动性更大,分子和离子的运动能力更强,分子与分子间、离子与离子间易相互混合,因此,实现对空气和水中痕量污染物的敏感检测,为后续治理提供关键的引导,至今仍然是一个棘手并亟待解决的问题.

光纤生化传感器灵敏度高,选择性好;操作简便,不需要专门的培训;易于实现连续、实时检测,适用于现场检测分析;检测时间短,能够多次重复使用,节约成本等优点^[5].因此,生化传感器在环境保护、环境监测、临床检验、生物医学等方面展现出良好的应用前景^[6-7],在人体健康防护中发挥着关键性作用.如图1所示:一方面,随着科学技术和工业经济的快速发展,气体和水质污染越来越严重,对人类健康造成多方破坏和潜在威胁,发展高性能生化传感技术,可为环境污染物的有效控制提供数据支撑,从源头上减少疾病的发生;另一方面,人体呼出的气体和生物体液中通常含有电解质、代谢物等,可通过检测和分析这些疾病标志物来提供重要的生理信息,从而使得疾病的早期诊断和预防成为可能.

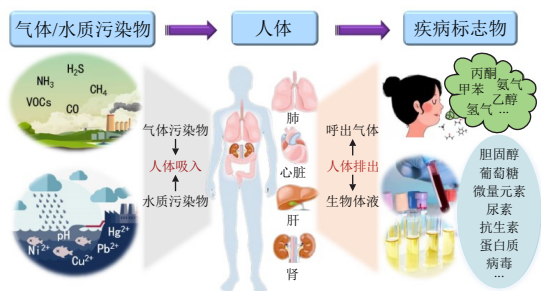


图1 生化传感器在人体健康防护中的应用

本文介绍用于人体健康防护的一些光纤传感原理,叙述光纤生化传感器在气体/水质污染物监测和疾病标志物检测中的应用,展示光纤生化传感器从控制与决策两方面对人体健康防护的贡献.讨论限制光纤生化传感器发展的一些因素以及对未来用于人体健康防护领域的低成本、高性能、分布式、多参数测量传感器的需求.

1 光纤生化传感原理

目前应用于气体和液体中的生化量测量的传感器按照测量方式划分主要有直接测量和间接测量.

1.1 直接测量

任何物质均有其固定的吸收光谱,当具有连续的光源通过吸收介质后,不同波长的光被介质吸收的程度是不同的,将透射光通过分光仪进行分析,可形成某种物质的吸收光谱^[8-10].其吸收强度与被测物质

浓度间服从朗伯-比尔定律,通过对输出光强的分析,可进行生物物质的定性和定量分析,其结构如图2所示.目前应用直接测量方式的传感器主要有光谱吸收型光纤传感器和表面拉曼散射型光纤传感器.

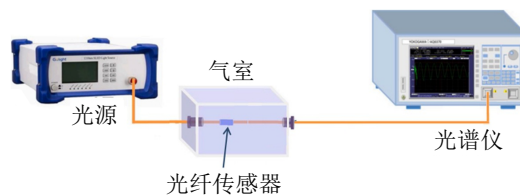


图2 基于直接测量方式的光纤气体传感器

光谱吸收型光纤传感器是光谱分析技术与现代光纤技术相结合的产物,它的一大优点是具有简单可靠的测量结构,且只需要调换光源,对准吸收谱线,可采用同样的实验系统来检测不同的生化量^[11-12].但是在实际应用中,待测物在红外波段的吸收谱宽仅几个纳米,吸收的信号淹没于噪声后,很难直接用于测量待测物的浓度,尤其是低浓度的检测.拉曼光谱作为一种指纹光谱,无需特别的制样过程,根据水的拉曼散射很弱的特点,拉曼光谱可用水作为溶剂来研究水溶液中的生物样品.此外,拉曼光谱对待检测样品的形态没有限制,可测定固态、液态、气态等样品,且拉曼光谱对样品的检测是无接触的,可实现无损检测.

1.2 间接测量

在实际应用中,一些特殊的生化量无法直接测量,且光纤传感器对它们并不敏感,因此,需要在传感器表面涂敷一层敏感材料以实现目标检测物的测量,其结构如图3所示.间接测量的原理主要是利用敏感材料与待测物质发生化学反应或吸附作用,引起光纤表面折射率、温度或应变等物理量的变化,进而引起光信号的变化,最后通过波长变化量来标定出待测物质的浓度以及一些其他特性^[13].基于表面等离子共振、马赫曾德尔干涉、法布里珀罗干涉以及迈克尔逊干涉等原理的光纤传感器均利用了此类原理.目前,间接测量型传感器因其优越的传感性能广泛应用于折射率、温度、湿度、气体、离子以及生物量浓度等

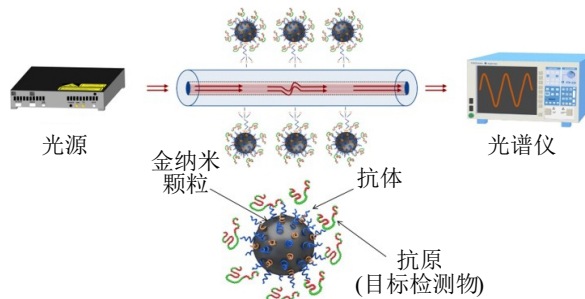


图3 基于间接测量方式的光纤传感器

参数的测量。

2 用于危险气体和水质污染物监测的光纤生化传感技术

2.1 光纤传感技术在危险气体浓度监测领域的应用

随着国内工业化速度的提升,工业生产效率和人民生活水平逐渐提高,社会对环境污染加剧、空气质量下降等问题也逐渐重视。工业生产和日常生活中,经常涉及到的危险气体主要有两类:一类是易燃易爆气体,如氢气(H_2)^[14]、甲烷(CH_4)等^[15-17];另一类是有毒有害气体,如氨气(NH_3)、硫化氢(H_2S)等,这些危险气体的排放会严重威胁人们的生命健康

2.1.1 易燃易爆气体浓度监测

易燃易爆气体具有较大的火灾危险性,一旦发生灾害事故,往往危害大、影响大、损失大等,且生命安全也会受到严重威胁^[18-19]。光纤传感器具有结构小、安全性高、选择性好等特性^[20-26],近些年来,各国学者对面向易燃易爆气体监测的高性能光纤传感器进行了深入研究。下面以甲烷和氢气为例进行详细介绍。

2017年,Zheng等^[17]利用连续波带间级联激光器开发了一种不受压力影响的中红外吸收光谱甲烷传感器,该传感器以波数为 $3\ 038.5\text{ cm}^{-1}$ 的甲烷吸收线为目标,采用吸收路径长度为 54.6 m 的多通气池增强气体吸收,最终达到平均检测时间为 2.5 s 下阿伦方差为 2.25 ppbv 的检测精度,但是由于传感器的体积过大,限制了实际应用。同年,Zhao等^[24]设计了一种基于光子晶体光纤(photonic crystal fibers, PCF)的新型同轴模式耦合干涉仪用于氢气传感,其结构如图4所示,采用 $Pd-WO_3$ 作为氢气敏感材料,当氢气浓度变化时, $Pd-WO_3$ 膜的折射率和体积变化,导致输出光谱发生漂移,实验结果表明:该传感器具有良好的重复性和选择性且不受外界温度波动的影响,但是灵敏度和监测分辨率不够高。随后,同团队的Zhang等^[27]

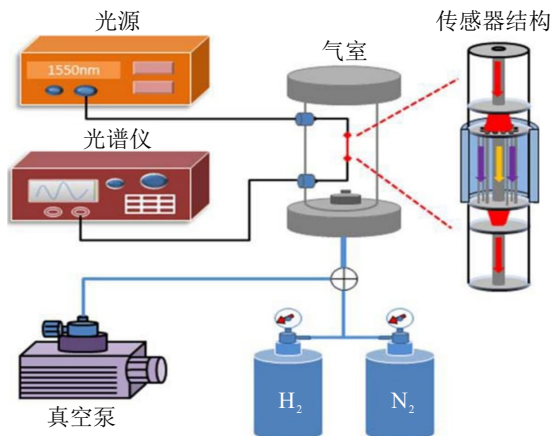


图4 基于PCF的新型同轴模式耦合干涉仪^[24]

