

证书号 第 1557450 号



发明 专利 证书

发明名称：一种复合压电振子及其制备方法

发明人：周丹；张国峰；林国豪；陈燕；戴吉岩；陈王丽华

专利号：ZL 2011 1 0001124.8

专利申请日：2011年01月05日

专利权人：香港理工大学

授权公告日：2014年12月31日

本发明经过本局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，颁发本证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。

本专利的专利权期限为二十年，自申请日起算。专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年01月05日前缴纳。未按照规定缴纳年费的，专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长
申长雨

申长雨





(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102594278 A

(43) 申请公布日 2012. 07. 18

(21) 申请号 201110001124. 8

(22) 申请日 2011. 01. 05

(71) 申请人 香港理工大学

地址 中国香港九龙红磡

(72) 发明人 周丹 张国峰 林国豪 陈燕

戴吉岩 陈王丽华

(74) 专利代理机构 深圳市顺天达专利商标代理

有限公司 44217

代理人 郭伟刚

(51) Int. Cl.

H03H 3/007 (2006. 01)

H03H 9/02 (2006. 01)

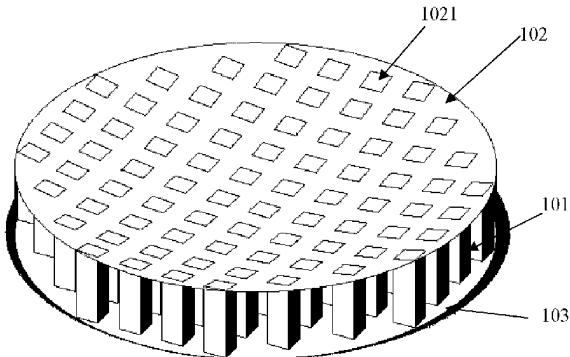
权利要求书 2 页 说明书 6 页 附图 5 页

(54) 发明名称

一种复合压电振子及其制备方法

(57) 摘要

本发明公开了一种复合压电振子及其制备方法，该压电振子包括：呈阵列分布的多个压电柱，多个压电柱由聚合物粘结成一复合体，复合体的上表面为内凹的曲面，多个压电柱的上端面暴露于该上表面，该多个压电柱的下端面暴露于该复合体的下表面，该上表面及该下表面分别镀有一层电极材料。本发明的方案中，由于作为压电振子的发射面的上表面内凹，可将声波的能量集中在需要探测的区域，可提高超声换能器的灵敏度及横向分辨率，提升机电耦合系数，有效地降低了机械品质因数值。此外，该压电振子本身由于上表面内凹而聚焦，因此不需要额外使用声透镜材料，精简了超声换能器的结构和减少声透镜造成的声波传输过程中能量的损失。



1. 一种复合压电振子，其特征在于，包括呈阵列分布的多个压电柱，所述多个压电柱由聚合物粘结成一复合体，所述复合体的上表面为内凹的曲面，所述多个压电柱的上端面暴露于所述上表面，所述多个压电柱的下端面暴露于所述复合体的下表面，所述上表面及所述下表面分别镀有一层电极材料。

2. 根据权利要求 1 所述的压电振子，其特征在于，所述压电柱的高度不小于所述压电柱的宽度的 2.5 倍。

3. 根据权利要求 2 所述的压电端子，其特征在于，所述多个压电柱中，相邻压电柱之间的排列间隔均相等。

4. 根据权利要求 3 所述的压电振子，其特征在于，所述压电柱的体积分数范围为 40%–90%，所述体积分数根据公式 $p^2/(p+w)^2$ 而得，其中，所述 w 是所述相邻压电柱之间的排列间隔，所述 p 是所述压电柱的宽度。

5. 一种复合压电振子的制备方法，其特征在于，所述方法包括：

S1、将压电块料沿竖直方向极化；

S2、对所述压电块料进行纵向线切割开槽，得到多个纵向槽，其中，每个纵向槽的宽度、高度均相同，所述纵向槽的深度小于所述压电块料的上表面与下表面之间的距离；

S3、将进行纵向线切割后的压电块料进行横向线切割开槽，得到多个横向槽，形成呈阵列分布的多个压电柱，其中，每个横向槽的宽度、深度均相同，所述横向槽的宽度、深度分别与所述纵向槽的宽度、深度相同；

S4、将进行横向线切割后的压电块料内置于腔体中，所述腔体设置有供聚合物渗入其内部的缺口，所述腔体的高度略大于所述压电块料的高度；

S5、将具有流动性的聚合物从所述缺口导入，所述聚合物填充所述多个横向及纵向槽；

S6、将渗入聚合物后的腔体置于真空环境中去除所述聚合物中的气泡；

S7、将抽真空去除所述聚合物的气泡后的腔体固化，使得所述压电块料与所述聚合物形成一复合体；

S8、从腔体中取出所述复合体；

S9、打磨所述复合体的下表面，直到露出所述聚合物，并且所述压电柱的下端面暴露在所述下表面为止；

S10、将所述复合体的上表面打磨成向内凹的曲面，并且使所述压电柱的上表面暴露在所述上表面；

S11、在所述打磨后的上表面和下表面镀一层电极材料，得到压电振子。

6. 根据权利要求 5 所述的方法，其特征在于，所述多个横向槽中，相邻的横向槽之间的排列间隔均相等，所述多个纵向线槽中，相邻的纵向槽之间的排列间隔均相等，所述相邻的横向槽之间的排列间隔等于所述相邻的纵向槽之间的排列间隔。

