

空芯光纤气体传感气室的优化设计

周佳琦 陆维佳 孙帮山 石艺尉

(复旦大学信息科学与工程学院, 上海 200433)

摘要 波导式光学吸收腔在气体和液体浓度测量等领域有广泛的应用前景。空芯光纤作为光学吸收腔具有很多优点。空芯光纤的参数与传感系统的性能有直接的关系。提出了一种能同时考虑空芯光纤的损耗和系统信噪比的数学模型。从理论上分析了光纤的长度、内径、目标气体浓度以及输入光场能量分布等因素对传感系统信号输出强度和灵敏度的影响。给出的最优化参数为提高系统灵敏度和补偿系统误差提供了参考。

关键词 光学器件;空芯光纤;优化设计;吸收光谱传感;信噪比

中图分类号 TN252 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0222008

Optimization of Hollow Fiber as Absorption Cell for Gas Sensing

Zhou Jiaqi Lu Weijia Sun Bangshan Shi Yiwei

(School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract Optical waveguide has a promising application as absorption cell in concentration measurement for gases and liquids. Hollow fiber has many advantages when it is used as the absorption cell for spectroscopic gas sensing. The characteristics of the sensing system are directly related to various parameters of the hollow fiber. A mathematical model is proposed considering both the transmission loss of the hollow fiber and the signal-to-noise ratio of the system. Theoretical analysis is made for the dependence of the output intensity and sensitivity on the fiber parameters such as length and inner-diameter, the concentration of target gas, as well as the intensity distribution of light source. Several important results are obtained from the simulation, which provide optimizing methods for the sensing system and algorithms for error compensation.

Key words optical device; hollow fibers; optimization; spectroscopic sensing; signal-to-noise ratio

OCIS codes 230.7370; 080.2720; 280.4788

1 引 言

利用光谱吸收法原理的气体传感器具有灵敏度高、气体选择性强、响应速度快和无损检测等特点。近年来国内外对这种方法进行了深入的研究^[1~9]。光谱吸收法测量物质浓度的理论根据是比尔-朗伯(Beer-Lambert)定律^[10,11],即物质对光的吸收与物质浓度和物质与光的作用距离成正比。而不同物质由于分子内部振动和转动的特异性,在不同频率处存在各自的吸收谱线^[1,2]。通过测量吸收谱线的位置和强度,可以同时确定物质的种类和浓度。

光学吸收腔是光谱吸收法测量系统的传感部件,吸收腔的特性直接影响系统的灵敏度和响应时间等重要性能。光学吸收腔的种类主要有怀特(White)腔与波导腔等。怀特气体吸收腔需要光学准直,难以在现场使用,并且腔体大,气体对流所需时间长,所以响应速度较慢^[3,12]。波导式吸收腔具有内径细、光程长、易于弯曲等优点,得到了广泛的研究和应用。目前应用于气体测量的波导式吸收腔主要有空芯光纤(HF)和空芯光子晶体带隙光纤(HC-PBF)等。两者都因其在红外波段的低损耗特

收稿日期: 2011-06-15; **收到修改稿日期**: 2011-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(60971014)资助课题。

作者简介: 周佳琦(1987—),男,硕士研究生,主要从事空芯光纤气体吸收腔方面的研究。

E-mail: 09210720106@fudan.edu.cn(中国光学学会会员号: S040421185A)

导师简介: 石艺尉(1963—),男,教授,主要从事中远红外光波导及其应用等方面的研究。E-mail: ywshi@fudan.edu.cn(中国光学学会会员号: S0401117835)