设计了一种基于溶胶-凝胶 $Pd-WO_3$ 涂层和高双折射光纤环境的 H_2 传感器,进一步提高了传感器的 H_2 监测性能。

为了减少温度对监测性能的影响,2018年,Zhang等^[28]通过集成光子晶体光纤(PCF)模态干涉仪和高折射光纤环形镜(HBFLM),实现了高灵敏度和高精度的 H_2 浓度和温度同步测量:首先,在PCF上镀上溶胶-凝胶 $Pd-WO_3$ 涂层,用于检测周围环境中氢气浓度,同时,监测HBFLM谐振波谷的波长位置变化实现对环境温度的检测;然后,将两者集成在一起后,可在集成干涉仪的输出光谱上同时监测到两个独立的共振波谷,当外部氢浓度或温度的变化时,输出光谱的波谷也会随之移动;最后,结合双波长矩阵法,可同时测量氢气浓度和温度。同年,Liu等^[29]为了同时测量 CH_4 和 H_2 ,设计了一种基于光子晶体光纤的表面等离子体共振(surface plasmon resonance, SPR)传感器,实现了对含有 CH_4 和 H_2 的混合气体的监测,该传感器对 CH_4 的监测灵敏度为 $-1.99\text{ nm}/\%$,对 H_2 的监测灵敏度为 $-0.19\text{ nm}/\%$ 。

2021年,Liu等^[30]设计了一种基于PCF-SPR的 CH_4 气体传感器,在光子晶体光纤圆周边面抛光了两个平面,并镀上了银膜,在银上沉积了一层含笼形超分子主体化合物Cryptophane-E掺杂的聚硅氧烷的纳米结构薄膜,作为敏感材料增敏,另外,它还能减轻银的氧化,实验结果表明,该传感器具有较高的灵敏度值。2023年,Zhang等^[31]提出了一种具有游标效应的高灵敏度光纤 H_2 传感器,该传感器由3个法布里-珀罗干涉仪(Fabry-Perot interferometer, FPI)级联而成,其结构如图5所示,将氢气敏感材料 $Pd-WO_3$ 涂覆在聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)表面, $Pd-WO_3$ 在与 H_2 接触时会产生热量,引起PDMS的热膨胀和折射率变化,最终导致游标包络波长随 H_2 浓度的变化而漂移,该 H_2 传感器具有极高的灵敏度,是单个FPI的16.11倍,对温度也有很好的监测能力,灵敏度高达 $3.783\text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。2023年,Zhang等^[32]还提出了一种基于自组装微瓶谐振器的新型光纤氢气

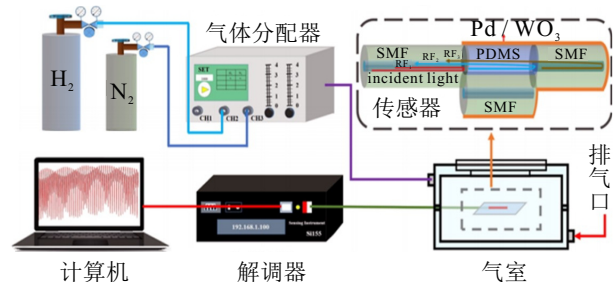


图5 基于三FPI级联的高灵敏度光纤 H_2 传感器^[31]

传感器,通过将锥形光纤与自组装的微瓶耦合以激发回音壁模式,制备了微瓶谐振腔,当回音壁模式谐振腔暴露于 H_2 时, H_2 分子穿透PDMS并与Pd- WO_3 发生氧化还原反应,利用PDMS吸收热量后的体积和折射率变化实现了对氢气的高灵敏度监测;另外,实验中还发现它具有抗外界湿度和温度干扰的能力。

综上所述,新型敏感材料和光纤结构的引入,增加了光纤气体传感器的灵敏度以及检测极限,使其具备安全性好、结构小、响应灵敏度高以及选择性强的优点,改善了目前易燃易爆传感器存在体积大、灵敏度低和选择性差等不足。

2.1.2 有毒有害气体浓度监测

许多工业生产过程均存在刺激性气体,这些气体多具有腐蚀性,经呼吸道进入人体可造成急性中毒。刺激性气体对机体毒作用的共同特点是对眼、呼吸道粘膜以及皮肤均具有不同程度的刺激性。若吸入这些气体,轻者则因其化学性炎症反应,出现流涕、喉痒、呛咳等症状,重者则出现肺水肿甚至死亡^[33]。为了防止工业生产中的气体泄漏,造成严重事故、危害人体健康安全,实时远距离的气体浓度监测非常必要^[34-39]。由于光纤具有低损耗、远距离传输的特性,近些年来,各国学者对面向有毒有害气体监测的高性能光纤气体传感器进行了深入研究。下面以 NH_3 为例进行简要介绍。

2018年,Zhu等^[34]设计了一种基于氧化锌包覆的光纤干涉型 NH_3 传感器,该传感器实现了对0~5460 ppm浓度范围内的 NH_3 的高灵敏测量。同年,Shrivastav等^[40]提出了一种超敏 NH_3 传感方法,利用单模光纤(single mode fiber, SMF)-PCF-SMF的结构完成马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zendel interferometer, MZI)的制备,使用聚苯胺@ SnO_2 纳米复合材料作为气敏材料实现对 NH_3 的检测,该方法具有非常快的响应和恢复时间以及非常低的检测限。

2020年,Fu等^[41]基于干涉原理提出了一种锥形光纤干涉仪,将 Fe_2O_3 纳米管涂覆于光纤表面作为传感层,通过测定透射光谱的波长偏位,可检测 NH_3 的浓度,虽然该传感器在常温下检测 NH_3 时灵敏度不够高,但是其具有非常宽的检测范围,可用于环境中有害气体的检测。2021年,Liu等^[42]提出了一种基于功能化悬浮芯光纤的 NH_3 传感器,将四苯基卟啉四磺酸水合物薄层沉积在光纤内腔壁上作为增敏材料,该传感器在氨气浓度为0~10 ppm的范围内进行了测试,验证了检测ppb量级的氨气的的能力,且可重复使用。

2.1.3 小结

近些年,光纤传感技术在污染气体浓度监测中的应用现状如表1所示。目前,主要问题是大多数气体传感器还存在温度、湿度的干扰。在今后的研究中应设计多参数测量的光纤气体传感器,以减小环境因素对传感器性能的影响。

表1 光纤传感技术在污染气体浓度监测中的应用现状

目标分析物	原理	监测范围	检测限/灵敏度	文献
CH_4	SPR	0.5%~3.5%	0.344 nm/%	[18]
H_2	模间干涉	0~1%	2.18 nm/%	[27]
H_2 、温度	模间干涉	0~1%	-1.12 nm/%、 -1.84 nm/°C	[28]
CH_4 、 H_2	SPR	0~3.5%、 0~3%	-1.99 nm/%、 -0.19 nm/%	[29]
H_2 、温度	FPI	0~1%、 18~34°C	6.214 nm/%	[31]
H_2	WGM	0~3%	-3.091 nm/%	[32]
NH_3	MZI	0~5460 ppm	5.75 pm/($\mu g \cdot L^{-1}$)	[34]
NH_3	MZI	0~8 ppb	8.09 ppt	[40]
NH_3	MZI	0~11640 ppm	1.30 pm/ppm	[41]
NH_3	MZI	0~10 ppm	20 ppb	[42]

2.2 光纤传感技术在水质污染监测领域的应用

根据国家环境监测总站的报道,我国城市地表水难以检测的污染类型主要有重金属污染、酸性和碱性污染以及其他有机污染。随着这些污染物的不断增加,环境污染越来越严重,严重威胁人类的健康。为了防止环境受到破坏,改善人们的生活环境,防止人们身体健康受到威胁,近些年,各国学者对面向水质污染物监测的光纤传感技术进行了广泛研究^[43]。

2.2.1 重金属离子监测

随着现代城市的可持续性发展,重金属对大气、土壤以及水环境中的污染不断地增加,尤其是对水环境的污染^[44]。目前,这些重金属普遍存在于环境和日常饮食中^[45-50],对人类身体健康造成了严重威胁。因此,为了人类健康不受威胁,各国学者对重金属离子监测进行了广泛研究。

