



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106849739 B

(45)授权公告日 2020.09.01

(21)申请号 201611095429.9

(51)Int.CI.

(22)申请日 2016.12.01

H02N 2/00(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 106849739 A

(56)对比文件

CN 1303172 A, 2001.07.11

(43)申请公布日 2017.06.13

CN 101238598 A, 2008.08.06

(30)优先权数据

CN 101842916 A, 2010.09.22

2015-236648 2015.12.03 JP

US 2013313945 A1, 2013.11.28

(73)专利权人 精工爱普生株式会社

审查员 张玉麒

地址 日本东京都

(72)发明人 高桥智明

(74)专利代理机构 北京康信知识产权代理有限公司
代理人 田喜庆

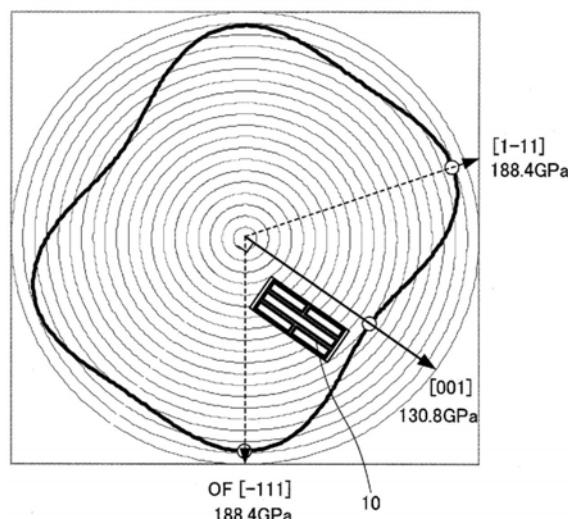
权利要求书2页 说明书13页 附图15页

(54)发明名称

马达用压电驱动装置及其制造方法、马达、
机器人以及泵

(57)摘要

本发明提供一种能够实现高输出的马达用压电驱动装置。该马达用压电驱动装置包括：基板，其具有长边方向以及与上述长边方向正交的短边方向；压电元件，其设置于上述基板上并具有第一电极、第二电极以及位于上述第一电极与上述第二电极之间的压电体；以及接触部，其安装于上述基板的上述长边方向的前端部，或者与上述基板的上述长边方向的前端部接触并且与被驱动体接触，上述基板的上述长边方向与在上述基板的面内杨氏模量最小的方向大体一致。



1. 一种马达用压电驱动装置,其特征在于,包括:

基板,其具有长边方向以及与所述长边方向正交的短边方向;

压电元件,其设置于所述基板上并具有第一电极、第二电极以及位于所述第一电极与所述第二电极之间的压电体;以及

接触部,其安装于所述基板的所述长边方向的前端部,或者与所述基板的所述长边方向的前端部接触并且与被驱动体接触,

所述基板的所述长边方向与在所述基板的面内杨氏模量最小的方向大体一致,

所述基板是{110}基板或{100}基板,

所述基板的所述长边方向与<100>方向大体一致。

2. 一种马达用压电驱动装置,其特征在于,包括:

基板,其具有长边方向以及与所述长边方向正交的短边方向;

压电元件,其设置于所述基板上,并具有第一电极、第二电极以及位于所述第一电极与所述第二电极之间的压电体;

接触部,其安装于所述基板的所述长边方向的前端部,或者与所述基板的所述长边方向的前端部接触并且与被驱动体接触,

在将所述基板的所述短边方向的切变模量设为G_{xy},将所述基板的所述长边方向的杨氏模量设为E_x,将所述基板的所述短边方向的杨氏模量设为E_y时,所述基板的所述长边方向与在所述基板的面内E_y/E_x/G_{xy}的值最大的方向大体一致,

所述基板是{110}基板或{100}基板,

所述基板的所述长边方向与<100>方向大体一致。

3. 根据权利要求1或2所述的马达用压电驱动装置,其特征在于,

所述基板是单晶硅基板。

4. 根据权利要求1或2所述的马达用压电驱动装置,其特征在于,

所述基板以及所述压电元件构成芯片,

所述芯片设置有多个,

多个所述芯片沿所述基板的厚度方向排列。

5. 一种马达用压电驱动装置的制造方法,其特征在于,包括:

在晶片上形成多个压电元件的工序,其中,该压电元件具有第一电极、第二电极以及位于所述第一电极与所述第二电极之间的压电体;

在所述晶片上与多个压电元件相对应地形成多个芯片区域的工序,其中,该芯片区域具有长边方向以及与所述长边方向正交的短边方向;

从所述晶片提取出所述芯片区域来获取芯片的工序;以及

在所述芯片的所述长边方向的前端部安装与被驱动体接触的接触部的工序,或者以与所述芯片的所述长边方向的前端部接触的方式配置与被驱动体接触的接触部的工序,

所述芯片区域形成为所述芯片区域的所述长边方向与在所述芯片区域的面内杨氏模量最小的方向大体一致,

所述晶片是{110}晶片或{100}晶片,

所述芯片区域形成为所述芯片区域的所述长边方向与<100>方向大体一致。

6. 一种马达用压电驱动装置的制造方法,其特征在于,包括:

在晶片上形成多个压电元件的工序,其中,该压电元件具有第一电极、第二电极以及位于所述第一电极与所述第二电极之间的压电体;

在所述晶片上与多个压电元件相对应地形成多个芯片区域的工序,其中,该芯片区域具有长边方向以及与所述长边方向正交的短边方向;

从所述晶片提取出所述芯片区域来获取芯片的工序;

在所述芯片的所述长边方向的前端部安装与被驱动体接触的接触部的工序,或者以与所述芯片的所述长边方向的前端部接触的方式配置与被驱动体接触的接触部的工序,

在将所述芯片区域的所述短边方向的切变模量设为G_{xy},将所述芯片区域的所述长边方向的杨氏模量设为E_x,将所述芯片区域的所述短边方向的杨氏模量设为E_y时,所述芯片区域形成为所述芯片区域的所述长边方向与在所述芯片区域的面内E_y/E_x/G_{xy}的值最大的方向大体一致,

所述晶片是{110}晶片或{100}晶片,

所述芯片区域形成为所述芯片区域的所述长边方向与<100>方向大体一致。

7.根据权利要求5或6所述的马达用压电驱动装置的制造方法,其特征在于,

所述晶片是单晶硅晶片。

8.根据权利要求5或6所述的马达用压电驱动装置的制造方法,其特征在于,

包括使多个所述芯片沿所述芯片区域的厚度方向排列的工序。

9.一种马达,其特征在于,包括:

权利要求1或2所述的马达用压电驱动装置;以及

转子,其通过所述马达用压电驱动装置而旋转。

10.一种机器人,其特征在于,包括:

多个连杆部;

关节部,其连接多个所述连杆部;以及

权利要求1或2所述的马达用压电驱动装置,其使多个所述连杆部在所述关节部转动。

11.一种泵,其特征在于,包括:

权利要求1或2所述的马达用压电驱动装置;

管,其输送液体;以及

多个指状物,它们通过所述马达用压电驱动装置的驱动来封闭所述管。

马达用压电驱动装置及其制造方法、马达、机器人以及泵

技术领域

[0001] 本发明涉及马达用压电驱动装置及其制造方法、马达、机器人以及泵。

背景技术

[0002] 利用压电元件使振动体振动从而驱动被驱动体的压电致动器(马达用压电驱动装置)由于不需要磁铁、线圈而被利用于各种领域(例如参照专利文献1)。在这样的压电驱动装置中,通常利用具备块状的压电体的压电元件(块压电元件)(例如参照专利文献2)。

[0003] 另一方面,作为压电元件,已知有具备薄膜状的压电体的元件(薄膜压电元件)。薄膜压电元件主要利用于在喷墨打印机的头部进行墨的射出。

[0004] 专利文献1:日本特开2004-320979号公报

[0005] 专利文献2:日本特开2008-227123号公报

[0006] 若将上述那样的薄膜压电元件用于压电驱动装置,则能够使压电驱动装置或由其驱动的设备小型化。然而,在使用了这样的薄膜压电元件的压电驱动装置中,存在由于是小型而输出不足的情况。

发明内容

[0007] 本发明的几个方式所涉及的一个目的在于提供一种能够实现高输出的马达用压电驱动装置。另外,本发明的几个方式所涉及的一个目的在于提供一种能够实现高输出的马达用压电驱动装置的制造方法。并且,本发明的几个方式所涉及的一个目的在于提供一种包含上述的马达用压电驱动装置的马达、机器人以及泵。

[0008] 本发明是为了解决上述的课题的至少一部分而完成的,能够作为以下的方式或者应用例来实现。

[0009] 应用例1

[0010] 本发明所涉及的马达用压电驱动装置的一方式包括:

[0011] 基板,其具有长边方向以及与上述长边方向正交的短边方向;

[0012] 压电元件,其设置于上述基板上并具有第一电极、第二电极以及位于上述第一电极与上述第二电极之间的压电体;以及

[0013] 接触部,其安装于上述基板的上述长边方向的前端部,或者与上述基板的上述长边方向的前端部接触,并且与被驱动体接触,

[0014] 上述基板的上述长边方向与在上述基板的面内杨氏模量最小的方向大体一致。

[0015] 在这样的马达用压电驱动装置中,例如在电压施加于压电元件的情况下,能够增大基板的弯曲振动的位移量(振幅),并能够实现高输出(参照后面描述的“3.实验”)。

[0016] 应用例2

[0017] 本发明所涉及的马达用压电驱动装置的一方式包括:

[0018] 基板,其具有长边方向以及与上述长边方向正交的短边方向;

[0019] 压电元件,其设置于上述基板上并具有第一电极、第二电极以及位于上述第一电

极与上述第二电极之间的压电体；以及

[0020] 接触部，其安装于上述基板的上述长边方向的前端部，或者与上述基板的上述长边方向的前端部接触，并且与被驱动体接触，

[0021] 在将上述基板的上述短边方向的切变模量设为G_{xy}，将上述基板的上述长边方向的杨氏模量设为E_x，将上述基板的上述短边方向的杨氏模量设为E_y时，上述基板的上述长边方向与在上述基板的面内E_y/E_x/G_{xy}的值最大的方向大体一致。

