

基于扫描光源的光纤气体传感系统的研究

齐洁^{1,2} 董小鹏² 沈炎鑫² 郑俊达²

(¹南京航空航天大学智能材料与结构航空科技重点实验室, 江苏 南京 210016)
(²厦门大学信息科学与技术学院光波技术研究所, 福建 厦门 361005)

摘要 提出了一种基于窄带扫描光源的光纤气体传感系统。该系统能在多种气体共存环境下, 完成对不同组分气体浓度的检测。克服了传统光纤气体传感系统在多种气体共存环境下需要多台光源进行检测的弊端, 降低了工业化气体检测的成本。系统以放大自发辐射(ASE)光源为基础, 结合锯齿波(STW)驱动的可调谐法-珀(Fabry-Perot)滤波器形成窄带扫描光源。针对可调谐滤波器的电容特性会引起锯齿波驱动失真的现象, 提出了采用并联谐振回路的方案来解决锯齿波驱动失真的问题, 保障了扫描光源工作的稳定性。实验结果表明, 在乙炔和氨气混合气体的环境下, 本系统可以实现对不同组分气体浓度的同时检测, 检测结果误差较小。

关键词 光纤光学; 气体检测; 并联谐振; 扫描光源; 可调谐法-珀滤波器

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0905001

Research on Fiber Gas Sensor System Based on Scanning Light Source

Qi Jie^{1,2} Dong Xiaopeng² Shen Yanxin² Zheng Junda²

¹The Aeronautic Key Laboratory of Smart Material and Structure, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

²Institute of Light-Wave Technology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China

Abstract An optical-fiber gas sensor system based on narrowband scanning light source is proposed. It can complete the concentration detection of various gases mixed in the environment. As usual, traditional fiber gas sensor system requires multiple light sources for detection when there are several different kinds of gases. By using scanning light source, the cost of industrialization gas detection can be reduced. Using an Amplified Spontaneous Emission (ASE) source as fundamental instrument, combining tunable Fabry-Perot filter driven by saw-tooth wave (STW), narrowband scanning light is generated. As the Fabry-Perot tunable filter is a capacitive device, it can cause the linear distortion of the saw-tooth wave. Parallel resonant circuit solutions are proposed to decrease saw-tooth wave linear distortion, thus the stability of light source scanning work is guaranteed. Experimental results show that the system can detect the gas concentration of different components which are mixed with acetylene and ammonia gas. Experimental results also show low error rate.

Key words fiber optics; gas detection; parallel resonant; scanning light source; tunable Fabry-Perot filter

OCIS codes 120.0280; 230.0040; 280.1120; 280.4788; 300.1030

1 引言

光源的选择是光谱吸收型光纤气体传感系统的关键技术之一。由于气体的吸收谱线较窄, 通常采用窄带光源来提高检测的灵敏度^[1]。目前, 吸收型光纤气体传感研究广泛采用的光源有两种: 1) 发光

二极管(LED)光源为驱动的光纤气体传感系统, 采用 LED 光源, 配合与被测气体吸收谱线相对应的滤波片形成工作波长和参考波长。LED 光源工作性能稳定, 成本低, 但是在使用过程中, 针对不同种类的待测气体需要改换不同的滤波片来改变工作波

收稿日期: 2011-03-18; **收到修改稿日期**: 2011-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(61077031)与厦门大学 985 与 211 工程资助课题。

作者简介: 齐洁(1974—), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: qijie1106@sohu.com

导师简介: 董小鹏(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤技术及其在光通信与光传感领域的应用等方面的研究。

E-mail: xpd@xmu.edu.cn(通信联系人)

