

# 吸收式光纤湿度检测系统的研究

倪家升<sup>1,2</sup> 常军<sup>1,2</sup> 王昌<sup>1</sup> 刘统玉<sup>1</sup> 宋志强<sup>1</sup> 王黔<sup>1</sup><sup>(1</sup> 山东省科学院激光研究所, 山东 济南 250014; <sup>2</sup> 山东大学信息学院, 山东 济南 250100)

**摘要** 介绍了湿度传感器的现有技术,提出了使用激光扫描技术实现湿度检测的新方案。通过扫描检测水在 1.36  $\mu\text{m}$  处的吸收峰,实现了长期稳定湿度检测,避免了检测误差和漂移。整套系统采用全光纤设计,实现了远程检测。由于探头以及信号传输部分均不需要供电,因此增强了系统的安全性能。采用不易受温度、应力影响的光学器件,使得系统可以在高温高压环境中稳定工作。对设计的湿度检测技术进行了详细说明,并实现了一套湿度检测系统,达到了  $10^{-6}$  量级湿度检测。

**关键词** 传感器;湿度;激光扫描;全光纤检测

中图分类号 TP212.14

OCIS 280.4788 060 2370

文献标识码 A

## Fiber Humidity Detection System Based Absorption Method

Ni Jiasheng<sup>1,2</sup> Chang Jun<sup>1,2</sup> Wang Chang<sup>1</sup> Liu Tongyu<sup>1</sup> Song Zhiqiang<sup>1</sup> Wang Qian<sup>1</sup>

<sup>(1</sup> Laser Institute of Shandong Academy of Science, Jinan, Shandong 250014, China  
<sup>2</sup> School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China)

**Abstract** The humidity sensors of existing technologies are described, and the use of laser scanning technology for humidity detecting new programs is proposed. By scanning the water in the absorption peak at 1.36  $\mu\text{m}$ , a long-term stable detection of humidity is achieved, and the errors and drift can be avoided. The entire system with all-fiber design, achieves a long-range detection. As the probe and signal transmission do not require electricity, the system's security features are enhanced. The system uses optical devices less susceptible to temperature and stress, making the system more stable even in the high temperature and pressure environment. The design of the humidity detection technology is described in detail, and a humidity detection system is achieved. It reaches the detection of  $10^{-6}$ -level moisture.

**Key words** sensors; humidity; laser scanning; all fiber detection

## 1 引言

湿度的测量往往要在高温高压环境下进行,另外,气流速度、温度和湿度变化非常剧烈或测量污染严重的工业气体时,其精度将大大降低。因此,找到一种温度适应范围大,抗干扰性能优良,在外界恶劣环境下依然能够长期在线稳定工作的湿度检测方法,对于生产和科研都非常迫切。早期的湿度测量通常采用干湿球湿度计和毛发湿度计,灵敏度低,响应时间慢。目前最常使用的是基于湿敏元件的湿度传感器,湿敏元件的线性度及抗污染性差,在检测环境湿度时,湿敏元件要长期暴露在待测环境中,很容易被污染而影响其测量精度及长期稳定性,另外电子元器件的寿命、温度等都会造成检测偏移误差。光纤传感技术发展起来后,使用光学方法对湿度进行检测引起关注。光纤湿度检测主要有光纤布拉格光栅(FBG)式<sup>[1,2]</sup>、光纤渐逝波耦合法<sup>[3]</sup>和基于 Nafion 结晶紫传感膜<sup>[4]</sup>等方法。FBG 式检测也是基于湿敏材料对 FBG 施加外力,造成 FBG 的中心波长发生位移,从而波长解调出湿度信息。FBG 器件本身对于温度和外界应力敏感,因此在恶劣环境下易产生检测误差,并且因为其使用的依然是湿度敏感材料,所以依然存在线性度和抗污染能力差,响应时间长等缺点。光纤渐逝波耦合法要对光纤进行特殊处理,由于光纤尺寸较小,加上处理方法目前不够成熟造

收稿日期: 2010-02-01; 收到修改稿日期: 2010-03-15

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAK03B00)、山东省科技攻关项目(2009GG10007016)和山东省重大专项(2008ZHZX1A0308)资助课题。

作者简介: 倪家升(1982—),男,硕士,助理研究员,主要从事光纤传感器技术方面的研究。E-mail: Njsh51@163.com

成特殊处理的渐逝波耦合器件重复性差,很难制造出耦合特性相同的两个器件,因此也限制了其具体应用。基于 Nafion 结晶紫传感膜方法是用 Nafion 结晶紫传感膜作为湿敏材料,涂敷于光纤端面,这种方法响应时间较慢,同时测量范围和灵敏度都不够理想。