7. 根据权利要求 5 所述的方法，其特征在于，所述压电柱的宽度不大于所述纵向槽的深度的 2/5。

8. 根据权利要求 6 所述的方法，其特征在于，所述压电柱的体积分数为 40%–90%，所述体积分数根据公式 $p^2/(p+w)^2$ 所得，其中，所述 p 是所述相邻的纵向槽之间的排列间隔，所述 w 是所述每个纵向槽的宽度。

9. 根据权利要求 6 至 8 任意一项所述的方法, 其特征在于, 所述聚合物是以下的任一种: 环氧树脂、聚氨酯、硅橡胶。

一种复合压电振子及其制备方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种压电超声换能器，尤其涉及一种复合压电振子及其制备方法。

背景技术

[0002] 压电振子是压电超声换能器的核心部件，其性能指标对超声换能器的成像效果是至关重要的。目前，用于制备超声换能器的压电振子主要包括压电单晶、陶瓷、聚合物以及复合材料。其中，压电单晶和陶瓷的声阻抗高，Q值高，不适合制备宽带换能器，压电聚合物的压电响应低，所制备的超声换能器灵敏度不高。

[0003] 压电复合材料，由压电单晶或陶瓷和聚合物按一定的连通方式、体积比和空间几何分布而制成的材料。压电复合材料可以弥补单相材料的一些不足，不仅可以有效发挥压电材料优异的电学性能和高分子材料的柔性优点，而且具有常用压电单晶或陶瓷所没有的优良特性，可以成倍的提高材料的某些压电性能。目前，压电复合材料已经广泛的应用于工业、海洋工程、医学等领域，尤其是1-3型压电复合材料给压电材料的研究注入了新的活力，在船只及潜艇的水声测听器、超声医学诊断、结构的非损伤探测等方面具有相当的优势。

[0004] 然而随着科学技术日新月异的发展，对现有超声换能器的性能提出了更高的要求，特别是灵敏度和带宽的要求，必须从根本上优化超声换能器的核心部件即压电振子的特性，包括机电转换特性，以及能量聚焦特性等。

发明内容

[0005] 本发明要解决的技术问题在于，现有技术中，超声换能器的灵敏度不够高及频带宽度不够大，针对现有技术的上述缺陷，提供一种复合压电振子及其制备方法。

[0006] 本发明解决其技术问题所采用的技术方案是：

[0007] 一种复合压电振子，包括呈阵列分布的多个压电柱，所述多个压电柱由聚合物粘结成一复合体，所述复合体的上表面为内凹的曲面，所述多个压电柱的上端面暴露于所述上表面，所述多个压电柱的下端面暴露于所述复合体的下表面，所述上表面及所述下表面分别镀有一层电极材料。

[0008] 优选地，所述压电柱的高度不小于所述压电柱的宽度的2.5倍。

[0009] 优选地，所述多个压电柱中，相邻压电柱之间的排列间隔均相等。

[0010] 优选地，所述压电柱的体积分数范围为40% -90%，所述体积分数根据公式 $p^2/(p+w)^2$ 而得，其中，所述w是所述相邻压电柱之间的排列间隔，所述p是所述压电柱的宽度。

[0011] 本发明还提供一种制备上述压电振子的方法：

[0012] 一种复合压电振子的制备方法，所述方法包括：

[0013] S1、将压电块料沿竖直方向极化；

[0014] S2、对所述压电块料进行纵向线切割开槽，得到多个纵向槽，其中，每个纵向槽的宽度、高度均相同，所述纵向槽的深度小于所述压电块料的上表面与下表面之间的距离；

[0015] S3、将进行纵向线切割后的压电块料进行横向线切割开槽，得到多个横向槽，形成呈阵列分布的多个压电柱，其中，每个横向槽的宽度、深度均相同，所述横向槽的宽度、深度分别与所述纵向槽的宽度、深度相同；

[0016] S4、将进行横向线切割后的压电块料内置于腔体中，所述腔体设置有供聚合物渗入其内部的缺口，所述腔体的高度略大于所述压电块料的高度；

[0017] S5、将具有流动性的聚合物从所述缺口导入，所述聚合物填充所述多个横向及纵向槽；

[0018] S6、将渗入聚合物后的腔体置于真空环境中去除所述聚合物中的气泡；

[0019] S7、将抽真空去除所述聚合物的气泡后的腔体固化，使得所述压电块料与所述聚合物形成一复合体；

[0020] S8、从腔体中取出所述复合体；

[0021] S9、打磨所述复合体的下表面，直到露出所述聚合物，并且所述压电柱的下端面暴露在所述下表面为止；

[0022] S10、将所述复合体的上表面打磨成向内凹的曲面，并且使所述压电柱的上表面暴露在所述上表面；

[0023] S11、在所述打磨后的上表面和下表面镀一层电极材料，得到压电振子。

[0024] 优选地，所述多个横向槽中，相邻的横向槽之间的排列间隔均相等，所述多个纵向线槽中，相邻的纵向槽之间的排列间隔均相等，所述相邻的横向槽之间的排列间隔等于所述相邻的纵向槽之间的排列间隔。