长^[2,3],给使用带来不便;2)分布反馈激光二极管(DFB-LD)光源。系统将波长调制技术和谐波检测系统相结合,为提高微弱信号检测的精度,采用相关检测和锁相放大器,测量精度可达 10^{-6} 数量级^[4~6]。DFB-LD光源可以单纵模运行,谱线窄,线宽可达几十千赫兹,可以通过调节激光器的驱动电流或温度使激光的工作波长精确地对准被测气体的特征吸收峰,从而获得很高的测量精度。但使用DFB-LD光源相干噪声较大,且会随时间发生变化;波长调节范围不宽(因此单一光源只能对应一种气体的测量),光源在使用中,需要温控模块,从而导致系统较复杂,控制成本较高。

本文提出了一种基于差分吸收检测原理的窄带扫描光源光纤气体传感系统。系统采用宽带放大自发辐射(ASE)光源,结合锯齿波(STW)驱动的可调谐法布里-珀罗滤波器(FFP),产生扫描光源^[7]。ASE光源具有带宽更宽、稳定性更好、功率更高、使用寿命长、易与光纤传感系统耦合等优点。产生的扫描光源与DFB-LD光源相比,相干性小,光源可连续扫过气体的多个吸收峰,从而保证在单一气体存在的环境下,能多波长定标;同时,由于光源可以实现大范围的波长调节,系统还可以在多种气体共存的环境下实现测量。

2 光纤气体传感系统的设计

2.1 气体近红外光谱差分吸收原理

光谱吸收型的气体传感器是最重要的一类光纤气体传感器。它是利用了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,反演得到气体的浓度^[1]。当一束光强为 I_0 的输入平行光通过待测气体时,如果光源光谱覆盖一个或多个气体的吸收谱,则光通过气体时发生衰减。根据Lambert-Beer定律,出射光强 $I(\lambda)$ 与入射光强 $I_0(\lambda)$ 和气体的浓度之间的关系为

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \times \exp[-\alpha(\lambda)Cl + \beta(\lambda)l + \gamma l + \delta]A(\lambda), \quad (1)$$

式中 $\alpha(\lambda)$ 为某一特定波长下气体的吸收系数; l 为吸收路径的长度; C 为气体的浓度; $\beta(\lambda)$ 为瑞利散射系数; γ 为米氏散射系数; δ 为由于气体密度发生波动产生的吸收系数; $A(\lambda)$ 为传感系统的传输函数。

直接利用(1)式求解浓度是困难的。实际系统选择两个不同波长(λ_1, λ_2)的单色光,一个对应气体的吸收波长,称之为工作波长;另一个不被气体吸收,称为参考波长。两个波长相隔很近。将波长为

λ_1 和 λ_2 的光同时或在很短时间内同时通过待测气体时,有

$$I_1(\lambda_1) = I_0(\lambda_1) \exp[-\alpha(\lambda_1)Cl + \beta(\lambda_1)l + \gamma_1 l + \delta_1]A(\lambda_1), \quad (2)$$

$$I_2(\lambda_2) = I_0(\lambda_2) \exp[-\alpha(\lambda_2)Cl + \beta(\lambda_2)l + \gamma_2 l + \delta_2]A(\lambda_2), \quad (3)$$

由于 λ_1 和 λ_2 的波长一般相差零点几个纳米,在这样小的间隔下,可以认为 λ_1 波长的光和 λ_2 波长的光同时通过待测气体,因此, $\beta_1 \approx \beta_2, \gamma_1 \approx \gamma_2, \delta_1 \approx \delta_2$ 。调节光学系统使

$$A(\lambda_1)I_0(\lambda_1) = A(\lambda_2)I_0(\lambda_2), \quad (4)$$

联立(2)~(4)式可求得

$$C = \frac{1}{[\alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2)]l} \ln \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)}, \quad (5)$$

由于波长为 λ_1 的光被气体吸收了,而波长为 λ_2 的光不被气体吸收,因此 $\frac{I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)} < 1$ 。对 $\ln \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)}$ 进行泰勒级数展开,并代入(5)式中,可得到气体的浓度为

$$C = \frac{1}{[\alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2)]l} \frac{I(\lambda_2) - I(\lambda_1)}{I(\lambda_2)}, \quad (6)$$

