

光纤折射率 与湿度传感器

Guangxian Zheshelü yu Shidu Chuanganqi

■ 邵敏 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

西安石油大学优秀学术著作基金资助

光纤折射率与湿度传感器

邵 敏 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书从光纤折射率与湿度传感器的研究和设计层面展开讨论,介绍和综述了光纤折射率与湿度传感器的基本概念、原理、应用现状以及光纤折射率与湿度传感器所涉及的光纤原理。着重阐述了几种新型光纤折射率与湿度传感器的设计制作、原理和传感特性,并介绍了最新的研究成果。

本书主要作为从事光纤传感技术方面的科技人员和工程技术人员
的参考书,也可作为高等院校光纤传感相关研究领域的研究生参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光纤折射率与湿度传感器/邵敏著. —北京:国防工业出版社,2015.8

ISBN 978-7-118-10418-9

I. ①光... II. ①邵... III. ①光导纤维-折射率②光纤传感器 IV. ①TQ342②TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 208238 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/32 印张 4 $\frac{3}{4}$ 字数 201 千字

2015 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1200 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

光纤传感器体积小、质量轻,利用光纤良好的传光特性和信息传递能力,可实现多个物理量的测量。光纤传感器具有抗电磁干扰、灵敏度高、耐腐蚀、远距离传输、可工作在严重污染的恶劣环境中、对测量对象无污染等优点,应用前景广阔。目前已研制的光纤传感器有光纤温度传感器、光纤压力传感器、光纤振动传感器、光纤加速度计、光纤陀螺、水听器、光纤电流(电压)传感器、光纤磁场传感器、光纤声音传感器、光纤气体传感器、光纤流量(流速)传感器、光纤湿度传感器、光纤折射率传感器、光纤液位传感器、光纤射线传感器等。经过几十年的研究,光纤传感器已具备一定的产业化能力。

光纤折射率和光纤湿度传感器在生物医学、环境生态等领域具有重要的应用潜力和应用价值。本书从光纤折射率和光纤湿度传感器的研究和设计层面展开讨论,介绍和综述了光纤折射率、光纤湿度传感器的基本概念、原理、应用现状以及光纤折射率与湿度传感器所涉及的光纤原理。本书着重阐述了几种新型光纤折射率传感器和光纤湿度传感器的设计制作、原理和传感特性,旨在介绍最新的研究成果。

基于以上指导思想,全书共分为7章。

第1章介绍折射率与湿度的测量特点,简述了光纤传感技术的原理和分类。对光纤折射率传感器、湿度传感器的国内外研究现状作了总结。最后给出了光纤折射率传感器、湿度传感器的应用概况。

第2章理论分析FBG、LPFG的传输特性和基本传感原理,理论分析光纤干涉仪的基本原理,阐述不同类型光纤干涉仪的工作原理与应用。

第3章理论分析微纳FBG(Micro Fiber Bragg Grating, MFBG)的折射率传感特性,制作MFBG样品,对MFBG的折射率和湿度响应特性

进行实验研究,并对实验结果进行理论分析。

第4章在理论分析和数值模拟 SMS 光纤结构的内部光场分布和输出特性的基础上,设计和制作基于 SMS 光纤结构和 FBG 的传感器,实验研究其折射率和湿度响应特性,实现湿度测量。

第5章提出并实现一种光纤锥的制作方法,利用此方法制作不同结构的光纤马赫-曾德干涉仪。理论分析各马赫曾德干涉仪的干涉原理和干涉模式,实验研究 MZI 的湿度(或折射率)和温度响应特性,讨论实验结果。

第6章理论分析 STMS 光纤结构的内部光场分布和输出特性,制作不同尺寸的 STMS 光纤结构,实验研究其折射率、湿度、温度响应特性。

第7章设计基于 LPFG 嵌入保偏光纤 Sagnac 环的折射率传感器,实验研究传感器的温度、应变和折射率响应特性,给出传感系数矩阵;制作基于多模光纤与 LPFG 级联的折射率传感器,实验研究该结构的折射率响应特性。