[0022] 在这样的马达用压电驱动装置中，例如在电压施加于压电元件的情况下，能够增大基板的弯曲振动的位移量，并能够实现高输出（参照后面描述的“3. 实验”）。

[0023] 应用例3

[0024] 在应用例1或2中，

[0025] 上述基板可以是单晶硅基板。

[0026] 在这样的马达用压电驱动装置中能够实现高输出。

[0027] 应用例4

[0028] 在应用例3中，上述基板可以是{110}基板，

[0029] 上述基板的上述长边方向与<100>方向大体一致。

[0030] 在这样的马达用压电驱动装置中能够实现高输出。

[0031] 应用例5

[0032] 在应用例3中，上述基板可以是{100}基板，

[0033] 上述基板的上述长边方向与<100>方向大体一致。

[0034] 在这样的马达用压电驱动装置中能够实现高输出。

[0035] 应用例6

[0036] 在应用例1～5的任意一例中，上述基板以及上述压电元件构成芯片，

[0037] 上述芯片设置有多个，

[0038] 多个上述芯片沿上述基板的厚度方向排列。

[0039] 在这样的马达用压电驱动装置中能够实现更高输出。

[0040] 应用例7

[0041] 本发明所涉及的马达用压电驱动装置的制造方法的一方式包括：

[0042] 在晶片上形成多个压电元件的工序，其中，该压电元件具有第一电极、第二电极以及位于上述第一电极与上述第二电极之间的压电体；

[0043] 在上述晶片上与多个压电元件相对应地形成多个芯片区域的工序，其中，该芯片区域具有长边方向以及与上述长边方向正交的短边方向；

[0044] 从上述晶片提取出上述芯片区域来获取芯片的工序；以及

[0045] 在上述芯片的上述长边方向的前端部安装与被驱动体接触的接触部的工序，或者以与上述芯片的上述长边方向的前端部接触的方式配置与被驱动体接触的接触部的工序，

[0046] 上述芯片区域被形成为上述芯片区域的上述长边方向与在上述芯片区域的面内杨氏模量最小的方向大体一致。

[0047] 根据这样的马达用压电驱动装置的制造方法，能够制造可实现高输出的马达用压电驱动装置。

[0048] 应用例8

[0049] 本发明所涉及的马达用压电驱动装置的制造方法的一方式包括：

[0050] 在晶片上形成多个压电元件的工序，其中，该压电元件具有第一电极、第二电极以及位于上述第一电极与上述第二电极之间的压电体；

[0051] 在上述晶片上与多个压电元件相对应地形成多个芯片区域的工序，其中，该芯片区域具有长边方向以及与上述长边方向正交的短边方向；

[0052] 从上述晶片提取出上述芯片区域来获取芯片的工序；以及

[0053] 在上述芯片的上述长边方向的前端部安装与被驱动体接触的接触部的工序，或者以与上述芯片的上述长边方向的前端部接触的方式配置与被驱动体接触的接触部的工序，

[0054] 在将上述芯片区域的上述短边方向的切变模量设为 G_{xy} ，将上述芯片区域的上述长边方向的杨氏模量设为 E_x ，将上述芯片区域的上述短边方向的杨氏模量设为 E_y 时，

[0055] 上述芯片区域被形成为上述芯片区域的上述长边方向与上述芯片区域的面内 $E_y/E_x/G_{xy}$ 的值最大的方向大体一致。

[0056] 根据这样的马达用压电驱动装置的制造方法，能够制造可实现高输出的马达用压电驱动装置。

[0057] 应用例9

[0058] 在应用例7或8中，上述晶片可以是单晶硅晶片。

[0059] 根据这样的马达用压电驱动装置的制造方法，能够制造可实现高输出的马达用压电驱动装置。

[0060] [应用例10]

[0061] 在应用例9中，上述晶片可以是{110}晶片，

[0062] 上述芯片区域被形成为上述芯片区域的上述长边方向与<100>方向大体一致。

[0063] 在这样的马达用压电驱动装置的制造方法，能够制造可实现高输出的马达用压电驱动装置。

[0064] 应用例11

[0065] 在应用例9中，上述晶片可以是{100}晶片，

[0066] 上述芯片区域被形成为上述芯片区域的上述长边方向与<100>方向大体一致。

[0067] 根据这样的马达用压电驱动装置的制造方法，能够制造可实现高输出的马达用压电驱动装置。

[0068] 应用例12

[0069] 在应用例7~11的任意一例中，马达用压电驱动装置的制造方法包括使多个上述芯片沿上述芯片区域的厚度方向排列的工序。

[0070] 根据这样的马达用压电驱动装置的制造方法，能够制造可实现更高输出的马达用压电驱动装置。

[0071] 应用例13

[0072] 本发明所涉及的马达的一方式包括：

[0073] 应用例1~6的任意一例所述的马达用压电驱动装置；以及

[0074] 转子，其通过上述压马达用电驱动装置而旋转。

[0075] 在这样的马达中能够包含本发明所涉及的马达用压电驱动装置。

[0076] 应用例14

- [0077] 本发明所涉及的机器人的一方式包括：
- [0078] 多个连杆部；
- [0079] 关节部，其连接多个上述连杆部连接；
- [0080] 应用例1～6的任意一例所述的马达用压电驱动装置，其使多个上述连杆部在上述关节部转动。
- [0081] 在这样的机器人中能够包含本发明所涉及的马达用压电驱动装置。
- [0082] 应用例15
- [0083] 本发明所涉及的泵的一方式包括：
- [0084] 应用例1～6的任意一例所述的马达用压电驱动装置；
- [0085] 管，其输送液体；以及
- [0086] 多个指状物，它们通过上述马达用压电驱动装置的驱动来封闭上述管。
- [0087] 在这样的泵中能够包含本发明所涉及的马达用压电驱动装置。

附图说明

- [0088] 图1是示意性地表示本实施方式所涉及的马达用压电驱动装置的俯视图。
- [0089] 图2是示意性地表示本实施方式所涉及的马达用压电驱动装置的剖视图。
- [0090] 图3是用于说明基板的长边方向的俯视图。
- [0091] 图4是用于说明基板的长边方向的俯视图。
- [0092] 图5是表示用于说明本实施方式所涉及的马达用压电驱动装置的等效电路的图。
- [0093] 图6是用于说明本实施方式所涉及的马达用压电驱动装置的动作的图。
- [0094] 图7是用于说明本实施方式所涉及的马达用压电驱动装置的制造方法的流程图。
- [0095] 图8是示意性地表示本实施方式所涉及的马达用压电驱动装置的制造工序的俯视图。
- [0096] 图9是示意性地表示本实施方式所涉及的马达用压电驱动装置的制造工序的俯视图。
- [0097] 图10是用于说明实验例所使用的模型的立体图。
- [0098] 图11是表示晶体取向和各参数的表格。
- [0099] 图12是表示基板的长边方向的杨氏模量Ex与基板的谐振频率F的关系的图表。
- [0100] 图13是表示基板的长边方向的杨氏模量Ex与基板的纵向振动的位移量的关系的图表。
- [0101] 图14是表示Ey/Ex值与基板的纵向振动的位移量的关系的图表。
- [0102] 图15是表示基板的短边方向的切变模量Gxy与基板的弯曲振动的位移量的关系的图表。
- [0103] 图16是表示Ey/Ex/Gxy值与基板的弯曲振动的位移量的关系的图表。
- [0104] 图17是用于说明基板的振动模式的图。
- [0105] 图18是用于说明压电元件的变形模式的图。
- [0106] 图19是表示在计算杨氏模量时使用的硅的基本常量的表格。
- [0107] 图20是表示硅晶片中的杨氏模量的面内的分布的图。
- [0108] 图21是表示硅晶片中的杨氏模量的面内的分布的图。

- [0109] 图22是表示硅晶片中的Ey/Ex/Gxy值的面内的分布的图。
- [0110] 图23是表示硅晶片中的Ey/Ex/Gxy值的面内的分布的图。
- [0111] 图24是示意性地表示本实施方式的变形例所涉及的马达用压电驱动装置的剖视图。
- [0112] 图25是用于说明本实施方式所涉及的机器人的图。
- [0113] 图26是用于说明本实施方式所涉及的机器人的手腕部分的图。
- [0114] 图27是用于说明本实施方式所涉及的泵的图。

具体实施方式

[0115] 以下,利用附图详细地对本发明的优选的实施方式进行说明。此外,以下说明的实施方式并不是不恰当地限定权利要求书所记载的本发明的内容。并且,以下所说明的全部结构并不一定是本发明的必要结构要件。

- [0116] 1. 马达用压电驱动装置

[0117] 首先,参照附图对本实施方式所涉及的马达用压电驱动装置进行说明。图1是示意性地表示本实施方式所涉及的马达用压电驱动装置100的俯视图。图2是示意性地表示本实施方式所涉及的马达用压电驱动装置100的图1的II—I线剖面。

[0118] 如图1及图2所示,马达用压电驱动装置100包括基板10、固定部12、第一连接部14、第二连接部16、接触部20以及压电元件30。基板10、固定部12、连接部14、16以及压电元件30构成芯片102。

[0119] 基板10在面内具有杨氏模量的各向异性。基板10例如是单晶硅基板。基板10也可以是{110}基板。即,基板10的面方位可以是{110}。{110}基板例如是在{110}面上被切出的基板。此处,{110}表示与(110)等效的面。因此,基板10例如既可以是(110)基板,也可以是(-110)基板。此外,在本说明书中,对于单位晶格的负的面方位或负的方向的“1bar”表述为“-1”。并且,基板10在面内具有杨氏模量的各向异性即可,其材质不做特别限定,可以是化合物半导体基板(例如GaAs基板)。

[0120] 基板10可以是{100}基板。即,基板10的面方位可以是{100}。{100}基板例如是在{100}面上被切出的基板。此处,{100}表示与(100)等效的面。因此,基板10例如既可以是(100)基板,也可以是(001)基板。