2017年,Sahu等^[45]提出了一种新型光纤SPR汞离子(Hg^{2+})传感器,该传感器采用银纳米印迹海藻酸钠/聚乙烯醇纳米复合薄膜作为敏感材料,其在 Hg^{2+} 浓度为0.9~1200 ppb范围内具有良好的线性响应,在pH值为2.0~10.0范围内对 Hg^{2+} 水溶液具有良好的识别效果。为了降低温度对 Hg^{2+} 传感器监测性能的影响,2018年,Zhang等^[46]提出了一种可同时监测 Hg^{2+} 的浓度和温度的双参数反射式

光纤传感器,其结构如图6所示,实验结果表明:该传感器在 $0\sim 100\ \mu\text{M}$ 范围内,对 Hg^{2+} 的监测灵敏度最高可达到 $0.0823\ \text{nm}/\text{mM}$,温度灵敏度可达到 $0.0147\ \text{nm}/^\circ\text{C}$,具有同时监测 Hg^{2+} 的浓度和温度的能力。

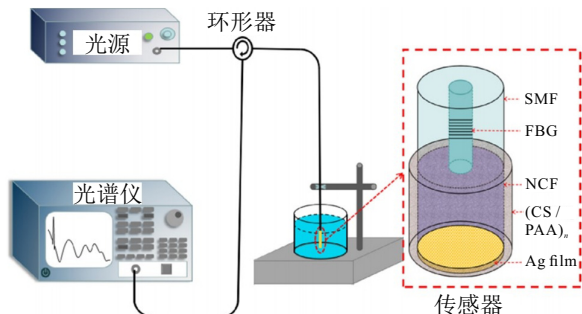


图6 SA-Ag/PVA纳米复合薄膜的光纤SPRHg²⁺传感器^[46]

为了提高传感器的多参数测量能力,2019年,Halkare等^[51]使用大肠杆菌B40作为局部表面等离子体共振生化传感器的受体,用于检测水中 Hg^{2+} 和镉离子(Cd^{2+})。金属离子与细菌细胞上的硫醇以及其他基团相互作用,导致传感器周围折射率变化,从而实现金属离子的检测^[52-55]。实验结果表明,该传感器具有较广的检测范围、较低检测限和良好的选择性,但是,大肠杆菌易失活,因此制作较困难。

2020年,Zhang等^[53]提出了一种基于SPR的新型双通道光纤传感器,该传感器将不同厚度的银层溅射到两个光纤通道上,产生两个共振角,用壳聚糖和聚丙烯酸通过层层自组装将较厚的银通道功能化,用于监测污染水中的重金属离子,以较薄的银通道作为参考通道,实验结果表明,该传感器对于低浓度铜离子具有较高的灵敏度。2021年,Ma等^[54]提出了一种基于SPR和表面离子印迹技术的反射型光纤镍离子传感器,该传感器利用氧化石墨烯和镍离子印迹壳聚糖增强了传感器的灵敏度,实验结果表明,印迹后传感器的选择性显著提高,且具有良好的稳定性和重复性。

在重金属离子监测方面,由于光纤结构设计的灵活性,基于其他原理的传感器也在这里获得了许多的应用^[56-58]。2018年,Zhong等^[59]提出了一种D型光纤重金属离子传感器,该传感器的传感区域由3层结构和层间表面感测区域组成,表面层由加拿大香脂制成,纵向部分涂有光吸收膜,通过静电自组装技术,在传感区域涂覆聚阳离子层和聚阴离子层作为监测 Hg^{2+} 的敏感层,实验结果表明,该传感器具有较高的灵敏度和较低的监测限,但是结构的机械稳定性较差。2020年,de Acha等^[60]提出了一种用于

监测水溶液中 Hg^{2+} 离子的光纤荧光传感器,该传感器基于荧光团标记的胸腺嘧啶脱氧核糖核苷酸序列,该序列直接固定于锥形光纤的尖端,在 Hg^{2+} 存在的情况下, Hg^{2+} 会猝灭标记荧光团中的荧光,从而实现了水溶液中 Hg^{2+} 离子的测量,该传感器对 $5\times 10^{-12}\ \text{M}\ \text{Hg}^{2+}$ 的响应时间为24.8s,但是其可重复性一般。

综上所述,相比于光纤干涉结构与光纤荧光结构^[61],光纤SPR结构融合了高灵敏度、高稳定性、高选择性等优势,因此,在重金属离子监测领域的应用较为广泛,但是也存在诸多因素限制其发展。如其工作波长通常在600nm左右,与1550nm左右的工作波长相比,光纤传输损耗显著增加,因此,不适合远程遥感;另外,金属膜的厚度、均匀性以及易氧化等因素均会影响传感特性,对镀膜工艺技术的要求较高。

2.2.2 pH值监测

pH值是以对数标度来衡量溶液酸碱度的重要化学参数,是水质监测和生物医药生产过程中的重要参数之一,对其进行实时监测具有重要的现实意义。近些年来,国内外众多学者对光纤pH值传感器进行了很多有意义的研究,也取得了很多建设性的研究成果。

2018年,Lei等^[62]提出了一种基于光纤光栅和MZI干涉仪的复合光纤pH传感器,利用光纤光栅测量温度对传感器的影响,利用水凝胶的膨胀或收缩监测pH值,实验结果表明,该传感器具有较宽的pH测量范围和良好的稳定性。为了进一步提高对pH值的监测能力,Zhao等^[63]研制了一种基于多模光纤-SMF-多模光纤结构的水凝胶包覆光纤SPR传感器,其结构如图7所示,该传感器具有显著的重复性和良好的稳定性,同时,测量范围更宽、制作工艺更简单,在pH值测量中具有广阔的应用前景。

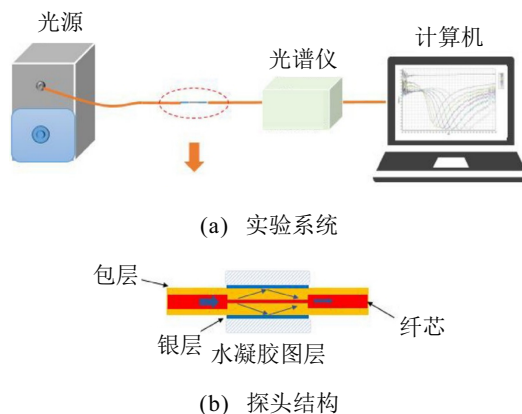


图7 光纤pH值传感器^[63]

2019年,Semwal等^[64]利用SPR原理制备了还原

氧化石墨烯-聚苯胺纳米复合材料的高灵敏度光纤pH传感器,该传感器在pH值为2.4~11.35范围内具有较高的灵敏度和稳定性.2020年,Li等^[65]提出了一种基于分层自组装和SPR技术的光纤pH传感器,以聚丙烯酸/壳聚糖自组装纳米膜作为敏感膜,对pH值范围为3.18~11.84的样品进行了测试,实验结果表明,该传感器具有良好的稳定性、重复性和迟滞特性.2021年,Wang等^[66]提出了一种基于脱氧核糖核酸(deoxyribonucleic acid, DNA)功能化的锥形光纤pH传感器,利用pH/DNA(i-motif)混合物与互补DNA协作,实现了对pH的传感,实验结果表明,该传感器具有良好的生物相容性、无标签操作、结构紧凑、样品消耗少等优点,但是结构稳定性较差且成本较高.

2.2.3 有机污染物监测

工业废水中含有很多不同种类的污染物,以糠醛生产为例,糠醛废水是国家重点控制的有机废水,而糠醛废水也是难于处理的废水之一,其主要含有醇类、醛类、酮类、脂类、酚类等多种有机物.下面以酚类的监测为例进行简要介绍.