本书主要内容的编写是在西安石油大学光纤传感重点实验室完成的,感谢实验室各位老师与研究生的支持与讨论。乔学光教授给本书提出了很多意见和建议,感谢乔老师的悉心指导。本书得到了西安石油大学优秀学术著作基金和西安石油大学“光纤油田动态传感监测研究”科研创新团队的资助,在此一并感谢。由于作者水平有限,书中的不妥与错误之处,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 光纤传感技术	2
1.3 光纤折射率传感器的研究现状	6
1.4 光纤湿度传感器的研究现状	9
1.5 光纤折射率传感器与湿度传感器的应用概况	13
第 2 章 光纤传感的基本理论	16
2.1 光纤布拉格光栅传感原理	16
2.1.1 光纤布拉格光栅的结构原理	16
2.1.2 光纤布拉格的耦合模方程	17
2.1.3 光纤布拉格光栅的传感原理	19
2.2 长周期光纤光栅传感原理	20
2.2.1 纤芯基模与包层模的有效折射率	21
2.2.2 长周期光纤光栅的模式耦合方程	24
2.2.3 长周期光纤光栅的传感原理	28
2.3 光纤干涉仪	29
2.3.1 光纤马赫-曾德干涉仪	29
2.3.2 光纤萨格纳克干涉仪	32
2.3.3 光纤迈克尔逊干涉仪	33
2.3.4 光纤法布里-珀罗干涉仪	34
2.4 本章小结	36
第 3 章 微纳光纤布拉格光栅的折射率与湿度传感特性	37
3.1 微纳光纤布拉格光栅折射率传感特性的理论模拟	37

3.1.1	纤芯有效折射率与纤芯直径和环境 折射率的关系	38
3.1.2	微纳光纤布拉格光栅对环境折射率的 响应规律	40
3.2	微纳光纤布拉格光栅的制作	43
3.3	折射率传感特性	44
3.4	湿度传感研究	46
3.4.1	利用光纤测量湿度的工作原理	46
3.4.2	湿度传感特性	48
3.5	本章小结	49
第4章	基于 SMS 光纤结构结合光纤布拉格光栅的传感器 ...	50
4.1	SMS 光纤结构的传感原理	50
4.2	SMS 光纤结构的数值模拟分析	54
4.2.1	SMS 光纤结构内部光场分布的数值模拟	55
4.2.2	多模纤芯直径对光场分布的影响	57
4.2.3	多模纤芯长度对光场分布的影响	59
4.2.4	各阶模式的光场分布	61
4.2.5	环境折射率对光场分布的影响	63
4.3	SMS 光纤结构的折射率传感实验研究	65
4.3.1	SMS 光纤结构的制作	65
4.3.2	折射率传感特性	66
4.4	基于 SMS 光纤结构结合光纤布拉格光栅 传感器的制作	69
4.5	传感器的理论分析	72
4.6	传感器的实验研究	74
4.6.1	折射率传感特性	74
4.6.2	湿度传感特性	76
4.7	本章小结	78

第 5 章 基于光纤锥型马赫 - 曾德干涉仪的湿度传感器与	
折射率传感器	79
5.1 光纤锥型马赫 - 曾德干涉仪的基本原理	79
5.2 基于双光纤锥型马赫 - 曾德干涉仪的湿度传感器	80
5.2.1 传感器的制作	81
5.2.2 理论分析	82
5.2.3 干涉光谱的傅里叶分析	84
5.2.4 湿度传感特性	85
5.2.5 温度传感特性	88
5.3 基于多模光纤与光纤锥的马赫 - 曾德干涉仪的	
湿度传感器	89
5.3.1 传感器的制作	89
5.3.2 理论分析	90
5.3.3 湿度传感特性	92
5.3.4 温度传感特性	94
5.4 基于多模纤芯与光纤锥的马赫 - 曾德干涉仪的	
折射率传感器	95
5.4.1 传感器的制作	96
5.4.2 理论分析	98
5.4.3 折射率传感特性	99
5.4.4 温度传感特性	102
5.5 本章小结	103
第 6 章 STMS 光纤结构的折射率和湿度传感特性	105
6.1 STMS 光纤结构的传感原理	105
6.2 STMS 光纤结构的数值模拟分析	106
6.2.1 光纤长度对光场分布的影响	108
6.2.2 多模纤芯直径对光场分布的影响	110
6.2.3 环境折射率对光场分布的影响	110
6.3 STMS 光纤结构的制作	112

