



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107076706 A

(43)申请公布日 2017.08.18

(21)申请号 201580047286.1

(74)专利代理机构 北京品源专利代理有限公司
11332

(22)申请日 2015.08.25

代理人 王小衡 王天鹏

(30)优先权数据

14/480,986 2014.09.09 US

(51)Int.Cl.

G01N 29/02(2006.01)

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

G01N 29/036(2006.01)

2017.03.02

G01N 29/24(2006.01)

(86)PCT国际申请的申请数据

G01N 33/00(2006.01)

PCT/EP2015/069444 2015.08.25

(87)PCT国际申请的公布数据

W02016/037847 EN 2016.03.17

(71)申请人 AMS国际有限公司

地址 瑞士拉珀斯维尔

(72)发明人 卡斯珀·范·德·阿奥斯特

威廉·弗雷德里克·亚德里亚内
斯·贝什林

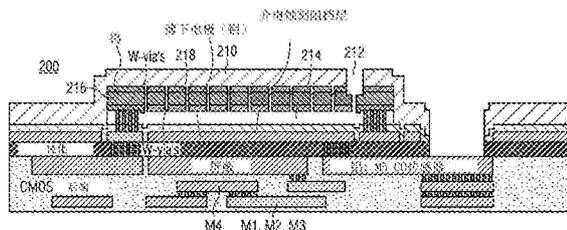
权利要求书2页 说明书13页 附图10页

(54)发明名称

谐振膜气体传感器及用于其的非暂时机器
可读存储介质

(57)摘要

一种气体传感器(200)包含腔体(214)并且被配置成感测所述腔体(214)中的气体混合物的摩尔质量、密度和粘度中的至少一个。此外,多个例示性实施例涉及一种用于测量二氧化碳(CO₂)水平的装置,其包括:第一振荡器组(520),其包含用于测量空气压力的第一传感器(250),其中所述第一传感器(250)包含第一密封膜(252),并且其中所述第一密封膜(252)覆盖密封的第一腔体(258);第二振荡器组(522),其包括用于测量第二未密封振荡膜(210)的谐振频率(f₂)的第二传感器(200),并且其中所述第二未密封膜(210)覆盖与所述第二传感器(200)外部的空气接触的第二腔体(214)。



1. 一种气体传感器(200),
其包括腔体(214)并且被配置成感测所述腔体(214)中的气体混合物的摩尔质量、密度和粘度中的至少一个。
2. 根据权利要求1所述的气体传感器(200),包括:
未密封振荡膜(210),其中所述未密封振荡膜(210)覆盖与所述气体传感器(200)外部的
气体混合物接触的所述腔体(214)。
3. 根据权利要求2所述的气体传感器(200),其被配置成测量所述未密封振荡膜(210)
的谐振频率(f_2),其中所述气体传感器(200)的谐振频率(f_2)用于确定所述气体混合物的
摩尔质量、密度和粘度中的至少一个。
4. 根据权利要求1至3中的一项所述的气体传感器(200),
其中所述气体传感器(200)使用在所述腔体(214)内俘获的气体混合物的挤压膜效应。
5. 根据权利要求1至4中的一项所述的气体传感器(200),
其中所述气体传感器(200)包括上电极(216)和下电极(218),并且被配置用于所述上
电极(218)的静电机械驱动。
6. 根据权利要求1至5中的一项所述的气体传感器(200),
包括靠近腔体(214)或与所述腔体(214)接触的加热器。
7. 根据权利要求6所述的气体传感器(200),
其中使用所述加热器来使温度循环。
8. 一种包括根据权利要求1所述的气体传感器(200)及压力传感器(250)的装置。
9. 一种用于测量二氧化碳(CO_2)水平的装置,包括:
 - 第一振荡器组(520),其包括用于测量空气压力的第一传感器(250),其中所述第一传
感器(250)包括第一密封膜(252),其中所述第一密封膜(252)覆盖密封的第一腔体(258);
 - 第二振荡器组(522),其包括用于测量第二未密封振荡膜(210)的谐振频率(f_2)的第
二传感器(200),其中所述第二未密封膜(210)覆盖与所述第二传感器(200)外部的空气接
触的第二腔体(214);
 - 混合器(514),其接受从所述第一振荡器组(520)输出的第一频率测量结果和从所述
第二振荡器组(522)输出的第二频率测量结果作为输入,并且输出所述第一频率测量结果
和所述第二频率测量结果的差值(f_d);以及
 - 电路(515),其接受所述差值(f_d)作为输入并且输出二氧化碳测量结果。
10. 根据权利要求9所述的装置,其中所述第一膜(252)和所述第二膜(210)在尺寸、形
状和制造过程中相同。
11. 根据权利要求9或10所述的装置,其中所述第一密封膜(252)为气密密封并且在压
力梯度下偏斜。
12. 根据权利要求9至11中的一项所述的装置,其中所述第一传感器(250)为压力传
感器,并且所述第二传感器(200)为气体传感器。
13. 一种用于测量二氧化碳(CO_2)水平的装置,包括:
 - 用于测量空气压力的第一传感器(250),其中所述第一传感器(250)包括密封膜
(252),其中所述密封膜(252)覆盖密封的第一腔体(258);
 - 用于测量未密封振荡膜(210)的谐振频率(f_2)的第二传感器(200),其中所述第二传

感器(200)包括加热器,其中所述未密封膜(210)覆盖与所述第二传感器(200)外部的空气接触的第二腔体(214),并且其中所述加热器与所述第二腔体(214)的内表面接触;

-混合器(514),其接受从所述第一传感器(250)输出的第一频率测量结果和从所述第二传感器(200)输出的第二频率测量结果作为输入,并且输出所述第一频率测量结果和所述第二频率测量结果的差值(f_d);以及

-电路(515),其接受所述差值(f_d)作为输入并且输出二氧化碳测量结果。

14.根据权利要求13所述的装置,其中所述第一膜(252)和所述第二膜(210)在尺寸、形状和制造过程上相同。

15.根据权利要求13或14所述的装置,其中所述第一密封膜(252)为气密密封并且在压力梯度下偏斜。

16.根据权利要求13至15中的一项所述的装置,其中所述第一传感器(250)为压力传感器,并且所述第二传感器(200)为气体传感器。

17.一种其上编码有由装置执行以用于测量二氧化碳(CO_2)水平的指令的有形且非暂时机器可读存储介质,其中所述有形且非暂时机器可读存储介质包括:

-用于使用第一传感器(250)获取第一空气压力测量结果的指令,其中所述第一传感器(250)包括密封膜(252);

-用于使用第二传感器(200)获取空气测量结果的第二谐振频率(f_2)的指令,其中所述第二传感器(200)包括未密封振荡膜(210),其中所述未密封膜(210)覆盖与所述第二传感器(200)外部的空气接触的腔体(214);

-用于计算第一频率测量结果和第二频率测量结果的差值(f_d)的指令;以及

-用于基于所述差值(f_d)计算二氧化碳测量结果的指令。

谐振膜气体传感器及用于其的非暂时机器可读存储介质

技术领域

[0001] 本申请涉及一种气体传感器、一种包含气体传感器的装置、一种用于测量二氧化碳水平的装置以及一种其上编码有指令以由装置执行来测量二氧化碳水平的有形且非暂时机器可读存储介质。

[0002] 本申请涉及交叉敏感减轻的谐振CO₂感测。本文所公开的各种例示性实施例一般涉及CO₂感测。

背景技术

[0003] 电子传感器可以许多方式来监测空气质量或气体成份；气体混合物的若干物理性质将随着成份的变化而变化。例如，传感器可基于使用热金属丝检测气体混合物的热导率和测量该金属丝到外界的热耗散。

[0004] 具体而言，CO₂感测可以许多方式工作。两种当前的方法包括：基于材料的方法，其中一种材料吸收CO₂，结果电容的变化，并且又其中金属丝温度通过测量电阻来读取——被加热的自由悬挂金属丝周围的空气混合物的变化导致介质的热导率的变化，由此导致热金属丝的冷却。另一种方法为CO₂的谐振感测，通常，此方法要求进行谐振的MEMS元件上的功能材料，以检测导致频率变化的物质变化。

[0005] 本专利申请的一个目的是提供一种气体传感器、一种包含气体传感器的装置、一种用于测量二氧化碳水平的装置以及一种其上编码有指令以由装置执行来以高准确度测量二氧化碳水平的有形且非暂时机器可读存储介质。

[0006] 所述目的通过独立权利要求的主题来实现。从属权利要求中描述了进一步的实施例。

[0007] 在一个实施例中，一种装置可通过对气体混合物的平均摩尔质量敏感而利用频率的精确感测的可用性，其中摩尔质量反映在装置的谐振频率中。然而，对于任何气体传感器，响应将随多重影响而变化，例如，气体压力、温度和/或相对湿度。摩尔质量传感器还将补偿交叉敏感。许多方法要求气体处于相对于传感器的特定状态，例如，低真空或小空间。对检测器内的气体流动的控制可能较为困难。在较高压力下和较大空间内（在微米范围内），分子在撞击传感器表面之前将彼此碰撞。

[0008] 在理想条件下，例如，在实验室或其它受控条件下，存在若干方式来测量气体混合物的CO₂含量。然而，在实地，条件很少为理想的。例如，摩尔质量影响空气中的粒子（碰撞的分子）的平均速度。而这又将影响粒子对其所遇到的壁（例如，传感器）的碰撞或撞击。该动态效应可表示为气膜刚度，以及气膜阻尼常数。质量因子或Q因子，谐振系统的相对带宽的测量结果影响了系统能够检测气体所在的范围——以为了能够测量较小频移，针对于具有足够高的Q较为重要。

[0009] 例如，在运行于真空中的装置中，使用Q=40000的谐振器能够以高分辨率来确定谐振频率（在频移检测中为次ppm准确度）。然而，当周围环境从真空变为常规空气时，Q显著下降。在空气中，相同的谐振器可展示Q=3900。通过此谐振器，1ppm-等级的频率检测是可