将波长为 λ_1 的光和波长为 λ_2 的光分别经相同的两路光电转换后成为电压输出。可得

$$C = \frac{1}{[\alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2)]l} \frac{U(\lambda_2) - U(\lambda_1)}{U(\lambda_2)}, \quad (7)$$

若已知气体的吸收系数 $\alpha(\lambda_1), \alpha(\lambda_2)$,则气体浓度就可通过对 $U(\lambda_1), U(\lambda_2)$ 的测量求出。这就是光谱差分吸收原理。

2.2 扫描光源的设计与实现

在光谱吸收型光纤气体传感系统中,光源的选择尤为重要。本文选用实验室自制的ASE光源作为传感系统的驱动光源,其输出功率为2.9 mW,图1为ASE光源的输出谱线图。由图1可知,系统选用的ASE光源光谱范围较宽,中心波长在1550 nm,能覆盖乙炔和氨气近红外波段的主要吸

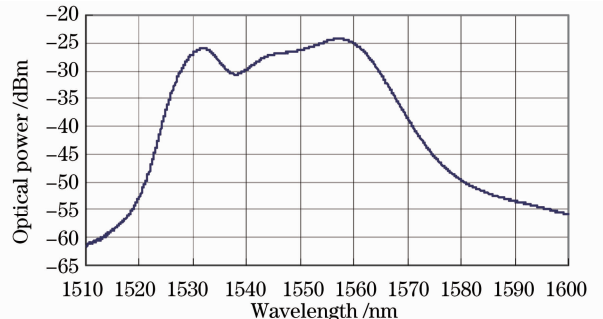


图1 实测的ASE光源输出谱线

Fig. 1 Spectrum of ASE source

收峰。同时,光纤对这一波段的光衰减很小,现有的探测器件的灵敏度又相当高,所以能获得很好的检测效果。但是,由于气体的吸收峰很窄,吸收强度小,因而直接采用 ASE 光源,相对光功率的变化小,测量精度不高。为提高检测精度,通常选用窄带光源来提高检测的灵敏度^[1]。

将 PPF 置于钕纤 ASE 光源之后,通过锯齿波驱动 PPF。利用 PPF 内的法布里-珀罗腔(F-P 腔)选频特性,产生窄带光源与被测气体吸收峰相匹配,提高测量的灵敏度^[7~13]。在外部扫描控制电压的作用下,F-P 腔内的压电陶瓷产生压缩,从而改变了 F-P 腔的长度,随之产生 F-P 腔透射波长的改变。因此,通过在 F-P 腔上施加锯齿形驱动电压,就可以获得窄带的波长扫描光源。

实验选择一只美国 Micron Optics 公司生产的可调谐 FFP(自由谱区 32.500 nm,插入损耗小于 0.5 dB,3 dB 带宽 0.094 nm)。

由于可调谐 F-P 腔的结构为压电陶瓷,具有电容负载效应,因此将可调谐 F-P 滤波器作为锯齿波的负载会引起锯齿波的线性失真,如图 2 所示。

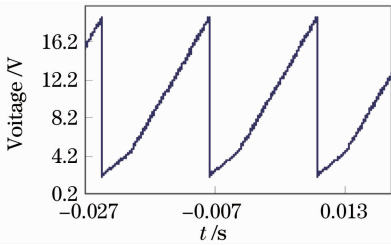


图 2 失真的锯齿波驱动信号

Fig. 1 Distortion of the saw-tooth waveform

为了保证加载在可调谐 F-P 滤波器上的锯齿波保持良好的线性度,需要对 FFP 的电容特性进行补偿。利用电感和电阻、电容构成的并联谐振回路,抵消由于 FFP 电容效应引起的输出附加极点。电

