(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 114829024 A
(43)申请公布日 2022.07.29

(21)申请号 202080087213.6
(22)申请日 2020.10.26
(30)优先权数据
1915544.9 2019.10.25 GB
(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2022.06.15
(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/GB2020/052712 2020.10.26
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2021/079160 EN 2021.04.29
(71)申请人 斯特凡TTO有限公司
地址 挪威特隆赫姆
(72)发明人 弗罗德·泰霍尔德
安德烈亚斯·沃格乐
托拜厄斯·达尔
(74)专利代理机构 北京弘权知识产权代理有限公司 11363
专利代理师 王建国 李琳
(51)Int.Cl.
B06B 1/06(2006.01)
G01S 15/89(2006.01)

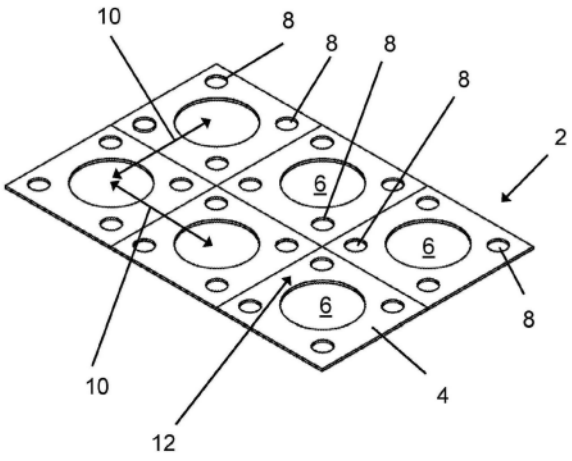
权利要求书2页 说明书10页 附图10页

(54)发明名称

超声换能器

(57)摘要

提供了一种压电微加工超声换能器(PMUT)，其包括位于单个公共半导体管芯上的专用超声发射器和至少一个单独的专用超声接收器。多个PMUT可以布置在镶嵌阵列中。还公开了一种系统，该系统包括在单个公共半导体管芯上的至少一个PMUT，还提供了被布置成发射第一超声信号的专用超声发射器以及被布置成接收第二超声信号的至少一个单独的专用超声接收器。该系统还包括信号处理子系统，其包括模拟域；数字域；数模转换器；和模数转换器。所述信号处理子系统被布置成在所述数字域中生成估计的直接路径信号，使用所述数模转换器将所述估计的直接路径信号转换为模拟的估计的直接路径信号，从所述第二信号中减去所述模拟的估计的直接路径信号以产生修改的接收信号并使用所述模数转换器将所述修改的接收信号转换为数字的修改的接收信号。



CN 114829024 A

1.一种压电微加工超声换能器(PMUT),其包括位于单个公共半导体管芯上的专用超声发射器和至少一个单独的专用超声接收器。

2.根据权利要求1所述的PMUT,其中所述管芯是正方形或矩形的。

3.根据权利要求1或2所述的PMUT,其中所述超声发射器基本上位于所述管芯的中心,并且所述超声接收器基本上位于所述管芯的角或各个角中。

4.根据权利要求3所述的PMUT,其包括在所述管芯的每个角中的一个超声接收器。

5.根据前述权利要求中任一项所述的PMUT,其中所述超声发射器的宽度至少是所述超声接收器的宽度的两倍。

6.根据前述权利要求中任一项所述的PMUT,其中所述超声发射器被配置为发射具有主波长的信号,并且所述半导体管芯具有基本上等于所述主波长的一半的宽度。

7.根据前述权利要求中任一项所述的PMUT,其包括布置在所述超声发射器和所述超声接收器之间的一个或多个声学路径屏障。

8.一种装置,其包括布置成镶嵌阵列的多个如前述权利要求中任一项所述的PMUT。

9.根据权利要求8所述的装置,其中所述阵列是矩形阵列。

10.一种用于发射和接收超声信号的系统,其包括至少一个根据权利要求1至7中任一项所述的PMUT、被布置成驱动所述超声发射器的发射器电路和被布置成检测来自所述超声接收器的信号的接收器电路。

11.根据权利要求10所述的系统,其被布置成从接收信号中减去直接路径信号以产生修改的接收信号。

12.根据权利要求11所述的系统,其被布置成在转换成数字之前从模拟的接收信号中减去所述直接路径信号,以产生修改的模拟的接收信号。

13.根据权利要求10-12中任一项所述的系统,其被布置成从所述专用超声发射器发射第一超声信号并且被布置成从所述专用超声接收器接收第二超声信号,所述系统还包括信号处理子系统,所述信号处理子系统包括:

模拟域;

数字域;

数模转换器;和

模数转换器,

其中所述信号处理子系统被布置成在所述数字域中生成估计的直接路径信号,使用所述数模转换器将所述估计的直接路径信号转换为模拟的估计的直接路径信号,从所述第二信号中减去所述模拟的估计的直接路径信号以产生修改的接收信号并使用所述模数转换器将所述修改的接收信号转换为数字的修改的接收信号。

14.一种系统,其包括至少一个压电微机器超声换能器(PMUT),所述PMUT包括在单个公共半导体管芯上的专用超声发射器和至少一个单独的专用超声接收器,所述发射器被布置为发射第一超声信号,所述接收器被布置为接收第二超声信号,所述系统还包括信号处理子系统,所述信号处理子系统包括:

模拟域;

数字域;

数模转换器;和

模数转换器，

其中所述信号处理子系统被布置成在所述数字域中生成估计的直接路径信号，使用所述数模转换器将所述估计的直接路径信号转换为模拟的估计的直接路径信号，从所述第二信号中减去所述模拟的估计的直接路径信号以产生修改的接收信号并使用所述模数转换器将所述修改的接收信号转换为数字的修改的接收信号。

15.根据权利要求13或14所述的系统，其被布置为记录从所述发射器到所述接收器的直接路径信号以创建直接路径信号的数据库。

16.根据权利要求15所述的系统，其被布置为从所述数据库中选择估计的直接路径信号。

17.根据权利要求16所述的系统，其被布置为监测所述数字的修改的接收信号的质量参数，并基于所述质量参数执行以下之一：使用所述估计的直接路径信号；修改所述估计的直接路径信号；从所述数据库中选择新的估计的直接路径信号；或者记录从所述超声发射器到所述超声接收器的一个或多个新的直接路径信号。

18.一种操作用于发射和接收超声信号的根据权利要求10至17中任一项所述的系统的方法，所述方法包括对于至少部分操作时间段，同时从所述超声发射器发射信号和使用所述超声接收器接收信号。

19.一种操作用于发射和接收超声信号的根据权利要求10至17中任一项所述的系统的方法，所述方法包括从所述超声发射器发射信号，所述信号具有基本上是所述半导体管芯的宽度的两倍的主波长。

20.一种操作用于发射和接收超声信号的根据权利要求10至17中任一项所述的系统的方法，所述方法包括从所述超声发射器周期性地发射信号，其中每个发射周期长于0.1毫秒。

21.一种操作用于发射和接收超声信号的系统的方法，所述系统包括压电微加工超声换能器(PMUT)的非平面阵列，每个换能器包括在单个公共半导体管芯上的专用超声发射器和至少一个单独的专用超声接收器，所述方法包括从所述非平面阵列中的所述PMUT中的第一个的发射器发射一个或多个信号，使用所述非平面阵列的所述PMUT中的第二个的至少一个接收器接收所述信号，并使用所述接收到的信号确定所述第一和第二PMUT的相互相对位置。

22.根据权利要求21所述的方法，包括在由所述第一和第二PMUT上的一个或多个接收器接收的信号的后续信号处理中使用所述相互相对位置。

23.一种用于发射和接收超声信号的系统，其包括压电微加工超声换能器(PMUT)的非平面阵列，每个换能器包括在单个公共半导体管芯上的专用超声发射器和至少一个单独的专用超声接收器，所述系统被配置为执行权利要求21或22所述的方法。

超声换能器

[0001] 本发明涉及超声换能器,即用于产生和接收频率高于人类可听见的声波的装置。它们可用于许多应用,从简单的测距应用到复杂的医学成像应用,在测距应用中可以通过测量发射超声信号和接收反射回波信号之间的时间来估计到物体的距离。

[0002] 在许多应用中,使换能器尽可能小是重要的,因为它们要安装到小型装置中,或者允许使用大型阵列。为此目的开发的一种技术是压电微加工超声换能器(PMUT),其中每个PMUT元件在耦合到适当的电路时通常充当发射器和接收器两者。

