

·测试、试验与仿真·

## 消光棱镜气室气体检测特性分析

姚伟超, 魏明生, 张超金, 戴新宇

(江苏师范大学 物理与电子工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:**在消光法气体浓度检测中,使用了两个相同的直角棱镜增大透射光束在气体中的光程,利用其对光束的全反射特性提高了气室的检测灵敏度;使用凸透镜对旁轴光束聚焦,解决了二次测量中输出光束平移问题;给出了旁轴光束条件下光束的传输特性方程及灵敏度的定性表达,并对灵敏度进行了仿真分析;使用单波长测量法对气体浓度进行了计算,并分析了系统误差。

**关键词:**棱镜气室;全反射;消光法;气体检测

中图分类号:O439; TN247

文献标识码:A

文章编号:1673-1255-(2012)02-0062-04

## Analysis of Gas Measurement Characteristics of Prism Gas Cell by Light Extinction Method

YAO Wei-chao, WEI Ming-sheng, ZHANG Chao-jin, DAI Xin-yu

(College of Physics & Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In the measurement of gas concentration by means of the light extinction, two identical rectangular prisms are used to increase the optical path of transmitted light in the gas and the detection sensitivity of the gas cell is improved by making use of total internal reflection of prisms. Focusing of the paraxial light beam by means of convex lens solves the problem that output beam moves in the second measurement. Transmission equation of probing light beam and the sensitivity of the system are proposed in the condition of the paraxial light beam, and simulation analysis is made for the sensitivity. Based on the measurement method of single wavelength, the gas concentration and system error are calculated and analyzed respectively.

**Key words:** prism gas cell; total internal reflection(TIR); light extinction method; gas measurement

现代工业生产中排放的气体和尘埃混合在大气中,形成的气溶胶无论是对环境还是对人体都产生了极大危害。对气溶胶的检测通常所用的方法有气固两相流成像法<sup>[1]</sup>、动态光散射法<sup>[2]</sup>、超生波测量法<sup>[2]</sup>、消光法、棱镜模型多次折射法<sup>[3]</sup>等。相比于成像测量法,光散射法由于技术成熟、易于实现光电转换和在线测量而成为主导测量法,但穿透强度低限制了其在高浓度测量时的应用;消光法由于接收到的是透射光,具有较高的强度,在在线测量中应用越来越多<sup>[2]</sup>。消光法采用的气室结构通常有 Herriott 型、White 型和渐变折射率透镜型气室<sup>[4]</sup>。相比于这三种

气室结构,由两块相同的直角棱镜构成的全反射棱镜气室由于调节简便、灵敏度较高而得到越来越多的应用。文中以这种气室为基础讨论了旁轴光束条件下光束的传输特性及检测灵敏度,给出了具体的表达式,并对文献[5]的算法进行了简化,对文献[6]在浓度测量上进行了推广。

### 1 棱镜气室气体浓度测量原理

一种物质总是对某一波长范围内的光呈透明状,而对另一些范围内的光却是不透明的,物质对光具有选择吸收作用<sup>[7]</sup>。对于弱吸收介质,朗伯定律指

出,平行单色光入射到含有消光颗粒群的介质时,由于颗粒对光的散射和吸收,强度为 $I_0$ 的光在通过厚度为 $d$ 的吸收层后的光强公式<sup>[5,7]</sup>为

$$I = I_0 \exp(-\alpha_\lambda d) \quad (1)$$

其中, $\alpha_\lambda$ 为吸收系数,对于给定光的波长可视为常数。比尔定律指出,物质对光的吸收系数与浓度有关,吸收系数 $\alpha_\lambda$ 正比于物质浓度 $c$ , $\alpha_\lambda = Ac$ , $A$ 是与浓度无关的常量,故

