

学校编码: 10384
学号: 23120061152496

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

光谱吸收型光纤气体传感器的研究和设计
Investigation and Design of Spectral Absorptive Fiber Gas
Sensor

钟 春 兰

指导教师姓名: 董 小 鹏 教授

专 业 名 称 : 无 线 电 物 理

论 文 提 交 日 期 : 2009 年 5 月

论 文 答 辩 时 间 : 2009 年 月

学 位 授 予 日 期 : 2009 年 月

答 辩 委 员 会 主 席 : _____

评 阅 人 : _____

2009 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（）课题（组）的研究成果，获得（）课题（组）经费或实验室的资助，在（）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

中文摘要

随着石油、天然气工业以及煤炭工业的发展,煤矿安全、环境污染等一系列问题正成为人们关注的重点,对煤矿生产、工业生产和日常生活中产生的有害气体进行高灵敏度检测变得十分重要。光谱吸收型光纤气体传感器因具有灵敏度高、响应速度快、分辨力高,抗电磁干扰、适用于易燃易爆的危险场合等优点,倍受国内外学者关注,从而具有重大的研究意义。

本课题在 Lambert-Beer 定律基础上,利用气体在石英光纤透射窗口内的吸收峰,测量由于气体吸收产生的光强衰减,从而反演出气体的浓度。设计了两套可行实验方案,分别解决了目前差分检测和谐波检测中存在的主要技术难题。并分别以 CH_4 和 C_2H_2 作为目标气体进行实际测量,取得了良好的实验结果,主要研究内容如下:

(1) 研究基于红外光谱吸收的光纤气体传感机理。依据气体的吸收特性,研究光源、光探测器、光纤光栅参数的选择及其之间的耦合技术,设计稳定低噪声光学传感气室,并研究气室长度对传感器灵敏度的影响。

(2) 研究气体检测方法,对目前常用的差分检测和谐波检测方案的原理、存在的技术问题进行了分析和讨论。并在此基础上提出相应解决方案,设计并搭建两种检测系统。

(3) 搭建新颖可靠的时间双差分传感系统。

- 设计用于气体传感中微弱信号测量的便携式双光路光电检测采集系统,解决了目前差分检测中存在的小信号有效放大和大信号饱和的矛盾;
- 将信号采集单元集成于电路之中,形成一便携式系统,克服了目前光电检测和采集系统体积庞大的问题;
- 采用 CH_4 作为目标气体取得了良好的测量结果。

(4) 搭建基于 FBG 和线性滤波器的波长调制检测系统。

- 设计新颖光源调制系统,获得了适合气体检测的窄带扫描光源;降低光源成本的同时,解决了窄带光源相干性高引起的系统附加干涉问题;
- 首次提出利用气体吸收曲线的近似线性部分和线性滤波器边缘滤波特性,解决当前谐波检测技术中存在的窄带光源不稳定以及中心波长不精确锁定影响测量精度的技术难题;
- 首次通过该种技术实现中心波长的跟踪;
- 设计了新颖的微弱信号检测电路;
- 采用 C_2H_2 作为目标气体取得了良好的实验结果。

(5) 系统的实验与结果分析。分析对 CH_4 、 C_2H_2 气体的实验和测量数据,并对两种不同实验方案进行比对分析。

关键词: 气体传感; 差分检测; 频率调制检测

Abstract

Nowadays, with the development of industries such as petroleum, natural gas and coal mining, issues like colliery security, environment pollution have been paid more and more attention to in our society and it is vital to have a high-sensitive detection on noxious gas in the industrial production and our daily life. The spectrum absorptive fiber optical gas sensor, having the merits of high sensitivity, fast response, high resolution, good EMI immunity and conformity to flammable and explosive dangerous areas, gains positive regards coming from both domestic and international scholars, which gives it a great significant to be studied and explored.