[0003] 尽管PMUT实现了生产小型超声换能器的目标,但申请人已经意识到存在与它们相关的缺点。

[0004] 从第一方面来看,本发明提供了一种压电微加工超声换能器(PMUT),其包括位于单个公共半导体管芯上的专用超声发射器和至少一个单独的专用超声接收器。

[0005] 本发明扩展到一种用于发射和接收超声信号的系统,该系统包括至少一个如本文所述的PMUT、布置成驱动所述超声发射器的发射器电路和布置成检测来自所述超声接收器的信号的接收器电路。

[0006] 因此,本领域技术人员将看到,根据本发明,单个管芯具有单独的专用发射器和接收器。这解决了申请人确定的现有技术方法的缺点之一,即如果相同的元件同时用作发射器和接收器,则需要以通常非常短、锐利和高功率的突发模式发送信号。

[0007] 需要短突发(burst),以便作为发射器和接收器的元件能够从发射切换到接收,以捕获来自附近物体的反射信号。突发必须具有相对较高的功率,以确保发射足够的能量以提供足够的分辨率。这意味着相关的电子设备需要在作为发射器的元件之间切换,并且由于需要应对突发发射的高功率输出,这些电子设备很复杂。

[0008] 相比之下,根据本发明,在单个半导体管芯上同时具有专用发射器和专用接收器允许同时发射和接收信号,因此不需要切换电子设备。这可以降低系统电子设备的复杂性。此外,可以通过更长、更低功率的发射实现给定的发射能量,这减少了对发射器本身和驱动电路的需求,因为不需要创建突发发射所需的电力电子设备。此外,这意味着通常可以在接收器处避免‘消隐期’,即接收器‘关闭’的时间窗口,因为它当时充当发射器。这进而意味着,使用传统的切换系统,难以测量离与传感器/发射器设置非常接近的物体的距离。当使用更长、更低功率的发射时,接收器可以在发射进行时‘收听’,并拾取发射器和接收器之间的回声和直接路径声音的叠加。这进而可以实现对附近物体的检测和成像。

[0009] 例如,在100kHz系统上,每秒可发送100个信号,例如啁啾(chirp)。这些啁啾中的每一个都可以跨越整个周期,即高达1/100秒或10毫秒。然而,它也可更短,但要创建任何有意义的代码-即不仅仅是一个尖峰或突发,预计它必须填充此周期的至少1/100,或0.1毫秒。例如,使用200kHz的采样频率,这相当于200,000*0.0001秒或20个样本。短于20个样本的代码将更类似于突发,而不是有用的实际编码信号(例如啁啾)。该代码还可以并且优选地长于20个样本,即50个样本或100个样本,或者如果应用程序需要较少的高速跟踪,它甚至可以更长。对于主要处理缓慢移动物体的运动跟踪系统,30Hz的帧速率可能就足够,这意味着300毫秒是一个很好的啁啾长度。

[0010] 在一组实施例中，从接收信号中减去直接路径信号以产生修改的接收信号。直接路径信号是直接从超声发射器传播到超声接收器的信号，而没有被感兴趣的物体反射。直接路径信号可以包括空中直接声学路径信号，和/或通过半导体管芯直接从发射器发射到接收器的信号。一旦经历了模数转换，例如使用合适的数字信号处理器，直接路径信号的减去可以在数字接收信号上执行。然而，申请人已经意识到这种方法的缺点。通常，直接路径信号比来自感兴趣物体的期望接收反射信号强得多。因此，当从超声接收器接收到的信号通过模数(A/D)转换器进行模数转换时，A/D转换器需要高动态范围才能转换期望的接收信号，即来自感兴趣物体的反射，以及强得多的直接路径信号。高动态范围的A/D转换器，即具有足够位分辨率以避免饱和的转换器，更复杂，并因此成本更高且使用功耗更大，因此不是期望的。

[0011] 因此，在一组实施例中，在转换为数字之前从模拟接收信号中减去直接路径信号以产生修改的接收信号。然后可以将其转换为数字修改接收信号。由于修改接收信号不包括直接路径信号，因此A/D转换器可能不需要如此高的动态范围，因此可能相对简单且便宜。

[0012] 在一组这样的实施例中，专用超声发射器被布置成发射第一超声信号并且专用超声接收器被布置成接收第二超声信号，该系统进一步包括信号处理子系统，该信号处理子系统包括：

[0013] 模拟域；

[0014] 数字域；

[0015] 数模转换器；和

[0016] 模数转换器，

[0017] 其中信号处理子系统被布置成在所述数字域中生成估计的直接路径信号，使用所述数模转换器将所述估计的直接路径信号转换为模拟的估计的直接路径信号，从所述第二信号中减去所述模拟的估计的直接路径信号以产生修改的接收信号并使用所述模数转换器将所述修改的接收信号转换为数字的修改的接收信号。

[0018] 这样的布置本身就具有新颖性和创造性。因此，当从另一方面看时，本发明提供了一种系统，该系统包括至少一个压电微机器超声换能器(PMUT)，该PMUT包括在单个公共半导体管芯上的专用超声发射器和至少一个单独的专用超声接收器，该发射器被布置为发射第一超声信号，该接收器被布置为接收第二超声信号，该系统还包括信号处理子系统，该信号处理子系统包括：

[0019] 模拟域；

[0020] 数字域；

[0021] 数模转换器；和

[0022] 模数转换器，

[0023] 其中信号处理子系统被布置成在所述数字域中生成估计的直接路径信号，使用所述数模转换器将所述估计的直接路径信号转换为模拟的估计的直接路径信号，从所述第二信号中减去所述模拟的估计的直接路径信号以产生修改的接收信号并使用所述模数转换器将所述修改的接收信号转换为数字的修改的接收信号。

[0024] 因此可以看出，根据本发明的上述实施例和方面，直接路径信号的估计可以在数

字域中计算,但在模拟域中减去,以便限制A/D转换器所需的动态范围,如前所解释。

[0025] 在一组实施例中,记录从发射器到接收器的直接路径信号以创建直接路径信号的数据库,例如在数字域。这可以通过例如对接收信号进行时间选通(time-gating)以排除来自环境的反射来完成。可以在一段时间内记录直接路径信号,以便创建更可靠的直接路径信号测量数据库。附加地或替代地,可以在不同的环境条件下记录直接路径信号,例如在变化的温度下。在一组实施例中,估计的直接路径信号是从数据库中选择的。估计的信号可以是随机猜测,或者可以根据来自环境传感器的输入来选择,例如在直接路径信号数据库创建中使用的温度传感器。

[0026] 在一组实施例中,监测数字的修改的接收信号的质量参数。这可以指示用于从接收信号中减去的估计的直接路径信号是否是好的选择。质量参数的一个实例是最小能量,它可以指示最强分量(直接路径)已从接收信号中去除的程度。可用于监控质量的另一个参数是稀疏度,其中信号的最大稀疏度表示正在接收‘清晰回波’。

[0027] 在一组实施例中,如果质量参数高于第一阈值,则修改估计的直接路径信号。例如,过滤器可以将卷积应用于直接路径估计。

[0028] 在一组实施例中,如果质量参数低于第二阈值,则记录从超声发射器到超声接收器的新直接路径信号以创建直接路径信号的新数据库。质量非常差可能表明发射器的行为或环境发生了重大变化。在一组实施例中,如果质量参数高于第二阈值但低于第一阈值,则从数据库中选择新的估计的直接路径信号。

[0029] 因此,在一组实施例中,系统监测数字的修改的接收信号的质量参数,并基于所述质量参数执行以下之一:使用估计的直接路径信号;修改估计的直接路径信号;从数据库中选择新的估计的直接路径信号;或者记录从超声发射器到超声接收器的一个或多个新的直接路径信号。

[0030] 因此,如果质量参数高于第一阈值并且用于从接收信号中减去的估计的直接路径信号是良好选择,则接收信号可用于进一步分析,例如接近度、存在或手势感测。

[0031] 在本发明的任一方面的一组实施例中,PMUT包括布置在超声发射器和超声接收器之间的一个或多个声学路径屏障。这些声学路径屏障可以通过削弱发射器和接收器元件之间的信号的空气传输来物理地降低空中直接声学路径信号的强度。

[0032] 当从另一方面看时,本发明提供了一种操作用于发射和接收超声信号的系统的方法,该系统包括至少一个如本文所述的PMUT,该方法包括对于至少部分操作时间段,同时从所述超声发射器发射信号和使用所述超声接收器接收信号。

[0033] 当从另一方面看时,本发明提供了一种操作用于发射和接收超声信号的系统的方法,该系统包括至少一个如本文所述的PMUT,该方法包括从所述超声发射器周期性地发射信号,其中每个发射周期长于0.1毫秒,例如长于0.2毫秒。

