

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.

H04R 19/01 (2006.01)

H04R 31/00 (2006.01)



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200310112933.1

[45] 授权公告日 2009年2月11日

[11] 授权公告号 CN 100461976C

[22] 申请日 2003.12.26

[21] 申请号 200310112933.1

[73] 专利权人 美国通用微机电系统公司

地址 美国加利福尼亚

[72] 发明人 王云龙

[56] 参考文献

US2002048220A1 2002.4.25

US6295247B1 2001.9.25

CN1346231A 2002.4.24

审查员 程小亮

[74] 专利代理机构 北京润平知识产权代理有限公司

代理人 周建秋

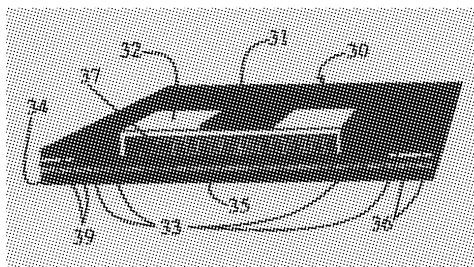
权利要求书 3 页 说明书 16 页 附图 7 页

[54] 发明名称

微电容式麦克风系统及其制造方法

[57] 摘要

一种微电容式麦克风系统，包括由若干个微电容式单元排列形成的可伸缩式麦克风阵列，各微电容式单元包括低电极，支撑在低电极上的薄膜，在薄膜与低电极之间形成真空密封空间，所述微电容式单元还包括硅基体，低电极层叠在硅基体上，薄膜表面的中心部分覆盖有中心信号线，在薄膜两侧分别形成一接地电极，两接地电极与中心信号线共同构成传输线。本发明还提供一种制造前述微电容式麦克风系统的方法。本发明的电容式麦克风具有灵敏度高、稳固性好的优点，且在宽频带使用时具有均匀频响。



1. 一种微电容式麦克风系统，包括若干个微电容式单元排列形成的麦克风阵列，各微电容式单元包括低电极，支撑在低电极上的薄膜，在薄膜与低电极之间形成有真空密封空间，其特征在于：所述微电容式单元还包括硅基体，低电极层叠在硅基体上，薄膜表面的中心部分覆盖有中心信号线，在薄膜两侧分别形成有一接地电极，两接地电极与中心信号构成传输线。
2. 如权利要求1所述的微电容式麦克风系统，其特征在于：所述低电极为掺杂多晶硅层，所述薄膜为氮化硅膜。
3. 如权利要求2所述的微电容式麦克风系统，其特征在于：所述掺杂多晶硅层是三氯化磷局部掺杂多晶硅，所述硅基体与所述低电极之间设有氮化硅绝缘膜。
4. 如权利要求1所述的微电容式麦克风系统，其特征在于：所述传输线为中心信号线与两接地电极形成的共面传输线，所述接地电极与低电极电接触。
5. 如权利要求1所述的微电容式麦克风系统，其特征在于：所述微电容式麦克风系统还包括一射频检测电路，所述麦克风阵列作为检测电路的一个组成部分。
6. 如权利要求5所述的微电容式麦克风系统，其特征在于：所述射频检测电路还包括振荡器、相位调整器、混频器及低通滤波器，振荡器的一输出端与麦克风阵列的输入端连接，麦克风阵列的输出端与混频器的射频输入端口连接，振荡器的另一输出端与相位调整器的第一输入端连接，相位调整

器的输出端与所述混频器的本机振荡器端口连接，混频器的输出端与低通滤波器连接。

7. 如权利要求6所述的微电容式麦克风系统，其特征在于：所述低通滤波器的输出端与放大器相连接，所述混频器的第二输出端通过一正交反馈回路与所述相位调整器的第二输入端连接。
8. 如权利要求5所述的微电容式麦克风系统，其特征在于：所述射频检测电路还包振荡器、相位调整器、减法器、放大器、混频器及低通滤波器，振荡器的第一输出端通过麦克风阵列与减法器的第一输入端连接，振荡器的第二输出端通过相位调整器与减法器的第二输入端连接，振荡器的第三输出端直接与混频器的第一输入端连接，减法器的输出端通过放大器与混频器的第二输入端连接，混频器的输出端与低通滤波器连接。
9. 如权利要求8所述的微电容式麦克风系统，其特征在于：所述相位调整器通过一衰减器与减法器相连接。
10. 制造一种微电容式麦克风系统的方法，该微电容式麦克风系统包括由若干个微电容式单元排列形成的麦克风阵列，各微电容式单元包括低电极，支撑在低电极上的薄膜，在薄膜与低电极之间形成有真空密封空间，所述微电容式单元还包括硅基体，低电极层叠在硅基体上，薄膜表面的中心部分覆盖有中心信号线，在薄膜两侧分别形成有接地电极，两接地电极与中心信号构成传输线，所述制造方法包括以下步骤：
 - (1) 制备硅基体；
 - (2) 低压化学气相沉积法在硅基体表面沉积多晶硅膜；
 - (3) 掺杂所述多晶硅膜的部分区域，以形成低电极；

- (4) 低压化学气相沉积法再次沉积氮化硅膜，并在该氮化硅膜上位于低电极位置的上方形成多晶硅牺牲层，再次沉积氮化硅膜，从而在硅体上形成一突起；
- (5) 蚀刻所述牺牲层，以在低电极上释放氮化硅膜，形成所述薄膜，且薄膜与低电极间形成一真空密封空间；以及
- (6) 在薄膜表面的中心部分镀金属形成中心信号线，同时在薄膜两侧的基体上分别形成接地电极，所述中心信号线与两接地电极共同构成传输线。
11. 如权利要求 10 所述的制造方法，其特征在于：在步骤（1）与步骤（2）之间包括低压化学气相沉积法在基体上沉积氮化硅绝缘膜的过程，步骤（3）中是在高温熔炉中是用三氯化磷掺杂多晶硅。
12. 如权利要求 10 所述的制造方法，其特征在于：在步骤（4）与步骤（5）之间包括用等离子蚀刻法在所述突起两侧形成蚀刻孔，蚀刻牺牲层是采用湿法蚀刻，在步骤（6）中还包括采用等离子蚀刻法除去部分氮化硅膜，使形成的接地电极与低电极电接触。
13. 如权利要求 12 所述的制造方法，其特征在于：在步骤（5）与步骤（6）之间包括利用低压化学气相沉积法进一步沉积氮化硅膜的过程以封闭所述蚀刻孔。

微电容式麦克风系统及其制造方法

技术领域

本发明涉及麦克风系统及其制造方法，特别涉及一种宽频带微机械加工的（micromachined）电容式麦克风系统（下称微电容式麦克风系统）及其制造方法。

背景技术

日前兴起的电容式微超声换能器（capacitor Micromachined Ultrasonic Transducers, cMUT）已成为压电式换能器的一种重要的替代品。它可以提供一组范围更宽的参数来优化换能器的性能，并易于制造及电子集成。这种超声换能器的制造及操作已被众多刊物及专利所揭露。例如，美国专利 5,619,476、5,870,351、5,894,452 等揭示了电容式超声换能器的制造技术。该电容式超声换能器的薄膜被若干个绝缘支撑支持在基体上。该绝缘支撑由氮化硅、二氧化硅或聚酰胺制成，并与薄膜的边缘接触。在基体与所述薄膜表面的一层导电膜间施加一电压，从而使该薄膜振动并发出声波。将换能器浸入一种美国专利 6,493,288 揭示的封闭液体使薄膜封闭后，换能器便可以投入应用。前述换能器可具有多个相同或不同形状和/或大小的薄膜。使用时，利用电激发控制以得到预期的波束方向图，以使多元件换能器形成一个或多个阵列。