能的。然而,压力传感器膜使用不同类型的谐振器(弯曲模式而不是块模式),并且仅在真空中使用密封膜达到适当的Q等级。由于大量的原因,要求真空或其它特定环境变量以达到适当的Q等级对于真实世界条件中的使用可能是不切实际的,这不仅因为可能必须检测露天的变化条件。

[0010] 一种开口结构具有依赖于气体压力的谐振频率。然而,由于空气中的阻尼损耗(由于空气粘度),环境压力下的Q等级可约为200。即在 $Q=200$ 下,频率分辨率允许对谐振频率中的20ppm的相对位移的检测。然而,这意味着在周围环境条件下,200ppm粒子的 CO_2 变化将导致12ppm的频率变化,其已接近当前装置的此检测极限。在氧和氮为主要成份下,对任何其它气体的浓度变化的影响意味着摩尔质量中仅希望出现较小的变化。希望能够检测大约数十ppms (10s of ppms)的频移,即,仅在 CO_2 浓度将对频率产生影响的时候。数十ppms为缩写,其意为频移处于大约几十的量级,例如30、40、50等ppm。

[0011] 考虑到对基于频率的 CO_2 感测的当前期望,呈现了对各种例示性实施例的简要概述。在下文的发明内容中可进行一些简化和删节,其意欲突出和介绍各种例示性实施例的一些方面,但是非意欲限制本发明的范围。稍后的章节中将给出对优选例示性实施例的详细描述,其能够使本领域的普通技术人员作出和使用本发明性概念。

发明内容

[0012] 本发明的多个例示性实施例涉及关于膜周围的空气中的 CO_2 分子的量的振荡膜的频移。频移可与空气中的温度,压力和湿度波动成比例。在一些实施例中,谐振 CO_2 传感器可作为用于温度、湿度和压力的传感器组合的外接附件。本文所公开的各种例示性实施例大体上涉及一种克服对相对湿度的交叉敏感的方法。

[0013] 多个例示性实施例涉及一种用于测量二氧化碳(CO_2)水平的装置,包括:第一振荡器组,其包括用于测量空气压力的第一传感器,其中所述第一传感器包括第一密封膜,其中所述第一密封膜覆盖密封的第一腔体;第二振荡器组,其包括用于测量第二未密封振荡膜的谐振频率的第二传感器,其中所述第二未密封膜覆盖与所述第二传感器外部的空气接触的第二腔体;混合器,其接受从所述第一振荡器组输出的第一频率测量结果和从所述第二振荡器组输出的第二频率测量结果作为输入,并输出第一频率测量结果和第二频率测量结果的差值;以及电路,其接受所述差值作为输入并输出二氧化碳测量结果。

[0014] 在各种替代实施例中,所述第一膜和所述第二膜在尺寸、形状和制造过程上相同。

[0015] 在各种实施例中,测得所述第一膜和所述第二膜为 $200 \times 200 \mu m^2$ 。

[0016] 所述第一传感器的第一膜和所述第二传感器的第二膜可为矩形。

[0017] 可替代地,所述第一膜和所述第二膜具有介于 $50 \mu m$ 到 $1000 \mu m$ 间距的边长。可替代地,所述第一膜和所述第二膜具有介于 $100 \mu m$ 至 $300 \mu m$ 间距的边长。

[0018] 所述第一膜的不同边的边长可不同。所述第二膜的不同边的边长可不同。

[0019] 所述第一膜的边长可不同于或等于所述第二膜的边长。

[0020] 可替代地,所述第一和/或第二膜可为圆形。

[0021] 在替代实施例中,所述第一密封膜为气密密封并且在压力梯度下偏斜。

[0022] 在一些替代实施例中,在压力梯度下的偏斜包括在膜内部和膜外部之间的压力差下偏斜。

- [0023] 在一些替代实施例中,所述第二振荡器组进一步包括第一上电极和第二下电极。
- [0024] 所述第二传感器可包括第一上电极和第二下电极。
- [0025] 多个例示性实施例涉及一种用于测量二氧化碳(CO₂)水平的装置,其包括:用于测量空气压力的第一传感器,其中所述第一传感器包括密封膜,其中所述密封膜覆盖密封的第一腔体;用于测量未密封振荡膜的谐振频率的第二传感器,其中所述第二传感器包括加热器,其中所述未密封膜覆盖与所述第二传感器外部的空气接触的第二腔体,并且其中所述加热器与所述第二腔体的内表面接触;混合器,其接受从所述第一传感器输出的第一频率测量结果和从所述第二传感器输出的第二频率测量结果作为输入,并输出第一频率测量结果和第二频率测量结果的差值;以及电路,其接受所述差值作为输入并输出二氧化碳测量结果。
- [0026] 在各种替代实施例中,所述第一膜和所述第二膜在尺寸、形状和制造过程上相同。
- [0027] 在各种实施例中,测得所述第一膜和所述第二膜为200x200 μm^2 。
- [0028] 在替代实施例中,所述第一密封膜为气密密封并且在压力梯度下偏斜。
- [0029] 在一些替代实施例中,所述第二振荡器组进一步包括第一上电极和第二下电极。所述第二传感器可包括第一上电极和第二下电极。
- [0030] 多个例示性实施例涉及一种其上编码有由装置执行以用于测量二氧化碳(CO₂)水平的指令的有形且非暂时机器可读存储介质,其中所述有形且非暂时机器可读存储介质包括使用第一传感器获取第一空气压力测量结果的指令,其中所述第一传感器包括:密封膜;用于使用第二传感器获取空气测量结果的第二谐振频率的指令。其中所述第二传感器包括:未密封振荡膜,其中所述未密封膜覆盖与所述第二传感器外部的空气接触的腔体;用于计算第一频率测量结果和第二频率测量结果的差值的指令;以及用于基于所述差值计算二氧化碳测量结果的指令。
- [0031] 所述指令可以在线执行。
- [0032] 替代实施例包括:用于刚好在使用所述第二传感器测量空气的谐振频率之前对所述第二腔体进行加热的指令;以及,用于读取所述第一膜的温度的指令。
- [0033] 在一些实施例中,用于使用第二传感器获取空气测量结果的第二谐振频率的指令进一步包括用于启动所述装置的上电极的静电机械驱动的指令。
- [0034] 在其它实施例中,上电极的静电机械驱动进一步包含在所述装置的两个电极上施加DC加AC电压。
- [0035] 本发明的多个例示性实施例涉及一种测量二氧化碳(CO₂)水平的方法,其包括:使用第一传感器获取第一空气压力测量结果,其中所述第一传感器包括密封膜;使用第二传感器获取空气测量结果的第二谐振频率,其中所述第二传感器包括未密封振荡膜,其中所述未密封膜覆盖与所述第二传感器外部的空气接触的腔体;计算第一频率测量结果和第二频率测量结果的差值;以及,基于所述差值计算二氧化碳测量结果。
- [0036] 各种例示性方法进一步包括:刚好在使用所述第二传感器测量空气的谐振频率之前,对所述第二腔体进行加热;以及,读取所述第一膜的温度。
- [0037] 在多个替代实施例中,所述使用第二传感器获取空气测量结果的第二谐振频率的步骤进一步包括对上电极的静电机械驱动。
- [0038] 所述方法是在线并连续执行。所述步骤周期性地重复。

[0039] 在多个例示性实施例中,上电极的静电机械驱动进一步包括在两个电极上施加DC加AC电压。

[0040] 所述第一传感器可作为压力传感器来实现。所述第二传感器可作为气体传感器来实现。

[0041] 在一个实施例中,一种气体传感器包括腔体。所述气体传感器被配置成感测所述腔体内的气体混合物的摩尔质量、密度和粘度中的至少一个。

[0042] 因此,所述气体传感器可检测所述腔体内的气体混合物的物理或机械量或物理或机械性质。因此,所述气体传感器不含被设计用于吸收待测量气体的吸收层。有利地,可避免有时由吸收层的变化性质所导致的气体传感器的偏离。针对气体测量,气体传感器使用机械和/或物理原理,而非化学原理。由气体传感器确定的气体混合物的摩尔质量、粘度和密度为腔体内的气体混合物所包含的每种气体的函数。

[0043] 所述气体传感器可用于检测气体混合物的摩尔质量、密度和粘度中的至少一个,例如,用于过程监视或质量控制,例如监视工业气体混合物、天然气、民用气、合成气、压缩空气和/或医疗应用中所用的气体混合物。通过确定气体混合物的摩尔质量,还可确定相对分子质量(也称为相对摩尔质量或分子重量)。可确定气体混合物的纯度。

[0044] 气体混合物可由刚好一种具有该摩尔质量的气体组成。若气体混合物由至少两种气体组成,则通过所述气体传感器确定平均摩尔质量。然而,“摩尔质量”也用于本专利申请中的“平均摩尔质量”。

[0045] 在一个实施例中,气体混合物中的大多数气体的浓度在特定应用中是已知的或是近似已知的。在所述应用中,在气体混合物中仅一种气体或少数气体的浓度可能不是已知的并且可能是可变的。所述气体传感器可设计用于基于腔体内的气体混合物的摩尔质量、粘度或密度的确定来确定一种气体的浓度。所述气体可为二氧化碳、湿气或另一种气体。

[0046] 在一个实施例中,所述气体传感器包括振荡膜。所述振荡膜被制作成未密封振荡膜。所述未密封振荡膜覆盖所述腔体。所述腔体与气体传感器外部的的气体混合物接触,例如与气体传感器外部的空气接触。

[0047] 在一个实施例中,所述未密封振荡膜的第一表面与气体传感器外部的的气体混合物接触。所述未密封振荡膜包括至少一个间隙、开口、孔或孔径。膜的第二表面,并且因此的腔体,与气体传感器外部的的气体混合物接触。所述腔体内的气体混合物可与气体传感器外部的的气体混合物相同。

[0048] 所述未密封振荡膜执行取决于腔体内的气体混合物的摩尔质量和/或密度和/或粘度的振荡。气体混合物的机械/物理性质,例如摩尔质量、密度和粘度,影响了未密封振荡膜的振荡。其可影响由气体传感器测量的振荡的振幅、相位、谐振频率和质量因子中的至少一个。

