

一种用于气体检测 MEMS 电容式 红外发光强度探测器

杨地委^{1,2}, 张正勇¹

(1 中国科学院 合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230031; 2 中国科学技术大学 自动化系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 文章提出了一种用于气体检测的 MEMS 电容式红外发光强度探测器。结合理论推导和仿真分析确定了该探测器的尺寸大小, 并对其制作工艺流程做了叙述。它基于气体的红外吸收热效应, 借助弹性薄膜的形变将热量变化转变为电容量变化, 再经基于运算放大器的电容微传感器检测电路以电压信号输出。将它与环境气室采用 MEMS 技术一体化, 能够得到体积小、精度高和可批量生产的气体检测装置。

关键词: 气动腔; 平板电容; 红外探测器; 微电子机械系统

中图分类号: TP212

文献标识码: B

文章编号: 1006-2394(2011)03-0068-03

A Kind of MEMS Capacitive Infrared Detector for Gas Detection

YANG Di-wei^{1,2}, ZHANG Zheng-yong¹

(1 Hefei Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

2 University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract In this paper, a MEMS capacitive infrared detector is presented. Its size dimension is determined by theoretical derivation and simulation analysis, and the process of machining techniques is illustrated. The basis of this detector is infrared thermal effect. The variation changes from thermal energy to capacitance through deformation of elastic film. The variation of capacitance is inputted to capacitive micro-sensor detecting circuit with operational amplifier, and then voltage is outputted. A gas detecting device, which is of small size, high accuracy and batch production, can be got by integrating this detector with a gas chamber through MEMS technology.

Key words air cavity; parallel-plate capacitor; infrared detector; MEMS

0 引言

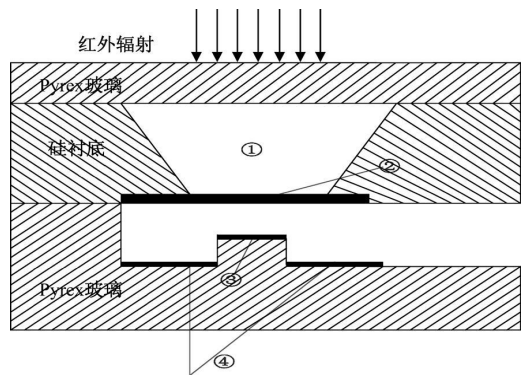
红外辐射是自然界普遍存在的一种能量交换形式。由于携带着信息的红外辐射只有被探测器接收并转换成电信号以后才能得到利用, 红外探测技术成为一个重要的研究领域。微电子技术和 MEMS(微电子机械系统)技术的不断进步, 使红外探测系统实现了小型化。红外微探测器按照敏感机理可分为光敏型和热敏型。光敏型基于光的量子效应探测发光强度的微弱变化, 对光源单色性要求较高, 且一般都需辅以冷却装置, 热敏型则能避免这些问题。在众多的热敏型探测器中, Golay 型探测器通过检测气体受热膨胀引发的弹性膜形变来感知红外辐射。从换能角度看, 它由热能转换为机械能, 因此探测信号对强电磁场不敏感; 同时, 它采用密封腔体, 能削弱湿度对探测精确度的影响。可见, Golay 型探测器更适用于强磁场、高湿度的苛刻环境。本文提出了一种用于气体检测的 MEMS 电容式红外发光强度探测器, 并结合理论

推导和仿真分析确定了该探测器的尺寸大小。

1 基本结构及工作原理

1.1 基本结构

该种 MEMS 电容式红外探测器主要包括两部分: 密封 CO₂ 的气动腔和平板电容器, 其结构如图 1 所示。



① 气动腔 ② 浓硼硅弹性薄膜(测量电容器上极板)
③ 测量电容器 A 极板 ④ 检测电容器 A 极板

图 1 红外探测器结构剖面图

收稿日期: 2010-12

作者简介: 杨地委(1984-), 女, 硕士研究生, 研究方向为微红外气体传感器与 MEMS 电容式红外探测器。

气动腔由刻蚀有深坑的硅基底与 Pyrex 玻璃键合得到, 平行板电容器由可动极板和固定极板构成。与气动腔相连的浓硼硅薄膜即是平行板电容器的可动极板, 固定极板则是在 Pyrex 玻璃上涂覆两部分有一定高度落差的金属薄膜层, 从而形成测量电容和参考电容的双电容差分测量结构。

