



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109283403 A

(43)申请公布日 2019.01.29

(21)申请号 201811346215.3

(22)申请日 2018.11.13

(71)申请人 东南大学

地址 210096 江苏省南京市玄武区四牌楼2号

(72)发明人 张滕远 周再发 黄庆安

(74)专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司 32200

代理人 熊玉玮

(51) Int. Cl.

G01R 29/22(2006.01)

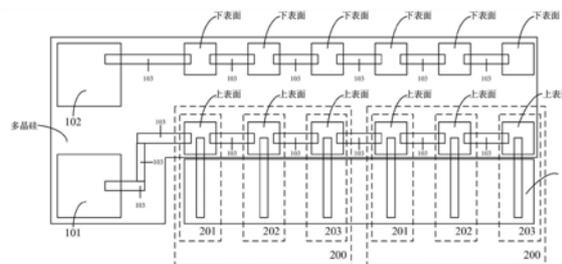
权利要求书1页 说明书6页 附图2页

(54)发明名称

基于多层悬臂梁的薄膜材料横向压电系数测试模型及方法

(57)摘要

本发明涉及微机电系统材料参数在线测试技术领域,提出基于多层悬臂梁的薄膜材料横向压电系数测试模型及方法。测试模型由三个中间层和顶层宽度组合非线性相关的悬臂梁构成。三个悬臂梁的底层、中间层和顶层的材料和厚度分别完全相同,长度也相同。测试方法是先测得悬臂梁的一阶谐振频率,再基于谐振频率法对各悬臂梁的各层材料杨氏模量进行提取,然后基于逆压电效应法测量任意一个悬臂梁的尖端位移,最后基于能量法解析得到该悬臂梁中间层所用薄膜材料的横向压电系数d31。本发明提出的测试模型简单,其加工过程可与MEMS同步,没有特殊加工要求。测试方法求解复杂度低、计算量少,且易于操作,测试过程具备可重复性、稳定性和高效率,符合在线测试要求。



1. 基于多层悬臂梁的薄膜材料横向压电系数测试模型, 所述测试模型 (200) 包括第一三层悬臂梁 (201)、第二三层悬臂梁 (202) 和第三三层悬臂梁 (203); 所述三层悬臂梁释放后能保持平直状态; 所述第一三层悬臂梁 (201)、第二三层悬臂梁 (202) 和第三三层悬臂梁 (203) 的底层材料参数、底层厚度以及梁的长度完全相同, 所述第一三层悬臂梁 (201)、第二三层悬臂梁 (202) 和第三三层悬臂梁 (203) 的中间层材料参数、中间层厚度以及梁的长度完全相同, 所述第一三层悬臂梁 (201)、第二三层悬臂梁 (202) 和第三三层悬臂梁 (203) 的顶层材料参数、顶层厚度以及梁的长度完全相同, 其特征在于:

所述第一三层悬臂梁 (201) 的底层 (11) 宽度是 w_1 、中间层 (12) 宽度是 w_{21} 、顶层 (13) 宽度是 w_{31} , 并且 $w_1 > w_{21} > w_{31}$; 所述第二三层悬臂梁 (202) 的底层 (21) 宽度是 w_1 、中间层 (22) 宽度是 w_{21} 、顶层 (23) 宽度是 w_{32} , 并且 $w_1 > w_{21} > w_{32}$; 所述第三三层悬臂梁 (203) 的底层 (31) 宽度是 w_1 、中间层 (32) 宽度是 w_{22} 、顶层 (33) 宽度是 w_{32} , 并且 $w_1 > w_{22} > w_{32}$;

所述第一三层悬臂梁 (201)、第二三层悬臂梁 (202) 和第三三层悬臂梁 (203) 的中间层和顶层的宽度组合分别为: w_{21} 与 w_{31} 、 w_{21} 与 w_{32} 和 w_{22} 与 w_{32} , 并且这些宽度组合之间非线性相关。

2. 根据权利要求1所述的基于多层悬臂梁的薄膜材料横向压电系数测试模型, 其特征在于: 第一三层悬臂梁 (201)、第二三层悬臂梁 (202) 和第三三层悬臂梁 (203) 并排放置, 各个三层悬臂梁的上表面用金属极板 (103) 引出至顶层金属极板 (101); 各个三层悬臂梁的下表面用金属极板 (103) 引出至底层金属极板 (102)。

3. 基于多层悬臂梁的薄膜材料横向压电系数测试方法, 根据权利要求2所述的基于多层悬臂梁的薄膜材料横向压电系数测试模型而实现, 其特征在于: 包括如下步骤:

步骤A: 使用仪器测量第一三层悬臂梁 (201)、第二三层悬臂梁 (202) 和第三三层悬臂梁 (203) 的挠曲度;

步骤B: 使用仪器测量第一三层悬臂梁 (201)、第二三层悬臂梁 (202) 和第三三层悬臂梁 (203) 的一阶谐振频率;