[0025] 优选地，所述压电柱的宽度不大于所述纵向槽的深度的 2/5。

[0026] 优选地，所述压电柱的体积分数为 40% -90%，所述体积分数根据公式 $p^2/(p+w)^2$ 所得，其中，所述 p 是所述相邻的纵向槽之间的排列间隔，所述 w 是所述每个纵向槽的宽度。

[0027] 优选地，所述聚合物是以下的任一种：环氧树脂、聚氨酯、硅橡胶。

[0028] 使用本发明的技术方案，具有以下有益效果：由于压电振子的作为发射面的表面是内凹的曲面，可将声波的能量集中在需要探测的区域，进而提高超声换能器的灵敏度，此外由于随着压电柱高度的增大，与其对应的谐振频率会降低，因此越靠近压电振子中心，谐振频率越高；越靠近压电振子边缘时，谐振频率越低，因此宽化了压电振子的频带宽度。

[0029] 再者，该压电振子本身由于表面内凹而聚焦，因此不需要额外使用声透镜材料，精简了超声换能器的结构和减少声透镜造成的声波传输过程中能量的损失。

附图说明

[0030] 下面将结合附图及实施例对本发明作进一步说明，附图中：

[0031] 图 1 是本发明实施例的一种复合压电振子及其制备方法的压电块料经过线切割之后的结构示意图；

[0032] 图 2 是本发明实施例的一种复合压电振子及其制备方法的制备方法流程图；

[0033] 图 3 是本发明实施例的一种复合压电振子及其制备方法的压电振子与传统复合压电振子的电学性能比较；

[0034] 图 4-1 是采用传统技术所制备的复合压电振子的模拟的超声换能器的超声波回波特性示意图；

[0035] 图 4-2 是本发明实施例的一种复合压电振子及其制备方法的模拟的超声换能器的超声波回波特性示意图；

[0036] 图 5-1 是采用传统技术所制备的复合压电振子的模拟的超声换能器的声场特性示意图；

[0037] 图 5-2 是本发明实施例的一种复合压电振子及其制备方法的模拟的超声换能器的声场特性示意图。

具体实施方式

[0038] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白，以下结合附图及实施例，对本发明进行进一步详细说明。应当理解，此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明，并不用于限定本发明。

[0039] 如图 1 所示，是本发明实施例的一种复合压电振子及其制备方法的压电块料经过线切割之后的结构示意图。作为优选，该压电块料是圆柱，而该压电块料是压电单晶或压电陶瓷。其中，所述压电块料可以是：LiNbO₃ 单晶、PZT 陶瓷、BaTiO₃ 陶瓷以及 PMN-PT 驰豫铁电单晶中的一种，此处对此不作限制。

[0040] 本实施例中，该压电振子包括：呈阵列分布的多个压电柱 101，所述多个压电柱 101 由聚合物粘结成一复合体 100。其中，所述复合体 100 的上表面 102 为内凹的曲面，所述多个压电柱的上端面 1021 暴露于所述上表面 102，所述多个压电柱的下端面（未示出）暴露于所述复合体 100 的下表面 103，所述上端面 102 及所述下端面 103 分别镀有一层电极材料。该电极材料可以是金、银、铂等电导率高和容易焊接的金属中的一种，此处对此也不作限制。此外，所述镀金属电极的方式有多种，如溅射、电镀或化学镀等。

[0041] 本实施例中，相邻的压电柱 101 之间的距离均相等。作为优选，该压电柱下端面是正方形。此外，所述压电柱 101 的高度不小于所述压电柱的宽度的 2.5 倍，而所述压电柱的体积分数范围为优选地，所述压电柱的体积分数范围为 40% -90%，所述体积分数根据公式 $p^2 / (p+w)^2$ 而得，其中，所述 w 是所述相邻压电柱之间的排列间隔，所述 p 是所述压电柱的宽度。

[0042] 本实施例中，所述压电振子的制备工艺如下：

[0043] 首先，选择一块压电块料，该块料是压电单晶或压电陶瓷。作为优选，本实施例中，该块料是圆柱型的结构。接着将压电块料沿竖直方向极化。极化后，使其具备压电性能。接着对所述压电块料进行纵向线切割，得到多个纵向槽。其中，每个纵向槽的宽度、高度均相同，所述纵向槽的深度小于所述压电块料的上表面与下表面之间的距离，即所述纵向槽的深度刚好不使压电块料被切透。此外，该多个纵向槽之间的排列间隔可以不一样，但是作为优选，所述多个纵向槽中，相邻的纵向槽之间的排列间隔是一样的，均为 p。紧接着，将进行纵向线切割之后的压电块料进行横向线切割开槽，得到多个横向槽。其中，每个横向槽的宽度、深度均相同，所述横向槽的宽度、深度分别与所述纵向槽的宽度、深度相同。因此，所述横向槽及所述纵向槽的宽度均为 w。作为优选，所述多个横向槽之间的排列间隔和纵向槽之间的排列间隔相等，均为 p。由于进行线切割后，横向槽及纵向槽之间剩余的压电块料形成了压电柱，随后形成一个个直立的按照一定间隔规整排列的压电柱。因此，相邻的压电柱之间的排列间隔就是所述横向槽或纵向槽的宽度，所述压电柱的宽度等于相邻的横向槽之