[0034] 在一组实施例中,使用编码的发射。这可以允许接收器区分信号部分发射的时间,从而计算反射信号从物体传播的距离。编码的发射的一个简单实例是啁啾,例如连续增加/减小频率的发射。特定频率的接收信号然后提供有关信号最初发射时间的信息,并且可以计算信号传播的距离。

[0035] 通过将发射信号与接收信号相关联,系统脉冲响应可以从接收的啁啾信号中计算,或者可以使用更先进的脉冲响应估计技术,例如反卷积。具体来说,如果发射信号是s

(t)，那么接收信号将是：

[0036] $y(t)=h(t)*s(t)+n(t)$

[0037] 其中h(t)是信道脉冲响应，n(t)是噪声项。然后，假设发射信号近似为白色，即，$s(t)*s(-t)\approx\partial(t)$，其中$\partial(t)$是近似的狄拉克脉冲，可以得到脉冲响应的估计值为：

[0038] $$\widehat{h(t)}=y(t)*s(-t)=h(t)*s(t)*s(-t)+n(t)*s(-t)\approx h(t)+n_2(t)$$

[0039] 其中$n_2(t)=s(-t)*n(t)$。

[0040] 也可以或替代地通过反卷积计算脉冲响应，即通过从信号s(t)的样本构造矩阵S，以获得矩阵向量方程组：

[0041] $y=Sh+n$

[0042] 其中向量y包含时间序列y(t)的堆叠样本和脉冲响应h(t)的h个堆叠样本，然后在任何合适的范数或约束下计算h作为该方程组的解。脉冲响应包含有关直接路径信号和回波的信息，这些信息可以使用已知的DSP技术消除歧义。

[0043] 尽管考虑到制造发射器和接收器通常需要的不同的工艺，这对于本领域技术人员来说是违反直觉的，但申请人已经认识到在单个公共管芯或芯片上具有这些不同的专用元件的优点，因为它允许更多元件在更小的区域内，因此可以减小任何多个管芯阵列的尺寸。这在许多领域都是有益的，尤其是在智能可穿戴设备领域，例如在较小区域内需要高分辨率的领域。

[0044] 管芯可以是任何方便的形状，但在一组实施例中，管芯是正方形或矩形的。发射器可以是任何形状，但优选地是圆形的。类似地，所述或每个接收器优选地是圆形的。

[0045] 可以以任何方便的方式实现管芯上的发射器和接收器的布局。。在一组实施例中，超声发射器基本上位于管芯的中心，并且(一个或多个)超声接收器基本上位于管芯的角或相应的角中。在管芯为正方形或矩形的一个实例中，在所述管芯的每个角中提供一个超声接收器，即，有四个接收器。

[0046] 在一组实施例中，超声发射器或系统被配置成发射具有主波长(λ)的信号，并且所述半导体管芯具有基本上等于所述主波长的一半(λ/2)的宽度。类似地，本发明扩展到一种操作用于发送和接收超声信号的系统的方法，该系统包括至少一个如本文所述的PMUT，该方法包括从所述超声发射器发射信号，所述信号具有基本上是所述半导体管芯宽度的两倍的主波长。

[0047] 当本文描述类型的多个管芯被布置在镶嵌阵列中时，具有宽度λ/2的管芯可能是有益的，因为其发射器因此将大体上间隔λ/2。如本领域技术人员或阵列信号处理的技术人员将理解的，这是执行波束成形等的最佳选择。其中，如上所述，接收器位于管芯的角处，相应管芯上的相应接收器也将大体隔开λ/2。在每个角都有接收器的情况，它们将形成2x2微型阵列，跨越平铺芯片的每个顶点，并且这些微型阵列中的每一个都将与其他此类微型阵列具有λ/2间距。理论上可以证明，这种布置具有高程度的分辨率和光束转向能力，因为它不违反空间奈奎斯特采样标准，这会导致所谓的栅瓣。微型阵列可以用作‘一个公共传感器’，即通过对来自它们的信号求和或求平均值，或者，可以单独使用它们的输入，作为单独处理每个元素的阵列处理方法的输入。这有一定的好处，例如能够更好地关注或消除来自特定方向的声音。例如，如果有信号进入阵列的宽边，则信号s1(t)、s2(t)、s3(t)、s4(t)可

以组合成例如s1(t)-s2(t)+s3(t)-s4(t)，或者还有s1(t)+s2(t)-s3(t)-s4(t)，两者在正向的响应都为0，但不是从其他方向。

[0048] 本发明扩展到包括布置成镶嵌的、优选地矩形的阵列的如本文所述的多个PMUT的装置。

[0049] 可以选择发射器和接收器的尺寸以适合特定应用。在一组实施例中，发射器大于接收器。这可能有利于有效地产生所需的发射能量。在一组实施例中，超声发射器的宽度至少是超声接收器宽度的两倍。例如，它可以是接收器的至少三倍、四倍、五倍或更多倍。申请人已经认识到，一种特别有益的布置是在方形管芯中央的圆形发射器中具有较大的发射器，并且在其边缘具有圆形接收器。这样的几何结构允许紧凑的整体管芯尺寸，同时允许发射器的尺寸最大化。

[0050] 在一组实施例中，在柔性基板上提供多个管芯。由于每个管芯都配备了发射器和接收器元件，因此可以布置管芯以计算彼此的相对位置。因此可以将管芯安装在柔性PCB上，然后可以将其连接到多个不同表面中的任何一个上。这可以为微型机器人、无人机等提供灵活、低功耗、可超级安装的3D成像系统。多个管芯还可用于构建自配置阵列或传感器网络。这些可以通过利用以下事实进行自配置：由于每个芯片至少都有发射器和接收器，每个元件的相对位置可以通过使用在不在相同管芯上的发射器和接收器对之间的飞行时间测量或方向测量(到达方向)或相对时间差(到达时间差)或它们的组合，结合管芯布局的知识而得出。

[0051] 这种布置本身是新颖的和创造性的，因此从另一方面来看，本发明提供了一种操作用于发送和接收超声信号的系统的方法，该系统包括压电微加工超声换能器(PMUT)的非平面阵列，每个换能器包括在单个公共半导体管芯上的专用超声发射器和至少一个单独的专用超声接收器，所述方法包括从所述非平面阵列中的所述PMUT中的第一个的发射器发射一个或多个信号，使用所述非平面阵列的所述PMUT中的第二个的至少一个接收器接收所述信号，并使用所述接收到的信号确定所述第一和第二PMUT的相互相对位置。

[0052] 本发明的该方面扩展到被配置为执行上述方法的系统。

[0053] 在一组实施例中，所述相互相对位置用于对由所述第一和第二PMUT上的一个或多个接收器接收的信号的后续信号处理中。

[0054] PMUT可由任何合适的压电材料形成，但在一组实施例中，超声发射器和/或超声接收器由氮化铝或氮化铝钪制成。如上所述，尽管传统上认为在公共管芯上制造发射器和接收器是困难的，但申请人已经意识到，将这些材料用于发射器和接收器有利于这一点，而不会过度损害两者的性能。申请人已经发现，例如，由AlN制造的发射器在某些情况下可以用比气相沉积锆钛酸铅(PZT)更高的电压驱动，并且进一步，用钪代替一些铝可以显著提高PMUT的性能。发射器和接收器都可以由相同的材料制成，或者也可以使用针对高效发射和接收而优化的材料组合。

[0055] 在其他实施例中，超声发射器和/或超声接收器由PZT(锆钛酸铅)、KNN((K,Na)NbO3)、ZnO(氧化锌)、BaTiO3(钛酸钡)或PMN-PT(Pb(Mg1/3Nb2/3)O3-PbTiO3)制造。

[0056] 在一组实施例中，发射器和接收器由不同的材料制成。例如，超声发射器可以由PZT制成，而超声接收器可以由AlN制成。PZT通常在比AlN更低的电压下输出更高的声压。

[0057] 在实践中，如果将AlN用于发射器，则可能难以构建提供足够强的输出信号的PMUT

系统，而无需构建复杂且昂贵的放大输出电路。例如，在超声系统安装在大房间天花板上的房间监控应用中，如果发射器使用AlN而不是PZT，则朝向较低水平的地板发射的能量可能不足以获得有用的回波。因此，可能期望使用PZT来制造超声发射器。

[0058] 一旦生成了发射信号以提供从周围环境接收到的足够强的回波，就希望以尽可能高的信噪比(SNR)接收回波。AlN比PZT对超声信号具有更高的灵敏度，因此更适合此目的。更好的SNR导致更好的超声检测，以及在阵列波束形成应用中更有效的波束形成。除此之外，具有良好SNR的足够灵敏的超声接收器还可以降低对过度输出功率的需求(即不怎么需要强信号来提高(SNR)以及在设备中使用过多的功率。例如，在房间监控应用中，使用PMUT的设备可能由电池供电，而不必要高的功率输出水平会缩短电池寿命。

