

# 三椭球结构多组分光学传感器性能提高研究

周宇航, 倪雨琛, 葛玮, 郭亚\*

江南大学物联网工程学院轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122

**摘要** 光学气体传感器性能受气室结构影响较大,但是关于通过改进气室结构提高光学气体传感器的研究较少,提高芯片的利用率对缓解全球半导体芯片供应不足及低碳环保等具有重要意义。为了提高芯片利用率与满足多组分气体传感器高性能检测需求,设计了一种使用非分光红外技术的可同时检测 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>和 CO 这三种气体的三椭球型气室结构光学传感器,并对气室的光学性能进行研究。通过光路仿真、有限元模拟、蒙特卡罗模拟等可知:23%的接收面上集中了91%的能量,克服了直射式结构气室光程短和光敏面上光通量低的问题(光程长度增加了25%,光通量增加了40倍),同时克服了多反射式结构光通量过低的问题(约增加了117倍),信噪比分布是多反射式和直射式的10~100倍。因此,所提三椭球气室结构对于高端多组分组合式气体传感器的实现有着重要的意义。

**关键词** 传感器; 光学气体传感器; 非分光红外技术; 三椭球型气室结构; 有限元模拟; 蒙特卡罗模拟

中图分类号 TP212

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220884

## Study on Improving Performance of Three-Ellipsoidal Multicomponent Optical Sensors

Zhou Yuhang, Ni Yuchen, Ge Wei, Guo Ya\*

Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Ministry of Education, School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China

**Abstract** The performance of optical gas sensors is greatly affected by the gas chamber structure. However, there are few researches aimed at improving the optical gas sensor by improving the structure of the gas chamber. Improving the utilization of chips is crucial to alleviate the global shortage of semiconductor chips and low-carbon environmental protection. In this study, a three-ellipsoidal gas chamber optical sensor with non-dispersive infrared technology is designed to improve chip utilization and satisfy the high performance detection requirements. The proposed sensor can simultaneously detect CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, and CO. Furthermore, the optical performance of the gas chamber is studied. The results of the optical path, finite element, and Monte Carlo simulations clearly show that 91% of the energy is concentrated on 23% of the receiving surfaces, which effectively overcomes the problems of short optical path of the direct structure gas chamber and low luminous flux on the photosensitive surface (the optical path length increases by 25%, and the luminous flux increases by 40 times). Moreover, the problem of low luminous flux of the multi reflection structure (approximately 117 times) is mitigated. The signal-to-noise ratio distribution is 10-100 times that of the multireflection and direct reflection. Therefore, the proposed three-ellipsoidal gas chamber structure is of great significance for manufacturing high-end multicomponent combined gas sensors.

**Key words** sensors; optical gas sensor; non-dispersive infrared; three-ellipsoidal gas chamber structure; finite element simulation; Monte Carlo simulation

## 1 引言

气体检测对于厂房、居民及环境保护等具有重要的意义。随着物联网的兴起,能够检测多种气体的小

型化多功能传感器越来越重要。在煤矿、石油、化工等行业的生产制造过程中,会产生大量的有毒、易燃、易腐蚀气体,这些气体一旦泄漏并达到一定浓度,就会对环境以及人的生命、健康、财产造成巨大的影响。因

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-03-23; 录用日期: 2022-04-20; 网络首发日期: 2022-04-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31771680)、国家自然科学基金国际合作项目(51961125102)

通信作者: \*guoya68@163.com

此,对易燃或有毒气体的检测和处理显得尤为重要,其中,CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>和CO是3种较为常见的气体,其安全问题尤为普遍。当以上3种气体超出一定的浓度值时,会对人民的生命、财产等造成严重的威胁<sup>[1]</sup>。

如今,大气中CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>和CO等气体含量变化所引起的气候变化对农牧业生态系统的影响远超历史上任何一个时期,这对人类的生存和发展提出了极大的挑战。及时检测以上3种气体的浓度变化,并据此采取积极的响应措施至关重要<sup>[2]</sup>。但目前能够同时检测这3种气体的传感器比较缺乏,因此有必要设计一种能同时检测CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>和CO这3种气体的传感器。

目前,市面上的气体传感器多数面向单一气体检测。若使用单气体传感器进行气体浓度检测,目标气体以外的有害气体便无法检测,无法保障危险场所的生产安全以及农牧作物的品质和产量<sup>[3-4]</sup>。多组分传感器可以在芯片供货不足的情况下节约芯片及成本。

采样气室是红外光与待测气体相互作用的密闭空间,同时也是红外光由光源发出到被探测器接收过程的必要通道。气室结构直接影响光程长度、光能损失和反应时间,决定着传感器的性能。2012年,Hodgkinson等<sup>[5]</sup>提出pellistor结构气室,主体为圆柱体,以提高光通量来改善CO<sub>2</sub>传感器的信噪比;2015年,太原理工大学梁永直等<sup>[6]</sup>利用椭圆光学原理,增加了光在气室内传播的光程长度,以此提高CO<sub>2</sub>传感器的检测精度;2020年,Ye等<sup>[7]</sup>提出五面体气室结构,利用1个抛物面聚光器、2个双凸透镜和5个平面镜建立五面体结构,以此提升CH<sub>4</sub>的检测精度。

