基于柔性空芯光纤的小型化气体传感器系统

2016.2. version1.0

摘要 空芯光纤

Minimized Gas Sensor System Based on Flexible Hollow Waveguide

2016.2 Version1.0

Abstract：Optical Gas Sensor

# 1 引言

基于光谱吸收特性进行气体的检测与计量，在工业生产、环境质量检测、生物医学等方面都有着举足轻重的作用[[1]](#endnote-1)。相比于氧化、中和等利用化学变化的其他方法，光谱吸收式的气体检测有着灵敏度高、响应速度快、抗电磁干扰、危险系数低、无损检测等诸多优点。另外，在合理的设计情况下，还能够达到多气体检测的效果[[2]](#endnote-2)。该方法的理论基础为朗伯-比尔定律（Beer-Lambert Law），即介质对光的吸收与介质的浓度以及介质和光的作用距离成正比。

气体的光谱吸收需要合适的吸收腔，常见的吸收腔有Herriott腔、怀特腔、积分球、空芯光纤等。其中，空芯光纤的天然空芯通道既可以让气体分析物附着其中，又能够使得光从中通过。更好的是，空芯光纤细长而能够弯曲的腔体，有效的提高了传感器可达到的光程长度，也成为了小型化吸收式气体传感器的理想选择。

目前，对于基于空芯光纤的气体传感器有了针对红外特性、传感特性、性噪比等方面的研究[[3]](#endnote-3)。但

文中，我们分析了光纤长度、系统信噪比、弯曲半径、弯曲模型等变量对于传感特性的影响，并设计传感系统进行以甲烷气体为例进行实验验证。从而，对基于柔性空芯光纤的气体传感器的小型化提出了优化方案。

# 2 理论模型

基于传输损耗理论，假设空芯光纤的内径为2T，入射角度为，则光线在波导中的传输损耗为：

其中R值为有效反射率：

其中，和分别与p极化和s极化光的均值有关，因介质折射率而异。

假设入射端初始光强分布为，表征传感器的光源，其分布函数因光源种类、耦合方式、系统设计等而异。本文中系统采用红外傅里叶光谱仪（FTIR），其光强近似服从高斯分布。设为光束的半峰全宽发散角，则：

考虑系统衰减可知，输出端功率为：

根据朗伯-比尔定律：

其中，为气体吸收系数，b为光程长度，c为气体浓度。

在弯曲柔性空芯光纤作为小型化气体传感吸收腔时，会产生其所特有的附加弯曲损耗[[4]](#endnote-4)：

其中，r为弯曲半径，K为因材料而异的常数。

实际传感设备中，我们会利用充满背景气体（多为氮气）的损耗光谱作为背景，将通入待测气体后吸收光谱作为。因此，实际测量时所获得的实际输出可以表示为（以dB为单位）：

另外，考虑到实际系统噪声：

其中，光程长度利用有效光程率函数进行了修正。

对于气体传感系统，我们对表征系统的气体吸收强度求导得到系统灵敏度。在理想条件下，根据朗伯-比尔定律气体吸收强度与气体浓度呈线性关系。然而在实际情况中，由于上述各类因素的存在，灵敏度随

# 3. 系统搭建

# 4 结果分析

根据公式（2-n）推导，该小型化传感系统的输出与光源发散角、波导内径、波导长度、气体浓度、弯曲半径、波导长度、信噪比等变量相关。

光源发散角与系统所选择的光源直接相关。一般情况下，发散角越小的光源造价越高，其传感效果也越好[[5]](#endnote-5)。

## 波导内径

同样材质的波导，内径越小的柔韧性越好：

实物图：不同内径光纤弯曲图

**仿真图：内径（横轴）越大，吸收强度（纵轴）越高；不同弯曲半径区别（三条）**

波导长度

仿真图：三维：长度【存在最有长度】、吸收强度、气体浓度（弯曲半径固定）

弯曲半径

仿真图：三维：弯曲半径、吸收强度、气体浓度（长度1m）

考虑实际传感系统情况以及实验室现实条件，我们选取了FTIR作为系统光源，内径700的Ag/Ag 玻璃基底空芯光纤作为气室，甲烷气体3.33处的吸收峰作为检测对象搭建了如下的气体传感实验系统：

传感实验系统图

*针对检测波长范围进行了波导传输特性优化，*

*碘化前后对比（碘化实验细节）*

实验数据+

1. 弯曲半径

通过弯曲固定长度，改变弯曲角度来实现弯曲半径的变化。

弯曲半径越大，吸收强度降低，灵敏度增加。

1. 信噪比

通过降低耦合效率实现系统信噪比的降低，系统整体特性降低。

1. 弯曲长度优化

同一根光纤在同样的弯曲半径下，弯曲长度越长（其余部分保持水平不弯曲），吸收就越充分，灵敏度越高

1. 弯曲模型

正圆比椭圆有更优的灵敏度

# 4 结论

参考文献

Hodgkinson J, Tatam R P. Optical gas sensing: a review[J]. Measurement Science & Technology, 2012, 24(1):111-123.

1. [1] Allen M G 1998 Diode laser absorption sensors for

   gas-dynamic and combustion flows Meas. Sci. Technol.

   9 545–62

   [2] Laj P et al 2009 Measuring atmospheric composition change

   Atmos. Environ. 43 5351–414

   [3] Smith D and ˇSpanˇel P 2007 The challenge of breath analysis

   for clinical diagnosis and therapeutic monitoring Analyst

   132 390–6

   [4] Jones E 1987 The pellistor catalytic gas detector Solid State

   Gas Sensors ed P T Moseley and B C Tofield (Bristol:

   Adam Hilger) chapter 2

   气体检测的各种应用 [↑](#endnote-ref-1)
2. Wynne R M, Creedon K, Barabadi B, Vedururu S, Merritt Jand Ortega A 2008 Simultaneously sensing multiple gases using a single length of hollowcore photonic bandgap fiber with sub-minute response times Proc. SPIE 7056 70560W

   空芯光纤的多气体检测 [↑](#endnote-ref-2)
3. 曾旋, 刘炳红, 何宇婧,等. 近红外低损耗AgI/Ag空芯光纤的制作[J]. 光学学报, 2013(3):72-76.

   周； [↑](#endnote-ref-3)
4. 弯曲附加损耗 [↑](#endnote-ref-4)
5. 周佳琦, 陆维佳, 孙帮山,等. 空芯光纤气体传感气室的优化设计[J]. 光学学报, 2012(2):281-286. [↑](#endnote-ref-5)