

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2024 年 2 月 8 日 (08.02.2024)



(10) 国际公布号
WO 2024/027730 A1

- (51) 国际专利分类号:
B06B 1/06 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2023/110644
- (22) 国际申请日: 2023 年 8 月 2 日 (02.08.2023)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
202210959236.2 2022年8月5日 (05.08.2022) CN
- (71) 申请人: 天津大学 (TIANJIN UNIVERSITY) [CN/CN]; 中国天津市南开区卫津路 92 号, Tianjin 300072 (CN)。
- (72) 发明人: 庞慰 (PANG, Wei); 中国天津市南开区卫津路 92 号, Tianjin 300072 (CN)。牛鹏飞 (NIU, Pengfei); 中国天津市南开区卫津路 92 号, Tianjin 300072 (CN)。张孟伦 (ZHANG, Menglun); 中国天津市南开区卫津路 92 号, Tianjin 300072 (CN)。
- (74) 代理人: 北京金诚同达律师事务所 (BEIJING JINCHENG TONGDA & NEAL LAW FIRM); 中国北京市朝阳区建国门外大街 1 号国贸大厦 A 座 10 层, Beijing 100004 (CN)。
- (81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD,

(54) Title: MICROMACHINED ULTRASONIC TRANSDUCER STRUCTURE HAVING DUAL PMUTS PROVIDED AT SAME SIDE AS SUBSTRATE, AND MANUFACTURING METHOD THEREFOR

(54) 发明名称: 基底同侧设置有双 PMUT 的微机械超声换能器结构及其制造方法

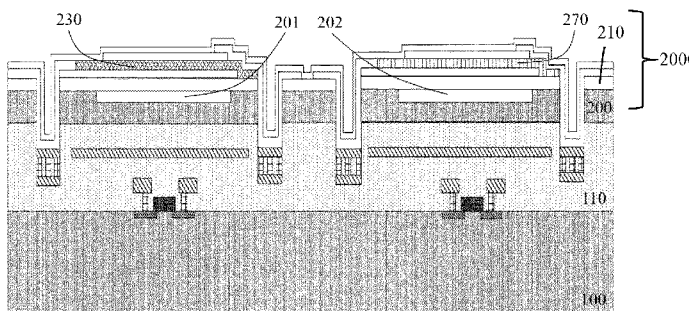


图 1

(57) Abstract: The present invention relates to a micromachined ultrasonic transducer structure and a manufacturing method therefor. The micromachined ultrasonic transducer structure comprises a PMUT unit; the PMUT unit comprises a PMUT substrate, a first PMUT, and a second PMUT; each PMUT comprises a first electrode layer, a second electrode layer, and a piezoelectric layer, wherein the first PMUT and the second PMUT are arranged as laterally spaced apart at one side of the PMUT substrate; the piezoelectric coefficient of the piezoelectric layer of the first PMUT is higher than the piezoelectric coefficient of the piezoelectric layer of the second PMUT; and the permittivity of the piezoelectric layer of the first PMUT is lower than the permittivity of the piezoelectric layer of the second PMUT. The present invention further relates to an electronic device comprising the present micromachined ultrasonic transducer structure.

(57) 摘要: 本发明涉及一种微机械超声换能器结构及其制造方法, 该微机械超声换能器结构包括 PMUT 单元, PMUT 单元包括 PMUT 基底、第一 PMUT 和第二 PMUT, 每个 PMUT 包括第一电极层、第二电极层与压电层, 其中: 第一 PMUT 和第二 PMUT 在横向上彼此间隔开设置在 PMUT 基底的一侧; 第一 PMUT 的压电层的压电系数高于第二 PMUT 的压电层的压电系数, 且第一 PMUT 的压电层的介电常数低于第二 PMUT 的压电层的介电常数。本发明还涉及一种包括了上述的微机械超声换能器结构的电子设备。

SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ,
UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚
(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE,
BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR,
HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO,
PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF,
CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN,
TD, TG)。

本国际公布:

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。
- 在修改权利要求的期限届满之前进行, 在收到该
修改后将重新公布(细则48.2(h))。

基底同侧设置有双 PMUT 的微机械超声换能器结构及其制造方法

技术领域

本发明的实施例涉及半导体领域，尤其涉及一种基底同侧设置有双 PMUT (Piezoelectric Micromachined Ultrasonic Transducer, PMUT) 的微机械超声换能器结构及其制造方法、一种具有该微机械超声换能器结构的电子设备。

背景技术

超声换能器作为一种电声元件广泛应用于生产生活中。超声换能器通过发射超声波至外界环境，并通过超声换能器接收反射回来的超声波转换为电信号进行传感、成像以及对外界环境的作用。超声换能器的典型应用包括指纹识别、超声成像、超声雷达和测距、无损检测、流量测量、力觉反馈等，在人体成像、汽车倒车雷达、水下声纳探测、扫地机器人、超声烟雾报警器等场景都会用到。上述应用中，均涉及超声换能器的超声信号发射及超声信号回波的接收，因此超声换能器的发射灵敏度以及接收灵敏度在很大程度上决定了超声换能器的优劣，是上述应用场景下的关键指标。

利用传统机械切割方案制造超声换能器，在振动单元的尺寸微型化方面，以及生产成本、效率及产品一致性和良率等方面受限，不能满足超声成像仪进一步发展，特别是在低成本、便携化、高分辨率等方面的需求。

基于半导体工业的 MEMS 制造技术是高效、低成本、批量化生产小尺寸器件的非常有效的方式。利用 MEMS 技术开发的超声换能器主要基于电容式和压电式两种原理，分别对应于电容式微机械超声换能器 (Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer, CMUT) 和压电式微机械超声换能器 (PMUT)，他们能够与互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS) 电路集成，实现具有高集成度、强运算能力的微型超声换能器的低成本、一致性和规模化制造。在这两种换能器中，CMUT 工作时需要施加较大偏置电压，致使功耗较高，应用受到一定限制。相比而言，PMUT 是一种很有前途的方案。其中 PMUT 与 CMOS 的有效集成是实现上述超声换能器的至关重要的因素。

压电式微机械超声换能器 PMUT 的发射灵敏度和接收灵敏度作为关键性能指标，对 PMUT 应用于上述多种场景起到至关重要的作用，发射灵敏度和接收灵敏度过低将影响信号信噪比，最终导致系统无法工作或性能低下。

PMUT 通常呈弯曲振动模式。作为超声发射器时，在压电薄膜两侧的电极上施加交变电场，由于逆压电效应导致压电层中产生横向应力，进而产生一个弯曲力矩，迫使薄膜偏离平面，向周围介质中发射声压波。如公式（1）所示，弯曲振动的 PMUT 的超声发射灵敏度 S_T 正比于压电薄膜的压电系数 e_{31f} ：

$$S_T \propto e_{31f} \quad (1)$$

当 PMUT 作为超声接收器时，入射超声波使压电薄膜偏转产生横向应力，由于正压电效应，在压电薄膜两侧的电极上集聚电荷，形成电压信号，如公式（2）所示，其接收灵敏度 S_R 正比于压电系数 e_{31f} 与介电常数 ϵ_{33} 的比值：

$$S_R \propto e_{31f}/\epsilon_{33} \quad (2)$$

超声成像中，超声换能器探头既做发射器向外发射超声波，又作为接受器，接受从待成像对象处反射回来的超声波，工作模式通常是脉冲-回波模式，如公式（3）所示，PMUT 脉冲-回波灵敏度 $S_T \cdot S_R$ 正比于压电系数 e_{31f} 的平方与介电常数 ϵ_{33} 的比值。

$$S_T \cdot S_R \propto e_{31f}^2/\epsilon_{33} \quad (3)$$

压电系数和介电常数是压电材料的基本特性，表 1 列举了常见压电材料中 PZT 和 AlN 的压电系数和介电常数特性。

表 1. 常见压电材料中 PZT 和 AlN 的性质

	PZT	AlN
$e_{31f} \text{ (C/m}^2\text{)}$	-10	-1
ϵ_{33}	1200	10
$e_{31f}/\epsilon_{33} \text{ (C/m}^2\text{)}$	-0.0083	-0.093
$e_{31f}^2/\epsilon_{33} \text{ (C/m}^2\text{)}^2$	0.083	0.093
$e_{31f}^2(\text{PZT})/\epsilon_{33}(\text{AlN}) \text{ (C/m}^2\text{)}^2$	9.34	

比较 PZT 和 AlN 两种压电材料可知，当仅作为发射超声波探头使用时，PZT 的压电常数比 AlN 的高 10 倍，基于公式（1），PZT 基 PMUT 的发射灵敏度将是 AlN 基 PMUT 的 10 倍。

然而，仅仅作为接收超声波的探头使用时，PZT 的介电常数是 AlN 的约 110

倍，因此 PZT 基 PMUT 的接收灵敏度将是 AlN 基 PMUT 的约十二分之一。在同时做发射和接收模式的超声探头时，利用 PZT 或者 AlN 单一压电材料时，如表 1 所示，其所开发的 PMUT 的脉冲-回波（发射-接收）信号的灵敏度相当。

因此，单一压电材料难以满足同时具有高压电系数和低介电常数的特性，基于单一压电材料的例如 PMUT-on-CMOS 器件不能实现同时具有超高超声波发射强度和超高超声接收灵敏度的应用需求。

此外，PMUT 制造流程包含多种薄膜（比如压电薄膜、电极薄膜等）在不同温度下的沉积以及相应薄膜在不同气氛、液体环境的刻蚀，这些加工流程可能对 CMOS 电路造成破坏。另外不同压电材料的薄膜化、图案化工艺及在薄膜两侧沉积的电极材料也存在极大不同，因此在同一衬底上加工两种材质的 PMUT 存在工艺不兼容问题。这导致在同一片晶圆上依次逐层制作不同压电薄膜基 PMUT 存在很大的风险和难度，需要开发一种工艺兼容性强、便捷的含有不同类型压电材料的 PMUT-on-CMOS 集成方案。