感电容并联谐振补偿回路如图 3 所示。

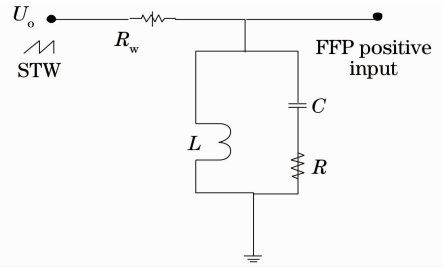


图 3 可调谐 F-P 滤波器的内部等效电路及补偿电路图

Fig. 3 Compensation and equivalent circuit of tunable F-P filter circuit

由图 3 可得,电感电容并联谐振补偿回路发生谐振的条件为

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC - R^2 C^2}} \quad (8)$$

在图 3 所示的电路设计中,通过选择合适的电感和电阻 R_w ,使电路参数满足(8)式的条件,就可以抵消由于可调谐滤波器电容效应而产生的极点,从而保证了锯齿波的线性度。经过补偿后的锯齿波如图 4 所示。

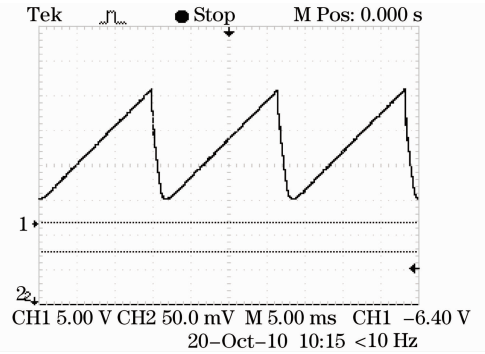


图 4 经过补偿后的锯齿波

Fig. 4 Saw-tooth with compensation

2.3 乙炔氨气光纤气体传感系统的设计

系统结构如图 5 所示。频率为 58 Hz,峰峰值在 0~15 V 连续可调的锯齿波电路驱动 F-P,通

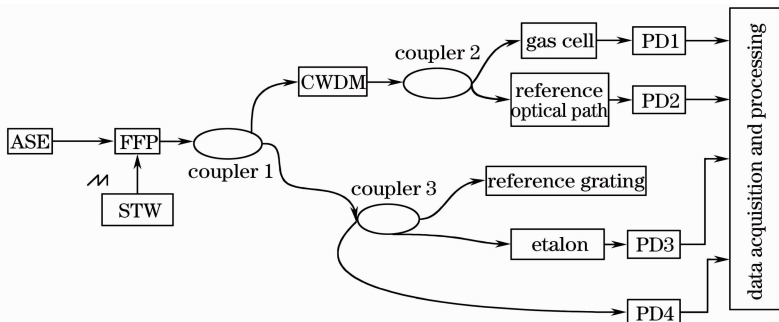


图 5 乙炔氨气光纤气体传感系统原理框图

Fig. 5 Diagram of the optical fiber acetylene and ammonia gas detection system

过调节锯齿波幅度和直流偏置电平实现的扫描光源,扫过乙炔气体在 1531~1537 nm 范围的主要吸收峰。由于 F-P 腔的工作波长和驱动电压在整个波长范围具有一定的非线性、重复性不好的特性^[14],在实验中,通过采用参考光栅和一个法-珀标准具的方法来对输出信号提供波长参考,进行光谱重建,以提取差分检测所需的参考波长和工作波长。

3 实验结果及分析

根据 Lambert-Beer 定律,气室光强的衰减与气体的浓度有关。但在实际的检测中,很多因素都会引起光强的下降。为了滤除气体信息里电路和光路中的背景噪声,提高检测的信噪比,对输出信号进行数字平均滤波和多项式数据平滑滤波^[15]。通过法-珀标准具和参考光栅可以划定波长范围,以保证每次数字平均时的起始点对齐。