[0121] 在俯视观察时(从基板10的厚度方向观察),基板10是具有长边方向以及与长边方向正交的短边方向的形状。在图示的例子中,基板10的平面形状(从基板10的厚度方向观察的形状)是长方形。长边方向是长边延伸的方向,短边方向是短边延伸的方向。

[0122] 在基板10上设置有压电元件30,基板10能够通过压电元件30的变形而振动。固定部12经由连接部14、16来支承基板10。固定部12例如固定于外部部件(未图示)。在图示的例子中,连接部14、16从基板10的长边方向的中央部向基板10的短边方向延伸突出,并与固定部12连接。

[0123] 接触部20设置于基板10的长边方向的前端部11。在俯视观察时,前端部11由基板10的短边构成。接触部20是从前端部11突出的突出部。在图示的例子中,接触部20经由粘合剂22安装(粘合)于前端部11。此外,虽然未图示,但可以在前端部11设置有凹部,且接触部20被设置为与该凹部嵌合。在该情况下,接触部20可以与前端部11接触。在图示的例子中,

接触部20的形状是立方体,但也可以是球状。

[0124] 接触部20是与被驱动部件(具体而言,后面描述的图6所示的转子4)接触,并将基板10的运动传递至被驱动部件的部件。接触部20的材质例如是陶瓷(具体而言为氧化铝(Al_2O_3)、氧化锆(ZrO_2)、氮化硅(Si_3N)或者它们的混合物等)。转子4的形状例如为圆柱状、球状。

[0125] 如图2所示,压电元件30设置于基板10上。此外,虽然未图示,但也可以在基板10与压电元件30之间设置绝缘层。在该情况下,压电元件30经由绝缘层设置于基板10上。绝缘层可以由设置于基板10上的氧化硅层和设置于氧化硅层上的氧化锆层构成。压电元件30具有第一电极32、压电体层(压电体)34以及第二电极36。

[0126] 第一电极32设置于基板10上。在图1所示的例子中,第一电极32的平面形状为长方形。第一电极32可以由设置于基板10上的铱层和设置于铱层上的白金层构成。铱层的厚度例如为5nm以上100nm以下。白金层的厚度例如为50nm以上300nm以下。此外,第一电极32也可以是由Ti、Pt、Ta、Ir、Sr、In、Sn、Au、Al、Fe、Cr、Ni、Cu等构成的金属层、或者是混合或层叠这些金属的两种以上而成的。第一电极32是用于对压电体层34施加电压的一个电极。

[0127] 压电体层34设置于第一电极32上。压电体层34位于第一电极32与第二电极36之间。在图示的例子中,压电体层34的平面形状为长方形。压电体层34的厚度例如为50nm以上20 μm 以下,优选为1 μm 以上7 μm 以下。这样一来,压电元件30为薄膜压电元件。若压电体层34的厚度小于50nm,则存在马达用压电驱动装置100的输出变小的情况。具体而言,若想要提高输出来提高针对压电体层34的施加电压,则存在压电体层34发生绝缘击穿的情况。若压电体层34的厚度大于20 μm ,则存在压电体层34产生裂缝的情况。

[0128] 使用钙钛矿型氧化物的压电材料作为压电体层34。具体而言,压电体层34的材质例如为锆钛酸铅($Pb(Zr,Ti)O_3$:PZT)、铌酸锆钛酸铅($Pb(Zr,Ti,Nb)O_3$:PZTN)。压电体层34通过由电极32、36施加电压从而能够变形(伸缩)。

[0129] 第二电极36设置于压电体层34上。在图示的例子中,第二电极36的平面形状为长方形。第二电极36可以由设置于压电体层34上的紧贴层和设置于紧贴层上的导电层构成。紧贴层的厚度例如为10nm以上100nm以下。紧贴层例如为TiW层、Ti层、Cr层、NiCr层或它们的层叠体。导电层的厚度例如为1 μm 以上10 μm 以下。导电层例如为Cu层、Au层、Al层或它们的层叠体。第二电极36是用于对压电体层34施加电压的另一个电极。

[0130] 压电元件30设置有多个。在图1所示的例子中,压电元件30设置有5个(压电元件30a、30b、30c、30d、30e)。在俯视观察时,例如压电元件30a~30d的面积相同,压电元件30e具有比压电元件30a~30d大的面积。压电元件30e在基板10的短边方向的中央部沿着基板10的长边方向设置。压电元件30a、30b、30c、30d设置于基板10的四角。在图示的例子中,在压电元件30a~30e中,第一电极32被设置为一个连续的导电层。

[0131] 此外,虽然未图示,但马达用压电驱动装置100可以具有设置为覆盖压电元件30的绝缘层、与第一电极32电连接的第一布线层以及与第二电极36电连接的第二布线层。

[0132] 此处,图3及图4是用于说明基板10的长边方向A的俯视图。此外,为了方便,在图3、图4以及后面描述的图6中省略固定部12以及连接部14、16的图示。

[0133] 如图3及图4所示,通过在晶片104形成多个芯片区域10a从而能够从1片晶片104获取多个芯片102。在图示的例子中,芯片区域10a设置有8个,但其数量不做特别限定。此外,

芯片区域10a是成为基板10的区域。芯片102包括基板10、压电元件30而构成。

[0134] 图3示出晶片104是{110}晶片的情况。即,基板10是{110}基板。图4示出晶片104是{100}晶片的情况。即,基板10是{100}基板。此外,在图3及图4中,“OF”是指定向平面(Orientation Flat)。

[0135] 如图3所示,在晶片104是{110}晶片的情况下,成为基板10的芯片区域10a的长边方向A与<100>方向(方位)大体一致。在图示的例子中,长边方向A与<100>方向完全一致。此处,<100>方向表示与[100]方向等效的方向。因此,长边方向A例如与[100]方向、[010]方向、[-100]方向、[0-10]方向、[001]方向或者[00-1]方向大体一致。具体而言,在晶片104是(110)晶片的情况下,长边方向A是[001]方向。此外,在图示的例子中,定向平面位于<111>方向(例如,在晶片104是(110)晶片的情况下位于[-111]方向)。

[0136] 此处,所谓“方向 α 与方向 β 大体一致”是指与方向 α 平行的第一轴的相对于与方向 β 平行的第二轴的倾斜角 θ 在20°以内,优选为15°以内,更加优选为5°以内。

[0137] 如图4所示,在晶片104是{100}晶片的情况下,成为基板10的芯片区域10a的长边方向A与<100>方向大体一致。在图示的例子中,长边方向A与<100>方向完全一致。具体而言,在晶片104是(001)晶片的情况下,长边方向A是[100]方向。此外,在图示的例子中,定向平面位于<110>方向(例如,在晶片104是(001)晶片的情况下,位于[110]方向)。

[0138] 在基板10是{110}基板或{100}基板的情况下,<100>方向是在基板10的面内杨氏模量最小的方向(参照后面描述的“3.实验”)。另外,在将基板10的短边方向B的切变模量设为 G_{xy} ,将基板10的长边方向A的杨氏模量设为 E_x ,将基板10的短边方向B的杨氏模量设为 E_y 时,<100>方向是在基板10的面内 $E_y/E_x/G_{xy}$ 最大的方向(参照后面描述的“3.实验”)。

[0139] 图5是表示用于说明马达用压电驱动装置100的等效电路的图。压电元件30被分为三组。第一组具有两个压电元件30a、30d。第二组具有两个压电元件30b、30c。第三组只具有一个压电元件30e。如图5所示,第一组的压电元件30a、30d相互并联连接,并与驱动电路110连接。第二组的压电元件30b、30c相互并联连接,并与驱动电路110连接。第三组的压电元件30e单独与驱动电路110连接。

[0140] 驱动电路110向5个压电元件30a、30b、30c、30d、30e中的规定的压电元件,例如,压电元件30a、30d、30e的第一电极32与第二电极36之间施加周期性变化的交流电压或者脉动电压。由此,马达用压电驱动装置100能够使基板10超声波振动,从而使与接触部20接触的转子(被驱动部件)向规定的旋转方向旋转。此处,所谓“脉动电压”,是指向交流电压施加了DC偏移的电压,脉动电压的电压(电场)的朝向是从一个电极朝向另一个电极的单向。

[0141] 此外,相比从第一电极32朝向第二电极36,优选电场的朝向从第二电极36朝向第一电极32。另外,通过向压电元件30b、30c、30e的电极32、36之间施加交流电压或脉动电压,从而能够使与接触部20接触的转子向相反方向旋转。

[0142] 图6是用于说明马达用压电驱动装置100的基板10的动作的图。如图6所示,马达用压电驱动装置100的接触部20与作为被驱动部件的转子4的外周接触。驱动电路110向压电元件30a、30d的电极32、36之间施加交流电压或脉动电压。由此,压电元件30a、30d沿箭头x的方向伸缩。据此,基板10在基板10的平面内弯曲振动而呈曲折形状(S字形状)变形。进一步,驱动电路110向压电元件30e的电极32、36之间施加交流电压或脉动电压。由此,压电元件30e沿箭头y的方向伸缩。由此,基板10在基板10的平面内纵向振动。通过上述那样基板10

的弯曲振动以及纵向振动,接触部20如箭头z那样进行椭圆运动。其结果为,转子4绕中心4a向规定的方向R(在图示的例子中为顺时针方向)旋转。

[0143] 此外,在驱动电路110向压电元件30b、30c、30e的电极32、36之间施加交流电压或脉动电压情况下,转子4向与方向R相反方向(逆时针方向)旋转。

[0144] 另外,优选基板10的弯曲振动的谐振频率与纵向振动的谐振频率相同。由此,马达用压电驱动装置100能够使转子4高效地旋转。

[0145] 如图6所示,本实施方式所涉及的马达120包括本发明所涉及的马达用压电驱动装置(在图示的例子中为马达用压电驱动装置100)以及通过马达用压电驱动装置100而旋转的转子4。转子4的材质例如是陶瓷。在图示的例子中,转子4的形状为圆柱状。

[0146] 马达用压电驱动装置100例如具有以下的特征。

[0147] 在马达用压电驱动装置100中,基板10的长边方向与在基板10的面内杨氏模量最小的方向大体一致。因此,在马达用压电驱动装置100中,例如在电压施加于压电元件30的情况下,能够增大基板10的弯曲振动的位移量(振幅),并能够实现高输出(参照后面描述的“3.实验”)。由此,在马达用压电驱动装置100中,例如,能够提高效率(输出/针对压电元件30的施加电压)。