[0049] 在一个实施例中,所述气体传感器测量所述未密封振荡膜的谐振频率。所述气体传感器的谐振频率用于确定所测量气体的摩尔质量和/或粘度和/或密度。有利地,能够以高准确度确定谐振频率。

[0050] 在一个实施例中,所述气体传感器使用在所述腔体内俘获的气体混合物的挤压膜效应。所述腔体作为浅腔来实现。所述腔体的高度较小。在一个实施例中,高度小于 $5\mu\text{m}$ 。可替代地,高度小于 $2\mu\text{m}$ 。可替代地,高度小于 $0.5\mu\text{m}$ 。高度的较小值导致腔体内的气体混合物

的挤压。配置所述腔体使得腔体内的气体混合物表现为类似挤压膜。高度可被称作腔体的指定间隙。

[0051] 在一个实施例中,所述气体传感器包括上电极和下电极。所述腔体布置在上电极和下电极之间。所述气体传感器被配置成提供上电极的静电机械驱动。上电极布置在未密封振荡膜中。在上电极和下电极之间AC和/或DC电压。当在上电极和下电极之间施加非零电压时,朝着下电极吸引上电极。仅在下电极和上电极之间具有0V电压的情况下,上电极和下电极才非彼此吸引。

[0052] 在一个实施例中,施加在上电极和下电极之间的交流电压或电流的频率不断变化,直到电压或电流的频率等于所述未密封振荡膜的谐振频率为止。在谐振频率的情况下,对于低于或高于谐振频率的频率,未密封振荡膜的振荡的振幅更高。

[0053] 在一个实施例中,所述气体传感器包括加热器。加热器靠近或与所述腔体接触。加热器可由未密封振荡膜包含。加热器可位于所述腔体的底侧上。可替代地,加热器可位于所述腔体的与所述未密封振荡膜相对的一侧。

[0054] 在一个实施例中,使用所述加热器来循环温度。因此,腔体内的气体混合物的温度通过加热器进行循环。对提供给加热器的电力进行调节以循环温度。所述腔体的容积内的气体混合物的压力近似恒定并且与温度无关。因此,通过对腔体内的气体混合物的温度进行循环,气体混合物中的气体分子或原子的数量以及因此的每种气体的浓度发生变化。气体混合物中的气体分子或原子的数量和不同气体的浓度与绝对温度的倒数 $1/T$ 成比例。因此,通过温度的循环而改变气体混合物的摩尔质量和/或密度和/或粘度。可在较低温度下测量谐振频率的第一值,而在较高温度下测量谐振频率的第二值。可使用与恒定温度下的谐振频率的测量结果相比的第一和第二值来确定与气体混合物相关的更多信息。

[0055] 在一个实施例中,一种装置包括所述气体传感器和压力传感器。所述压力传感器位于所述气体传感器附近。

[0056] 所述装置可设计用于确定所述气体混合物的摩尔质量、密度和粘度中的至少一个。可替代地或额外地,所述装置可设计用于使用气体传感器提供的信息和压力传感器提供的信息来确定一种气体的浓度。气体混合物的摩尔质量、密度和粘度不仅取决于气体混合物中不同气体的相对浓度,还取决于腔体内的压力。压力传感器提供压力传感器信号,其为气体传感器外部的压力函数的函数。由于气体传感器包括未密封振荡膜,所以腔体内的压力等于气体传感器外部的压力。因此,压力传感器信号为腔体内的压力函数的函数。通过除了气体传感器所提供的气体传感器信号之外还使用压力传感器信号(例如未密封振荡膜的谐振频率等),能够减小压力对气体浓度的确定的影响。

[0057] 在一个实施例中,一种半导体主体包括所述气体传感器。所述气体传感器被制作在所述半导体主体的表面。所述半导体主体可由硅制成。所述气体传感器可为硅传感器。

[0058] 所述半导体主体还可包括压力传感器。所述压力传感器可被制作在所述气体传感器制作在其上的所述半导体主体的相同表面。

[0059] 可替代地,又一半导体主体可包含压力传感器。所述又一半导体主体可由硅制成。所述气体传感器和所述压力传感器可被制作在不同的半导体主体上。

[0060] 显而易见,以此方式,多个例示性实施例可实现CO₂感测。

附图说明

[0061] 为了更好地理解各种例示性实施例,参考了附图,其中:

[0062] 图1提供了示出关于分子在撞击另一个分子前所行进的预期路程的粘性层流和自由分子流之间的区别的图示;

[0063] 图2A示出对空气打开的例示性气体传感器;

[0064] 图2B示出例示性密封空气压力传感器;

[0065] 图2C示出又一例示性气体传感器;

[0066] 图2D示出又一例示性压力传感器;

[0067] 图3示出用于例示性开放式和封闭式传感器的谐振频率测量结果;

[0068] 图4示出开放式和封闭式装置的阻尼对压力之间的关系;以及

[0069] 图5示出用于将两个传感器的测量结果进行组合的例示性系统或装置;

[0070] 图6A和6B为示出空气的主要成份的两个例示性表;

[0071] 图6C和6D为示出作为相对湿度和温度的函数的空气中的含水量的依赖性的例示性表。

具体实施方式

[0072] 鉴于上文所述,希望实现一种测量空气中的CO₂含量的装置,其可不依赖于任何特定压力、温度或湿度。仅检测气体混合物的摩尔质量的变化。具体地说,希望创建一种将期望信号从其它环境参数分离的方法。

[0073] 对任何气体传感器而言,测量结果将由于多重影响而变化,例如,气体压力、温度和相对湿度。这些交叉敏感可被减轻以实现大约200ppm的环境空气中的CO₂的ppm水平波动的检测。

[0074] 现参照附图,其中类似的数字表示类似的组件或步骤,并且其中公开了多个例示性实施例的较宽方面。

[0075] 图1示出关于分子在撞击另一个分子前所行进的预期路程的粘性层流和自由分子流之间的区别。当气体处于自由分子流状态时,分子的平均自由程大于气体周围的密封的最大容积尺寸。一个预期结果是分子碰撞壁,而不是彼此碰撞。这种状态对应于低真空和/或气体被封入其中的壁之间的较小距离。在常规空气压力下,气体以粘性(层)流的状态而动作。

[0076] 在较高压力下(图1的最左区域,110),分子在撞击壁或例如传感器表面等其它表面之前将彼此碰撞。粗略计算,如图1中所示出,在假定的1000mbar的标准海平面压力下,自由程为约100nm。

[0077] 在例如以检测器的微结构分离壁的微米范围的自由程内,希望高达约~20mbar以上等级的分子流。应注意,在约1 μ m的间隙中,分子将不会无撞击地从一个表面行进到另一个表面,而是将仅经历少量的碰撞。因此,对于约1 μ m的间隙,对分子平均速度的测量结果可足够精确到有价值。尽管在环境空气条件下间隙高度可减小到分子的平均自由程长度(即,~100nm),但此可对制造过程控制造成进一步的限制。

[0078] 图2A示出对空气打开的例示性气体传感器200,其中膜210通过膜210中的间隙212

与空气接触,因此不会由于外部施加的空气压力而偏斜。气体传感器200也称为第二传感器。

[0079] 图2B示出例示性密封空气压力传感器250,其中膜252气密密封并且在膜内部(密封腔体258内)和膜外部之间的压力差下偏斜。压力传感器200也称为第一传感器。在图2B的例示性密封压力传感器布置中,包含上电极254和下电极256的电容器的电容为上电极254的偏斜的函数,其继而为内部和外部之间的压力差的函数,其中上电极254可包含钨(W),下电极256可包含铝(Al)。

[0080] 然而,为了检测例如CO₂等环境气体,图2A所示的开放式结构必须使得在环境分子穿过传感器结构的间隙212之后能够对其进行检测,使得微腔体214与环境空气接触。在这种布置中,能够通过上电极216的静电机械驱动来探查并测量微腔体214中的空气薄膜的动态特征。静电机械驱动可通过在两个电极216、218上施加DC加AC电压来实现。

[0081] 在微米范围,低压力下的分子的行为可等于较高压力下的分子的行为,因为从自由分子流到黏性流的转变可能不可见。因此,在较小规模下,无需采用真空下的测量结果以实现适当的测量结果。图3示出用于例示性200x200 μm^2 的开放式和封闭式传感器210、250的谐振频率测量,如图2A和2B所示,其中测得微腔体214、258的高度为0.6 μm 。用于沿线310的图2A的开放式结构的数据示出上电极216或膜210的谐振频率的测量结果为空气压力的函数。因为气体传感器200的膜210在间隙212处开放,所以腔体214内的压力与气体传感器200外部的环境压力相同,图3中示出其处于1到1400mbar以上范围内的可变水平。膜210作为未密封振荡膜来实现。

[0082] 图2C示出气体传感器200的例示性实施例,其为图2A所示的气体传感器的进一步发展。气体传感器200包括腔体214(还可被称为“微腔体”)和未密封振荡膜210。未密封振荡膜210包括上电极216。气体传感器200还包括下电极218。腔体214由未密封振荡膜210和下电极218封闭。未密封振荡膜210包括间隙212,其还可被称为“端口”、“孔径”、“孔”或“开口”。可替代地,未密封振荡膜210包括超过一个的间隙/端口/孔径/孔/开口。气体混合物能够通过至少一个间隙212从气体传感器200的外部流向腔体214。

[0083] 上电极216可使用三个金属化薄膜220、221、222来实现。第一薄膜220靠近腔体214。第一薄膜220可为粘附层。上电极216的第二薄膜221可作为主金属化层来实现,例如,由钨或铝制成。上电极216的第三薄膜222可作为防反射涂层来实现。未密封振荡膜210包括隔膜层223,其覆盖上电极216。在上电极216和膜隔离层223中实现间隙212。

[0084] 气体传感器200包括底部隔离层224,其布置在下电极218和腔体214之间。底部隔离层224将下电极218与上电极216隔离。底部隔离层224被设计为介电蚀刻阻挡层。在蚀刻牺牲层以用于制作腔体214期间,蚀刻剂在底部隔离层224处停止。下电极218可由导电层225制作,例如,由铝。