性^[7,13~15]在气体浓度的测量方面具有良好的应用前景。

目前对于空芯光纤作为气体传感吸收腔的研究主要关注波导制作工艺和具体实验测试。虽然已经在实验上论证了这种吸收腔的高灵敏度和快响应的特性,但缺乏系统的理论证明^[13]。在较早的光学吸收腔研究中,已经报道了实际测量吸收度与测量目标浓度之间存在的非线性关系^[16,17],与比尔-朗伯定律矛盾。这是由于存在波导损耗和系统噪声,测量动态范围存在限制。低浓度时,由于吸收信号太小被噪声淹没,所以存在最低可测量极限;高浓度时,吸收信号虽然很大,但是由于光强大部分被吸收,使得噪声对整体信号的影响更加明显,从而使输出结果在高浓度范围产生明显的非线性特征。有效光程率对波导式吸收腔的影响很大,但是对空芯光纤而言,波导损耗和系统信噪比(SNR)对于测试系统灵敏度的影响更明显。本文建立了空芯光纤作为波导式吸收腔的数学模型,在考虑实际信噪比等条件下,从理论上得出了影响吸收腔输出强度和灵敏度的各个因素。

2 空芯光纤作为波导式吸收腔的数学模型

传输损耗理论计算的基本模型如图1所示。设空芯光纤的内直径为 $2T$,入射角度为 θ ,光在波导中传输时损耗系数为

$$2\alpha(\theta) = \frac{1 - R(\theta)}{2T \cot \theta}, \quad (1)$$

其中 $R(\theta)$ 为有效反射率,它与p极化和s极化光的均值有关,即

$$R(\theta) = \frac{R_p(\theta) + R_s(\theta)}{2} \quad (2)$$

其中 $R_p(\theta)$ 与 $R_s(\theta)$ 与介质折射率有关^[13]。

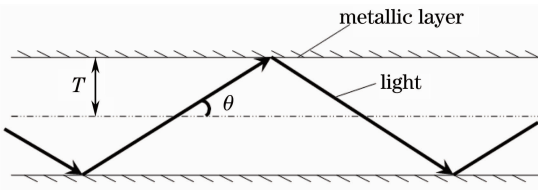


图1 传输损耗理论计算的基本模型

Fig. 1 Ray model for theoretical evaluation of transmission loss

设初始端光强分布为 $P_0(\theta)$,一般用作波导式吸收腔气体传感的光源根据系统不同、应用不同和造价要求不同而有所差异。常见的有激光器如外腔

量子级联激光器(EC-QCL)^[2,18~20]和红外傅里叶光谱仪(FTIR)^[7,20,21]等。它们的光强近似服从高斯分布^[13,22]。设 θ_d 为光束的半峰全宽发散角,有

$$P_0(\theta) = \frac{4\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\theta_d} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{\theta_d^2} \times 4 \ln 2\right) d\theta. \quad (3)$$

如图2所示,考虑入射光线角分布计算时,单位面积 dS 与 $\sin \theta$ 成正比。所以最终输出功率 $P(z)$ 可以表示为

$$P(z) = \frac{4\sqrt{\ln 2}}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\theta_d} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{\theta_d^2} \times 4 \ln 2\right) \times \exp[-2\alpha(\theta)z] \sin \theta d\theta, \quad (4)$$

而根据比尔-朗伯定律有

$$I = I_0 \times \exp(-\epsilon bc), \quad (5)$$

式中 ϵ 为气体吸收度, b 为有效作用光程, c 为被测物质浓度。

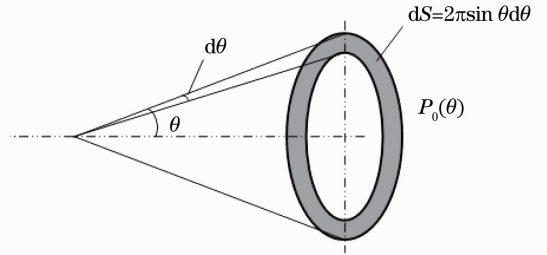


图2 考虑入射光线角分布计算的示意图

Fig. 2 Illustration for calculation considering an angular distribution of incident rays

