

光谱式 MEMS/CMOS 兼容气敏传感器

高超群 焦斌斌 刘茂哲 李全宝 杨 锴 石莎莉 李志刚 欧 毅 景玉鹏[†] 陈大鹏

(中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 光谱技术是化学分析的终极手段. 将光谱技术与 MEMS(micro-electro-mechanical systems)和 CMOS 技术结合是解决当前气敏传感器灵敏度低、选择性差、体积大、功耗高、不便于阵列化和高度集成以至于无梯度立体矢量探测能力等问题的有效手段. 本文介绍了一种制作于(110)硅片上的集成光谱式 MEMS/CMOS 兼容气敏传感器, 详述了该气敏传感器的工作原理、传感器结构和制造工艺.

关键词: MEMS; 气敏传感器; 光谱分析

PACC: 8280T; 0765G; 4283

中图分类号: TN4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2008)10-2043-07

1 引言

环境恶化引起的各类疾病给无数患病者带来痛苦, 威胁着人类的生命安全. 但是对于许多有毒有害或易燃易爆气体却缺乏高质量的气敏传感器. 以环境荷尔蒙为例, 到目前为止仍无有效的可用传感器. 为了准确监测气体环境并及时采取有效措施防止危险发生, 开发出优秀的便携式气敏传感器成为当前重要的科研任务^[1~3].

目前市场上主流的气敏传感器大多数是采用陶瓷工艺制造的, 主要利用敏感材料与目标气体发生氧化还原反应时电子浓度的变化达到气体检测的目的. 这类传感器的缺点是选择性低, 易受温度、湿度等环境因素的影响, 而且寿命短、体积大、功耗高, 难以大规模集成. 同时, 产品的灵敏度和功耗等特性与材料粉体颗粒大小有关, 需要引入复杂工艺, 成本昂贵, 不适合大量制备^[4,5], 难以实现对环境气体浓度梯度进行矢量分析.

近十几年成为研究热点的 MEMS(micro-electro-mechanical systems)气敏传感器, 继承了微电子技术的优势, 具有体积小、功耗低、产品性能一致性好, 以及易集成化、智能化的特点^[5]. 现有产品主要利用敏感材料与目标气体发生相互作用时电阻、电容、伏安特性等电学参量的变化或者振动频率等机械参量的变化达到气体检测的目的. 这类基于敏感膜的 MEMS 传感器灵敏度比较高, 但是其抗干扰能力很低, 而且存在着敏感膜的寿命和选择性之间的矛盾.

将光谱分析技术与 MEMS 技术结合起来, 开发 MEMS 光谱式气敏传感器, 实现光谱仪的微型化, 正是解决目前气敏传感器研发领域中上述一系列问题的一种选择. 利用气体对电磁辐射的选择性吸收引起原子分子特征光谱的强度变化来实现目标气体的定性检测和定量分析, 将从根本上解决现有气敏传感器误报率高和选择性低等致命问题. 制作于硅片上的微型光谱仪, 可

克服大型光谱仪体积大、成本高的缺点, 具有精度高、速度快、分析范围广、灵敏度高等一系列优点, 同时还具有可批量生产、便于推广等优势^[6~8]. 它将成为一种全面监测气体环境, 保障人们生活安全的有力工具.

光谱仪微型化领域已有不少研究实例, 如 Slobodan 等人^[9]发明的集成热电光谱仪和 Kong 等人^[10]实现的一体化光栅光谱仪等.

图 1 为 Slobodan 等人发明的热电光谱气敏传感器结构示意图. 图中, 1 是淀积在微桥上的钨膜, 为该传感器的光源; 2 为凹面光栅; 3 为红外光传播的硅波导层; 4 为辐射能量检测器, 检测器上有可吸附目标气体的薄膜. 薄膜所吸收的光强会依吸附于其上的气体浓度变化, 利用红外光的热效应, 经热电转换, 便得到了待测气体的浓度. 这种传感器, 将凹面光栅与热电探测器相集成, 整个传感器只有硬币大小, 但由于波导和凹面光栅的加工难度高, 其制作成本是很高的^[11]. 另外, 由于采用热电方式进行探测, 此传感器的灵敏度和响应速率会受到限制.