间或相邻的纵向槽之间的排列间隔。其中，该压电柱的截面是正方形。根据超声换能器声波辐射表面面积以及电路匹配要求确定压电相的体积分数，其中，压电柱的体积分数按照公式： $p^2/(p+w)^2$ 来计算。作为优选，体积分数在 40% -90%，选择该范围的体积分数时，压电振子具有较为优异的压电和声学性能。之后，将进行横向线切割后的压电块料内置于腔体中，所述腔体设置有供聚合物导入其内部的缺口，所述腔体的高度略大于所述压电块料的高度。将具有流动性的聚合物从所述缺口导入，所述聚合物填充所述多个横向槽及纵向槽。之后，将其置于真空中去除所述聚合物中的气泡，抽取气泡后，将所述腔体固化，使得所述压电块料与所述聚合物形成一复合体。从腔体中取出所述复合体后，打磨所述复合体的下表面，直到露出所述聚合物，并且露出所述压电柱的下端面，将所述复合体的上表面打磨成向内凹的曲面，并且露出所述压电柱的上端面，之后在所打磨后的上表面及下表面镀一层电极材料。

[0044] 所述上表面与所述下表面的距离根据实际应用的频率设计。由于磨去了该压电柱上端面覆盖的聚合物，因此该压电柱的顶部暴露在所述上表面，如图 1 所示。该压电振子的发射面（上表面）制备成凹形面，更具体地，该凹形面是球面。压电振子的背面（下表面）是平面，于是形成了中心薄、边缘厚的压电振子。在所述打磨后的上表面和下表面镀一层金属电极，得到压电振子。

[0045] 由于上表面 102 是球面，所述第二表面 103 是平面，因此所述多个压电柱的高度是不一致的。于是形成了中心薄、边缘厚的压电振子。由于随着压电柱的高度的增加，谐振频率减小，因此，位于压电振子的中心位置处的压电柱高度最小，对应最高的谐振频率，而靠近该振子边缘位置的压电柱高度越高，其谐振频率也就越低。因此，压电振子的共振频率特性就宽带化了。

[0046] 本实施例中，该聚合物可以是环氧树脂、聚氨酯，还可以是硅橡胶，此处对聚合物的类型不作限制，但是无论使用上述何种类型聚合物，都能达到减小声阻抗，容易与生物组织、声耦合剂等实现声学匹配的效果。此外，构成所述基体的聚合物紧密填充所述多个纵向槽及横向槽。因此，该压电振子的内部结构（上表面 102 与下表面 103 之间部分）是一系列压电柱排列在聚合物中，各个压电柱上下贯通，综合了压电单晶或陶瓷优异的纵向长度伸缩振动机电耦合性能和聚合物的低声阻抗和高柔韧性。

[0047] 如图 2 所示，是本发明实施例的一种复合压电振子及其制备的制备方法的流程图。首先，选择一块压电块料，作为优选，本实施例中，该块料是圆柱型的结构。

[0048] 在步骤 201 中，将压电块料沿竖直方向极化。极化后，使其具备压电性能。接着在步骤 202 中，对所述压电块料进行纵向线切割开槽，得到多个纵向槽，其中，每个纵向槽的宽度、深度均相同，所述纵向槽的深度小于所述压电块料的上表面与下表面之间的距离（即压电块料的高度）。具体地，每个纵向槽之间保留部分的压电块料宽度（即压电柱）w 不大于每个纵向槽深度的 2/5，具体地，该多个纵向槽中，相邻的纵向槽之间的排列间隔可以不一样，但是作为优选，所述相邻的纵向槽之间的排列间隔是一样的，均为 p；而所述压电块料的上表面到与其对应的下表面之间的距离等于所述压电块料的高度，所述纵向槽的深度小于所述压电块料的高度。作为优选，所述多个纵向槽的深度略小于所述压电块料的高度，即所述多个纵向槽的深度刚好不使压电块料被切透。接着在步骤 203 中，将进行横向线切割后的压电块料进行横向线切割开槽，得到多个横向槽，随后形成一个个直立的按照

一定间隔规整排列的压电柱。其中，每个横向槽的宽度、深度均相同，所述横向槽的宽度、深度分别与所述纵向槽的宽度、深度相同。其中，该压电柱的截面是正方形。根据超声换能器声波辐射表面面积以及电路匹配要求确定压电相的体积分数，其中，压电柱的体积分数按照公式： $p^2 / (p+w)^2$ 来计算，其中，所述 p 是所述相邻的纵向槽之间的排列间隔，所述 w 是所述每个纵向槽的宽度。作为优选，体积分数在 40% -90%，选择该范围的体积分数时，压电振子具有较为优异的压电和声学性能。

[0049] 需要说明的是：由于进行线切割后，横向槽及纵向槽之间剩余的压电块料形成了压电柱，随后形成一个个直立的按照一定间隔规整排列的压电柱。因此，相邻的压电柱之间的排列间隔就是所述横向槽或纵向槽的宽度，所述压电柱的宽度等于相邻的横向槽之间或相邻的纵向槽之间的排列间隔。接着转到步骤 204。