Based on Lambert-Beer law, the gas concentration is calculated through the measurement of light-intensity attenuation caused by the gas absorption peak in the transmission window of silica fiber. Two schemes, using CH_4 and C_2H_2 as the target gases, were designed and implemented in our research, which resolved the technical problems in the differential detection and the frequency modulation detection, respectively. The main tasks involved in our research are as followings:

- (1) Studying the principle based on infrared spectrum absorptive fiber gas sensing: on the basis of the gas absorptive characteristics, the light source, optical sensors, the selection of the fiber grating parameters and the couple techniques between them were investigated, a stable low-noise gas cell was designed and the influence on the sensor sensitivity given by the variation of the gas cell length was observed.
- (2) Studying the approach of gas detection: the fundamentals and existing problems within the present differential and frequency modulation detections were analyzed and discussed, from which the corresponding solutions and detecting systems were proposed.
- (3) Implementation of the novel time dual differential sensing system:
 - a) A portable, dual optical channel electronic acquisition system specialized in weak signal detection in gas sensing was designed, which gives a balance between the high gain and saturation in the amplifier circuitry.
 - b) The volume of the acquisition system was reduced to a portable size, which settles the big volume problem of the present photoelectric acquisition system.
 - c) Good experimental results were obtained in CH_4 detection.
- (4) Implementation of the frequency modulation detecting system based on FBG and linear filter.
 - a) A novel modulation light source was designed, which served as the narrow-band scanning light source to detect gas; the cost of that kind of light source was reduced while the system additional interference problem caused by the high coherence of the narrow-band light source was resolved at the same time.
 - b) It was the first time that the technical problem that the deterioration of

the measurement accuracy due to the instability of the narrow-band light source and the inaccuracy of the center wave-length was settled by the means of taking advantage of the approximate linear section of the gas absorptive curve and the edge filtering characteristics of the linear filter.

- c) The center wave-length could be traced at the first time.
 - d) A novel weak signal detecting circuitry was designed and implemented, which is specialized in frequency modulation detection.
 - e) Good experimental results were obtained in C_2H_2 detection.
- (5) Analysis in the experimental results of the system: the procedures and measurement data of the CH_4 , C_2H_2 were analyzed in this dissertation.

Keywords: Gas Detection; Differential Detection; Frequency Modulation Detection

目 录

| | |
|---|-----------|
| 中文摘要 | i |
| Abstract | ii |
| 目 录 | iv |
| Table of Contents | vii |
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 气体传感综述 | 1 |
| 1.2 光纤气体传感 | 2 |
| 1.2.1 光纤气体传感器的特点 | 2 |
| 1.2.2 光纤气体传感器的分类 | 2 |
| 1.3 光谱吸收型光纤气体传感技术 | 3 |
| 1.3.1 光谱吸收型光纤气体传感技术国内外研究现状 | 4 |
| 1.3.2 光谱吸收型光纤气体传感技术存在的问题 | 7 |
| 1.4 课题的目的、意义及主要创新点 | 7 |
| 第 2 章 光谱吸收型光纤气体传感器的原理及方法研究 | 9 |
| 2.1 气体分子的光谱吸收特性 | 9 |
| 2.1.1 气体分子的典型吸收线 | 9 |
| 2.1.2 光谱吸收法基本原理 | 9 |
| 2.1.3 典型气体吸收谱线 | 10 |
| 2.2 传感气室设计原则及光路耦合技术 | 12 |
| 2.2.1 吸收路径的长度对传感器测量灵敏度的影响 | 12 |
| 2.2.2 光学传感气室的设计及其与光纤的耦合 | 14 |
| 2.2.3 光源、光探测器与光纤的选择和耦合技术 | 15 |
| 2.3 差分与谐波检测方案分析与讨论 | 18 |
| 2.3.1 差分检测方案分析与讨论 | 18 |
| 2.3.2 谐波检测方案分析与讨论 | 21 |
| 2.4 本章小结 | 24 |
| 第 3 章 时间双差分光纤气体传感系统的设计 | 26 |
| 3.1 时间双差分光纤气体传感系统基本原理和系统构建 | 26 |
| 3.1.1 系统基本原理 | 26 |
| 3.1.2 光电检测采集系统要求 | 27 |
| 3.1.3 本文所用的光电检测采集系统的特点 | 28 |
| 3.1.4 时间双差分光电检测采集系统结构 | 29 |
| 3.2 便携式程控增益双光路光电检测采集系统的设计与实现 | 30 |
| 3.2.1 光电检测 | 30 |
| 3.2.2 50Hz 工频同步开关电容窄带陷波器 | 32 |