一个优质的麦克风应具有如下特性：首先，必须具有较高的灵敏度，使其可检测到最低达 2×10^{-5} 帕斯卡（Pa）的压力，与人耳可检测到的最低声级相

对应，且可在较宽的频带范围内运作。其中，较高的灵敏度意味着麦克风的总固有噪声很低。第二，具有较好的稳固性，以便于麦克风可在户外使用而不会因湿气或凝固而发生衰退或损坏其功能。第三，易于制造及电子集成。最后，它还应具有抗震、抗高加速、耐高温等性能。

许多微电容式麦克风使用的薄膜结构与大型麦克风或录音室录音用的麦克风的薄膜结构相似。一种常用电容式麦克风结构如图 1 所示，包括悬挂于导电信号板 15 上的导电薄膜 11，该导电信号板 15 上穿戳有声音开孔 13。当冲压波振动薄膜 11 时则可以检测到声音，并改变换能器 12 的容量。正常使用时，电容式麦克风（即换能器）的容量变化可通过测量一定偏置电压下的输出电流 18 来检测。支撑室 17 内设有压力平衡通道 14，用于保护薄膜 11，以免其因大气压力的波动而被信号板 15 击破。用于测量或校正的精密电容式麦克风，其位于薄膜后方设有数量级为 20 微米的相对较大的气隙，方可具有均匀的频响。微硅麦克风，其薄膜尺寸为 1-2 毫米，因为较小尺寸的薄膜导致运动缩减，因而需要的气隙 16 的数量级为几个微米才能保持足够的灵敏度。然而，气隙尺寸的减少将扩大挤压膜阻尼(squeeze-film damping)、引入频率依赖性的刚度及损耗（introducing frequency-dependent stiffness and loss）等的影响，这将使声频的机械响应产生不良变化。况且，因为高声压可能导致薄膜在其偏置电压下破裂，所以获得一个宽的变化范围及高的灵敏度是两个相互矛盾的目的。可见，传统结构灵敏度低，特别是在低频带使用时灵敏度低，且在户外潮湿环境中使用时缺乏稳固性。

美国专利 5,619,476、5,870,351、5,894,452 及 6,493,288 都揭示了传统的电容式微超声换能器(capacitor Micromachined Ultrasonic Transducers, cMUT)，亦即

微电容式麦克风，例如，具体有 100 个单元的这种传统的换能器，其中每个单元的尺寸为 200 微米、气隙为 0.5 微米、薄膜的厚度为 1 微米，将所有的单个单元密封从而使电容的气隙不至暴露在环境中，以利于抵抗湿度，甚至可以在潮湿的环境中使用。当其用作接收器，使用传统的检测方案时，在前述单元之间施加 30.745 伏特的直流电压，且其输出给放大器，该放大器具有如下特性参数： $R_{in}=2$ 兆欧 ($M\Omega$)， $C_{in}=1$ 皮法拉 (pf)， $V_{noise}=1.4$ 纳伏/赫兹 (nV/Hz)， $I_{noise}=0.01$ 帕斯卡/平方赫兹 (Pa/\sqrt{Hz})，当频率低于 100 千赫兹 (KHz) 时，信噪比急剧下降。也就是说，在频率低于 100 千赫兹 (KHz) 时可以获得一个信号，但灵敏度非常低。

另外，美国专利 6,493,288 揭示的一种 cMUT，请同时参阅图 2，该微电容式麦克风是由多个小的、密封的、真空单元构成，各单元具有薄膜 21，金属电极 22 覆盖在薄膜 21 上。该薄膜 21 在其边缘由绝缘支撑 24 以一定间距支撑在导电基体 23 上。内部空间 25 抽真空。虽然该 cMUT 可在宽频带使用，但是其金属电极 22 覆盖了薄膜 21 的整个长度，这样进一步缩减了声压作用下薄膜 21 的运动。这种缩减的运动最终结果将导致电容的变化更小，甚至低于麦克风的总体灵敏度，因此灵敏度很低。

另外，传统 cMUT 的设计还具有制造时易扩缩的缺陷。

发明内容

本发明旨在解决上述问题而提供一种具有高灵敏度和稳固性的微电容式麦克风系统，其在宽频带内具有均匀的频响。

本发明的第二个目的在于提供一种制造前述麦克风系统的方法。

为实现前述目的，本发明提供一种微电容式麦克风系统，包括由若干个微

电容式单元排列形成的麦克风阵列，各微电容式单元包括低电极，支撑在低电极上的薄膜，在薄膜与低电极之间形成真空密封空间，所述微电容式单元还包括硅基体，低电极层叠在硅基体上，薄膜表面的中心部分覆盖有中心信号线，在薄膜两侧各形成一接地电极，两接地电极与中心信号线共同构成传输线。

该微电容式麦克风系统还包括一射频检测电路，所述麦克风阵列作为检测电路的一个组成部分。

所述射频检测电路还包括振荡器、相位调整器、混频器及低通滤波器，振荡器的一输出端与麦克风阵列的输入端连接，麦克风阵列的输出端与混频器的射频输入端口连接，振荡器的另一输出端与相位调整器的第一输入端连接，相位调整器的输出端与所述混频器的本机振荡器端口连接，混频器的输出端与低通滤波器连接。

所述低通滤波器的输出端与放大器相连接，所述混频器的第二输出端通过一正交反馈回路与所述相位调整器的第二输入端连接。

所述射频检测电路还包振荡器、相位调整器、减法器、放大器、混频器及低通滤波器，振荡器的第一输出端通过麦克风阵列与减法器的第一输入端连接，振荡器的第二输出端通过相位调整器与减法器的第二输入端连接，振荡器的第三输出端直接与混频器的第一输入端连接，减法器的输出端通过放大器与混频器的第二输入端连接，混频器的输出端与低通滤波器连接。

所述相位调整器通过衰减器与减法器相连接。

本发明还提供一种制造微电容式麦克风系统的方法，该微电容式麦克风系统包括由若干个微电容式单元排列形成的麦克风阵列，各微电容式单元包括低电极，支撑在低电极上的薄膜，在薄膜与低电极之间形成真空密封空间，所述

微电容式单元还包括硅基体，低电极层叠在硅基体上，薄膜表面的中心部分覆盖有中心信号线，在薄膜两侧各形成一接地电极，两接地电极与中心信号线构成传输线，所述制造方法包括以下步骤：制备硅基体；低压化学气相沉积法在硅基体表面沉积多晶硅膜；掺杂所述多晶硅膜的部分区域，以形成低电极；低压化学气相沉积法再次沉积氮化硅膜，并在该氮化硅膜上位于低电极位置的上方形成多晶硅牺牲层，再次沉积氮化硅膜，从而在硅体上形成一突起；蚀刻所述牺牲层，以在低电极上释放氮化硅膜，形成所述薄膜，且薄膜与低电极间形成一真空密封空间；以及在薄膜表面的中心部分镀金属形成中心信号线，同时在薄膜两侧的基体上分别形成接地电极，所述中心信号线与两接地电极共同构成传输线。