本文提出了一种基于激光扫描技术的湿度检测系统,并对其进行了详细说明。

## 2 基本原理

本文基于气体分子的吸收光谱理论,利用特定波长的光与气体分子的吸收作用的原理,检测水分子气体的浓度,从而实现湿度检测。由于气体分子吸收光谱的存在,当光经过待测气体时,若光源光谱与待测气体的吸收谱线有重合,部分光能量将被待测气体吸收,输出光强将减弱,当气体浓度较低时,这种气体对特定波长光能量的吸收作用满足比尔-朗伯定律。

电磁辐射与气体分子相互作用时,在其能量( $E = h\nu$ ,  $E$  为光子能量,  $h$  为普朗克常数,  $\nu$  为光子频率)与分子的电子、振动或转动能量差相当的情况下,能引起分子由低能态跃迁高能态,结果某些特定波长的电磁辐射被气体分子所吸收,于是得到了气体分子吸收光谱<sup>[5~7]</sup>。如果用能量较高的近红外、中红外光去照射分子,则分子能够发生由低振动能态向高振动能态的跃迁,但同时还伴有转动能态的跃迁。这样我们就得到了在振动带上出现一系列的转动结构的振动-转动光谱。因此研究振动-转动光谱可以直接或间接地用于湿度水气含量的检测。

根据对气体分子光谱的分析可知:水分子气体在中红外和近红外波段有特征振动-转动光谱带以及泛频振动-转动光谱带,而且一个振动谱又分裂成多个转动结构谱线,即振动谱带内含有多个精细谱线,如图 1 所示。

由于光谱的自然展宽、碰撞展宽和多普勒展宽等影响,对于每一条精细谱线并不只有一个确定的频率,而是以某一频率为中心,按一定方式在一定的频率范围内连续分布。因此实际的分子光谱线都是有一定宽度的光谱轮廓,而不是一条没有宽度和形状的线条。

当光经过气体并且与待测气体中水分子的吸收谱线有重合时,部分光能量将被待测气体吸收,输出光强将减弱,满足比尔-朗伯定律<sup>[8]</sup>。根据比尔-朗伯定律,输出光强与待测气体浓度的关系为

$$I(t) = I_0(t) \exp[-\alpha(\lambda)LC], \quad (1)$$

式中  $I(t)$  为输出光光强,  $I_0(t)$  为输入光光强,  $\alpha$  为吸收系数(与波长有关),  $L$  为光与气体作用的长度(即光在气体中传输的距离),  $C$  为气体浓度。

当气体的吸收系数、光程确定后,光强的衰减就只与气体浓度相关。可以得到气体的浓度为

$$C = -\frac{1}{\alpha(\lambda)L} \ln \frac{I(t)}{I_0(t)}. \quad (2)$$

从图 1 可以看出,在  $1.8 \sim 1.9 \mu\text{m}$  之间水气存在较强的吸收,但是由于考虑到激光器等器件,选择  $1.3 \mu\text{m}$  处另一个较强的吸收带内吸收峰作为湿度检测的吸收峰,本文采用  $1364.69 \text{ nm}$  气体吸收峰作为湿度检测气体吸收的依据,通过水气在  $1364.69 \text{ nm}$  处的吸收强度来检测湿度。

## 3 系统设计方案

系统结构图如图 2 所示,分布反馈式布拉格(DFB)半导体激光器(LD)能够发出线宽非常窄的激光,同时,激光的中心波长随驱动电流的大小改变而近似线性改变,因此,DFB-LD 可以实现小波长范围内的波长扫描,用它来对水的吸收峰进行扫描,则可以得出水的某一吸收峰的精细信息。驱动电路则为激光器提供一个锯齿波形的电流扫描驱动,使激光器能够波长扫描。