2019年,Zhong等^[67]提出了一种高灵敏度光催化塑料光纤传感器,用于检测水溶液中的苯酚,结果表明,该传感器对pH为2.0~14.0的水溶液中苯酚的选择性监测具有 -0.39 mg/mL 的高灵敏度和 $15\text{ }\mu\text{g/L}$ 的最低检测限.2020年,Mishra等^[68]制备了一种基于长周期光纤光栅的酚类化合物传感器,该光纤光栅涂有酪氨酸酶(多酚氧化酶)包封的聚丙烯酰胺凝胶,酚类化合物与酶包覆光纤光栅接触后,可通过酶反应改变酪氨酸固定化凝胶的折射率,从而改变光栅的共振波长,实验结果显示,该光纤传感器具有宽工作范围、快速响应、低成本、现场检测能力等优点,但是灵敏度不够高.Pathak等^[69]研究出了一种基于银薄膜的光纤SPR传感器,用于检测酚类分析物邻苯二酚,该传感器检测原理依赖于邻苯二酚与涂覆在银膜上的十六烷基三甲基溴化铵功能化氧化锌/碳纳米管纳米复合材料的相互作用,实验结果表明,该探针对于邻苯二酚的检测灵敏度为 $5.46\text{ nm}/\mu\text{M}$,并表现出较低检测限以及高效的重复性和选择性,适用于现场探测或实时遥感应用.

2.2.4 小结

近些年,光纤传感技术在水质污染物监测中的应用现状如表2所示.在水质污染物监测中,具有多参数测量功能的光纤生化传感器的发展较为缓慢,对于温度、pH补偿的系统性研究较少,在今后的研究中,应设计具有多参数测量功能的光纤气体传感器,以减

小环境因素对监测结果准确性的影响.

表2 光纤传感技术在水质污染监测中的应用现状

目标分析物	原理	监测范围	检测限/灵敏度	文献
Hg ²⁺	SPR	0.9~1 200 ppb	0.9 ppb	[45]
Hg ²⁺ 、温度	SPR	0~100 μM 20~50 $^{\circ}\text{C}$	0.082 3 nm/ μM 0.014 7 nm/ $^{\circ}\text{C}$	[46]
Hg ²⁺	SPR	10^{-12} ~ 10^{-6} M	1.0 pM	[48]
Hg ²⁺	SPR	0~30 μM	8 nM	[49]
Hg ²⁺ 、Cd ²⁺	SPR	0.5~2 000 ppb	0.5 ppb	[51]
Hg ²⁺ 、Cd ²⁺	SPR	0~80 μM	0.249 nm/ μM	[53]
Ni ²⁺	SPR	0~100 mg/L	0.002 393 mg/L	[54]
Hg ²⁺	干涉	10 nM~10 μM	10^{-9} M	[58]
pH、温度	MZI	2~12 $^{\circ}\text{C}$, 20~40 $^{\circ}\text{C}$	-0.27 nm/pH 0.088 nm/ $^{\circ}\text{C}$	[62]
pH	SPR	1~12 $^{\circ}\text{C}$, 20~40 $^{\circ}\text{C}$	13 nm/pH	[63]
pH	SPR	2.4~11.35	75.09 nm/pH	[64]
pH	SPR	3.18~11.84	32.31 nm/pH	[65]
pH	干涉	4.98~7.4	480 pm/pH	[66]
苯酚	干涉	10~100 mg/L	$15\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	[67]
酚类化合物	干涉	0~800 μM	0.088 nm/ μM	[68]
邻苯二酚	SPR	0~100 μM	5.46 nm/ μM	[69]

3 用于疾病标志物检测的光纤生化传感技术

3.1 人体呼出气体的检测

在细胞的新陈代谢过程中,细胞内的各种酶与氨基酸、蛋白质、脂肪、碳水化合物等物质发生化学反应,会形成一些副产物,其中包括挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs).当细胞遭受刺激或病变时,细胞内酶活性和生物物质会产生重大变化,原有的新陈代谢过程遭到破坏,为了适应新的代谢环境,重新达到一个反应稳态,这些代谢产物会伴随呼吸作用,呼出体外^[70-71].利用糖尿病与丙酮^[72]、非酒精性脂肪性肝炎与乙醇、肺癌与甲苯、小肠细菌的过度增长与H₂、肾病与NH₃间的关系,可对疾病诊断和持续监测.

2018年,Tang等^[73]展示了一种胆固醇液晶膜涂层侧抛光光纤来感应挥发性有机化合物(VOC)气体,研究发现,该传感器对四氢呋喃、丙酮和甲醇气体具有不同的检测灵敏度,该研究提供了一种用于检测VOCs气体的新方法.2019年,Kanawade等^[74]展示了填充有PDMS的负轴光纤尖端作为室温下检测挥发性有机气体的传感器平台,使用该传感器测量了浓度范围为5~200 ppm的氯仿、正己烷、甲苯、丙酮、甲苯和甲醇等气体,实验结果表明,该传感器对于甲苯和丙酮具有高灵敏度和较低检测限,另外,其响应时间和恢复时间也较短.同年,Zhao等^[75]也研究出了一

种基于PDMS涂层的FPI VOCs传感器,通过监测级联FPI由于游标效应的干扰谱包络实现了对VOCs气体的高灵敏度检测,在0~500 ppm范围内,异丙醇的检测灵敏度为20 pm/ppm,响应时间为50 s.

2020年,Pawar等^[76]提出了一种双腔FPI传感器,该传感器使用石墨烯、聚甲基丙烯酸甲酯和石墨烯/聚甲基丙烯酸甲酯复合材料涂敷的光纤制成,用于在室温下浓度在5~200 $\mu\text{L/L}$ 间的VOCs气体,传感器的平均响应时间和恢复时间在48~52 s和8~12 s,可用于远程检测和空气质量监测.2021年,Yap等^[77]提出了一种使用光学微纳光纤传感技术的室温VOCs传感器,将二硫化钼(MoS_2)纳米片作为增敏材料,并沉积在光纤的锥腰区作为VOCs识别元件,功能化后的传感器可实现对丙酮、乙酸乙酯、环己烷和IPA的检测,且具有良好的重复性,可完全恢复至测量前的状态.2022年,Devendiran等^[78]提出了一种基于纳米晶氧化铝涂层的侧抛光纤气体传感器,用于检测VOCs气体,研究结果表明,该传感器对丙酮气体表现出优异的气体灵敏度和选择性.

近些年,光纤传感技术在人体呼气检测中的应用现状如表3所示.目前光纤人体呼气传感技术的研究仍然处于起步阶段,很多传感原理和技术方案鲜有探索.研究中新型的气敏材料种类较少,且对于已知气敏材料的制备方法并不完善,需要探索制备方法,提高质量和产量,并探索关于该类材料更详细的气敏特性.此外,人体呼出气体成分间存在交叉敏感问题,这是一个急需解决的问题.

表3 光纤传感技术在人体呼气检测中的应用现状

目标分析物	原理	监测范围	检测限/灵敏度	文献
四氢呋喃、 丙酮、甲醇	MZI	0~8 mmol/L	6.6×10^{-4} , 2.9×10^{-4} , 0.6×10^{-4} RIU·L/mm	[73]
甲苯、丙酮	MZI	5~200 ppm	0.92, 2.19 pm/ppm	[74]
VOCs	FPI	0~500 ppm	20 pm/ppm	[75]
丙酮和温度	FPI	5~200 $\mu\text{L/L}$ 30~70 $^{\circ}\text{C}$	11.62 pm/($\mu\text{L/L}$) 120 pm/ $^{\circ}\text{C}$	[76]
丙酮、乙酸乙酯、 环己烷和 IPA	FPI	0~120 ppm	0.0195, 0.0143, 0.0072, 0.0058 nm/ppm	[77]

3.2 人体生物体液的检测

体液并非“死水一潭”,而是不断地进行新陈代谢,与外环境进行物质交换,通过机体的各种生理调节,始终保持相对稳定,主要是体液容量、渗透压以及各种溶质浓度的稳定,以保证组织细胞的各种生命活动得以正常进行.当细胞遭受刺激或病变时,原有的

新陈代谢过程会遭到破坏.因此,通过检测体液中各种溶质含量的变化,可了解身体发生的变化,进而预防和诊断疾病.因此,众多科学家进行了人体体液与相关疾病内在联系的研究.

3.2.1 血液检测

随着社会的发展和科学的进步,越来越多的人关注健康问题.每年因糖尿病、高血压和冠心病等医学疾病导致的死亡率不断上升.随着生物医学的不断发展,医学方面对于葡萄糖和胆固醇含量的检测也在不断进步,且检测结果的好坏同样关系到人的健康问题.因此,对于人体血液中各类生化指标的检测,受到了医学研究人员和检测人员的广泛关注.