本文结合现有的国内外传感器气室结构,考虑光程长度、光能损失和反应时间,设计出一种可同时检测CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>和CO这3种气体的三椭球型结构。此设计基于单光源六探测器差分光学检测方法,该方法凭借其灵敏度高、检测范围广、抗干扰性强等优点,在气体检测领域得到广泛应用<sup>[8]</sup>。在研究过程中,完成三椭球型结构的3D建模,利用光学软件LightTools绘制光接收面光强分布图,而后通过有限元模拟确定气室长度,最后利用TracePro蒙特卡罗模拟分析与直射式及多反射式结构进行对比。

## 2 气室结构设计

在对CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>和CO气体进行检测的红外差分模型中,需要设置3个参比通道,以消除在使用过程中因光源抖动、光学器件污染、电路噪声以及环境改变导致的测量结果波动<sup>[9]</sup>。由朗伯-比尔定律可知,气体浓度的计算公式<sup>[9-11]</sup>如下:

$$c = \frac{1}{(k_{\text{ref}} - k_{\text{mea}})l} \ln \frac{I_{\text{out(me)a}}}{I_{\text{out(ref)}}}, \quad (1)$$

式中: $I_{\text{out(me)a}}$ 为测量通道的红外光被气体吸收后的强度; $k_{\text{mea}}$ 表示待测气体对测量通道的特定波长红外辐射的吸

收系数; $I_{\text{out(ref)}}$ 为参比通道红外光经过气体区域后的输出光强; $k_{\text{ref}}$ 表示待测气体对参比通道的特定波长红外辐射的吸收系数。根据3种气体的光谱吸收带(如图1所示,数据来源于美国国家标准与技术研究院),选定4.26 μm、7.30 μm及4.65 μm的红外光分布用于CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>及CO的测量,参比通道的波长选定为3.60 μm(此波长的红外光几乎不会被待测的3种气体吸收)。由此可以确定3个通道滤光片的波长,表明利用一个传感器同时检测以上3种气体的可行性。

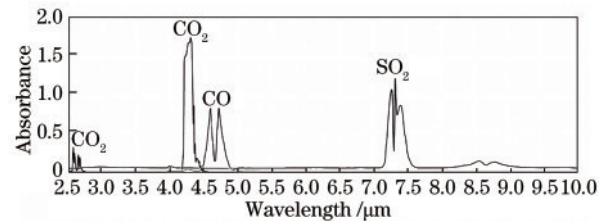


图1 3种气体的红外吸收光谱图

Fig. 1 Infrared absorption spectra of three gases

气室中需要包含1个红外光源、6片滤光片与3个热电堆探测器。增加光程长度的方式有很多,但必须要考虑尽量压缩体积、提高准确度及灵敏度等因素。在各种几何形状的结构中,椭球是一种特殊的形状。椭球的面镜(以椭圆的长轴为轴,把椭圆转动360°形成立体图形,其内表面全部做成反射面,中空)可以将某个焦点发出的光线全部反射到另一个焦点处,且每条光线光程长度相同,如图2(a)所示。由此可知,由一个焦点发射的光经过椭圆内壁切面位平面镜会反射到另一个焦点处<sup>[12]</sup>。在以上标准约束下,提出了三椭球型气室结构,如图2(b)所示。

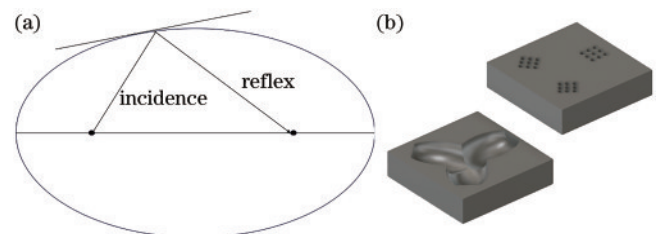


图2 三椭球型气室原理及结构设计。(a)椭圆形结构光路示意图; (b)三椭球型气室内腔结构图

Fig. 2 Principle and structure design of three-ellipsoidal air chamber. (a) Schematic diagram of elliptical structured light path; (b) structure diagram of inner cavity of three ellipsoidal air chamber

观察图2(b)可知,采用3个椭球拼接的方式构成一个完整的气室。为了便于computer numerical control (CNC)加工以及传感器和灯源的安装,将气室分为上、下2个部分<sup>[13]</sup>。3个气室分别进行CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>和CO浓度测量。3个椭球相交的部分是焦点重合的部分,因此将电调制红外光源放置在此处。将3个探测器分别放在3个椭球的另外一个焦点处,红外光经腔