1.2 工作原理

每种气体分子都有着独特的化学结构, 这就导致其对特定波段的红外辐射具有较强的吸收特性。当一定强度的红外光透过气动腔顶部的 Pyrex 玻璃窗口, 气动腔内的纯净气体吸收特定波段的红外辐射, 温度升高, 体积发生膨胀, 引发腔体底部的弹性浓硼硅薄膜发生形变。这一形变量也是平行板电容器极板间距的减小量, 进而电容量有所变化。采用红外脉冲光源, 在照射周期足够大的情况下, 气体体积发生较大变化, 引起弹性膜较大的形变, 通过检测电容变化量, 即可推知红外辐射强度。

2 气动腔和平板电容器的结构

2.1 结构实现工艺流程

气动腔和平板电容器是该种 MEMS 电容式红外探测器的关键组成部分, 本文综合考虑工艺可行性和探测性能指标确定了它们的结构。气动腔和平板电容器的工艺实现流程如图 2 所示, 具体步骤为:

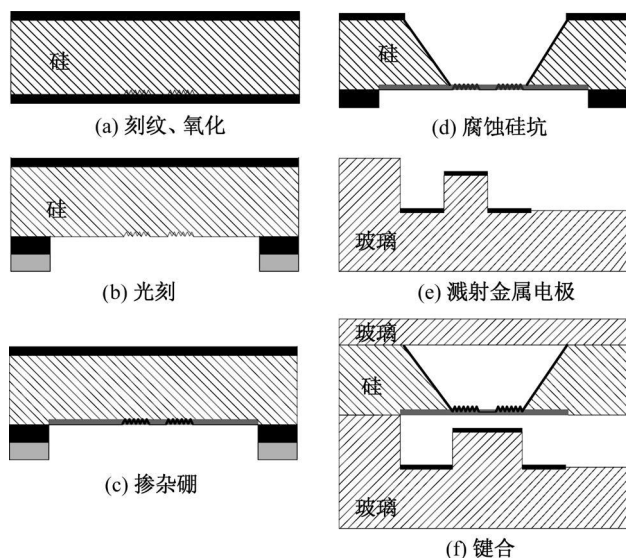


图 2 红外探测器结构实现的工艺流程图

(a) 在清洗过的 $p++$ 型硅衬底背面刻出纹状图形, 然后两面均热生长一层 SiO_2

(b) 在背面 SiO_2 表层的相应区域内涂覆光刻胶, 并做等离子体腐蚀;

(c) 在裸露出硅衬底的区域进行浓硼硅扩散, 扩散深度为 $1\mu m$

(d) 在硅衬底正面的对应区域涂覆光刻胶, 同做等离子体腐蚀, 再用碱性氢氧化钾腐蚀剂各向异性腐蚀裸露出来的 $p++$ 型硅, 直至掺杂浓硼硅层停止腐蚀, 得到深度为 $1mm$ 的硅坑, 然后除去剩余光刻胶;

(e) 刻蚀玻璃得到如图 2(e) 所示形状, 中间圆柱状结构与凹陷区域高度差为 $8\mu m$, 在圆柱体顶端和凹陷区域溅射铝电极;

(f) 将 (e) 得到的带有金属电极的玻璃和硅衬底的正面相对键合到一起, 形成平板电容器, 再将该结构置于纯净 CO_2 气体环境中, 用另一块玻璃板与硅坑键合密封, 形成气动腔。

对于上述制作工艺过程, 有以下几点说明:

(1) 采用浓硼硅自停止腐蚀技术生成气动腔底部的弹性薄膜。这种方法得到的弹性薄膜大面积均匀平坦, 且其厚度精确可控。但较小的硼原子替代性进入硅的晶格后, 使得硼掺杂层产生了拉伸应力, 弹性薄膜容易损毁。锗原子比硅原子大, 能够起到补偿作用, 所以可通过添加锗原子来减小掺杂硼的弹性薄膜层的内应力。

(2) 用于得到平板电容的键合工艺此处选用阳极键合。阳极键合过程中需要给硅和玻璃之间加电, 使得硅相对玻璃保持阳极, 该电源电压一般约为 $1.2kV$ 。这一高电压带来的强静电力往往会破坏平板电容的弹性可动极板, 造成弹性膜的畸变, 甚至有可能失效。为了解决这一问题, 采用局部静电屏蔽的方法, 即在键合过程中使硅衬底上悬空的弹性薄膜与相对应的玻璃上的金属电极带有等电位, 由此可很好地屏蔽对弹性薄膜的静电吸引, 有效地防止了阳极键合过程中静电力对不需要键合的可动微结构部分的破坏。

(3) 工艺流程中 (e) 得到的金属电极与弹性薄膜构成了两个平行板电容器。玻璃板上凸起的圆柱体上表面溅射的金属电极与弹性薄膜形成的是测量电容, 而玻璃板上凹陷部分的表面溅射的金属电极与弹性薄膜形成的是参考电容。双电容结构可以消除温度及其他环境因素带来的干扰, 使得检测到的输出信号更为精确。测量电容的极板面积比弹性薄膜全面积要小得多, 可减小压膜阻尼的影响; 且与测量电容固定极板相对的弹性薄膜部分形变较明显, 这就使得该探测器的分辨率大大提高。测量电容器金属电极的引线是在圆柱体中心打微孔注 Au 而参考电容器金属电极的引线是直接玻璃板上刻槽溅射 Au

2.2 结构尺寸

首先对发光强度变化与测量电容间的关系做如下推导。气动腔内气体受红外光照射吸收的热量与其温度变化 ΔT 间的关系为: $Q = Cm \Delta T$, C 为气动腔内纯净

气体的比热容, m 为气室内气体的质量。依据能量守恒原则可得:

$$I = \frac{K_m C_m U_0 \Delta \lambda}{\omega t} \Delta T \quad (1)$$

对于气动腔内纯净气体从理想气体定律出发有:

$\frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta V}{V} \approx \frac{\Delta T}{T}$, 其中 P, T, V 分别是气动腔内气体的初始压强、温度和体积, 且有 $\Delta V = \frac{0.009575a^6}{D} \Delta P$, 则温致

压变系数 $C_p = \frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{104.4DV}{a^6 T}$, 弹性薄膜的形变量和压强变化量的关系式为: $d = \frac{a^4}{64D} \Delta P$, 皆代入式 (1) 可得

测量电容值 c 和发光强度 I 的对应关系为:

测量电容值 c 和发光强度 I 的对应关系为:

$$I = \frac{K_m C_m U_0 \Delta \lambda \xi T a^4}{1.63 \omega t c V}$$

式中: $K_m = 683 \text{ lm/W}$ 是波长为 555 nm 的光功当量, U_0 为红外光吸收峰波长 λ_0 处的频率, $\Delta \lambda$ 为吸收峰处的频谱宽度, ξ 为平板电容的介电常数, a 为弹性薄膜的边长, ω 为红外光的辐射立体角, t 为辐射时长。

结合以上的理论推导结果, 用 ANSYS 软件对浓硼硅薄膜的变形情况进行模拟仿真, 可知, 腔体深度 h 在 MEMS 工艺实现范围内取 1 mm ; 弹性薄膜的面积 S 越大, 探测器灵敏度就越高, 但同时会增大压膜阻尼, 折中取为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$; 玻璃板上作为测量电容下极板的面积为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 测量电容的极板间距为 $2 \mu \text{m}$, 则参考电容器的极板间距为 $10 \mu \text{m}$, 溅射金属电极层的厚度为 50 nm , 弹性薄膜的厚度为 $1 \mu \text{m}$ 。