[0050] 在步骤 204 中，将进行横向线切割后的压电块料内置于腔体中，所述腔体设置有供聚合物渗入其内部的缺口，所述腔体的高度略大于所述压电块料的高度。其中，所述腔体外形与所述压电块料一致，所述腔体设置有供聚合物渗入所述腔体内部的缺口，所述腔体的高度略大于所述压电块料的高度，所述腔体的截面是圆形，所述圆形的半径略大于所述压电块料的截面的半径。接着在步骤 205 中，将具有流动性的聚合物从所述缺口导入，所述聚合物紧密填充所述多个横向槽及纵向槽。接着在步骤 206 中，将渗入聚合物后的腔体置于真空环境中去除所述聚合物中的气泡。接着在步骤 207 中，将抽真空去除所述聚合物的气泡后的腔体固化，使得所述压电块料与所述聚合物形成一复合体。具体地，可在常温或加热条件下将其固化。接着在步骤 208 中，从腔体中取出所述复合体；接着转到步骤 209。

[0051] 在步骤 209 中，打磨所述复合体的下表面，直到露出所述聚合物，并且所述压电柱的下端面暴露在所述下表面为止。接着在步骤 210 中，将所述复合体的上表面打磨成向内凹的曲面，并且使所述压电柱的上端面暴露在所述上表面。具体地，按照实际应用的探测距离将所述上表面打磨成一定弧度的曲面，所述上表面的曲面与所述下表面之间的距离根据实际应用的频率设计。由于磨去了该压电柱上方覆盖的聚合物，因此该压电柱的上端面暴露在所述上表面上，如图 1 所示。该压电振子的发射面（上表面）制备成凹形面，更具体地，该凹形面是球面。压电振子的背面（下表面）是平面，于是形成了中心薄、边缘厚的压电振子。接着在步骤 211 中，在所述打磨后的上表面和下表面镀一层电极材料，得到压电振子。该电极材料可以是金、银、铂等电导率高和容易焊接的金属中的一种，此处对此也不作限制。此外，所述镀金属电极的方式有多种，如溅射、电镀或化学镀等。

[0052] 本实施例中，压电振子的顶部是曲面，底部是平面，由于随着压电柱的高度的增加，谐振频率减小，因此，位于压电振子的中心位置处的压电柱高度最小，对应最高的谐振频率，而靠近该振子边缘位置的压电柱高度越高，其谐振频率也就越低。因此，压电振子的共振频率特性就给宽带化了。该球面的曲率可以使超声换能器的声波的焦点位于探查的位置，不需要额外使用声透镜部件，精简了超声换能器的结构、材料和减少了声透镜造成声波传输过程中的能量损失。此外，可将声波的能量集中于需探测的区域，有利于提高超声换能器的灵敏度和横向分辨率。

[0053] 本实施例中，该聚合物可以是环氧树脂、聚氨酯，还可以是硅橡胶，此处对聚合物的类型不作限制，但是无论使用上述何种类型聚合物，都能达到减小声阻抗，容易与生物组织、声耦合剂等实现声学匹配的效果。此外，构成所述基体的聚合物紧密填充所述多个横向

槽及纵向槽。因此,该压电振子的内部结构(所述上表面与下表面之间部分)是一系列压电柱排列在聚合物中,各个压电柱上下贯通,综合了压电单晶或陶瓷优异的纵向长度伸缩振动机电耦合性能和聚合物的低声阻抗和高柔韧性。

[0054] 为了说明本实施例所制备的压电振子的性能,以 PZT 压电陶瓷和环氧树脂制备复合压电振子为例,将本发明所制备的压电振子与传统技术所制备的复合压电振子的电学性能进行了比较。图 3 是两种复合压电振子的电学阻抗频谱,可以推算出,使用本发明的压电振子,进一步提高了机电耦合系数 k_t (由 70% 增至 74%) 和降低了机械品质因数 Q 值(由 23 减至 15),可提高超声换能器的频带宽度和轴向分辨率。此外,分别模拟比较了两种复合压电振子应用于超声换能器的特性,如图 4-1 及 4-2 和图 5-1 及 5-2 所示。图 4-1 及 4-2 是超声波回波特性比较图,从图中结果来看,使用本发明的复合压电振子,超声换能器的频带宽度被大幅度提升(由 34% 提高到 61%)。图 5-1 及 5-2 为声场特性比较图,从声场的相对强度来看,使用本发明所制备的复合压电振子,焦点位置处的聚焦范围更加集中,而且近场连续出现的较高声强也被削弱了,因此能够获得更好的横向和轴向分辨率,提高超声图像的质量。

[0055] 本发明的方案中,从根本上优化超声换能器的核心部件即压电振子的特性,包括机电转换特性,以及能量聚焦特性等等。从而提高超声换能器的灵敏度和带宽。另一方面,压电复合材料可以有效发挥压电材料优异的电学性能和高分子材料的柔性优点。