对于通有待测气体的空芯光纤,计算损耗系数要考虑到该段光程中的气体吸收损耗,光程步长为 $2T/\sin \theta$ 。所以要对损耗系数进行修正

$$2\alpha'(\theta) = \frac{1 - A \times R(\theta)}{2T \cot(\theta)}. \quad (6)$$

利用比尔-朗伯定律,同时考虑有效光程率(EPLR)^[22] r_{EPLR} ,得出修正系数

$$A = \exp[-\epsilon c (2T/\sin \theta) \times r_{EPLR}]. \quad (7)$$

实验时一般分别测量通有背景气体(一般为氮气)时的输出能量 $P_{\text{Back}}(z)$ 和通有待测气体时的输出能量 $P_{\text{Gas}}(z)$,通过比较得出吸收谱线结果。

最终结果可以表示为

$$P(z) = 10 \lg \frac{P_{\text{Back}}(z)}{P_{\text{Gas}}(z)} = 10 \lg \frac{\int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{\theta_d^2} \times 4 \ln 2\right) \times \exp[-2\alpha(\theta)] \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{\theta_d^2} \times 4 \ln 2\right) \times \exp[-2\alpha'(\theta)] \sin \theta d\theta}. \quad (8)$$

测量时考虑噪声的影响,则测量背景时和实测目标气体时的信噪比可以表示为 $R_{SN}^{Back} = P_{Back}(z)/n_0$, $R_{SN}^{Gas} = P_{Gas}(z)/n_0$, 其中 n_0 为输出端噪声平均功率。

所以,实际测量时的最终输出(以 dB 为单位)可以表示为

$$P(z) = 10\lg \frac{P_{Back}(z) + n_0}{P_{Gas}(z) + n_0} = 10\lg \frac{P_{Back}(z) \times \left(1 + \frac{1}{R_{SN}^{Back}}\right)}{P_{Gas}(z) \times \left(1 + \frac{1}{R_{SN}^{Gas}}\right)} = 10\lg \frac{P_{Back}(z)}{P_{Gas}(z)} + 10\lg \left(1 + \frac{1}{R_{SN}^{Back}}\right) - 10\lg \left(1 + \frac{1}{R_{SN}^{Gas}}\right). \quad (9)$$

传感系统噪声主要取决于检测器的噪声,而氟化三甘氨酸硫酸酯(DTGS)与中链甘油三酯(MCT)这类检测器的噪声主要为宽带高斯白噪声^[23],在一次测量过程中其平均功率可视为常数。在目标波长处,当波导长度一定时, $P_{Back}(z)$ 为恒量,所以 R_{SN}^{Back} 也可视为不变。但是 $P_{Gas}(z)$ 会随着气体浓度的变化而变化,导致 R_{SN}^{Gas} 变化。所以在考虑噪声情况下,气体吸收强度与气体浓度在高浓度时会呈现非线性关系。

3 结果分析

根据(8)和(9)式,气体吸收强度与波导内径和长度、目标气体浓度以及输入光场能量分布等多个因素有关。下面分别对它们与气体吸收强度的关系进行计算。

1) 光源光束发散角与气体吸收强度关系

光源是传感系统的重要组成部分,其选择与系统的性能指标及造价密切相关。一般来说,激光光源的发散角小,非相干宽谱光源的发散角大。光源的发散角越大系统损耗越大,而发散角小的光源价格较高。