发明内容

为缓解或解决现有技术中的上述问题的至少一个方面，提出本发明。

本发明的实施例涉及一种微机械超声换能器结构，包括：

PMUT 单元，包括 PMUT 基底、第一 PMUT 和第二 PMUT，每个 PMUT 包括第一电极层、第二电极层与压电层，

其中：

第一 PMUT 和第二 PMUT 在横向上彼此间隔开设置在 PMUT 基底的一侧；

第一 PMUT 的压电层的压电系数高于第二 PMUT 的压电层的压电系数，且第一 PMUT 的压电层的介电常数低于第二 PMUT 的压电层的介电常数。

本发明的实施例还涉及一种微机械超声换能器结构的制造方法，包括步骤：

提供晶体管单元，晶体管单元包括晶体管基底以及在横向方向上间隔开布置的第一晶体管和第二晶体管；以及

提供与晶体管单元的一侧的表面接合的 PMUT 单元，PMUT 单元包括 PMUT 基底、第一 PMUT 和第二 PMUT，PMUT 基底与晶体管单元的一侧的表面以面接合的方式接合，每个 PMUT 包括第一电极层、第二电极层与压电层，

其中：

第一 PMUT 和第二 PMUT 在横向上彼此间隔开设置在 PMUT 基底的一侧，且分别与第一晶体管和第二晶体管在微机械超声换能器结构的厚度方向上对应；且

第一 PMUT 的压电层的压电系数高于第二 PMUT 的压电层的压电系数，第一 PMUT 的压电层的介电常数低于第二 PMUT 的压电层的介电常数。

本发明的实施例还涉及一种电子设备，包括上述的微机械超声换能器结构，或者上述制造方法制造的微机械超声换能器结构。

附图说明

以下描述与附图可以更好地帮助理解本发明所公布的各种实施例中的这些和其他特点、优点，图中相同的附图标记始终表示相同的部件，其中：

图 1-图 4 为根据本发明的不同示例性实施例的微机械超声换能器结构的结构示意图；

图 5-13 为根据本发明的一个示例性实施例的示例性示出图 2 所示的微机械超声换能器结构的制造方法的截面示意图；

图 14 为根据本发明的一个示例性实施例的 PMUT 结构阵列的示意图。

具体实施方式

下面通过实施例，并结合附图，对本发明的技术方案作进一步具体的说明。在说明书中，相同或相似的附图标号指示相同或相似的部件。下述参照附图对本发明实施方式的说明旨在对本发明的总体发明构思进行解释，而不应当理解为对本发明的一种限制。发明的一部分实施例，而并不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

发明人发现，如果用具有高压电系数的压电材料基 PMUT 作为超声发射器，低介电常数的压电材料基 PMUT 作为超声接收器，比如在一套超声换能器上共同集成如表 1 所示的 PZT 基 PMUT 和 AlN 基 PMUT，其中 PZT 基 PMUT 作为超声发射器，AlN 基 PMUT 作为超声接收器，则其脉冲-回波灵敏度将较单一材料基 PMUT 高 100 倍。

此外，现有 PMUT 与 CMOS 的集成主要是通过如下两种方案实现的：

方案 1. 以 CMOS 晶圆为基片，对其进行各种薄膜沉积和刻蚀流程加工，然

而 PMUT 制造流程包含多种薄膜（比如压电薄膜、电极薄膜等）在不同温度下的沉积以及相应薄膜在不同气氛、液体环境的刻蚀，这就需要该加工工艺流程不对 CMOS 电路造成破坏。目前已知压电材料中，仅有 AlN 基压电材料等少数几种压电薄膜的 MEMS 制造流程与 CMOS 兼容，故而这种方案主要用于相应压电材料基集成化超声换能器的开发。然而压电薄膜的压电特性是 PMUT 性能的至关重要的决定部分，比如 PZT、LiNbO₃ 等具有非常优异压电特性的压电材料，其加工工艺较 AlN 苛刻，与 CMOS 兼容性较差，故而基于上述工艺流程的 CMOS 集成化 PMUT 的开发受限较多，很难实现。

方案 2. 分别加工 PMUT 晶圆和 CMOS 晶圆，设定 PMUT 晶圆的设置压电薄膜的一侧以及 CMOS 晶圆的设置晶体管的一侧为相应晶圆的正面，将 PMUT 晶圆的正面和 CMOS 正面键合，构建 CMOS 集成化 PMUT。与上述方案 1 相比，该方案对压电材料的局限性较小，然而，PMUT 机械振动单元的有效振动是高效地发射和接受超声波的关键，这需要振动单元下方含有空腔结构，提供空间供振动单元有效振动，这需要 CMOS 上含有相应空腔。然而空腔尺寸是决定 PMUT 超声频率的核心要素，空腔尺寸的变化将导致 PMUT 超声频率的变化。在 PMUT 和 CMOS 两片晶圆键合时，不可避免的存在对准偏差，导致振动单元区域与本身设计之间存在随机偏差，造成所开发的 CMOS 集成化 PMUT 的频率波动。值得指出的是，应用于超声成像领域的 PMUT 振元的直径都非常小，通常在几十微米甚至更小，即使 1 微米的对准偏差也将造成很大的不利影响。

因此，现有技术中还存在开发出如下的 CMOS 与 PMUT 集成方案的需求：对压电材料本身普适性强，和/或 CMOS 单元与 PMUT 单元的集成过程不对空腔尺寸产生影响。

基于上述，本发明提出在同一 CMOS 晶圆上，分别集成具有高压电系数（例如，绝对值高于 $1\text{C}/\text{m}^2$ ，进一步的高于 $5\text{C}/\text{m}^2$ ）的压电材料基 PMUT 和具有低介电常数（例如，低于 1200，进一步低于 100）的压电材料基 PMUT 两类超声换能器，其中具有高压电系数的压电材料基 PMUT 专用于发射超声波，而具有低介电常数的压电材料基 PMUT 用于接收反射回来的超声波。上述 PMUT 与 CMOS 集成方案是开发拥有优异性能、低廉成本的 MEMS 超声换能器的关键。

本发明还提出了一种同时将上述两种类型压电材料基 PMUT 集成在同一 CMOS 晶圆上的方案。

首先，本发明的附图中的附图标记说明如下：

1000：CMOS 单元或晶体管单元。

100：CMOS 基底或晶体管基底，可选材料为单晶硅、氮化镓、砷化镓、蓝宝石、石英、碳化硅、金刚石等。

101：晶体管的源极和漏极。

110：电路保护层，其为绝缘材料层，可以是二氧化硅、氮化硅等。

111：晶体管的栅极。

113A：晶体管单元层内电连接层，对应于第一电连接层，材料可选钼、钌、金、铝、镁、钨、铜，钛、铌、钽、铬或以上金属的复合或其合金等，上述材料也适用于其他电连接层。

113B：晶体管单元层内电连接层，对应于第二电连接层。

113、115：其他晶体管单元层内电连接层。

112 和 114：晶体管单元层间电连接层。

2000'：PMUT 初步单元，例如参见图 9。

2000：PMUT 单元，参见图 11。

200'：PMUT 初步基底，可选材料为单晶硅、氮化镓、砷化镓、蓝宝石、石英、碳化硅、金刚石等。

200：PMUT 基底，材料与 PMUT 初步基底一致。

201 和 202：用于 PMUT 的空腔。

210：支撑层，其材料可以与电极层的材料相同，或者不同。支撑层可以如图 6 所示设置在 PMUT 的下部，即设置在 PMUT 与 PMUT 基底之间，此时支撑层为绝缘层，其材料可以为硅、二氧化硅、氮化硅等不导电材料。支撑层也可以设置在 PMUT 的上部。需要指出的是，也可以不设置支撑层。

220、240：电极层，材料可选钼、钌、金、铝、镁、钨、铜，钛、铌、钽、铬或以上金属的复合或其合金等。两个电极层的材料可以相同也可以不同。

230、270：压电层。材料可选多晶氮化铝 (AlN)、多晶氧化锌、多晶锆钛酸铅 (PZT)、多晶铌酸锂 (LiNbO_3)、多晶钽酸锂 (LiTaO_3)、多晶铌酸钾 (KNbO_3) 等材料，或者单晶氮化铝、单晶氮化镓、单晶铌酸锂、单晶锆钛酸铅、单晶铌酸钾、单晶石英薄膜、或者单晶钽酸锂等材料，上述的单晶或多晶材料还可以包括一定原子比的稀土元素掺杂材料，均属于本发明可以使用的压电层，如铌

掺杂氮化铝 (AlScN)。

250: 结构保护层, 一般为介质材料, 如二氧化硅、氮化铝、氮化硅等。

235: 导电层或电连接层, 其材料可以选自用于形成电极层的材料。

275: 导电层或电连接层, 其材料可以选自用于形成电极层的材料。

290: 器件保护层, 一般为介质材料, 如二氧化硅、氮化铝、氮化硅等。

300: 辅助基底, 可选材料为单晶硅、氮化镓、砷化镓、蓝宝石、石英、碳化硅、金刚石等。

310: 临时粘合层, 可以由任何能够将 PMUT 单元和辅助基底 300 临时接合的材料, 例如可以为光刻胶。

400A: 第一导电用孔。

400B: 第二导电用孔。

500: 接合材料层, 参见图 4, 其可以是金属键合层, 例如金-金键合、铝-铝键合等, 也可以是其它将两层接合在一起的材料层。

3000: 微机械超声换能器结构或 PMUT 结构 (参见图 1 和图 14)。

4000: PMUT 结构阵列 (参见图 14)。

图 1-图 4 为根据本发明的不同示例性实施例的微机械超声换能器结构 3000 的结构示意图。

在图示的实施例中, 单个 PMUT 通常包括支撑层 210, 压电层 230 以及压电层 230 两侧的顶电极层 240、底电极层 220 (例如参见图 6-图 9), 在 PMUT 振动单元面向 CMOS 的一侧设置空腔 201 和 202, 使 PMUT 振动单元能够产生有效的弯曲振动产生超声波。本发明中, CMOS 晶圆或者如图所示的晶体管单元 1000 上同时集成具有高压电系数的压电材料基 PMUT 和具有低介电常数的压电材料基 PMUT 两类超声换能器。