步骤C: 基于谐振频率法, 提取第一三层悬臂梁 (201)、第二三层悬臂梁 (202) 和第三三层悬臂梁 (203) 各层材料的杨氏模量;

步骤D: 基于逆压电效应法, 使用仪器测量测试模型中任意一个悬臂梁的尖端位移;

步骤E: 基于能量法, 通过对测试模型中任意一个悬臂梁的压电模型表达式进行解析得到该悬臂梁中间层所用薄膜材料的横向压电系数 d_{31} 。

4. 根据权利要求3所述的基于多层悬臂梁的薄膜材料横向压电系数测试模型而实现的测试方法, 其特征在于: 步骤E中对于多层悬臂梁, 共 n 层, 第 j 层为压电薄膜材料层 ($1 \leq j \leq n$), 其它各层材料均是弹性材料; 由能量法构建多层悬臂梁压电模型的解析表达式:

$$\frac{\pi w_j \tilde{E}_j}{4l} \cdot (Z_j^3 - Z_{j-1}^3) \cdot d_{31} \cdot e + \frac{c\pi^4}{96l^3} \sum_{i=1}^n \tilde{E}_i w_i \cdot (Z_i^3 - Z_{i-1}^3) = 0$$

其中, 每层薄膜上表面距离中性轴 (即 x 轴的) 的高度为 $Z_i = z_i - z_c$, e 为施加在压电材料上下表面的电场强度, $e = V/h_j$;

$$\text{根据 } d_{31} = -\frac{c\pi^3 \sum_{i=1}^n \tilde{E}_i w_i (Z_i^3 - Z_{i-1}^3)}{24l^2 w_j \tilde{E}_j (Z_j^2 - Z_{j-1}^2) \cdot e} \text{ 求解薄膜材料的横向压电系数。}$$

基于多层悬臂梁的薄膜材料横向压电系数测试模型及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及微机电系统材料参数的在线测试技术领域,特别是涉及基于多层悬臂梁的薄膜材料横向压电系数测试模型及方法。

背景技术

[0002] 随着微电子机械系统(MEMS, Micro-Electro-Mechanical System)工艺的不断进步与完善,越来越多的微机械结构得以设计并制造出来。大部分的可动微机械结构尺寸很小,需要使用大量薄膜材料。但是,薄膜材料的力学特性不能用宏观机械材料的机械参数来衡量。而且薄膜材料,尤其是晶体材料,在形成薄膜、细梁等结构时,由于加工工艺的不同,即使同一种材料往往也会表现出明显不同的力学特性。同理,即使加工工艺相同,但在不同生产环境下由于热学参数的不同,也会导致同一种材料表现出明显不同的力学特性。因此,在生产制造薄膜材料时,对薄膜材料的特性开展监控和在线测试具有重要的应用价值。

[0003] 多层悬臂梁在MEMS中占有重要的地位,在悬臂梁上制作压电薄膜直接实现梁的运动与电信号之间的转换,受到了特别关注。并且,在设计和模拟悬臂梁时,压电薄膜材料的压电系数成为关键参数,其中又以横向压电系数 d_{31} 最为重要。然而对于采用不同工艺或不同配比制作的压电材料,该压电系数必须通过实验的方法来测量。

[0004] 以悬臂梁谐振模型来测量横向压电系数的方法,应用非常广泛。但是对于三层悬臂梁而言,其谐振模拟方法需要求解六元非线性方程组,求解过程复杂,因此其横向压电系数的测量速度无法满足MEMS生产工艺的需求,并且由于测量所得结果是一个较大的范围值,因此测量的准确度也无法满足MEMS生产工艺的需求。

发明内容

[0005] 本发明所要解决的技术问题是:采用三层悬臂梁设计一种测试模型,并利用该测试模型和实验仪器,通过测试和计算获得压电薄膜材料的横向压电系数,所提出的横向压电系数的测量速度和测量结果的准确度都能满足MEMS在线测试需求。

[0006] 本发明为解决上述技术问题采用以下技术方案:

[0007] 一方面,提出一种基于三层悬臂梁的压电薄膜材料横向压电系数的测试模型。一组测试模型包括第一三层悬臂梁、第二三层悬臂梁和第三三层悬臂梁。第一三层悬臂梁、第二三层悬臂梁和第三三层悬臂梁的上表面用金属极板引出至顶层金属极板。第一三层悬臂梁、第二三层悬臂梁和第三三层悬臂梁的下表面用金属极板引出至底层金属极板。

[0008] 测试模型中任意一个三层悬臂梁包括:底层、中间层、顶层、锚区和衬底。锚区固定在衬底上,除了锚区以外的其他区域部分均被悬浮,构成悬臂梁结构。第一三层悬臂梁、第二三层悬臂梁和第三三层悬臂梁的底层都是多晶硅层、材料参数完全相同;第一三层悬臂梁、第二三层悬臂梁和第三三层悬臂梁的中间层是压电薄膜材料层、材料参数完全相同;第一三层悬臂梁、第二三层悬臂梁和第三三层悬臂梁的顶层是金属层、材料参数完全相同。