$$I = I_0 \exp(-Acd) \quad (2)$$

在比尔定律成立的条件下,可由光在气体中被吸收的程度来决定浓度。在入射光强和透射光强 $I$ 、 $I_0$ 已知的条件下,浓度可表示为

$$c = -\frac{1}{Ad} \ln \frac{I}{I_0} \quad (3)$$

光通过介质时因介质的吸收和散射共同作用使光强减弱,比尔表达式改为

$$I = I_0 \exp[-(\alpha_\lambda + \alpha_s)d] \quad (4)$$

其中, $\alpha_\lambda$ 为吸收系数, $\alpha_s$ 为散射系数。定义 $k = \alpha_\lambda + \alpha_s$ 为衰减系数,表达式改为

$$I = I_0 \exp(-kd) \quad (5)$$

在气溶胶颗粒粒径较小,粒子大小在 $\frac{1}{5}\lambda \sim \frac{1}{10}\lambda$

以下时仅考虑瑞利散射,散射系数 $\alpha_s$ 是入射光波长 $\lambda$ 及胶体颗粒粒径 $2r$ 的函数,对于一种气溶胶在固定光波长时散射系数视为常数。浓度表达式改为

$$c = -\frac{1}{Ad} \ln \frac{I}{I_0} - \frac{\alpha_s}{A} \quad (6)$$

由于消光法的理论基础是Mie散射理论,仅在不相干的单散射条件下成立<sup>[2]</sup>,故使用此法时待测胶体粒子浓度不能过大。

## 2 棱镜气室的工作原理

### 2.1 气室基本结构

棱镜气室基本结构由两个完全相同的、底边相互平行的直角棱镜构成,其结构如图1所示。 $D1$ 、 $D2$ 为两个形同的直角棱镜,其两个底边 $F1$ 、 $F2$ 相互平行,两棱镜间为胶体吸收池。入射光束进入气室,在 $D1$ 、 $D2$ 直角边发生多次全反射,以增大光束在气室中的光程。光束选择上可以利用激光的准直特性和高亮度以增大检测效果。

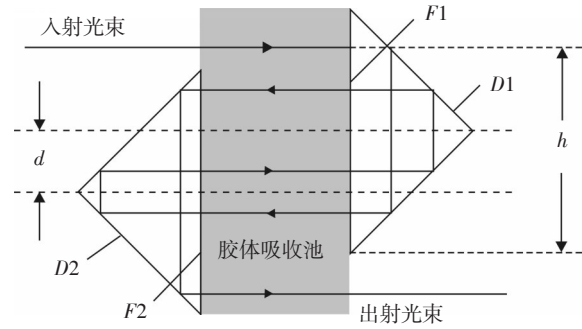


图1 棱镜气室基本结构

### 2.2 光束的传输方程

由于两直角棱镜对称面间距为 $d$ ,在间距为 $d$ 内只有一条往返光束。根据反射对称原理,所有光束所占用的平均空间宽度均为 $d$ 。在不含首末两条光束时,在 $D1$ 、 $D2$ 之间光束数量为 $\text{int}(\frac{h}{d})$ ,则光束往返总量可表示为 $N = \text{int}(\frac{h}{d}) + 2$ 。其中, $h$ 为入射光束到直角棱镜 $D1$ 下顶角的垂直距离。当间距 $d$ 改变时,光束往返总量 $N$ 也会相应改变,光束在吸收池内的有效总光程为 $L = \left[ \text{int}(\frac{h}{d}) + 2 \right] l$ , $l$ 为吸收池宽度,即棱镜底边 $F1$ 、 $F2$ 的水平距离。

光束在气室内传输时,发生全反射、反射和透射。一般光学玻璃透明系数约为0.99,在计算时可视棱镜材料为全透明的,不考虑其对光束的吸收作用。在忽略棱镜的全反射损失时,系统内仅考虑吸收池内的气体对光的吸收。