本文设计的光谱式 MEMS/CMOS 兼容气敏传感器采用参比结构, 以目标气体放电管为发射谱光源, 以

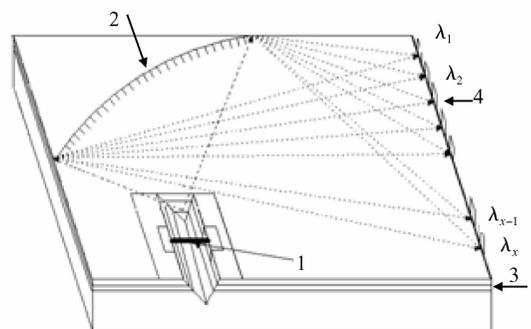


图 1 Slobodan 等人发明的热电光谱气敏传感器结构示意图
Fig.1 Main structures of integrated calorimetric spectrometer invented by Slobodan *et al*

[†] 通信作者. Email: jingyupeng@ime.ac.cn

2008-03-21 收到, 2008-04-22 定稿

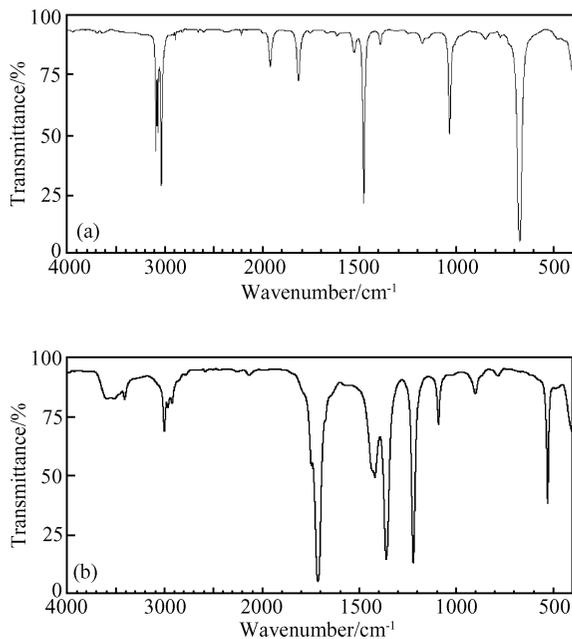


图 2 不同物质的红外谱 (a) 苯; (b) 丙酮

Fig.2 Infrared spectra of different substances (a) Benzene; (b) Acetone

不等间距光栅为波长选择性成像结构,由 CMOS 敏感单元实现光强检测.它具有体积小、灵敏度高的优点,便于通过阵列化实现气体浓度梯度分析,并与 CMOS 工艺兼容,符合科技发展趋势.

2 光谱式 MEMS/CMOS 兼容气敏传感器的工作原理

物质的内部运动,在外以辐射或吸收电磁辐射的形式表现出来^[12].当电子受激从量子化的高能级向低能级跃迁时,就辐射出一系列单一波长的电磁波,形成各种物质特殊的光谱序列;而处于基态的原子或分子吸收特定波长的光时,电子就从低能级的基态跃迁到激发态,宏观上表现为透射光的强度减小^[13].由于不同物质的能级结构不同,而且只有当光子的能量同两能级能量之差恰好满足 $\Delta E = h\nu$ 时才会出现某频率的光发射或光吸收,所以各种物质的发光和光吸收有很强的指纹性,据此可利用发射光谱或吸收光谱对不同的物质进行定性和定量分析.

图 2 为苯和丙酮在中红外区的透射谱^[14],以二者为例,可以看到它们的光谱图有很大的差别:苯的特征峰的位置主要在 $\nu = 3056\text{cm}^{-1}$ ($\lambda = 3.3\mu\text{m}$), $\nu = 1479\text{cm}^{-1}$ ($\lambda = 6.8\mu\text{m}$), $\nu = 674\text{cm}^{-1}$ ($\lambda = 14.8\mu\text{m}$) 等处,而丙酮的 3 个主要特征峰则位于 $\nu = 1715\text{cm}^{-1}$ ($\lambda = 5.8\mu\text{m}$), $\nu = 1363\text{cm}^{-1}$ ($\lambda = 7.3\mu\text{m}$), $\nu = 1223\text{cm}^{-1}$ ($\lambda = 8.2\mu\text{m}$).

物质对光吸收的定量关系,用朗伯-比尔定律来描述:

$$A = \log \frac{I_0}{I} = kbc \quad (1)$$

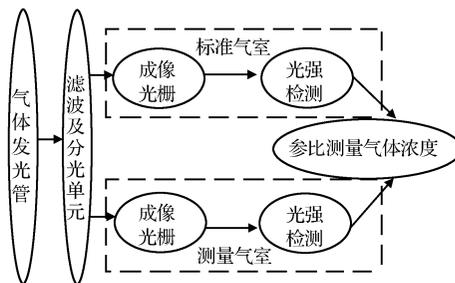


图 3 光谱式 MEMS/CMOS 兼容气敏传感器工作原理示意图

Fig.3 Working principle of MEMS/CMOS compatible gas sensors based on spectroscopy analysis