[0009] 测试模型中任意一个三层悬臂梁的长度均是1。

[0010] 测试模型中任意一个三层悬臂梁的底层、中间层和顶层的厚度分别是 h_1 、 h_2 和 h_3 ，并且底层厚度远大于中间层厚度和顶层厚度、顶层厚度大于中间层厚度，即 $h_1 \gg h_3 > h_2$ 。

[0011] 测试模型中任意一个三层悬臂梁的底层宽度都是 w_1 ，底层、中间层和顶层的宽度依次递减。测试模型中三个三层悬臂梁的中间层宽度和顶层宽度构成一种非线性相关组合，即第一三层悬臂梁的中间层和顶层宽度组合为 w_{21} 与 w_{31} 、第二三层悬臂梁的中间层和顶层宽度组合为 w_{22} 与 w_{32} 、第三三层悬臂梁的中间层和顶层宽度组合为 w_{22} 与 w_{32} 。

[0012] 另一方面，利用一种基于三层悬臂梁的压电薄膜材料横向压电系数的测试模型，提出一种薄膜材料的横向压电系数 d_{31} 的测量方法。该测量方法步骤如下：

[0013] 步骤A：使用仪器测量第一三层悬臂梁、第二三层悬臂梁和第三三层悬臂梁的挠曲度。

[0014] 步骤B：使用仪器测量第一三层悬臂梁、第二三层悬臂梁和第三三层悬臂梁的一阶谐振频率。

[0015] 步骤C：基于谐振频率法，提取第一三层悬臂梁、第二三层悬臂梁和第三三层悬臂梁各层材料的杨氏模量。

[0016] 步骤D：基于逆压电效应法，使用仪器测量测试模型中任意一个悬臂梁的尖端位移。

[0017] 步骤E：基于能量法，通过对测试模型中任意一个悬臂梁的压电模型表达式进行解析得到该悬臂梁中间层所用薄膜材料的横向压电系数 d_{31} 。

[0018] 本发明采用以上技术方案与现有技术相比，具有以下技术效果：

[0019] 采用多层悬臂梁作为测试模型，并合理设计了测量方法和解析计算表达式，使得求解复杂度降低、计算量减少。本发明提出的测试模型简单、测试方法简单易于操作，测试仪器和设备要求低，测试过程具备可重复性和稳定性，因此所得测量方法效率高。并且本发明提出的测试模型的加工过程可与MEMS同步，没有特殊加工要求，完全符合在线测试的要求。

附图说明

[0020] 图1是本发明提出的基于三层悬臂梁的压电薄膜材料横向压电系数的测试模型的版图；

[0021] 图2是第一三层悬臂梁201的结构示意图，其中图2(a)是俯视图，图2(b)是侧视图；

[0022] 图3是第二三层悬臂梁202的结构示意图，其中图3(a)是俯视图，图3(b)是侧视图；

[0023] 图4是第三三层悬臂梁203的结构示意图，其中图4(a)是俯视图，图4(b)是侧视图。

具体实施方式

[0024] 图1是本发明提出的的基于三层悬臂梁的压电薄膜材料横向压电系数的测试模型的版图，该图为主视图。

[0025] 一组测试模型200包括第一三层悬臂梁201、第二三层悬臂梁202和第三三层悬臂梁203。第一三层悬臂梁201、第二三层悬臂梁202和第三三层悬臂梁203并排布置，各三层悬臂梁的上表面用金属极板103引出至顶层金属极板101。各三层悬臂梁的下表面用金属极板103引出至底层金属极板102。图1中，为增加测试的容错性，在版图设计中并排布置了两组

完全一样的测试模型200。

[0026] 具体实施例一：

[0027] 图2是第一三层悬臂梁201的结构示意图,其中图2(a)是俯视图,图2(b)是侧视图。第一三层悬臂梁201包括:底层11、中间层12、顶层13、锚区14和衬底15。锚区14固定在衬底15上,除了锚区14以外的其他区域部分均被悬浮,构成悬臂梁结构。底层11是多晶硅层,中间层12是压电薄膜材料层,顶层13是金属层。第一三层悬臂梁201的长度是1。第一三层悬臂梁201的底层11的厚度是 h_1 、宽度是 w_1 ;第一三层悬臂梁201的中间层12的厚度是 h_2 、宽度是 w_{21} ;第一三层悬臂梁201的顶层13的厚度是 h_3 、宽度是 w_{31} ;底层11、中间层12和顶层13的宽度依次递减,即 $w_1 > w_{21} > w_{31}$ 。并且底层11的厚度远大于中间层12的厚度和顶层13的厚度,并且顶层13的厚度大于中间层12的厚度,即 $h_1 \gg h_3 > h_2$ 。