在气室中,出射光束的光强为输出的前进光束的强度 $I_f$ 与探测光束每次穿过 $F1$ 、 $F2$ 界面时的反射光束强度 $I_r$ 之和<sup>[5]</sup>

$$I = I_f + I_r \quad (7)$$

设棱镜与空气界面透过率记为 $\tau$ 。则前进光束强度 $I_f$ 表达式

$$I_f = I_0 \tau^{2N-2} \exp(-kNL) \quad (8)$$

前进光束在界面发生反射。在光束与界面近似垂直的条件下,反射率很低,反射光强微弱。在输出光束检测时,为消除反射光强影响,将其中一个棱镜倾斜微小角度,使前进光束与反射光束分离,仅检测前进光束,出射光束用光阑加以限制<sup>[6]</sup>。则出射光强可表示为

$$I = I_f + I_r \approx I_f = I_0 \tau^{2N-2} \exp(-kNL) \quad (9)$$

### 3 检测气体参数的确定

#### 3.1 单波长法确定衰减系数

单波长测量法是用一个已知波长为  $\lambda$  的入射光对气体多次入射测量以确定其参数的方法。相对双波长法,在使用光源为激光时单波长法不需要对激光进行频率变换,使用半导体激光器(LD)仅需改变气室结构即可得到衰减系数。

在顶角垂直间距为  $d_1$  时,设光束在气室内传播次数为  $N_1$ ,输出光强  $I_1$ ;间距为  $d_2$  时,光束传播次数为  $N_2$ ,输出光强  $I_2$ ,两次测量入射光强均为  $I_0$  符合光束传输特性方程

$$\begin{cases} I_1 = I_0 \tau^{2N_1-2} \exp(-kN_1 l) \\ I_2 = I_0 \tau^{2N_2-2} \exp(-kN_2 l) \end{cases} \quad (10)$$

光线通过介质时,沿原传播方向的透射光的强度的减弱,称为消光,是由颗粒对入射光散射和吸收两个因素引起的<sup>[2]</sup>。比值  $\frac{I}{I_0}$  称为消光值,反映入射光的衰减。设两次测量的消光值记为  $B_1$ 、 $B_2$ ,由式(10)得

$$\begin{cases} B_1 = \tau^{2N_1-2} \exp(-kN_1 l) \\ B_2 = \tau^{2N_2-2} \exp(-kN_2 l) \end{cases} \quad (11)$$

对得到的消光值取对数得到

$$\begin{cases} \ln B_1 = (2N_1 - 2) \ln \tau - kN_1 l \\ \ln B_2 = (2N_2 - 2) \ln \tau - kN_2 l \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)消去透过率  $\tau$ ,得到由  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $N_1$ 、 $N_2$  表示的衰减系数为

$$k = \frac{(N_2 - 1) \ln B_1 - (N_1 - 1) \ln B_2}{(N_1 - N_2) l} \quad (13)$$

#### 3.2 气溶胶浓度测量

在求解气溶胶浓度时,首先测量吸收池不存在待测胶体时透射背景光强信号,用以清除寄生误差;求解胶体参数利用已知标准胶体作参考。设浓度为  $c_1$ 、 $c_2$  的同种标准胶体参数分别为  $I_0$ 、 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $N_1$ 、 $N_2$ 、 $\tau_0$ 、 $l_0$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ ,两次测量参数均符合方程(9),参数  $A$ 、 $\alpha_s$  可表示为

$$\begin{cases} A = \frac{(2N_2 - 2) \ln \tau_0 - \ln \frac{I_0}{I_2}}{N_2 l_0 (c_2 - c_1)} - \frac{(2N_1 - 2) \ln \tau_0 - \ln \frac{I_0}{I_1}}{N_1 l_0 (c_2 - c_1)} \\ \alpha_s = \frac{(2N_1 - 2) \ln \tau_0 - \ln \frac{I_0}{I_1}}{N_1 l_0 (c_2 - c_1)} (c_2 - 2c_1) - \frac{(2N_2 - 2) \ln \tau_0 - \ln \frac{I_0}{I_2}}{N_2 l_0 (c_2 - c_1)} c_1 \end{cases} \quad (14)$$

式中,参数  $A$ 、 $\alpha_s$  均为常量。在求得参数  $A$ 、 $\alpha_s$  后代入式(9),可以得到由  $I$ 、 $N$ 、 $\tau$ 、 $l$  表示的最终气溶胶浓度表达式。