如图 1 所示, 230 和 270 分别代表高压电系数基压电薄膜和低介电常数基压电薄膜。201 和 202 分别是两种类型压电薄膜所构成 PMUT 进行有效弯曲振动的空腔区域。200 是构建 PMUT 的衬底或者 PMUT 基底, 100 是构建 CMOS 电路的衬底或者晶体管基底, 110 是电路保护层。

如前所述的, 在更具体的实施例中, 压电层 230 的压电系数绝对值大于 1C/m^2 , 和/或压电层 270 的介电常数小于 1200。进一步的, 压电层 230 的压电系数绝对值大于 5C/m^2 , 和/或压电层 270 的介电常数小于 100。

在更具体的实施例中，压电层 230 为 PZT 或掺杂 PZT，压电层 270 为 ALN 或 AlScN。在 PMUT-on-CMOS 集成方面，本发明分别制作 CMOS 晶圆和 PMUT 晶圆，其中在 PMUT 晶圆上制作两种类型压电薄膜基 PMUT，之后将 PMUT 晶圆衬底侧减薄并与 CMOS 晶圆正面进行键合，最后将 PMUT 晶圆电极与 CMOS 晶圆上相应电极互连实现电学连接，如有需要并对器件进行表面保护（可以具体的参见后续参照附图 5-图 13 的示例性说明）。该集成方案中，不同类型压电薄膜基 PMUT 加工中，即使存在比较苛刻的加工条件，也不会对 CMOS 晶圆产生破坏，工艺兼容性好。

在 PMUT 振动所需空腔 201 和 202 的形成方式上，如图 1 所示，其可以通过预置空腔，填充牺牲层材料，在最后阶段释放的方式形成空腔。图 2 是通过背刻方式形成空腔。图 3 是一种压电薄膜基 PMUT 是通过背刻方式，另一种压电薄膜基 PMUT 是通过牺牲层方式形成空腔。

在 PMUT 晶圆与 CMOS 晶圆的键合中，PMUT 晶圆衬底层可与 CMOS 晶圆的电路保护层直接键合（例如参见图 1-图 3），也可通过中间键合层材料（比如金属键合等，对应于接合材料层 500）实现 PMUT 单元与 CMOS 单元的集成（例如参见图 4）。

在图 1-图 4 所示的实施例中，PMUT 单元包括了两个在横向方向上间隔开的 PMUT，即第一 PMUT 和第二 PMUT，第一 PMUT 的压电层 230 的压电系数高于第二 PMUT 的压电层 270 的压电系数，且第一 PMUT 的压电层 230 的介电常数低于第二 PMUT 的压电层 270 的介电常数。在进一步的实施例中，第一 PMUT 的压电层 230 为 PZT，第二 PMUT 的压电层 270 为 AlN。

在本发明中，对于独立权利要求而言，PMUT 基底可以是如图 1-图 4 所示的为单晶硅、氮化镓、砷化镓、蓝宝石、石英、碳化硅、金刚石等的基底，也可以是其他的用于生成 PMUT 的其他支撑结构，均在本发明的保护范围之内。

在图 1-图 4 所示的实施例中，采用了 PMUT-on-CMOS 的结构，但是本发明不限于此。上述的 PMUT 单元也可以设置在其他结构上，PMUT-on-CMOS 是本发明的一个有利的实施例。

在图 1-图 4 所示的实施例中，PMUT 单元的第一 PMUT 用于发射超声波，第二 PMUT 用于接收超声波。

图 5-图 13 为根据本发明的一个示例性实施例的示例性示出图 2 所示的微机

械超声换能器结构的制造方法的截面示意图。更具体的，图 5-图 13 是以背刻形式形成 PMUT 振动所需空腔，以 PMUT 基底 200 与 CMOS 电路保护层 110 直接键合为例，其中高压电系数材料 230 或第一 PMUT 的压电层 230 选用 PZT，低介电常数材料 270 或第二 PMUT 的压电层 270 选用 AlN，构建具有超高脉冲-回波灵敏度的 PMUT-on-CMOS 超声换能器。

先提供晶体管单元 1000。图 5 是 CMOS 结构示意图，其中 100 为 CMOS 的衬底，即晶体管基底（可以是硅等），110 为电路保护层（可以是氧化硅、氮化硅等）。101 为晶体管的源极和漏级，111 为晶体管的栅极，113A、113B、113 和 115 是 CMOS 层内电连接层，112 和 114 是 CMOS 层间电连接层。如图 5 所示，晶体管单元包括晶体管基底 100 以及在横向方向上间隔开布置的第一晶体管和第二晶体管。需要指出的是，图 2 所示结构为示例性的，对于本发明而言，CMOS 单元 1000 可以包括 CMOS 晶体管和电路保护层 110，还可以可选的包括第一电连接层 113A、第二电连接层 113B。

接着，提供 PMUT 初步单元 2000'，参见图 9。PMUT 初步单元 2000' 包括 PMUT 初步基底 200'、第一 PMUT 和第二 PMUT。每个 PMUT 包括底电极层 220、顶电极层 240 与压电层 230。下面具体参照图 6-图 9 说明如何提供 PMUT 初步单元 2000'。

图 6 中，先在支撑层 210 上形成 PZT 基 PMUT，其中，200' 为 PMUT 的衬底，即 PMUT 初始基底（可以是硅），210 为支撑层（可以是氧化硅等），230 为 PZT 压电薄膜层或压电层，220 和 240 为压电薄膜层两侧的底、顶电极层。可以采用 MEMS 工艺，形成 PZT 基 PMUT。这里的初始基底 200' 是相对于图 11 中的基底 200 而言的，初始基底 200' 减薄后成为基底 200。

如图 7 所示，PZT 基 PMUT 的压电层 230 以及顶、底电极结构图案化之后，在 PZT 基 PMUT 表面沉积结构保护层 250，用于后续 AlN 基 PMUT 加工过程中对 PZT 基 PMUT 的保护。

如图 8 所示，在设置有 PZT 基 PMUT 的晶圆或初始基底 200' 上，构建的 AlN 基 PMUT，AlN 基 PMUT 包含压电薄膜层或 ALN 压电层 270 以及顶、底电极层 280 和 260。

如图 9 所示，待 PZT 基 PMUT 和 AlN 基 PMUT 在晶圆或初始基底 200' 上形成之后，去除 PZT 基 PMUT 的结构保护层 250，以得到 PMUT 单元 2000。如图 9 所

示，其包括了 PZT 基 PMUT 和 AlN 基 PMUT 两个 PMUT。

如图 9 所示，PMUT 初步单元 2000' 中，并不包括将 PMUT 电极与 CMOS 电极连接在一起的电连接结构。在图 9 中，如图 9 中的 PMUT 初步基底 200' 的厚度过大，需要基于后续的减薄工艺在后续步骤中减薄，以使 PMUT 和 CMOS 之间电连接部分尽量短，需要键合到 CMOS 晶圆上的 PMUT 基底的厚度尽量薄，最好在 10 微米以下，甚至是 5 微米以下。不过，在 PMUT 基底的厚度已经满足要求的情况下，也可以不执行后续的基底减薄步骤，或者在能够忍受 PMUT 和 CMOS 之间电连接部分的长度的情况下，也可以不执行后续的基底减薄步骤，这些都在本发明的保护范围之内。

下面参照图 10-图 11 示例性说明如何将 PMUT 单元 2000 接合到晶体管单元 1000 上。

如图 10 所示，以临时粘合层 310 覆盖 PZT 基 PMUT 和 AlN 基 PMUT 以及设置辅助基底 300，所述辅助基底 300 与所述临时粘合层 310 接合。在晶圆级制作中，设置辅助基底 300 是为了后续 PMUT 初始基底减薄。

如图 11 所示，在初始基底 200' 的另一侧执行减薄工艺以形成 PMUT 基底 200。可以将图 10 中辅助基底 200' 减薄至所需尺寸，例如小于 $10\ \mu\text{m}$ ，甚至是小于 $5\ \mu\text{m}$ ，如果键合流程需要，可以对其进行表面抛光化。然后通过背刻工艺刻蚀出 PMUT 振动所需空腔 201 和 202，如图 11 所示。

然后，将 PMUT 基底 200 与晶体管单元的表面或者 CMOS 电路保护层 110 接合，以及移除临时粘合层 310 和辅助基底 300，最终如图 11 所示。接合方案可选择硅-硅键合、硅-氧化硅键合、金属键合等各种方案。

如图 12 所示，通过刻蚀工艺将 PMUT 基底 200 和 CMOS 电路保护层 110 刻蚀以形成导电用孔，露出 CMOS 的电连接端或电连接层。如图 12 所示，对于每一个 PMUT，刻蚀出第一导电用孔 400A 和第二导电用孔 400B，以分别露出晶体管单元层内电连接层 113A 和晶体管单元层内电连接层 113B。可选的，第一电连接层 113A 与 CMOS 晶体管的电极中的一个（例如源极）电连接，第二电连接层 113B 与 CMOS 晶体管的电极中的另外的一个电极（例如栅极）电连接。不过，在 CMOS 单元中存在其他的电连接结构的情况下，基于需要和要求，第一电连接层 113A 和/或第二电连接层 113B 也可以与之电连接，这也在本发明的保护范围之内。