[0085] 气体传感器200包括第一导线226,其可使用导电层225来制作。第一导线226通过第一通孔227耦合到上电极216。额外地,气体传感器200包括第二导线228,其由导电层225制作。第二导线228通过第二通孔229耦合到上电极216。

[0086] 额外地,气体传感器200包括钝化层230,其上布置下电极218。第一和第二导线226、228还布置在钝化层230上。额外地,气体传感器200包括金属化堆栈231,其还可被称为CMOS后端。金属化堆栈231包括至少一个金属化层232。气体传感器200包括屏蔽结构233,其

可使用第一金属化层232来制作。屏蔽结构233在下电极218的下方实现。屏蔽结构223通过钝化层225与下电极218分离。

[0087] 下电极218通过通孔236耦合到第一金属化层232所包含的导线。对应地,第一导线226通过通孔237耦合到第一金属化层232所包含的导线。金属化堆栈231可包含至少第二和第三金属化层234、235。第一金属化层232通过额外的通孔耦合到第二和第三金属化层234、235。

[0088] 气体传感器200还可包括一氧化碳传感器240。一氧化碳传感器240在第一金属化层232的内部实现。膜隔离层223、底部隔离层224和钝化层225包括开口,使得气体能够流到或扩散到一氧化碳传感器240。可替代地,气体传感器200不含一氧化碳传感器240。

[0089] 此外,气体传感器200包括半导体基板241。金属化堆栈231布置在半导体基板241上。半导体基板241可由硅制成。半导体基板241和金属化堆栈231可包含电路,如图5中详细示出。所述电路可为一个CMOS电路或多个CMOS电路。所述电路耦合到气体传感器200的上电极和下电极216、218。

[0090] 半导体主体242包括气体传感器200。气体传感器200作为硅传感器来实现。气体传感器200是基于微电-机械-系统技术来制作。因此,气体传感器200为微电-机械传感器,缩写为MEMS传感器。腔体214是通过牺牲层的蚀刻来实现。因此,气体传感器200是使用表面微加工技术来制作。通过牺牲层的厚度来确定腔体214的高度。腔体214的高度可小于 $5\mu\text{m}$ 。可替代地,腔体214的高度可小于 $2\mu\text{m}$ 或 $0.5\mu\text{m}$ 。由于腔体214的较低高度,当上电极216向下电极218移动时,腔体214内部的气体混合物表现得像挤压膜。

[0091] 未密封振荡膜210执行机械振荡,其为机械振动。膜210的中部的运动垂直于膜210的表面。通过向气体传感器200的上电极216提供电信号,例如交流电压或电流,导致未密封振荡膜210的振动。未密封振荡膜210可在腔体214的气体混合物中生成纵波,例如声波。

[0092] 气体传感器200可额外地包括温度传感器(未示出),用于测量腔体214附近的温度。

[0093] 气体传感器200可包括加热器。加热器可作为电阻加热器来实现。加热器还可作为金属电阻器来实现。加热器可为未密封振荡膜210的一部分。加热器可由上电极216来实现。上电极216被接触两次,即被第一导线226和第一通孔227以及被第二导线228和第二通孔229接触。因此,可通过第一和第二导线226、228向上电极216提供电流以进行加热。电流可通过由半导体基板214和金属化堆栈231实现的电路来生成。有利地,加热器通过所述腔体与金属化堆栈231和半导体基板240隔离。因此,对腔体222内的气体混合物的加热仅要求少量的功率。

[0094] 在替代实施例中(未示出),加热器被制作在膜隔离层223的顶部。加热器通过导电层225中额外的通孔和结构而耦合到所述电路。

[0095] 可替代地,加热器可在下电极218的下方实现,或者可使用下电极218作为加热器。

[0096] 图2D示出压力传感器250的例示性实施例,其为图2B所示实施例的进一步发展。压力传感器250被制作在半导体基板241上,其上还实现有气体传感器200。因此,一个半导体主体242包括气体传感器200以及压力传感器250。因此,压力传感器250的层对应于气体传感器200的层。压力传感器250包括密封膜252。密封膜252包括压力传感器250的上电极254。如图2C所解释,上电极254包括第一、第二和第三金属化薄膜220至222。此外,密封膜252包

括膜隔离层223。密封膜252不含间隙、开口、孔或孔径。因此,压力传感器250外部的的气体混合物不能扩散或流入压力传感器250的腔体258中。密封膜252由于压力传感器250外部的的气体混合物的压力与压力传感器250的腔体258内的气体混合物或真空之间的压力差而偏斜。上电极254通过通孔227耦合到压力传感器250的第一导线226。

[0097] 额外地,压力传感器250包括下电极256。此外,压力传感器250包括底部隔离层224。压力传感器250的下电极256通过通孔236耦合到第一金属化层232的导线。下电极256和第一导线226能够通过导电层225来实现。压力传感器250是使用与气体传感器200相同的半导体基板241来制作。第一导线226通过通孔237耦合到金属化层232的导线。金属化堆栈231布置在半导体基板241和钝化层230之间。

[0098] 压力传感器250包括屏蔽结构233,其可使用第一金属化层232来制作。屏蔽结构233在下电极256的下方实现。屏蔽结构223通过钝化层225与下电极256分离。

[0099] 压力传感器250还可包括又一氧化碳传感器243。

[0100] 将压力传感器250生成的压力传感器信号与由气体传感器200提供的气体传感器信号,例如气体传感器200的谐振频率,进行组合。压力传感器作为电容性压力传感器来实现。压力传感器250的电容值取决于压力传感器250外部的的气体混合物与腔体258内的气体混合物或真空之间的压力差。因此,能够使用电路(例如电容对电压转换器)来生成压力传感器信号,其可为数字或模拟信号。

[0101] 可替代地,可使用例如图5所示的振荡电路来生成压力传感器信号。因此,可向压力传感器250的上电极254提供交替信号,例如电流或电压。检测密封膜252的谐振频率作为压力传感器信号。因此,用于操作气体传感器200的电路可类似于或相同于用于操作压力传感器250的电路。

[0102] 在替代的未示出的实施例中,使用又一半导体基板来制作压力传感器250。因此,可使用不同的MEMS技术制造压力传感器250和气体传感器200。压力传感器250和气体传感器200布置在公共基板上的附近位置,例如印刷电路板、陶瓷或外壳。

[0103] 如图3可见,与由开放式气体传感器200测量的其下方的空气腔交互作用的膜的谐振频率取决于气体压力,使得:

$$[0104] \quad \omega^2 = \frac{k_{eff} + k_{film}}{m_{eff}} \text{ 并且 } k_{film} = \frac{c A p}{d}$$

[0105] 其中 k_{film} 等于气膜刚度, k_{eff} 等于机械刚度, m_{eff} 等于有效质量;并且 k_{film} 包括取决于气体种类的常数 c 、正前面积 A 、压力 p 和电极间距 d 。电极间距 d 等于腔体214的高度。在图3的压力范围内,频率的平方根性质是不可见的。频率-压力线的斜率与气体混合物的摩尔质量成比例。因此,可假定气体传感器2006的测量结果处于约1000mbar的额定常规空气压力,接着与真实压力的测量结果进行组合——当平均压力已知时,可使用气体传感器200的绝对谐振频率 f_2 来确定所测量气体的摩尔质量。

[0106] 下一步计算指示出,为了看出200ppm CO_2 的变化,待检测的频率变化应该是什么。气膜刚度和气膜阻尼系数可确定为不同气体的压力的函数,例如氦($M=4$)、氮($M=28$)和六氟乙烷($M=138$)。挤压膜阻尼也是气体种类的函数,但是气膜刚度,并且因此的 k_{film} -对- p 比率与 M 成比例。实际上,其与 \sqrt{M} 成比例,意为当在极低压力下,例如,介于0和1mbar之间时,氦、氮和六氟乙烷的 k_{film} -对- p 比率的曲线的相对斜率2、5.3和12。

[0107] 常规空气的主要成份为氧、氮、二氧化碳、氢、氩、氖、氦和氙(水蒸汽,尤其处于湿气的形式,也是环境空气的成份,但是稍后将进行讨论)。下表(图6A中的表1)示出主要成份的平均摩尔质量的变化,共计指示的总摩尔质量(28.971),及其摩尔分布;由于舍入,列出了百万分之一百万加2(应注意,假定此混合物中CO₂为303ppm)。

[0108] 在氧和氮为主要成份下,任何其它气体的浓度变化的影响意味着仅小变化在摩尔质量中产生。例如,如表1所示CO₂为303ppm之处,摩尔质量M=28.971。图6B中的表2示出CO₂水平的变化,同时保持粒子的总数恒定。

[0109] 如所示,CO₂浓度从303ppm到500ppm的变化,差值为197ppm,而同时假设由所有其它气体进行的比例调节,导致新的摩尔质量。此为对待检测质量变化的最坏情况估计,因为实际上更可能的情况时O₂将通过呼吸换得CO₂,并且N₂将保持不被影响,导致了稍微更显著的摩尔质量的变化。在表2所示的例示性情况下,相对变化为0.011%或110ppm,并且新摩尔质量M=28.974。尽管此为微小的差别,但是在明确地相同压力水平下的变化前后作出的测量结果将导致频率的显著变化。

[0110] 摩尔质量的变化反映了气膜的弹簧常数的变化,如下列方程式所反映:

$$[0111] \quad \omega^2 = \frac{k_{eff} + k_{film}}{m_{eff}}$$

[0112] 此值可从频率f下的气体传感器200的读数导出,其中 $f = \sqrt{\omega}$ 。例如,对于图2A中的开放式传感器200的配置中所示的240平方微米膜210, $k_{eff} = 1.3 \times 10^4$ [N/m]。在1bar下,气膜具有 $k_{film} = 3.6 \times 10^3$ [N/m]。在有效质量 $m_{eff} = 5.5 \times 10^{-10}$ [kg]下,此例示性装置的谐振频率 $f_{res} = \omega / 2\pi = 874$ kHz。若气体混合物的摩尔质量发生变化, k_{film} -对-p比率将发生变化,并因此1bar下的气膜刚度将不同。(参看,例如,Matthijs Suijlen, "Model-based design of MEMS resonant pressure sensors", NXP 2011, Thesis. <http://alexandria.tue.nl/extra2/716458.pdf>, last accessed August 14, 2014; 尤其图4(实验,其中气膜刚度和气膜阻尼系数被确定为压力的函数,对于不同的气体,测量结果仅高达1mbar,导致自由分子流的体系))。 k_{film} 的比例变化为110ppm,因此上述示例的频率将从874.000kHz变为874.010kHz,12ppm的变化。