| | | |
|---------------------------------------|---|-----------|
| 3.2.3 | PLL 同步时钟生成电路 | 34 |
| 3.2.4 | LPF 低通抗混叠滤波器 | 36 |
| 3.2.5 | 24 位高精度 $\Sigma - \Delta$ 模数转换 | 36 |
| 3.2.6 | AVR 单片机系统 | 38 |
| 3.2.7 | uC/OS-II 及其在 AVR 上的移植 | 39 |
| 3.2.8 | 基于 uCOS-II 的用户任务编写 | 43 |
| 3.2.9 | 系统命令 | 46 |
| 3.3 | 系统实验结果与分析 | 47 |
| 3.3.1 | 实验条件 | 47 |
| 3.3.2 | 测量结果分析 | 48 |
| 3.4 | 传感器的性能分析与技术指标 | 51 |
| 3.5 | 系统改进方案 | 52 |
| 3.6 | 本章小节 | 53 |
| 第 4 章 基于 FBG 和线性滤波器的检测系统的设计与分析 | | 54 |
| 4.1 | 检测基本原理 | 54 |
| 4.1.1 | 气体吸收系数调制解调原理 | 54 |
| 4.1.2 | 线性滤波器调制解调原理 | 55 |
| 4.2 | 系统结构 | 56 |
| 4.2.1 | 光源调制 | 57 |
| 4.2.2 | 光纤光栅波长扫描范围 ($\Delta \lambda$), 光源输出功率波动以及光栅谱线变化对测量结果影响的消除 | 60 |
| 4.2.3 | 中心波长偏移的补偿措施和波长偏移跟踪技术 | 62 |
| 4.2.4 | 信号检测方法 | 62 |
| 4.3 | 光电检测和信号采集部分 | 63 |
| 4.3.1 | 检测电路结构及原理 | 63 |
| 4.3.2 | 光电转换和微弱信号检测技术 | 63 |
| 4.3.3 | 信号调理电路设计 | 65 |
| 4.3.4 | 直流信号的提取 | 67 |
| 4.3.5 | 电路噪声测试 | 68 |
| 4.3.6 | 数据采集和 PC 软件 | 68 |
| 4.4 | 实验结果分析 | 69 |
| 4.4.1 | 气体浓度的测量 | 70 |
| 4.4.2 | $\Delta \lambda$ 及系统波动因子对测量结果的影响的消除 | 71 |
| 4.4.3 | 中心波长的监测与跟踪 | 73 |
| 4.5 | 讨论与分析 | 74 |
| 4.6 | 本章小结 | 75 |
| 第 5 章 总结及展望 | | 76 |
| 5.1 | 两种检测方案的性能对比 | 76 |
| 5.1.1 | 响应时间 | 76 |
| 5.1.2 | 检出范围 | 76 |
| 5.1.3 | 传感器的稳定性 | 77 |
| 5.1.4 | 传感器的重复性 | 77 |

| | |
|---------------------|-----------|
| 5.1.5 传感器的成本..... | 77 |
| 5.1.6 传感器的应用前景..... | 78 |
| 5.2 课题总结..... | 78 |
| 5.3 存在问题..... | 79 |
| 参考文献 | 81 |
| 附录 | 84 |
| 致谢 | 86 |