6.4	STMS 光纤结构的传感特性研究	115
6.4.1	折射率传感特性	115
6.4.2	湿度传感特性	119
6.4.3	温度传感特性	119
6.4.4	湿度传感方案的构思	121
6.5	本章小结	122
第7章	基于长周期光纤光栅的折射率传感器	123
7.1	基于 LPFG 嵌入保偏 Sagnac 环的折射率传感器	123
7.1.1	传感器制作	125
7.1.2	折射率传感特性	126
7.1.3	温度传感特性	128
7.2	基于 LPFG 熔接多模光纤的折射率传感器	129
7.2.1	传感器制作与原理	130
7.2.2	折射率传感特性	131
7.3	本章小结	134
参考文献		136

第1章 绪 论

1.1 概 述

折射率不仅是物体的固有属性之一,也是重要的光学参数和生化参数,因此折射率测量方法的研究具有重要的研究意义。而且对于折射率的测量还可转换为 pH 值、液位、流量、流速、湿度等物理量的测量。折射率传感在生物化学领域具有重要的作用,如农林科技、环境检测、医学诊断、石油化工等,因此得到了广泛研究。目前,常用的折射率测量方法有布儒斯特角法、阿贝折射仪、椭偏仪、干涉法、表面等离子体共振技术、光纤法等技术。在上述折射率测量方法中,光纤法操作简便、灵敏度高、结构灵巧、可进行折射率的实时监测,引起研究者的广泛关注。

空气的干湿程度一般称为“湿度”,湿度是指空气中水蒸气的含量,通常用绝对湿度、相对湿度、比较湿度、混合比、饱和差以及露点等物理量来表征。绝对湿度(Absolute Humidity, AH)是指一定体积的空气中含有的水蒸气的质量,单位是 g/m^3 ,它的极值是饱和状态下的最高湿度。相对湿度(Relative Humidity, RH)是绝对湿度与最高湿度的比值,表示空气中的绝对湿度与同温度下的饱和绝对湿度的比值,也就是指在一定时间内某处空气中所含水汽量与该气温下饱和水汽量的百分比。相对湿度为 100% RH 的空气就是水蒸气饱和的空气。随着湿度的增高,空气的最高湿度就越大。露点指空气中水蒸气含量和气压不变的条件下冷却达到饱和时的温度。在实际应用中,一般测量的是相对湿度。

相对湿度的计算公式为

$$\phi = \frac{\rho_w}{\rho_{w, \max}} \times 100\% = \frac{e}{E} \times 100\% = \frac{s}{S} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 ρ_w ——绝对湿度(g/m^3)；
 $\rho_{w,\max}$ ——最高湿度(g/m^3)；
 E ——饱和蒸气压(Pa)；
 s ——比湿(g/kg)；
 S ——最高比湿(g/kg)。

自然界中,动植物的生长对环境湿度要求极高。对于植物而言,空气湿度和温度影响光和、吸收、蒸腾等代谢过程,进而影响植物的生长。若相对湿度太小,会加重土壤干旱和空气干旱,破坏植物的水分平衡,阻碍植物的生长。而若相对湿度长时间处于饱和状态,植物生长亦会受到抑制。一般来说,空气湿度在 60%~85% RH,较为适宜植物生长。空气湿度在 45%~55% RH,则适宜动物生存。人体的大部分组织是由水组成的,因此环境湿度对人体的影响较大。过于干燥和潮湿都会降低人的舒适感,而且影响人体健康。人类适宜生存的环境湿度范围是 40%~55% RH。所以湿度测量在环境检测中尤为重要。

常见的湿度传感器有电容式、电阻式等电量湿度传感器。由于电类湿度传感器具有测量精度高、响应速度快等优点,因而得到了广泛应用。表 1-1 列出了几种典型的湿度传感器。可以看出传统的湿度传感器测量范围大,但存在着长期稳定性差等问题,而且不能工作在强电磁干扰和严重污染的环境中。因此研发新型湿度传感器并解决上述问题是湿度传感器研究领域的迫切需求。