其中 A 为吸光度; I_0 为入射光强度; I 为透射光强度; b 为吸收路径的长度; c 为吸光物质的浓度; 比例常数 k 称为吸收系数,表示吸光质点对某波长的光的吸收能力.该公式是光谱定量分析的理论基础,其物理意义为:当单色光通过含有吸光物质的气体后,气体的吸光度与吸光物质的浓度以及吸收路径的长度成正比.值得注意的是,该公式是针对单色光进行定量分析的,如果光源的光色不纯,会使结果偏离朗伯-比尔定律,整个分析系统的线性度会下降^[13].

图 3 为本光谱式 MEMS/CMOS 兼容气敏传感器的工作原理示意图.利用现代半导体微加工工艺,将目标气体事先封装在一个微型气体发光管中,利用射频电源激发目标气体放电,使之按照其电子能级的结构发出一系列不同波长的光.由于目标气体被封装在单晶硅微型发光管中,所以目标气体发出的光中只有红外光(波长大于 $1.1\mu\text{m}$)能穿透发光管的管壁.然后将这一微型发光管透射出来的红外光分成对称的两路,一路通往封有标准气体的标准气室,另一路通往与环境空气相通的测量气室.标准气室和测量气室内均有成像光栅,在针对某一特征频率红外光的成像点上有 CMOS 光强检测单元.利用 MEMS 光刻技术,可以将光强检测单元制作在成像光栅后任意波长的成像点上进行高精度测量.

从图 3 中可以看到,标准气室和测量气室的内部结构一致,几何位置对称分布,这样可以在很大程度上减少实际测量过程中以共模形式出现的非理想因素的干扰(如光源的单色度和光强涨落、光路的精确度、温度引起的热胀冷缩、背景光和杂散光的影响以及界面处的反射和折射等).

通过标准气室的一路光,其吸光度为

$$A_0 = kbc_0 \quad (2)$$

由于标准气室中不含目标气体,而本传感器光源提供的红外光是由目标气体受激辐射发出的,所以通过该气室的这一路光的光吸收是比较低的.

通过测量气室的一路光,其吸光度为

$$A = kbc \quad (3)$$

该气室中的光吸收与待测气体中目标气体的含量有关:如果测量气室中含有目标气体,那么这一路光的部分能量将会被目标气体吸收,且目标气体浓度越高、光路路径越长,能量损失越多,光强降低得就越多.将这

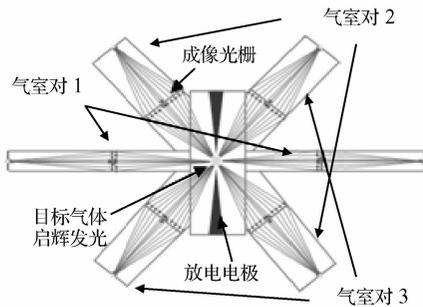


图 4 光谱式 MEMS/CMOS 兼容气敏传感器的结构示意图

Fig. 4 Main structures of MEMS/CMOS compatible gas sensors based on spectroscopy analysis

路光的吸光度与经过标准气室的一路光的吸光度进行比照,就可以得到待测气体中目标气体浓度 Δc 的信息:

$$\Delta A = kb(c - c_0) = kb\Delta c \quad (4)$$

很显然,上述差值越大,待测气体中目标气体浓度越高,差值越小,目标气体浓度越低。

3 光谱式 MEMS/CMOS 兼容气敏传感器的结构

光谱式 MEMS/CMOS 兼容气敏传感器的结构主要包括目标气体发光管、滤波单元、参比微气室对(包括标准气室及测量气室)、不等间距单色光成像光栅和光强检测单元等几部分。

本气敏传感器制作于(110)硅片上,以气体发光管为光源,以经化学抛光的(111)面竖墙为滤波器,以单晶硅立柱构成的不等间距竖直光栅为波长选择性成像单元,以光电二极管为光强检测单元。本传感器有 3 对微气室,分别针对目标气体 3 个特征波长红外光设计。由图 2 可知,若以苯为目标气体,则 3 个波长可分别选取 3.3、6.7 和 14.8 μm ;若以丙酮为目标气体,则 3 个波长分别选取 5.8、7.3 和 8.2 μm 。

图 4 为光谱式 MEMS/CMOS 兼容气敏传感器的结构示意图。如图所示,中央封闭结构为发光管,目标气体在电极间放电发光;连接各气室与发光管的管壁为光洁度和陡直度都很高的单晶硅(111)面竖墙。针对不同波长的红外光进行分析的各套气室的标准气室和测量气室均相对于光源对称。