厦门大学博硕士论文摘要库

Table of Contents

| | |
|--|-----------|
| Chinese Abstract | i |
| English Abstract | ii |
| Table of Contents in Chinese | iv |
| Table of Contents | vii |
| Chapter 1 Introduction | 1 |
| 1.1 Gas Detection Overview | 1 |
| 1.2 Fiber Gas Sensing | 2 |
| 1.2.1 Features of Fiber Gas Sensor | 2 |
| 1.2.2 Classification of Fiber Gas Sensor | 2 |
| 1.3 Spectra Absorptive Fiber Gas Sensing Technology | 3 |
| 1.3.1 Status of Present Spectra Absorptive Fiber Gas Sensing Research | 4 |
| 1.3.2 Existing Problems of Spectra Absorptive Fiber Gas Sensing Technology | 7 |
| 1.4 Purposes, Significances And innovations of This Research | 7 |
| Chapter 2 Principles And Approaches of Gas Detection | 9 |
| 2.1 Selective Absorbability of Gas Molecules | 9 |
| 2.1.1 Typical Absorptive Curves of Gas Molecules | 9 |
| 2.1.2 Basic Principles of Spectra Absorptive Approach | 9 |
| 2.1.3 Typical Absorptive Spectrum of Gas | 10 |
| 2.2 Gas Cell Design Rules And Optical Coupling Technology | 12 |
| 2.2.1 Influence of Gas Cell Length on Sensor Sensitivity | 12 |
| 2.2.2 Optical Gas Cell Design And Coupling with Fiber | 14 |
| 2.2.3 Selection And Coupling of LD, Optical Sensor And Fiber | 15 |
| 2.3 Analysis in Differential and Frequency Modulation Detections | 18 |
| 2.3.1 Analysis in Differential Detection | 18 |
| 2.3.2 Analysis in Frequency Modulation Detection | 21 |
| 2.4 Summary | 24 |
| Chapter 3 Design of Dual Time Differential Detecting System | 26 |
| 3.1 Fundamentals of Dual Time Differential Detecting System | 26 |
| 3.1.1 Basic Principles | 26 |
| 3.1.2 Requirements of Photo-Electrical Acquisition System | 27 |
| 3.1.3 Features of Photo-Electrical Acquisition System in Our Subject | 28 |
| 3.1.4 System Structure | 29 |
| 3.2 Design of Portable Photo-Electrical Acquisition System | 30 |
| 3.2.1 Photo-Electrical Detection | 30 |
| 3.2.2 50Hz Sync Switching Capacitor LPF | 32 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 3.2.3 | PLL Clock Signal Generator | 34 |
| 3.2.4 | Anti-alias LPF | 36 |
| 3.2.5 | 24 Bit $\Sigma - \Delta$ Analog to Digital Conversion | 36 |
| 3.2.6 | AVR Microcontroller | 38 |
| 3.2.7 | uC/OS-II And Porting on AVR | 39 |
| 3.2.8 | User Tasks Based on uC/OS-II | 43 |
| 3.2.9 | System Commands | 46 |
| 3.3 | Analysis in Experimental Results | 47 |
| 3.3.1 | Test Conditions | 47 |
| 3.3.2 | Analysis in Measurement Results | 48 |
| 3.4 | Performance And Key Technical Indexes of Gas Sensor | 51 |
| 3.5 | Improvement of the System | 52 |
| 3.6 | Summary | 53 |
| Chapter 4 Detecting System Based on FBG And Linear Filter | | 54 |
| 4.1 | Fundamentals | 54 |
| 4.1.1 | Modulation And Demodulation of Gas Absorptive Factor | 54 |
| 4.1.2 | Linear Fiber Modulation And Demodulation Principles | 55 |
| 4.2 | System Structure | 56 |
| 4.2.1 | Modulation on Light Source | 57 |
| 4.2.2 | Removal of $\Delta\lambda$ Volatility And Bragg Grating Noise | 60 |
| 4.2.3 | Compensation And Tracking on Center Wave-length | 62 |
| 4.2.4 | Signal Detecting Scheme | 62 |
| 4.3 | Photo-Electrical Conversion And Signal Processing | 63 |
| 4.3.1 | Fundamentals | 63 |
| 4.3.2 | Photo-Electrical Conversion And Weak Signal Detection | 63 |
| 4.3.3 | Signal Conditioning Circuitry | 65 |
| 4.3.4 | Restoration of DC Signal | 67 |
| 4.3.5 | System Noise Test | 68 |
| 4.3.6 | Data Acquisition And PC Software | 68 |
| 4.4 | Analysis in Experimental Results | 69 |
| 4.4.1 | Gas Concentration Measurement | 70 |
| 4.4.2 | Removal of $\Delta\lambda$ influence | 71 |
| 4.4.3 | Monitoring And Tracking of Center Wave-length | 73 |
| 4.5 | Analysis in Existing Problems | 74 |
| 4.6 | Summary | 75 |
| Chapter 5 Summary And Prospect | | 76 |
| 5.1 | Performance Comparison on Two Detecting Schemes | 76 |
| 5.1.1 | Response Time | 76 |
| 5.1.2 | Measurement Range | 76 |
| 5.1.3 | Sensor Stability | 77 |
| 5.1.4 | Sensor Repeatability | 77 |
| 5.1.5 | Sensor Cost | 77 |

| | |
|--|----|
| 5.1.6 Sensor Application Prospect..... | 78 |
| 5.2 Subject Summary | 78 |
| 5.3 Existing Problems | 79 |
| Reference | 81 |
| Appendix | 84 |
| Acknowledgement | 86 |