3.1 单一气体实验

3.1.1 单一乙炔和氨气气体测试系统的输出

在扫描光源的驱动下,分别对单一的乙炔和氨气气体进行测试。图 6 为乙炔气体体积分数为 6.4×10^{-5} 时,实际系统的输出。图 7 为氨气体积分数为 1% 时,实际系统的输出。由图 6,7 可以看出,在扫描光源的驱动下,实际系统的输出为一段连续的光谱,包含有气体的多个特征吸收峰。因此,可以对被测气体进行多波长定标。

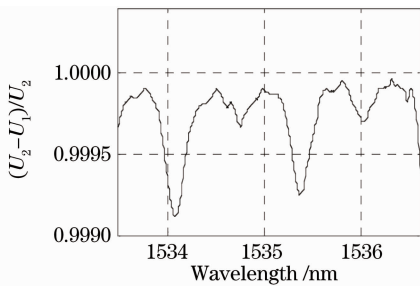


图 6 体积分数为 6.4×10^{-5} 的乙炔气体多个吸收峰谱线图

Fig. 6 Multiple absorption peaks spectrum chart of 6.4×10^{-5} (volume fraction) acetylene gas

3.1.2 单一气体的多波长定标

配置不同浓度乙炔气体的样本,读取乙炔在 1534.093 和 1535.393 nm 处吸收峰的数据 U_1 ,选择 1534.300 和 1536.600 nm 为参考波长,读取参考波长的数据 U_2 ,做归一化数据处理。图 8 为乙炔气体在 1534.099 和 1535.393 nm 波长处两个特征吸收峰下气室的输出特性曲线。

由于系统采用的是扫描光源,因此输出为一连

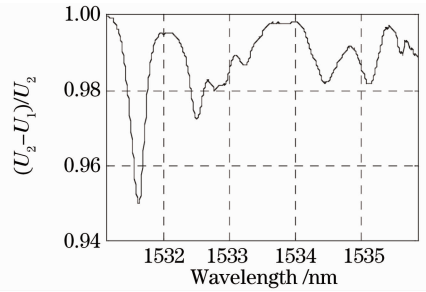


图 7 实验获得的体积分数为 1% 的氨气气体多个吸收峰谱线图

Fig. 7 Multiple absorption peaks spectrum chart of 1% (volume fraction) ammonia gas

续的光谱,测量乙炔在 1532.831 nm 波长下的输出 U_2 ,1532.500 nm 波长下的输出 U_0 ,计算单一乙炔测试时的测量误差,如表 1 所示。

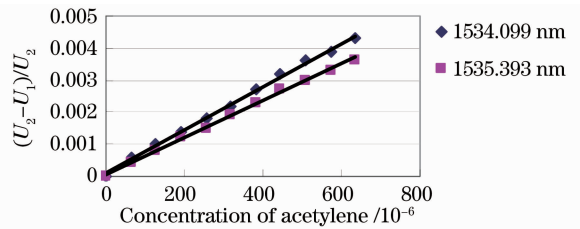


图 8 单一乙炔气体定标结果

Fig. 8 Calibration results of a single acetylene gas

表 1 单一气体测量时乙炔的测试结果

Table 1 Testing results of the acetylene gas

Injection gas /mL	Actual concentration of acetylene gas /10 ⁻⁶	Calculated concentration of acetylene gas /10 ⁻⁶	Measurement error /%
0.80	509	513	0.74
1.00	636	651	2.23
1.20	764	788	1.59
1.40	891	913	2.51
1.60	1018	1038	1.92
1.80	1145	1175	2.61
2.00	1273	1288	1.17