#### 3.3 检测灵敏度分析

将棱镜气室灵敏度定义为单位衰减系数变化引起的输出光强变化,则对一定波长的激励光源,棱镜气室灵敏度表示为

$$S_{N\lambda} = \left| \frac{dI}{dk} \right| = N l I_0 \tau^{2N-2} \exp(-kNl) \quad (15)$$

无棱镜反射单程测量灵敏度表示为

$$S_\lambda = \left| \frac{d[I_0 \exp(-kl)]}{dk} \right| = l I_0 \exp(-kl) \quad (16)$$

对于两种测量方法,  $\frac{S_{N\lambda}}{S_\lambda} = N \tau^{2N-2} \exp[-k(N-1)l]$ ,

则在棱镜与空气界面透过率近似为1时,如果待测胶体浓度较低即  $k \approx 0$ ,棱镜气室灵敏度为无反射单程测量灵敏度的  $N$  倍,气室检测灵敏度近似与穿过吸收池的光线条数成正比。

对于透过率较大的冕牌玻璃材料直角棱镜透过系数  $\tau \approx 0.96$ ,令吸收池长度为1 m,在衰减系数  $k=0 \sim 2$ ,  $N=1$ 、 $N=4$ 、 $N=6$  三种条件下利用 MATLAB 仿真输出光强如图2。

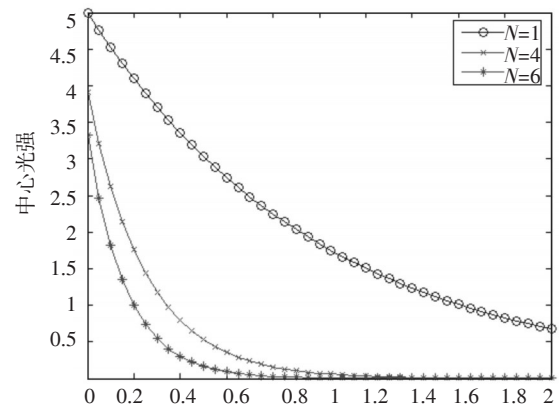


图2 不同的衰减系数对应输出光强

图2中曲线的斜率反映了气室检测灵敏度。由图2曲线变化趋势同样可以得到在其他条件相同时  $N$  越大灵敏度越大的结论。

在光束条数增多的条件下,气室的检测灵敏度增大,气室可检测的气溶胶浓度可达到较小值,在减小几何结构的条件下降低了测量下限。在  $N$  变化时(使  $N$  为奇数),测量胶体的浓度为图3所示变化趋势。

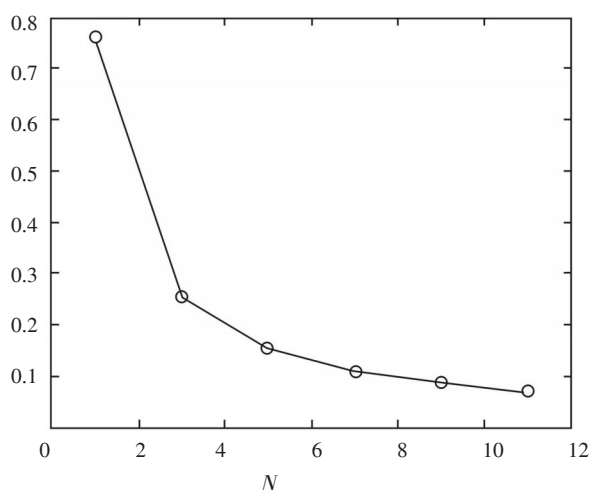


图3 测量气溶胶浓度下限变化示意图

## 4 棱镜气室测量装置及误差分析

### 4.1 测量系统组成

消光法测量系统通常由直流稳压电源、光源、光学系统、吸收池及光电检测系统、计算机等组成。在二次输出采样时,由于输出光束的位置将发生平移,光电传感器要随之移动。为解决这个问题,可以采用光纤光谱仪简化测量装置<sup>[2]</sup>,用光纤引导输入及输出光束。这里使用透镜聚焦的简化方法,其实验装置如图4。