厦门大学博硕士论文摘要库

厦门大学博硕士学位论文摘要库

第1章 绪论

光纤传感技术是20世纪70年代末伴随着光纤的实用化和光通信技术的发展而形成的。1970年，康宁公司根据高锟博士的理论，第一个制造出损耗小于20dB/km的光纤，从此揭开了光纤技术的序幕。在短短几十年中，光纤通信迅速成为通讯领域的一大产业。在光通信过程中，由于光纤容易受到温度、压力等环境因素的影响，而导致光强、相位、频率等光波参数发生变化，因此演绎出一门全新的技术——光纤传感技术。

光纤传感器具有诸多优点，可以解决许多传统传感器无法解决的问题，因此被广泛应用于医疗、交通、电力、机械、石油化工、民用建筑以及航空航天等各个领域。随着信息高速公路热潮的到来，光纤传感技术将走进千家万户，深入到军事和民用的各个方面。

1.1 气体传感综述

现代工业发展的同时也引发了一系列安全和环境污染等社会问题，例如，工业生产中使用的原料和在生产过程中产生的气体的种类和数量随着工业的发展而越来越多，这些气体中，有毒性气体和可燃性气体不仅污染环境，而且有产生爆炸、火灾和使人中毒的危险。伴随着世界各国大力发展煤炭工业，煤矿爆炸事故日益增加。此外汽车工业的蓬勃发展，家庭液化石油气、煤气和天然气的广泛使用对环境污染提出更为严峻的挑战。对这些气体迅速准确的检测将有效地防止此类恶性事件的发生。

气体浓度的快速准确检测是环保监控、安全生产、医疗监护、工业过程必不可少关键技术，在煤炭、石油化工、冶金、电力、农业、医疗等行业以及环保工程和生物工程等方面都有着广泛的应用，气体传感器的研究已经受到极大的重视。

目前主要存在如下几种气体传感器形式：氧化物半导体气体传感器、固体电解质气体传感器、有机半导体气体传感器、石英振子气体传感器、场效应气体传感器、热催化气体传感器、表面声波气体传感器、光学气体传感器、气相色谱分

析传感器等^[1-2]。

随着经济与科技的发展,人们对气体传感器提出了越来越高的要求,传统的气体传感器渐渐暴露了自身的一些弱点,如半导体气体传感器普遍存在易中毒、测量精度低、抗干扰能力差的问题,而且在石油、化工等易燃易爆环境中使用这类传感器还会带来安全方面的隐患。因此,开发先进的新型的气体传感器成为一项紧迫的任务,而近年来迅速发展的光纤气体传感器具有传统气体传感器无可比拟的优点,因此倍受国内外学者关注,代表了气体传感技术的一个重要发展方向。

1.2 光纤气体传感

1.2.1 光纤气体传感器的特点

光纤气体传感器(Fiber Optic Gas Sensor)是利用光纤本身作为传感元件(传感型)或附于光纤端的某种材料或结构作为传感介质(传光型)将气体传感信号用光纤传输至信号处理单元。光纤用于气体传感有着其它气体传感器不可比拟的优势:

(1)极强的抗电磁场干扰能力,优良的电绝缘性和耐腐蚀性,是一种本质安全型的传感器。适合于测量易燃易爆气体或者工作于易燃环境以及在强电磁干扰环境;

(2)测量范围宽,精度高,工作稳定,寿命长;

(3)适合于长距离的在线测量,可将传感探头放入恶劣或危险的环境,由光纤将信号引出在远距离安全地带进行遥控遥测;

(4)传感单元结构简单稳定可靠;

(5)易于组成光纤传感网络,通过空分复用(SDM)、时分(TDM)以及波分(WDM)等多路复用技术^[3-10]可以使多个光纤传感器共用同一根光纤同一光源和同一信号检测设备,大大降低了系统成本。

1.2.2 光纤气体传感器的分类

光纤传感器用于气体浓度的测量,主要基于与气体物理或化学特性相关的光学现象或特性,用于气体测量的光纤技术相当丰富,各种光纤气体测量装置种类

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库