在步骤（1）与步骤（2）之间还包括低压化学气相沉积法在基体上沉积氮化硅膜的过程，步骤（3）中是在高温熔炉中是用三氯化磷（Phosphorous Oxychloride）掺杂多晶硅。

在步骤（4）与步骤（5）之间还包括用等离子蚀刻法在所述突起两侧形成蚀刻孔，蚀刻牺牲层是采用湿法蚀刻，在步骤（6）中还包括采用等离子蚀刻法除去部分氮化硅膜，使形成的接地电极与低电极电接触。

在步骤（5）与步骤（6）之间还包括利用低压化学气相沉积法进一步沉积氮化硅膜的过程以封闭蚀刻孔。

与现有技术相较，本发明麦克风系统的微电容式单元的基体为硅基体，且薄膜表面的中心部分覆盖有传输线电极，两接地电极与中心信号线共同构成信号传输线，因此其灵敏度及稳固性更好，易于制造及电子集成。而且，本发明的麦克风系统的微电容式单元具有真空封装膜结构，因此在宽频带内具有均匀

的频响。最后，本发明提供的制造方法精密度高。

附图说明

图 1 为传统微电容式麦克风单元的横截面示意图。

图 2 是现有技术的多单元 cMUT 麦克风一个代表性单元的横截面示意图。

图 3 是本发明微电容式麦克风系统的一个微电容单元的立体图。

图 4 是图 3 的主视图。

图 5 是由多个电容单元组成的麦克风阵列模压结构示意图。

图 6 是可伸缩模压结构的麦克风阵列的模板示意图。

图 7 是图 5 和图 6 所示麦克风阵列的等同传输线路示意图。

图 8 是本发明微电容式麦克风系统的射频检测电路图。

图 9 是本发明微电容式麦克风系统的电容薄膜在大气压负载作用下测量的偏差曲线图。

图 10 是本发明微机械加工麦克风系统的另一种射频检测电路图。

图 11 是麦克风输出端测量的声音信号及固有噪声信号曲线图，以及使用图 10 的检测电路时的潜在固有噪声基线。

图 12 是本发明微电容式麦克风系统的微电容单元在制造过程中的结构示意图。

具体实施方式

请同时参照图 3-6，本发明的微电容式麦克风系统包括一个可伸缩式麦克风阵列 40（见图 5 和图 6），该麦克风阵列 40 是由一定数量的微电容单元 30 沿一射频传输线周期性地间隔排列组成，从而形成一条电容式加载传输线。各微电容单元 30 的具体结构请参阅图 3-4，包括硅基体 34，在硅基体 34 表面覆盖有第

一层多晶硅膜 36 和氮化硅膜 39。在第一层氮化硅膜 39 上叠有第二层多晶硅膜 36，其中心部分区域形成掺杂层而作为低电极 35。在第二层多晶硅膜 36 上层叠有第二层氮化硅膜 39，在低电极 35 上支撑有一电容薄膜 32，该电容薄膜 32 与低电极 35 之间形成真空密封空间 37。在电容薄膜 32 两侧分别形成接地电极 33，该接地电极 33 与低电极 35 电连接。

上述传输线结构是通过在薄膜 32 上使用一个共面的波导传输线而实现的。该共面的波导传输线包括三个导体：中心信号线 31、两接地电极 33。其中，中心信号线 31 横贯于薄膜 32 中心区域上，两接地电极 33 分别位于一排薄膜 32 两侧。该共面传输线具有屏蔽作用，从而使麦克风系统的灵敏度更高。

各电容薄膜 32 下方均具有低电极 35，该低电极 35 自薄膜 32 的中心位置下向接地电极 33 延伸，该低电极 35 是由局部掺杂的多晶硅膜制成。用多晶硅取代金属制造导体的理由在于：在沉积氮化硅薄膜时需要很高的温度，而这一般来说往往要超过普通金属的熔解温度。

微电容单元 30 排列成麦克风阵列 40，请具体参阅图 5-6 的掩模示意图，各电容单元 30 之间由前述传输线相连接而实现信号的传输，所形成的传输线越长，麦克风系统的灵敏度越高。所述麦克风阵列 40 具有可伸缩性，也就是说，可以根据具体需要而选择电容单元 30 的数目，即传输线的长度或麦克风阵列 40 的尺寸。浇道 (die streets) 38 一般为 100 微米 (μm) 宽，以利于将麦克风阵列 40 按所需尺寸切割成片。

上述微电容单元 30 使用真空封装膜，这种结构在麦克风领域具有重要的应用。首先，真空且不使用穿孔的信号板意味着薄膜背后的空气强度为零。其二，因为薄膜背面无空气流通的通道，这样挤压膜的阻抗被消除，而挤压膜的阻抗

是其他电容式麦克风在音频范围内产生噪音的主要来源。最后，在支撑腔室没有使用依赖频率的电路元件，且在电路组件中不采用压力平衡通道，因此频响均匀性也被提高。与不封装的标准麦克风不同，封装的麦克风结构不发生声音低频上移。事实上，该薄膜对任意低频的刺激均发生响应，包括大气压的波动在内。

电容式麦克风是一种平板电容器，输入声音信号振动麦克风的薄膜，而导致在输入声音信号频率时总体电容变化。薄膜的振动可由测量总体电容的变化而测量，在声压下，其大致与薄膜的位移成线性函数。这通常可以通过在平行平板之间施加一固定的偏置电压时测量麦克风的电流输出值来测量。使用 N 个小的 cMUT 薄膜，而不使用具有相同面积的单个薄膜，由于参数 N 缩减了前述位移及电容的预期变化，从而使得 cMUT 薄膜产生均匀、持久响应。所幸的是，该 cMUT 封装结构的固有噪声非常小，这意味着可获得一个灵敏的麦克风。用射频检测技术可补偿薄膜的微小位移反应，便可以灵敏地检测微小的电容变化。

将前述麦克风阵列 40 安装或封装在印刷电路板芯片上，该印刷电路板芯片上具有检测信号处理的电子元件。该检测信号处理的电子元件在发明中与麦克风阵列 40 一起构成一射频检测电路，各电子元件集成在印刷电路板的芯片上，也可将用于信号处理的电子元件和麦克风阵列 40 直接组装成上述微电容式麦克风系统。

封装在印刷电路板芯片上以后，微 cMUT 麦克风单元电容式地加载于具有电容性薄膜的传输线上。这种结构，如图 7 所示，其可用作毫米波的微波信号滤波器，但在其通带范围内仍可用作射频信号的传输线。在图 7 中， Z_0 为一部分传输线的特性电阻，其由单个的麦克风单元形成， ΔC 为麦克风单元的电容变

化，当传输线上的电容膜在声压作用下发生振动时，传输线的传播常数，亦即射频信号的相位速度，发生变化。因此，沿加载传输线发射的射频载波信号被冲击在电容薄膜上的声音信号进行相位调制。而后续的相位解调则是利用相位检波电路恢复该声音信号的。