如图 13 所示，例如以沉积工艺，设置 PMUT 和 CMOS 的电连接层 235 和 275，

实现 PMUT 和 CMOS 的电连接。最后，如果需要，在整个器件表面沉积保护层或器件保护层 290。其中 235 和 275 为电连接层，可以选用各种各样的导电材料，例如是形成电极层的材料，另外连接 PZT 基 PMUT 与 CMOS 电路的导电通道或电连接层 235 所采用的材料与实现 AlN 基 PMUT 与 CMOS 电连接的导电通道或电连接层 275 可以是同种材料，也可以是不同种导电材料。如能理解的，明显的，电连接层 235 和 275 彼此电绝缘，电连接层 235 和 275 均是经由导电用孔分别与晶体管单元层内电连接层 113A 和层内电连接层 113B 形成电连接。

如能够理解的，在上述的方法中，如果通过设置接合材料层 500 实现 PMUT 单元与晶体管单元之间的接合，则 PMUT 单元、晶体管单元以及所述接合材料层共同限定空腔，接合材料层 500 的厚度限定所述空腔的高度。

此外，在上述的技术方案中，PMUT 基底 200 与电路保护层 110 接合，如图 1 所示，即 PMUT 单元 2000 的基底侧（或反面）与 CMOS 单元 1000 的晶圆侧（或正面）相接合，从而：（1）在后续的步骤中需要在 PMUT 基底 200 上制备 PMUT 时，PMUT 基底 200 可以保护 CMOS 单元 1000，或者（2）可以直接以 PMUT 单元 2000 与 CMOS 单元 1000 接合，不用考虑制备 PMUT 时对 CMOS 单元 1000 的影响。这可以使得上述的微机械超声换能器结构对于压电材料的普适性强，既可以为氮化铝（AlN），也可以为锆钛酸铅（PZT）、铌酸锂（LiNbO₃）、钽酸锂（LiTaO₃）、铌酸钾（KNbO₃）等材料。

需要指出的是，本发明中的“PMUT 基底与电路保护层接合”不仅包括如图 1 所示的两者直接接合的情况，还可以包括在两者之间设置有其他接合用层或膜层的情况，例如在图 4 中，PMUT 基底与电路保护层之间设置有可以是金属键合层的接合材料层 500。

需要专门指出的是，在本发明的具体的实施例中，以 PMUT 基底与电路保护层接合为例作了示例性说明，但是，PMUT 基底与 CMOS 单元 1000 的接合可以是限定 CMOS 单元的表面的电路保护层，也可以是限定 CMOS 单元的表面的其他层，均在本发明的保护范围之内。

如图 1-图 4 所示的实施例中，CMOS 单元 1000 还包括 CMOS 基底 100，电路保护层 110 的一侧与 PMUT 基底 200 接合，电路保护层 110 的另一侧与 CMOS 基底 100 接合。可选的，在有些情况下，PMUT 单元也可以与 CMOS 基底 100 接合，这也在本发明的保护范围之内。

还需要专门指出的是，在本发明中，以 CMOS 作为晶体管的一个示例，从而以 CMOS 单元作为晶体管单元的一个示例，但是本发明不限于此，晶体管还可以是 BiMOS 单元或 BCD 等，从而晶体管单元还可以是 BiMOS 单元或 BCD 单元等。

类似于对“PMUT 基底与电路保护层接合”的解释和说明，本发明中的“PMUT 单元与晶体管单元的表面接合”可以是 PMUT 单元与晶体管单元的表面直接接合的情况，还可以包括在 PMUT 单元与晶体管单元的表面之间设置有其他接合用层或膜层的情况，均在本发明的保护范围之内。

如图 1-图 4 所示，PMUT 基底 200 设置有利于 PMUT 的空腔 201。即在采用 PMUT 单元 2000 与 CMOS 单元 1000 接合的情况下，空腔 201 已经设置在 PMUT 单元 2000 中。换言之，在晶圆级制造中，PMUT 振动所需的空腔结构设置在 PMUT 晶圆侧，不需要在 CMOS 晶圆上形成空腔，从而 CMOS 晶圆与 PMUT 晶圆集成过程不存在因对准偏差引起的振动区域的变化，以及由此引起的超声换能器频率的变化，克服了现有技术中 CMOS 与 PMUT 的集成过程对空腔尺寸产生不利影响这样的技术问题。虽然没有示出，在可选的实施例中，空腔 201 可以贯穿 PMUT 基底 200。

在上述图 1-图 4 所示的结构中，PMUT 基底 200 设置有利于 PMUT 的空腔 201。但是，本发明不限于此。空腔 201 也可以不设置在 PMUT 基底 200 中，更具体的，PMUT 单元 2000 与晶体管单元之间设置有接合材料层 500，PMUT 单元 2000、晶体管单元 1000 以及接合材料层 500 共同限定空腔 201，接合材料层 500 的厚度限定空腔 201 的高度。如此，晶圆级制造中，PMUT 振动所需的空腔 201 也不需要 CMOS 晶圆上形成，而且基于例如金属键合层的接合材料层 500 可以限定空腔 201 在横向方向上的侧面从而空腔 201 的区域较大，从而可以减小 CMOS 晶圆与 PMUT 晶圆集成过程因对准偏差引起的振动区域的变化，以及由此引起的超声换能器频率的变化，克服了或减少了现有技术中 CMOS 与 PMUT 的集成过程对空腔尺寸产生不利影响这样的技术问题。上述方案中，空腔 201 处于所述接合面的设置了 PMUT 单元的一侧，形成空腔 201 不会对晶体管单元的结构发生额外的改变，不必在两者集成之前在晶体管单元中设置空腔，减少或者避免了现有技术中 CMOS 单元与 PMUT 单元的集成过程对空腔尺寸产生不利影响的技术问题。

如图 1-图 4 所示，在可选的实施例中，对于每一个 PMUT，微机械超声换能器结构设置有第一导电用孔 400A 和第二导电孔 400B，第一导电用孔 400A 贯

穿 PMUT 基底 200 和/或支撑层 210 以及抵达电路保护层 110 内的第一电连接层 113A, 第二导电孔 400B 贯穿 PMUT 基底 200 和/或支撑层 210 以及抵达电路保护层 110 内的第二电连接层 113B, 其中: 第一导电层 235 经由第一导电孔 400A 与第一电连接层 113A 电连接, 第二导电层 275 经由第二导电孔 400B 与第二电连接层 113B 电连接。

如图 1-图 4 所示, 在可选的实施例中, PMUT 单元 2000 包括支撑层 210, 支撑层 210 用于实现 PMUT 的弯曲振动。如图 1-图 4 所示, 支撑层 210 设置在 PMUT (包括电极层 220、240 和压电层 230) 与 PMUT 基底 200 之间, 此时, 第一导电孔 400A 和第二导电孔 400B 贯穿支撑层 210。如能够理解的, 也可以不设置支撑层 210, 或者支撑层 210 设置在顶电极或者第一电极层 240 的上方, 此时第一导电孔 400A 和第二导电孔 400B 不用或不存在贯穿支撑层的情况。这些方案都在本发明的保护范围之内。

但是, 不论是否设置支撑层 210 和/或 PMUT 基底 200, 第一导电孔 400A 和第二导电孔 400B 均需要贯穿 PMUT 单元以抵达下方的电连接层。

虽然没有示出, 第一导电层 235 和第二导电层 275 可以在微机械超声换能器结构的侧面分别与在侧面露出的第一电连接层 113A 和第二电连接层 113B 电连接, 这也在本发明的保护范围之内。

另外, 当 PMUT 设置在空腔内时, 空腔对 PMUT (尤其是压电层) 起到与外界环境隔离的保护作用, 能够提高 PMUT 的可靠性和长期稳定性, 进而在上述的 PMUT 结构用在例如成像仪中时, 可以提高最终成像系统的可靠性和长期稳定性。

图 14 为根据本发明的一个示例性实施例的 PMUT 结构阵列的示意图。如图 14 所示, 上述的 PMUT 结构 3000 可以仅仅是阵列 4000 中的一个阵元。图 14 中, 空心圆代表 PMUT 结构 3000 的 PMUT 振动区域, 除了圆形之外, 其可以是椭圆、多边形及其组合等任意需要的形状。黑实心圆代表 PMUT 单元与 CMOS 单元实现电连接, 如图 5 所示的第一电连接层 113A 和第二电连接层 113B 处, 其也可以是任意需要的形状。PMUT 结构 3000 组合构成 PMUT 结构阵列 4000。

每个 PMUT 单元可以通过与之匹配的 CMOS 电路单独控制, 形成二维 PMUT 结构阵列 4000。

也可以将多个 PMUT 结构 3000 连接在一起, 比如同一列上的 PMUT 结构 3000 的电极互联, 形成一维线阵列, 此时 CMOS 单元的电路与 PMUT 单元的电连接点

减少，一对 CMOS 单元与 PMUT 单元的电连接点对多个 PMUT 单元同时控制。

可以基于 PMUT 结构或者 PMUT 结构阵列，形成超声换能器，该超声换能器可以用在超声成像仪上，PMUT 结构或者 PMUT 结构阵列也可以用在其他的电子设备上，例如超声测距仪、超声指纹传感器、用于工业领域的无损探伤仪等。

基于以上，本发明提出了如下技术方案：

1、一种微机械超声换能器结构，包括：

PMUT 单元，包括 PMUT 基底、第一 PMUT 和第二 PMUT，每个 PMUT 包括第一电极层、第二电极层与压电层，

其中：

第一 PMUT 和第二 PMUT 在横向上彼此间隔开设置在 PMUT 基底的一侧；

第一 PMUT 的压电层的压电系数高于第二 PMUT 的压电层的压电系数，且第一 PMUT 的压电层的介电常数低于第二 PMUT 的压电层的介电常数。

2、根据 1 所述的微机械超声换能器结构，其中：

第一 PMUT 的压电层为 PZT 或掺杂 PZT，第二 PMUT 的压电层为 ALN 或 AlScN。

3、根据 1 所述的微机械超声换能器结构，其中：

第一 PMUT 用于发射超声波，第二 PMUT 用于接收超声波。

4、根据 1-3 中任一项所述的微机械超声换能器结构，还包括：

晶体管单元，包括晶体管基底以及在横向方向上间隔开布置的第一晶体管和第二晶体管，第一 PMUT 和第二 PMUT 分别与第一晶体管和第二晶体管在微机械超声换能器结构的厚度方向上对应；