室内壁反射后可以分别被 3 种组合探测器所接收。气室的 3 个椭球腔中心对称。此气室设计方案可以利用 1 个电调制红外光源辐射 3 个腔室,分别用于  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{CO}$  气体浓度的检测,3 个腔室中心对称。红外光的反射在一定程度上增加了光程长度,且有效利用了气室空间。

### 3 气室结构分析

光学仿真时,需要红外光源产生大量的随机光线,光线的随机性与数量将会影响到仿真结果的准确性。光线的设定数量越多,仿真的结果越准确,但是需要综合考虑计算机的运行能力与运行时间,选取合理的光线数量<sup>[14-15]</sup>。为了模拟反光杯对朗伯光源的反射,将光源设定为平行光源,且光线数量设置为 100000。

#### 3.1 气室光接收面光强分布

在仿真过程中,探测器所在的 3 个位置设置为接收面,分别用以模拟 3 种气体的组合探测器的光线接收情况。研究气室光接收面的光强分布主要是为了验证气室结构的可行性,因此结构参数对结果不会产生影响,在本仿真中设置接收面的直径为 20 mm、气室长度为 60 mm。光线经过气室内壁的一次反射后,会被探测器的接收面所接收。图 3 展现了三椭球型气室中光线的传输情况。

图 4 为三椭球型气室的光线散射体表图,从左至右依次为  $\text{CO}_2$  组合探测器、 $\text{SO}_2$  组合探测器和  $\text{CO}$  组合探测器得到的散射图。3 种气体的接收面所接收的光

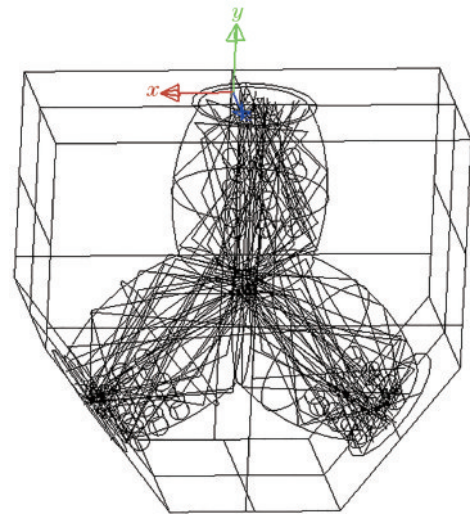


图 3 三椭球型气室中光线传输情况模拟示意图

Fig. 3 Simulation diagram of light transmission in three-ellipsoidal gas chamber

线分布均匀,每个面接收到的光线数分别为 30599、29436、28735。以第 1 个数据为基准,计算差异百分比,得到的结果分别为 3.80% 和 6.09%。根据数据可知,每个面接收到的光线数较为一致,比较细微的差异是由光线传输过程中的随机性引起的。同时,三椭球型气室的光照强度集中在接收面的中心部分,3 个接收面大约都在 23% 的面积上集中了 91% 的能量。在气室实际的工作中,可能会因内壁的吸收作用,导致部分红外光被吸收,从而影响测量结果。因此,可对气室的内壁进行镀膜处理,以减少红外光的损失。

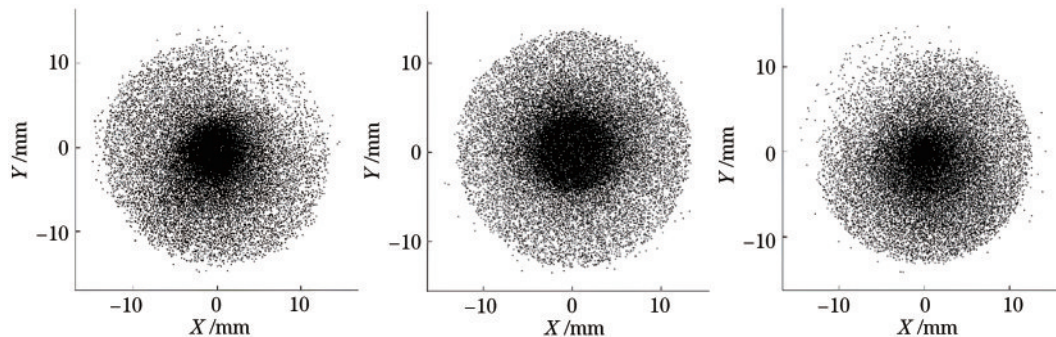


图 4 三椭球型气室的光线散射图

Fig. 4 Light scattering diagrams of three-ellipsoidal gas chambers

图 5(a)、(b)、(c)展示的是三椭球型气室的照度光栅分布情况,从中间区域向外围逐渐衰减,即中心部分能量强且分布均匀。在衰减趋势方面,图 5(d)、(e)、(f)是三椭球气室光照强度立体分布图。3 个气体组合探测器能够很好地接收光源发出的光,使得通过对应滤光片的光信号到达探测器的检测阈值。