发光管采用封闭结构,可降低电弧在危险气体测量现场引起爆炸的危险性;浓度测量使用参比式结构,用对称的检测手段可有效地减少共模信号的干扰,提高了传感器的灵敏度和线性度,扩大了测量范围,并且很大程度上降低了光源光强涨落、杂散光以及光在界面处的折射、反射等一系列非理想因素对传感器性能的影响;特征谱分析时,使用 3 对微气室对 3 个特征波长的红外光吸收情况同时检测,可以排除吸收峰重叠的物质干扰^[13],有效改善气敏传感器在选择性和误报率等方面的性能。

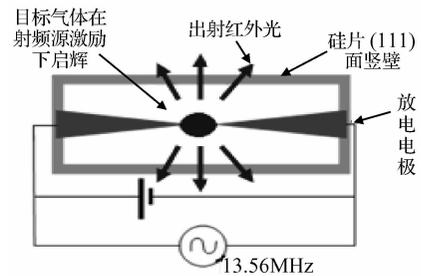


图 5 气体发光管的工作原理示意图

Fig. 5 Working principle of gas discharge lamps

3.1 目标气体发光管

光源是光谱分析中必不可少的结构之一,本文涉及的光谱式 MEMS/CMOS 兼容气敏传感器使用目标气体放电产生的辉光作为系统的光源,不同于已有微型光谱仪常见的连续谱光源^[6~8],本光源属特征谱光源,能量利用率高,其所发出的光对目标气体的敏感度好。

当在发光管电极间施加足够的电压时,发光管中的自由电子就会在电场作用下被加速而获得能量。高速运动的电子与填充在电极间的气体原子或分子发生第一类非弹性碰撞时,就把能量传给被碰撞的原子或分子,使其放电,并伴随辐射出不同波长的电磁波。如果采用交流电场来实现启辉,则可提高光源的稳定性,并可以在较大范围内通过改变电学参数来改变气体放电性质和激发特性,从而更有利于光谱分析^[12]。

本传感器的气体发光管是在(110)硅片上用 ICP 刻蚀设备刻出的 10 μm 深的封闭腔室,其内部 5 μm 深处有一对放电电极,并封有一个大气压的目标气体。在 13.56MHz 的射频源激励下,发光管电极间的气体将电离放电,并按照目标气体的电子能级辐射出不同频率的电磁波来。电极间隙为 1 μm ,发光管可近似为点光源。图 5 为气体发光管的工作原理示意图,电极间的气体在射频源激励下放电,红外光透过单晶硅管壁出射。

3.2 滤波单元

如前所述,朗伯-比尔定律是针对单色光进行定量分析的公式,所以实际光路中的光单色度越低,测量结果与公式偏离得就越多,而光源提供的光所含的频谱成分比较丰富,所以需要滤波。

本传感器的滤波单元是在(110)硅片上由 ICP 刻蚀设备刻蚀并经各项异性腐蚀溶液 TMAH(四甲基氢氧化铵)化学抛光得到的 10 μm 深的(111)面单晶硅竖墙,它们的光洁度很高,陡直度也很好。该竖墙作为发光管的两面管壁将发光管与标准气室和测量气室连接起来。

由于紫外及可见光波段的电磁波会因单晶硅的本征吸收而无法透过,所以用单晶硅竖墙可实现滤波器功能,只允许红外光(波长大于 1.1 μm)透过发光管。标准气室和测量气室相对于点光源的几何位置是对称的,对称的结构保证了两气室内的光路也是对称的。

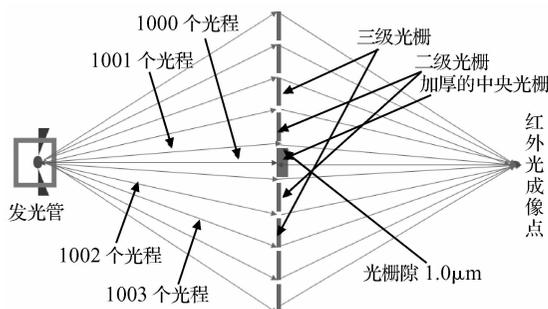


图 6 红外光成像光路示意图

Fig. 6 Light routes of infrared image

3.3 微气室对

微气室对包括标准气室和测量气室,是针对特定波长的红外光设计的一对参比单元,二者内部结构一致,相对于光源的几何位置对称.标准气室是一封闭结构,其内部封有一个大气压的标准气体,而测量气室则是与环境相通的开放结构.各气室内与光源相距 1000 倍波长处有由单晶硅立柱构成的单色光成像光栅,光栅主极大成像位置处有光强检测单元.