表 1-1 几种湿度传感器

湿度传感器	检测范围	存在问题
氯化锂湿敏传感器	20%~90%	易潮解,寿命较短,重复性较差
金属氧化物陶瓷湿敏传感器	1%~100%	适合于高温高湿环境;脱附困难
有机高分子湿敏传感器	0%~100%	耐水性差,抗污染能力差

1.2 光纤传感技术

光纤的构成较为简单。光纤的纤芯和包层是由不同折射率的光纤材料制成,其中纤芯的折射率略小于包层的折射率。纤芯与包层之间

存在的折射率差使得光在纤芯中能够发生全反射而进行传输。同时,在光纤包层的外面还有塑料涂覆层、松套管等结构保护光纤表面不受损伤。一般来说,通信光纤的包层直径为 $125\mu\text{m}$,涂覆层直径为 $250\mu\text{m}$ 。不同类型的光纤具有不同的纤芯和包层直径,如长距离通信中,光纤需要具有厚包层,这样可以避免光的泄漏而保证信号不失真,所以长距离通信中的单模光纤的纤芯直径约为 $9\mu\text{m}$ 。短距离通信中使用的光纤纤芯直径较大,可以传输多个模式,称为多模光纤,其纤芯直径为 $25\sim 105\mu\text{m}$ 。

此外,还有很多特殊光纤,如色散补偿光纤,它具有大的负色散,可以补偿标准单模光纤的色散。保偏光纤通过光纤几何尺寸的设计,能够产生桥列的双折射效应,可以很好地保持光波的偏振态。塑料光纤是由高聚合物为纤芯材料、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)包层材料的光纤,具有柔软、坚固、成本低等优点,适宜短距离传输。光子晶体光纤是一种在二氧化硅的背景材料中具有空气孔的光纤,这些气孔的尺度与光波波长大致在同一量级,光被限制在低折射率的光纤芯区传播。同时,还有可以实现激光的掺铒、掺镱、掺铥等掺杂类光纤,具有特殊光学特性的双包层光纤和空心光纤等。

光纤最初是在通信技术中用于长距离传输光波,但光在光纤中传播时表征光波的特征参量(如强度、相位、偏振态、波长等)会随外加信号(如温度、压力、应力、折射率、电磁场、振动、转动等)的变化而发生改变,通过光探测器在输出端解调就可检测出所需要的物理量。这就是光纤传感的基本原理,如图 1-1 示。

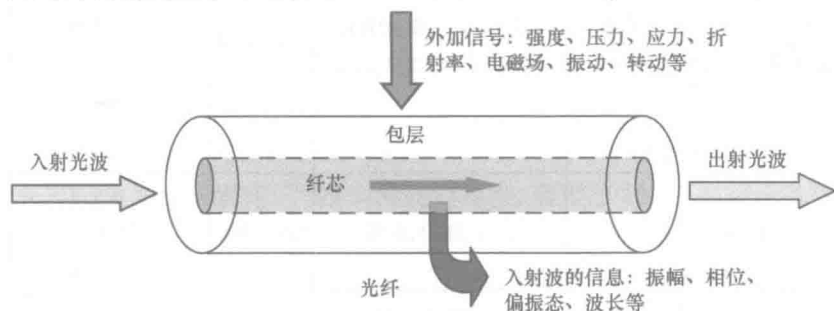


图 1-1 光纤传感原理

光纤传感技术^[1-3]是利用被测的物理量对光纤中输入和输出的光波进行调制而实现测量,按光的调制方式可分为光强调制、相位调制、偏振态调制和波长调制等。按照传感原理可以分为传感型(或功能型)传感器和传光型(非功能型传感器)。典型的传感技术如表 1-2 所列。