[0113] 图4示出开放式和密封装置(例如传感器200和250)的阻尼对压力之间的关系。如上述,Q因子影响系统或装置能够检测气体的范围——为了能够测量较小的频移,具有足够高的Q较为重要,但是压力传感器膜仅在使用密封膜的真空中可达到适当的Q等级。如图4所示,对于具有密封膜的压力传感器,Q因子(示为阻尼因子1/Q)受到外部压力的影响,如线410所示,频率但是作为压力的函数几乎不变,如图3中的线312所示。因此,对于密封装置,例如压力传感器250,不存在额外的弹簧常数。然而,由于腔体214中存在/俘获的空气的挤压膜效应,开放式装置(例如气体传感器200)具有显著较高的频率和~200的较低Q(如线412所示)。如图4所示,对于开放式和封闭式装置两者,1/Q为压力的线性函数。1/Q曲线410、412的斜率之间的差值与腔体内所存在的空气分子的额外阻尼效应成比例。

[0114] 空气压力、温度和湿度均将改变可检测的谐振频率。为了检测大约10ppm的频移,仅当CO₂浓度会影响频率时,才应减轻这些因子的影响。可对传感器例如例示性气体传感器200进行修改以减轻这些因子并实现相比测量不变的外部空气时可能的频移而言使测量更小的频移成为可能的条件。

[0115] 例如,若并入气体传感器200和压力传感器250中的膜210、252良好匹配,例如,除密封或未密封的差别外均相同,从而使自其获得的测量结果处于近似相同的外部条件。在这种布置中,可以相对于开放式传感器200的充当绝对压力传感器250的密封膜252来补偿开放膜210的谐振频率的压力效应。

[0116] 同样,应注意,温度影响将对膜210和252具有相同的增量(Δ)——差信号将更不依赖于温度(T)。开放膜和密封膜210、252之间的剩余频率 f_{res} 的增量为确定开放膜210的 f_{res} 变化的良好方式,因为温度变化的影响将变小。由于腔体压力极低这一事实(如图3所示),密封膜252的谐振频率不是压力的函数,所以 f_{res} 的实际斜率(P)与腔体214内部所存在的气体的摩尔密度成正比。为了检测由于200ppm的气体成份变化导致的摩尔密度变化,压力测量结果中的误差应远小于200ppm。当前已知电容性压力传感器能够在1bar下实现2Pa,或20ppm的相对准确度。关于Q因子的信息还可用于提取关于取决于压力和分子质量的阻尼的信息。

[0117] 额外地,下文将关于湿气影响和减轻来讨论一种减轻可对CO₂检测产生影响的湿气和水分的方法。

[0118] 因为交叉敏感(例如,空气压力、温度和湿度)确定了传感器的准确度,所以允许将环境气体的谐振频率和压力程度与显著程度的准确度进行比较的系统或装置要求同时获取的来自开放式结构传感器200和密封膜传感器250两者的测量结果。

[0119] 为了从压力或温度变化区分气体-混合物-变化的影响,可检测频率的差值,如图5所示,其中,系统或装置将传感器的测量结果进行组合,例如,传感器200和250。将两个传感器膜510和512并入两个独立的振荡器回路520、522,也称为两个振荡器组。将(压力传感器250的)合成频率 f_1 和(气体或CO₂传感器200的)合成频率 f_2 馈入混合器514,产生差频 f_d 。如表1和2以及图3和4所示,恒定压力下的差频 f_d 与CO₂的变化成比例。在由 f_1 检测的压力水平进行变化下,可由初始校准程序生成存储的查找表,以设定用于所定义的CO₂水平下的 f_2 的值的参考点。

[0120] 如上述,环境空气含有水分子。水蒸汽占据空气中的大量的分子。水的摩尔质量为18,相比而言,CO₂为44。与在许多应用中可能必需检测的几百ppm的CO₂相比,水蒸汽的水平趋于极大,例如,在用于在人们中毒之前向人们警告CO₂水平升高的CO₂检测器中。例如,图6C中的表3列出了室温和~1bar压力下的具有可变相对湿度的水的ppm。

[0121] 含水量还是温度的强函数。例如,在图6D所示的表4中,仅温度发生变化。

[0122] 尽管ppm-对-RH%接近线性,但是ppm-对-温度曲线示出指数特性。在极高的RH%水平下,对于室温和1bar空气压力的条件,以ppm表示的含水量接近30000。若腔体214中的气体混合物很好地包括所施加的温度,可通过调节气体传感器200的温度来调节空气中水的ppm-水平。可将加热器例如焦耳加热器并入靠近或与腔体214接触的气体传感器200的结构中,从而恰好在测量谐振频率前蒸发掉被吸收到膜210上的所有水分。

[0123] 如上文所论述,气体传感器200感测浅腔214中的气体混合物(即,空气)的摩尔质量。摩尔质量被反映在谐振频率中。频率还取决于温度、RH%和压力,因此使用单独传感器来测量这些参数。为了去除水和温度的组合交叉敏感,所述系统或装置可使用一种调节方法,其中使用加热器来循环温度以及因此的含水量。应注意,若不存在直接(例如,液体)水源,则非通过升高温度来直接调节空气中的绝对水浓度——然而,若水膜从腔体内部的表

面蒸发,则水蒸汽分子的浓度将增大。除了由于波动的水含量所导致的更大量级的摩尔质量的诱发变化之外,传感器的频率由于其自身的温度依赖性还将遵循温度调节。然而,能够使用传感器200、250中的密封和开放膜的差频来补偿这些影响。温度调节将导致绝对湿度水平发生变化,而CO₂的ppm-水平保持恒定。

[0124] 如图5所示,所述系统或装置包括气体传感器200和压力传感器250。气体传感器200也可被称为“第二传感器”,压力传感器250也可被称为“第一传感器”。所述系统或装置包括第一和第二振荡器回路520、522。第一振荡器回路520包括压力传感器250,而第二振荡器回路522包括气体传感器200。额外地,第一振荡器回路520包括第一放大器523。第二振荡器回路522包括第二放大器524。第一和第二放大器523、524作为增益放大器来实现。

[0125] 第一放大器523的输出端连接到压力传感器250的一个端子。压力传感器250的另一个端子连接到第一放大器523的输入端。压力传感器250的所述端子和其它端子可为压力传感器250的上电极和/或下电极254、256。第一放大器523的输出端耦合到混合器514的第一输入端。

[0126] 第二放大器524的输出端连接到气体传感器200的一个端子。气体传感器200的另一个端子连接到第二放大器524的输入端。气体传感器200的所述端子和其它端子可为气体传感器200的上电极和/或下电极216、218。第二放大器524的输出端耦合到混合器514的第二输入端。

[0127] 电路515可耦合到混合器514的输出端并且计算气体浓度。电路515可包含查找表。电路515可通过加热器信号SH控制气体传感器200的加热器。半导体主体242可包括第一和第二放大器523、524,混合器514、电路515、气体传感器200和压力传感器250。所述系统或装置可检测例如二氧化碳。若二氧化碳的浓度恒定或已知,则所述系统或装置可检测湿气,这是因为水分子也是气体,或另一种气体。气体传感器200以及因此的所述系统或装置实际上对其所暴露于的气体混合物的摩尔质量的变化较为敏感。

[0128] 根据前文,多个例示性实施例提供对与气体传感器相关的交叉敏感的补偿。具体地说,通过实现多传感器封装,包括加热器,并且解决已知的影响。

[0129] 从前文的描述可显而易见,可在硬件和/或固件中实现本发明的各种例示性实施例。此外,可将各种例示性实施例作为存储在机器可读存储介质上的指令来实现,其中指令可由至少一个处理器来读取并执行以实现本文所详细描述的操作。电路515可包含至少一个处理器。机器可读存储介质可包括用于存储以例如个人计算机或膝上型计算机,服务器或其它计算装置等机器可读的形式的信息的任何机构。因此,机器可读存储介质可包括只读存储器(ROM)、随机存取存储器(RAM)、磁盘存储介质、光学存储介质、闪速存储器装置以及类似的存储介质。所述指令和机构可在线执行。

[0130] 本领域的技术人员应理解,本文的任意框图表示体现本发明原理的示意性电路的概念视图。类似地,将理解,任意流程图、流程框图、状态转换图、伪代码等均表示大体上可以机器可读介质表示并由此能够由计算机或处理器执行的各种程序,不论这种计算机或处理器是否明确示出。

[0131] 本专利申请中,压力传感器250连续地等同于第一传感器250。额外地,在本专利申请中,气体传感器200连续地等同于第二传感器200。

[0132] 尽管特定参考了本发明的特定例示性方面详细描述本发明的各种例示性实施例,

但是应理解,本发明可具有其它实施例,并且可在各种明显方面对其细节进行修改。如对本领域的技术人员已显而易见,可作出各种变化和修改,而仍属于本发明的精神和范围内。因此,上文的公开内容、描述和附图仅用于说明性目的,而非以任何方式对本发明进行限制,本发明的范围仅由权利要求来界定。