#### 3.2 气室长度影响分析

气室长度会影响测试分辨率及传感器对于动态气体的响应时间。直射式气室的长度一般设置在 50~70 mm 之间<sup>[16]</sup>。因此在本小节中,利用有限元模拟,通

过比较 3 种不同气室长度(50 mm、60 mm、70 mm)下,气体充满且在气室内浓度达到稳定的时间来选定气室长度。气体充满气室的时间受气体类型影响不大,因此以浓度为 0.04% 的  $\text{CO}_2$  气体来进行流体力学的有限元模拟。

图 6 为传感器在空气环境中的气流流向图。假设大气流动速度为 5 m/s,可以看到空气大量聚集在气室的进、出气口处,传感器通过此处与外界进行气流交换。此外,空气的湍动能在接触到气室的边界时最大。



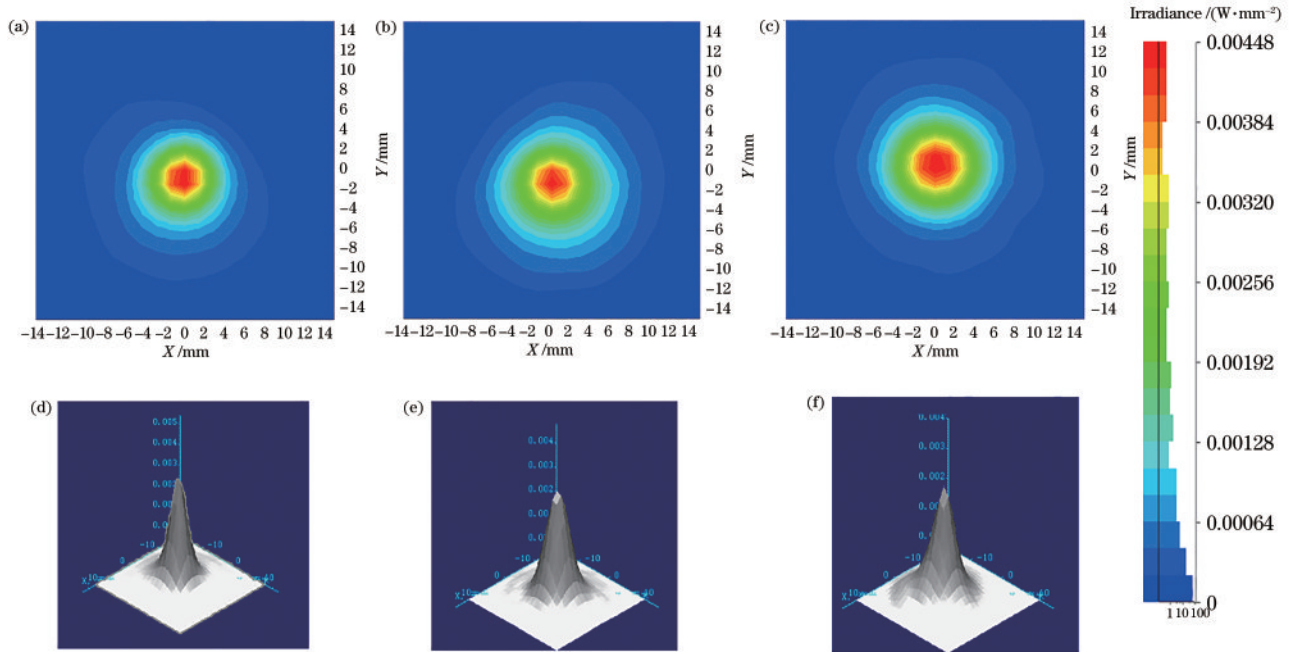


图 5 三椭球型气室的照度光栅及光照强度立体分布。(a) CO<sub>2</sub>接收面照度光栅;(b) SO<sub>2</sub>接收面照度光栅;(c) CO接收面照度光栅;  
(d) CO<sub>2</sub>接收面光照强度;(e) SO<sub>2</sub>接收面光照强度;(f) CO接收面光照强度  
Fig. 5 Illumination grating and three-dimensional distribution of illumination intensity in three-ellipsoidal air chamber. (a) Illumination grating of CO<sub>2</sub> receiving surface; (b) illumination grating of SO<sub>2</sub> receiving surface; (c) illumination grating of CO receiving surface; (d) light intensity of CO<sub>2</sub> receiving surface; (e) light intensity of SO<sub>2</sub> receiving surface; (f) light intensity of CO receiving surface