[0028] 图3是第二三层悬臂梁202的结构示意图,其中图3(a)是俯视图,图3(b)是侧视图。第二三层悬臂梁202包括:底层21、中间层22、顶层23、锚区24和衬底25。锚区24固定在衬底25上,除了锚区24以外的其他区域部分均被悬浮,构成悬臂梁结构。底层21是多晶硅层,中间层22是压电薄膜材料层,顶层23是金属层。第二三层悬臂梁202的长度是1。第二三层悬臂梁202的底层21的厚度是 h_1 、宽度是 w_1 ;第二三层悬臂梁202的中间层22的厚度是 h_2 、宽度是 w_{21} ;第二三层悬臂梁202的顶层23的厚度是 h_3 、宽度是 w_{32} ;底层21、中间层22和顶层23的宽度依次递减,即 $w_1 > w_{21} > w_{32}$ 。并且底层21的厚度远大于中间层22的厚度和顶层23的厚度,并且顶层23的厚度大于中间层22的厚度,即 $h_1 \gg h_3 > h_2$ 。

[0029] 图4是第三三层悬臂梁203的结构示意图,其中图4(a)是俯视图,图4(b)是侧视图。第三三层悬臂梁203包括:底层31、中间层32、顶层33、锚区34和衬底35。锚区34固定在衬底35上,除了锚区34以外的其他区域部分均被悬浮,构成悬臂梁结构。底层31是多晶硅层,中间层32是压电薄膜材料层,顶层33是金属层。第三三层悬臂梁203的长度是1。第三三层悬臂梁203的底层31的厚度是 h_1 、宽度是 w_1 ;第三三层悬臂梁203的中间层32的厚度是 h_2 、宽度是 w_{22} ;第三三层悬臂梁203的顶层33的厚度是 h_3 、宽度是 w_{32} ;底层31、中间层32和顶层33的宽度依次递减,即 $w_1 > w_{22} > w_{32}$ 。并且底层31的厚度远大于中间层32的厚度和顶层33的厚度,并且顶层33的厚度大于中间层32的厚度,即 $h_1 \gg h_3 > h_2$ 。

[0030] 第一三层悬臂梁201的底层11的宽度、第二三层悬臂梁202的底层21的宽度与第三三层悬臂梁203的底层31的宽度相等,均为 w_1 。

[0031] 由第一三层悬臂梁201、第二三层悬臂梁202和第三三层悬臂梁203构成的一组测试模型200,实际上是一种采用多个薄膜宽度组合非线性相关的多层悬臂梁测试模型,多个薄膜宽度的非线性组合分别为: w_{21} 与 w_{31} 、 w_{21} 与 w_{32} 和 w_{22} 与 w_{32} 。

[0032] 第一三层悬臂梁201、第二三层悬臂梁202和第三三层悬臂梁203仅在材料的结构尺寸上有所区别,而在材料参数上完全相同。因此,基于测试模型200的谐振模型,将微机械薄膜梁的谐振频率等动力学特性与材料特性、结构尺寸等参数联系起来。

[0033] 具体实施例二：

[0034] 采用基本微机电加工工艺制作一种构成测试模型200的三层悬臂梁,具体步骤如下：

[0035] 步骤1：

[0036] 在 $400\mu\text{m}$ 的硅衬底上生长一层氧化层,再在其上面生长一层多晶硅底层,并淀积一

层光刻胶PSG;在充满氩气并且温度保持在1050℃的环境下退火1小时,让多晶硅掺杂;之后用湿法刻蚀掉PSG。

[0037] 步骤2:

[0038] 生长一层0.2 μm 的氧化层,在其上面旋涂正性光刻胶,且第一层掩模版PADOXIDE的图形被复制到光刻胶上;去除掉被曝光的部分光刻胶并湿法刻蚀掉不需要的氧化层。

[0039] 步骤3:

[0040] 利用反应溅射法(Reactive Sputtering)溅射中间层压电材料AlN;在其上面旋涂正性光刻胶,且第二层掩模版PZFILM的图形被复制到光刻胶上。去除掉被曝光的部分光刻胶并湿法刻蚀不需要的压电材料AlN。

[0041] 步骤4:

[0042] 在结构表面旋涂一层负性光刻胶,且第三层掩模版PADMETAL的图形被复制到光刻胶上;去掉没有被曝光的光刻胶并用电子术蒸发的方法淀积顶层的金属叠层:20nm的铬和1 μm 的铝;最后溶解掉残余的光刻胶。

[0043] 步骤5:

[0044] 测试结构上方覆盖一层对紫外线敏感的光刻胶,并通过第四层掩模版SOI进行紫外线光照;去掉被曝光的光刻胶并反应离子刻蚀(RIE)掉不需要的氧化层和深反应离子刻蚀(DRIE)掉不需要的多晶硅直至氧化层;最后溶解掉不必要的光刻胶。

[0045] 步骤6:

[0046] 在硅片的上方覆盖一层保护层;这层保护层是由聚酰亚胺构成的,主要的作用是背面刻蚀时正面的结构不会剥落。

[0047] 步骤7:

[0048] 在硅片的背面旋涂一层光刻胶,且第五层掩模版TRENCH的图形被复制到光刻胶上。去掉被曝光的光刻胶并反应离子刻蚀(RIE)掉底层的氧化层,接着深反应离子刻蚀(DRIE)掉衬底直至氧化层,最后去掉光刻胶并用湿法氧化腐蚀工艺去掉不需要的氧化层。

[0049] 具体实施例三:

[0050] 利用测试模型200和仪器,采用谐振频率法提取悬臂梁各层材料的杨氏模量。这种杨氏模量提取步骤包括:使用仪器测量一阶谐振频率、通过解析计算得到杨氏模量。

[0051] 步骤101:使用仪器测量一阶谐振频率,包括:测量第一三层悬臂梁201的一阶谐振频率 f_1 、测量第二三层悬臂梁202的一阶谐振频率 f_2 和测量第三三层悬臂梁203的一阶谐振频率 f_3 ,具体如下:

[0052] 步骤101-1:用数字全息显微镜(DHM-R2200,瑞士Lyncée Tec SA公司)确定第一三层悬臂梁201、第二三层悬臂梁202和第三三层悬臂梁203是否挠曲以及记录挠曲幅度。具体做法是:首先将测试模型200水平摆正放置于升降台;然后根据测试需求选取合适放大倍数的显微镜物镜;通过选择合适的激光源和工作模式后,监视器中显示待测物体的图形;找到待测量的第一三层悬臂梁201、第二三层悬臂梁202和第三三层悬臂梁203并选取沿各悬臂梁长度方向的一条轮廓线,显微镜系统显示出该轮廓线路径上悬臂梁与衬底之间的高度距离,即各悬臂梁的挠曲幅度;记录并保存各悬臂梁的挠曲幅度数值。

[0053] 步骤101-2:用激光多普勒测振仪(MSV-400-M2,德国Polytech公司)对第一三层悬臂梁201、第二三层悬臂梁202和第三三层悬臂梁203进行一阶谐振频率测量。具体做法是:

首先将测试模型200平放于激光多普勒测振仪测试视场区域,将外加周期啁啾信号直接接在顶层金属极板101和底层金属极板102,第一三层悬臂梁201、第二三层悬臂梁202和第三三层悬臂梁203在外加周期啁啾信号的激励下将产生振动;由于第一三层悬臂梁201、第二三层悬臂梁202和第三三层悬臂梁203在本征频率处会产生谐振,因此在频谱上会出现峰值,峰值对应的第一个频率即分别是第一三层悬臂梁201的一阶谐振频率 f_1 、第二三层悬臂梁202的一阶谐振频率 f_2 和第三三层悬臂梁203的一阶谐振频率 f_3 。理想情况下,衬底激励的频谱应该尽可能的平缓,谐振梁在全波段范围内受到均匀的激励发生受迫振动,在本征频率附近因为选频放大作用而产生谐振,在振动频谱上形成谐振峰。环境温度下可测出第一三层悬臂梁201的一阶谐振频率 f_1 、第二三层悬臂梁202的一阶谐振频率 f_2 和第三三层悬臂梁203的一阶谐振频率 f_3 。

[0054] 步骤102:通过解析计算得到杨氏模量,具体包括如下步骤:

[0055] 步骤102-1:近似解析计算三层悬臂梁一阶谐振频率,具体如下:

[0056] 释放后保持平直状态的三层悬臂梁,其各阶谐振频率近似解析满足公式:

$$f_i = \frac{1}{2\pi} (k_{i1} l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A l^4}}, \quad \text{式中 } k_{i1} \text{ 满足关系式 } \cos(k_{i1} l) \cosh(k_{i1} l) = -1, \text{ 其中 } k_{11} = 1.875, k_{21} =$$

4.694, $k_{31} = 7.855, \dots$, 当 $i \geq 2$ 时,有近似关系 $k_{i1} = (i-1/2)\pi$ 。因此,以悬臂梁为边界条件时,第一阶谐振频率的近似解析满足公式:

$$[0057] \quad f_{1of} = \frac{1.875^2}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

[0058] 上式中,悬臂梁弯曲刚度 \overline{EI} 满足公式: $\overline{EI} = \sum_{i=1}^2 \tilde{E}_i I_i$; 悬臂梁线性密度 $\overline{\rho A}$ 满足公

$$\text{式: } \overline{\rho A} = \sum_{i=1}^2 \rho_i A_i \circ$$

[0059] 并且第 i 层压电材料薄膜在横截面上的面积关于中性轴的转动惯量 I_i 满足公式:

$$I_i = \frac{1}{3} w_i [(z_i - z_c)^3 - (z_{i-1} - z_c)^3]; \text{ 多层悬臂梁的底面 (即衬底的顶面) 在 } z \text{ 轴上位置为 } z_0, \text{ 定义 } z_0$$