当麦克风作为相位检波电路的一个组成部分时，射频载波的相位调制就可以被检测到，如图 8 所示，其用于检测电子装置的相位变化。该电路首先将来自振荡器 41 的射频信号分裂成两个支流。其中第一支流通过可伸缩式麦克风阵列 40，借助 cMUT 薄膜上的声音信号对射频信号进行相位调制。其中，信号满足下述等式：

$$V_{RF} = V_1 \cos(2\pi f_c t + \Phi(t)) \quad (1)$$

其中， V_1 和 f_c 分别是射频载波的振幅及频率， $\Phi(t)$ 表示与声音信号相关的一定的时变相位调制。而第二支流将一基准信号通过相位调整器 42 传播至混频器 44 的本机振荡器(Local Oscillator, LO)端口，按如下算术式进行：

$$V_{LO} = V_2 \cos(2\pi f_c t + \phi) \quad (2)$$

其中 V_2 是电压信号的幅度， ϕ 表示相对于 V_{RF} 的一定固定相位基准。混频器 44 在其输入端口进行信号相乘，其总积（不等于输入频率）输出至输出元件上，与电压振幅 K_d 的关系如下：

$$V_{RF} \times V_{LO} = K_d [\cos(\Phi(t) - \phi) + \cos(4\pi f_c t + \Phi(t) + \phi)] \quad (3)$$

一个低通滤波器 45 在混频器 44 的输出端口处移除载波频率的倍频成分，即 $2f_c$ ，以及可能产生的附加高次谐波。该解调（或基带）信号：

$$V_O = K_d \cos(\Phi(t) - \phi) \quad (4)$$

由相变条件 $\Phi(t)$ 与固定相位基准 ϕ 组成。调节 ϕ 为 $\pi/2$ 拉德 (rad)，从而使

两个信号在混频器 44 中正交，此时，所述解调信号 V_o 与 $\Phi(t)$ 的小量相变化成比例：

$$V_o = K_d \cos(\Phi(t)) \approx K_d \Phi(t) \quad (5)$$

因 $\Phi(t)$ 与电容的变化成比例，恢复 $\Phi(t)$ 便可重新获得施加于薄膜上声音信号。比例系数 K_d 充当混频器 44 的相位检波常数，其单位为伏特/拉德 (V/rad)，且将射频载波的弧度周相移动转变成基带电压信号。附加放大器 46 将信号放大至预期标准。正交反馈回路 43 自动锁定于混频器 44 的正交点，且用于补偿因温度或震动等造成的频率或相位等的任何偏移，还将直流电的偏移降低到最小。因时间常数可选择，所以电路运作的稳定性便被提高。从附加放大器 46 输出的声频信号可再经过一个放大器后输出至扬声器（未图示）。

上述射频检测系统具有一些突出的优点：首先，相互连接的所有电容单元都合并在该所述射频传输线结构中，这一点对于由许多电容相互连接，如 cMUTs 构成的麦克风尤其重要，因为恒压检测系统中的任何一个寄生电容都会降低其灵敏度。第二，尽管在薄膜上可施加电压以校准偏差和改变灵敏度或标准，但是在操作过程中不需要施加直流偏置电压。另外，在射频检测系统中，混频器 44 的出端阻抗是低阻抗，一般约 50 欧姆 (Ω)，因此不需要使用具有高阻抗输入的放大器。最后，输出信号与 $\Phi(t)$ 中的声频变化无关，因此，本发明的宽带麦克风可保持 cMUT 结构的低频响应。如图 8 所示的电路图，固定相位基准 ϕ ，也可以检测大气压的变化或电子元件中的慢漂移。因此，通过电压控制的相位调整器或者在所述薄膜上施加一个可变偏置电压，以实现反馈，从而消除长期偏移。因此，通过选择反馈信号的时间常数，系统可检测的最小频率变成可以选择。

卸载射频传输线的传播常数，单位为拉德/米 (rad/m)，为 $2\pi f_c \sqrt{L_i C_i}$ ，其中 f_c 射频载波频率， L_i 和 C_i 分别为传输线的感应系数和电容。为确定薄膜电容器的效果，卸载传输线的总长度可被看作 N 部分线的复合，每部分线长为 d 。电容式加载传输线的相位长度是由将单个薄膜电容合并到集总的电抗性传输线模组的各部分中而进行计算的。因此，加载传输线的总弧度相位长度为：

$$\Phi = 2\pi f_c N \sqrt{L_i d (C_i d + C_m)} \quad (6)$$

一种计算声压作用下的周相移动 $\Delta\Phi$ 的方法，以 $C_m + \Delta C_m$ 加载时的传输线的相长减去以薄膜的静态电容 C_m 加载时的传输线的相长，如下式所示：

$$\Delta\Phi = 2\pi f_c N [\sqrt{L_i d (C_i d + C_m + \Delta C_m)} - \sqrt{L_i d (C_i d + C_m)}] \quad (7)$$

其中 ΔC_m 是薄膜电容的变化。但是， $\Delta\Phi$ 的一个更为简单的近似表达可根据加载传输线的阻抗 Z_L 的特性阻抗获得。将与 C_m 相关电容的微小变化线性化而对等式 (6) 微分可得：

$$\Delta\Phi \approx \frac{\pi f_c N \sqrt{L_i}}{\sqrt{C_i} \sqrt{1 + \frac{C_m}{C_i d}}} \Delta C_m \quad (8)$$

如果 C_m 相对于一部分卸载传输线的电容较小时， $C_m/(C_i d)$ 可忽略，简化结果表达式并替换加载传输线的阻抗 $Z_L \approx Z_0 = \sqrt{L_i/C_i}$ ，等式 (8) 变为：

$$\Delta\Phi \approx \pi f_c N Z_L \Delta C_m \quad (9)$$

如果 C_m 改为表征该部分卸载传输线的电容，则分数 $C_m/(C_i d)$ 表征等式 (8) 分母的开方。加载传输线的阻抗也可以 C_m 表示，所以 $Z_L \approx \sqrt{L_i d/C_m} \sqrt{L_i d/C_m}$ ，用 Z_L 代替而得到与等式 (9) 相同的结果。因此，等式 (9) 也可以用于前述两种情形下近似计算周相移动。更重要的是，前述表达式预示着周相移动与薄膜电容的波动 ΔC_m 、薄膜的数目 N 、以及射频的载波频率 f_c 成比例。

因此，利用器件参数（device parameters）可以通过等式（8）或（9）计算周相移动。当相位检波电路在 2.8GHz（千兆赫）运作，本发明所制造的麦克风阵列 40 对于 1Pa rms（均方值为 1 帕斯卡）声压的预期周相移动幅度为 58.6 微拉德（ μ rad）。计算出的加载传输线的阻抗为 34.5 欧姆（ Ω ），而消除相位检波电路中阻抗匹配网络需要时，其它射频电路元件的一般阻抗 50 欧姆，相比之下，本发明的加载传输线的阻抗要小得多。

在麦克风系统中使用封装 cMUT 可以提供其对声压的均匀的宽频带响应，同时还可阻隔灰尘污染及湿气的侵蚀。另一方面，因为使用较小、较硬的薄膜将减小检测器对压力的机械响应，从而降低麦克风的总体灵敏度。许多常用于降低薄膜刚度的方法在本发明的设备中是不可实施的，因为本发明的薄膜的刚度必须维持其被完全支撑及封装，以获得持久性及响应性的优点。然而，我们仍然有机会减小薄膜刚度而提高灵敏度以及改进射频检波电路。

一种减小薄膜刚度的方法是采用减小中心信号线 31 的宽度，请同时参阅图 3-4。图 9 揭示了从本发明的麦克风系统中沿其金属传输线测量的薄膜的光学干涉仪测试图。从该测试图可见，在薄膜宽度为 190 微米（ μ m）时，仅薄膜的中心部分发生的偏置最大，并与低电极一起形成电容器向传输线提供电容。因此，中心信号线 31 可以减小至仅覆盖薄膜的中心（或偏置）部分，从而有效地降低薄膜的刚度，而不至于影响声压下的电容变化。