3.3.1 单色光成像光栅

竖直的不等间距单色光成像光栅,是本传感器的重要结构之一.该结构实现特定波长的红外光在特定位置处的成像,具有波长选择性聚焦功能.

由于光栅接收的是非平行光,因而其各级栅长是针对不同波长的红外光按照其自光源至光栅间隙的光程计算得到的.如图 6 所示,可近似为点光源的发光管发出的红外光到中央光栅的光程为 1000 倍波长,到第一个缝隙的光程为 1001 倍波长,到第 2 个缝隙的光程为 1002 倍波长,……光线经过光栅后,在距中央光栅 1000 倍波长处聚焦成像.中央光栅的厚度厚于其他各级光栅,可将直线传播的光线阻挡吸收.

表 1 中列出了针对苯的 3 个特征波长(3.3, 6.7 和 14.8 μm)的红外光吸收情况进行测量的微气室中,部分光栅长度的计算结果,详细的计算结果见附表.

上述光栅是在(110)硅片上由 ICP 设备刻出的一系列 10 μm 高的立柱,在光路中位于光源和光强测量单元之间,光栅间隙为 1 μm.

表 1 苯的特征波长红外光成像光栅部分计算结果

Table 1 Some calculating results of imaging grating of characteristic infrared of benzene

光栅级次	3.3 μm 红外光	6.7 μm 红外光	14.8 μm 红外光
	成像光栅各级 光栅长度/μm	成像光栅各级 光栅长度/μm	成像光栅各级 光栅长度/μm
1	294.2	607.4	1323
2	60.2	125.1	273.5
3	46.0	95.8	209.8
⋮	⋮	⋮	⋮
19	16.4	34.8	77.0
20	16.0	33.9	75.0

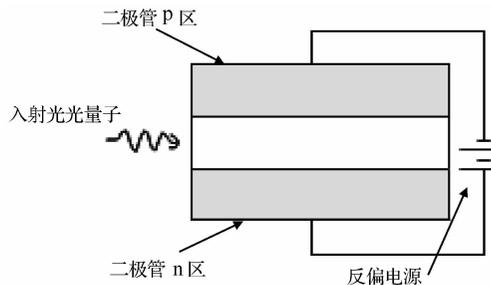


图 7 光强检测单元结构示意图

Fig. 7 Structures of energy intensity detecting unit

3.3.2 光强检测单元

光强检测单元是制作在各气室内成像光栅主极大像点处的光电二极管.当有红外光在光敏二极管反偏的 pn 结上成像时,入射光光子会激发出电子-空穴对,从而形成较大的光电流,实现光-电信号转换.入射红外光光强越强,注入 pn 结的光子越多,产生的光电流越大,反之亦然.相对于基于红外光热效应实现转换的其他的信号转换方式,光电转换具有灵敏度高的优势.图 7 为光强检测单元的结构示意图.

针对不同波长的红外光,利用微电子技术的选择性掺杂技术,可对检测单元的敏感光长波限进行调节,突破材料禁带宽度的限制,达到预期的灵敏度和精度.

4 MEMS 光谱气敏传感器的制作工艺

该气敏传感器使用 MEMS 工艺在(110)硅片上进行加工.

首先,在(110)硅片上,采用预腐蚀定位法确定{111}晶向.光刻对版时,若图形方位与晶体内部实际(111)晶面方向未严格对准,那么经 KOH 腐蚀出的侧面会出现侧棱(晶向误差大于 0.2°时就会导致很大的粗糙度^[15]),只有光滑的腐蚀侧面才是实际的(111)晶面.所以在定位区淀积一层氮化硅薄膜,其后光刻扇形定位区,定位图形由 60 个中心轴线相偏 0.2°的小矩形构成^[16].图 8 为上述氮化硅扇形定位窗口的部分图形,图中组成扇形的每个相邻矩形均互偏 0.2°.对定位区 ICP 刻蚀完成图形转移后,由 TMAH 对其进行各向异性腐