PMUT 单元与晶体管单元的一侧的表面接合，晶体管单元的一侧的表面为晶体管单元的接合面。

5、根据 4 所述的微机械超声换能器结构，其中：

用于第一 PMUT 和第二 PMUT 的空腔处于所述接合面的设置了 PMUT 单元的一侧。

6、根据 5 所述的微机械超声换能器结构，其中：

PMUT 基底与晶体管单元的一侧的表面接合，PMUT 基底设置有所述空腔。

7、根据 6 所述的微机械超声换能器结构，其中：

PMUT 单元还包括用于支撑 PMUT 的支撑层，支撑层设置在两个 PMUT 与 PMUT 基底之间。

8、根据 6 所述的微机械超声换能器结构，其中：

所述空腔贯穿 PMUT 基底；或者

所述 PMUT 单元与晶体管单元之间设置有接合材料层，所述 PMUT 单元、所述晶体管单元以及所述接合材料层共同限定所述空腔，所述接合材料层的厚度限定所述空腔的高度。

9、根据 4 所述的微机械超声换能器结构，其中：

每个晶体管单元包括所述晶体管、彼此电绝缘的第一电连接层和第二电连接层；且

对于每一个 PMUT 和对应的晶体管：所述微机械超声换能器结构还包括彼此电绝缘的第一导电层与第二导电层，第一电极层经由第一导电层与第一电连接层电连接，第二电极层经由第二导电层与第二电连接层电连接。

10、根据 9 所述的微机械超声换能器结构，对于每一个 PMUT 和对应的晶体管，还包括：

第一导电用孔和第二导电孔，第一导电用孔贯穿 PMUT 单元以及抵达晶体管单元内的第一电连接层，第二导电用孔贯穿 PMUT 单元以及抵达晶体管单元内的第二电连接层，

其中：

第一导电层经由第一导电用孔与第一电连接层电连接，第二导电层经由第二导电用孔与第二电连接层电连接。

11、根据 4 所述的微机械超声换能器结构，其中：

所述晶体管单元包括电路保护层，所述电路保护层覆盖所述晶体管；且所述电路保护层的一侧的表面为所述接合面。

12、根据 4 所述的微机械超声换能器结构，其中：

所述晶体管单元包括 CMOS 单元、BiMOS 单元、BCD 单元中的一种。

13、根据 1 所述的微机械超声换能器结构，其中：

第一 PMUT 的压电层的压电系数绝对值大于 $1\text{C}/\text{m}^2$ ；和/或
第二 PMUT 的压电层的介电常数小于 1200。

14、根据 13 所述的微机械超声换能器结构，其中：

第一 PMUT 的压电层的压电系数绝对值大于 $5\text{C}/\text{m}^2$ ；和/或
第二 PMUT 的压电层的介电常数小于 100。

15、一种微机械超声换能器结构的制造方法，包括步骤：

提供晶体管单元，晶体管单元包括晶体管基底以及在横向方向上间隔开布置的第一晶体管和第二晶体管；以及

提供与晶体管单元的一侧的表面接合的 PMUT 单元，PMUT 单元包括 PMUT 基底、第一 PMUT 和第二 PMUT，PMUT 基底与晶体管单元的一侧的表面以面接合的方式接合，每个 PMUT 包括第一电极层、第二电极层与压电层，

其中：

第一 PMUT 和第二 PMUT 在横向上彼此间隔开设置在 PMUT 基底的一侧，且分别与第一晶体管和第二晶体管在微机械超声换能器结构的厚度方向上对应；且

第一 PMUT 的压电层的压电系数高于第二 PMUT 的压电层的压电系数，第一 PMUT 的压电层的介电常数低于第二 PMUT 的压电层的介电常数。

16、根据 15 所述的方法，其中，提供 PMUT 单元的步骤包括：

在形成一个 PMUT 后设置覆盖其的保护层；

与所述一个 PMUT 在横向上间隔开的设置另一个 PMUT；

移除所述保护层。

17、根据 15 或 16 所述的方法，其中，提供 PMUT 单元的步骤包括：

提供 PMUT 初始基底以及设置在初始基底的一侧上的在横向方向上间隔开的第一 PMUT 和第二 PMUT；

以临时粘合层覆盖第一 PMUT 和第二 PMUT 以及设置辅助基底，所述辅助基底与所述临时粘合层接合；

在初始基底的另一侧执行减薄工艺以形成所述 PMUT 基底，且

在将 PMUT 基底与晶体管单元的表面接合的步骤之后，所述方法还包括步骤：移除临时粘合层和辅助基底。

18、根据 15 所述的方法，其中：

利用接合材料层将 PMUT 基底与晶体管单元的一侧的表面接合，所述 PMUT 单元、所述晶体管单元以及所述接合材料层共同限定所述空腔，所述接合材料层的厚度限定所述空腔的高度。

19、根据 15 所述的方法，其中：

对于每个晶体管，所述晶体管单元包括彼此电绝缘的第一电连接层和第二电连接层；

所述方法还包括步骤：对于每一个 PMUT 和对应的晶体管，提供彼此电绝缘的第一导电层与第二导电层，第一电极层经由第一导电层与第一电连接层电连接，第二电极层经由第二导电层与第二电连接层电连接。

20、根据 19 所述的方法，对于每一个 PMUT 和对应的晶体管，其中：

在提供彼此电绝缘的第一导电层与第二导电层的步骤之前，还包括步骤：形成第一导电用孔和第二导电孔，第一导电用孔贯穿 PMUT 单元以及抵达从而露出晶体管单元内的第一电连接层，第二导电用孔贯穿 PMUT 单元以及抵达从而露出晶体管单元内的第二电连接层；

在提供彼此电绝缘的第一导电层与第二导电层的步骤中，第一导电层经由第一导电用孔与第一电连接层电连接，第二导电层经由第二导电用孔与第二电连接层电连接。

21、根据 15-20 中任一项所述的方法，其中：

提供晶体管单元包括提供晶体管晶圆，基于 MEMS 工艺，所述晶体管晶圆形成有多个晶体管单元，每个晶体管单元包括在横向方向上间隔开布置的第一晶体管和第二晶体管；

提供与晶体管单元的一侧的表面接合的 PMUT 单元包括：提供 PMUT 晶圆，基于 MEMS 工艺，所述 PMUT 晶圆形成有与所述多个晶体管单元分别对应的多个 PMUT 单元，每个 PMUT 单元包括在横向上彼此间隔开设置的第一 PMUT 和第二 PMUT，第一 PMUT 和第二 PMUT 分别与第一晶体管和第二晶体管在微机械超声换能器结构的厚度方向上对应；

所述方法还包括步骤：执行切割以形成包括单个 PMUT 单元与单个晶体管单元的微机械超声换能器结构。

22、根据 15-21 中任一项所述的方法，其中：

第一 PMUT 的压电层为 PZT 或掺杂 PZT，第二 PMUT 的压电层为 AlN 或 AlScN。

23、根据 15-22 中任一项所述的方法，其中：

第一 PMUT 用于发射超声波，第二 PMUT 用于接收超声波。

24、根据 15-23 中任一项所述的方法，其中：

所述晶体管单元包括 CMOS 单元、BiMOS 单元、BCD 单元中的一种。

25、根据 15 所述的方法，其中：

第一 PMUT 的压电层的压电系数绝对值大于 $1\text{C}/\text{m}^2$ ；和/或

第二 PMUT 的压电层的介电常数小于 1200。

26、根据 25 所述的方法，其中：

第一 PMUT 的压电层的压电系数绝对值大于 5C/m^2 ；和/或

第二 PMUT 的压电层的介电常数小于 100。

27、一种电子设备，包括根据 1-14 中任一项所述的微机械超声换能器结构，或者根据 15-26 中任一项所述的制造方法制造的微机械超声换能器结构。

28、根据 27 所述的电子设备，其中：

所述电子设备包括如下中的至少一种：超声成像仪、超声测距仪、超声指纹传感器、无损探伤仪、流量计、力觉反馈设备、烟雾报警器。

尽管已经示出和描述了本发明的实施例，对于本领域的普通技术人员而言，可以理解在不脱离本发明的原理和精神的情况下可以对这些实施例进行变化，本发明的范围由所附权利要求及其等同物限定。

权 利 要 求 书

1、一种微机械超声换能器结构，包括：

PMUT 单元，包括 PMUT 基底、第一 PMUT 和第二 PMUT，每个 PMUT 包括第一电极层、第二电极层与压电层，

其中：

第一 PMUT 和第二 PMUT 在横向上彼此间隔开设置在 PMUT 基底的一侧；

第一 PMUT 的压电层的压电系数高于第二 PMUT 的压电层的压电系数，且第一 PMUT 的压电层的介电常数低于第二 PMUT 的压电层的介电常数。

2、根据权利要求 1 所述的微机械超声换能器结构，其中：

第一 PMUT 的压电层为 PZT 或掺杂 PZT，第二 PMUT 的压电层为 ALN 或 AlScN。

3、根据权利要求 1 所述的微机械超声换能器结构，其中：

第一 PMUT 用于发射超声波，第二 PMUT 用于接收超声波。

4、根据权利要求 1-3 中任一项所述的微机械超声换能器结构，还包括：

晶体管单元，包括晶体管基底以及在横向方向上间隔开布置的第一晶体管和第二晶体管，第一 PMUT 和第二 PMUT 分别与第一晶体管和第二晶体管在微机械超声换能器结构的厚度方向上对应；