表 1-2 光纤传感技术

类型		被测量	检测量	光纤类型
干涉型	迈克尔逊干涉仪	振动、位移、加速度、温度	相位、频率	单模光纤 多模光纤
	马赫-曾德干涉仪	振动、位移、加速度、 温度、折射率、 电压、电流、磁场、湿度	相位	单模光纤 多模光纤 细芯光纤 光子晶体光纤
	萨格纳克干涉仪	振动、转动、电流、磁场	相位	保偏光纤
	法布里-珀罗干涉仪	温度、压力、位移、加速度、 折射率、湿度、浓度	相位	单模光纤 多模光纤 细芯光纤 光子晶体光纤
非干涉型		位移、温度、折射率、电压、 电流、磁场、湿度、压力	偏振、 光强、损耗	单模光纤 多模光纤
光纤 光栅型	光纤布拉格光栅	温度、压力、位移、加速度、 折射率、湿度、浓度、应变	波长、光强	单模光纤 多模光纤 保偏光纤 细芯光纤
	长周期光纤光栅			
	倾斜光纤光栅			
	多模光纤光栅			
	保偏光纤光栅			
	细芯光纤光栅			
分布式光纤传感		温度、压力、应变	时间、频率	单模光纤 多模光纤 保偏光纤

1966 年英国标准电信研究所的高锟^[4]发表了《光频率的介质纤维表面波导》一文,从理论上分析证明了用光纤作为传输媒体以实现光

通信的可能性,并预言了制造通信用的超低耗光纤的可能性。1970 年美国康宁公司用改进型化学相沉积法(MCVD 法)成功研制成传输损耗只有 20dB/km 的低损耗石英光纤。随后人们研制出了多模光纤、色散补偿光纤、保偏光纤、双包层光纤、空心光纤、各种掺杂光纤、光子晶体光纤等,并将这些光纤应用至通信和传感器的研制中。

近年来,在光纤中制作光栅的技术引起了研究者们极大的兴趣。1978 年,K. O. Hill^[5]等人首先利用 488nm 氢离子激光器在掺铈光纤产生驻波干涉条纹,从而导致光纤的折射率沿轴向产生周期性的改变,制造出世界上第一只光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)。1989 年 G. Meltz^[6]等人提出了紫外光侧面曝光的写入技术。1993 年,K. O. Hill^[7]等人又首次提出利用相位掩模板方法,使 FBG 的制作效率大幅度提高。相位掩模板方法目前已成为制作光纤光栅最常用的方法,能够形成光纤光栅的批量生产,可以大大降低传感器的成本,推动了光纤光栅在光纤传感和光纤通信中的应用。

光纤光栅是利用外界光子与纤芯内铈离子之间的相互作用,导致折射率的永久性变化,从而在光纤纤芯内部形成空间位相光栅,相当于一个窄带的滤波器或反射镜。光纤光栅是过去几十年中发展最为迅猛的光纤器件之一,它的出现对光纤技术具有划时代的意义,开拓了光纤研究的新领域。由于光纤布拉格光栅具有结构紧凑(一般长为 2cm 左右)、波长调制、反射式监测、可以实现分布式测量等优点,尤其在光纤传感技术中具有非常重要的地位。

1995 年 A. M. Vengsarkar^[8]等人首次采用紫外激光,在掺铈的光敏光纤中采用振幅掩模板制作出第一只周期为几百微米的长周期光纤光栅(Long-period Fiber Grating, LPFG),它可以将纤芯基模耦合到同向传输的包层模。同年,V. Bhata^[9]等人详细研究了它的相关特性,提出了 LPFG 在通信和传感领域中的应用。1997 年,T. Erdogan^[10]从模式耦合的角度深入研究了 LPFG 的光谱特性,奠定了 LPFG 的理论基础。与光纤光栅不同,长周期光纤光栅的周期较长,是透射型光纤光栅,无后向反射。而且满足相位匹配条件的是同向传输的纤芯基模与包层模,因此长周期光纤光栅的谐振波长和幅值对外界环境的变化非常敏感,在光纤通信和光纤传感领域应用较广。

目前,较为成熟的光纤光栅写制技术主要有利用双光束干涉条纹在光纤上曝光的横向干涉法、使用相位掩模板和紫外激光的相位掩模法、利用柱面镜聚焦在光纤侧面曝光的逐点写入法和使用二氧化碳激光器对光纤直接曝光法等。光纤光栅技术发展至今,无论是写栅技术、理论研究还是应用都获得了极大提高。一些特殊结构的光纤光栅,如多模光纤光栅、倾斜光纤光栅、啁啾光纤光栅^[11-13]也相继研制成功。