图 9 为氨气气体在 1531.700 和 1532.500 nm 波长处两个特征吸收峰下气室的输出特性曲线。

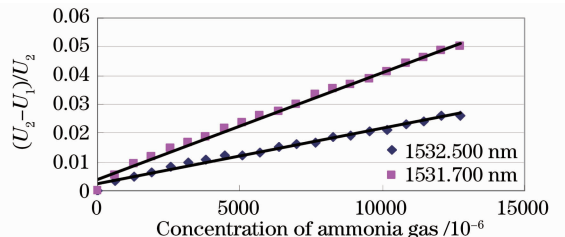


图 9 单一氨气气体定标结果

Fig. 9 Calibration results of a single ammonia gas

测量氨气在 1531.700 nm 波长下的输出 U_2 ，1531.300 nm 波长下的输出 U_1 ，计算单一氨气测试时的测量误差，如表 2 所示。

表 2 单一气体测量时氨气的测量结果

Table 2 Testing results of the ammonia gas

Injection volume of ammonia gas /mL	Actual concentration of ammonia gas /10 ⁻⁶	Calculated concentration of ammonia gas /10 ⁻⁶	Measurement error /%
4.00	2546	2601	2.18
5.00	3182	3125	-1.76
6.00	3818	3875	1.51
7.00	4455	4626	2.73
8.00	5091	5102	0.21
9.00	5727	5675	-0.92
10.00	6364	6294	-1.11

由表 1,2 可以看出，在单一乙炔气体测量时，测量误差最大为 2.61%，单一氨气测量时测量误差最大为 2.73%。测量误差较小。

3.2 乙炔氨气混合环境下的测试结果

根据 HITRAN 数据库可知，乙炔气体在 1532.831 nm 附近有特征吸收，氨气在 1532.500 nm 附近有特征吸收峰。两种气体在此波段的特征吸收峰距离 0.331 nm，可调谐法-珀滤波器透射峰的半峰全宽为 0.094 nm，即产生的扫描光源的线宽度为 0.094 nm。在常温常压的测量中，乙炔和氨气的吸收峰会有一定程度的混叠，但不会完全叠加在一起而难以分辨。由于气体的吸收谱线为洛伦兹线形，利用 Origin 软件中的多线洛伦兹线拟合，将这两条混叠的吸收峰分开。实现在常温下两种气体的同时测量。如图 10 所示。

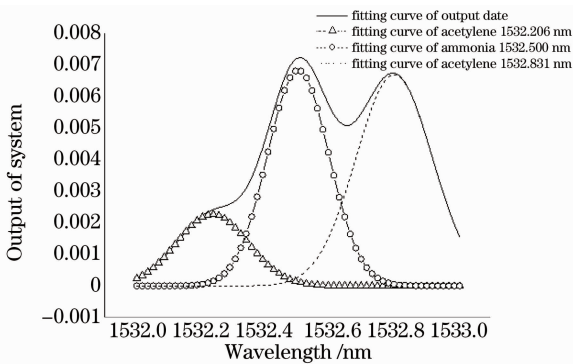


图 10 氨气乙炔吸收峰的混叠和 Origin 下的洛伦兹拟合示意图

Fig. 10 Aliasing of absorption peaks when mixing ammonia gas with acetylene gas and Lorentz fitting schemes in Origin system

用干净的氮气吹洗气室，将氮气注入气室中，然后依次加入 4~10 mL 的高纯氨气（纯度为 99.99%），并同时注入 0.80~2.00 mL 的高纯乙炔（纯度为 99.80%）。数据处理结果如表 3,4 所示。 U_2 为系统在 1532.000 nm 的测量值， U_1 为系统在 1532.500 nm 的测量值， U_0 为系统在 1532.831 nm 的测量值。测量结果均进行了 35 次算术平均滤波、Savitzky-Golay 平滑滤波和背景噪声的去除。

表 3,4 为混合气体环境下乙炔气体和氨气气体浓度的测试结果与实际浓度的对比结果。

表 3 混合气体测量时乙炔的测试结果

Table 3 Testing results of acetylene of gas mixtrues

Injection volume of acetylene gas /mL	Actual concentration of acetylene gas /10 ⁻⁶	Calculated concentration of acetylene gas /10 ⁻⁶	Measurement error /%
0.80	509	531	-4.38
1.00	636	685	-7.58
1.20	764	755	1.13
1.40	891	825	7.40
1.60	1018	1011	0.67
1.80	1145	1069	6.62
2.00	1273	1202	5.57