目前,最常见的人体血液中的生化指标是葡萄糖和胆固醇.葡萄糖的检测在预防糖尿病方面具有至关重要的作用^[79];而胆固醇同样也是人体的重要组成成分,还是临床生化检查的一个重要指标,胆固醇广泛存在于哺乳动物体内,是生物膜、神经细胞和脑细胞的主要结构成分^[80].葡萄糖和胆固醇的浓度过高或过低均会对人体造成一定的危害.对葡萄糖和胆固醇浓度的检测可为疾病的诊断和治疗提供有效的依据^[81-85].近年来,随着光纤传感技术的发展,很多研究人员展开了对葡萄糖和胆固醇检测方法的研究.

2018年,Yuan等^[82]报道了一种以金纳米颗粒/2-氨基乙硫醇/p-巯基苯基硼酸作为SPR信号放大标记的新型SPR葡萄糖传感器,使用夹层结构和金纳米颗粒增强了对葡萄糖的响应,实验结果显示,该夹心结构的强耦合提高了传感器的选择性和灵敏度,最低检测限低至80 nM,但是该传感器的制造过程极为复杂.2019年,Kumar等^[83]提出了一种基于SPR的光纤胆固醇传感器,采用金纳米颗粒和胆固醇氧化酶为增敏材料提高了传感器的灵敏度和选择性,使得最低检测限低至53.1 nM,但是该传感器利用的是锥形光纤结构,在实验中易断裂,因此,在机械稳定性方面还有待提高.

2020年,Yu等^[84]提出了一种涂敷 MoS_2 -石墨烯复合纳米涂层的D型光纤SPR传感器,实验结果表明, MoS_2 -石墨烯复合纳米结构的优异光电性能和芘-1-硼酸特异性结合葡萄糖分子的能力提高了SPR传感器的葡萄糖检测性能.外部温度变化不可避免地影响SPR生化传感器的精度.为此,Wu等^[86]提出了一种超紧凑的无标记双通道SPR光纤传感器,可同时测量葡萄糖浓度和环境温度,该传感器基于蚀刻侧孔光纤制成的独特双通道结构,在镀上银和氧化锌膜后,用PDMS填充一条通道,用于测量温度,将葡萄糖

氧化酶固定另一条通道,用于测量葡萄糖,该传感器具有较高的葡萄糖浓度灵敏度、温度灵敏度以及较低检测限,同时具有温度补偿功能,适用于葡萄糖和其他分析物的原位监测和高精度传感。

为了实现对葡萄糖和胆固醇同时测量,从而更好地判断患者的身体健康情况,2022年,Zheng等^[87]提出了一种即插即用的SPR双参数光纤生化传感器,其增敏结构和检测结果如图8所示。在光纤表面涂覆金膜以激发SPR,然后用金纳米颗粒修饰金膜的末端以产生双SPR共振波谷。为了同时检测葡萄糖和胆固醇的浓度,在传感器的表面以共价键结合的方式固定了P-巯基苯硼酸和 β -环糊精。理论和实验结果均验证了“即插即用”传感器测量葡萄糖和胆固醇双生物量的可行性。该传感方法检测限低,选择性好,为光纤传感器在多参数测量中的应用提供了重要的研究价值。

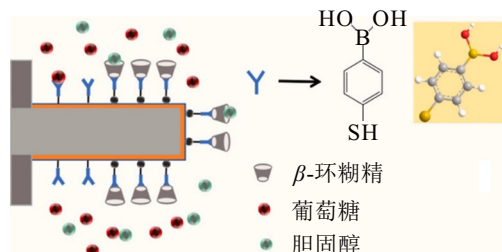


图8 SPR双参数光纤生化传感器^[87]

3.2.2 尿液检测

多巴胺(dopamine, DA)和尿酸(uric acid, UA)是维持人体新陈代谢、中枢神经系统和循环系统正常生理功能的重要生物物质。DA和UA作为生物活性小分子,在人体中枢神经系统、新陈代谢和循环系统中发挥重要的作用。DA是存在于生理体液(如尿液和细胞质)中的含氮有机化合物,被视为神经系统和免疫系统疾病的生物标志物。UA是存在于生理体液(血浆、血清、血液和尿液)中的一种内源性化合物,是嘌呤在人体内的最终代谢产物,在维持人类和高等灵长类动物的健康过程中起着至关重要的作用^[88]。因此,近年来,生理调查和疾病诊断等领域的专家学者对DA和UA浓度检测问题进行了深入且广泛的研究。

2019年,Singh等^[89]开发了一种锥形光纤传感器探头来检测人体内的UA浓度,利用尿酸酶对尿酸具有高选择性的特点,结合SPR原理对外界环境折射率非常敏感的原理实现了对UA的测量。2020年,Agrawal等^[90]制备了一种氧化铜纳米颗粒和银纳米颗粒修饰的光纤UA传感器。这两种纳米颗粒显著提高了传感器的生物相容性和灵敏度,使得该传感器

具有选择性高、重现性好、检测限低等优点,可应用于医学中的UA检测。2021年,Eddin等^[91]首次开发了一种基于壳聚糖-石墨烯量子点薄膜的SPR传感器用于DA检测,该传感器在DA检测方面表现出了优异的灵敏度,达到了1.0 fM的最低检测限,可应用于临床中检测严重神经障碍患者生物体液中的DA含量。

综上所述,光纤生化传感方法由于其具有响应快速、灵敏度高和成本低廉等优点,广泛应用于DA和UA的检测^[92-94]。另外,石墨烯、金属纳米颗粒、壳聚糖、碳量子点等多种碳材料,因其优异的电催化活性和良好的生物相容性,已广泛应用于同时测定和选择性测定生物分子。

3.2.3 唾液检测

唾液中有机物主要有黏蛋白、黏多糖、淀粉酶、溶菌酶、免疫球蛋白、血型物质、游离氨基酸以及DNA等。虽然唾液中含有很多物质,但是由于其提取具有简单、快捷、无害的特点,多用于DNA检测的来源。DNA检测对于生物检测领域具有重要意义,对遗传性疾病的诊断、常见疾病的辅助诊断均有一定的作用。通过基因检测有助于疾病的诊断,可了解自身是否有家族性疾病的致病基因,预测患病风险,同时也可正确选择药物,避免滥用药物和出现药物不良反应^[95]。另外,DNA检测技术在病毒检测、环境监测等重要研究领域的应用也有很多。

2020年,Loyez等^[96]基于光纤光栅、SPR技术以及DNA检测技术,制作了一种光纤光栅SPR生化探针,实现了对肺癌细胞的特异性检测。2021年,Gong等^[97]首次验证了在一个简单的SMF-无芯光纤-SMF结构中同时使用SPR和MZI进行温度和折射率的双参数测量,通过将探针DNA固定在光纤上作为探针来捕获互补DNA,实现了DNA杂交检测的无标记传感,其结构如图9所示。

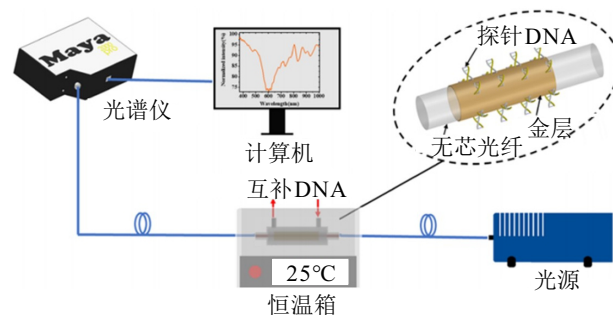


图9 基于MZI原理的双参数DNA传感器^[97]

2022年,Li等^[98]提出了一种基于游标效应的反射式FPI无标记生化传感器,用于原位实时DNA

杂交检测,利用探针DNA(pDNA)特异性识别互补DNA(cDNA)。实验结果表明,这两种传感器适用于原位监测以及DNA分子的高精度传感,在医学诊断、食品科学、基因工程等生物领域具有巨大的应用潜力。