[0059] 虽然PZT在用于制造超声发射器时提供比AlN更高的声压，但超声发射器使用PZT和超声接收器使用AlN也可能存在缺陷。为了使PZT具有高灵敏度，材料必须在使用前进行极化，以使PZT显示压电特性。然而，在大批量制造的情况下，材料的额外极化步骤可能导致更昂贵和更复杂的制造。

[0060] 因此，在一组实施例中，发射器和接收器由相同的材料制成。这可以增加制造的便利性，特别是如果在超声发射器和超声接收器中都使用AlN，因为可能不需要进行材料的极化。

[0061] 在一组实施例中，超声接收器是光学接收器。当超声发射器和超声接收器由不同的材料制成时，光学接收器可以与另一种类型的发射器结合使用。两种合适的示例性类型的光学接收器是使用光学多相读出器和光学谐振器的光学接收器。光学多相读出器例如在WO 2014/202753中进行了描述，并且光学谐振器例如在Shnaiderman,R.等人的“A submicrometre silicon-on-insulator resonator for ultrasound detection”,Nature,2020,585,372-378中进行了描述。

[0062] 这两种光学接收器方法都可以提高接收信号的SNR。这可以使光学接收器元件彼此之间比在接收器元件之间使用的典型λ/2间距更接近，其中根据超指向性原理实现高分辨率成像。因此，通过在具有合适发射器的单个管芯上使用多个紧密间隔的光学接收器，可以制造紧凑的超声成像组件。

[0063] 现在将参考附图仅通过实施例来描述本发明的某些实施方式，在附图中：

[0064] 图1是根据本发明第一实施例的PMUT的视图；

[0065] 图2是根据本发明第二实施例的PMUT的视图；

[0066] 图3是图1的PMUT的剖面图；

[0067] 图4是超声信号发射和接收系统的框图；

[0068] 图5是如图2所示的PMUT的矩形阵列的视图；

[0069] 图6是附接在柔性基板上的如图2所示的PMUT阵列的视图；

[0070] 图7是无人机附接有图6的阵列的视图；

[0071] 图8是PMUT及相关系统的示意图，用于减少直接路径信号；

[0072] 图9是示出产生图8和图9所示系统的直接路径信号的估计的方法的流程图；

[0073] 图10是PMUT及相关系统的另外示意图，用于减少直接路径信号；和

[0074] 图11是使用光学接收器的PMUT的视图。

[0075] 图1是根据本发明实施例的压电微加工超声换能器(PMUT)2的简化视图。PMUT 2包

括方形硅管芯4,在其上形成超声发射器6和超声接收器8。下面参考图3给出制造过程的进一步细节。

[0076] 如将看到的,发射器6是圆形的并且位于管芯的中心。接收器6比发射器6小得多,并且位于管芯的一个角的未使用空间中。图2示出了一个变型实施例,其中各个接收器8位于管芯4的每个角。当然可以提供其他数量的接收器,例如两个、三个或更多。它们也可以位于其他地方,或者多于一个可以位于给定角落。发射器可以具有不同的形状或位置和/或可以提供多个发射器。

[0077] 例如,发射器6可能设计成以40kHz或更高的频率发射信号。管芯4具有大约4mm的宽度,这是这些信号在空气中的波长的一半。发射器6具有大约3mm的直径,而接收器具有大约0.1mm的直径。

[0078] 图3是更详细地显示图2中所示的PMUT 2的层的示意性对角横截面。这包括硅基板100,在其中心具有对应于发射器的孔106以及在对应于接收器的角部具有较小的孔108。放置在硅基板100上的是硅膜102。

[0079] 在发射器和接收器孔106、108上方是各自的压电叠层,其包括夹在两个电极110之间的压电薄膜材料层104,例如AlN、AlScN或PZT。

[0080] 该装置可以通过使用典型的微制造技术来制造。发射器和麦克风的结构通常可以是薄膜、(一维或二维)悬臂结构或桥。这些机械结构的主要部分通常包括硅。这些结构可以通过例如以下制造:硅块体微机械加工,即从硅晶片开始时去除大部分硅,留下预期的机械(薄)结构,或硅表面微机械加工,即沉积(结构化)牺牲层和硅薄膜,将硅薄膜结构化并去除牺牲层后留下机械结构。

[0081] 除了发射器或麦克风元件的主要机械部分外,这些元件还包括薄膜金属电极和压电薄膜。这可能是用于装置的发射器和麦克风部分的相同压电薄膜材料,也可能是具有优化的发射和传感特性的不同压电薄膜材料。薄膜电极材料和压电薄膜材料通常在构造机械结构的硅部分之前构造。取决于致动和读出概念,可以使用两个电极(使用31模式的压电层的下方有一层和顶部上有一层)或一个电极(在使用33模式的压电层的顶部上)。

[0082] 电极材料通常通过溅射工艺沉积。压电薄膜材料(取决于材料)还可以通过物理方法(例如溅射或脉冲激光沉积工艺)或使用化学方法(例如化学气相沉积(CVD)或化学溶液沉积(CSD))来沉积。

[0083] 图4示出了使用本文描述的PMUT 6、8的超声发射和接收系统的典型组件的高度简化的示意框图。该系统包括具有存储器22和电池24的CPU 20,电池通常将为系统的所有组件供电。CPU 20连接到信号发生器26和信号采样器28。这些可以在实践中由合适的数字信号处理器(DSP)提供。信号发生器26连接到驱动超声发射器6的发射放大器30。

[0084] 在另一侧,接收器8连接到接收放大器32,接收放大器将信号传递到采样器28并传递到CPU。需要说明的是,由于发射器6与接收器8是分开的,并且驱动它的路径独立于接收信号的路径,所以不需要复杂的开关电子器件,可以同时进行发射和接收。

[0085] 在使用中,发射器6可以用相对长的、低功率的信号来驱动——例如超过0.1或0.2毫秒长,而不是需要用尖锐的突发信号来驱动。

[0086] 图5示出了图2所示类型的PMUT 2的矩形阵列。在此可以看出,各个管芯4在公共基板(未示出)上以相互邻接的关系镶嵌在一起以形成阵列。因为管芯4是半波长宽,所以发射

器6在X和Y方向上的中心之间间距10也是半波长。还可以看出，相邻管芯的各个角落中的接收器8形成了各自的2x2微型阵列12。由于管芯4的尺寸，这些微型阵列12也分开半个波长。

[0087] 尽管在图5中仅示出了六个管芯4，但在示例性实施例中，在阵列的一维或两维中可能存在许多管芯。

[0088] 声音的波长λ取决于声速c及其频率f：λ＝c/f

[0089] 对于空气中的技术可用超声波(高于40kHz以确保高于狗的可听范围)，波长低于8.6毫米，因此作为超声波阵列的重要参数的一半波长低于4.3毫米。这是MEMS(微机电系统)类型设备的典型尺寸，例如本文所述的那些。

[0090] 对于典型的MEMS类型结构，例如悬臂和膜，基本振动模式的频率可以用以下等式表示：

[0091] 悬臂：

[0092] $$f = \frac{1.015}{2\pi}\frac{t}{L^2}\sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

[0093] 圆形膜/隔膜：

[0094] $$f = \frac{40.8}{2\pi}\frac{t}{d^2}\sqrt{\frac{E}{12(1-\nu)\rho}}$$

[0095] 这里t是机械结构的厚度，E是杨氏模量，ρ是密度，L是悬臂的长度，d是圆形膜的直径。这些等式用于单一材料，但对于多层结构，可以容易地修改。

[0096] 这些等式举例说明了MEMS超声结构的可行性。是MEMS结构的典型尺寸的直径为1250μm的8μm厚硅膜的特征频率具有约80kHz的特征频率。

[0097] 大多数标准波束成形算法都受益于λ/2间距，因为这意味着可以将每个入射波前与具有不同角度或波数的其他入射波前区分开来，这又意味着防止了所谓的‘栅瓣’问题。受益于λ/2(或更窄)间距的经典波束形成方法包括(加权)延迟和求和波束形成器、自适应波束形成器(如MVDR/Capon)、测向方法(如MUSIC和ESPRIT)以及盲源估计方法(如DUET)，以及无线通信方法、具有附加约束的超声成像方法，例如熵或信息最大化。

