

连续波激光衰荡痕量气体浓度测量系统的研究

李志全, 王会波, 田秀仙
(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:介绍了一种新型的基于连续波激光光腔循环衰荡多组分气体浓度测量系统,并对设计过程中各主要器件的原理和作用进行了分析与研究。得出了七种特定峰值波长的光分别在对应浓度为 $100\text{cm}^3/\text{m}^3$ 的七种气体中的衰荡时间,比较了不同浓度的同种气体对光的吸收特性,研究了光的衰荡时间、环路损耗与气体对光的吸收系数和气体浓度的关系,提出了一种气体浓度在线测量的新方法。

关键词:循环衰荡;增益可调掺铒光纤放大器;可调光衰减器;衰荡时间;吸收系数;气体浓度
中图分类号:TN253 **文献标识码:**A

Research on the Trace Gas Concentration Measurement System Based on CW Laser Ring-down Method

LI Zhi-quan, WANG Hui-bo, TIAN Xiu-xian
(Institute of Electric Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In this paper, the new CW laser gas concentration measurement system based on the cavity ring-down method was introduced, and the analysis to the principles and functions of the main devices were done during the designing progress. Then, the ring-down times of seven certain light in seven corresponding gases (with the same concentration of $100\text{cm}^3/\text{m}^3$) were obtained, and the gas absorption characteristics in different concentrations were given. Also, the ring-down time-gas absorption coefficient-gas concentration relation and the loop loss-gas absorption coefficient-gas concentration relation were analyzed, all of which proposed a new method for the gas concentration in-situ measurement.

Key words: ring-down; variable erbium doped fiber amplifier; variable optical attenuator; ring-down time; absorption coefficient; gas concentration

1 引言

痕量气体浓度测量是一项重大的科学研究课题,这是因为这种气体浓度虽然很低,但和人类健康、环境保护及超精密加工息息相关。到目前为止,已报道的用于现场气体组分和浓度测量的方法主要有催化烧结式、电化学气相色谱式、半导体吸收式、热导传感式、激光吸收式和光纤传感式等。这些方法在不同程度上完成了气体浓度的监测任务。但是在一些特殊场合,尤其是要求测量精度较高的场合,这些方法就不能满足要求了^[1-7]。

文中提出了一种基于连续波激光光腔循环衰荡

多组分痕量气体浓度测量新方法,并设计了测量系统。利用此系统可以实现高精度气体浓度在线测量和组分识别。

2 气体浓度在线测量原理及系统设计

2.1 测量原理

图1所示的系统中,由连续波激光发生器发出波长包含某种气体吸收谱的平行激光束,该激光束

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60377002);河北省博士基金项目(B37)资助。

作者简介:李志全(1954-),男,博士生导师,主要从事非线性光电检测,光纤及光学传感器的研究。

收稿日期:2008-03-30; **修订日期:**2008-07-06

经掺铒光纤放大器放大和可调衰减器调节后,通过多路光开关对气室的选择作用使光进入相应的 FBG 滤波,经滤波后的光分为两路,一路进入微腔气室,另一路由光探测器接收送入 PC 机处理。经微腔气室中的待测气体吸收的光也分为两路,一路由光探测器接收送入 PC 机处理,另一路经光隔离器继续在光纤回路中循环,当光探测器探测到光的幅值为 $1/e$ 时,微机根据衰荡时间即给出了这种气体的浓度。环路中应用光隔离器是为了消除或抑制光纤信道中产生的反向光,这类反向光的存在导致光路系统间产生自耦合效应和系统的反射噪声,使掺铒光纤放大器增益发生变化和产生自激励,造成整个系统无法正常工作。

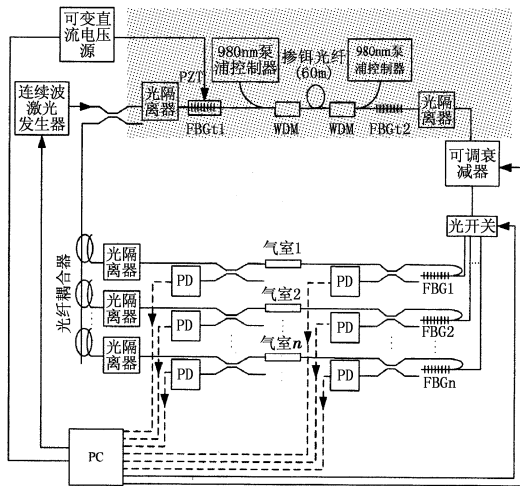


图 1 气体浓度在线测量系统的结构框图

当光束经过气室时,由于该气体对光的吸收作用,使得输出光产生衰减,光强与气室及该气体的浓度的关系为^[2]:

$$\frac{I_o}{I_i} = e^{-\alpha Cl} \tag{1}$$

式中, I_o 为气室输出光强度; I_i 为气室输入光强度; α 为某种气体对输入某峰值波长的光的吸收系数 ($\alpha = S_0 g(\lambda - \lambda_0)$); S_0 表示分子在吸收峰 λ_0 处的吸收线强; $g(\lambda - \lambda_0)$ 为分子在波长 λ 处的吸收线形函数,与温度和压力有关^[3]; C 为气室中被测气体的浓度; l 为光在气室中的光程。

因为 $\alpha Cl \ll 1$, 所以 $e^{-\alpha Cl} \approx 1 - \alpha Cl$ 在任何情况下都成立。从式(1)可以看出被测气体的浓度与光强的改变量 $\Delta I = (I_o - I_i)$ 有关。气体的最小检测浓度为^[4]:

$$C_{\min} \approx \frac{[\Delta I / I_o]_{\min}}{[\alpha l]_{\max}} \tag{2}$$

从式(1)和式(2)可以看出,提高测量的灵敏度,可采取的方法有:

- (1) 增加气室的有效长度,即增大光在气室中的光程 l ;
- (2) 使用连续波激光光源,以确保气体对光的有效吸收系数最大;
- (3) 选择灵敏度高的光电探测器,以得到高的探测灵敏度。

光在光纤环腔中循环一周,根据光纤环腔衰荡时间和光纤环净损耗间的关系,由 $I_o / I_i = e^{-\sigma}$, 其中 $\sigma = \alpha Cl$, 可得输出光的振幅衰减,即光纤环净损耗为:

$$\Gamma = 10 \lg \frac{I_o}{I_i} = 10 \lg e^{-\sigma} = 4.34 \sigma \tag{3}$$

设一束光在环路中第 1 次、第 2 次、第 3 次、第 4 次, ..., 第 m 次 ($m = 1, 2, 3, 4, \dots$) 从气室出来时的光强分别为 $I_{o1}, I_{o2}, I_{o3}, I_{o4}, \dots, I_{om}$, 则有:

$$\frac{I_{o1}}{I_i} e^{-\sigma}, \frac{I_{o2}}{I_{o1}} e^{-\sigma}, \frac{I_{o3}}{I_{o2}} e^{-\sigma}, \frac{I_{o4}}{I_{o3}} e^{-\sigma}, \dots, \frac{I_{om}}{I_{o,m-1}} e^{-\sigma} \tag{4}$$

由此可得:

$$\frac{I_{o1}}{I_i} \cdot \frac{I_{o2}}{I_{o1}} \cdot \frac{I_{o3}}{I_{o2}} \cdot \frac{I_{o4}}{I_{o3}} \dots \frac{I_{om}}{I_{o,m-1}} = e^{-\sigma} \cdot e^{-\sigma} \cdot e^{-\sigma} \cdot e^{-\sigma} \dots e^{-\sigma} = e^{-m\sigma} \tag{5}$$

即循环 m 周时,输入输出光的衰减关系为:

$$\frac{I_o}{I_i} = \frac{I_{om}}{I_i} = e^{-m\sigma} \tag{6}$$

所需的时间为:

$$t = m\tau \tag{7}$$

式中, τ 为光的循环周期。定义输出的光衰减到 $1/e$ 的时间 t_r 为光纤环腔衰荡时间,则有^[5]:

$$t_r = \frac{\tau}{\sigma} = \frac{\tau}{\alpha Cl} = \frac{4.34}{\Gamma} \tau \tag{8}$$

因此:

$$\frac{I_o}{I_i} = e^{-\frac{m\sigma}{\sigma}} = e^{-\frac{t}{t_r}} \tag{9}$$

由光纤环腔衰荡时间可以得到被测气体的浓度。在光纤环腔中,光纤环净损耗为^[5]:

$\Gamma =$ 光纤损耗 + 元器件插入损耗 + 耦合损耗 + 气室吸收损耗 + 可调衰减器损耗 - 掺铒光纤放大器增益

光纤环腔衰荡时间大小可以通过调节光纤环路中的增益或可调衰减器来改变,采用这种光腔衰荡法,光源功率的波动不影响光纤环腔衰荡时间,因此系统中掺铒光纤放大器的增益稳定性是十分重要的。