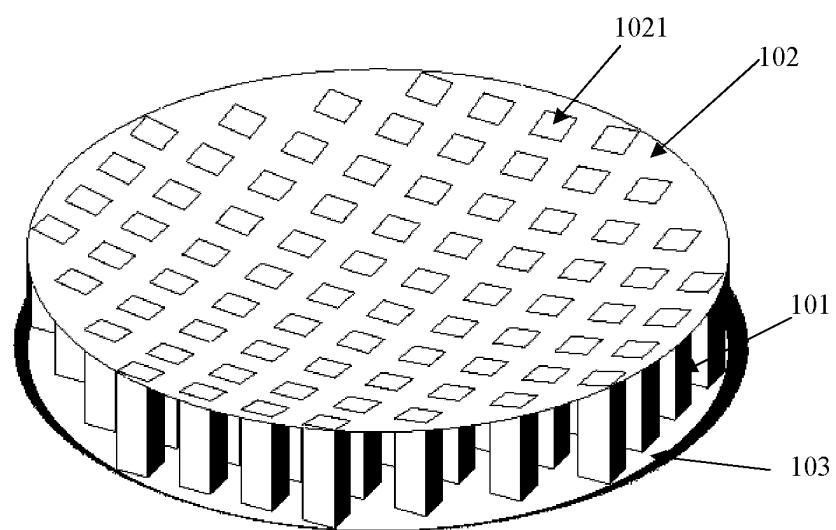


图 1

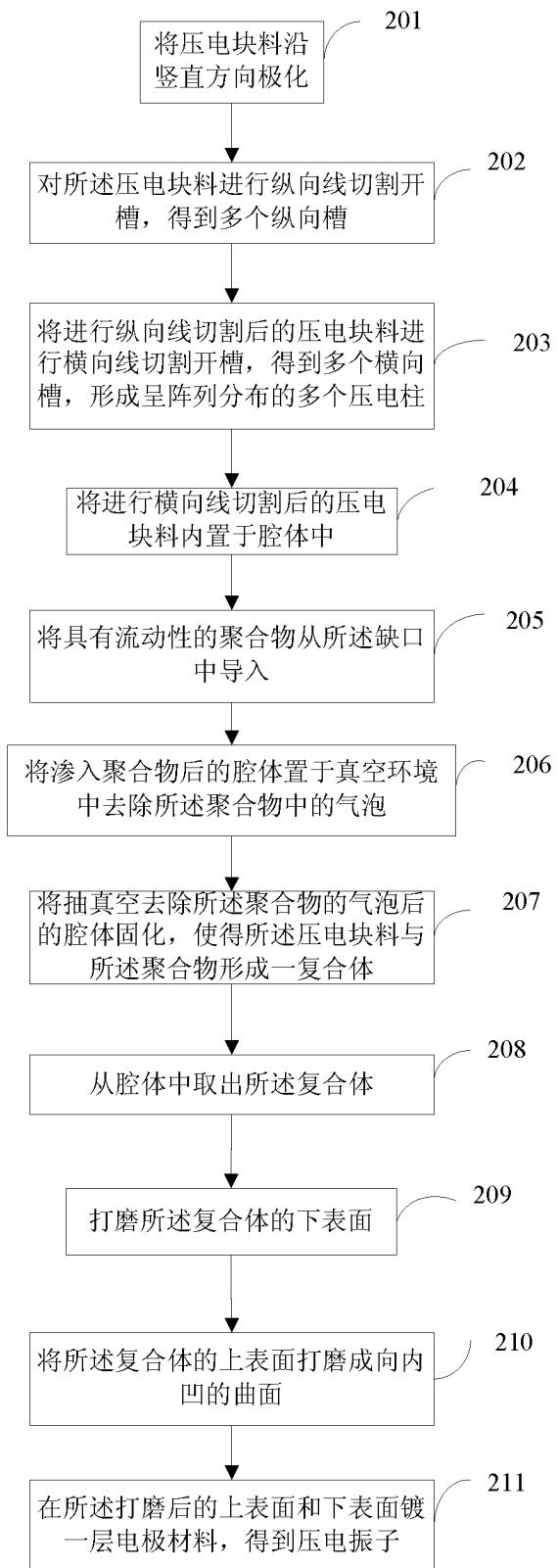


图 2