PMUT 单元与晶体管单元的一侧的表面接合，晶体管单元的一侧的表面为晶体管单元的接合面。

5、根据权利要求 4 所述的微机械超声换能器结构，其中：

用于第一 PMUT 和第二 PMUT 的空腔处于所述接合面的设置了 PMUT 单元的一侧。

6、根据权利要求 5 所述的微机械超声换能器结构，其中：

PMUT 基底与晶体管单元的一侧的表面接合，PMUT 基底设置有所述空腔。

7、根据权利要求 6 所述的微机械超声换能器结构，其中：

PMUT 单元还包括用于支撑 PMUT 的支撑层，支撑层设置在两个 PMUT

与 PMUT 基底之间。

8、根据权利要求 6 所述的微机械超声换能器结构，其中：

所述空腔贯穿 PMUT 基底；或者

所述 PMUT 单元与晶体管单元之间设置有接合材料层，所述 PMUT 单元、所述晶体管单元以及所述接合材料层共同限定所述空腔，所述接合材料层的厚度限定所述空腔的高度。

9、根据权利要求 4 所述的微机械超声换能器结构，其中：

每个晶体管单元包括所述晶体管、彼此电绝缘的第一电连接层和第二电连接层；且

对于每一个 PMUT 和对应的晶体管：所述微机械超声换能器结构还包括彼此电绝缘的第一导电层与第二导电层，第一电极层经由第一导电层与第一电连接层电连接，第二电极层经由第二导电层与第二电连接层电连接。

10、根据权利要求 9 所述的微机械超声换能器结构，对于每一个 PMUT 和对应的晶体管，还包括：

第一导电用孔和第二导电孔，第一导电用孔贯穿 PMUT 单元以及抵达晶体管单元内的第一电连接层，第二导电用孔贯穿 PMUT 单元以及抵达晶体管单元内的第二电连接层，

其中：

第一导电层经由第一导电用孔与第一电连接层电连接，第二导电层经由第二导电用孔与第二电连接层电连接。

11、根据权利要求 4 所述的微机械超声换能器结构，其中：

所述晶体管单元包括电路保护层，所述电路保护层覆盖所述晶体管；且

所述电路保护层的一侧的表面为所述接合面。

12、根据权利要求 4 所述的微机械超声换能器结构，其中：

所述晶体管单元包括 CMOS 单元、BiMOS 单元、BCD 单元中的一种。

13、根据权利要求 1 所述的微机械超声换能器结构，其中：

第一 PMUT 的压电层的压电系数绝对值大于 $1\text{C}/\text{m}^2$ ；和/或

第二 PMUT 的压电层的介电常数小于 1200。

14、根据权利要求 13 所述的微机械超声换能器结构，其中：

第一 PMUT 的压电层的压电系数绝对值大于 $5\text{C}/\text{m}^2$ ；和/或

第二 PMUT 的压电层的介电常数小于 100。

15、一种微机械超声换能器结构的制造方法，包括步骤：

提供晶体管单元，晶体管单元包括晶体管基底以及在横向方向上间隔开布置的第一晶体管和第二晶体管；以及

提供与晶体管单元的一侧的表面接合的 PMUT 单元，PMUT 单元包括 PMUT 基底、第一 PMUT 和第二 PMUT，PMUT 基底与晶体管单元的一侧的表面以面接合的方式接合，每个 PMUT 包括第一电极层、第二电极层与压电层，

其中：

第一 PMUT 和第二 PMUT 在横向上彼此间隔开设置在 PMUT 基底的一侧，且分别与第一晶体管和第二晶体管在微机械超声换能器结构的厚度方向上对应；且

第一 PMUT 的压电层的压电系数高于第二 PMUT 的压电层的压电系数，第一 PMUT 的压电层的介电常数低于第二 PMUT 的压电层的介电常数。

16、根据权利要求 15 所述的方法，其中，提供 PMUT 单元的步骤包括：

在形成一个 PMUT 后设置覆盖其的保护层；

与所述一个 PMUT 在横向上间隔开的设置另一个 PMUT；

移除所述保护层。

17、根据权利要求 15 或 16 所述的方法，其中，提供 PMUT 单元的步骤包括：

提供 PMUT 初始基底以及设置在初始基底的一侧上的在横向方向上间隔开的第一 PMUT 和第二 PMUT；

以临时粘合层覆盖第一 PMUT 和第二 PMUT 以及设置辅助基底，所述辅助基底与所述临时粘合层接合；

在初始基底的另一侧执行减薄工艺以形成所述 PMUT 基底，且

在将 PMUT 基底与晶体管单元的表面接合的步骤之后，所述方法还包括步骤：移除临时粘合层和辅助基底。

18、根据权利要求 15 所述的方法，其中：

利用接合材料层将 PMUT 基底与晶体管单元的一侧的表面接合，所述

PMUT 单元、所述晶体管单元以及所述接合材料层共同限定所述空腔，所述接合材料层的厚度限定所述空腔的高度。

19、根据权利要求 15 所述的方法，其中：

对于每个晶体管，所述晶体管单元包括彼此电绝缘的第一电连接层和第二电连接层；

所述方法还包括步骤：对于每一个 PMUT 和对应的晶体管，提供彼此电绝缘的第一导电层与第二导电层，第一电极层经由第一导电层与第一电连接层电连接，第二电极层经由第二导电层与第二电连接层电连接。

20、根据权利要求 19 所述的方法，对于每一个 PMUT 和对应的晶体管，其中：

在提供彼此电绝缘的第一导电层与第二导电层的步骤之前，还包括步骤：形成第一导电用孔和第二导电孔，第一导电用孔贯穿 PMUT 单元以及抵达从而露出晶体管单元内的第一电连接层，第二导电用孔贯穿 PMUT 单元以及抵达从而露出晶体管单元内的第二电连接层；

在提供彼此电绝缘的第一导电层与第二导电层的步骤中，第一导电层经由第一导电用孔与第一电连接层电连接，第二导电层经由第二导电用孔与第二电连接层电连接。

21、根据权利要求 15-20 中任一项所述的方法，其中：

提供晶体管单元包括提供晶体管晶圆，基于 MEMS 工艺，所述晶体管晶圆形成有多个晶体管单元，每个晶体管单元包括在横向方向上间隔开布置的第一晶体管和第二晶体管；

提供与晶体管单元的一侧的表面接合的 PMUT 单元包括：提供 PMUT 晶圆，基于 MEMS 工艺，所述 PMUT 晶圆形成有与所述多个晶体管单元分别对应的多个 PMUT 单元，每个 PMUT 单元包括在横向上彼此间隔开设置的第一 PMUT 和第二 PMUT，第一 PMUT 和第二 PMUT 分别与第一晶体管和第二晶体管在微机械超声换能器结构的厚度方向上对应；

所述方法还包括步骤：执行切割以形成包括单个 PMUT 单元与单个晶体管单元的微机械超声换能器结构。

22、根据权利要求 15-21 中任一项所述的方法，其中：

第一 PMUT 的压电层为 PZT 或掺杂 PZT，第二 PMUT 的压电层为 AlN 或

AlScN。

23、根据权利要求 15-22 中任一项所述的方法，其中：

第一 PMUT 用于发射超声波，第二 PMUT 用于接收超声波。

24、根据权利要求 15-23 中任一项所述的方法，其中：

所述晶体管单元包括 CMOS 单元、BiMOS 单元、BCD 单元中的一种。

25、根据权利要求 15 所述的方法，其中：

第一 PMUT 的压电层的压电系数绝对值大于 $1\text{C}/\text{m}^2$ ；和/或

第二 PMUT 的压电层的介电常数小于 1200。

26、根据权利要求 25 所述的方法，其中：

第一 PMUT 的压电层的压电系数绝对值大于 $5\text{C}/\text{m}^2$ ；和/或

第二 PMUT 的压电层的介电常数小于 100。

27、一种电子设备，包括根据权利要求 1-14 中任一项所述的微机械超声换能器结构，或者根据权利要求 15-26 中任一项所述的制造方法制造的微机械超声换能器结构。