而气体的组分识别就是基于以上原理来实现

的。当被测气体为未知的纯气体或混合气体时,由于气体对其峰值吸收线内的光的吸收作用,当光经过气室时将产生衰减,由此即可断定气体成分,实现组分识别。

一般的有毒有害、易燃易爆气体在近红外的吸收系数非常微弱,典型气体对近红外光的吸收谱峰值波长和吸收系数如表1所示。

表1 典型有毒有害、易燃易爆气体的吸收系数^[4,6]

气体种类	吸收波长 λ/nm	吸收谱线强度 $S/\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1} \times 10^{-2}$	吸收系数 $\alpha/\text{cm}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$
CO ₂	1572.66	0.048	~0.0017
CO	1567	0.0575	~0.002
H ₂ S	1578	0.325	~0.012
HI	1541	0.775	~0.028
NH ₃	1544	0.925	~0.0335
CH ₄	1665	6.9	~0.25
C ₂ H ₂	1532.83	~20	~0.725

2.2 系统设计

光纤环路光腔循环衰荡多组分气体浓度在线测量系统的结构如图1所示,以下将阐述各主要器件的工作原理及作用。

(1) 连续波激光发生器

在本文的气体浓度测量中使用的是连续波激光发生器。因为它既能发出波长包含所测气体吸收谱的平行激光束,又能使外界环境的变化对光的影响尽可能的小。这与可调谐脉冲激光发生器相比大大提高了气体浓度的测量精度。

(2) 增益可调掺铒光纤放大器

图1中的阴影部分是增益可调掺铒光纤放大器(VEVFA)的结构原理图,它采用的是双向泵浦,以保证系统的噪声性能较优,而输出功率又较大。在VEVFA的前后两端各接一个光纤光栅(FBGt1, FBGt2),其中,FBGt1为中心波长可调的光纤光栅。FBG的Bragg波长的改变是通过PZT电致伸缩效应来实现的。PZT的驱动直流电压由PC机按程序驱动可变直流电压源给定,FBGt1粘贴在涂有隔热层的PZT上,这样PZT的伸缩导致了FBG栅距 Λ 的增大或缩小,实现其Bragg波长改变^[8-9]。

(3) 可调光衰减器

系统设计中,希望输出信号的衰荡时间是气体吸收强度(反映气体浓度)的单值函数,但实际系统中存在光纤损耗、插入元件损耗、环境温度、压力变化以及光电噪声引起的损耗。这就需要调节VEVFA的增益和可调光衰减器(VOA)的衰减,使整个系统处于平衡状态。本系统利用可调衰减器还可以

实现气体的吸收谱在微小范围内平移,避免被测气体吸收谱线的重叠,确保了气体浓度测量的可靠性和单值性。可调光衰减器的结构如图2所示^[10-11]。

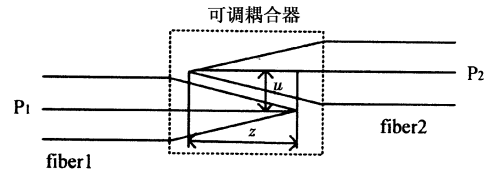


图2 可调光衰减器示意图

(4) 气室的设计

在采用连续光源时,对模式的匹配存在严格要求,对于大多数的系统,腔的模式间距约为150MHz,相对于连续波激光发生器的宽度而言很宽,在这种情况下,通过在一个腔体镜面上加一个PZT来消除光源波长的空腔共振,即可达到目的。对于单一光纤环,不需要这样复杂的结构,因为长约20~200m的光纤环路可以提供空腔谐振模约(1~10)MHz的间距。系统的光学微腔气室如图3所示。在此,利用硅橡胶和镀膜以及气室的尘埃过滤技术解决光纤光栅和微腔气室的环境温度敏感及环境粉尘污染问题。气室主要由两个准直透镜组合而成,距离为5cm,固定在铝制的圆柱上,准直透镜的作用是为了保证光传输过程中具有良好的平行性,在金属铝外套上垂直开两个孔,以保证所测气体浓度为在线测量的气体浓度。此时,气室约有3dB的插入损耗,此损耗可以通过调整光学腔的设计而减小^[2-6]。