这也是改进麦克风中所述射频检波技术的最佳方法。因为加载传输线将电容变化转变为相位变化，因此，增加射频载波的相位调制或者降低相位检波电子组件的噪声的方法都可以改进麦克风的灵敏度。

通过采用更高的射频频率，与麦克风传输线结构有关的射频载波的周相移

动便可增加。因为周相移动与 f_c 成比例，由等式 (9) 可知，如果 K_d 保持不变，每个倍频可将信号电平提高到 6 分贝 (dB)。但是，必须选用合适的射频，才可以平衡随传输线内的射频损耗的增加而导致的周相移动增加以及在更高操作频率下检波电子组件的固有噪声电平的增加。

除了从麦克风的传输线方面来增加相移外，相位检波电路的灵敏度也可以用来改进麦克风的总体灵敏度。在另一实施例中，采用射频干涉仪来抑制载波，请参阅图 10。因为抑制载波可防止混频器 44 的饱和，因此，可以在进入混频器 44 之前在射频频率时直接放大相位调整信号。因为在射频频率时可以使用低噪声、窄频带的放大器，因此，混频器固有的 $1/f$ 噪声及基带放大噪声的影响可以得到减弱。这样，系统固有噪声电平可以达到基础电热噪声限度。图 10 揭示一个改进了的相位检波电路。如果使用 9 千兆赫兹 (GHz) 的载波频率以及与本发明的电路相同的射频功率，该改进相位检波电路在音频信号为 1 千赫兹 (kHz) 时，它的相位变化检测灵敏度可以达到均方值 (rms) 为 0.3 纳拉德/平方赫兹 (nrad/ $\sqrt{\text{Hz}}$)。在图 10 中，电路首先将来自振荡器 41 的射频信号分裂成三股支流。第一支流从麦克风阵列 40 中通过，利用 cMUT 薄膜上的声压对射频信号进行相位调制。来自振荡器 41 的第二支流通过相位调整器 51，从相位调整器 51 输出的信号通过衰减器 48 进行衰减之后，信号输入至减法器 49，cMUT 薄膜调制的信号也输入至减法器 49，两信号在减法器 49 内进行减法运算。从减法器 49 中输出的差额信号经过放大器 46 进行放大，再输入至混频器 44 中。第三支流自振荡器 41 直接输入到混频器 44 的 RF 端口。混频器 44 的输出信号经低通滤波器 45 移除载波频率的倍频成分，即 $2f_c$ ，以及可能产生的附加高次谐波。从低通滤波器 45 输出的声频信号可以再次通过一个放大器放大后传输至扬声器

(未图示)。

图 11 是本发明的 cMUT 麦克风的性能测试图。该麦克风系统使用图 8 所示的射频检波电路，其所具备的实际固有噪声电平 (Existing Noise Floor) 可表征麦克风低频总体噪声。然而，使用图 10 的射频检波电路，麦克风的固有噪声电平就可以降低为图 11 中的虚线所示。这表明，利用载波抑制的相位检波布局可显著提高 1kHz (千赫兹) 时的灵敏度。在更低的声频或亚声频时灵敏度的提高更为显著。

本发明的微电容式麦克风系统的制造工艺与传统工艺不同，请同时参照图 12，其主要包括以下步骤：

- (1) 制备硅基体 34；
- (2) 低压化学气相沉积法在硅基体 34 表面沉积多晶硅膜 36；
- (3) 在高温熔炉中掺杂上述多晶硅膜 36 的部分区域，以形成低电极 35；
- (4) 低压化学气相沉积法沉积氮化硅膜 39，并在该氮化硅膜 39 上位于低电极 35 上方形成多晶硅牺牲层 50，再次沉积氮化硅膜 39，从而在硅体上形成一突起；
- (5) 蚀刻牺牲层 50 以在低电极 35 上释放氮化硅膜从而形成薄膜 32，且薄膜 32 与低电极 35 间形成一真空密封空间 37；以及
- (6) 在薄膜 32 表面的中心部分镀金属形成中心信号线 31，同时在薄膜 32 两侧各形成一接地电极 33，所述中心信号线 31 与两接地电极 33 共同构成共面传输线。

其中，在步骤 (1) 中，选用绝缘高电阻率 (2000 欧姆-公分 ($\Omega\text{-cm}$)) 的硅基体，其实用于几千兆赫 (GHz) 时的低损耗共面传输线，并借助减

小基体内的电流而降低电压消耗。在步骤(2)中,用低压化学气相沉积法(Low-Pressure Chemical Vapor Deposition, LPCVD),依次在硅基体34上沉积第一层多晶硅膜36和第一层氮化硅膜39,再在氮化硅膜39上沉积第二层多晶硅膜36。其中,第一层多晶硅膜36具有屏蔽作用,第一层氮化硅膜39在一定程度上起到绝缘作用,这两层膜可选择性地沉积。第二层多晶硅膜36主要用于形成低电极35。在步骤(3)中,用二氧化硅遮盖多晶硅膜36上用作电绝缘体的区域,在高温熔炉中以三氯化磷(Phosphorous Oxychloride)局部掺杂多晶硅膜36上用作导体部分的区域,从而制成掺杂多晶硅膜(低电极)35部分,图12(a)所示为用氢氟酸除去前述二氧化硅遮挡层后的结构示意图。

步骤(4)中,在前述多晶硅膜36上沉积一层薄的氮化硅用作抗蚀刻,接着在该层薄的氮化硅膜表面且位于前述低电极35中心区域部分沉积形成多晶硅的图案牺牲层50,最后在多晶硅图案牺牲层50上沉积氮化硅从而在硅体上形成一突起,请参阅图12(b)。步骤(5)中,在所述突起两侧面用等离子蚀刻形成小通孔51,对前述牺牲层进行湿法蚀刻从而释放薄膜32,湿法蚀刻过程中先使用氢氧化钾蚀刻剂蚀刻,再使用氢氟酸蚀刻,从而形成图12(c)所示的薄膜结构。在真空炉内再次沉积氮化硅以封闭前述蚀刻孔51,且同时在薄膜结构中形成真空密封空间37,该封闭的氮化物薄膜蚀刻成最终厚度,从而获得预期的挠度及刚度;将等离子蚀刻出口与延伸在薄膜32下方的掺杂多晶硅电极35接触进行蚀刻以去掉部分膜,在薄膜32的两侧镀金属,如镀铝,分别形成两接地电极33,两接地电极33在等离子蚀刻位置与低电极35电接触;最后,在薄膜32表面的中心部分镀金

属层，如镀铝，并形成预定图案从而形成金属传输线，即中心信号线 31，从而最终形成如图 12(d)或图 4 所示的完整结构。将前述方法制得的微电容式麦克风单元按具体需要形成预定尺寸的麦克风阵列 40，组合前述的其它检测信号处理的电子元件，便可形成本发明的微电容式麦克风系统。或者将麦克风阵列 40 与检测信号处理的电子元件一起集成在印刷电路板上，从而形成本发的微电容式麦克风系统。