$= 0$; 从下至上第 i 层的顶面在 z 轴上位置为 z_i , 满足公式: $z_i = \sum_{j=1}^i h_j$; 中性面高度 z_c 满足公式:

$$z_c = \frac{\sum_{i=1}^2 \tilde{E}_i w_i (z_i^2 - z_{i-1}^2)}{2 \sum_{i=1}^2 \tilde{E}_i w_i (z_i - z_{i-1})} \circ \text{ 式中, } w_i \text{ 为第 } i \text{ 层压电材料薄膜的宽度, } h_i \text{ 为第 } i \text{ 层压电材料薄膜的厚}$$

度, ρ_i 为第 i 层压电材料薄膜的材料密度, \tilde{E}_i 为第 i 层压电材料薄膜的等效杨氏模量; A_i 为第 i 层压电材料薄膜横截面上的面积。

[0060] 步骤102-2:提取三层悬臂梁的各层杨氏模量,具体如下:

[0061] 由三层悬臂梁一阶谐振频率的近似解析公式可知,与三层悬臂梁的长度和各层厚度有关;但是与三层悬臂梁的各层宽度无关,而是与三层悬臂梁中间层和顶层的宽度之比

有关,即第一三层悬臂梁201中间层和顶层的宽度之比 w_{21}/w_{31} 、第二三层悬臂梁202中间层和顶层的宽度之比 w_{21}/w_{32} 、第三三层悬臂梁203中间层和顶层的宽度之比 w_{22}/w_{32} 。因此,不同结构尺寸的三层悬臂梁一阶谐振频率,满足如下方程组:

$$[0062] \quad \begin{cases} f_{1cf}(\tilde{E}_1, \tilde{E}_2, \tilde{E}_3, w_1, w_{21}, w_{31}, l) = f_1 \\ f_{1cf}(\tilde{E}_1, \tilde{E}_2, \tilde{E}_3, w_1, w_{21}, w_{32}, l) = f_2 \\ f_{1cf}(\tilde{E}_1, \tilde{E}_2, \tilde{E}_3, w_1, w_{22}, w_{32}, l) = f_3 \end{cases}$$

[0063] 上式是以三层悬臂梁为边界的一阶谐振频率的近似线性解析公式,只对应一个频率值,即一阶谐振频率,因此,根据各悬臂梁经步骤101测量得到的一阶频率和结构尺寸,求解上述方程组,得到有限组关于杨氏模量的实数解和复数解,其中复数解不符合实际情况被排除;而通常适合工程应用的几组实数解中,符合材料参数通常值取值范围的、唯一一组实数解可以很明显被识别出来。

[0064] 具体实施例四:

[0065] 利用测试模型200和普通仪器,测试第一三层悬臂梁201、第二三层悬臂梁202和第三三层悬臂梁203中任意一个三层悬臂梁的尖端位移 c ,具体如下:对于释放后保持平直状态的三层悬臂梁,在其上下表面施加低频交流信号激励后,会使悬臂梁发生挠曲,用激光干涉仪(ML-10,英国Renishaw公司)对任意一个三层悬臂梁自由端(尖端)向下移动的最大位移进行测试。首先,将测试模型200放置于激光干涉仪测试视场区域下,在顶层金属极板101和底层金属极板102上接入低频交流电压,该频率远小于该悬臂梁的一阶谐振频率,以避免悬臂梁谐振带来的额外挠曲幅度;观察并记录尖端位移的测量值 c 。

[0066] 具体实施例五:

[0067] 压电薄膜材料的压电系数 d_{31} 不仅与结构尺寸和杨氏模量有关系,也跟由激励引起的挠度有关。对于多层悬臂梁,共 n 层,第 j 层为压电薄膜材料层($1 \leq j \leq n$),其它各层材料均是弹性材料。采用能量法建立该多层悬臂梁的压电模型,通过在压电薄膜的上下表面施加直流电压 V ,电压方向与极化方向平行,由于逆压电效应压电薄膜层在 x 方向会产生应变,从而使整个多层悬臂梁产生挠曲,设悬臂梁自由端向下移动的位移为 c ,对该位移进行测量并带入到模型中,即可求解出压电材料的压电系数 d_{31} 。

[0068] 由能量法构建的多层悬臂梁压电模型的解析表达式,如下:

$$[0069] \quad \frac{\pi w_j \tilde{E}_j}{4l} \cdot (Z_j^3 - Z_{j-1}^3) \cdot d_{31} \cdot e + \frac{c\pi^4}{96l^3} \sum_{i=1}^n \tilde{E}_i w_i \cdot (Z_i^3 - Z_{i-1}^3) = 0$$

[0070] 其中每层薄膜上表面距离中性轴(即 x 轴的)的高度为 $Z_i = z_i - z_c$, e 为施加在压电材料上下表面的电场强度, $e = V/h_j$ 。