图 3(a)为不同信噪比下,气体吸收强度与输入光源光束发散角的仿真结果。仿真参数设定为长度 L

为 1 m 的 Ag/AgI 空芯光纤,内径 D 为 0.5 mm 或 1 mm,目标气体为体积分数为 0.1% 的二氧化碳。本文的系统信噪比恒量参数定义为,当波导为 1 m 长的 Ag/AgI 空芯光纤、通有背景氮气时,在检测端测得的信噪比;考虑信噪比为 10 和 100 这两种情况。 $R_{SN}=10$ 时,光束发散角变大,光纤中高次模增多,整体损耗增大,使气体吸收强度变小;同时发散角的变大使得光在气室中与气体作用的有效光程增大,使气体吸收强度变大。两种因素的平衡使得当内径较小时最终输出信号随着发散角的增大存在一个最小值。而内径较大的空芯光纤损耗较小,高次模的影响较弱,有效光程率成为主导因素。 $R_{SN}=100$ 时,由于信号能量比噪声能量大得多,对波导损耗抵抗性能较好,所以不论内径是 0.5 mm 还是 1 mm,最终输出随着有效光程率的增大而增大。图中标出了典型的 FTIR 和量子级联激光器(QCL)的光束发散角。可见 QCL 更适合于小内径的气室传感的应用^[1,7,24],而小内径的气室具有响应速度快的优势。但是 QCL 输出光谱范围较小,可调谐的 QCL 价格昂贵,无法实现吸收峰相隔较远的多气体同时测量^[1]。FTIR 的输出光谱几乎覆盖整个中红外波段,如果能够提高 FTIR 输出功率,同时将光源系统小型化,FTIR 将具有较好的应用前景。

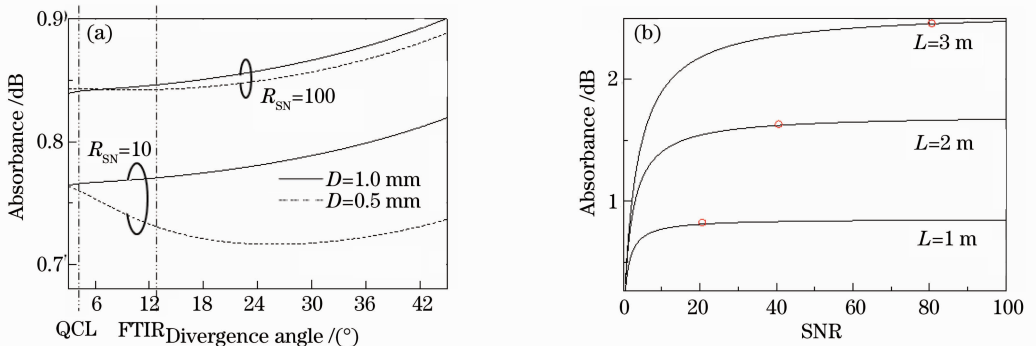


图 3 气体吸收强度与(a)输入光源光束发散角和(b)系统信噪比的关系

Fig. 3 Absorbance as a function of (a) divergence angle of the input light and (b) SNR of the measuring system

图 3(b)为波导长度分别为 1,2,3 m 时,气体吸收强度与系统信噪比的仿真结果。波导内径为 1 mm,二氧化碳气体体积分数为 0.1%,光源的光束发散角为 12.5°。气体吸收强度随着 SNR 的增大而增大。但是,存在有效点位置,即图中标出的 90%能量。当 SNR 小于有效点时,气体吸收强度随着 SNR 的增大变化明显;当 SNR 大于有效点时,气体吸收强度随着 SNR 的增大变化不明显。而且随着波导长度的增大,有效点的值也在增大。由于提高 SNR 值需要增加系统成本,因此应该根据不同的波导长度,合理地选取 SNR 值。

2) 波导内径与气体吸收强度关系

图 4 为不同信噪比下,气体吸收强度与波导内径的仿真结果。没有噪声或信噪比较大时,气体吸收强度受波导内径影响较小。而信噪比较小时,吸收强度会随着波导内径的增大明显增大。原因是信噪比越小,由波导内径变化所引起的波导损耗变化的影响也就越明显。对于便携式小型吸收式气敏传感,一般气室长度是米量级,内径的选择对于气室体积影响很大。为了获取较快的响应以进行实时测