激光器发出的光,经过光纤耦合器进入探头,探头内部结构为气体吸收池(图 3),将光从光纤中耦合到

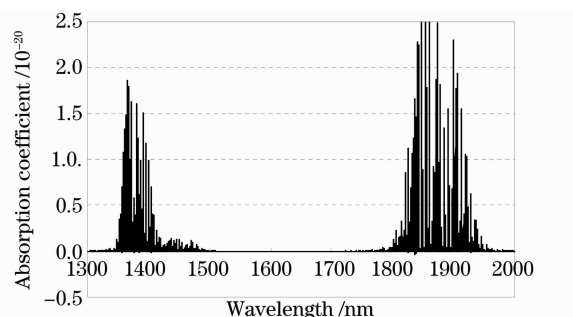


图 1 近红外水气吸收光谱图

Fig. 1  $\text{H}_2\text{O}$  absorption spectra at near infrared

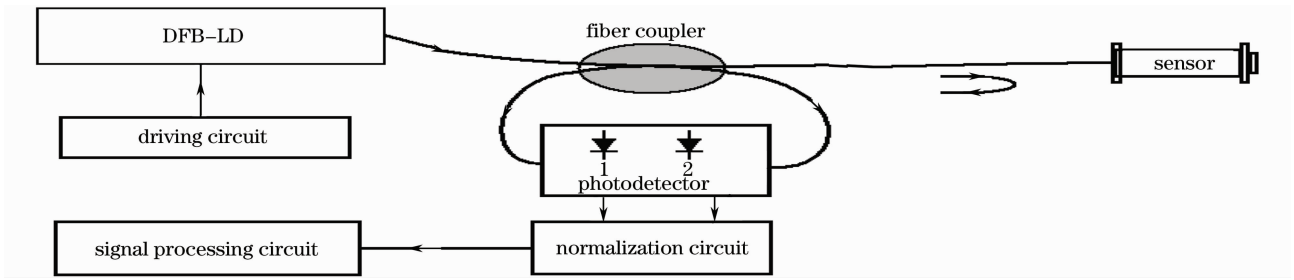


图 2 检测系统结构图

Fig. 2 Structure of detection system

空气内,被空气内的水充分吸收后再重新耦合到光纤内,原路返回。探头返回的光,携带水气吸收信息,通过耦合器进入到光电探测器转换为电信号。同时,激光器发出的光从光纤耦合器另一端出射,不含气体吸收信息,携带光源功率的波动信息,也被光电探测器接收转换为电信号。两路光电转换的电信号同步进入归一化单元,实现光源功率的波动平坦化,使得检测结果不受光功率的波动影响。信号处理部分提取水吸收信息,计算出最终的湿度信息。

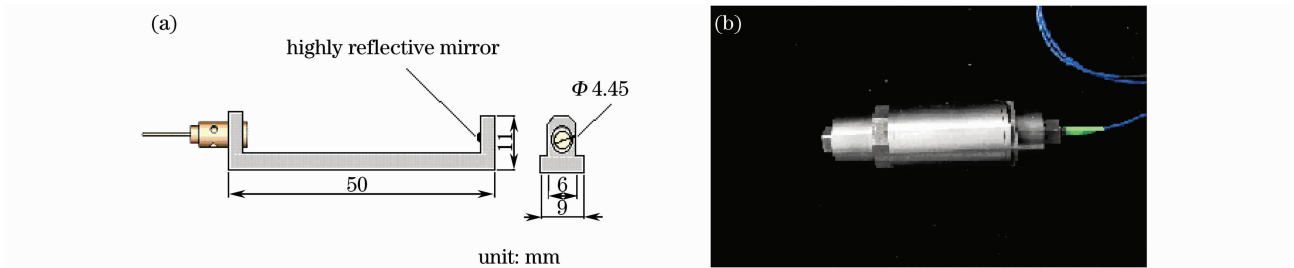


图 3 湿度传感器探头结构。(a) 内部结构图,(b) 探头实图

Fig. 3 Structure of humidity sensor. (a) internal structure image, (b) real image of sensor

### 4 实验结果

如图 4 所示,探头中分别通入不同湿度的气体,可以看出采集到的激光扫描信号因气体湿度不同而被吸收程度不同,根据对气体的不同吸收程度标定后可以反演计算出湿度值。本系统中使用锯齿波对激光器进行调制扫描,图 4 为 200 Hz 锯齿波扫描水气吸收峰时其中一个扫描周期(50 ms)的信号,因为 DFB-LD 发出激光的中心波长也与注入电流成正比,因此图中横坐标的时间也同时反映了激光中心波长的变化,图中显示 20 ms 处激光中心波长恰好对应水的最大吸收处(1364.69 nm 吸收峰)。

光纤传感器特别是功率解调原理的光纤传感器,往往会因为光路的扰动等因素造成光功率损耗扰动,从而影响检测的稳定性。本文中湿度传感器在计算浓度时,为了能够消除光路损耗对检测结果的影响,选择一个水分子吸收为零的波长处光强作为参考(图 4 相对强度为 1 的波长处),设吸收最强处信号为  $I_1$ ,参考信号为  $I_2$ ,可表示为

$$I_1 = I_0 K \exp(-\alpha LC), \tag{3}$$

$$I_2 = I_0 K \exp[-LC \cdot 0] = I_0 K, \tag{4}$$

式中  $K$  为光路损耗,往往会因为扰动以及探头污染损耗等而变化。两个信号相比得

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{I_0 K \exp[-\alpha LC]}{I_0 K} = \exp(-\alpha LC), \tag{5}$$