[0148] 在马达用压电驱动装置100中,基板10的长边方向与在基板10的面内Ey/Ex/Gxy的值最大的方向大体一致。因此,在马达用压电驱动装置100中,例如在电压施加于压电元件30的情况下,能够增大基板10的弯曲振动的位移量,并能够实现高输出(参照后面描述的“3.实验”)。由此,在马达用压电驱动装置100中,例如,能够提高效率。

[0149] 此外,作为在硅基板上设置有压电元件的结构,例如,假定了喷墨打印机所使用的液体喷射头。但是,在液体喷射头的情况下,不使用硅基板作为通过压电元件振动的振动体,在压电元件的正下方不存在硅基板。因此,在液体喷射头中,存在位于压电元件的正下方的部件的厚度较小,该部件因应力等而弯曲的情况。由此,存在压电体层产生裂缝的情况。与此相对,在马达用压电驱动装置中,由于在压电元件的正下方存在较厚的硅基板(例如厚度100μm左右),因此难以弯曲,从而能够抑制压电体层产生裂缝。

[0150] 2. 马达用压电驱动装置的制造方法

[0151] 接下来,参照附图对本实施方式所涉及的马达用压电驱动装置的制造方法进行说明。图7是用于说明本实施方式所涉及的马达用压电驱动装置100的制造方法的流程图。图8以及图9是示意性地表示本实施方式所涉及的马达用压电驱动装置100的制造工序的俯视图。

[0152] 如图8所示,在晶片104上形成多个压电元件30(S1)。具体而言,首先,在晶片104上形成第一电极32。第一电极32例如由通过溅射法、CVD(Chemical Vapor Deposition:化学气相沉积)法、真空蒸镀法等进行的成膜、以及图案形成(通过光刻以及蚀刻进行的图案形成)来形成。晶片104例如是单晶硅晶片。

[0153] 接下来,在第一电极32上形成压电体层34。压电体层34例如在重复进行了利用液相法的前驱体层的形成和该前驱体层的结晶化之后,通过图案形成来形成。所谓液相法是指使用包含薄膜(压电体层)的构成材料的原料液来使薄膜材料成膜的方法,具体而言,是溶胶-凝胶法、MOD(Metal Organic Deposition:有机金属沉积)法等。结晶化在氧环境中例如通过700℃~800℃的热处理来进行。

[0154] 接下来,在压电体层34上形成第二电极36。第二电极36例如通过与第一电极32相同的方法来形成。此外,虽然未图示,但第二电极36的图案形成与压电体层34的图案形成可以作为相同的工序来进行。

[0155] 根据以上的工序,能够在晶片104上形成多个压电元件30。

[0156] 如图9所示,在晶片104形成具有长边方向以及与长边方向正交的短边方向的芯片区域10a(S2)。芯片区域10a例如通过对晶片104进行图案形成,从而与多个压电元件30相对应地形成多个。即,以在一个芯片区域10a上设置一个压电元件30的方式对晶片104进行图案形成。具体而言,对晶片104进行图案形成来形成成为基板10的芯片区域10a、成为固定部12以及连接部14、16的周边区域12a、经由梁部108支承芯片区域10a以及周边区域12a的支承部106。在图示的例子中,虽然对于一个芯片区域10a设置有两个梁部108,但梁部108的数量不做特别限定。图案形成例如通过光刻以及蚀刻来进行。

[0157] 在晶片104是{110}晶片的情况下,芯片区域10a被形成为芯片区域10a的长边方向与<100>方向大体一致。在晶片104是{100}晶片的情况下,芯片区域10a被形成为芯片区域10a的长边方向与<100>方向大体一致。

[0158] 如图1所示,从晶片104提取出芯片区域10a以及周边区域12a,来获取芯片102(S3)。具体而言,切断图9所示的梁部108(例如折断),从支承部106分离出芯片区域10a以及周边区域12a。根据本工序,能够获取多个芯片102。

[0159] 接下来,在基板10的长边方向(芯片区域10a的长边方向)的前端部11安装接触部20(S4)。接触部20例如经由粘合剂22安装于前端部11。此外,也可以在前端部11设置凹部,并以与该凹部接触的方式配置接触部20。

[0160] 根据以上的工序,能够制造马达用压电驱动装置100。

[0161] 在马达用压电驱动装置100的制造方法中,能够制造可以实现高输出的马达用压电驱动装置100。

[0162] 3. 实验例

[0163] 以下示出实验例来更具体地对本发明进行说明。此外,本发明并不被以下的实验例以任何方式限定。

[0164] 3.1. 关于晶体取向和各参数的模拟

[0165] 使用图10所示那样的模型M,进行了利用有限元法的模拟。模型M具有基板K、设置于基板K的长边方向的前端部的接触部S、以及设置于基板K的长边方向的中央部的第一连接部T1以及第二连接部T2。将基板K的长边方向的长度固定为3.5mm。

[0166] 在本模拟中,改变基板K的面方位、长边方向的方位以及短边方向的方位,来求出基板K的长边方向的杨氏模量Ex、基板K的短边方向的杨氏模量Ey、基板K的短边方向的切变模量Gxy、Ey/Ex/Gxy值、基板K的泊松比vxy、基板K的谐振频率F、基板K的短边方向的长度W、基板K的纵向振动的位移量的比率(纵向位移比率)、基板K的弯曲振动的位移量的比率(弯曲位移比率)、基板K的纵向振动的位移量乘以横向振动的位移量得到的值的位移比率(纵向×弯曲位移比率)。

[0167] 基板K的短边方向的切变模量Gxy通过下述公式(1)来求出。

[0168]
$$Gxy = (Ex \times Ey) / (Ex + Ey + 2 \times Ey \times vxy) \cdots (1)$$

[0169] 由于基板K的长边方向的长度固定为3.5mm,因此基板K的纵向振动的谐振频率由

基板K的面方位以及长边方向的方位决定。因此,将基板K的短边方向的长度调整为基板K的弯曲振动的谐振频率与基板K的纵向振动的谐振频率相同。

[0170] 对于位移比率而言,将基板K的面方位设为(110)、将长边方向设为<111>、将短边方向设为<112>的模型的值作为100%,求出针对该模型的位移比率。

[0171] 图11是表示在模型M1~M7中晶体取向和各参数的表格。图12是表示基板K的长边方向的杨氏模量Ex与基板K的谐振频率F的关系的图表。图13是表示基板K的长边方向的杨氏模量Ex与基板K的纵向振动的位移量(纵向位移量)的关系的图表。图14是表示Ey/Ex值与基板K的纵向位移量的关系的图表。图15是表示基板K的短边方向的切变模量Gxy与基板K的弯曲振动的位移量(弯曲位移量)的关系的图表。图16是表示Ey/Ex/Gxy值与基板K的弯曲位移量的关系的图表。此外,在图12~图16中,纵向位移量以及弯曲位移量是在假定了对压电元件施加了1V的电压时的情况下的位移量(振幅)。

[0172] 如图11所示,对于模型M3、M5而言,弯曲位移比率为170%以上,纵向×弯曲位移比率为230%以上,弯曲位移比率以及纵向×弯曲位移比率都是非常大的值。在压电驱动装置中,若弯曲位移比率或纵向×弯曲位移比率大则能够实现高输出。因此,可知通过将基板K的面方位设为(110)或(100),将基板K的长边方向设为<100>,从而实现了压电驱动装置的高输出。

[0173] 并且,虽然基本上切变模量Gxy越小,弯曲位移越大,但根据图15及图16可知,与切变模量Gxy相比,Ey/Ex/Gxy值与弯曲位移量的相关性较好。这是由于短边方向上的基板的振动模式和压电元件的变形模式不同。

[0174] 由于在通常的弹性变形中,若向长边方向拉伸则短边方向收缩,因此基板的振动模式变为如图17所示那样。另一方面,如图18所示,在压电元件的d31方向的变形模式中,若向长边方向拉伸则短边方向也拉伸。由于这样的模式的差异而产生的位移量的降低比例被杨氏模量的纵横比率Ey/Ex影响,因此可以说Ey/Ex/Gxy值与弯曲位移量的相关性较好。此外,在图17及图18中,用实线表示变形前,用虚线表示变形后。

[0175] 并且,模型M3、M5与模型M1、M2、M4、M6、M7相比,谐振频率F低。若谐振频率低,则能够减少用于驱动压电元件的驱动电流,并能够减少发热量。

[0176] 并且,模型M3、M5与模型M1、M2、M4、M6、M7相比,短边方向的长度W较小。若短边方向的长度W小,则能够减少容量,并能够增加可以从1片晶片获取的芯片数量。

[0177] 3.2. 硅晶片的面内的杨氏模量的计算

[0178] 计算出硅晶片的面内方向上的杨氏模量。杨氏模量利用弹性刚度矩阵来计算。图19是表示在计算杨氏模量时所使用的硅的基本常量的表格。在图19中,“c_{ij}”表示刚度,“s_{ij}”表示柔量。

[0179] 图20及图21是表示以上述的方法计算出的硅晶片中的杨氏模量的面内的分布的图。图20是(110)硅晶片的分布,图21是(001)硅晶片的分布。在图20及图21中,用粗线表示杨氏模量的分布。在图20中,将定向平面设为[-111]方向。在图21中,将定向平面设为[110]方向。

[0180] 如图20所示,在(110)硅晶片中,在面内[001]方向的杨氏模量最小,为130.8GPa。因此,如图20所示可知,通过将构成压电驱动装置的基板10的长边方向设为[001]方向(<100>方向),能够使基板10的长边方向与在基板10的面内杨氏模量最小的方向一致。

[0181] 如图21所示,在(001)硅晶片中,在面内[100]方向的杨氏模量最小,为130.8GPa。因此,如图21所示可知,通过将构成压电驱动装置的基板10的长边方向设为[100]方向(<100>方向),能够使基板10的长边方向与在基板10的面内杨氏模量最小的方向一致。