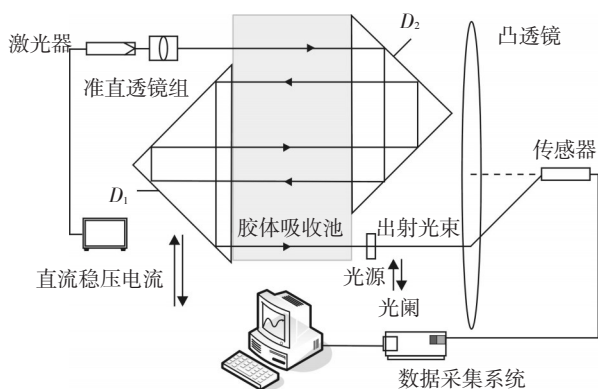


图4 气溶胶浓度测量系统

装置中棱镜 $D_2$ 固定, $D_1$ 可上下移动,凸透镜的主光轴平行于出射激光束,光源采用半导体激光器,激光器发出的光经准直透镜组压缩准直后入射到吸收池,光学系统置于暗室中,光阑可随出射光束调整位置,用来限制反射光束进入传感器。在二次测量时,出射激光束位置平移后仍基本平行于透镜主光轴,使得激光聚焦在光电传感器探头位置基本不变。

### 4.2 浓度变化趋势的表征

在系统工作时,为表征气溶胶浓度变化趋势,以浓度 $c_x$ 为相对值绘制相对浓度变化曲线。计算机通过串口接收数据采集系统采集到的数据,使用Visual C++设计MFC气体相对浓度变化监控程序。使用半导体激光器波长 $\lambda=650\text{ nm}$ ,在 $N=5$ , $l=0.5\text{ m}$ ,基准浓度 $c_x=251\text{ ppm}$ 时监控界面及变化曲线如图5。

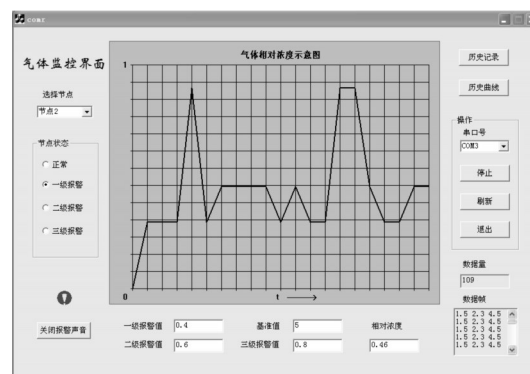


图5 监控界面及相对浓度变化曲线

### 4.3 系统误差分析

在光束传输方程的计算时,参数使用了若干近似,忽略了光束的全反射损失及光束在棱镜内部损耗。(1)石英玻璃材料在紫外到近红外区域具有较高透过率,对于不同光波长仍有衰减作用,这种衰减作用在棱镜内部光程增大时尤为明显。(2)机械加工及装调误差,要求光路在垂直于棱镜底边的平面内,但由于加工误差,棱镜底边将出现偏斜<sup>[3]</sup>,使出射光束偏离透镜主光轴,测量光强减弱,使得到的消光系数增大。(3)气溶胶胶体粒子附着在透镜表面,影响棱镜表面反射率,对测量结果产生部分影响。(4)消光法的理论基础是Mie散射理论,仅在不相干的单散射条件下成立,故待测气溶胶粒子浓度不能过大,浓度过大将造成复散射现象<sup>[2]</sup>使测量结果出现偏差。(5)测量出射光束光强基本原理是使用了A/D转换器,其转换精度将直接影响测量的精确性。

## 5 结束语

双棱镜消光气室结构用于气溶胶浓度检测,其有效透射光程易于调整。文中分析了棱镜气室结构在近似条件下光束的传输方程,仿真效果证明了近似

(下转第78页)