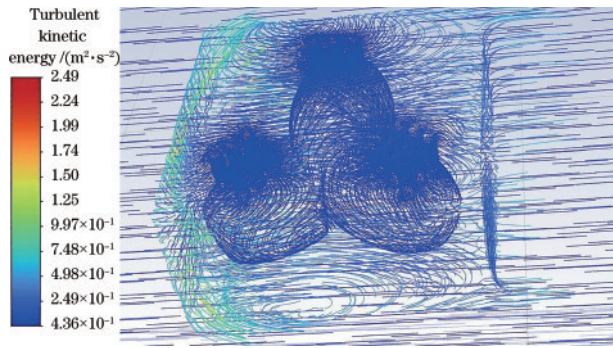


图 6 传感器在空气环境中的气流流向图  
Fig. 6 Flow direction diagram of sensor in air environment

假设大气环境中 CO<sub>2</sub> 的质量分数为 0.04%。经过模拟可知:对于长度为 50 mm 的气室,当时间持续到 2.5 s 时,气室内 CO<sub>2</sub> 质量分数达到大气中浓度的 95%;将气室长度增加为 60 mm、时间持续到 3.0 s 时,气室内 CO<sub>2</sub> 质量分数达到大气中浓度的 95%;当气室长度为 70 mm、时间持续到 4.0 s 时,气室内 CO<sub>2</sub> 质量分数达到大气中浓度的 95%。图 7、图 8 分别为气室长度为 50 mm 与 60 mm 时的不同时刻的 CO<sub>2</sub> 质量分数云图,为了节省篇幅,气室长度为 70 mm 的不同时刻 CO<sub>2</sub> 质量分数云图不再提供。综合考虑分辨率和响应时间,选择 60 mm 作为气室的长度。

### 3.3 与直射式及反射式气室的比较

对于单组分气体传感器,比较常见的气室结构是直射式和反射式。对以上 2 种气室的结构进行组合,得到

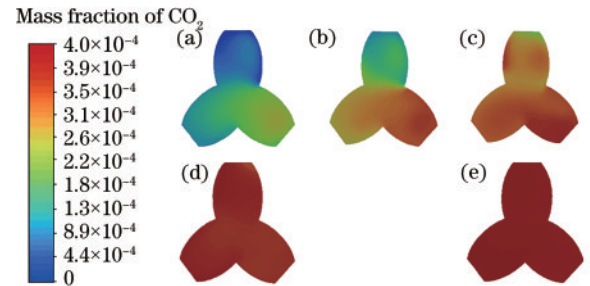


图 7 气室长度为 50 mm 时不同时刻的 CO<sub>2</sub> 质量分数云图。  
(a) 0.5 s; (b) 1.0 s; (c) 1.5 s; (d) 2.0 s; (e) 2.5 s  
Fig. 7 Cloud diagrams of CO<sub>2</sub> mass fraction at different times when length of gas chamber is 50 mm. (a) 0.5 s; (b) 1.0 s; (c) 1.5 s; (d) 2.0 s; (e) 2.5 s

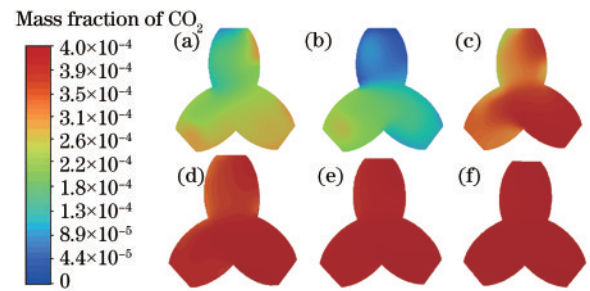


图 8 气室长度为 60 mm 时不同时刻的 CO<sub>2</sub> 质量分数云图。(a) 0.5 s;  
(b) 1.0 s; (c) 1.5 s; (d) 2.0 s; (e) 2.5 s; (f) 3.0 s  
Fig. 8 Cloud diagrams of CO<sub>2</sub> mass fraction at different times when length of gas chamber is 60 mm. (a) 0.5 s; (b) 1.0 s; (c) 1.5 s; (d) 2.0 s; (e) 2.5 s; (f) 3.0 s

了三组分的直射式及多反射式气体传感器。图 9(a)为直射式气室的 3D 模型图,图 9(b)为利用图 9(a)气室设计的三组分气体探测器摆放方式。探测器的直径大

小约为 10 mm,直射式气室中安装探测器部分的直径为 30 mm 左右。在实现安装 3 个探测器的前提下,尽量缩小气室的横截面积,进而缩小气室的体积。

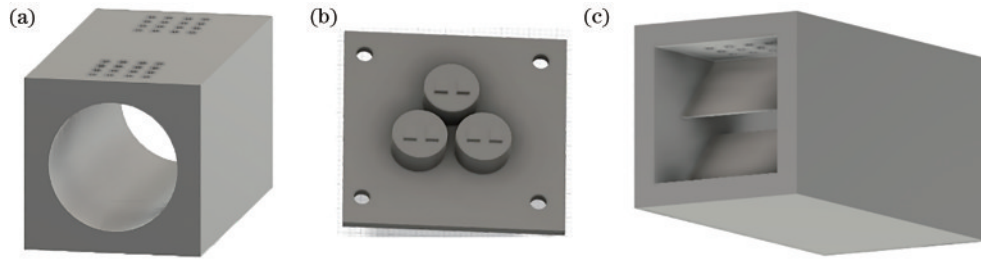


图 9 直射式及多反射式气室结构设计。(a)直射式气室 3D 模型图;(b)直射式探测器摆放设计;(c)多反射式气室 3D 模型图  
Fig. 9 Structural design of direct and multi reflection air chambers. (a) 3D model drawing of direct air chamber; (b) placement design of direct type detector; (c) 3D model drawing of multi reflection air chamber