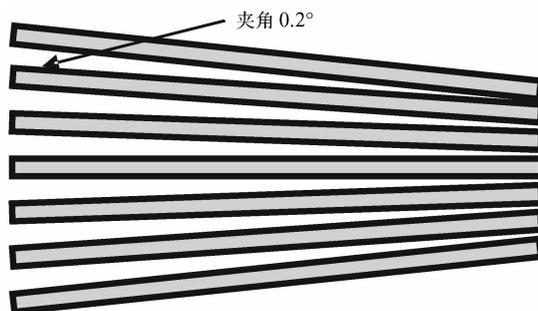


图 8 氮化硅扇形定位窗口示意图

Fig. 8 Sketch of fan-shaped nitride silicon windows for orientation

蚀,完全没有侧向腐蚀的氮化硅小矩形下暴露出的光滑单晶硅晶面即为(111)晶面。

其后,按照预腐蚀确定的实际晶向进行对准,在硅片上光强测量敏感单元位置上,采用标准工艺制作出 CMOS 敏感单元电路(本传感器采用后 MEMS 工艺)。(110)硅片和(100)硅片在电性能上,前者的空穴迁移率明显高于电子,而后者恰恰与之相反。借助于成熟的 CMOS 工艺及电路设计,可以在预定位置上制作出性能较好的光强检测敏感单元和必要的电路。

然后以铝为掩蔽层,ICP 刻蚀制作发光管、各气室及其内部的光栅等竖直结构:涂胶,晶向对准后,曝光显影,暴露出需要保护的部分;然后溅射一层铝膜,光刻胶剥离后,完成掩蔽层的制作;用 ICP 刻蚀设备向下刻 $5\mu\text{m}$ 。

接下来,在 $5\mu\text{m}$ 深处制作发光管放电电极和引线:涂胶,对准后曝光显影,暴露出电极及引线的形状,然后溅射 300nm 铝膜,光刻胶剥离后,完成电极和发光管引线的制作。继续用 ICP 设备向下刻蚀 $5\mu\text{m}$,完成所有气室竖墙和光栅等所有竖直结构的刻蚀。

再次光刻,用光刻胶保护适才制作的铝电极和发光管引线,在乙酸、硝酸和磷酸的混合溶液中,湿法腐蚀去除 ICP 刻蚀使用的铝掩蔽层。

去胶后,用 TMAH 溶液对暴露出的竖直面进行化学抛光,获得光洁度极高的(111)面单晶硅竖墙,完成发光管管壁等竖直结构的制作。

气室封闭:由于引线已制作完成,无法使用键合方式来实现结构封闭,故采用掩模封装的方法。在硅片上涂光刻胶后按照需要粘合的结构图形进行光刻,取另外一片硅片为封闭结构的盖子,将两片硅片压紧,在热板上进行加热键合。

两片硅片粘合完毕后,在盖子上用 ICP 刻蚀设备制作发光管和标准气室的充气孔,并在气孔附近挂焊球。向封闭结构充入需要的气体后,加热使气孔附近的焊球熔化,将气室封闭起来。其中发光管内部封入目标气体,标准气室内封入标准气体。

最后,传感器标定,基本结构制作完成。

由于单晶硅有严格的生长工艺,半导体技术有高精度定位光刻能力,我们可以在确定位置上很精确地制造出各种微结构,这是该传感器制作成功的关键。

5 结论

光谱技术是化学定量分析的权威手段,将其与 MEMS 技术结合,可获得其他类型的气敏传感器难以比拟的优良性能:红外光从侧面直接照在光电检测单元上,缩短了光生载流子的扩散时间,提高了传感器的响应速度和灵敏度;实现谱线面吸收,通过增加测量光束数目来扩大吸收路径的长度,提高吸光度,增大信号强度;基于被测物质的特征谱来进行定量分析,选择性好;不易受温度、湿度等环境因素的影响,抗干扰能力强,误报率低;可解决利用化学原理工作的传感器普遍存在的传感器中毒、反应受限、寿命低下等一系列问题,亦可解决敏感膜类传感器难以克服的吸附性与选择性

难以折中的困难;继承半导体技术的优势,借助微细加工技术,实现高精度、高选择性的气敏传感器;体积小、功耗低,将器件集成阵列化,可实现对气体浓度梯度的测量;与 CMOS 工艺整合,将信号采集和信号处理集成到同一硅片上,可获得高性能、低成本的小型化传感器。

本光谱式 MEMS/CMOS 兼容气敏传感器易于推广到多种气体,只需要依据气体的特征光谱调整发光管内的气体和光栅参数,便可针对不同气体进行分析,而无须对工艺进行大量更改。由于单个器件体积小、功耗低,可在硅片上制作大规模传感器矩阵,阵元针对不同气体设计,并采取二维的排布方式,结合成熟的 CMOS 信号处理电路,可实现多种气体浓度梯度同步检测的矢量分析系统。