28、根据权利要求 27 所述的电子设备，其中：

所述电子设备包括如下中的至少一种：超声成像仪、超声测距仪、超声指纹传感器、无损探伤仪、流量计、力觉反馈设备、烟雾报警器。

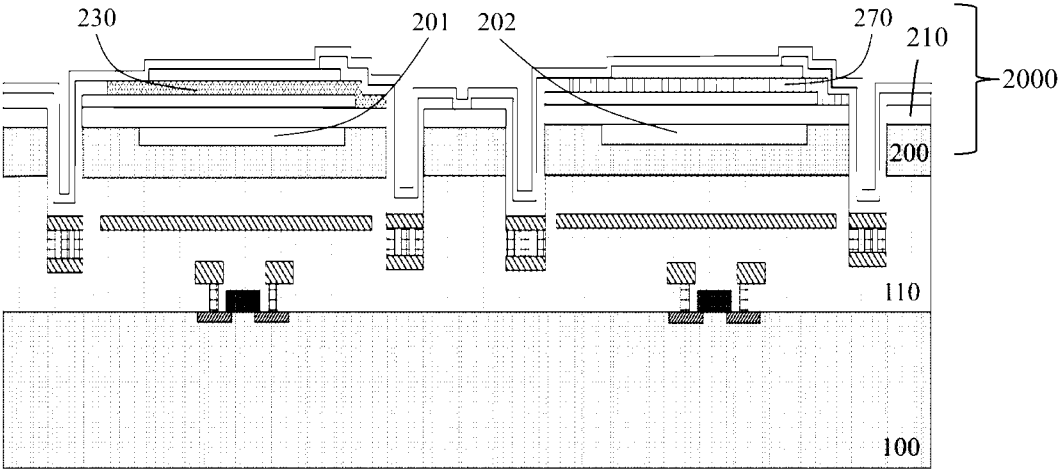


图 1

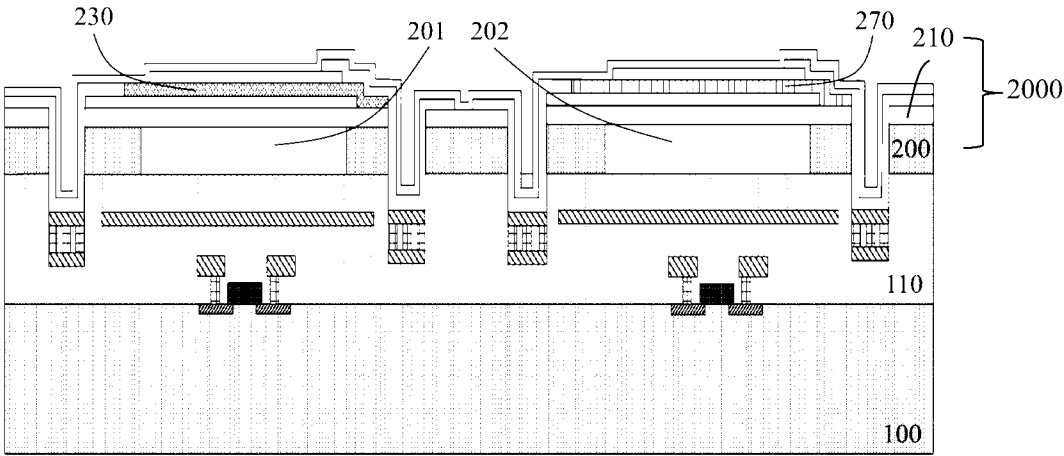


图 2

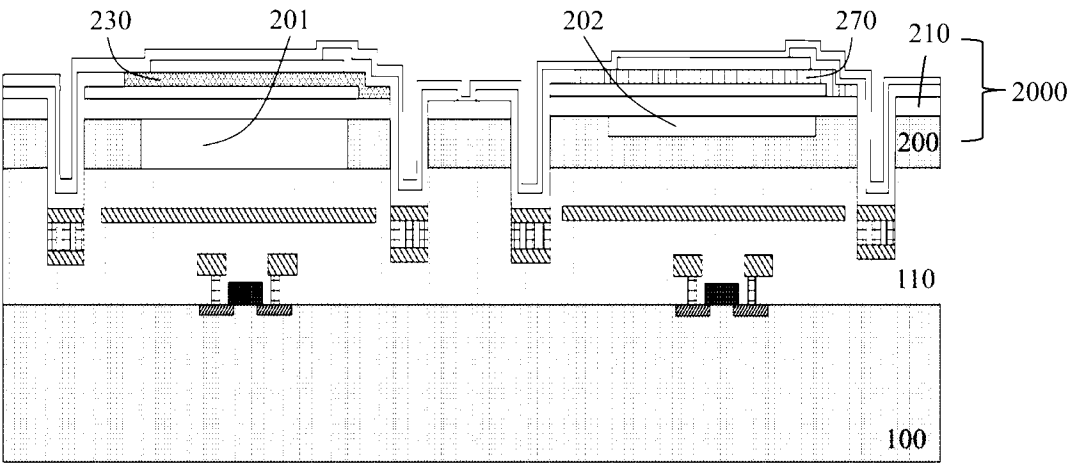


图3

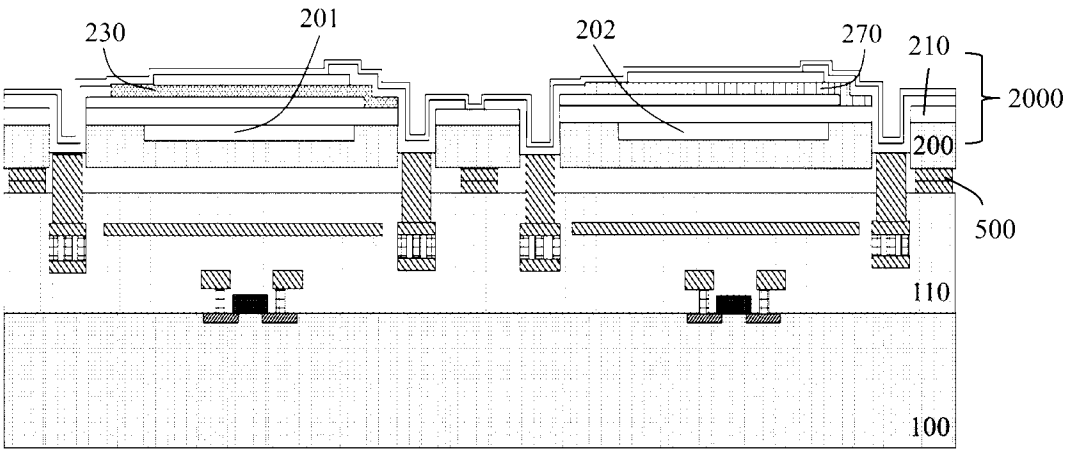


图 4

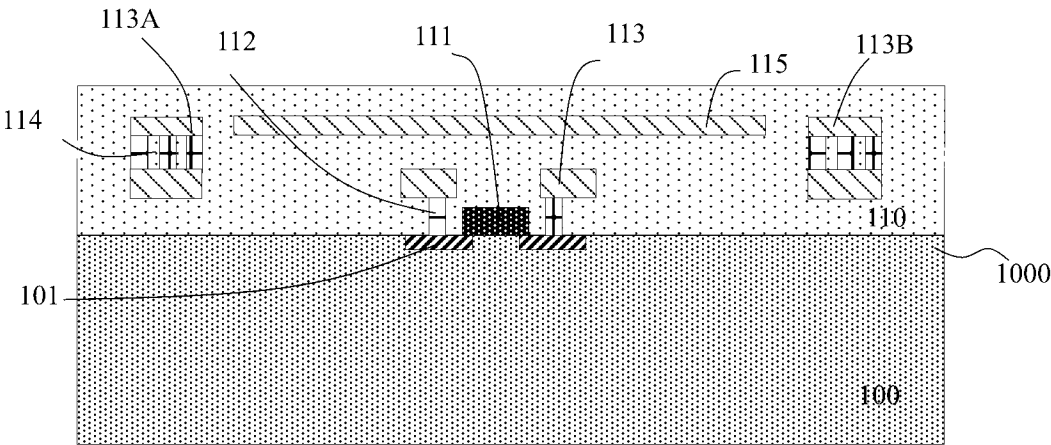


图 5

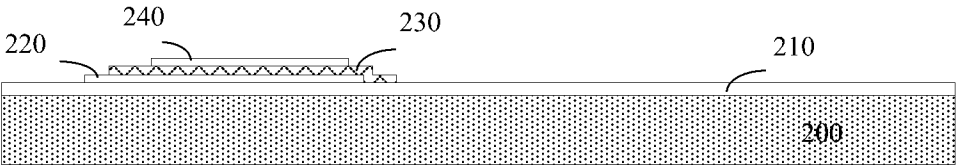


图 6

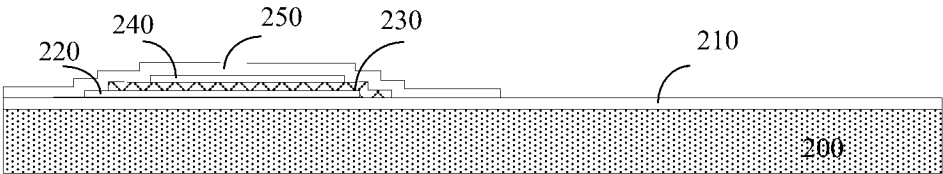


图 7

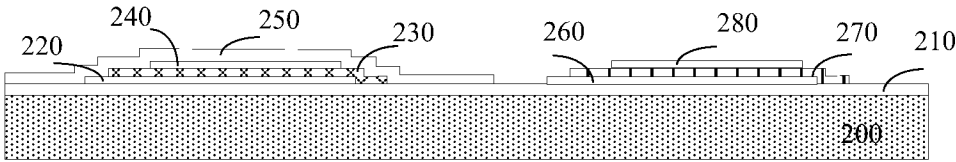


图 8

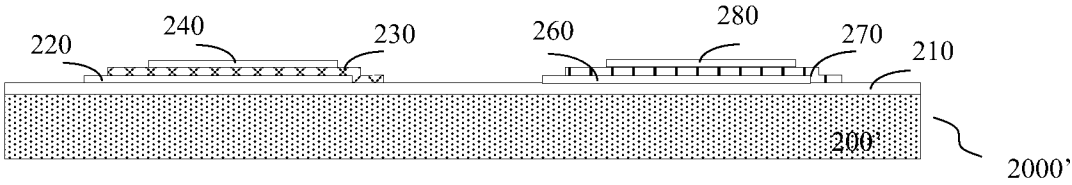


图 9

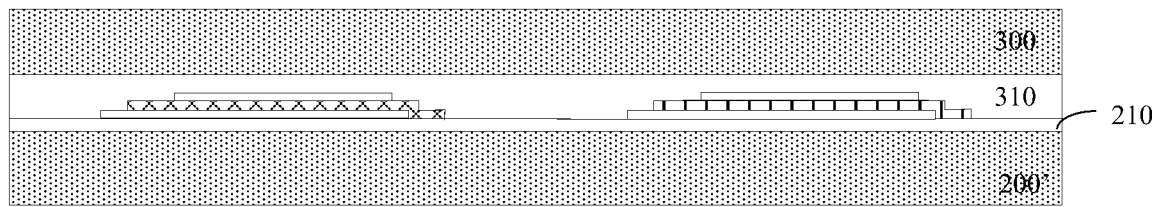


图 10

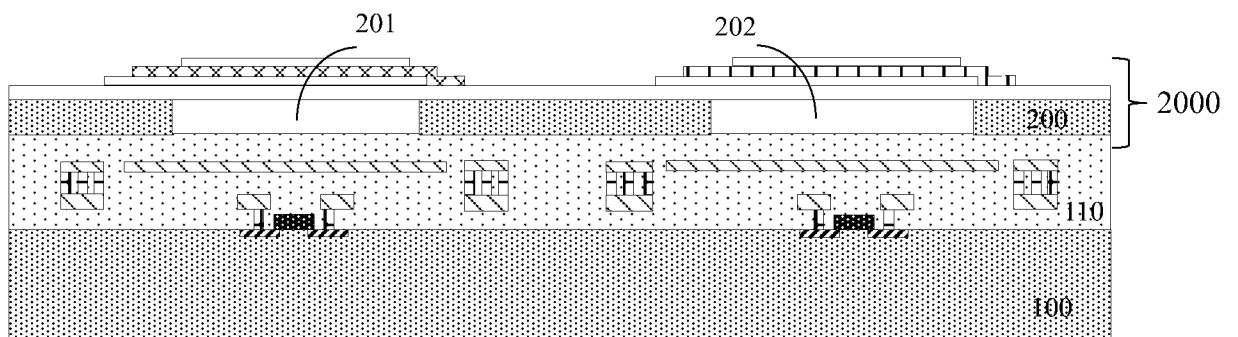


图 11

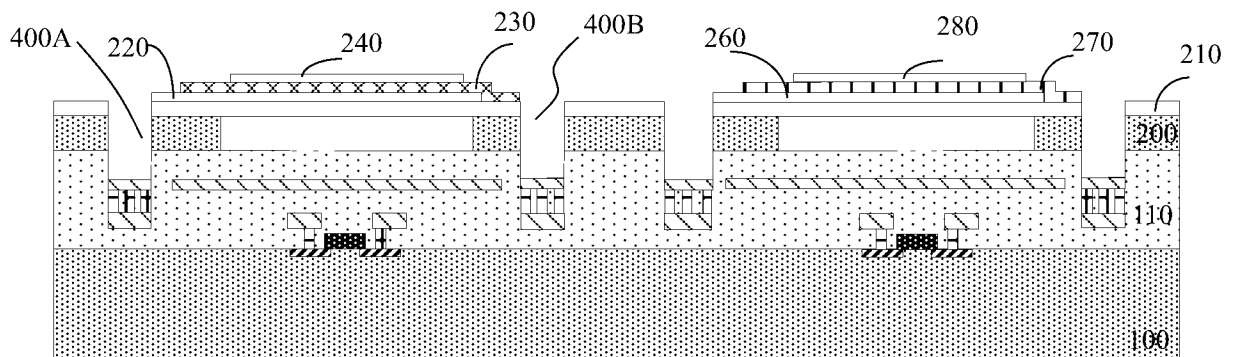


图 12

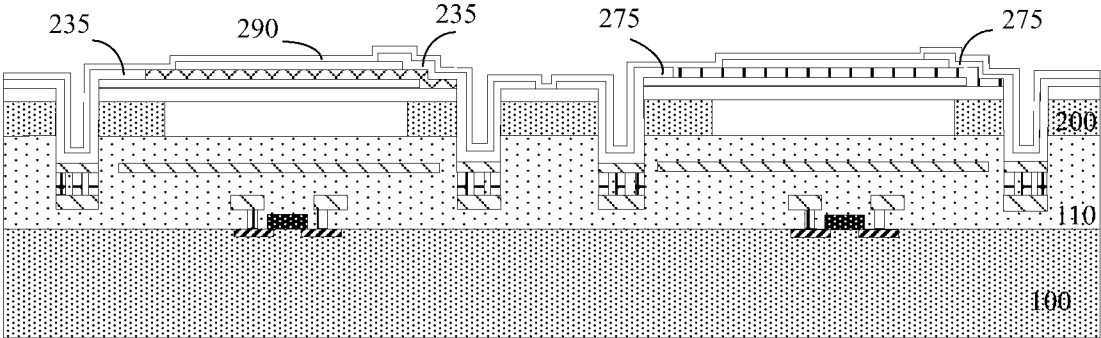


图 13

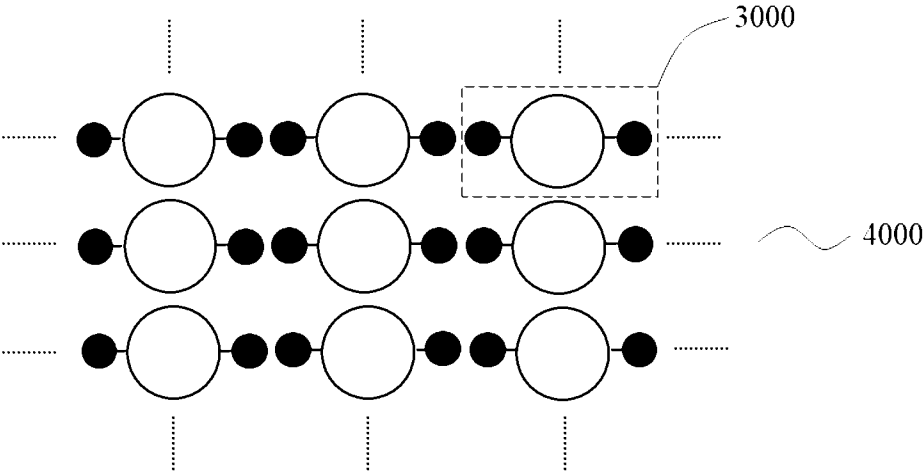


图 14

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2023/110644

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B06B1/06(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: B06B, H01N 30/-, H04R 17/-, A61B 8/-

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNTXT, ENTXTC, WPABSC, VEN, CJFD: 介电常数, 压电系数, 电容率, 介电系数, 压电, 压电常数, 压电微机械超声换能器结构, AIN, PMUT, PZT, 锆钛酸铅, 氮化铝, 晶体管, CMOS, piezoelectric micromachined ultrasonic transducer, piezoelectric+ constant, piezoelectric+ coefficient, dielectric constant, dielectric coefficient, specific inductive

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	TW 202139493 A (SUMITOMO CHEMICAL CO., LTD.) 16 October 2021 (2021-10-16) description, paragraphs [0010]-[0023] and [0040]-[0059], and figures 1-7	1-28
A	CN 110575946 A (SUOFUNATE PTY LTD.) 17 December 2019 (2019-12-17) entire document	1-28
A	CN 111182429 A (WUHAN UNIVERSITY) 19 May 2020 (2020-05-19) entire document	1-28
A	CN 114682472 A (SHENZHEN GOODIX TECHNOLOGY CO., LTD.) 01 July 2022 (2022-07-01) entire document	1-28
A	US 2017194934 A1 (CHIRP MICROSYSTEMS INC.) 06 July 2017 (2017-07-06) entire document	1-28



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“D” document cited by the applicant in the international application

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

24 November 2023

Date of mailing of the international search report

29 November 2023

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District,
Beijing 100088

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2023/110644

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
TW	202139493	A	16 October 2021	WO	2021205768	A1	14 October 2021