图 9(c)为多反射式气室的 3D 模型图。探测器的直径大小约 10 mm,在图中,采用 2 组相互平行的平面镜来改变光路的走向,所有平面镜都与气室的内壁成 45°角。在气室的左下方安装一个电调制红外光源,出射光与入射光平行射出。

对于 3 种气室结构,确定长度为 60 mm。利用 TracePro 软件进行蒙特卡罗追迹仿真,随机光线的数量设置为 100000,仿真给出了每一条入射光线在不同气室结构中吸收气体的光程长度、在内壁上的反射次数以及到达探测器的光线。3 种结构得到的数据如表 1 所示。

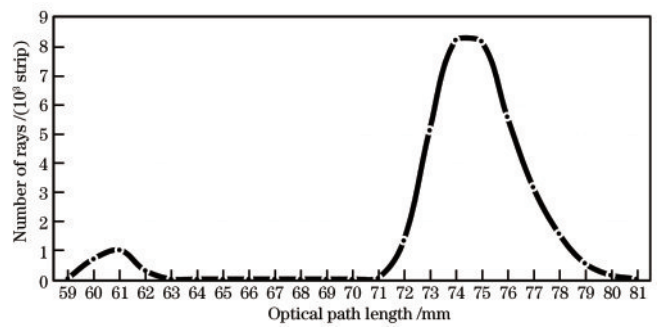


图 10 三椭球型气室的光程长度统计分布图  
Fig. 10 Statistical distribution of optical path length of three-ellipsoidal gas chambers

表 1 不同气室结构的光程长度、反射次数及到达接收面的光线数

Table 1 Optical path length, reflection times, and the number of light reaching receiving surface of different air chamber structures

Index	Triple ellipsoid type	Direct type	Multiple reflection type
Optical path length /mm	75.1270	60.0187	205.1787
Reflection times	0.9439	0	15.2274
Number of rays reached	4334	1074	597

通过分析表 1 中数据可以发现:多反射型结构的光程长度最长,但由到达探测器的光线数目可知,由于反射次数过多,大部分光线在反射过程中损耗掉了;而三椭球型结构到达探测器的光线数最多,说明反射过程中损耗最小,并且适当增加了光程长度。综合分析可知,三椭球型气室结构最为合理。为了进一步证明三椭球型气室结构的优越性,对其进行光程的分长度的统计分布分析(如图 10 所示)及反射次数的统计分布分析(如表 2 所示)。

通过图 10 可知,光程长度有多种可能的数据,造成这种现象的原因是光线的反射次数不同。光程长度主要分布在 60~64 mm 和 72~81 mm 这 2 个范围内,

表 2 三椭球型气室的反射次数统计分布

Table 2 Statistical distribution of reflection times of three ellipsoidal gas chambers

Reflection times	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>
0	2013	1995	2256
1	33896	24307	23787

第 1 个聚集范围即光线没有发生反射,第 2 个聚集范围即光线发生了一次反射。此外,光程长度越长,光线被气体吸收得越多,灵敏度越高,而图中大部分光线的光程长度分布在第 2 个聚集范围内,远大于气室的长度。通过设置合适的气室结构及长度,可根据具体应用需求,合理地平衡光程长度和响应时间这 2 个变量。

通过表 2 可知,3 个探测器接收到的光线总数分别为 35909、26302、26043。总光线数为 100000,每个探测器接收到的光线数都接近 30000,满足三椭球型结构的对称要求。虽然在传输过程中有部分光线会因随机性而超出接收范围,但通过计算结果可知其数量极少、可以忽略。另外,反射次数只有 0 次和 1 次,减少反射次数就可减少光能损失。在适当增加光程长度的前提下,已尽量减少光能损失,较合理地平衡了光程长度和光能损失这 2 个变量。

由于 non-dispersive infrared (NDIR) 气体传感器的



性能主要受限于发射源的功率及红外探测器的噪声,而光线交叉等造成的微弱噪声<sup>[17]</sup>对其影响甚微,故可以利用如下公式来估算传感器系统的信噪比水平,计算公式<sup>[18]</sup>为:

$$S_{\text{SNR}} = \frac{D^* \cdot P}{\sqrt{A_D \cdot \Delta f}}, \quad (2)$$

式中: $D^*$ 为探测器的探测率,单位为  $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ;  $P$ 为入射到探测器光敏面上的光通量; $A_D$ 为探测器光敏面面积; $\Delta f$ 为噪声带宽,这里设为  $1 \text{ Hz}$ 。以二氧化碳通道的信噪比为例,选用的 JX-II A 型探测器的  $D^* = 0.7 \times 10^8 \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ,  $A_D = 1.15^2 \text{ cm}^2$ 。