综上,根据近年的研究进展来看,光纤传感技术在DNA检测领域已取得了部分成果,且已验证了DNA绑定方案的可行性。DNA分子作为一种生物分子,其扩增过程以及其他反应过程受温度和pH影响。因此,单参数检测方案虽然在环境稳定状态下能够实现精准检测,但是,无法面向实际环境进行实时检测。

3.2.4 小结

近些年,光纤传感技术在生物体液检测中的应用现状如表4所示。目前而言,仍然存在诸多问题,如大多数文献中使用的敏感膜为生物酶,利用生物酶特有的反应特性来检测生物量,因此,在重复性方面目前鲜有探究出很好的方法来实现传感器的重复使用。另外,目前的检测方案虽然在环境稳定状态下能够实现精准检测,但是,无法面向实际环境进行实时检测。

表4 光纤传感技术在人体生物体液检测中的应用现状

目标分析物	原理	监测范围	检测限/灵敏度	文献
胆固醇	SPR	10 nM ~ 10 mM	53.1 nM	[81]
葡萄糖	SPR	0.01 ~ 30 mM	80 nM	[83]
葡萄糖	SPR	0 ~ 300 mg/dL	6 708.87 nm/RIU	[84]
葡萄糖+	SPR	0 ~ 5 mM	16.24 μM,	[86]
温度		20 ~ 50 °C	0.06 °C	
葡萄糖+	SPR	0 ~ 1.7 mM	0.000 78 mM	[87]
胆固醇		0 ~ 300 nM	0.012 nM	
尿酸	SPR	10 ~ 800 μM	206 μM	[88]
尿酸	SPR	10 μM ~ 1 mM	69.26 μM	[90]
多巴胺	SPR	0 ~ 1 pM	1 fM	[91]
DNA	SPR	0 ~ 100 cells/mL	49 cells/mL	[96]
DNA	SPR+MZI	0 ~ 1 μM	80 nM	[97]
DNA	FPI	1.331 1 ~ 1.345 0 RIU	68 nM	[98]

4 展望

近些年来,光纤生化传感器在人体健康防护领域的应用非常广泛,在人体健康防护和早期疾病的诊断中起着非常重要的作用。但是目前而言,仍然存在很多问题和挑战。

1) 在测量中的各生化组分间的关系复杂多变,易产生交叉干扰,且外界环境温度、湿度等条件的变化均会影响传感器的输出信号,进而影响传感器的准确性。

2) 在传感器的制备和修饰过程中,制作的工艺水

平和材料涂敷的厚度难以把握且具有太多的不确定性,很难达到理想的制作效果,传感器的制备一致性无法保证。

3) 在间接测量中,常利用敏感材料的特异性识别来实现传感器的选择性,目前,新型敏感材料的种类较少且制备方法并不完善,应用于光纤生化传感器上,虽然能够起到增敏的效果,但是难以实现理想的光材互耦,会影响传感器的稳定性。

4) 目前的监测技术主要以点式测量为主,给实际应用带来局限性,未来需要打破空间局限性,向分布式测量方向发展。

5 结语

本文介绍了近几年来光纤生化传感器在人体健康防护领域的主要研究进展,讨论了光纤生化传感器在气体、水质污染物、人体呼出气体以及生物体液检测等领域的应用,从两方面叙述了光纤传感技术在人体健康防护和诊断的应用:一方面,使用光纤生化传感技术对环境污染物的有效控制,可从源头减少疾病的发生;另一方面,使用光纤生化传感技术对人体呼出的气体和生物体液进行检测,可对疾病的早期诊断和预防提供帮助。最后,针对光纤生化气体传感器在人体健康防护和诊断中存在的不足进行了讨论,同时对其应用前景进行了展望。

参考文献(References)

- [1] Sushma, Kumari M, Saroha A K. Performance of various catalysts on treatment of refractory pollutants in industrial wastewater by catalytic wet air oxidation: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 228: 169-188.
- [2] Schraufnagel D E, Balmes J R, Cowl C T, et al. Air pollution and noncommunicable diseases: A review by the forum of international respiratory societies' environmental committee—Part 2: The damaging effects of air pollution[J]. *Chest*, 2019, 155(2): 409-416.
- [3] Yang W X, Li L G. Efficiency evaluation of industrial waste gas control in China: A study based on data envelopment analysis(DEA) model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 179: 1-11.
- [4] Awuchi C G, Twinomuhwezi H, Awuchi C G, et al. Industrial waste management, treatment, and health issues: Wastewater, solid, and electronic wastes[J]. *European Academic Research*, 2020, 8(2): 1081-1119.
- [5] Kersey A D, Dandridge A. Applications of fiber-optic sensors[J]. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, 1990, 13(1): 137-143.
- [6] Slavík R, Homola J, Brynda E. A miniature fiber optic surface plasmon resonance sensor for fast detection of staphylococcal enterotoxin B[J]. *Biosensors &*

- Bioelectronics, 2002, 17(6/7): 591-595.
- [7] Zhang Y N, Zhou T M, Han B, et al. Optical bio-chemical sensors based on whispering gallery mode resonators[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(29): 13832-13856.
- [8] Zhao Y, Zhang Y N, Wu D, et al. Wideband slow light with large group index and low dispersion in slotted photonic crystal waveguide[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(17): 2812-2817.
- [9] Nikodem M, Krzempek K, Dudzik G, et al. Hollow core fiber-assisted absorption spectroscopy of methane at 3.4 μm [J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 21843-21848.
- [10] Krzempek K, Abramski K, Nikodem M. Kagome hollow core fiber-based mid-infrared dispersion spectroscopy of methane at sub-ppm levels[J]. *Sensors*, 2019, 19(15): 3352.
- [11] Zhao Y, Zhang Y N, Wang Q. High sensitivity gas sensing method based on slow light in photonic crystal waveguide[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 173: 28-31.
- [12] Qian X L, Zhao Y, Zhang Y N, et al. Theoretical research of gas sensing method based on photonic crystal cavity and fiber loop ring-down technique[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 228: 665-672.
- [13] Zhang Y N, Wu Q L, Peng H J, et al. Photonic crystal fiber modal interferometer with Pd/WO₃ coating for real-time monitoring of dissolved hydrogen concentration in transformer oil[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(12): 125002.
- [14] Zhang Y N, Peng H J, Qian X L, et al. Recent advancements in optical fiber hydrogen sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 244: 393-416.
- [15] Liu H, Zhang W, Wang H R, et al. Design of methane sensor based on slow light effect in hollow core photonic crystal fiber[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 303: 111791.
- [16] Wang Z M, Gao P, Liu S W, et al. A reflective methane concentration sensor based on biconvex cone photonic crystal fiber[J]. *Optik*, 2021, 241: 166983.
- [17] Zheng C T, Ye W L, Sanchez N P, et al. Development and field deployment of a mid-infrared methane sensor without pressure control using interband cascade laser absorption spectroscopy[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 244: 365-372.
- [18] Wei W, Nong J P, Zhang G W, et al. Graphene-based long-period fiber grating surface plasmon resonance sensor for high-sensitivity gas sensing[J]. *Sensors*, 2017, 17(1): 2.
- [19] Yang J C, Che X, 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]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20258-20267.
- [20] Zhao Y, Zhang Y N, Wu D, et al. Fiber loop ring-down refractive index sensor based on high-Q photonic crystal cavity[J]. *Sensors Journal IEEE*, DOI: 10.1109/ICSENS.2012.6411192.
- [21] Zhang Y N, Zhao Y, Lv R Q. A review for optical sensors based on photonic crystal cavities[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 233: 374-389.
- [22] Zhang Y N, Zhao Y, Zhou T M, et al. Applications and developments of on-chip biochemical sensors based on optofluidic photonic crystal cavities[J]. *Lab on a Chip*, 2017, 18(1): 57-74.
- [23] Zhang Y N, Zhao Y, Wang Q. Multi-component gas sensing based on slotted photonic crystal waveguide with liquid infiltration[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 184: 179-188.
- [24] Zhao Y, Wu Q L, Zhang Y N. High-sensitive hydrogen sensor based on photonic crystal fiber model interferometer[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, 66(8): 2198-2203.
- [25] Shao J X, Xie W G, Song X, et al. A new hydrogen sensor based on SNS fiber interferometer with Pd/WO₃ coating[J]. *Sensors*, 2017, 17(9): 2144.
- [26] Zhang Y N, Zhang L B, Han B, et al. Erbium-doped fiber ring laser with SMS modal interferometer for hydrogen sensing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 102: 262-267.
- [27] Zhang Y N, Peng H J, Zhou T M, et al. Hydrogen sensor based on high-birefringence fiber loop mirror with sol-gel Pd/WO₃ coating[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 248: 71-76.
- [28] Zhang Y N, Zhou T M, Han B, et al. Simultaneous measurement of hydrogen concentration and temperature based on fiber loop mirror combined with PCF[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(6): 2369-2376.
- [29] 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, 45: 1-7.
- [30] Liu Q, Zhao J, Sun Y D, et al. High-sensitivity methane sensor composed of photonic quasi-crystal fiber based on surface plasmon resonance[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2021, 38(10): 1438-1442.
- [31] Zhang Y N, Liu Y X, Shi B F, et al. Lateral offset single-mode fiber-based fabry-perot interferometers with vernier effect for hydrogen sensing[J]. *Analytical Chemistry*, 2023, 95(2): 872-880.
- [32] Zhang Y N, Wang M Y, Zhu N S, et al. Optical fiber hydrogen sensor based on self-assembled PDMS/Pd-WO₃ microbottle resonator[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023, 375: 132866.
- [33] Zhang A Q, Wu Y, Yao B C, et al. Optimization study on graphene-coated microfiber Bragg grating structures for ammonia gas sensing[J]. *Photonic Sensors*, 2015, 5(1): 84-90.
- [34] Zhu Y, Fu H W, Ding J J, et al. Fabrication of three-dimensional zinc oxide nanoflowers for high-sensitivity fiber-optic ammonia gas sensors[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(27): 7924-7930.