[0182] 根据上述的“3.1.”的模拟以及图20、图21可知,在基板10是{110}基板或{100}基板的情况下,通过将基板10的长边方向设为在基板10的面内杨氏模量最小的方向<100>,能够增大弯曲位移比率以及纵向×弯曲位移比率。

[0183] 3.3. 硅晶片的面内的Ey/Ex/Gxy值的计算

[0184] 图22及图23是表示硅晶片的Ey/Ex/Gxy值的面内的分布的图。图22是(110)硅晶片的分布,图23是(001)硅晶片的分布。在图22及图23中,用粗实线表示Ey/Ex/Gxy值的分布,用虚线圆圈表示角度(1刻度10°)。

[0185] 如图22所示,在(110)硅晶片中,在面内[001]方向以及[00-1]方向的Ey/Ex/Gxy值最大。由此可知,通过将构成压电驱动装置的基板10的长边方向设为<100>方向,能够使基板10的长边方向与基板10的面内Ey/Ex/Gxy值最大的方向一致。

[0186] 如图23所示,在(001)硅晶片中,在面内[100]方向、[010]方向、[-100]方向以及[0-10]方向的Ey/Ex/Gxy值最大。由此可知,通过将构成压电驱动装置的基板10的长边方向设为<100>方向,能够使基板10的长边方向与基板10的面内Ey/Ex/Gxy值最大的方向一致。另外,根据图22及图23可知,通过使基板10的长边方向在与<100>方向±10°的范围内,能够充分地增大Ey/Ex/Gxy值。

[0187] 根据上述的“3.1.”的模拟以及图22、图23可知,在基板10是{110}基板或{100}基板的情况下,通过将基板10的长边方向设为在基板10的面内Ey/Ex/Gxy值最大的方向<100>,能够增大弯曲位移比率以及纵向×弯曲位移比率。

[0188] 4. 马达用压电驱动装置的变形例

[0189] 接下来,参照附图对本实施方式的变形例所涉及的马达用压电驱动装置进行说明。图24是示意性地表示本实施方式的变形例所涉及的马达用压电驱动装置200的剖视图。

[0190] 以下,在本实施方式的变形例所涉及的马达用压电驱动装置200中,对于与本实施方式所涉及的马达用压电驱动装置100的构成部件具有相同的功能的部件标注相同的附图标记,并省略其详细的说明。

[0191] 如图2所示,在上述的马达用压电驱动装置100中,芯片102设置有一个。与此相对,如图24所示,在马达用压电驱动装置200中,芯片102设置有多个。多个芯片102沿基板10的厚度方向排列。在图示的例子中,马达用压电驱动装置200具有两个芯片102,但其数量不做特别限定。此外,为了方便,在图24中省略固定部12的图示。

[0192] 基板10具有第一面1a以及朝向与第一面1a相反一侧的第二面1b。在第一面1a设置有结构体101。结构体101例如构成为包括压电元件30、覆盖压电元件的绝缘层(未图示)、与第一电极32电连接的第一布线层(未图示)、以及与第二电极36电连接的第二布线层(未图示)。结构体101构成芯片102。

[0193] 在图示的例子中,一侧的芯片102的第一面1a与另一侧的芯片102的第一面1a对置,并且一侧的芯片102的结构体101与另一侧的芯片102的结构体101通过粘合剂2接合。

[0194] 此外,虽然未图示,但也可以一侧的芯片102的第一面1a与另一侧的芯片102的第二面1b对置,并且一侧的芯片102的结构体101与另一侧的芯片102的基板10通过粘合剂2接

合。

[0195] 马达用压电驱动装置200例如在上述的工序(S3)之后,通过使多个芯片102沿芯片区域10a的(基板10的)厚度方向排列来制造。

[0196] 在马达用压电驱动装置200中,由于多个芯片102沿基板10的厚度方向排列,因此与例如只设置有一个芯片102的情况相比,能够实现更高输出。

[0197] 5. 使用了马达用压电驱动装置的装置

[0198] 本发明所涉及的马达用压电驱动装置是通过利用谐振从而能够对被驱动体施加较大的力的装置,并能够应用于各种装置。本发明所涉及的马达用压电驱动装置例如能够作为机器人(也包括电子部件输送装置(IC处理器)、给药用泵、钟表的日历推送装置、打印装置的送纸机构等各种设备的驱动装置来使用。以下,针对具有代表性的实施方式进行说明。以下,作为本发明所涉及的马达用压电驱动装置,对于包含马达用压电驱动装置100的装置进行说明。

[0199] 5.1. 机器人

[0200] 图25是用于说明利用了马达用压电驱动装置100的机器人2050的图。机器人2050具有臂2010(也可以称为“臂部”),该臂2010具备多根连杆部2012(也可以称为“连杆部件”)以及以能够转动或者弯曲的状态连接这些连杆部2012之间的多个关节部2020。

[0201] 在各个关节部2020中内置有马达用压电驱动装置100,能够利用马达用压电驱动装置100来使关节部2020转动或弯曲任意的角度。在臂2010的前端连接有机器手2000。机器手2000具备一对把持部2003。在机器手2000中也内置有马达用压电驱动装置100,能够利用马达用压电驱动装置100来开闭把持部2003而把持物品。另外,在机器手2000与臂2010之间也设置有马达用压电驱动装置100,能够利用马达用压电驱动装置100来使机器手2000相对于臂2010旋转。

[0202] 图26是用于说明图25所示的机器人2050的手腕部分的图。手腕的关节部2020夹持手腕转动部2022,手腕的连杆部2012以能够绕手腕转动部2022的中心轴O转动的方式安装于手腕转动部2022。手腕转动部2022具备马达用压电驱动装置100,马达用压电驱动装置100使手腕的连杆部2012以及机器手2000绕中心轴O转动。在机器手2000中竖立设置有多个把持部2003。把持部2003的基端部能够在机器手2000内移动,并在该把持部2003的根部分搭载有马达用压电驱动装置100。因此,通过使马达用压电驱动装置100工作,能够使把持部2003移动来把持对象物。此外,作为机器人并不局限于单臂的机器人,在臂的数量为两个以上的多臂机器人中也可以应用马达用压电驱动装置100。

[0203] 此处,在手腕的关节部2020、机器手2000的内部除了马达用压电驱动装置100之外,还包括向力传感器、陀螺传感器等各种装置供给电力的电力线、传递信号的信号线等,需要非常多的布线。因此,在关节部2020、机器手2000的内部配置布线非常困难。然而,由于马达用压电驱动装置100与通常的电动马达相比,能够减小驱动电流,因此即使在如关节部2020(尤其是臂2010的前端的关节部)、机器手2000那样较小的空间也能够配置布线。

[0204] 5.2. 泵

[0205] 图27是用于表示并说明利用了马达用压电驱动装置100的送液泵2200的一个例子的图。送液泵2200在壳体2230内包含贮存器2211、管2212、马达用压电驱动装置100、转子2222、减速传递机构2223、凸轮2202以及多个指状物2213、2214、2215、2216、2217、2218、

2219。

[0206] 贮存器2211是用于收容作为输送对象的液体的收容部。管2212是用于输送从贮存器2211送出的液体的管。马达用压电驱动装置100的接触部20以推压至转子2222的侧面的状态设置，马达用压电驱动装置100旋转驱动转子2222。转子2222的旋转力经由减速传递机构2223传递至凸轮2202。指状物2213～2219是用于封闭管2212的部件。若凸轮2202旋转，则通过凸轮2202的突起部2202A使指状物2213～2219按顺序向放射方向外侧挤压。指状物2213～2219从输送方向上游侧(贮存器2211侧)按顺序封闭管2212。由此，使管2212内的液体按顺序输送至下游侧。由此，能够将极少的量高精度地送液，或能够实现小型的送液泵2200。

[0207] 此外，各部件的配置不限定于图示的配置。另外，也可以不具备指状物等部件，而是设置于转子2222的球体等来封闭管2212的结构。上述那样的送液泵2200能够活用于将胰岛素等药液注射到人体的给药装置等。此处，通过利用马达用压电驱动装置100，能够比通常的电动马达减小驱动电流，因此能够抑制给药装置的消耗电力。因此，在电池驱动给药装置的情况下特别有效。

[0208] 本发明可以在具有本申请所记载的特征、效果的范围内省略一部分的结构，或者可以组合各实施方式、变形例。

[0209] 本发明包括与实施方式中说明的结构实质上相同的结构(例如，功能、方法和结果相同的结构、或目的和效果相同的结构)。另外，本发明包括将实施方式中说明的结构的非本质的部分置换的结构。另外，本发明包括与实施方式中说明的结构起到相同的作用效果的结构或能够达成相同目的的结构。另外，本发明包括在实施方式中说明的结构中附加了公知技术的结构。

[0210] 附图标记说明

[0211] 1a…第一面；1b…第二面；2…粘合剂；4…转子；4a…中心；10…基板；10a…芯片区域；11…前端部；12…固定部；12a…周边区域；14…第一连接部；16…第二连接部；20…接触部；22…粘合剂；30、30a、30b、30c、30d、30e…压电元件；32…第一电极；34…压电体层；36…第二电极；100…马达用压电驱动装置；101…结构体；102…芯片；104…晶片；106…支承部；108…梁部；110…驱动电路；120…马达；200…马达用压电驱动装置；2000…机器手；2003…把持部；2010…臂；2012…连杆部；2020…关节部；2050…机器人；2200…送液泵；2202…凸轮；2202A…突起部；2211…贮存器；2212…管；2213、2214、2215、2216、2217、2218、2219…指状物；2222…转子；2223…减速传递机构；2230…壳体。