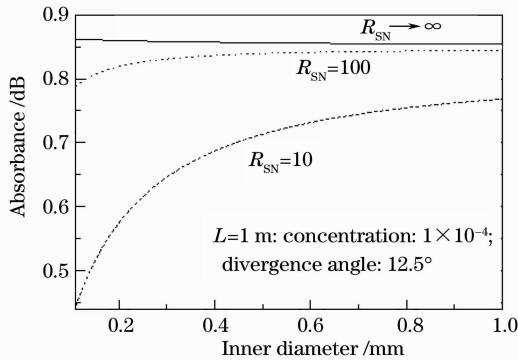


图 4 波导内径与气体吸收强度关系

Fig. 4 Absorbance as a function of inner diameter of the hollow fiber

量,内径应尽可能小。在这种应用条件下,需要系统具有较好的信噪比。

3) 目标气体浓度与气体吸收强度关系

图 5(a)为波导长度为 1 m 时,输出信号强度与目标气体浓度的关系,信噪比分别为 10,20,40,100 和无穷大(无噪声)。结果表明,在低浓度下,无论信噪比如何变化,吸收强度随着目标气体浓度近似线性变化,符合比尔-朗伯定律。但是信噪比的减小会导致系统灵敏度(直线的斜率)的变小。在高浓度下,结果呈非线性,实际测量时需要反馈补偿。该结果与国内其他研究小组在进行高浓度测量时出现的非线性实验结果相符^[12]。图 5(b)为波导长度为 2 m 时的仿真结果,与 1 m 时的趋势相同,但对于信噪比的要求更高。这是因为波导越长,光被气体吸收的能量就越大,到达接收端的信号能量就越小,对信噪比要求越高。

4) 波导长度和气体浓度对气体吸收强度的优化

图 6 为不同信噪比下,波导长度和气体浓度与气体吸收强度的仿真结果。图 6(a)是 SNR 为 20 情况下的仿真结果图。对于每个气体浓度都存在一个最佳波导长度值,使得气体吸收强度最大。因为考虑噪声时,有效作用距离的增长会提高光被气体吸收的能量,但同时到达接收端的信号能量会降低,信号能量会淹没在噪声中,所以,在实际存在噪声的情况下,波导长度不可能无限增长,而是存在一个最佳长度值,使得最终输出最大。另一方面,对于不同的浓度值,最佳长度值也不同。浓度越大,最佳波导长度值越小。这是因为对于相同的波导长度,浓度越大吸收也就越大,到达接收端的信号强度也就越小,更容易受噪声的影响。图 6(b)是 SNR 为 50 的仿真结果。在信噪比改善的情况下,对于每个浓度值,最佳波导长度值都变大了,而且整体信号能量也更大了。

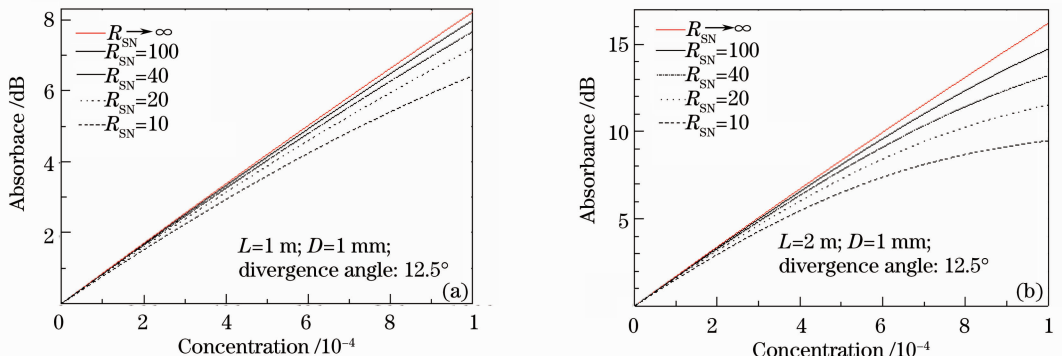


图 5 噪声对于目标气体浓度与气体吸收强度关系的影响。(a) L=1 m; (b) L=2 m

Fig. 5 Absorbance as a function of concentration with different SNRs. (a) L=1 m; (b) L=2 m