表 4 混合气体测量时氨气的测量结果

Table 4 Testing results of ammonia of gas mixtrues

Injection volume of ammonia gas /mL	Actual concentration of ammonia gas /10 ⁻⁶	Calculated concentration of ammonia gas /10 ⁻⁶	Measurement error /%
4.00	2546	2619	-2.90
5.00	3182	3094	2.76
6.00	3818	4019	-5.25
7.00	4455	4402	1.18
8.00	5091	5185	-1.85
9.00	5727	5727	0.01
10.00	6364	6411	-0.75

由表 3,4 中可以看出，在混合气体的环境下，可以通过分析输出光谱，将乙炔和氨气的浓度分别测量出来。测量所得到的乙炔气体浓度和实际浓度的误差最大为 7.58%，测量所得到的氨气气体的浓度和实际浓度的误差最大为 5.25%。

3.3 结果分析

分析误差结果发现，在两种气体混合环境下，测量的误差比单一气体测量时大。引起误差较大的原因有以下几个方面：

1) 在 Origin 环境下做洛伦兹曲线拟合时，由于两种气体的吸收峰出现了一定的混叠，造成混合气

体环境下的吸收谱线与单一气体的吸收谱线相比,发生一定的变化。因此用洛伦兹曲线拟合会带来一定的误差。

2) 在扫描光源的波长范围内,乙炔和氨气气体的特征吸收峰靠得比较近,因此测量过程中两种气体存在着一定的交叉敏感。

3) 乙炔和氨气的浓度由实验室配置,浓度的理论值由计算得出,理论值本身存在一定的误差。

在两种气体测量时,吸收谱线出现了一定的混叠。数据处理中虽然做了一定的数据补偿,但效果不太理想,带来了较大的测量误差。乙炔在1540.000 nm之后几乎没有吸收,而氨气在1544.000 nm附近还有吸收。因此,如果换用波长范围在1525~1545 nm的粗波分复用(CWDM),就可以测量到氨气在1544.000 nm的吸收峰。利用 HITRAN 数据库中氨气在1544.000和1532.500 nm的吸收系数,就可以推出氨气在1532.500 nm的吸收峰电压,利用这一结果对输出数据做进一步的修正,则由交叉敏感引起的误差可以进一步降低。

由于实验条件限制,系统使用的 CWDM 在1540.000 nm就截止了,因此本文没有对输出数据做进一步的修正,仅对数据处理做了原理性的探讨。对于因光谱混叠引起的数据修正将在后续工作中体现。

通过乙炔和氨气的测量实验表明,采用本气体检测系统可将混合气体中不同成分气体的浓度检测出来。证明了采用本系统进行多种气体测试方案的可行性。

4 结 论

搭建了基于扫描光源的光纤气体传感系统,并以乙炔气体和氨气为目标气体进行了测试实验。针对单一气体检测,本系统可以实现被测气体的多波长定标,系统在多个波长下均具有良好的线性度输出;在两种气体混合环境下,可以完成对不同组分气体的浓度检测。实验结果表明,本系统可以应用于多种气体共存的环境下的检测。

参 考 文 献

- 1 Wang Yanjiu. Study of Optical Fiber Sensing Technique for Harmful Gas Based on Spectrum Absorption[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2007. 41~43
王艳菊. 基于光谱吸收的光纤式有害气体测量技术的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2007. 41~43
- 2 Ye Xianfeng, Tang Weizhong. Research on CH₄ optical fiber gas sensor [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2000, **21**(3): 218~220