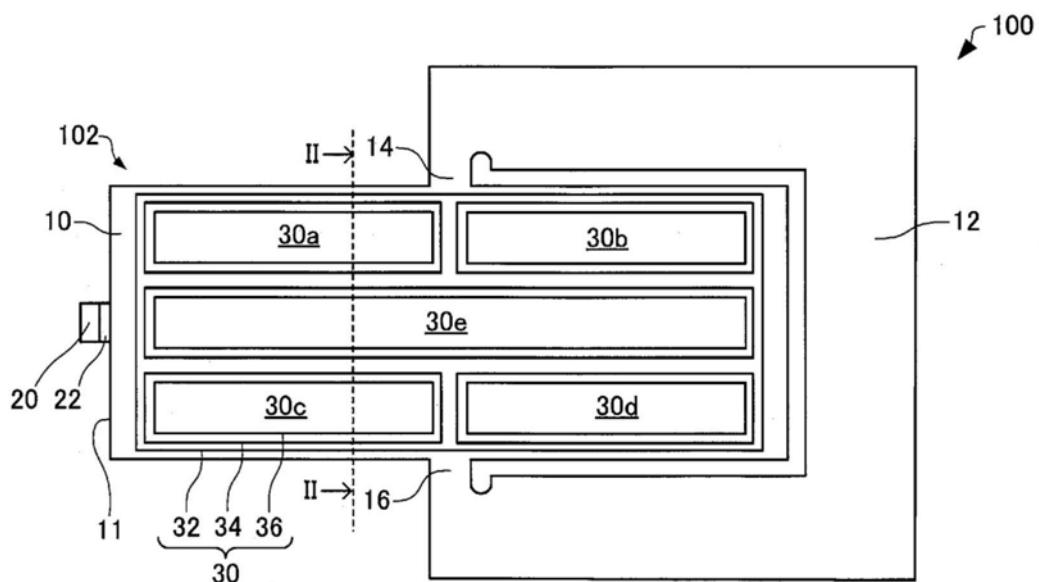


图1

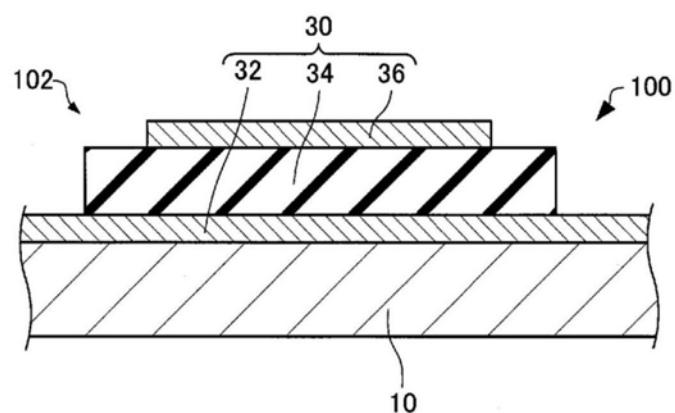


图2

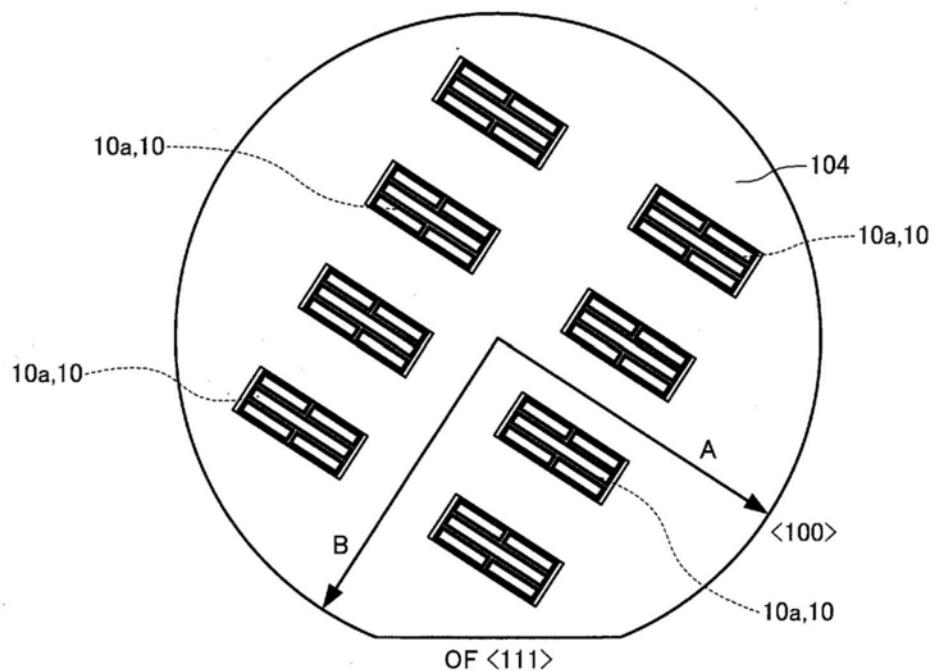


图3

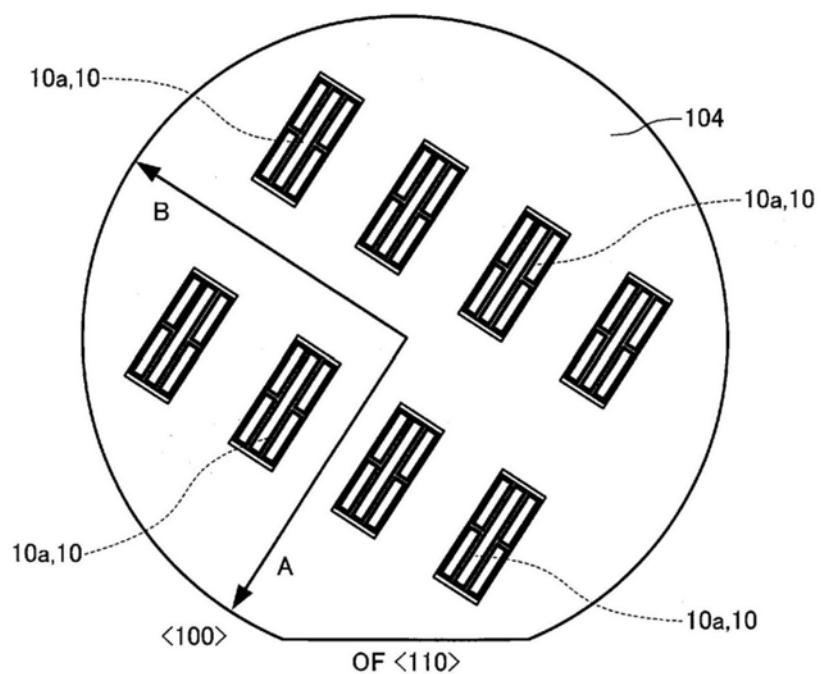


图4

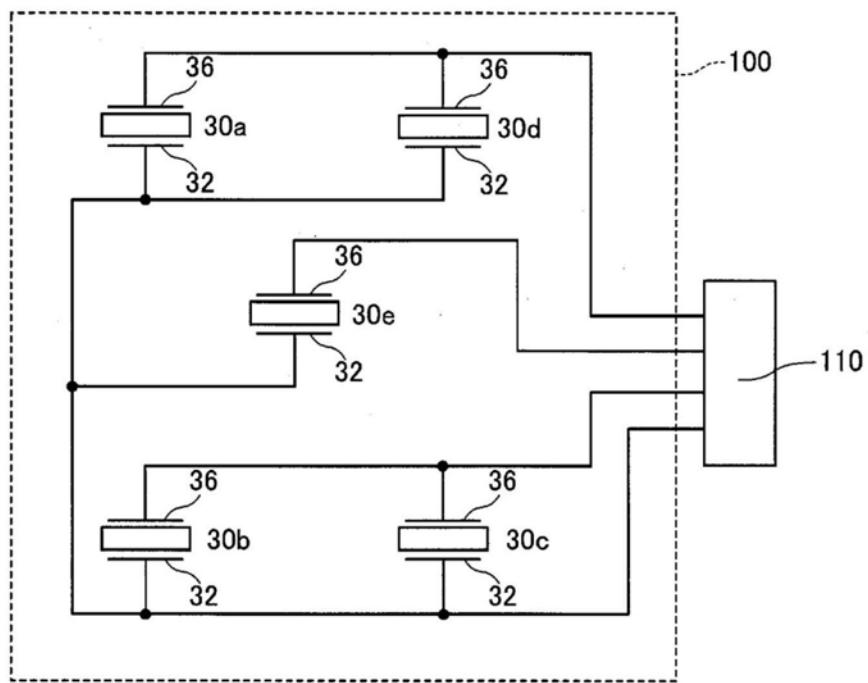


图5

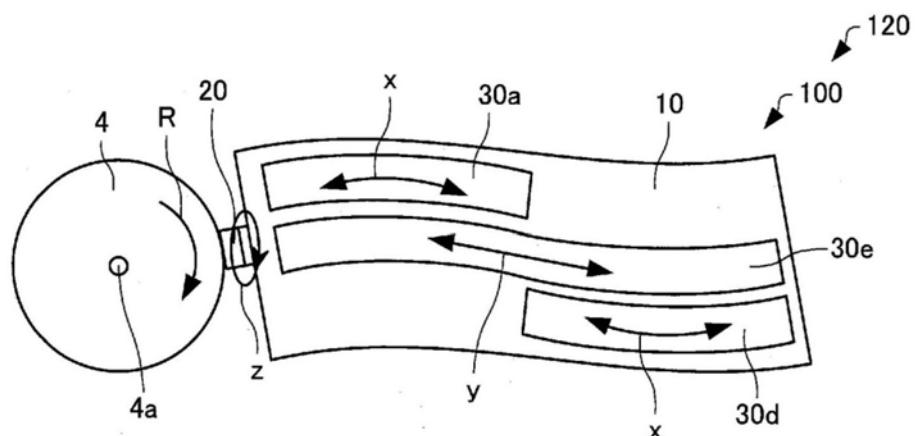


图6

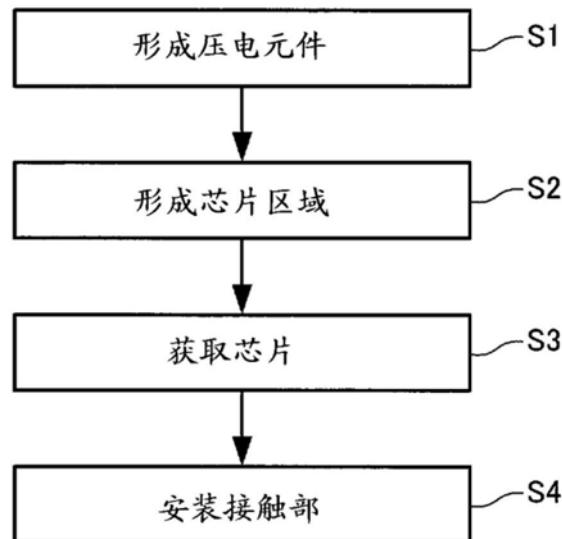


图7

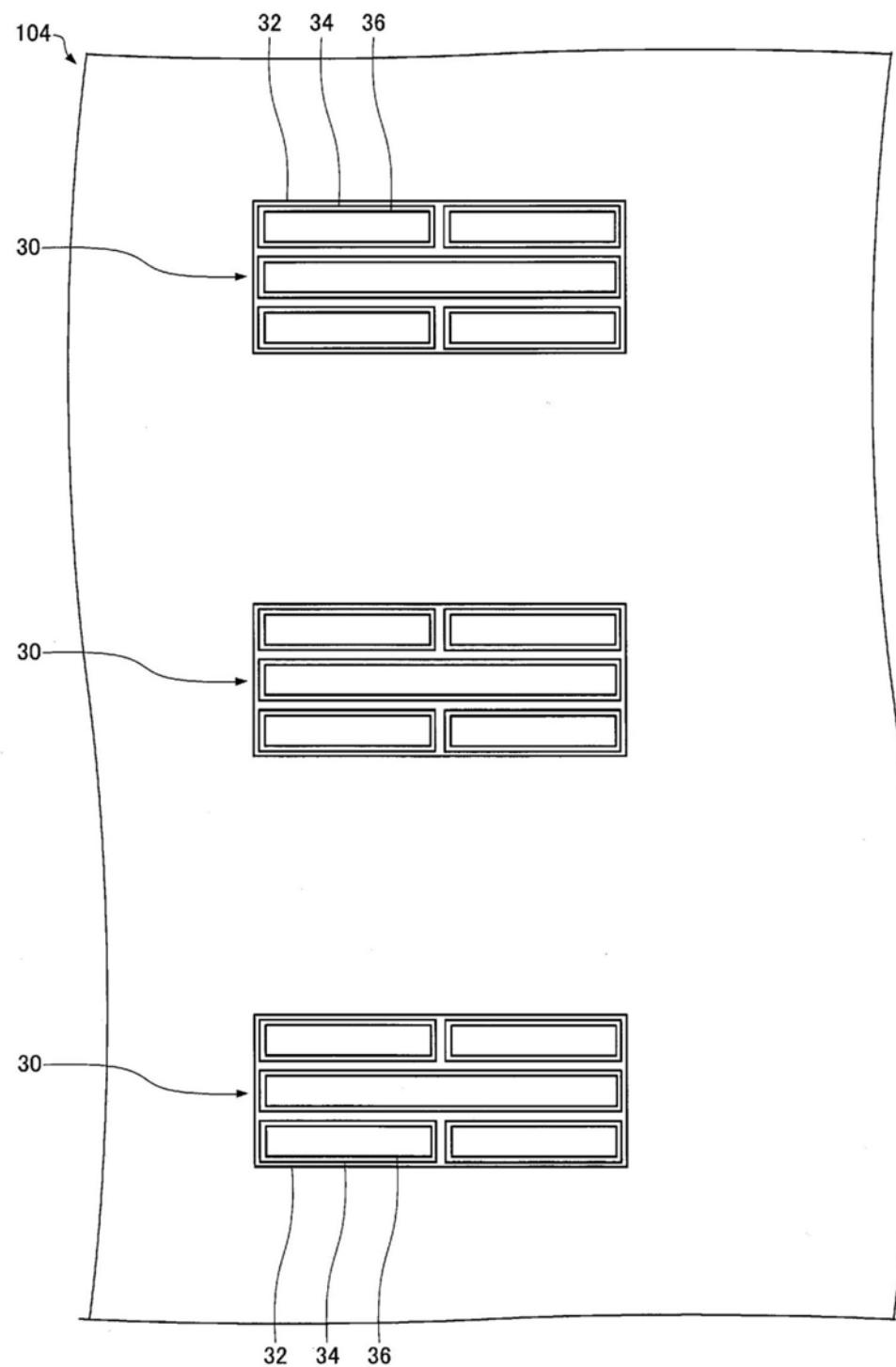


图8

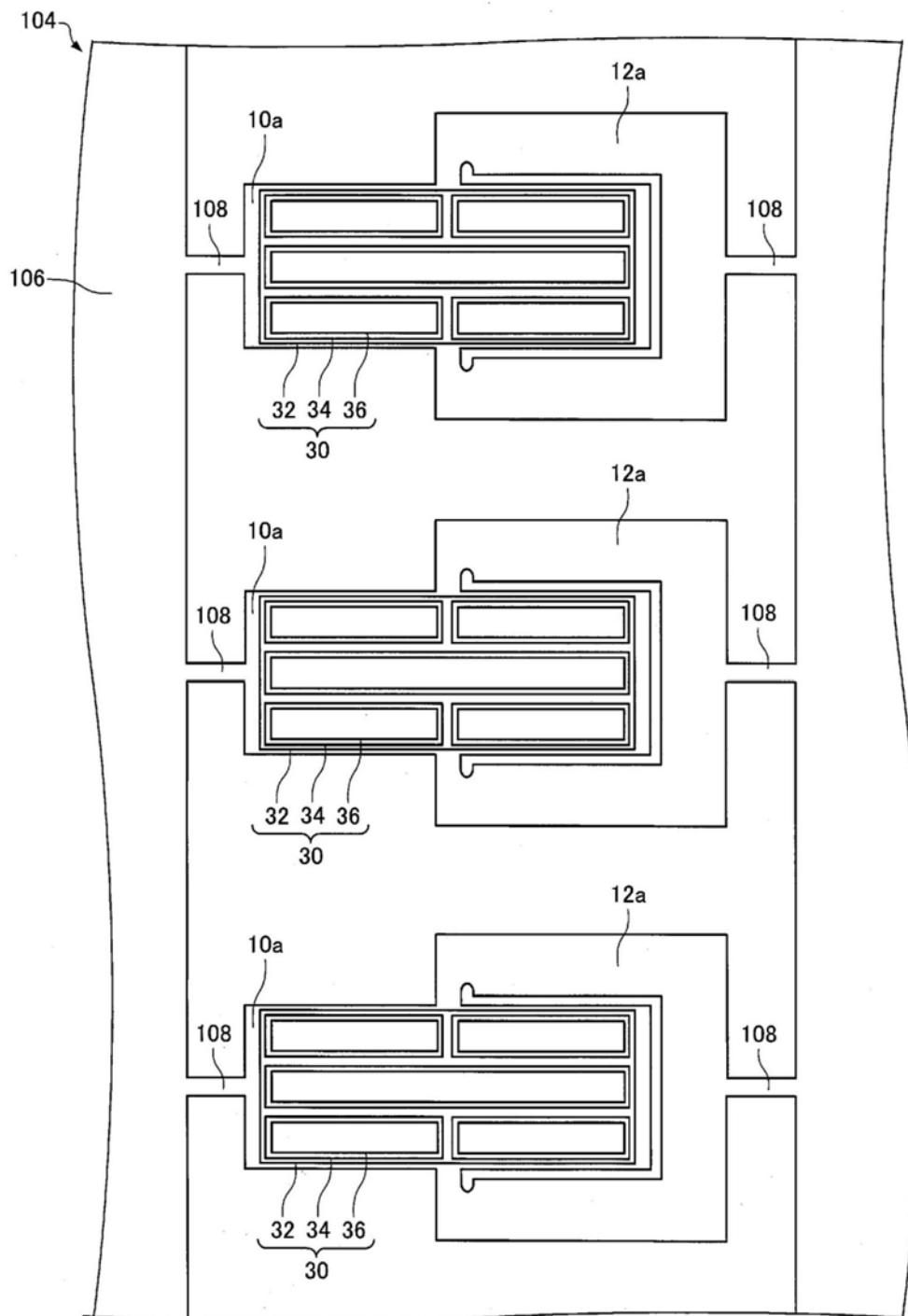


图9

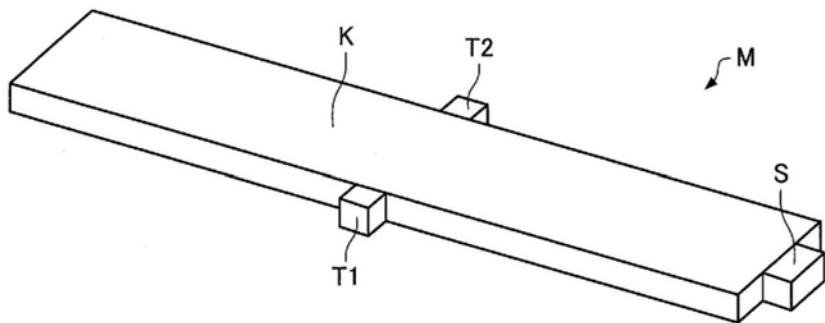


图10

	面方位	长边方向	短边方向	Ex [GPa]	Ey [GPa]	Gxy [GPa]	Ey/Ex/Gxy
M1	(110)	<111>	<112>	188.4	169.7	76.0	0.01
M2	(110)	<112>	<111>	169.7	188.4	76.0	0.015
M3	(110)	<100>	<110>	130.8	169.7	56.1	0.023
M4	(110)	<110>	<001>	169.7	130.8	56.1	0.014
M5	(001)	<100>	<010>	130.8	130.8	51.1	0.020
M6	(001)	<110>	<110>	169.7	169.7	79.6	0.013
M7	(111)	<110>	<112>	169.7	169.7	67.1	0.015

	ν_{xy}	F [kHz]	W [mm]	纵向位移 比率	弯曲位移 比率	纵向 \times 弯曲 位移比率
M1	0.184	1204	1.003	100%	100%	100%
M2	0.166	1159	0.926	111%	121%	135%
M3	0.280	1010	0.772	131%	176%	230%
M4	0.364	1151	0.795	90%	106%	95%
M5	0.280	1012	0.718	127%	185%	235%
M6	0.066	1142	1.027	126%	125%	157%
M7	0.265	1148	0.848	103%	119%	122%