3 红外探测器性能测试电路和方法

该红外探测器是基于平行板电容器极板间距离变化的电容式微传感器, 输出电容值很小。采用如图 3 所示的基于运算放大器的电容微传感器检测电路, 杂散电容 C_{s1} 和 C_{s2} 的存在不会影响检测输出, 此外, 对探

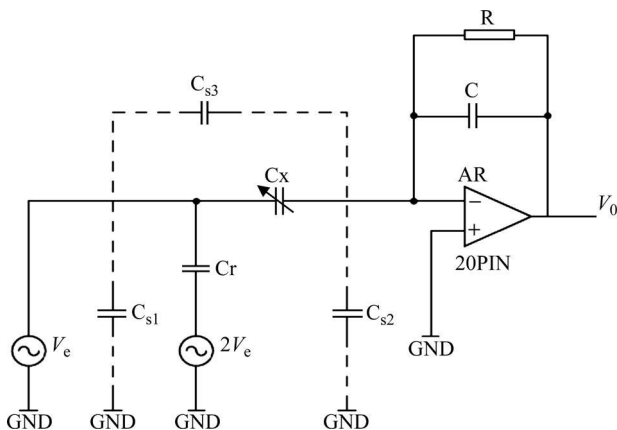


图 3 基于运算放大器的电容微传感器检测电路

测器引线进行屏蔽可降低杂散电容 C_{s3} 的大小。已知电容量与极板间距之间呈非线性关系, 但检测电路的输出与极板间距离为线性关系。

忽略 R 及 C_{s3} 的影响, 输出电压与红外探测器电容成正比 (与极板间距离成反比), 即 $v_0 = -v_e \frac{C_x - C_r}{C}$, 由该式可知, 参考电容量 C_r 的存在能够消除

温度等环境因素对检测电路输出电压的干扰。测试方法是: 用脉冲调制的红外光经探测器气动腔端的透射玻璃辐射气动腔内的气体, 另一端平板电容引线在上述电容检测电路相连, 测量不同脉冲调制周期 (即不同红外辐射强度) 下输出的电压值。由实验数据得出输出电压值和发光强度的关系曲线, 与理论推导的关系曲线对照, 从而确定探测器的测量范围、线性度和灵敏度等。

4 结论

本文所提出的红外探测器是利用 MEMS 技术制作的电容式微传感器, 具有双平板电容器结构。与双腔结构相比, 此种结构工艺上更易实现, 且消除干扰的效果也较好。文中所采用的电容检测电路应用到基于平板电容器极板间距离变化的电容式微传感器上, 不仅消除了温度等外界因素对检测输出的干扰, 还将电容量与极板间距的非线性关系转变为检测电路输出电压与极板间距的线性关系, 这无疑为准确分析红外探测器的性能带来了方便。这一 MEMS 电容式红外探测器能很好地满足环境气室和气动腔差动吸收的气体检测方法的需要, 它与环境气室可采用 MEMS 技术实现一体化, 从而得到体积小、精度高和可批量生产的气体检测装置。

参考文献:

- [1] 高翔, 徐静, 赵本刚. 微机械 Golay 腔型红外探测器的研究 [J]. 传感器与微系统, 2007(26): 20-23.
- [2] Yamashita K, Murata A, Okuyama M. Miniaturized Infrared Sensor Using Silicon Diaphragm Based on Goly Cell [J]. Sensors and Actuators A, 1998(66): 29-32.
- [3] 琚雪梅, 张巍, 毕东云. 红外吸收型 CO_2 气体传感器的设计 [J]. 传感器技术, 2005, 24(8): 62-64.
- [4] 李立杰. 微机械薄膜的设计与制造 [J]. 微细加工技术, 1999(3): 45-48.
- [5] 赵林, 徐晨, 赵慧. 键合技术在微机械 Golay-cell 红外探测器中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2006(27): 936-939.
- [6] 孙立宁, 晏祖根, 陈立国. 电容式微位移传感器检测电路的设计 [J]. 机械与电子, 2005(1): 33-35.

(许雪军编发)