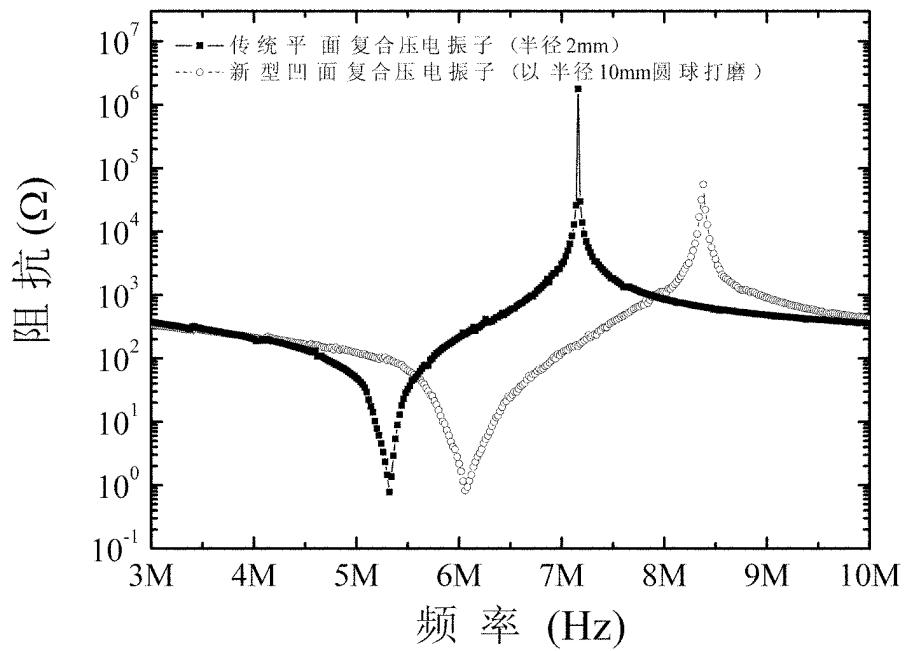


图 3

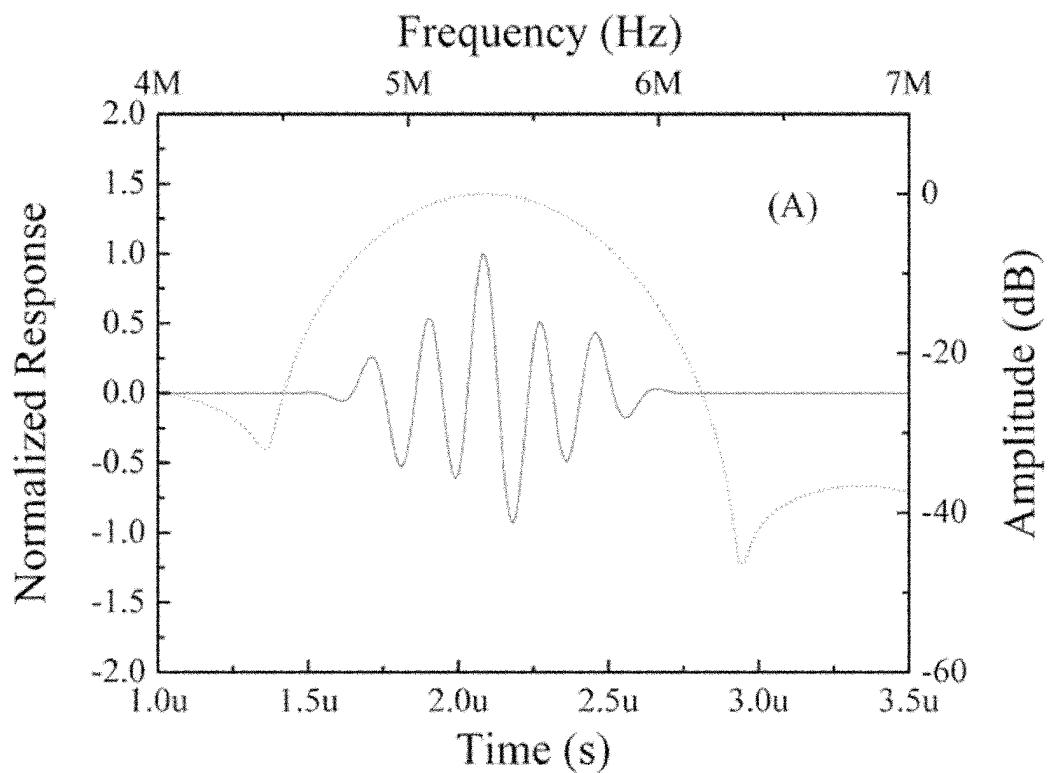


图 4-1

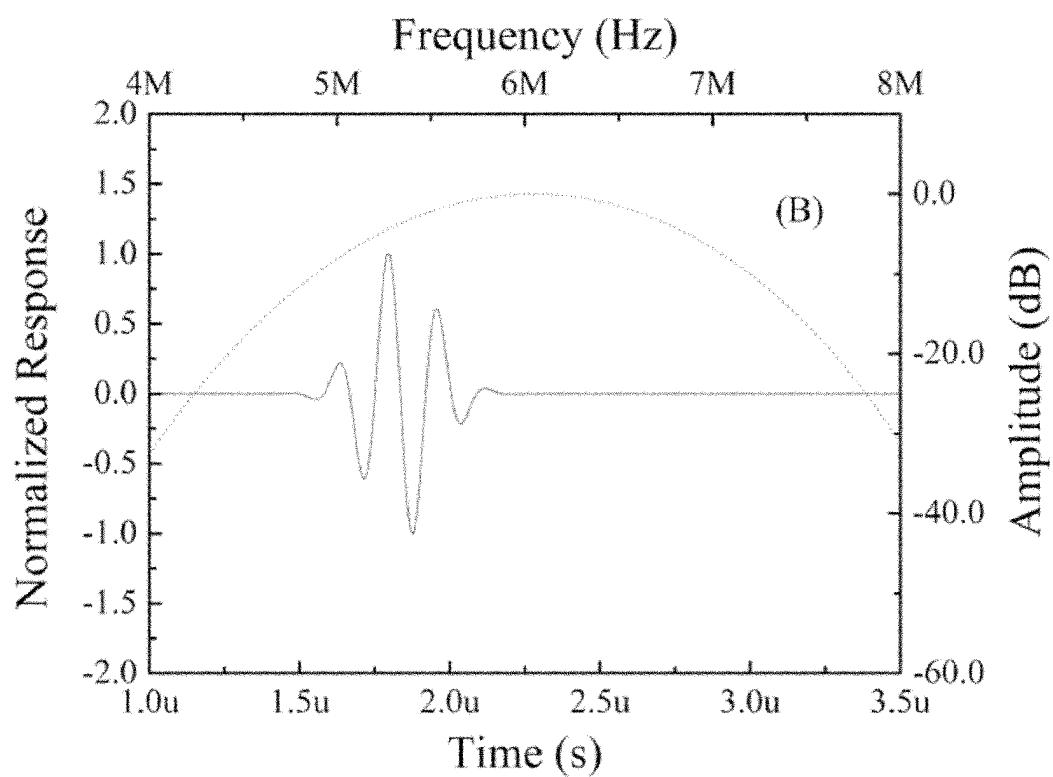