消除了不确定的  $K$  系数以及光源功率  $I_0$ ,从而提高了抗干扰能力。

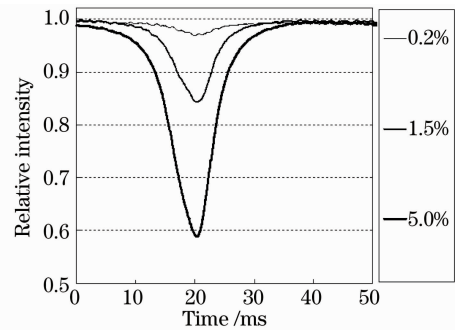


图 4 不同湿度气体得到的激光扫描信号

Fig. 4 Different scanning signals with different humidity gases

湿度检测系统完成后,首先要对其进行标定实验,得出信号与湿度存在的对应曲线关系,将该曲线关系录入软件系统作为反演湿度信息的依据。在湿度检测系统完成标定后,分别通入纯  $N_2$  以及湿度分别为 0.5%,1%,3%,6% 的气体检验,检测结果如图 5 所示。可以看出,实际测量值与标准气体实际值误差非常小,并且工作稳定。

## 5 结 论

本系统通过激光扫描法,对水在近红外吸收峰进行扫描,实现了湿度检测,充分发挥了光纤传感的技术优势:

1) 采用了全光纤结构设计,单模光纤传输损耗极小(1.3  $\mu\text{m}$  处 0.35 dB/km),因此能够实现远程检测。

2) 采用光学器件性能较之电子元器件等更加稳定,不受电磁干扰,耐腐蚀,通过合理的波长参考和归一化处理,使得该方案设计的湿度传感器长期稳定可靠,并且抗干扰能力强,不会发生漂移等现象,无需校正。

3) 本方法避免了使用对温度和其他参量敏感的器件,可以在高温高压下进行湿度检测而不产生检测误差,并且不需要供电,对检测环境扰动小,适合一些较为严格的设备环境检测。

光纤湿度检测仪,对于工农业生产,特别是化工领域具有非常大的意义,在一些对温度湿度控制要求严格的特殊领域里,能够充分发挥光纤传感的优势,极大地提高了工农业生产的效率和品质。

## 参 考 文 献

- Zhang Xiangdong, Li Yulin, Peng Wenda *et al.*. Design and realization of temperature and relative humidity sensor based on FBG[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1166~1169  
张向东,李育林,彭文达等. 光纤光栅型温湿度传感器的设计与实现[J]. 光子学报, 2003, **32**(10): 1166~1169
- Sheng Derin, Huang Xuefeng, Chen Jianhong *et al.*. Theoretical and preliminary experimental study for measuring the moisture of wet steam based on FBG[J]. *Journal of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2006, **26**(13): 113~116  
盛德仁,黄雪峰,陈坚红等. 基于布拉格光纤光栅测量湿蒸汽湿度的基础理论与前期试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, **26**(13): 113~116
- Pang Fufei, Xu Ping, Guo Hairun *et al.*. Research on fiber evanescent coupling relative humidity sensor[J]. *Optical Communication Technology*, 2008, **32**(3): 26~28  
庞拂飞,徐平,郭海润等. 光纤渐逝波耦合湿度传感器研究[J]. 光器件, 2008, **32**(3): 26~28
- Jin Xingliang, Li Wei, Sun Dahai *et al.*. Fabrication of relative humidity optical fiber sensor based on Nafion-crystal violet sensing film[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2005, **25**(8): 1328~1331  
金兴良,李伟,孙大海等. 基于 Nafion-结晶紫传感膜的光纤湿度传感器研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, **25**(8): 1328~1331
- H. Tsukioka, K. Sugawara. New apparatus for detecting transformer faults [J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1986, **21**(2): 24~35
- Lu Wanzhen, Yuan Hongfu. Modern Near Infrared Spectrum Analysis Technique[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2000: 14~20  
陆婉珍,袁洪福. 近代近红外光谱分析技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2000: 14~20
- Bai Changcheng, Zhang Haixing, Fang Hubao. Infrared Physics[M]. Beijing: Electronic and Industry Press, 1989. 179  
白长城,张海兴,方湖宝. 红外物理[M]. 北京: 电子工业出版社, 1989. 179
- Jin Wei, Liao Yanbiao, Zhang Zhipeng. Guided Waves Sensor: Principle and Technology[M]. Beijing: Science Press, 1998. 254~285  
靳伟,廖延彪,张志鹏. 导波光学传感器: 原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 254~285

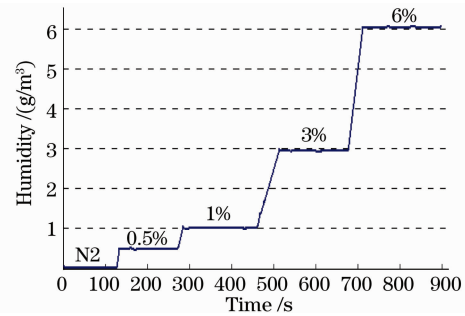


图 5 标定测试图

Fig. 5 Curves of calibration test