- [35] Fu H W, Jiang Y H, Ding J J, et al. Zinc oxide nanoparticle incorporated graphene oxide as sensing coating for interferometric optical microfiber for ammonia gas detection[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 254: 239-247.
- [36] Lee C T, Wang Y S. High-performance room temperature NH_3 gas sensors based on polyaniline-reduced graphene oxide nanocomposite sensitive membrane[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 789: 693-696.
- [37] Narasimman S, Balakrishnan L, Alex Z C. Fiber-optic ammonia sensor based on amine functionalized ZnO nanoflakes[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(1): 201-208.
- [38] Girei S H, Alkhabet M M, Kamil Y M, et al. Wavelength dependent graphene oxide-based optical microfiber sensor for ammonia gas[J]. *Sensors*, 2021, 21(2): 556.
- [39] Xu B, Huang J, Ding L Y, et al. A sensitive ammonia sensor using long period fiber grating coated with graphene oxide/cellulose acetate[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(15): 16691-16700.
- [40] Shrivastav A M, Sharma G, Rathore A S, et al. Hypersensitive and selective interferometric nose for ultratrace ammonia detection with fast response utilizing PANI@SnO₂ nanocomposite[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(11): 4402-4412.
- [41] Fu H W, Wang Q Q, Ding J J, et al. Fe₂O₃ nanotube coating micro-fiber interferometer for ammonia detection[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 303: 127186.
- [42] Liu L L, Tang Z J, He C Y, et al. Chemically functionalised suspended-core fibre for ammonia gas detection[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(15): 5197-5205.
- [43] Tabassum R, Gupta B D. Fiber optic manganese ions sensor using SPR and nanocomposite of ZnO-polypyrrole[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2015, 220: 903-909.
- [44] Raj D R, Prasanth S, Vineeshkumar T V, et al. Surface plasmon resonance based fiber optic sensor for mercury detection using gold nanoparticles PVA hybrid[J]. *Optics Communications*, 2016, 367: 102-107.
- [45] Sahu D, Sarkar N, Sahoo G, et al. Nano silver imprinted polyvinyl alcohol nanocomposite thin films for Hg²⁺ sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 246: 96-107.
- [46] Zhang Y N, Zhang L B, Han B, et al. Reflective mercury ion and temperature sensor based on a functionalized no-core fiber combined with a fiber Bragg grating[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 272: 331-339.
- [47] Chen Z L, Han K L, Zhang Y N. Reflective fiber surface plasmon resonance sensor for high-sensitive mercury ion detection[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(7): 1480.
- [48] Xue T Y, Qi K, Hu C Q. Novel SPR sensing platform based on superstructure MoS₂ nanosheets for ultrasensitive detection of mercury ion[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 284: 589-594.
- [49] Yuan H Z, Ji W, Chu S W, et al. Mercaptopyrindine-functionalized gold nanoparticles for fiber-optic surface plasmon resonance Hg²⁺ sensing[J]. *ACS Sensors*, 2019, 4(3): 704-710.
- [50] Shrivastav A M, Gupta B D. Ion-imprinted nanoparticles for the concurrent estimation of Pb(II) and Cu(II) ions over a two channel surface plasmon resonance-based fiber optic platform[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2018, 23(1): 017001.
- [51] Halkare P, Punjabi N, Wangchuk J, et al. Bacteria functionalized gold nanoparticle matrix based fiber-optic sensor for monitoring heavy metal pollution in water[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 281: 643-651.
- [52] Cheng Y, Li J, Deng S Y, et al. AgNPs@Ag(I)-AMTD metal-organic gel-nanocomposites act as a SERS probe for the detection of Hg²⁺[J]. *Composites Communications*, 2019, 13: 75-79.
- [53] Zhang M Z, Zhu G X, Li T S, et al. A dual-channel optical fiber sensor based on surface plasmon resonance for heavy metal ions detection in contaminated water[J]. *Optics Communications*, 2020, 462: 124750.
- [54] Ma Y, Zheng W L, Zhang Y N, et al. Optical fiber SPR sensor with surface ion imprinting for highly sensitive and highly selective Ni²⁺ detection[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-6.
- [55] Wang H L, Liang A H, Wen G Q, et al. A simple SPR absorption method for ultratrace Pb²⁺ based on DNAzyme-COF_{Pd} nanocatalysis of Ni-P alloy reaction[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, 330: 129381.
- [56] Tou Z Q, Koh T W, Chan C C. Poly(vinyl alcohol) hydrogel based fiber interferometer sensor for heavy metal cations[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 202: 185-193.
- [57] Lin Y F, Dong X Y, Yang J, et al. Detection of Ni²⁺ with optical fiber Mach-Zehnder interferometer coated with chitosan/MWCNT/PAA[C]. *The 16th International Conference on Optical Communications and Networks*. Wuzhen, 2017: 1-3.
- [58] Qin J J, Dong B H, Li X, et al. Fabrication of intelligent photonic crystal hydrogel sensors for selective detection of trace mercury ions in seawater[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(33): 8482-8488.
- [59] Zhong N B, Wang Z K, Chen M, et al. Three-layer-structure polymer optical fiber with a rough inter-layer surface as a highly sensitive evanescent wave sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 254: 133-142.
- [60] de Acha N, Elosúa C, Arregui F J. Development of an aptamer based luminescent optical fiber sensor for the continuous monitoring of Hg²⁺ in aqueous media[J]. *Sensors*, 2020, 20(8): 2372.