随着光纤与光纤光栅及其他光纤无源器件的不断研发,光纤传感器从20世纪70年代研究开始,已成为迅猛发展的高新技术之一。光纤传感技术已经被广泛应用于石油勘探、油井监测,桥梁、铁路与建筑物的健康监测,生化医学等领域,进行温度、压力、折射率、气体浓度、振动、应变和定位等监测中^[14-19]。与传统的电磁类传感器相比,它具有如下优点:

(1) 抗电磁干扰,电绝缘,耐腐蚀,安全可靠。可工作在强电磁干扰、易燃易爆、有毒、强腐蚀环境中。而且对被测物体影响小,可做到健康监测。

(2) 灵敏度高。特殊光纤、光束干涉技术以及传感器的制作、封装技术使得光纤传感器灵敏度优于传统传感器。

(3) 重量轻,体积小,结构紧凑,外形易变,成本低廉。

(4) 测量对象广泛。可以实现测量温度、压力、位移、振动、转动、速度、加速度、流量、液面、水声、电流、磁场、电压、超声波、折射率、浓度、湿度、定位、核辐射等物理量的测量。

(5) 可以实现对被测量的远距离监控、便于复用、便于组网。

1.3 光纤折射率传感器的研究现状

光纤折射率传感器是光纤传感器的研究重点之一,当外界环境的折射率变化时,光纤内各个模式的有效折射率会发生变化,因此会影响光纤传感器输出参量的变化。通过检测光纤传感器的输出变化,就可获得环境折射率的信息。由于对折射率的测量容易转换为浓度、湿度、pH、液位等参量的测量,在化工、医疗卫生、生物传感等领域应用广泛^[20-24]。常见的光纤折射率传感器有光纤光栅型、光纤锥型和干涉型。

1. 光纤光栅型折射率传感器

FBG 是波长调制型器件,在复用和分布式测量中具有优势。但是外界环境折射率变化时,能够引起 FBG 的布拉格波长的变化量很小,难以引起明显的观测,所以 FBG 对环境折射率的变化不敏感。为了提高 FBG 的折射率灵敏度,研究者们一般采用腐蚀光纤光栅、端面打磨光纤、在特殊光纤上写制光纤光栅或者将 FBG 与其他结构级联等方案来提高其折射率灵敏度。

2001 年 K. Schroeder^[25]通过打磨 FBG 的端面激发出包层模,有效提高了 FBG 的折射率灵敏度。2005 年 W. Liang^[26]腐蚀得到直径为 $3\mu\text{m}$ 的 FBG,实现了折射率测量。2010 年 X. Fang^[27]用飞秒激光器在微纳光纤上写制 FBG,当光纤直径为 $2\mu\text{m}$ 、环境折射率为 1.44RIU 时最高折射率灵敏度为 $231.4\text{nm}/\text{RIU}$ 。2010 年 M. Han^[28]将一根 FBG 与 LPFG 级联,利用纤芯基模与包层模的耦合实现了灵敏度为 $2.3\text{nm}/\text{RIU}$ 的折射率测量。2011 年 Q. Wu^[29]将 FBG 与单模-多模-单模光纤结构结合起来,传感器的最高折射率灵敏度为 $7.33\text{nm}/\text{RIU}$ 。K. Zhou^[30]在两个 FBG 之间用飞秒激光器刻入一个 $35\mu\text{m}$ 的微 F-P 腔,传感器的折射率灵敏度为 $9\text{nm}/\text{RIU}$ 。2012 年 Y. Ma^[31]在 FBG 前嵌入一段 10mm 长的细芯光纤,实现了 $1.33 \sim 1.41\text{RIU}$ 折射率范围的传感测量,灵敏度为 $133.26\text{dB}/\text{RIU}$ 。

研究者们也相继使用 LPFG、倾斜光纤光栅、多模光纤光栅进行了折射率测量。如 2007 年 J. H. Yan^[32]级联两个 LPFG,其中一个 LPFG 将包层腐蚀至 $98.5\mu\text{m}$,实现了折射率与温度的同时区分测量。2009 年, T. Guo^[33]在倾斜光栅前错位熔接单模光纤,激发出多个包层模,利用包层模对环境折射率的敏感性提高了传感器的折射率灵敏度。2013 年 Q. Z. Rong^[34]在多模 FBG 前嵌入一段细芯光纤,折射率灵敏度最高可达 $233.33\text{dB}/\text{RIU}$ 。