为更好地提高本发明的麦克风系统的抗潮湿性能，可在麦克风阵列 40 表面涂覆一层抗水涂层，例如，涂覆聚对苯二甲撑 (parylene) 涂层。这样，本发明的麦克风系统即使在水中也可以使用。

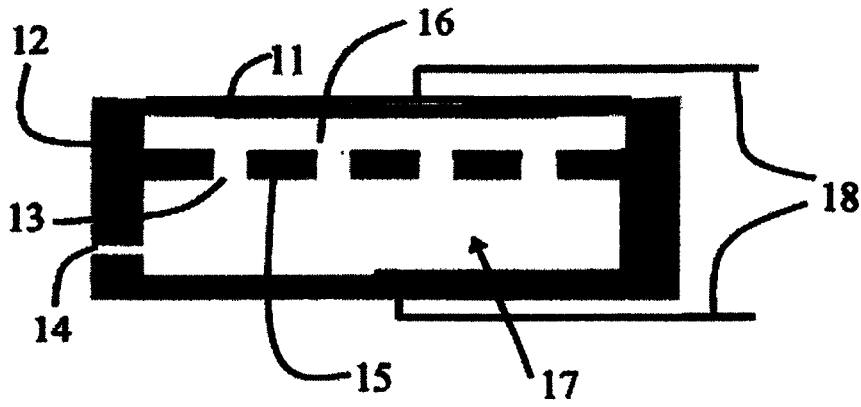


图 1

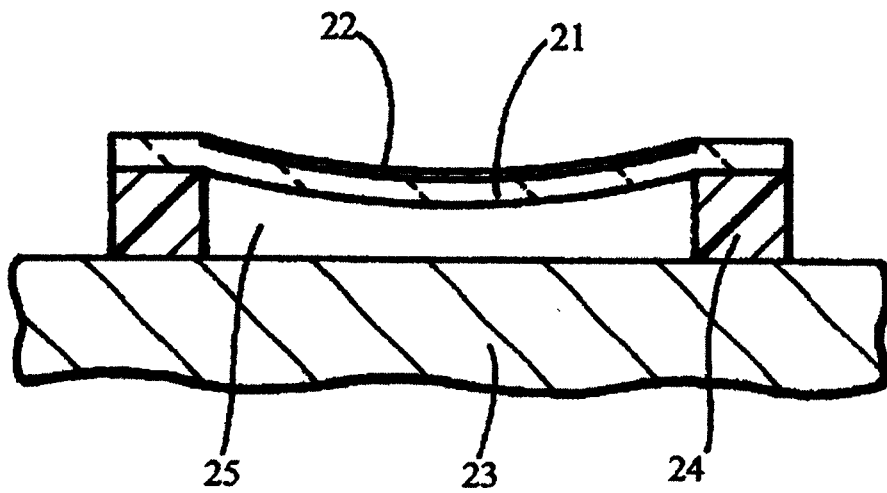


图 2

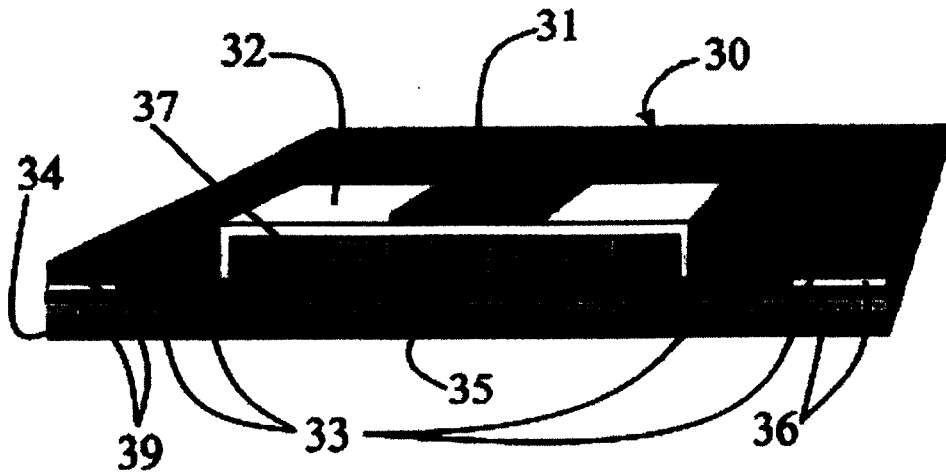