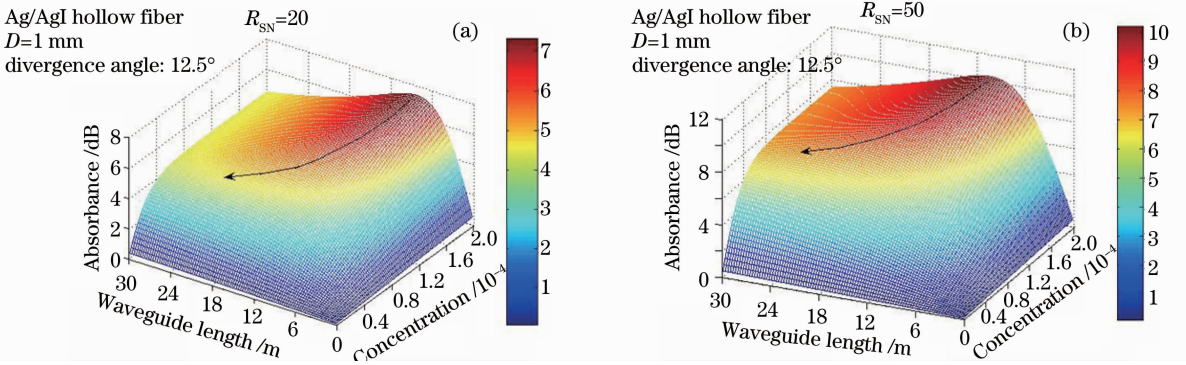


图6 波导长度和气体浓度与气体吸收强度关系。(a) $R_{SN}=20$; (b) $R_{SN}=50$

Fig. 6 Absorbance as a function of waveguide length and concentration for (a) $R_{SN}=20$ and (b) $R_{SN}=50$

该最佳波导长度值适用于对某个特定浓度值敏感的应用情况,如矿井下甲烷气体浓度的预警值,办公室里二氧化碳气体浓度的健康预警值,新装修的家庭环境中苯、甲苯气体浓度的健康预警值等。

5) 波导长度和气体浓度对系统灵敏度的优化

图7为不同信噪比下,波导长度和气体浓度与系统灵敏度的仿真结果。系统灵敏度定义为图5中表征目标气体浓度与气体吸收强度曲线的斜率大小。灵敏度越大,不同浓度气体反映在吸收信号上的区分度也就越大。同时灵敏度也表征了系统的测量极限(LOD)。图7(a)是 $R_{SN}=20$ 的仿真结果。对于每个气体浓度都存在一个最佳波导长度值,使得系统灵敏度最大。这是因为如果不存在噪声,由

比尔-朗伯定律系统灵敏度应正比于波导长度;当存在噪声时,波导长度就不能无限制地增大,波导长度越长,信号衰减就越大,噪声的影响也就越明显。同时,气体浓度越大,最佳波长值就越小。图7(b)是SNR为100的情况下的仿真结果。在信噪比改善的情况下,对于每个浓度值,最佳波导长度值都变大了,而且系统灵敏度也更大了。仿真结果与国际上已经发表的实验结果相符^[16]。文献[16]中实验测试的目标气体是一氧化碳,目标波长是 $2.3\ \mu\text{m}$,使用的是3 m长的Ag/AgI空芯光纤,与之对比的是10 cm长的Ag/AgI空芯光纤。实验结果表明波导长度增加30倍,灵敏度只增加了16倍。