[0098] 图6示出了由多个图2所示类型的管芯4组成的另一阵列14，其附接到例如由聚氨酯制成的条带16形式的柔性基板上。该阵列14可以附接到任何数量的物体或设备，或者可以形成可穿戴设备的一部分。图7显示了一个实例，其中阵列14附接到无人驾驶飞行器或无人机18的机身。在这样的布置中，驱动发射器及其接收器的处理器(未示出)可以被编程为在校准阶段操作，由此阵列14中的各个发射器6发射不同的信号，或在不同时间发射信号，这些信号由在阵列中的其他管芯上的接收器8接收。使用合适的算法，例如发射编码的信号(CDMA类型)或啁啾信号，然后进行匹配滤波或反卷积，以及信号峰值检测(例如即CFAR滤波器)，可以使用此类发射的飞行时间来确定各个管芯4的相对相互位置。在某些情况下，对计算两个接收器和一个发射/反射信号之间的相对到达时间差(TDOA)更感兴趣。存在用于此的一系列流行方法，包括广义互相关PHAse变换(GCC-PHAT)和转向响应PHAse变换(SRP-PHAT)。

[0099] 然后可以在操作期间使用这些来将适当的相位差应用于各个接收器的信号，以允许它们充当相干阵列-例如用于波束成形。这种方法有利于允许将阵列附接到任意数量的

不规则形状的物体上，因此精确的附接不是关键的。

[0100] 无人机18可以使用阵列14进行回声定位、避免碰撞等。

[0101] 图8是能够补偿直接路径信号的PMUT 302和相关系统的示意图。该系统包括PMUT 302，其包括方形硅管芯304，发射器元件306和接收器元件308形成在其上。

[0102] ASIC(专用集成电路)或DSP(数字信号处理器)42连接到初级数模(D/A)转换器34。该初级D/A转换器34连接到驱动超声发射器306的放大器132。超声发射器306因此发射超声信号48。

[0103] 超声接收器308接收从感兴趣物体反射的反射回波50。超声接收器308还接收声学直接路径信号44、46。直接路径信号之一44是空中直接声学路径信号。另一个直接路径信号46通过管芯304的主体从发射器306传送到接收器308。其他传输机制可能有助于接收器308接收到的整个直接路径信号。

[0104] ASIC/DSP 42还生成直接路径信号44、46对接收到的超声信号的影响的估计，这将在下面参考图9更详细地描述。ASIC/DSP 42包括可以修改产生的估计的信号修改器52。信号修改器52可以例如并入滤波器，该滤波器将卷积应用于来自ASIC/DSP 42的输出信号。估计的直接路径信号传递到D/A转换器54，将其转换为模拟信号。该模拟信号通过放大器36到达混频器38。混频器从接收器308产生的模拟信号中减去模拟的估计的直接路径信号，并且所得信号被传递到模数(A/D)转换器40以产生可以进一步分析的数字信号，例如用于回声定位、存储等。

[0105] 通常，直接路径信号44、46比接收到的回波50强得多。所述实施例有利地在采样之前去除直接路径信号44、46以转换成数字信号。如果不去除直接路径信号44、46，则A/D转换器40将需要高动态范围以便将接收到的回波50以及直接路径信号44、46都转换为数字信号。高动态范围A/D转换器更复杂，因此更昂贵且更耗电。

[0106] 图9是示出在图8所示的系统中产生直接路径信号44、46的估计的方法的流程图。在步骤58，系统开始记录从发射器元件306到单个接收器308的直接路径信号44、46。如果有多个接收器，如图2所示，则可以为每个单个接收器重复该过程。记录的信号不包括来自环境的反射，因为时间选通用于排除这些(因为它们的飞行时间比直接路径信号长)。

[0107] 由于直接路径信号44、46可以随条件(例如温度)而变化，因此可能需要在较长时间段内或在一天中的多个时间实例(当系统未使用)记录数个直接路径信号44、46以在步骤60中获得足够的数据库。可选地，记录可用于通过在稍高或稍低的频率处重新采样来估计不同温度和压力水平下的直接路径信号44、46。

[0108] 在步骤62，测试是否已经创建了足够的直接路径信号数据库的标准。该标准可以与任何合适的质量参数相关，例如预先记录的直接路径信号的自我重复程度，即过去的信号是否在自我重复，或者该标准可以与温度传感器相关联，该温度传感器需要已经收集一定范围的温度的直接路径信号，以使数据库“完整”。随着元素周围的物理环境可能发生变化，数据库可能会不时更新。例如，发射器306或接收器308可能被移动到不同的外壳，或者灰尘可能已经落在传感器上或传感器附近并影响直接声学路径。如果数据库质量不合格，则进一步记录直接路径信号。

[0109] 一旦确定数据库质量足够，在步骤64，反射信号的记录会话开始。在步骤66中提供直接路径信号的初始估计，或者作为随机猜测，或者考虑来自直接路径信号数据库创建步

骤58-62中使用的温度传感器(未示出)的输入。D/A转换器54然后转换来自ASIC/DSP 42的估计的直接路径信号,使得它可以在混频器38中被减去。

[0110] 在步骤70中,发射器306发射超声信号,并且接收器308接收反射回波50和直接路径信号44、46。在步骤72和74中,接收数据的质量被监测以识别从步骤66选择的直接路径信号是否是一个好的选择。质量参数的一个例子是最小能量,它表示接收信号(直接路径44、46)中最强的分量已经被成功地去除。或者,最大稀疏度可以用作参数,因为这表示正在接收“清晰回波”。通常,回波50和直接路径信号44、46的混合往往比它们中的任何一个单独的更复杂。也可以使用其他参数,例如随时间反映熵或自相似性。

[0111] 如果步骤74中的质量良好,则在步骤76中,从混频器38接收到的信号传递到A/D转换器40,并且可以用于进一步分析,例如接近度、存在或手势感测。

[0112] 如果步骤74中的质量很差,并且在步骤78中质量不低于第一阈值,则只需对直接路径信号的估计进行少量修改。这些小的修改可以由滤波器52合并,该滤波器将卷积应用于估计的直接路径信号,以便尝试在步骤80中对估计的直接路径信号进行整流。

[0113] 如果质量参数低于第二临界阈值,则在步骤82,系统再次开始记录直接路径信号,以建立新数据库。当发射器元件306的行为或环境发生重大变化时,这可能是必要的。

[0114] 如果质量参数低于第一阈值,但不低于第二阈值,则可以为估计的直接路径信号选择另一个候选者,如步骤84所示。

[0115] 图10是PMUT 302’和用于补偿直接路径信号的相关系统的另一个实施例的示意图。该实施例与图8的实施例几乎相同,并且相似的部件用相似的附图标记表示,并添加了撇号。然而,在该实施例中,PMUT 302’还包括声学路径屏障56。例如,这些声学路径屏障56可以是围绕发射器306’的圆柱体、围绕接收器308’的圆柱体或围绕发射器306’和接收器308’两者的圆柱体。声学路径屏障56通过减少发射器306’和接收器308’之间的信号44’的空气传输来物理地降低空中直接声学路径信号44’的强度。

[0116] 图11是使用光学接收器408的PMUT 402的视图。例如,这些可以包括MEMS结构,其中使用从膜反射的光,例如使用衍射光栅来读出膜通过声学信号的移动。光学接收器408可以比图2中所示的接收器8更紧密地间隔,因为光学接收器具有低得多的自噪声并且因此比传统的接收器具有更好的SNR。光学接收器408因此可以比λ/2更紧密地间隔开,而图像仍然以高分辨率获得。因此,通过使用紧密间隔的光学接收器408,紧凑的超声成像组件形成在单个管芯404上。