目前该传感器正在开发制作中。

参考文献

- [1] Huang Mintong. Application of gas sensors in industrial and civil domains. *Building Material*, 2006, 4: 1 (in Chinese) [黄敏桐. 气敏传感器在工业和民用领域的应用. 福建建材, 2006, 4: 1]
- [2] Feng Baiqun, Liu Donghong, Huang Yinghui. Principle and application of gas sensors in fire damp explosion. *Coal Engineering*, 2006, 10: 99 (in Chinese) [冯柏群, 刘东红, 黄颖辉. 气敏传感器的原理及在预防煤矿瓦斯爆炸中的作用. 煤炭工程, 2006, 10: 99]
- [3] Jia Liangju, Ying Pengzhan, Xu Linmin, et al. The current research situation and development trend of gas sensor. *Coal Mine Machinery*, 2005, 4: 3 (in Chinese) [贾良菊, 应鹏展, 许林敏, 等. 气敏传感器的研究现状与发展趋势. 煤矿机械, 2005, 4: 3]
- [4] Hui Chun, Xu Ailan, Xu Yulong. MEMS gas sensors. *Journal of Functional Material*, 2003, 34(2): 133 (in Chinese) [惠春, 徐爱兰, 徐毓龙. MEMS 气敏传感器. 功能材料, 2003, 34(2): 133]
- [5] Chen Changqing, Hu Ming, Wu Xiawan. Development of gas-sensitive sensor. *Materials Review*, 2003, 17(1): 33 (in Chinese) [陈长庆, 胡明, 吴霞宛. 气敏传感器的发展. 材料导报, 2003, 17(1): 33]
- [6] Ju Hui, Wu Yihui. Development of micro spectrometers. *Micro-nanoelectronic Technology*, 2003, 1: 30 (in Chinese) [鞠辉, 吴一辉. 微型光谱仪的发展. 微纳电子技术, 2003, 1: 30]
- [7] Wang Yongqing, Ma Wen, Wang Haizhou, et al. Investigation and progress of microspectrometer based on micro mechanical system. *Metallurgical Analysis*, 2006, 26(4): 40 (in Chinese) [王永清, 马雯, 汪海舟, 等. 基于微电子机械系统微型光谱仪的研究与进展. 冶金分析, 2006, 26(4): 40]
- [8] Shi Junfeng, Hui Mei, Wang Dongsheng, et al. Micromation and applications of spectrometers. *Optical Technique*, 2003, 29(1): 13 (in Chinese) [史俊峰, 惠梅, 王东生, 等. 光谱仪的微型化及其应用. 光学技术, 2003, 29(1): 13]
- [9] Integrated calorimetric spectrometer, US patent, No. 19990267292
- [10] Kong S H, Wijngaards D D L, Wolfenbuttel R F. Infrared microspectrometer based on a diffraction grating. *Sensors and Actuators A*, 2001, 92: 88
- [11] <http://www.istis.sh.cn/list/list.aspx?id=775>
- [12] Sun Hanwen. Atomic spectroanalytical analysis. Beijing: Higher Education Press, 2002 (in Chinese) [孙汉文. 原子光谱分析. 北京: 高等教育出版社, 2002]
- [13] Li Longquan, Zhu Yurei, Jin Gu, et al. Quantitative chemical analysis. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2007 (in Chinese) [李龙泉, 朱玉瑞, 金谷, 等. 定量化学分析. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2007]
- [14] http://riodb01.ibase.aist.go.jp/sdbs/cgi-bin/direct_frame_top.cgi
- [15] Zhang Long, Dong Wei, Liu Caixia, et al. Fabrication of micro-mirror in (110) silicon. *Journal of Jilin University (Information*

Science Edition), 2003, 21(2): 97 (in Chinese) [张龙, 董玮, 刘彩霞, 等. 利用(110)硅片制作微反射镜. 吉林大学学报(信息科学版), 2003, 21(2): 97]

- [16] Zhang Long, Dong Wei, Zhang Xindong, et al. Fabrication technique of bulk-silicon micro-optical switch in (110) silicon. Chinese Journal of Semiconductors, 2004, 25(1): 99 (in Chinese) [张龙, 董玮, 张歆东, 等. 利用(110)硅片制作体硅微光开关的工艺研究. 半导体学报, 2004, 25(1): 99]

附录 A

表 A1 苯的特征波长红外光成像光栅计算结果

Table A1 Calculating results of imaging grating of characteristic infrared of benzene