- [61] Liu C, Tuffour A, Liao J H, et al. Highly sensitive detection of Hg^{2+} using molybdenum disulfide-DNA sensors[J]. *Chemical Physics*, 2020, 534: 110758.
- [62] Lei M, Zhang Y N, Han B, et al. In-line Mach-Zehnder interferometer and FBG with smart hydrogel for simultaneous pH and temperature detection[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(18): 7499-7504.
- [63] Zhao Y, Lei M, Liu S X, et al. Smart hydrogel-based optical fiber SPR sensor for pH measurements[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 261: 226-232.
- [64] Semwal V, Gupta B D. Highly sensitive surface plasmon resonance based fiber optic pH sensor utilizing rGO-Pani nanocomposite prepared by in situ method[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 283: 632-642.
- [65] Li L K, Zhang Y N. Fiber-optic SPR pH sensor based on MMF-NCF-MMF structure and self-assembled nanofilm[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 70: 1-9.
- [66] Wang Y J, Zhang H, Cui Y X, et al. A complementary-DNA-enhanced fiber-optic sensor based on microfiber-assisted Mach-Zehnder interferometry for biocompatible pH sensing[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, 332: 129516.
- [67] Zhong N B, Chen M, Wang Z K, et al. A highly sensitive photocatalytic plastic optic-fiber sensor for selective detection of phenol in aqueous solutions[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, 285: 341-349.
- [68] Mishra S K, Chiang K S. Phenolic-compounds sensor based on immobilization of tyrosinase in polyacrylamide gel on long-period fiber grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 131: 106464.
- [69] Pathak A, Gupta B D. Fiber-optic plasmonic sensor utilizing CTAB-functionalized ZnO nanoparticle-decorated carbon nanotubes on silver films for the detection of catechol in wastewater[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(3): 2582-2593.
- [70] Li Y, Chen Y Z, Yi D, et al. A self-assembled fiber Mach-Zehnder interferometer based on liquid crystals[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(32): 11153-11159.
- [71] Prasanth A, Meher S R, Alex Z C. Metal oxide thin films coated evanescent wave based fiber optic VOC sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 338: 113459.
- [72] Pathak A K, Vipavakit C. VOC biomarker monitoring for diabetes through exhaled breath using Ag/P-TiO₂ composite plasmonic sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(20): 22631-22637.
- [73] Tang J Y, Fang J B, Liang Y L, et al. All-fiber-optic VOC gas sensor based on side-polished fiber wavelength selectively coupled with cholesteric liquid crystal film[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 273: 1816-1826.
- [74] Kanawade R, Kumar A, Pawar D, et al. Negative axicon tip-based fiber optic interferometer cavity sensor for volatile gas sensing[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 7277-7290.
- [75] Zhao C L, Han F, Li Y N, et al. Volatile organic compound sensor based on PDMS coated Fabry-Perot interferometer with vernier effect[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(12): 4443-4450.
- [76] Pawar D, Kanawade R, Kumar A, et al. High-performance dual cavity-interferometric volatile gas sensor utilizing Graphene/PMMA nanocomposite[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 312: 127921.
- [77] Yap S H K, Chan K K, Yeh C H, et al. Two-dimensional MoS₂ nanosheet-functionalized optical microfiber for room-temperature volatile organic compound detection[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2021, 4(12): 13440-13449.
- [78] Devendiran S, Priya A K, Sastikumar D. Design of aluminium oxide (Al₂O₃) fiber optic gas sensor based on detection of refracted light in evanescent mode from the side-polished modified clad region[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 361: 131738.
- [79] Gong P Q, Li X G, Zhou X, et al. Optical fiber sensors for glucose concentration measurement: A review[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 139: 106981.
- [80] Wang X J, Lv J T, E S Y, et al. Theoretical design and simulation optimization of photonic crystal cavity for tetrahydrofuran vapor sensing[J]. *Physica Status Solidi: B*, 2019, 256(11): 1900221.
- [81] Kumar S, Singh R, Kaushik B K, et al. LSPR-based cholesterol biosensor using hollow core fiber structure[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(17): 7399-7406.
- [82] Yuan H Z, Ji W, Chu S W, et al. Fiber-optic surface plasmon resonance glucose sensor enhanced with phenylboronic acid modified Au nanoparticles[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2018, 117: 637-643.
- [83] Kumar S, Kaushik B K, Singh R, et al. LSPR-based cholesterol biosensor using a tapered optical fiber structure[J]. *Biomedical Optics Express*, 2019, 10(5): 2150-2160.
- [84] Yu H X, Chong Y, Zhang P H, et al. A D-shaped fiber SPR sensor with a composite nanostructure of MoS₂-graphene for glucose detection[J]. *Talanta*, 2020, 219: 121324.
- [85] Zheng W L, Han B, E S Y, et al. Highly-sensitive and reflective glucose sensor based on optical fiber surface plasmon resonance[J]. *Microchemical Journal*, 2020, 157: 105010.
- [86] Wu S N, Tan Q, Forsberg E, et al. In-situ dual-channel surface plasmon resonance fiber sensor for temperature-compensated detection of glucose concentration[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 21046-21061.
- [87] Zheng W L, Zhang Y N, Li L K, et al. A plug-and-play optical fiber SPR sensor for simultaneous measurement of glucose and cholesterol concentrations[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2022, 198: 113798.
- [88] Pathak A, Gupta B D. Ultra-selective fiber optic SPR platform for the sensing of dopamine in synthetic

- cerebrospinal fluid incorporating permselective nafion membrane and surface imprinted MWCNTs-PP_y matrix[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2019, 133: 205-214.
- [89] Singh L, Singh R, Zhang B Y, et al. LSPR based uric acid sensor using graphene oxide and gold nanoparticles functionalized tapered fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 53: 102043.
- [90] Agrawal N, Saha C, Kumar C, et al. Development of uric acid sensor using copper oxide and silver nanoparticles immobilized SMSMS fiber structure-based probe[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(11): 9097-9104.
- [91] Eddin F B K, Fen Y W, Omar N A S, et al. Femtomolar detection of dopamine using surface plasmon resonance sensor based on chitosan/graphene quantum dots thin film[J]. *Spectrochimica Acta—Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2021, 263: 120202.
- [92] Singh L, Zhu G, Singh R, et al. Gold nanoparticles and uricase functionalized tapered fiber sensor for uric acid detection[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(1): 219-226.
- [93] Kunpatee K, Traipop S, Chailapakul O, et al. Simultaneous determination of ascorbic acid, dopamine, and uric acid using graphene quantum dots/ionic liquid modified screen-printed carbon electrode[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 314: 128059.
- [94] Kant R, Tabassum R, Gupta B D. Fiber optic SPR-based uric acid biosensor using uricase entrapped polyacrylamide gel[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(19): 2050-2053.
- [95] Li X G, Nguyen L V, Hill K, et al. All-fiber all-optical quantitative polymerase chain reaction (qPCR)[J]. *Sensors and Actuators B, Chemical*, 2020, 323: 128681.
- [96] Loyez M, Hassan E M, Lobry M, et al. Rapid detection of circulating breast cancer cells using a multiresonant optical fiber aptasensor with plasmonic amplification[J]. *ACS Sensors*, 2020, 5(2): 454-463.
- [97] Gong P Q, Wang Y M, Zhou X, et al. In situ temperature-compensated DNA hybridization detection using a dual-channel optical fiber sensor[J]. *Analytical Chemistry*, 2021, 93(30): 10561-10567.
- [98] Li F, Li X G, Zhou X, et al. Plug-in label-free optical fiber DNA hybridization sensor based on C-type fiber vernier effect[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 354: 131212.

作者简介

张亚男(1989—),女,教授,博士生导师,从事新型光纤生化传感器理论及关键技术、光学微腔谐振特性及其传感技术、量子感知与精密测量技术等研究, E-mail: zhangyanan@ise.neu.edu.cn;

靳泼(1994—),男,博士生,从事光纤生化传感技术的研究, E-mail: jinpo1015@163.com;

郑万禄(1993—),男,博士生,从事光纤生化传感技术的研究, E-mail: zhengwanlu6@stumail.neu.edu.cn;

赵勇(1973—),男,教授,博士生导师,从事光纤传感器、智能光电检测技术、量子感知与精密测量技术等研究, E-mail: zhaoyong@ise.neu.edu.cn.



特邀专家 张亚男,2010年获得东北大学测控技术与仪器专业工学学士学位;2012年、2015年分别获得检测技术与自动化装置专业工学硕士和博士学位;2016年留校工作,破格晋升为副教授;2019年,破格晋升为教授、博士生导师。国家自然科学基金优秀青年科学基金获得者、辽宁省优秀青年基金获得者、IEEE传感器协会哈尔滨分会主席。目前,主持和参与国家自然科学基金、国家重点研发计划、辽宁省基金等20余项科研项目;发表SCI检索论文100余篇;授权国家发明专利17项;获得省部级自然科学奖2项、学术成果奖3项。

专家寄语 回顾过去,无比自豪;展望未来,信心十足。愿母校永远辉煌,愿控制学科才俊如星流!