图 3

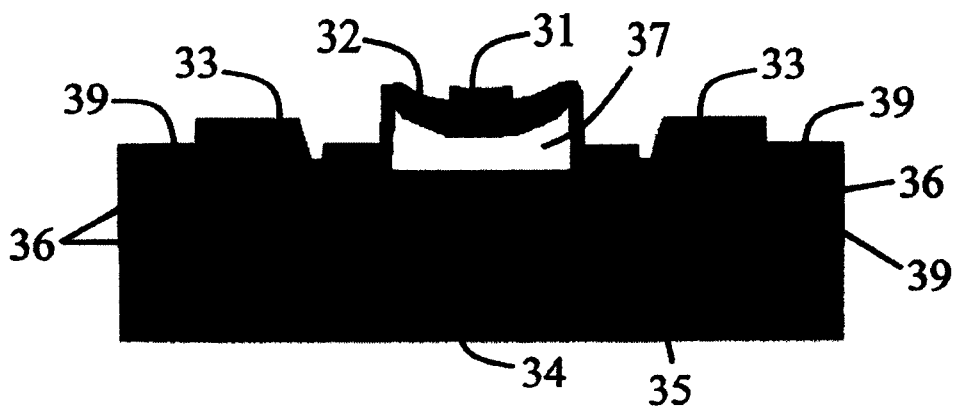


图 4

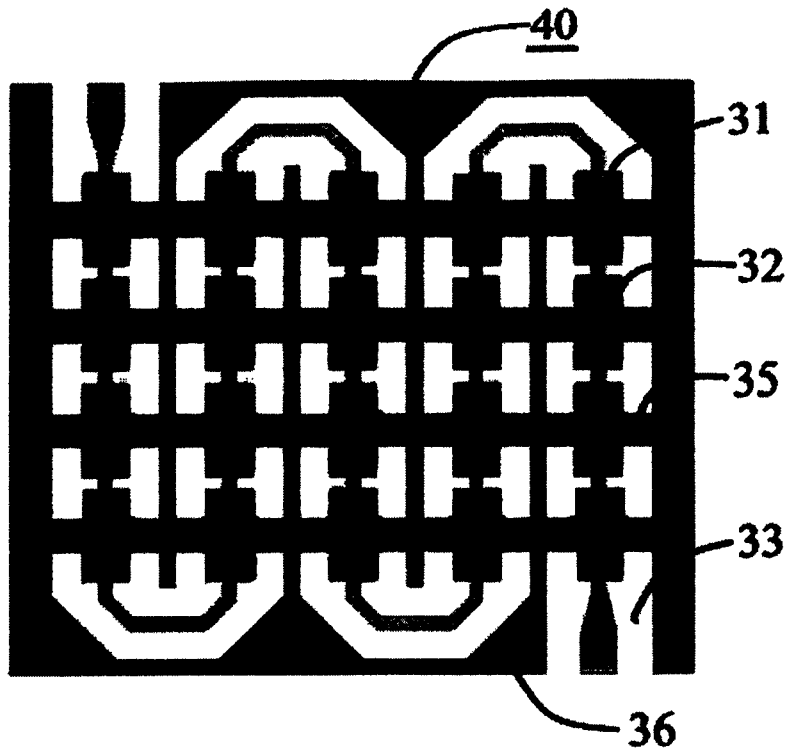


图 5

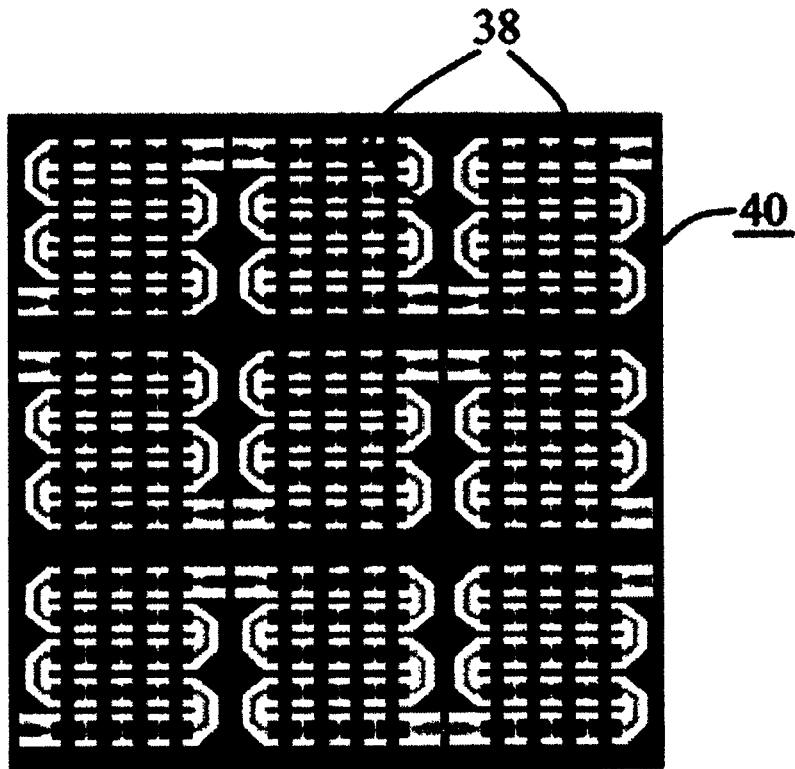


图 6

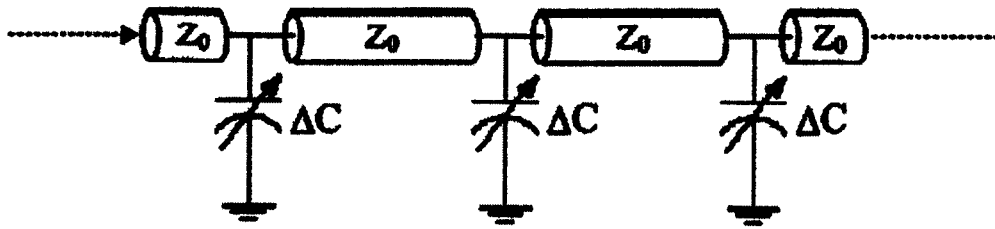


图 7