分别计算 3 种结构气室的  $P$  值及信噪比,结果如表 3 所示。

表 3 3 种结构的探测器光敏面上光通量  $P$  值及信噪比  
Table 3 Luminous flux  $P$  value and signal-to-noise ratio on photosensitive surface of detector with three structures

Index	Triple ellipsoid type	Direct type	Multiple reflection type
$P/W$	0.43263	0.01074	0.0036827
Signal-to-noise ratio	$10^7$	$10^6$	$10^5$

利用式(2)得到 3 种气室结构传感器的信噪比:三椭球型的信噪比最大,说明其抗干扰能力最强。另外,对比 3 个光通量值可知,三椭球型气室具有良好的光线集中能力,能够使探测器的敏感区域接收更密集的光线,增加单位面积的光通量。综上所述,三椭球型气室最为优越,符合三组分气体传感器的设计要求。

### 3.4 讨论

从矿井、化工厂等场所出现的有害气体测量的实际需求着手,采用差分检测模型设计了一种适用于三组分气体传感器的气室结构。通过 3D 建模、光路仿真及蒙特卡罗模拟分析等方法可知,60 mm 的三椭球型气室结构可以比较合理地平衡光程长度、光能损失和响应时间这 3 个变量,使传感器性能达到一个比较理想的效果。

直射式结构简单,光程长度等于气室长度,若想增加光程长度只能增加气室长度,传感器体积会相应增大;其次,光线在直射式气室中比较发散,在直射式气室中,一般会设置点光源照射在反光杯上,得到平行光源与气体进行接触。多反射式结构比较多样化,但是原理都是利用反射增加光线的光程长度,若想增加光程长度就要增加反射次数,在多次的反射过程中,光能损耗随之增大;其次,在多反射式气室中,仍然需要得到平行光束;最后,在体积比较小的气室内部,需要保证所有平面镜的精准安装,如果角度出现偏差,可能导致光束偏离探测器,对测量产生十分不利的影响。以上 2 种气室的平行光线都会造成光线不聚集的问题,进而导致光能浪费。

当直射式、多反射式以及三椭球型气室的长度相等时,三椭球型气室的光程长度比直射式气室更长,光线可以与气体进行更加充分的接触;同时,接收面的光通量更大,说明光线更加集中,进一步减小了光能损耗。此外,三椭球型气室的光程长度虽然比多反射式气室短,但是接收面的光通量却远远大于多反射式气室。三椭球型气室虽然结构是最为复杂的,生产成本不是最理想的,但是合理地平衡了光程长度、光能损耗以及信噪比等指标,对于高端传感器的实现有着重要的价值。

太原理工大学梁永直等<sup>[6]</sup>2015 年提出的三椭球型结构只能用于检测 1 种气体,其仅包含 1 个光源和探测器。在单光源输出经过许多次壁反射之后光线传播至接收器,反射次数过多容易造成光线能量损失;而所提传感器结构面向 3 种气体同时检测,其包含 1 个光源和 3 个探测器,上下盖为对等结构,不论采用 CNC 加工还是 3D 打印,都可以很方便地实现气室加工制造。同时,光源只经过一次反射就能到达接收器,有效聚集光线并减少光能损失。

本研究所探讨的三椭球型气室传感器是用来测量  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{CO}$  这 3 种气体浓度的,应用场景主要是矿井、化工厂等容易产出有毒有害气体的场所。在实际生活中,有多种气体、多种多样的应用场景,三椭球型气室的传感器所测量的气体类型可以根据实际情况确定,并不局限于所涉及的 3 种气体测量。虽然三椭球型气室存在着诸多优点但仍然有需要改进的地方。由于测量多种气体的浓度可能会导致传感器体积增大,根据不同的应用场景可能需要做一些结构上的调整以及需要研究针对此结构的测量结果校正算法等,以上问题的解决还需要后续的实验研究、数据计算、结构改良等工作。

## 4 结 论

本研究所设计的三椭球型气室结构,考虑了光程长度、光能损失和响应时间这 3 个要素。通过光路仿真、有限元模拟及蒙特卡罗模拟等方法,并且与相同尺寸的直射式及多反射式结构进行对比可知,60 mm 的三椭球型气室结构的性能指标最优,克服了直射式结构气室光程短和光敏面上光通量低的问题(光程长度增加了 25%,光通量增加了 40 倍),同时克服了多反射式结构光通量过低的问题(约增加了 117 倍),信噪比分布是多反射式和直射式的 10~100 倍。因此,所提三椭球型气室结构对于高端多组分组合式气体传感器的实现有着重要的意义。

### 参 考 文 献

- [1] 耿川雄,任家兵,马心灵,等.基于 LCA 的不同间作体系产量优势及温室效应研究[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(2):159-167.