2. 光纤法布里-珀罗干涉仪型折射率传感器

光纤 F-P 干涉仪是基于多光束干涉原理,一般由两个或者多个反射面组成。光在反射端面多次往返产生干涉,当环境或腔内折射率改变时会导致干涉条纹发生变化。制作方法通常有三种:①在光纤上制作出空气孔或刻痕,将待测液体注入空气 F-P 腔中;②熔接不同类

型的光纤,并切除光纤端面至几百微米,为了提高反射率可在光纤端面镀膜;③级联两个 FBG,FBG 充当反射镜,形成 F-P 腔。2008 年 T. Wei^[35]用飞秒激光器在单模光纤上制作出长 $60\mu\text{m}$ 、深 $72\mu\text{m}$ 的槽口,传感器的折射率灵敏度可达 $1163\text{nm}/\text{RIU}$ 。2011 年龚元^[36]通过腐蚀渐变折射率多模光纤纤芯后与单模光纤熔接形成 F-P 腔,其折射率灵敏度为 $45\text{dB}/\text{RIU}$ 。2012 年 C. R. Liao^[37]在一根单模光纤的端面用飞秒激光器打出一个孔后,与另外一段单模光纤熔接形成空气腔,可允许待测液体进入腔中,实验测得传感器的折射率灵敏度为 $994\text{nm}/\text{RIU}$ 。2013 年, J. J. Zhang^[38]将一段微纳光纤嵌入两个 FBG 之间,实现了温度与折射率的同时测量,传感器的波长分辨率为 0.5pm 。

3. 光纤马赫-曾德干涉型折射率传感器

光纤马赫-曾德干涉型 (Mach-zehnder Interferometer, MZI) 型折射率传感器^[39-42]的原理是基于模间干涉,具有制作简单、灵敏度高等优点,是光纤折射率传感器的研究热点。典型结构有纤芯失配、纤芯错位熔接、级联多个光纤锥、飞秒激光或化学腐蚀在光纤上打孔。2011 年 Qiang Wu^[43]提出单模-多模纤芯-单模光纤结构,当外界环境折射率为 1.437RIU 时灵敏度为 $1815\text{nm}/\text{RIU}$ 。P. F. Wang^[44]提出一种基于单模-细锥-多模-单模光纤结构,利用光束传播法对其进行了理论分析,并讨论了折射率传感特性。Di Wu^[45]级联三个光纤细锥,传感器的折射率灵敏度 $28.6\text{nm}/\text{RIU}$ 。J. Yang^[46]在外径为 $35\mu\text{m}$ 的光纤上用商用熔接机熔接出两个直径约为 $31\mu\text{m}$ 的光纤锥,在 $1.33 \sim 1.38\text{RIU}$ 折射率测量范围内灵敏度为 $430.2\text{nm}/\text{RIU}$ 。F. F. Pang^[47]制作了双包层-单模-双包层光纤折射率传感器,灵敏度可达 $823\text{nm}/\text{RIU}$ 。2012 年 B. Y. Li^[48]将两个光纤细锥组成的 MZI 再进行腐蚀,在 $1.3348 \sim 1.3558\text{RIU}$ 的折射率测量范围获得了 $664.57\text{nm}/\text{RIU}$ 的灵敏度。L. L. Xue^[49]给单模-多模-单模光纤结构中的多模光纤涂覆具有高折射率的聚苯乙烯,当薄膜厚度为 340nm ,在 $1.31 \sim 1.35\text{RIU}$ 的折射率范围内,传感器灵敏度为 $900\text{nm}/\text{RI}$ 。2013 年 K. Ni^[50]制作了基于两个单模光纤粗锥的 MZI,折射率灵敏度为 $266.5\text{nm}/\text{RIU}$ 。G. L. Yin^[51]设计了一种基于光纤锥和错位熔接的 MZI,可实现灵敏度为 $59.2\text{nm}/\text{RIU}$ 的折射率测量。