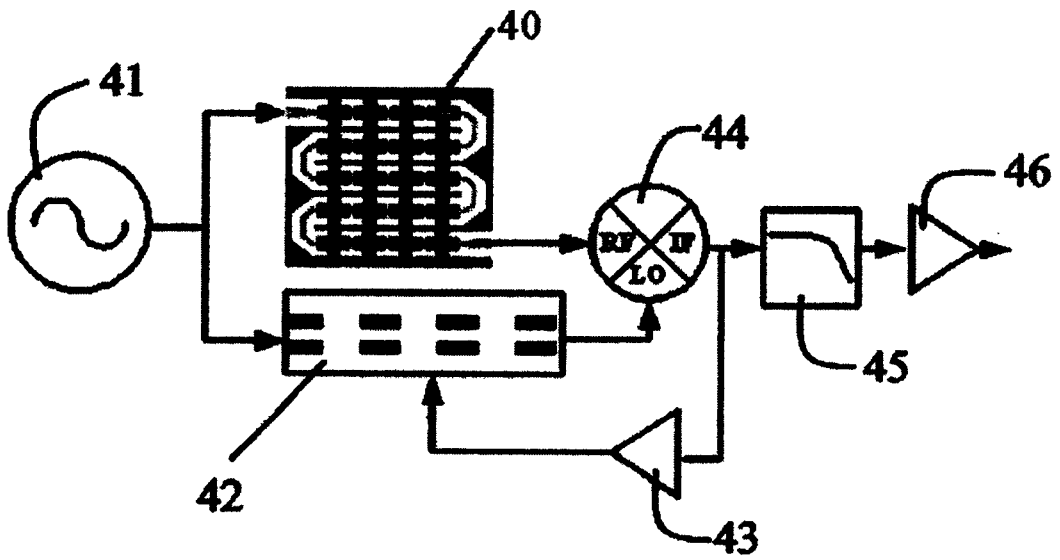


图 8

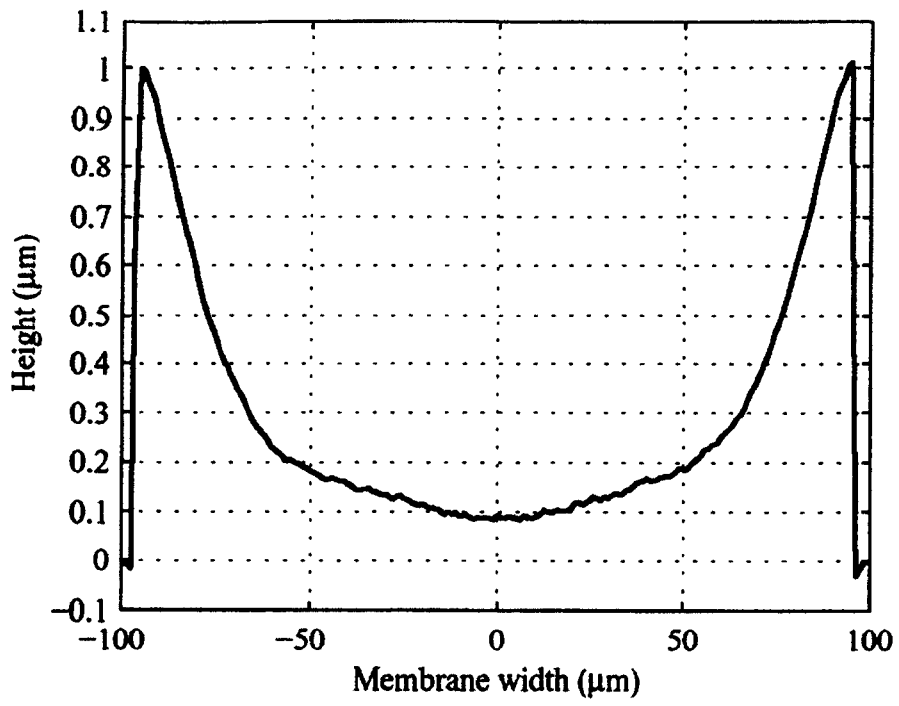


图 9

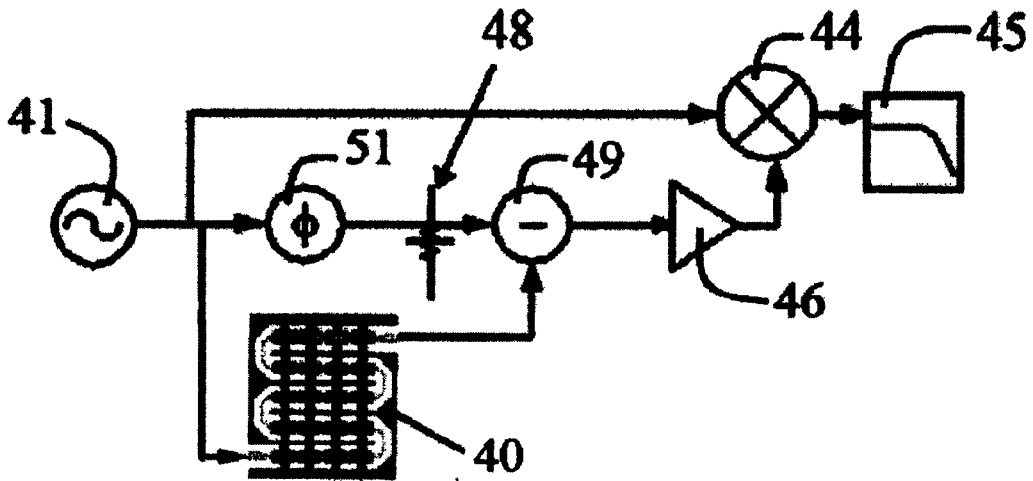


图 10

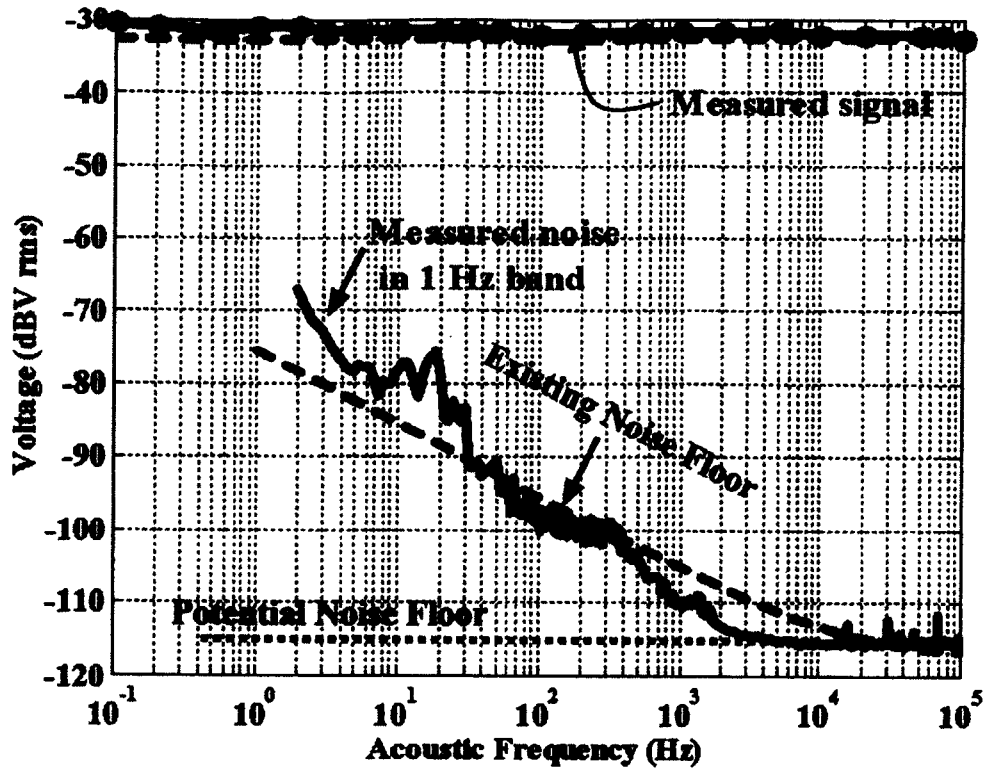


图 11

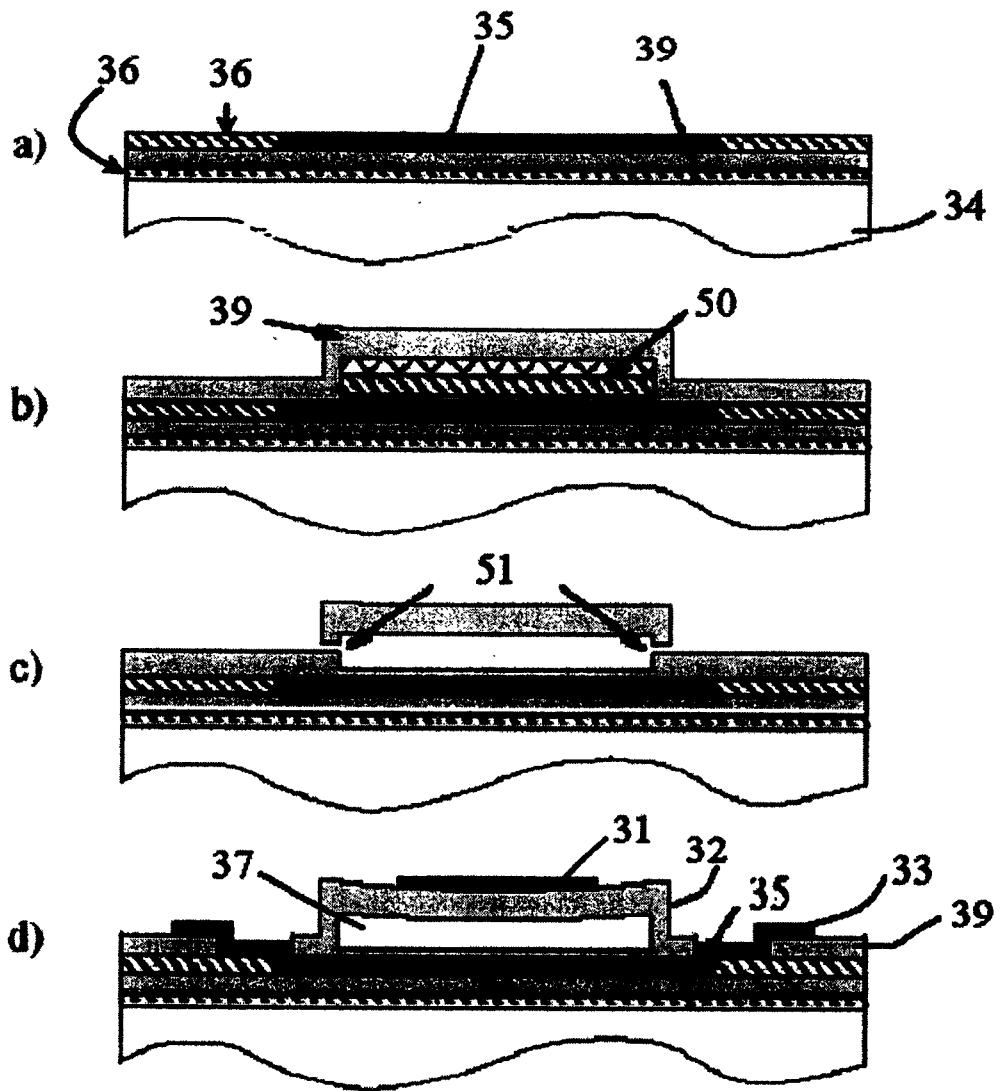


图 12