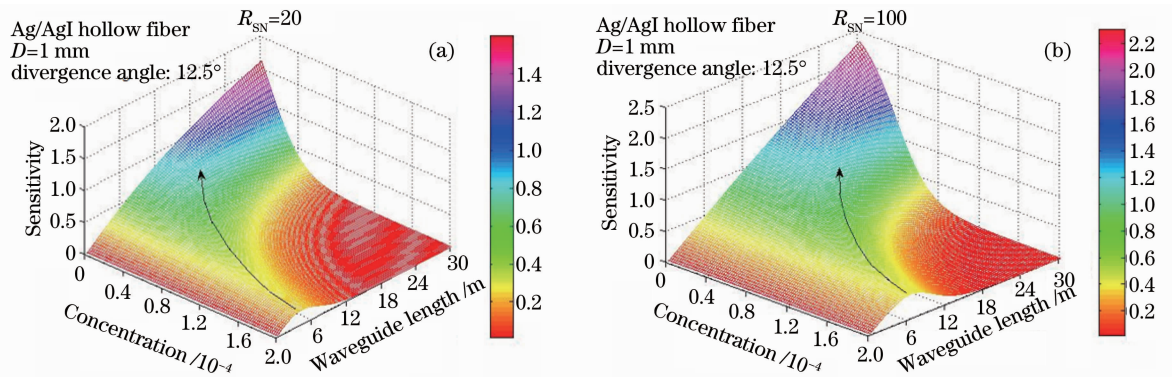


图7 波导长度和气体浓度与系统灵敏度关系。(a) $R_{SN}=20$; (b) $R_{SN}=100$

Fig. 7 Sensitivity as a function of waveguide length and concentration for (a) $R_{SN}=20$ and (b) $R_{SN}=100$

该最佳波导长度值适用于对某段特定浓度范围都敏感的应用情况,如工业生产中对于废气排放情况的实时监控,汽车尾气排放的实时监控,实验室应用环境下对整个实验过程的监控等。

4 结 论

利用数学建模的方法对以空芯光纤作为气体吸

收腔的气体吸收强度和系统灵敏度进行了初步的理论分析。计算了吸收腔系统的气体吸收强度与光束发散角、波导长度和内径、目标气体浓度等参数之间的关系;计算了吸收腔系统的灵敏度与波导长度的关系。QCL等激光器系统由于具有很低的光束发散角,所以在单一气体测量中比FTIR光源更具优势;但可调谐的QCL价格较高,所以目前FTIR在

多气体的识别和实时测量中具有优势。采用细径光纤的小型化传感系统对信噪比提出了更高的要求。增大吸收波导内径对提高系统整体性能有较大益处,但不利于系统响应时间的控制和系统的小型化。若系统要求的测量动态范围较大,则在测量较高浓度的气体时,系统信噪比劣化,必须进行非线性补偿。根据具体的应用环境和系统信噪比等情况可以优化选取最佳波导长度。

参 考 文 献

- 1 C. Young, S. S. Kim, B. Mizaikoff *et al.*. External cavity widely tunable quantum cascade laser based hollow waveguide gas sensors for multianalyte detection [J]. *Sensors and Actuators B*, 2009, **140**(1): 24~28
- 2 C. Charlton, B. Temelkuran, B. Mizaikoff *et al.*. Midinfrared sensors meet nanotechnology: trace gas sensing with quantum cascade lasers inside photonic band-gap hollow waveguides [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(19): 194102
- 3 Shi Yiwei, Zhou Zhiyun, Tang Xiaoli *et al.*. Design and fabrication of infrared hollow fibers for spectroscopic gas sensing [J]. *Infrared Millim. Waves*, 2009, **28**(2): 111~114
石艺尉, 周志云, 汤晓黎等. 吸收式气敏传感空芯光纤的设计和制备[J]. *红外与毫米波学报*, 2009, **28**(2): 111~114
- 4 Yu Kuanglu, Wu Chongqing, Wu Wenbin *et al.*. A novel multi-point fiber optics acetylene sensing system based on dense wavelength division multiplexers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0506003
余颀球, 吴重庆, 武文彬等. 基于波分复用的多点光纤乙炔传感系统 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0506003
- 5 Zhao Jianhua, Zhao Chongwen, Wei Zhoujun *et al.*. Study on monitoring multi-component toxic gases based on near-infrared spectroscopic method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 567~573
赵建华, 赵崇文, 魏周君等. 基于近红外光谱技术的多组分毒性气体检测研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 567~573
- 6 Cui Junhong, Ding Hui, Li Xianli *et al.*. Acetylene sensing system using hollow-core photonic crystal fiber as gas cell [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2262~2266
崔俊红, 丁 晖, 李仙丽等. 基于空芯光子晶体光纤气体吸收腔的乙炔检测系统[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2262~2266
- 7 S. S. Kim, N. Menegazzo, B. Mizaikoff *et al.*. Mid-infrared trace gas analysis with single-pass Fourier transform infrared hollow waveguide gas sensors [J]. *Appl. Spectroscopy*, 2009, **63**(3): 331~337
- 8 H. Manap, R. Muda, E. Lewis *et al.*. Ammonia sensing and a cross sensitivity evaluation with atmosphere gases using optical fiber sensor [J]. *Procedia Chemistry*, 2009, **1**(1): 959~962
- 9 Li Ang, Xie Pinhua, Liu Wenqing *et al.*. Monitoring of total emission volume from pollution sources based on passive differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica*