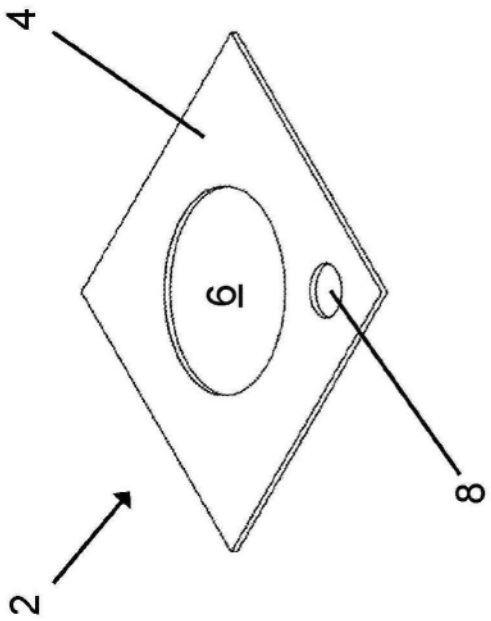


图1

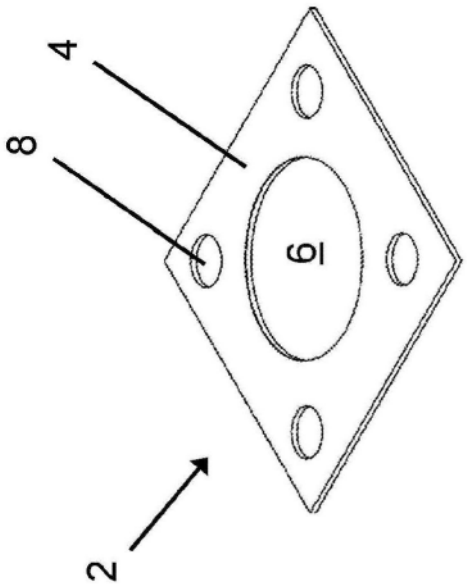


图2

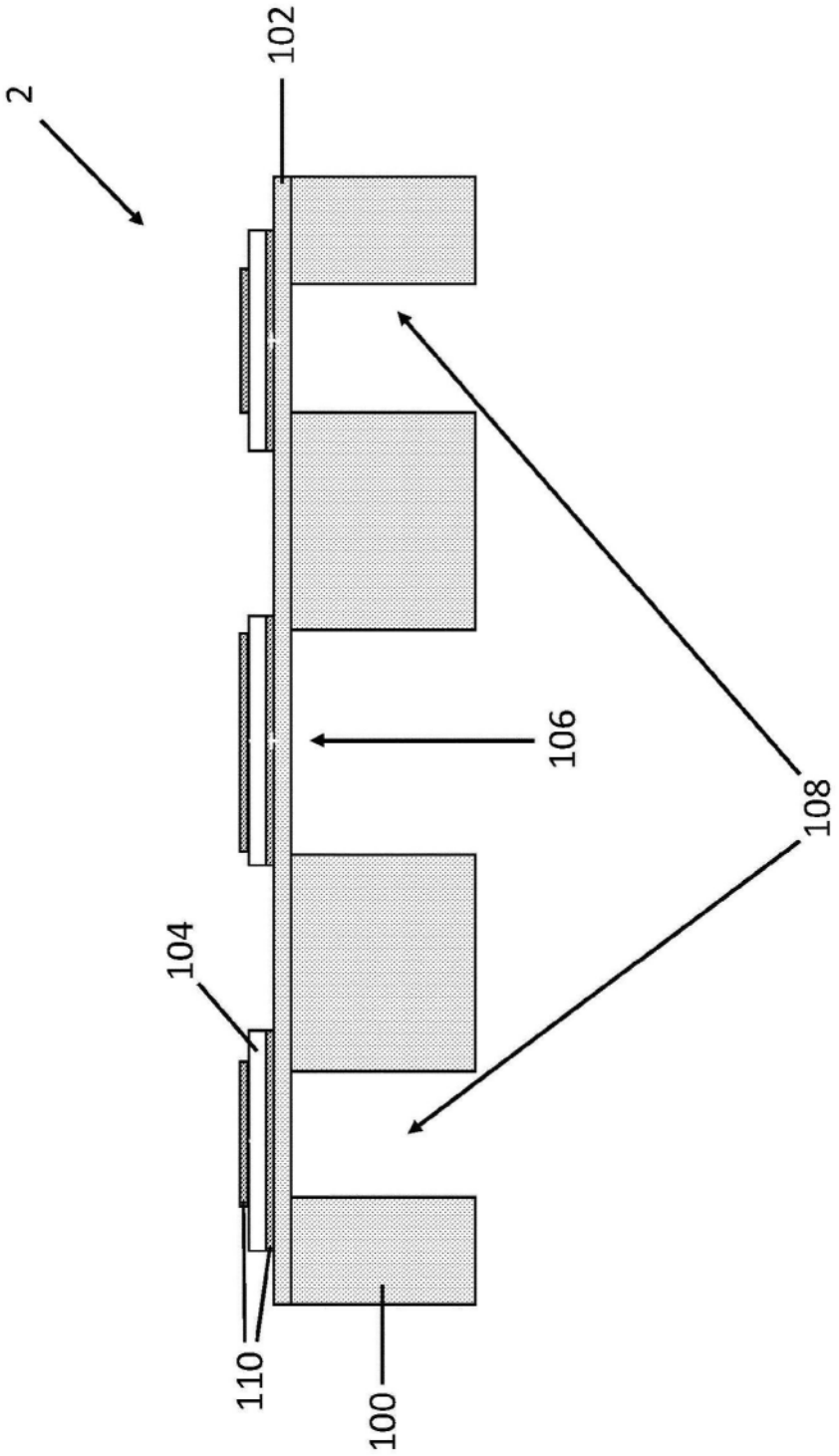


图3

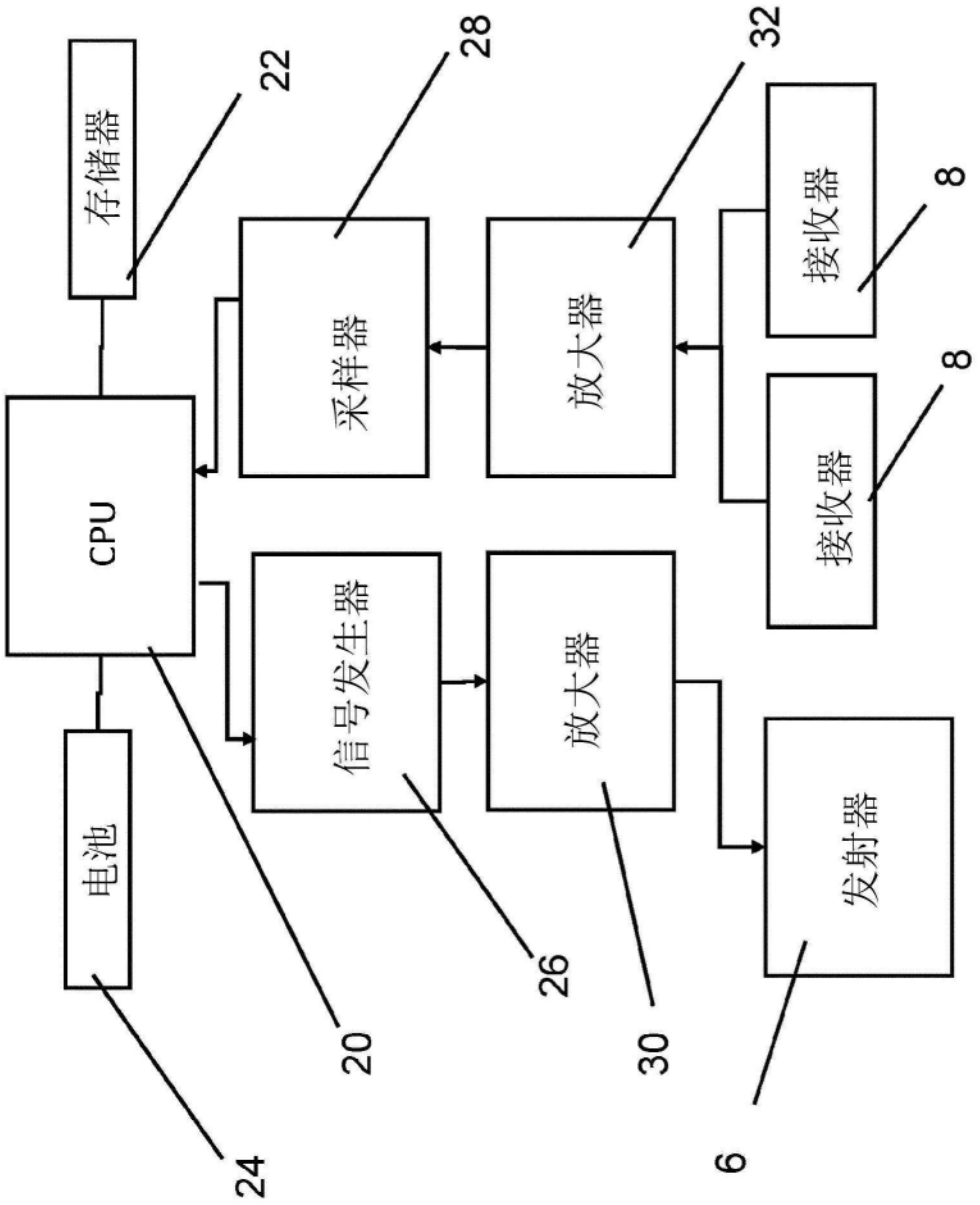


图4

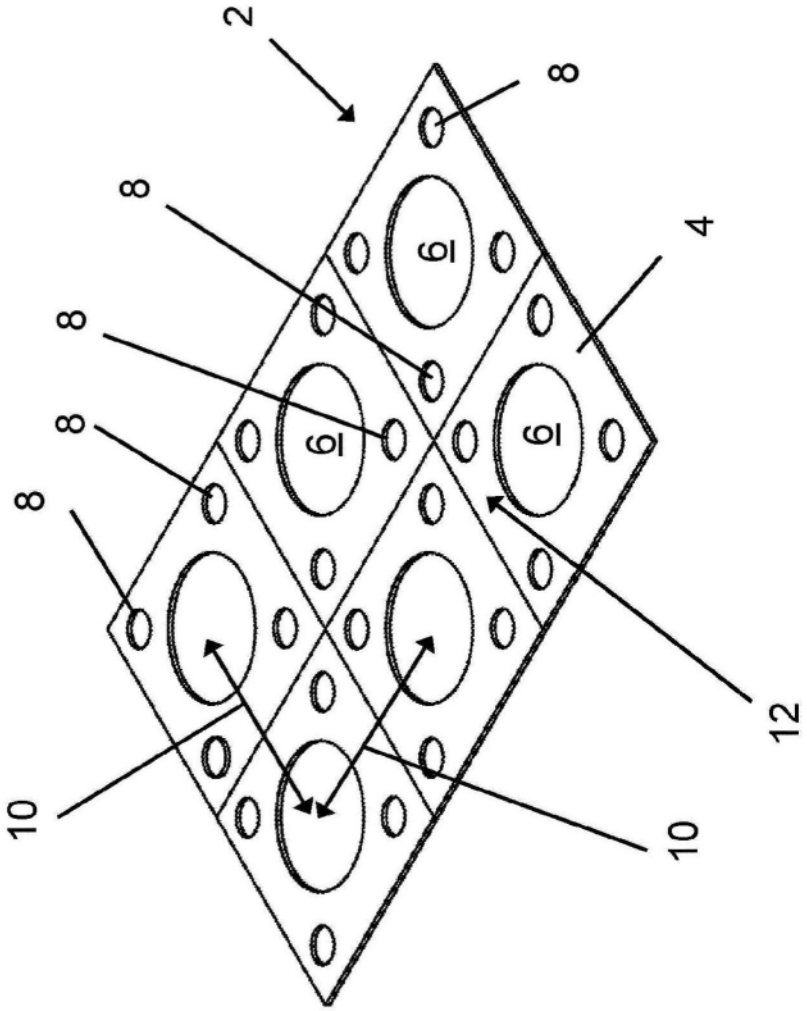


图5