- Geng C X, Ren J B, Ma X L, et al. Yield improvement and greenhouse effect of different intercropping systems based on life cycle assessment[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(2): 159-167.
- [2] 闫格, 张磊, 于玲, 等. 面向天然气泄漏检测的中红外甲烷传感系统与应用[J]. 中国激光, 2022, 49(18): 1810001.
- Yan G, Zhang L, Yu L, et al. Mid-infrared methane sensor system for natural gas leakage detection and application[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(18): 1810001.
- [3] 刘新, 张婷, 张刚, 等. 基于光声光谱技术的 CO 气体探测[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 0111002.
- Liu X, Zhang T, Zhang G, et al. Carbon monoxide detection based on photoacoustic spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 0111002.
- [4] 赵庆川. 中红外甲烷二氧化碳双气体传感系统的研制[J]. 光学学报, 2020, 40(23): 2330001.
- Zhao Q C. Development of a mid-infrared methane and carbon dioxide dual-gas sensor system[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(23): 2330001.
- [5] Hodgkinson J, Smith R, Ho W, et al. A low cost, optically efficient carbon dioxide sensor based on nondispersive infra-red (NDIR) measurement at 4.2  $\mu\text{m}$  [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8439: 843919.
- [6] 梁永直, 刘修振, 容幸福, 等. 一种基于三椭球体吸收腔室结构的红外气体传感器: CN104359850A[P]. 2015-02-18.
- Liang Y Z, Liu X Z, Rong X F, et al. Infrared gas sensor based on three-ellipsoid absorption chamber structure: CN104359850A[P]. 2015-02-18.
- [7] Ye W L, Tu Z H, Xiao X P, et al. A NDIR mid-infrared methane sensor with a compact pentahedron gas-cell[J]. Sensors, 2020, 20(19): 5461.
- [8] 裴昱, 张加宏, 李敏, 等. 恒温 NDIR 二氧化碳气体传感器研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(2): 189-195.
- Pei Y, Zhang J H, Li M, et al. Research on constant temperature NDIR carbon dioxide gas sensor[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(2): 189-195.
- [9] 孙世岭. 基于非色散红外技术的二氧化碳传感器研究[J]. 仪表技术与传感器, 2021(4): 1-3.
- Sun S L. Research on carbon dioxide sensor based on nondispersive infrared technology[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(4): 1-3.
- [10] 袁博. 基于 NDIR 原理的 CO<sub>2</sub> 浓度传感器的制备与研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- Yuan B. A research and manufacturing of CO<sub>2</sub> sensor based on NDIR technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019.
- [11] 梁钊铭. 矿用多气体浓度检测系统的研究与设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- Liang Z M. Research and design of mine multi-gas concentration detection system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [12] Tan Q L, Tang L C, Yang M L, et al. Three-gas detection system with IR optical sensor based on NDIR technology[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 74: 103-108.
- [13] 周芳娟. 304 不锈钢切削加工表面特性的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- Zhou F J. Research on machined surface characteristics of 304 stainless steel[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [14] 胡志威, 彭润玲, 秦汉, 等. LightTools 软件在均匀光分布的照明系统设计中的应用[J]. 光学仪器, 2012, 34(4): 49-53.
- Hu Z W, Peng R L, Qin H, et al. The application of LightTools software in uniform light distribution of the lighting system design[J]. Optical Instruments, 2012, 34(4): 49-53.
- [15] 刘洪兴, 任建伟, 李宪圣, 等. 基于 LightTools 的大口径积分球辐射特性仿真[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(4): 960-965.
- Liu H X, Ren J W, Li X S, et al. Radiometric characteristics simulation of large aperture integrating sphere based on LightTools[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(4): 960-965.
- [16] 袁博, 袁宇鹏, 张祖伟, 等. 基于差分吸收检测技术的非分散红外 CO<sub>2</sub> 呼吸气体传感器[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(1): 118-125.
- Yuan B, Yuan Y P, Zhang Z W, et al. Non-dispersive infrared CO<sub>2</sub> breathing gas sensor based on differential absorption detection technology[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(1): 118-125.
- [17] Park J S, Cho H C, Yi S H. NDIR CO<sub>2</sub> gas sensor with improved temperature compensation[J]. Procedia Engineering, 2010, 5: 303-306.
- [18] 陈晨, 张玉钧, 何莹, 等. 机动车尾气 NDIR 传感器性能仿真分析[J]. 红外技术, 2017, 39(6): 567-573.
- Chen C, Zhang Y J, He Y, et al. Performance simulation analysis of NDIR sensor for vehicle exhaust [J]. Infrared Technology, 2017, 39(6): 567-573.