- Sinica*, 2007, **27**(9): 1537~1542
李 昂, 谢品华, 刘文清等. 被动差分光学吸收光谱法监测污染源排放总量研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1537~1542
- 10 T. G. Levitskaia, M. O' Hara, S. I. Sinkov *et al.*. Direct spectrophotometric analysis of Cr(VI) using a liquid waveguide capillary cell [J]. *Appl. Spectroscopy*, 2008, **62**(1): 107~115
- 11 Li Changhou. UV-VIS Spectrophotometer [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. 9~15
李昌厚. 紫外可见分光光度计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 9~15
- 12 Dong Lei, Yin Wangbao, Jia Suotang *et al.*. High-sensitivity, large dynamic range, auto-calibration methane optical sensor using a short confocal Fabry-Perot cavity [J]. *Sensors and Actuators B*, 2007, **127**(2): 350~357
- 13 Y. Matsuura, M. Saito, M. Miyagi. Loss characteristics of circular hollow waveguides for incoherent infrared light [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1989, **6**(3): 423~427
- 14 Y. Matsuura, J. A. Harrington. Hollow glass waveguides with three-layer dielectric coating fabricated by chemical vapor deposition [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(6): 1255~1259
- 15 J. P. Parry, B. C. Griffiths, D. P. Hand *et al.*. Towards practical gas sensing with micro-structured fibres [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, **20**(7): 075301
- 16 J. Chen, A. Hangauer, M. Fleischer *et al.*. Low-level and ultralow-volume hollow waveguide based carbon monoxide sensor [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(21): 3577~3579
- 17 M. Beiza, P. Dress, A. Sukhtskiy *et al.*. Linearity and effective optical path length of liquid waveguide capillary cells [C]. *SPIE*, 1999, **3856**: 271~281
- 18 K. T. V. Grattan, T. Sun. Fiber optic sensor technology: an overview [J]. *Sensors and Actuators A*, 2000, **82**(1-3): 40~61
- 19 S. Wu, A. Deev, M. Haight *et al.*. Hollow waveguide quantum cascade laser spectrometer as an online microliter sensor for gas chromatography [J]. *J. Chromatography A*, 2008, **1188**(2): 327~330
- 20 B. Mizaikoff. Mid-IR fiber-optic sensors [J]. *Analytical Chemistry*, 2003, **75**(11): 258A~267A
- 21 T. E. L. Smith, M. J. Wooster, D. W. T. Griffith *et al.*. Absolute accuracy and sensitivity analysis of OP-FTIR retrievals of CO₂, CH₄ and CO over concentrations representative of "clean air" and "polluted plumes" [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2011, **4**(1): 97~116
- 22 Zhou Jiaqi, Shi Yiwei. A study on effective path length ratio for waveguide absorption cell [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0222008
周佳琦, 石艺尉. 波导式吸收腔的有效光程率研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0222008
- 23 Weng Shifu. Fourier Transform Infrared Spectroscopy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. 56~68
翁诗甫. 傅里叶变换红外光谱仪[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 56~68
- 24 B. Mizaikoff, B. Temelkuran, M. Giovannini. Trace sensing with miniaturized mid-infrared sensors [C]. 5th IEEE Conference on Sensors, 2006. 331~333

栏目编辑: 谢 婧