				JP	2021166220	A	14 October 2021
				EP	4135344	A1	15 February 2023
				US	2023142065	A1	11 May 2023
				US	2023276711	A2	31 August 2023
CN	110575946	A	17 December 2019	None			
CN	111182429	A	19 May 2020	None			
CN	114682472	A	01 July 2022	None			
US	2017194934	A1	06 July 2017	EP	3140869	A1	15 March 2017
				EP	3140869	A4	10 January 2018
				EP	3140869	B1	05 June 2019
				US	10566949	B2	18 February 2020
				WO	2015171224	A1	12 November 2015
				US	2020266798	A1	20 August 2020
				US	11711067	B2	25 July 2023

A. 主题的分类 B06B1/06(2006.01)i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类		
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) IPC: B06B, H01N 30/-, H04R 17/-, A61B 8/- 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNTXT,ENTXTC,WPABSC,VEN,CJFD:介电常数,压电系数,电容率,介电系数,压电,压电常数,压电微机械超声换能器结构,AlN,PMUT,PZT,锆钛酸铅,氮化铝,晶体管, CMOS, piezoelectric micromachined ultrasonic transducer,piezoelectric+ constant, piezoelectric+ coefficient,dielectric constant, dielectric coefficient, specific inductive		
C. 相关文件		
类型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
A	TW 202139493 A (SUMITOMO CHEMICAL CO) 2021年10月16日 (2021 - 10 - 16) 说明书第[0010]-[0023]、[0040]-[0059]段及附图1-7	1-28
A	CN 110575946 A (索夫纳特私人有限公司) 2019年12月17日 (2019 - 12 - 17) 全文	1-28
A	CN 111182429 A (武汉大学) 2020年5月19日 (2020 - 05 - 19) 全文	1-28
A	CN 114682472 A (深圳市汇顶科技股份有限公司) 2022年7月1日 (2022 - 07 - 01) 全文	1-28
A	US 2017194934 A1 (CHIRP MICROSYSTEMS INC) 2017年7月6日 (2017 - 07 - 06) 全文	1-28
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。		
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “D” 申请人在国际申请中引证的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件		
国际检索实际完成的日期 2023年11月24日		国际检索报告邮寄日期 2023年11月29日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088		授权官员 鹿士杰 电话号码 (+86) 010-62084988

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2023/110644

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利			公布日 (年/月/日)
TW	202139493	A	2021年10月16日	WO	2021205768	A1	2021年10月14日
				JP	2021166220	A	2021年10月14日
				EP	4135344	A1	2023年2月15日
				US	2023142065	A1	2023年5月11日
				US	2023276711	A2	2023年8月31日
CN	110575946	A	2019年12月17日	无			
CN	111182429	A	2020年5月19日	无			
CN	114682472	A	2022年7月1日	无			
US	2017194934	A1	2017年7月6日	EP	3140869	A1	2017年3月15日
				EP	3140869	A4	2018年1月10日
				EP	3140869	B1	2019年6月5日
				US	10566949	B2	2020年2月18日
				WO	2015171224	A1	2015年11月12日
				US	2020266798	A1	2020年8月20日
				US	11711067	B2	2023年7月25日