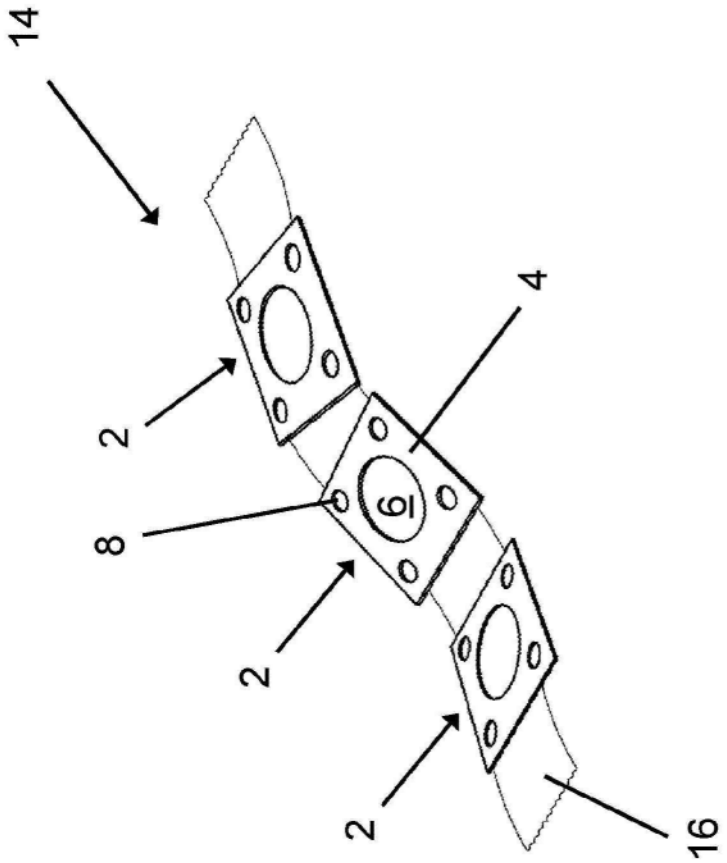


图6

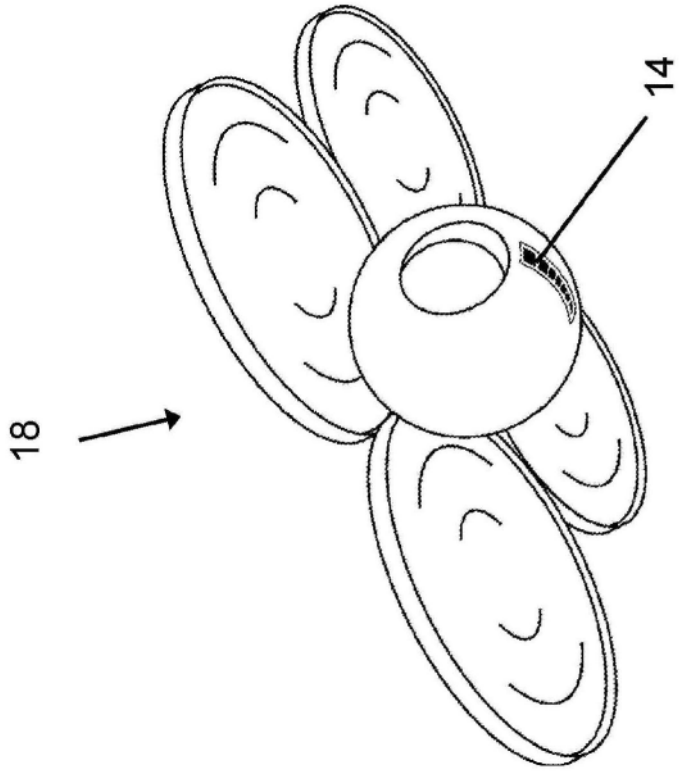


图7

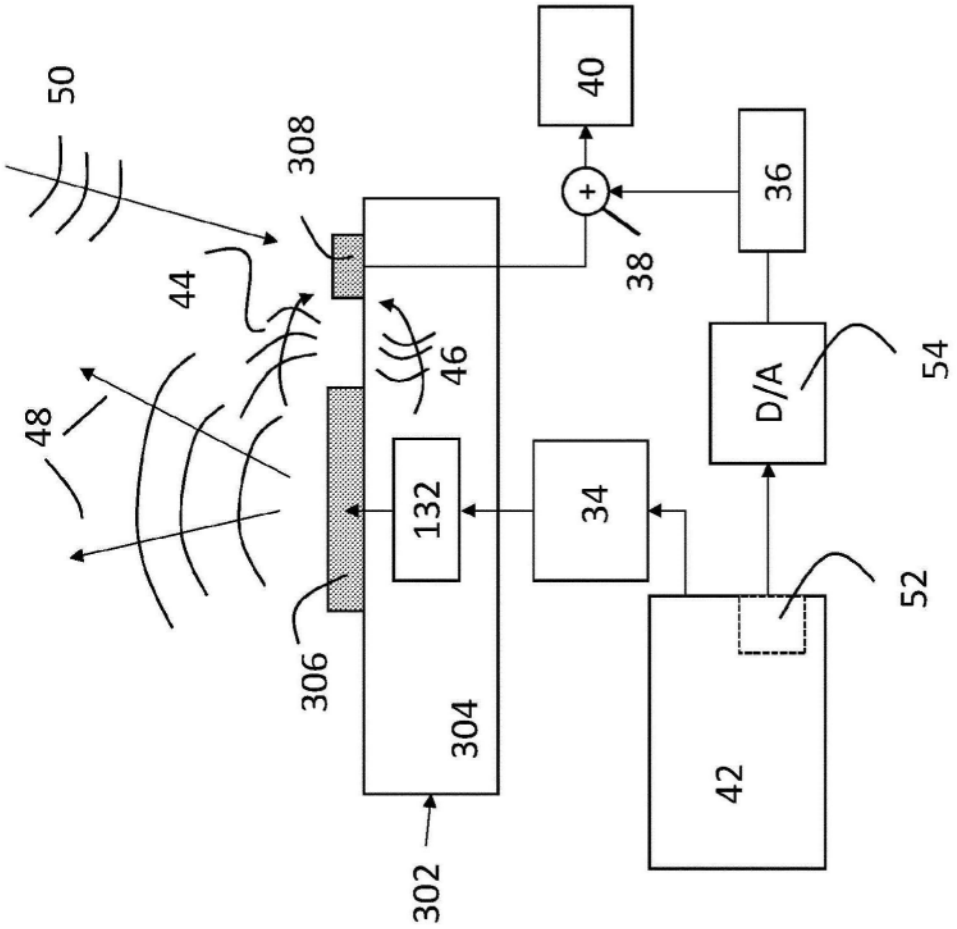


图8

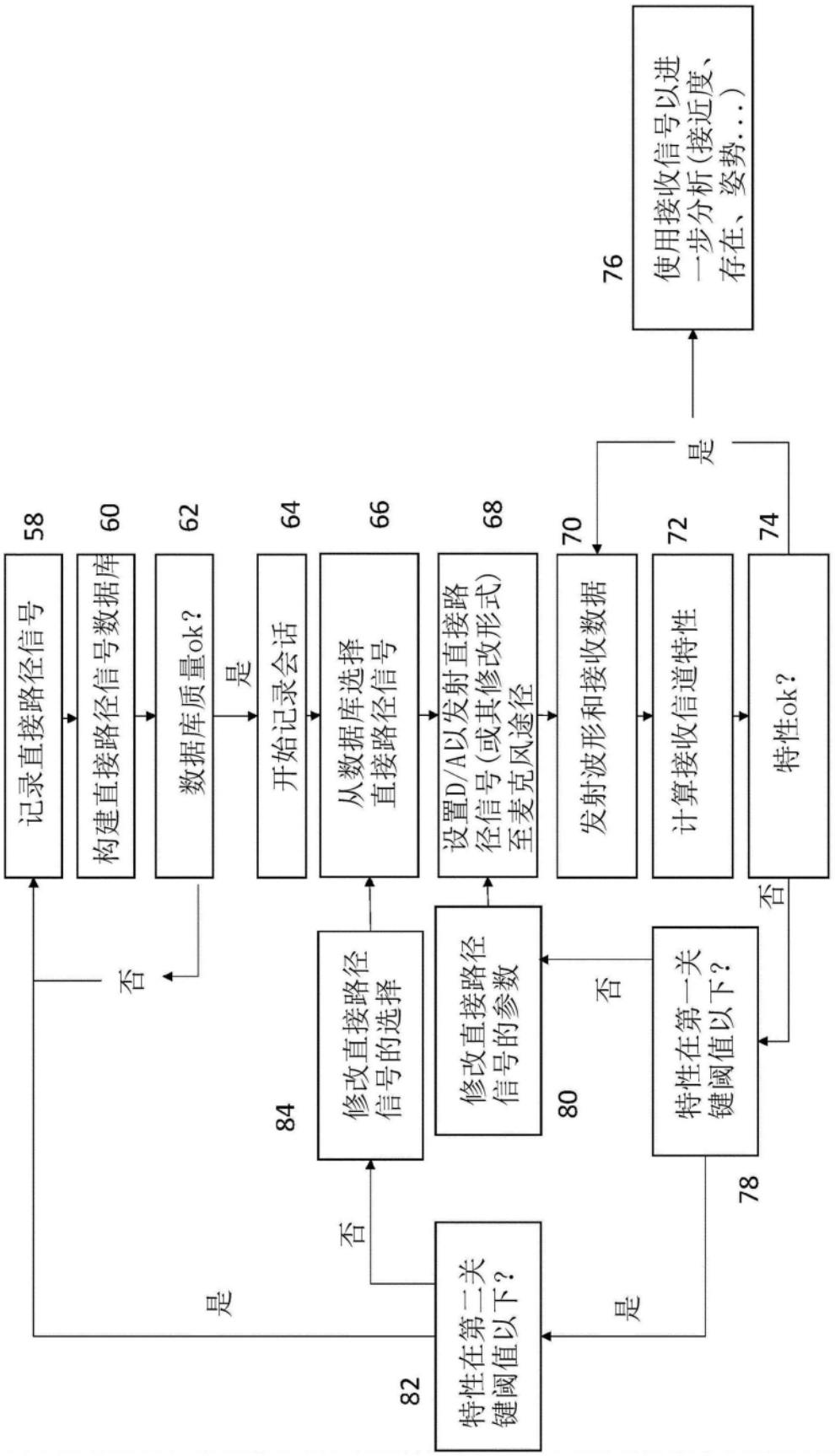

58
记录直接路径信号
60
构建直接路径信号数据库
62
数据库质量ok?
否
是
64
开始记录会话
66
从数据库选择
直接路径信号
68
设置D/A以发射直接路
径信号(或其修改形式)