图 4-2

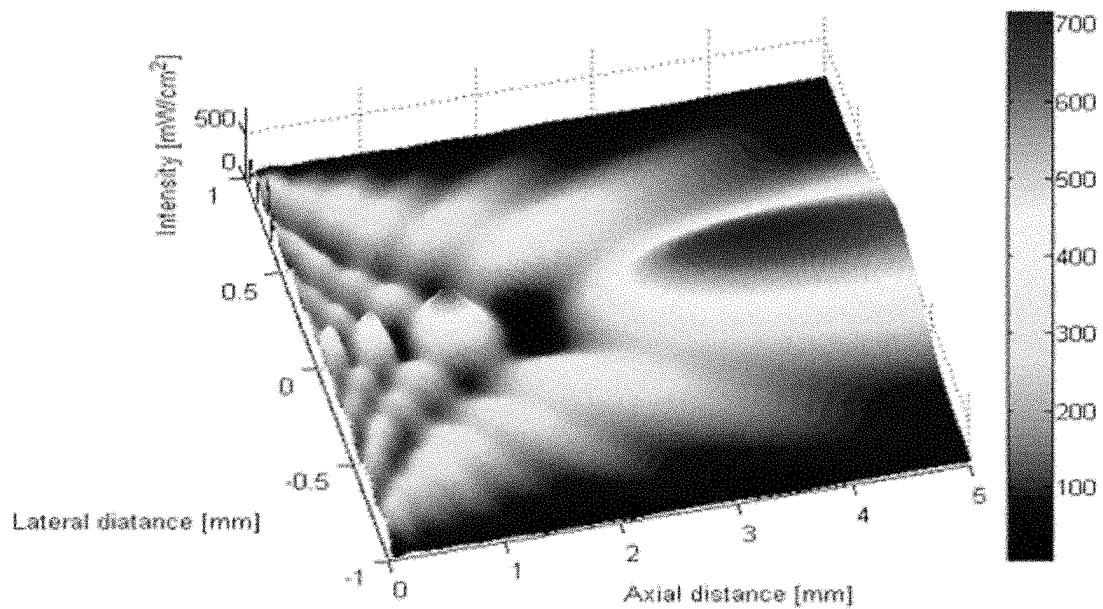


图 5-1

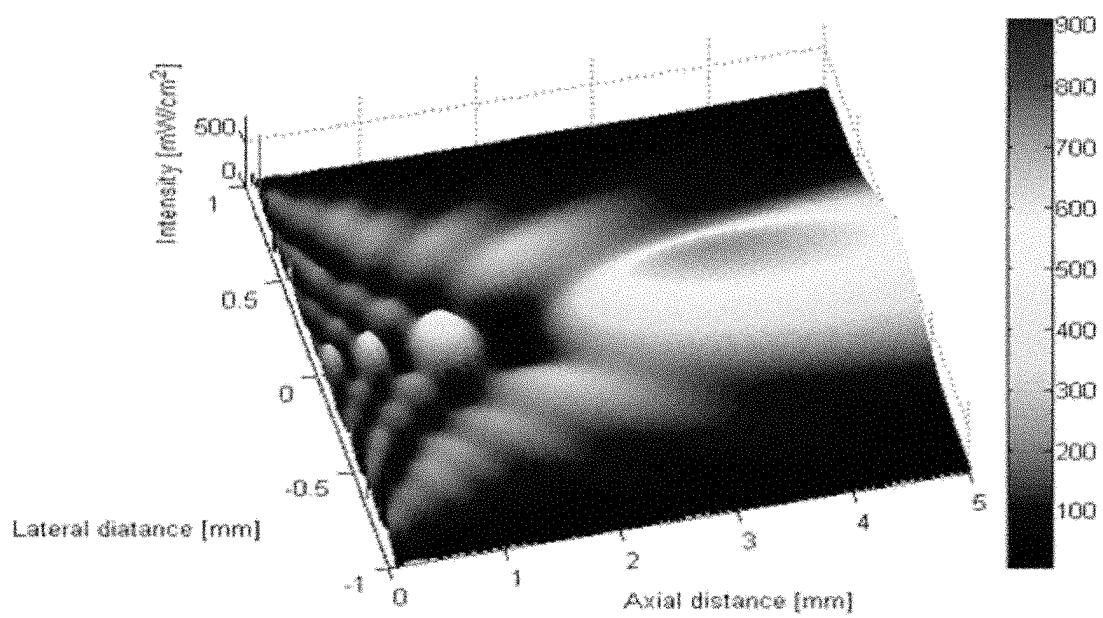


图 5-2