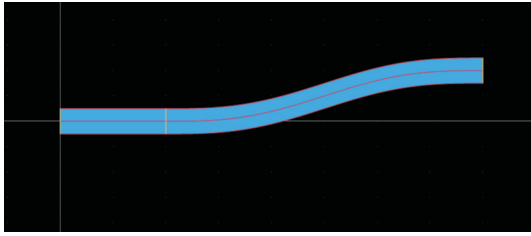


图11 正弦S弯曲波导结构  
仿真结果如图12所示。

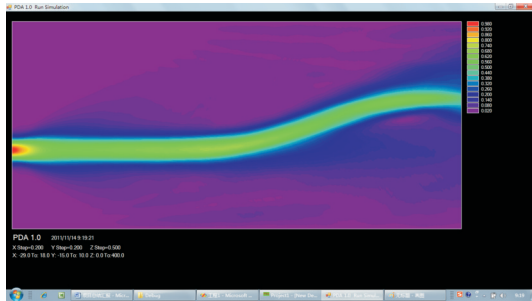


图12 正弦S弯曲波导的仿真结果

## 5 结束语

开发出一款能够仿真光波导器件的软件,此光学芯片商用仿真软件具有一定的实用性,界面简洁、操作简便、仿真结果直观明了,它采用VS2005 C#软件编写,利用了面向对象程序设计的思想,有利于各子模块的内聚性及独立性,且易于后期对系统功能的扩充。与国外先进的仿真软件相比,此仿真软件操作更方便,价格更低廉,数据计算精度符合使用要

求,大大提高了软件的商用使用价值,为光电器件的设计者带来了方便的设计环境,大大提高了设计的效率。

## 参考文献

- [1] A Yariv. Introduction to Optical Electronics[M]. New York: John Wiley & Sons, 1989:10-21.
- [2] 冯威,高建军. 光电集成电路的CAD系统[J]. 半导体学报, 2000,37(1):46-47.
- [3] 陈维友,张冶金,曹晓光,等. 光波导器件计算机辅助分析系统[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1999, 11(4): 340-341.
- [4] 王建平. 光学芯片CAD交互式软件的设计与实现[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2009.
- [5] 阎细圣,郭裕顺. 光学仿真软件的系统架构设计[J]. 计算机仿真, 2009, 26(9):264-268.
- [6] 李洋. EDA技术实用教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [7] 孙永强,戴峰,陈宗斌. Visual C#.NET 程序设计基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [8] 凤兰. 用有限差分法光束传播法计算光波导横模[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2008.
- [9] 魏坚. 三维光波导传输及增益特性的BPM法计算[D]. 长春: 长春理工大学, 2007.
- [10] 熊群. 有限差分光束传播法的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [11] 潘炜. 光波导光束传播法有限差分边界条件传输损耗集成光学电光调制器[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.

(上接第65页)

条件下全反射棱镜结构提高了系统的检测灵敏度,降低了测量下限。在痕量气体<sup>[5,8,9]</sup>测量中,由于单程消光微弱,这种检测方法具有较强的适用性。

## 参考文献

- [1] 周云龙,赵红梅,李莹,等. 图像处理技术在稀相气固两相流粒度测量中的应用[J]. 化工自动化及仪表, 2011, 38(10): 1180-1184.
- [2] 蔡小舒,苏明旭,沈建琪. 颗粒粒度测量技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [3] 陈世哲,刘世莹,范秀涛,等. 基于棱镜模型多次折射法的海水盐度检测系统[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0701003-1-0701003-5.
- [4] 吴希军,王玉田,刘学才,等. 棱镜气室在光纤甲烷检测系统中的应用研究[J]. 光学学报, 2010, 30(5): 1261-1266.
- [5] 肖韶荣,陈进榜,朱日宏,等. 基于直角棱镜的光纤光度传感器[J]. 中国激光, 2004, 31(12): 1513-1517.
- [6] 肖韶荣,高志山,廖延彪. 基于直角棱镜的气体传感器在能见度测量中的应用[J]. 中国激光, 2006, 33(1): 81-84.
- [7] 姚启钧. 光学教程[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2008: 270-280.
- [8] 阚瑞峰,刘文清,张玉钧,等. 基于可调谐激光吸收光谱的大气甲烷监测仪[J]. 光学学报, 2006, 26(1): 67-70.
- [9] 张军,朱永,陈俊清,等. 痕量气体可调谐激光二极管吸收光谱分析系统在线自校准技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(4): 1030-1034.