光栅级次	3.3 μm 红外光 成像光栅各级 光栅长度/ μm	6.7 μm 红外光 成像光栅各级 光栅长度/ μm	14.8 μm 红外光 成像光栅各级 光栅长度/ μm
1	294.2	607.4	1323
2	60.2	125.1	273.5
3	46.0	95.8	209.8
4	38.6	80.7	176.81
5	34.0	71.0	155.8
6	30.6	64.2	140.8
7	28.1	59.0	129.5
8	26.1	54.9	120.6
9	24.5	51.5	113.3
10	23.1	48.7	107.2
11	22.0	46.3	102.0
12	21.0	44.2	97.5
13	20.1	42.4	93.5
14	19.3	40.8	90.0
15	18.6	39.3	86.9
16	18.0	38.1	84.0
17	17.4	36.9	81.5
18	16.9	35.8	79.2
19	16.4	34.8	77.0
20	16.0	33.9	75.0
21	15.5	33.1	73.2
22	15.2	32.3	71.5
23	14.8	31.6	69.9
24	14.5	30.9	68.5
25	14.2	30.3	67.1
26	13.9	29.7	65.8
27	13.6	29.1	64.6
28	13.4	28.6	63.4
29	13.1	28.1	62.3
30	12.9	27.6	61.3
31	12.7	27.2	60.3
32	12.5	26.7	59.4
33	12.3	26.3	58.5
34	12.1	25.9	57.6
35	11.9	25.6	56.8
36	11.7	25.2	56.0
37	11.6	24.9	55.3
38	11.4	24.5	54.6
39	11.2	24.2	53.9
40	11.1	23.9	53.2
41	10.9	23.6	52.6
42	10.8	23.3	52.0
43	10.7	23.1	51.4

光栅级次	3.3 μm 红外光 成像光栅各级 光栅长度/ μm	6.7 μm 红外光 成像光栅各级 光栅长度/ μm	14.8 μm 红外光 成像光栅各级 光栅长度/ μm
44	10.6	22.8	50.8
45	10.4	22.5	50.3
46	10.3	22.3	49.7
47	10.2	22.1	49.2
48	10.1	21.8	48.7
49	10.0	21.6	48.2
50	9.9	21.4	47.8
51	9.8	21.2	47.3
52	9.7	2.0	46.9
53	9.6	20.8	46.5
54	9.5	20.6	46.0
55	9.4	20.4	45.6
56	9.3	20.3	45.3
57	9.2	20.1	44.9
58	9.1	19.9	44.5
59	9.1	19.7	44.1
60	9.0	19.6	43.8
61	8.9	19.4	43.5
62	8.8	19.3	43.1
63	8.8	19.1	42.8
64	8.7	19.0	42.5
65	8.6	18.8	42.2
66	8.6	18.7	41.9
67	8.5	18.6	41.6
68	8.4	18.4	41.3
69	8.4	18.3	41.0
70	8.3	18.2	40.7
71	8.2	18.1	40.5
72	8.2	17.9	40.2
73	8.1	17.8	39.9
74	8.1	17.7	39.7
75	8.0	17.6	39.5
76	8.0	17.5	39.2
77	8.9	17.4	39.0
78	8.9	17.3	38.7
79	7.8	17.2	38.5
80	7.8	17.1	38.3
81	7.7	17.0	38.1
82	7.7	16.9	37.9
83	7.6	16.8	37.7
84	7.6	16.7	37.4
85	7.5	16.6	37.2
86	7.5	16.5	37.0
87	7.4	16.4	36.9
88	7.4	16.3	36.7
89	7.4	16.2	36.5
90	7.3	16.1	36.3
91	7.3	16.0	36.1
92	7.2	16.0	35.9
93	7.2	15.9	35.8
94	7.2	15.8	35.6
95	7.1	15.7	35.4
96	7.1	15.7	35.2
97	7.0	15.6	35.1
98	7.0	15.5	34.9
99	7.0	15.4	34.8
100	6.9	15.4	34.6

MEMS/CMOS Compatible Gas Sensors Based on Spectroscopy Analysis

Gao Chaoqun, Jiao Binbin, Liu Maozhe, Li Quanbao, Yang Kai, Shi Shali, Li Zhigang,
Ou Yi, Jing Yupeng[†], and Chen Dapeng

(*Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: A novel MEMS/CMOS compatible gas sensor based on spectroscopy analysis, which is fabricated on a (110) silicon wafer, is proposed. Its main principle, structure, and fabrications are introduced in detail. The gas sensor gains high sensitivity and selectivity but has low power consumption, and it should detect the grads of gas concentration for the mentioned advantages.

Key words: MEMS; gas sensor; spectroscopy analysis

PACC: 8280T; 0765G; 4283

Article ID: 0253-4177(2008)10-2043-07

[†] Corresponding author. Email: jingyupeng@ime.ac.cn

Received 21 March 2008, revised manuscript received 22 April 2008