至麦克风途径
70
发射波形和接收数据
72
计算接收信道特性
74
特性ok?
否
是
76
使用接收信号以进
一步分析(接近度、
存在、姿势...)
78
特性在第一关
键阈值以下?
否
是
80
修改直接路径
信号的参数
82
特性在第二关
键阈值以下?
否
是
84
修改直接路径
信号的选择

图9

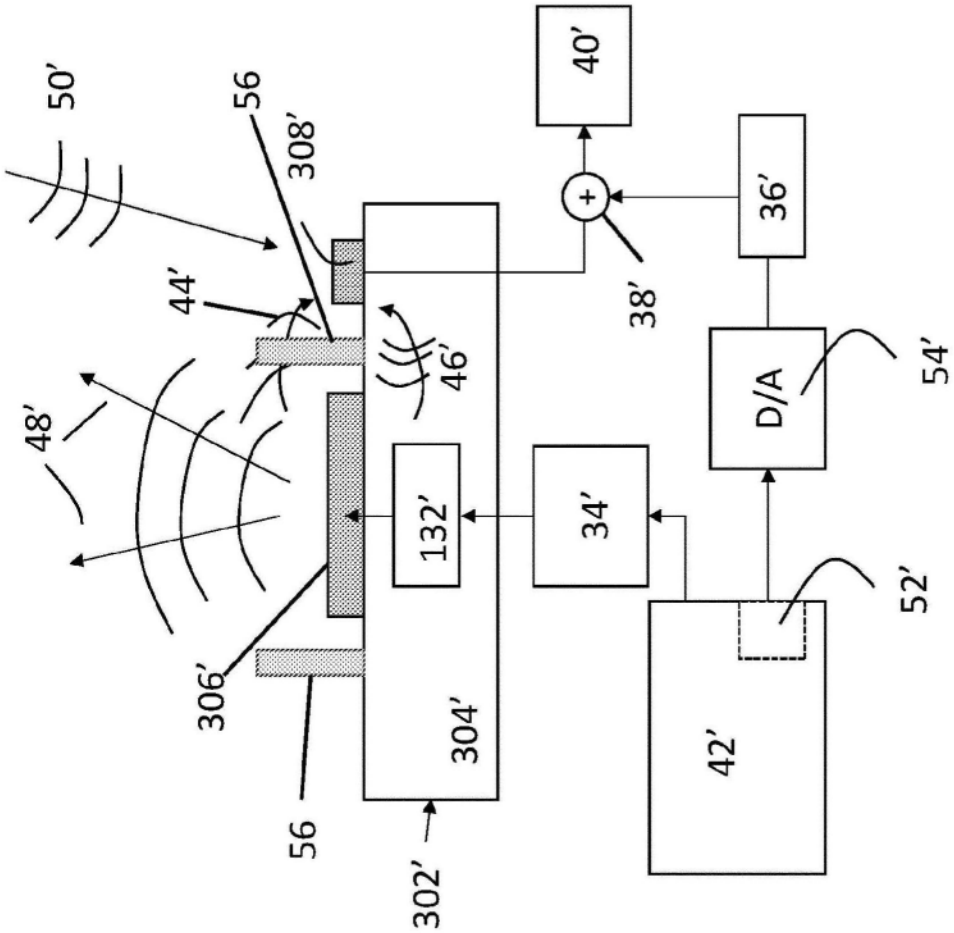


图10

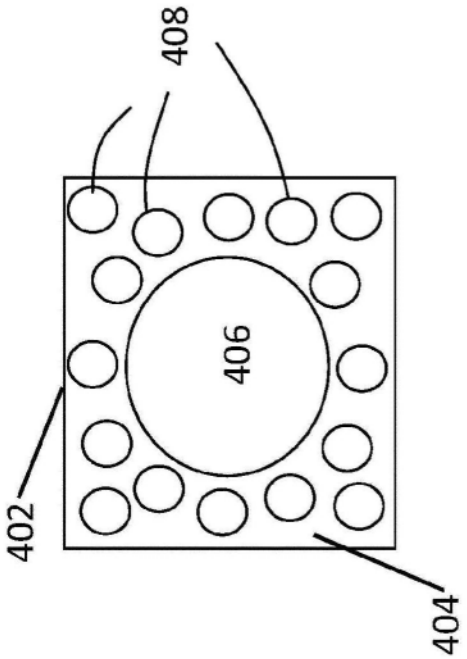


图11