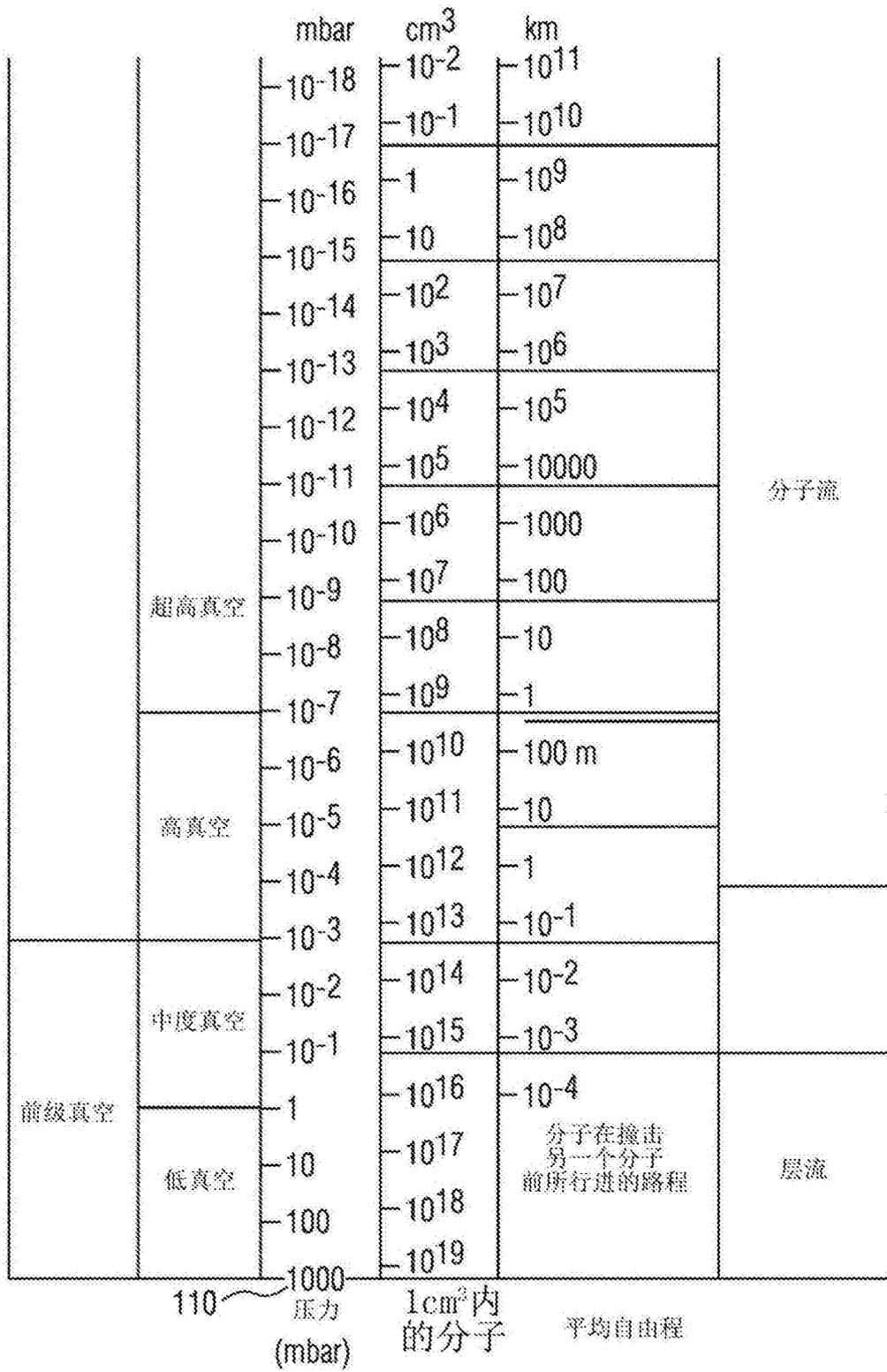


图1

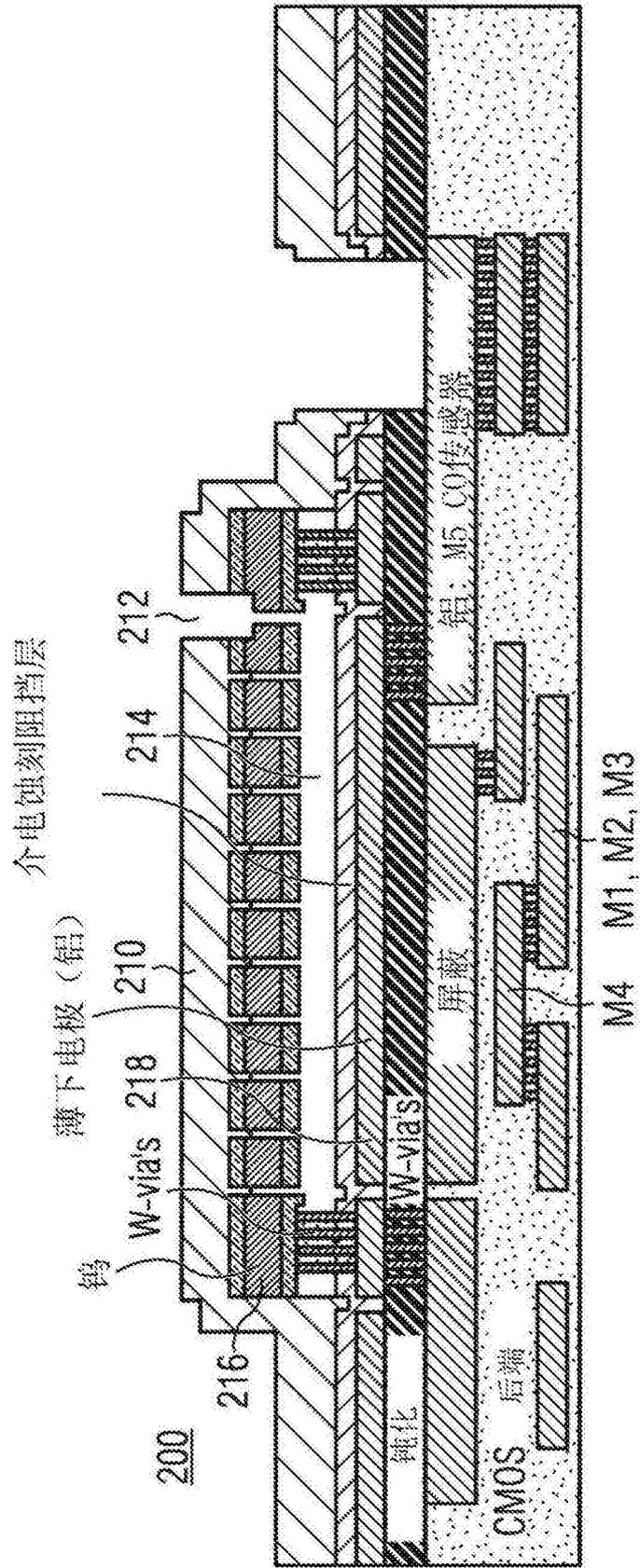


图2A

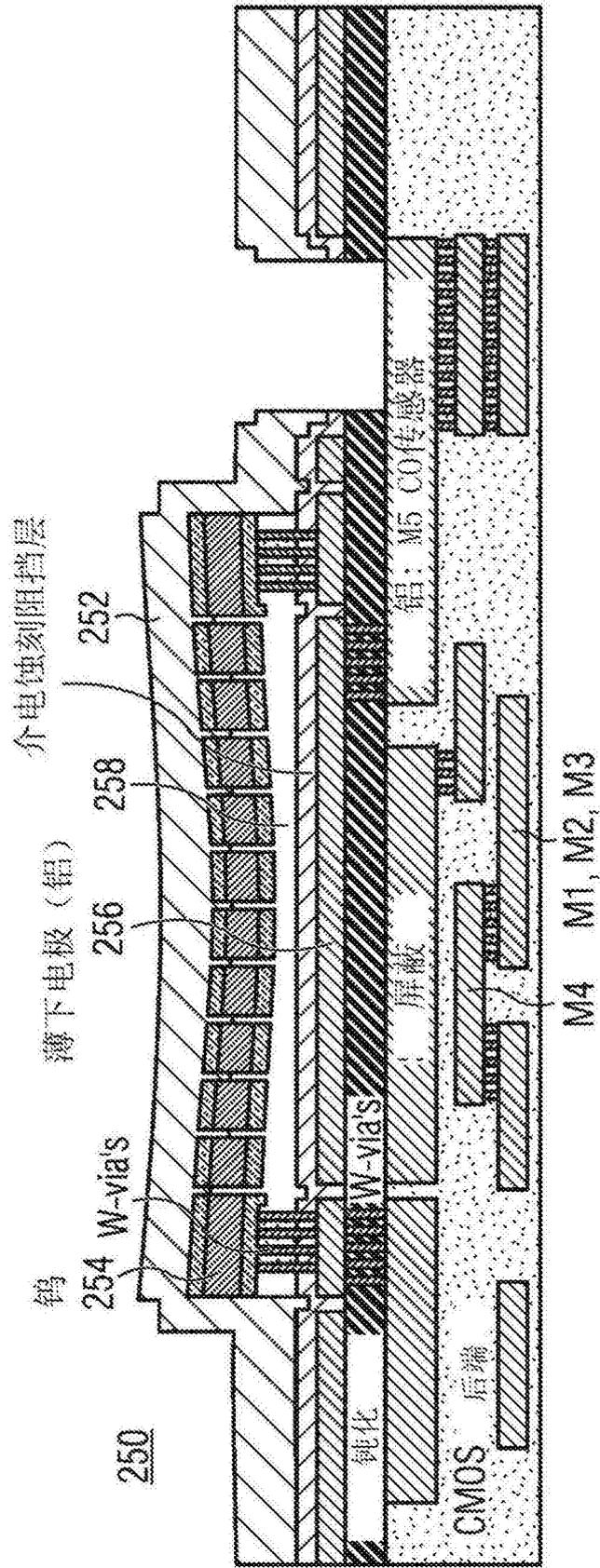


图2B

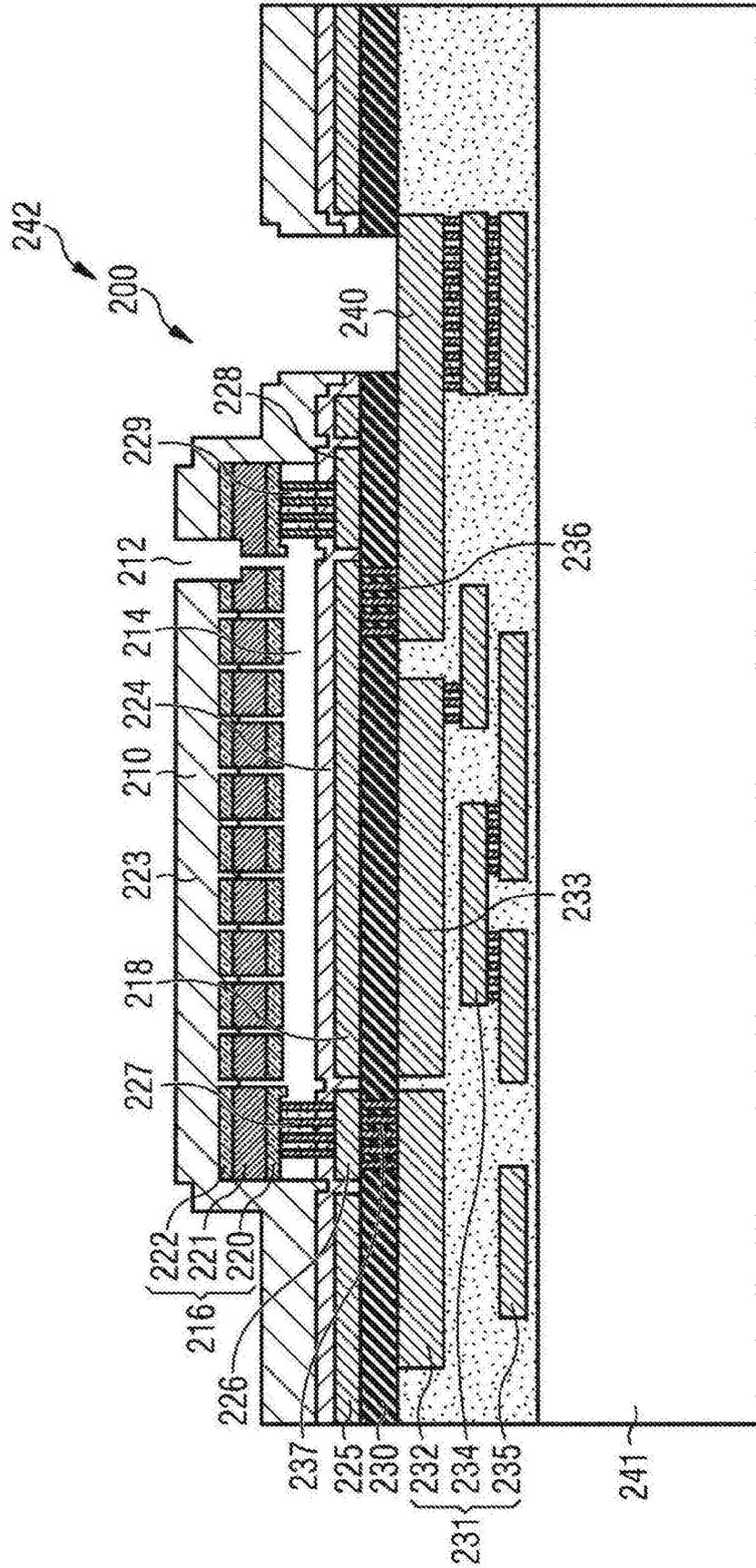


图2C

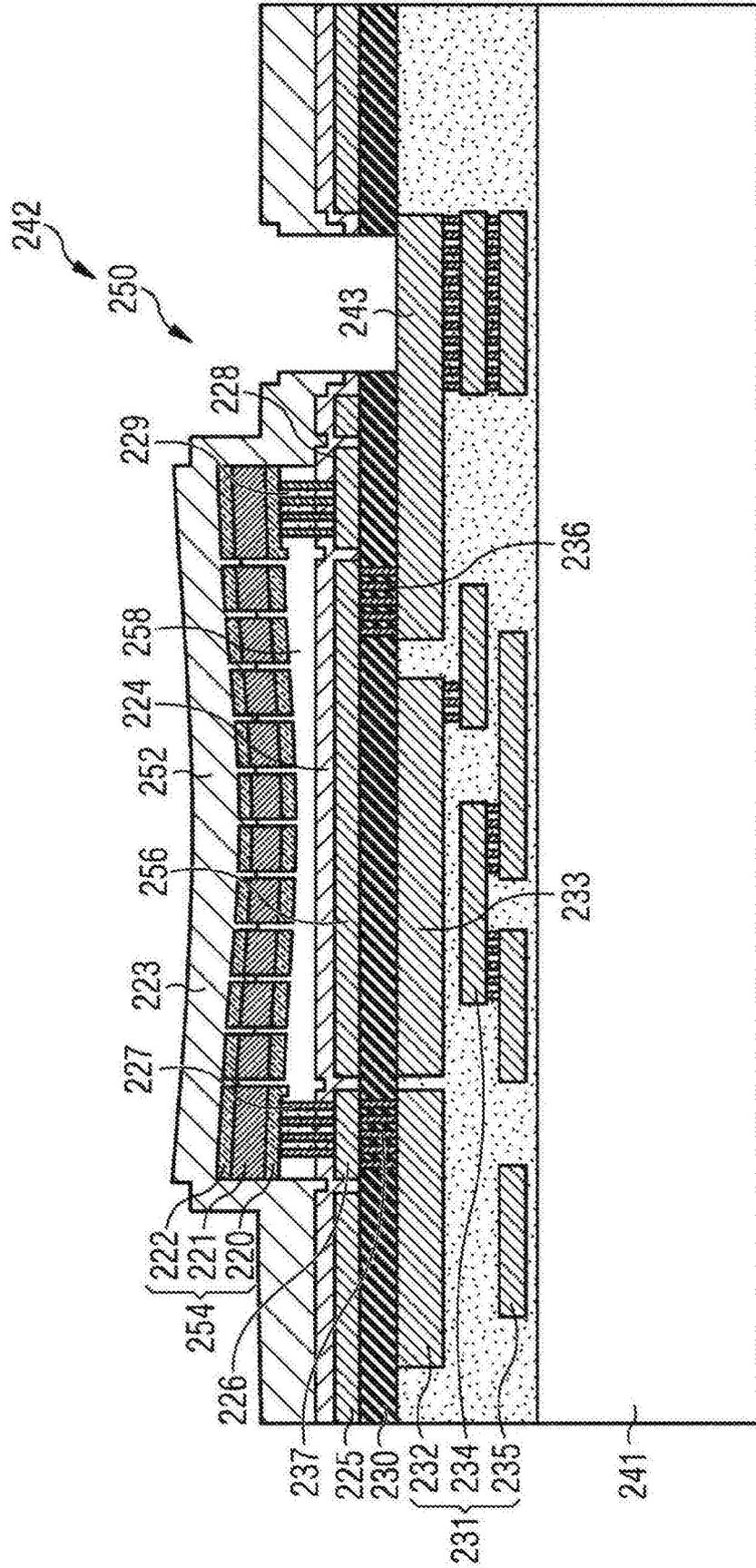


图2D

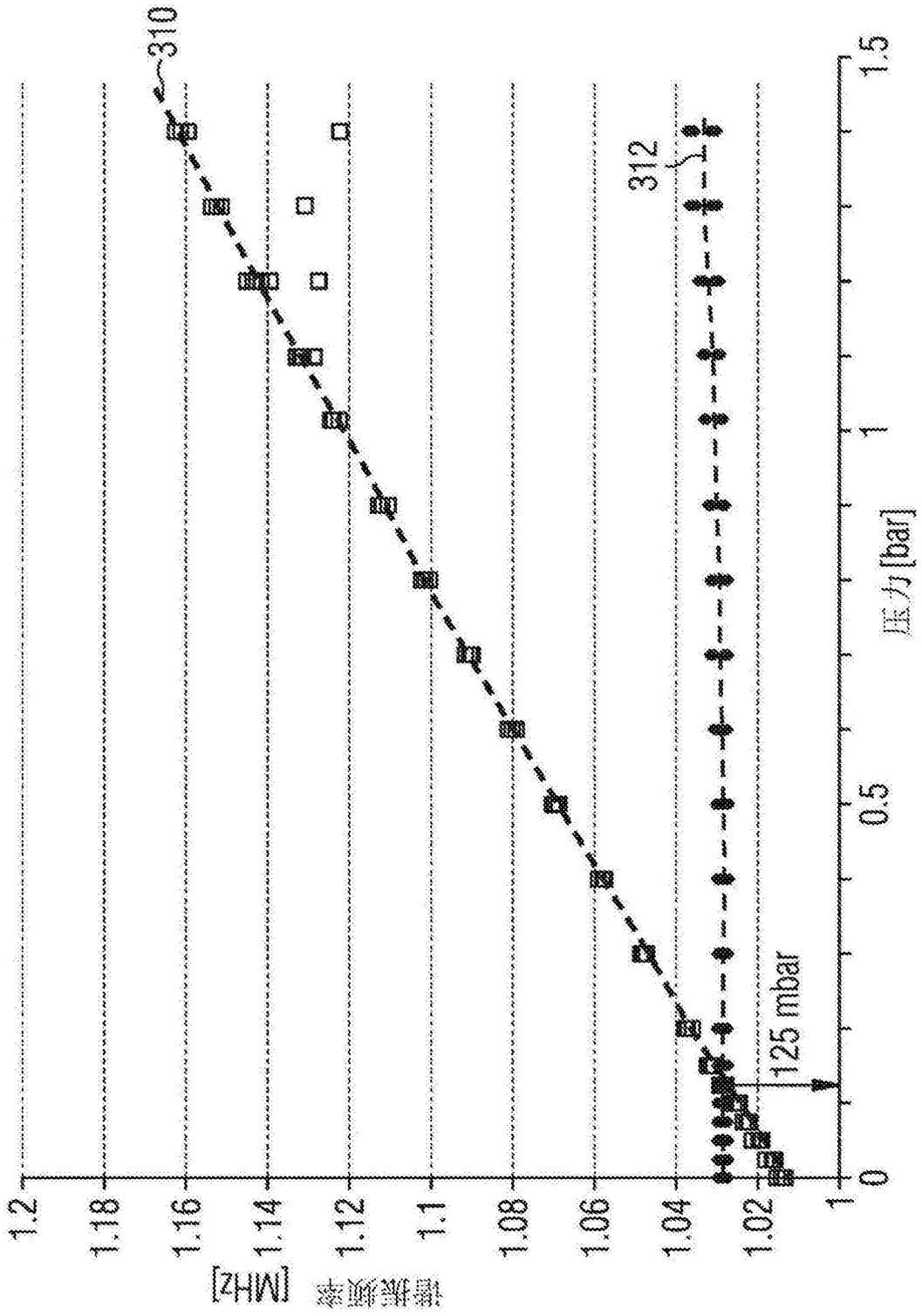


图3

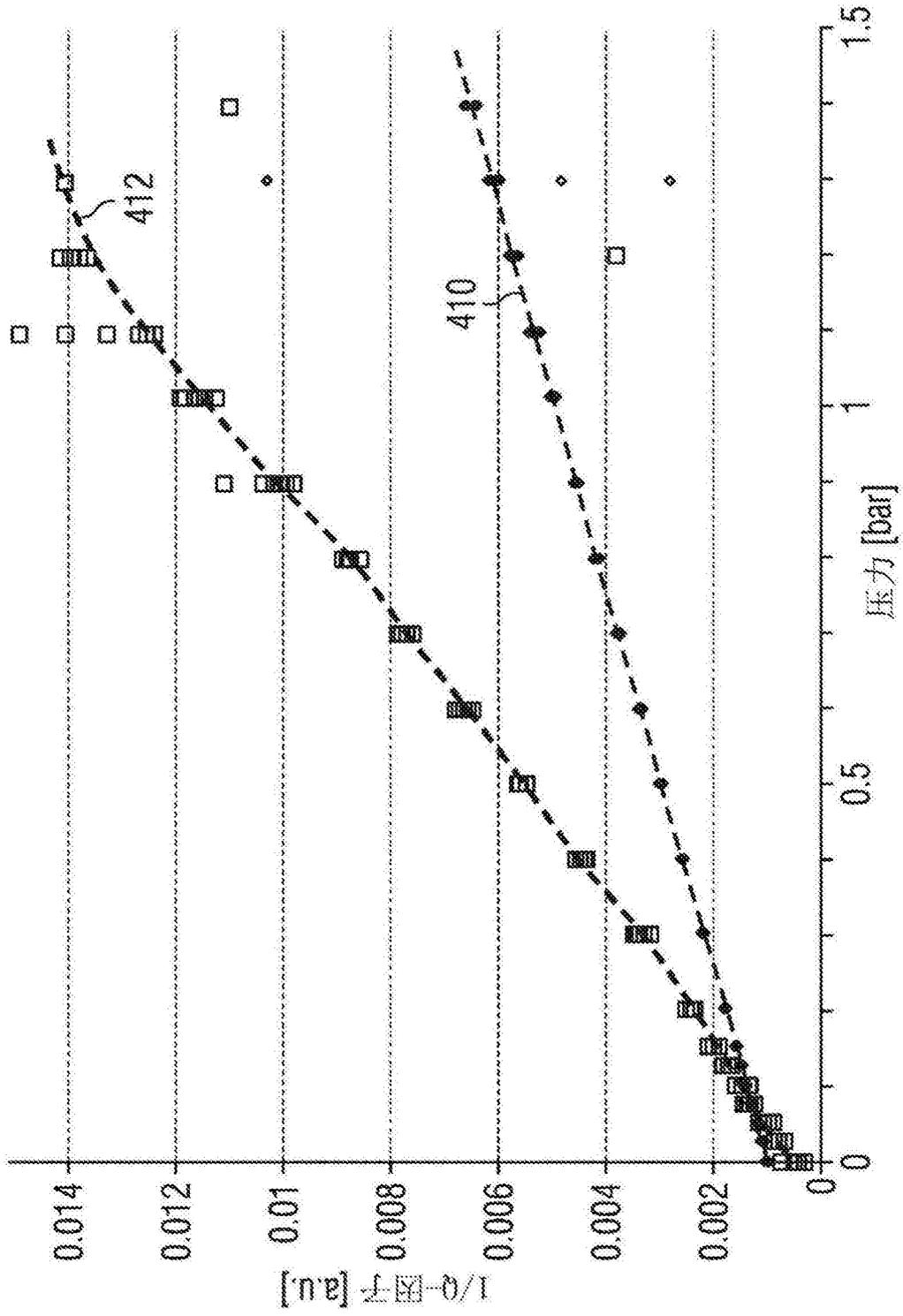


图4

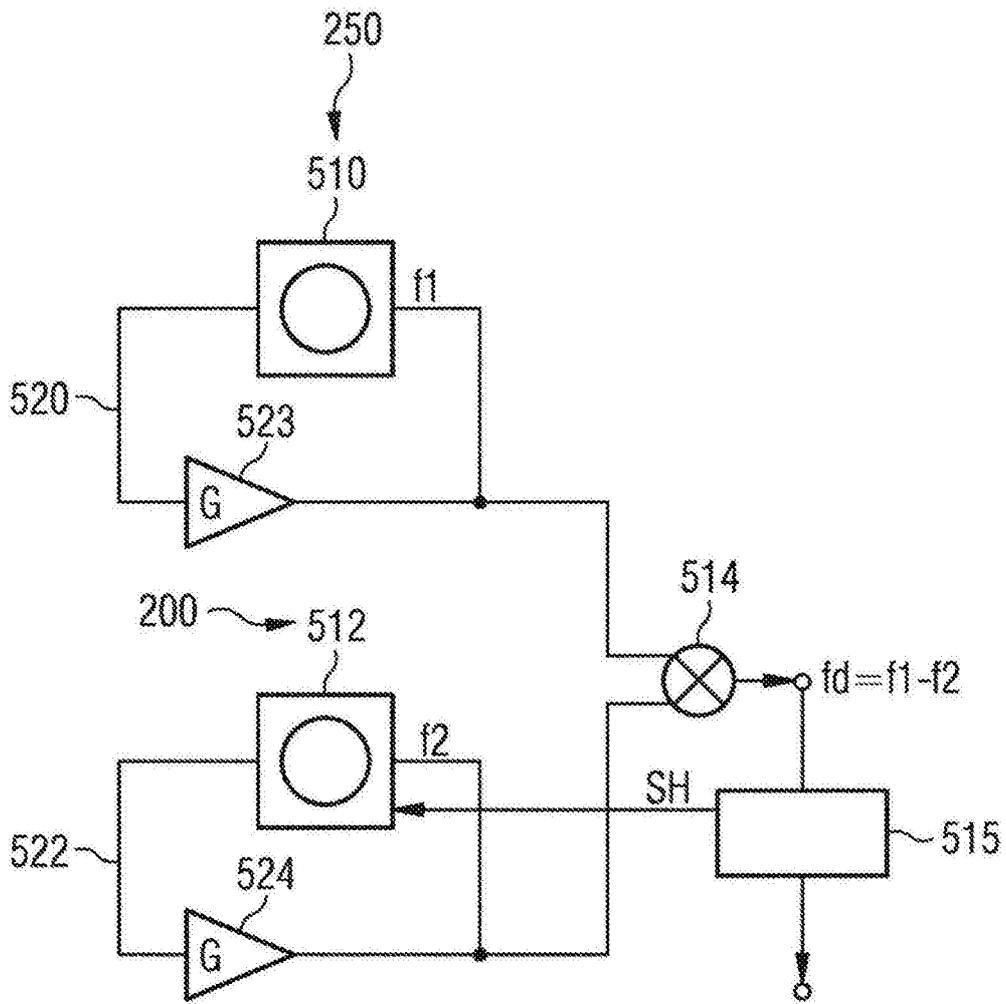


图5

表1

气体	体积分数	质量分数	摩尔质量	符号	部分质量	摩尔	ppm
氧气	20.95	23.2	32	O ₂	6.704	0.725	210048
氮气	78.09	75.47	28.02	N ₂	21.881	2.693433262	780343