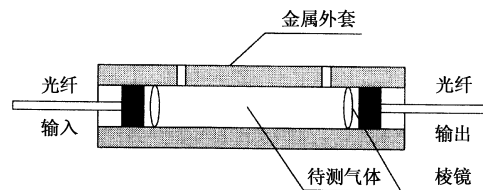


图3 光学微腔气室结构图

3 气体浓度在线测量的分析与研究

3.1 相同浓度不同气体对光的吸收特性分析

假设环路的长度为60m,七个气室的有效光程均为5cm,对应标号1~7的七种气体分别为CO₂, CO, H₂S, HI, NH₃, CH₄和C₂H₂,它们的浓度均为100cm³/m³,近红外光在这七种气体中的吸收谱峰值波长和吸收系数如表1所示,气体的最大吸收系数 α_{\max} 与吸收谱线强度 S 和半线宽 γ 的关系为: $\alpha_{\max} = S/\pi\gamma$ 。由公式 $\Gamma = 4.34\sigma = 4.34\alpha Cl$ 可知:不同波长的光在对应气室的环路中循环一周的净损耗是不同的。从图4的七种气体随时间变化对吸收谱内峰值波长光的吸收程度关系曲线(右上角的小图为0~0.35ms范围内局部图的放大)可以看出:对于

同一气体,气室输出的光强随时间是呈指数衰减的;对于不同的气体,气体对其吸收谱峰值波长的光的吸收系数越大,光的衰减趋势也就剧烈。光的衰荡时间分别为 2.600ms, 2.2100ms, 0.3683ms, 0.1579ms, 0.1319ms, 0.0177ms, 0.0061ms。气体的浓度为光的衰荡时间的单变量函数,而本系统的设计原则就是由光在气室中经过时是否产生衰减来判断气体的组分,若气体存在,再由光探测器探测光强衰减到 1/e 时所需衰荡时间,从而得到被测气体的浓度。

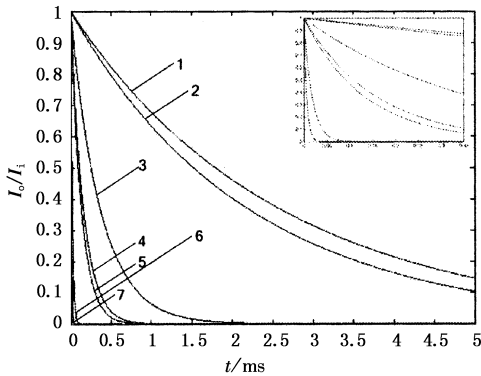
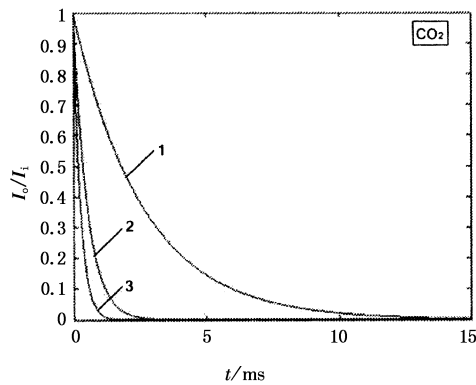