[0071] 上式整理可得薄膜材料的横向压电系数的计算公式为:

$$[0072] \quad d_{31} = - \frac{c\pi^3 \sum_{i=1}^n \tilde{E}_i w_i (Z_i^3 - Z_{i-1}^3)}{24l^2 w_j \tilde{E}_j (Z_j^2 - Z_{j-1}^2) \cdot e}$$

[0073] 以上所述仅是本发明的部分实施方式,应当指出,对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明原理的前提下,还可以做出若干改进和润饰,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

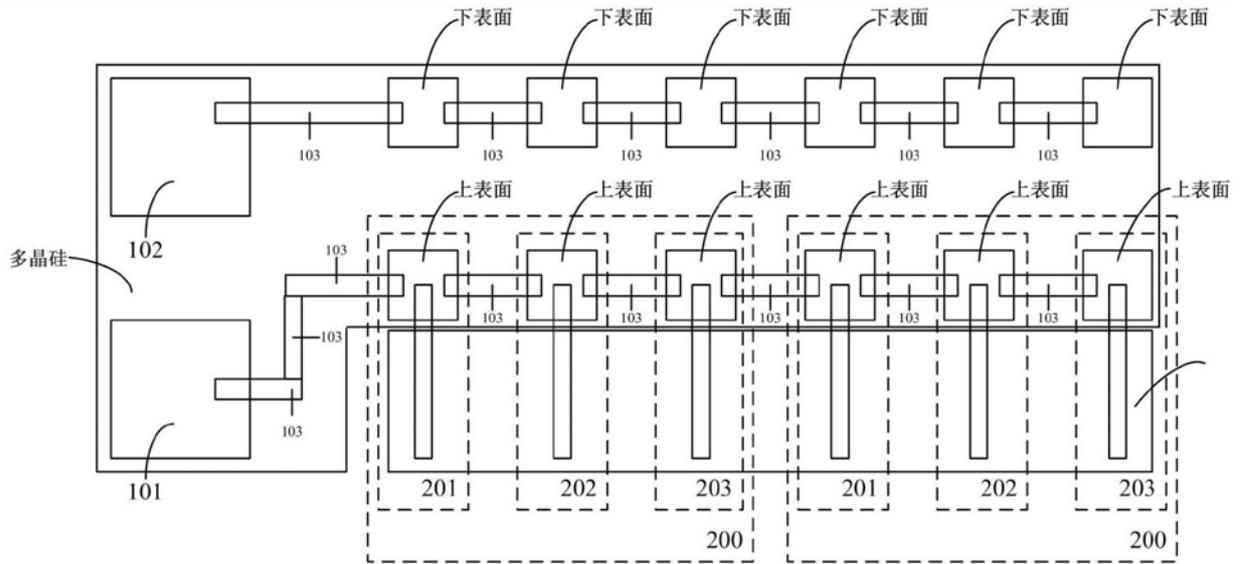


图1

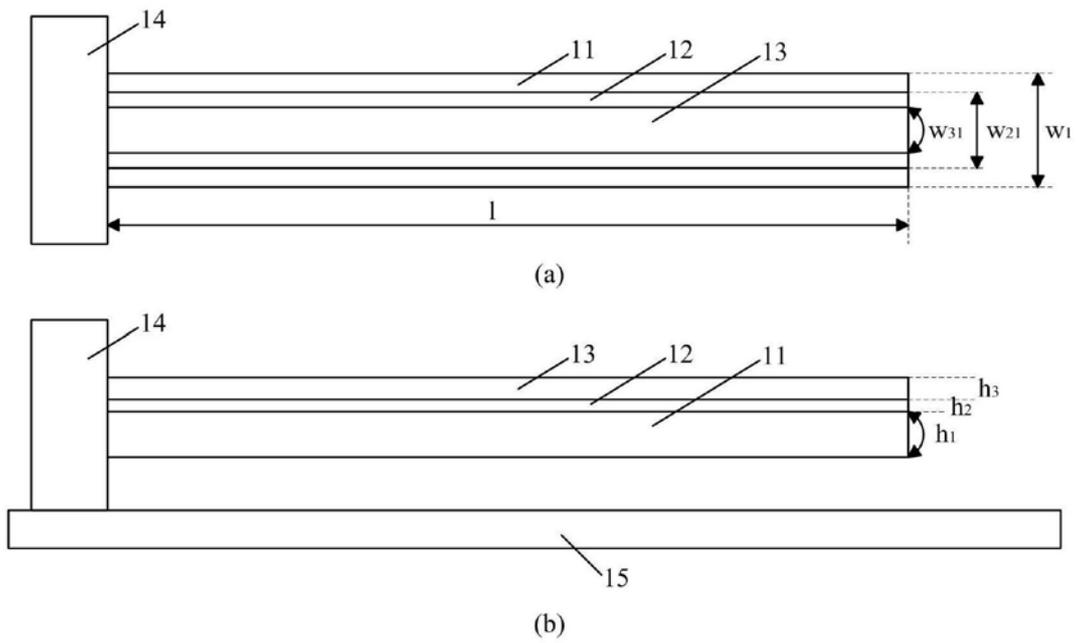


图2

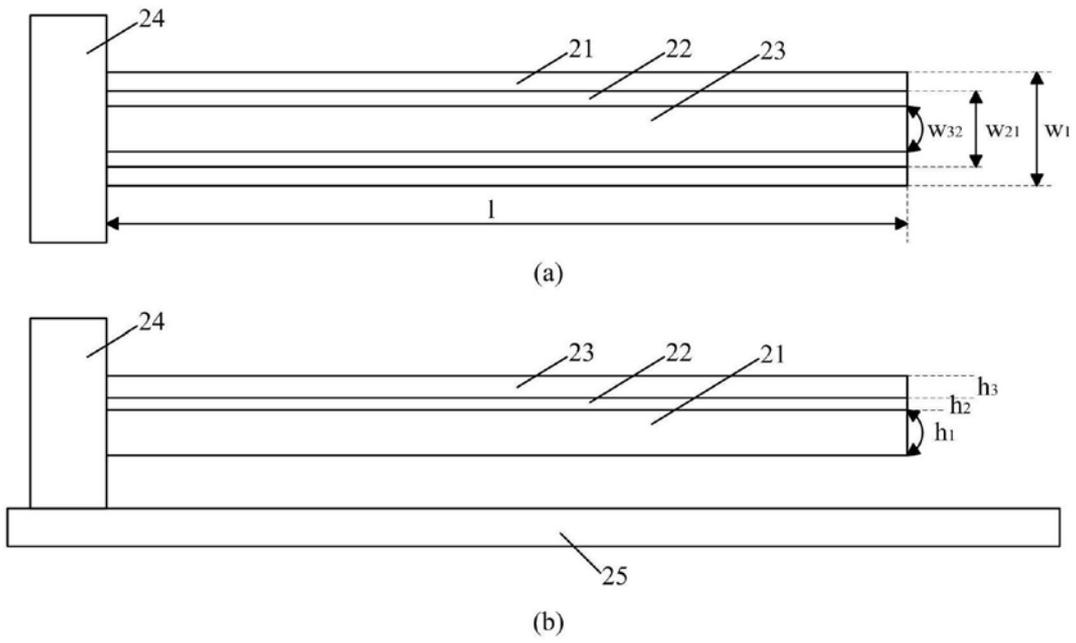


图3

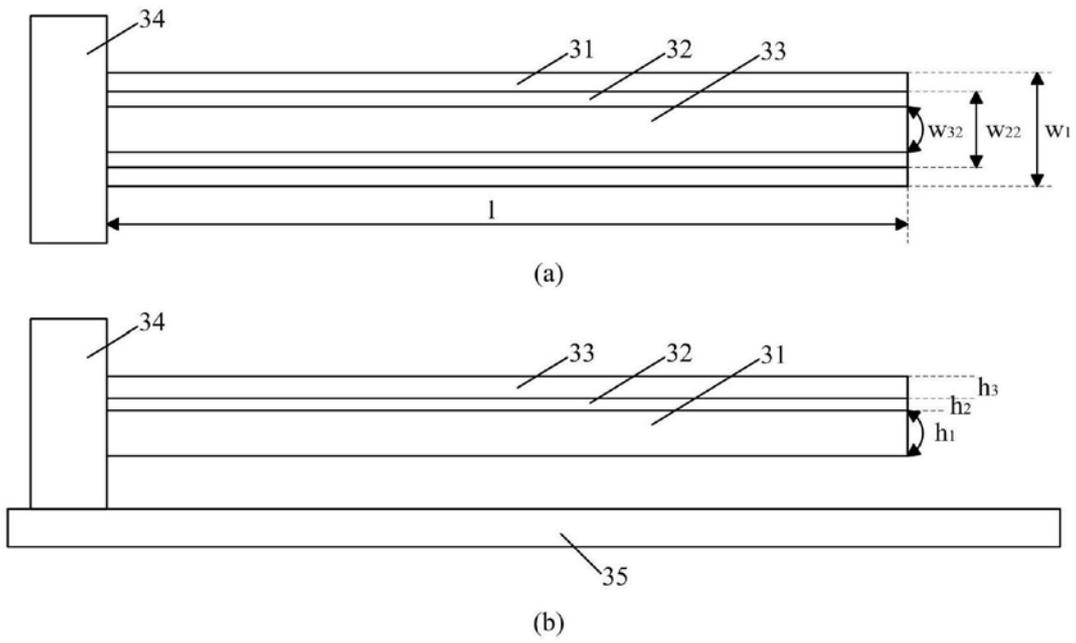


图4