二氧化碳	0.03	0.046	44.01	CO ₂	0.013	0.001045217	303
氢气	0.00005	~0	2.02	H	0.000		
氩气	0.933	1.28	39.94	Ar	0.373	0.032048072	9285
氦气	0.0018	0.0012	20.18	Ne	0.000	5.94648E-05	17
氖气	0.0005	0.00007	4	He	0.000	0.0000175	5
氪气	0.0001	0.0003	83.8	Kr	0.000	3.57995E-06	1
氙气	9(10 ⁻⁶)	0.00004	131.29	Xe		3.04669E-07	0
				合计:	28.971		1000002

图6A

表2

气体	部分质量	摩尔	ppm	增加的CO ₂	CO ₂ 增量	部分质量
氧气	6.704	0.725	210048	210006		6.72
氮气	21.881	2.693433262	780343	780190		21.861
二氧化碳	0.013	0.001045217	303	500	197	0.022
氢气	0.000					0
氩气	0.373	0.032048072	9285	9283		0.371
氖气	0.000	5.94648E-05	17	17		0
氦气	0.000	0.0000175	5	5		0
氪气	0.000	3.57995E-06	1	1		0
氙气		3.04669E-07	0	0		
合计:	28.971		1000002	1000002		28.974

图6B

表3

绝对温度	摄氏温度	mbar	RH%	ppm
298.15	25	1013.25	50	15619
298.15	25	1013.25	60	18743
298.15	25	1013.25	70	21867
298.15	25	1013.25	80	24990

图6C

表4

绝对温度	摄氏温度	mbar	RH	ppm
298.15	25	1013.25	50	15619
323.15	50	1013.25	50	60861
348.15	75	1013.25	50	190180
373.15	100	1013.25	50	499820

图6D