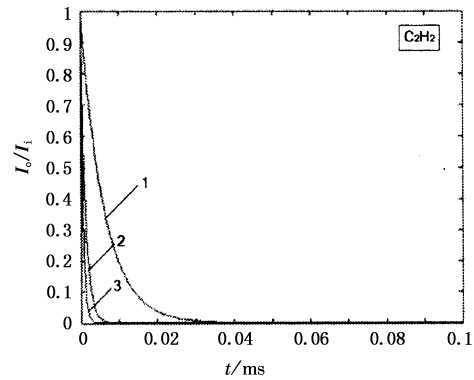
图4 七种气体随时间变化对吸收谱内峰值波长光的吸收特性曲线

3.2 不同浓度的同种气体对光的吸收特性分析

图5中的两个分图分别为 CO₂ 和 C₂H₂ 两种气



(a) CO₂



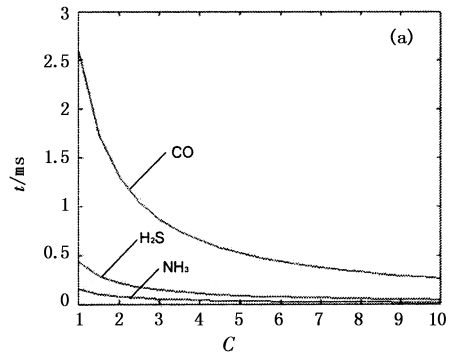
(b) C₂H₂

图5 不同浓度的同种气体随时间变化对光的吸收特性曲线

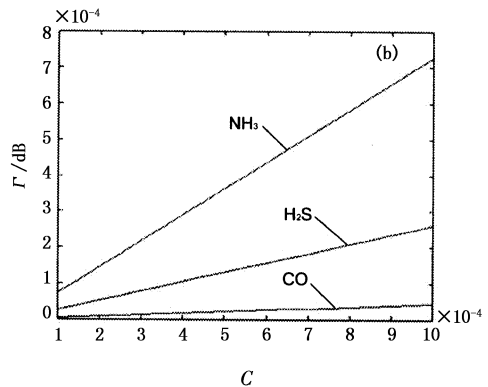
体随时间变化对 1572.66nm 和 1532.83nm 的光的吸收程度关系曲线,任一图中的标号 1~3 分别对应的气体浓度为 100cm³/m³, 500cm³/m³ 和 1000cm³/m³。气体浓度越大对光的吸收能力也就越强,光在环路中循环衰减时前几个周期内,气体单位时间内对光的吸收能力很强,而后,随着光强的不断衰减,气体的吸收能力也逐渐衰退。

3.3 光的衰荡时间及在环路中的损耗与气体对光的吸收系数和气体浓度的关系

由于 1544nm, 1578nm 和 1567nm 的光分别在 NH₃, H₂S 和 CO 三种气体中的吸收系数有关系式: $\alpha_{NH_3} > \alpha_{H_2S} > \alpha_{CO}$,所以在 NH₃, H₂S 和 CO 三种气体浓度相同的情况下,它们对光的衰荡时间是逐渐增大的;在三种光的衰荡时间相同的条件下,光的吸收系数大的则对应气体的浓度必然是小的。这三种光在环路中的损耗与对应气体的浓度是呈线性变化的;浓度相同的气体吸收系数越大,环路的损耗就越大,如图6所示。



(a) 衰荡时间与气体对光的吸收系数和气体浓度的关系



(b) 环路损耗与气体对光的吸收系数和气体浓度的关系

图6 衰荡时间、环路损耗与气体对光的吸收系数和气体浓度的关系

4 结论

本文设计的系统主要包括连续波激光发生器、光隔离器、掺铒光纤放大器、可调光衰减器、光开关、滤波器、气室、探测器和耦合器等器件,对系统中的

关键器件进行了阐述和分析。通过研究得出了七种特定峰值波长的光分别在对应的浓度为 $100\text{cm}^3/\text{m}^3$ 的七种气体中的衰荡时间,比较了不同浓度的同种气体对光的吸收特性,研究了光的衰荡时间、光的环路损耗与气体对光的吸收系数和气体浓度的关系,实验证明效果理想。

参考文献:

- [1] 潘炜,张晓霞,罗斌,等.一种梯形干涉链可调谐光滤波器的设计与研究[J].光学精密工程,2005,13(6):627-632.
- [2] 阚瑞峰,刘文清,张玉钧,等.可调谐二极管激光吸收光谱法监测大气痕量气体中的浓度标定方法研究[J].光谱学与光谱分析,2006,26(3):392-395.
- [3] 方曦,张玉钧,刘文清,等.近红外激光吸收光谱测量火焰中 CO_2 气体浓度[J].大气与环境光学学报,2007,2(1):64-67.
- [4] G Stewart, G Whitenett, B Culshaw, et al. Design of fiber laser and sensor systems for gas spectroscopy in the near-IR[J]. Proceedings of SPIE, 2004 (5272):172-180.
- [5] Gillian Whitenett, George Stewart, Kathryn Atherton, et al. Optical fibre instrumentation for environmental monitoring applications [J]. J. opt. A: Pure Appl. Opt., 2004 (5):140-145.
- [6] Gillian Whitenett, George Stewart, Hongbo Yu, et al. Investigation of a tuneable mode-locked fiber laser for application to multipoint gas spectroscopy [J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, (3):813-818.
- [7] 杨先辉,张秋华,于永森,等.可调谐 F-P 腔进行锥形光栅反射带宽解调的应力测量方法[J].光学精密工程,2007,15(5):651-654.
- [8] 蒙红云,高伟清,董新永,等.基于光纤布喇格光栅调谐的增益控制掺铒光纤放大器[J].南开大学学报(自然科学版),2003,36(2):47-50.
- [9] 李宏,陈海涓,杨祥林.沿传输方向掺杂浓度渐变掺铒光纤放大器的研究[J].光子学报,1997,26(2):110-114.
- [10] 薛春荣,汪洁,吴文娟.光纤型光可变衰减器的探索[J].激光与红外,2005,35(4):265-268.
- [11] 袁野,邹勇卓,鲍俊峰,等.一种新型微机电系统可调光衰减器[J].光学学报,2004,24(3):364-368.