- 叶险峰, 汤伟中. CH₄ 气体光纤传感器的研究[J]. *半导体光电*, 2000, **21**(3): 218~220
- 3 Wang Yiding, Zhong Hongjie, Jin Qinhan *et al.*. Infrared CH₄ monitor [J]. *Acta Scientiarum Naturalium University is Jilinensis*, 2001, (4): 69~71
王一丁, 钟宏杰, 金钦汉 等. 红外 CH₄ 检测仪[J]. *吉林大学学报(理学版)*, 2001, (4): 69~71
- 4 Wang Huaxiang, Cao Zhang. Optimization of low pass filter design in lock-in amplifier[J]. *Instrument*, 2005, **26**(7): 684~688
王化祥, 曹章. 基于锁相放大器的低通滤波环节优化设计[J]. *仪器仪表学报*, 2005, **26**(7): 684~688
- 5 Lin Ling, Wang Xiaolin, Li Gang *et al.*. A new type of lock-in amplifier detecting circuit [J]. *Journal of Tianjin University*, 2005, **38**(1): 65~69
林凌, 王小林, 李刚 等. 一种新型锁相放大器检测电路[J]. *天津大学学报*, 2005, **38**(1): 65~69
- 6 Li Yong. Design and Realization of Methane Concentration Detecting System Based on Tunable Diode Laser [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008. 16~20
李勇. 可调谐激光瓦斯浓度检测系统的设计与实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008. 16~20
- 7 Zhao Lei, Wang Honghai, Yu Xin *et al.*. Research on CH₄ and CO integral measurement based on fiber optic sensing technology [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2009, **31**(17): 4~6
赵磊, 王洪海, 余鑫 等. CH₄ 和 CO 一体化光纤传感检测技术的研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2009, **31**(17): 4~6
- 8 Liu Jin, Yang Haima, Zhang Jing *et al.*. Fiber optic multi-point gas sensor for acetylene based on frequency modulation harmonic detection technique [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2008, (6): 4~6
刘瑾, 杨海马, 张菁 等. 基于谐波检测技术的多点光纤乙炔气体传感器[J]. *仪表技术与传感器*, 2008, (6): 4~6
- 9 Wang Xiaona, Wang Qi, Chen Lehua *et al.*. Swept fiber laser based fiber optic sensor demodulator [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 82~85
王晓娜, 王琦, 陈乐华 等. 基于扫描光纤激光器的光纤传感解调研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1): 82~85
- 10 Wang Lixin, Liu Zhu, Xu Dan. Study on fiber optic gas sensor based on tunable Fabry-Perot cavity [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, **26**(6): 63~64
王立新, 刘柱, 徐丹. 基于可调 F-P 腔的光纤气体传感器研究[J]. *传感器与微系统*, 2007, **26**(6): 63~64
- 11 Wang Yutian, Guo Zengjun, Wang Litian. Study on Fabry-Perot CH₄ optical fiber sensor with LED [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2002, **23**(4): 307~310
王玉田, 郭增军, 王莉田. 用 LED 作光源的 Fabry-Perot 光纤甲烷气体传感器的研究[J]. *计量学报*, 2002, **23**(4): 307~310
- 12 Liu Jin, Yang Haima. Study on optical fiber multi-gas sensor based on spectral absorption [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2006, (2): 29~32
刘瑾, 杨海马. 光谱吸收型光纤多气体传感系统[J]. *仪器仪表与传感器*, 2006, (2): 29~32
- 13 Zhao Bing, Zhang Zhili, Zhong Qiyuan *et al.*. Research and application of FP and MZ fiber Bragg grating demodulation technique [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(10): 1314~1316
赵兵, 张志利, 仲启媛 等. 基于 FP 和 MZ 法的光纤光栅传感解调技术研究[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(10): 1314~1316
- 14 Zhou Jinlong. Investigation on the Novel Technology of the Fiber Bragg Gratings and Applications in Optical Fiber Communications [D]. Xiamen: Xiamen University, 2008. 27~29
周金龙. 新型光纤光栅技术及其在光通信与光纤传感方面的应用[D]. 厦门: 厦门大学, 2008. 27~29
- 15 Gao Jinzhan. Detection of Weak Signals [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. 229~231
高晋占. 微弱信号检测 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 229~231