图11

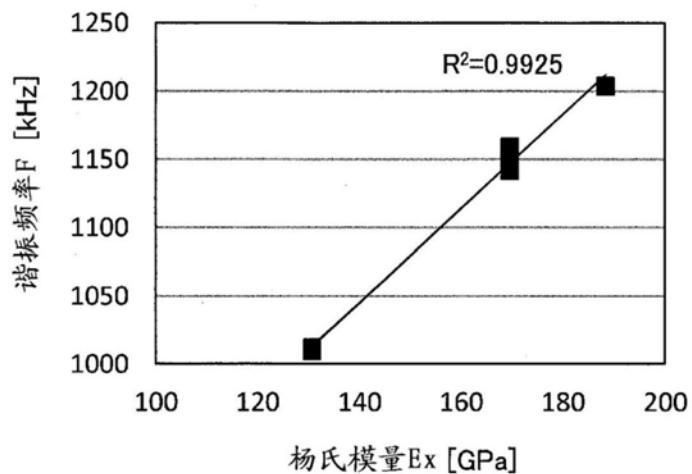


图12

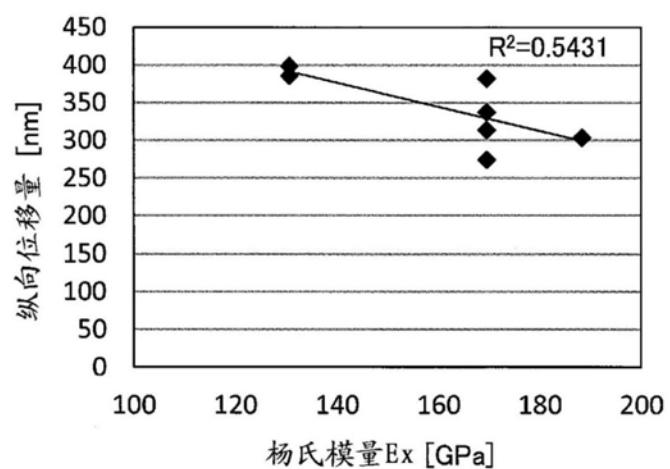


图13

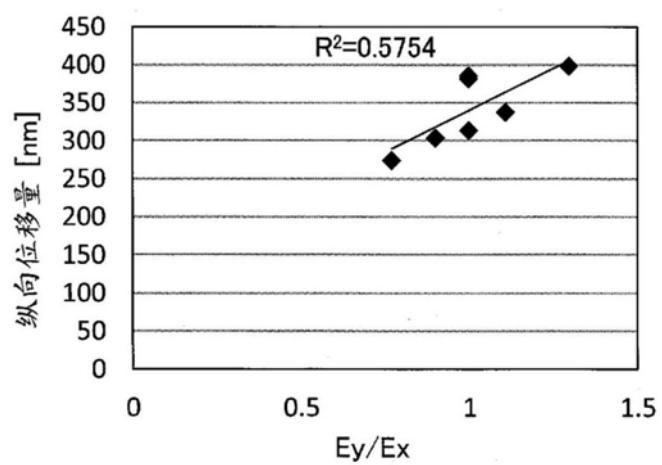


图14

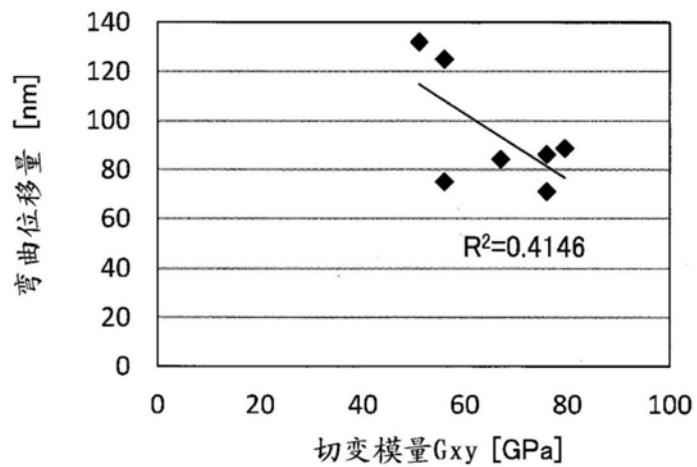


图15

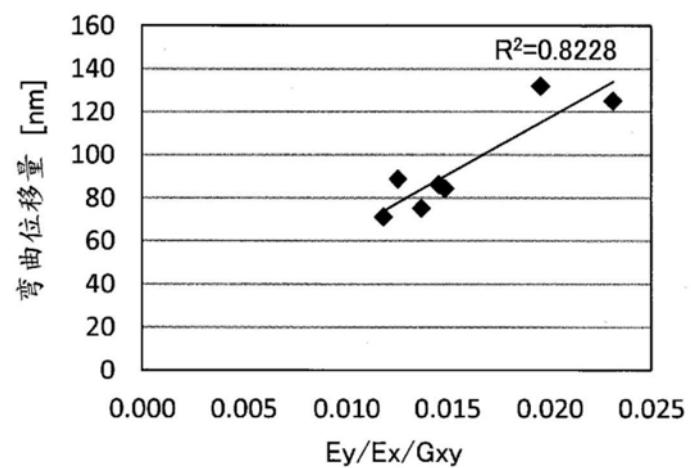


图16

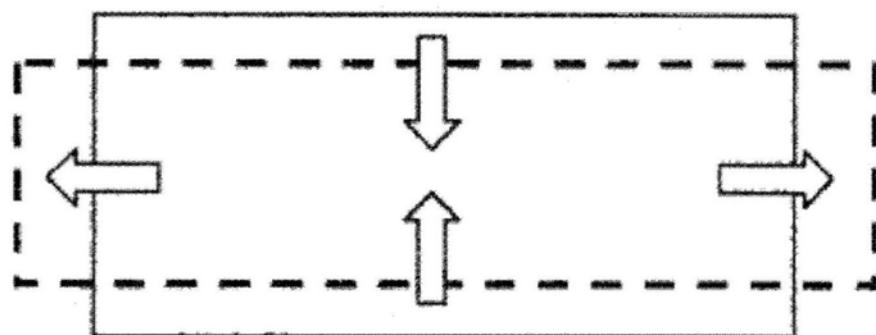


图17

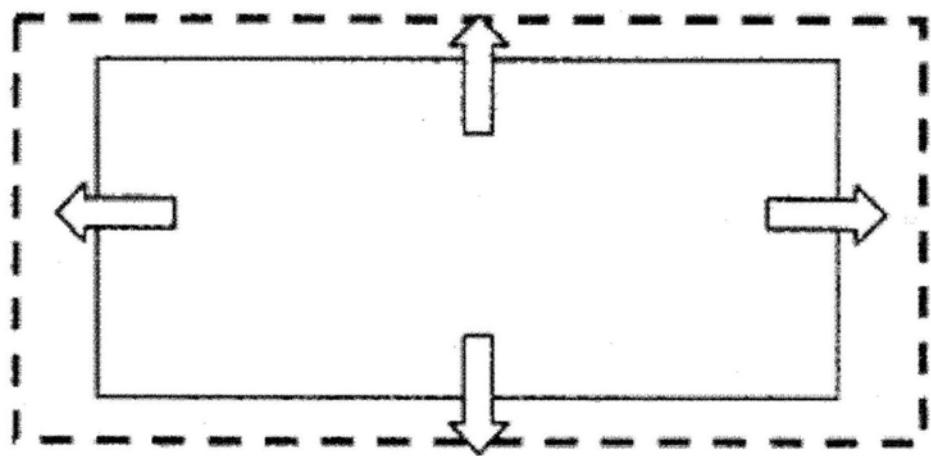


图18

c11	167.4 [GPa]
c12	65.23 [GPa]
c44	79.57 [GPa]
s11	0.007644 [GPa ⁻¹]
s12	-0.002143 [GPa ⁻¹]
s44	0.012568 [GPa ⁻¹]
sc	0.003504 [GPa ⁻¹]

图19

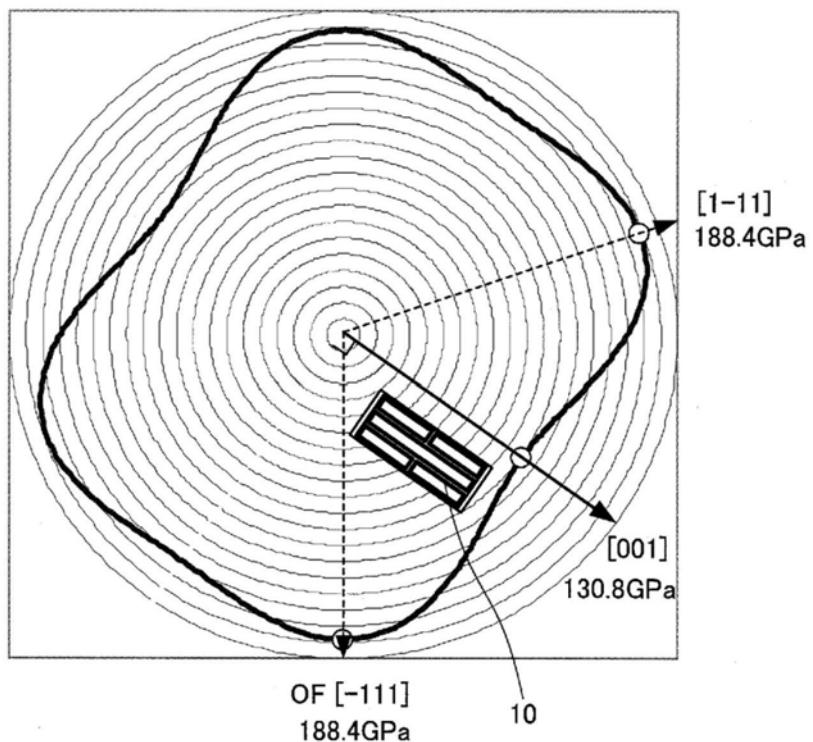


图20

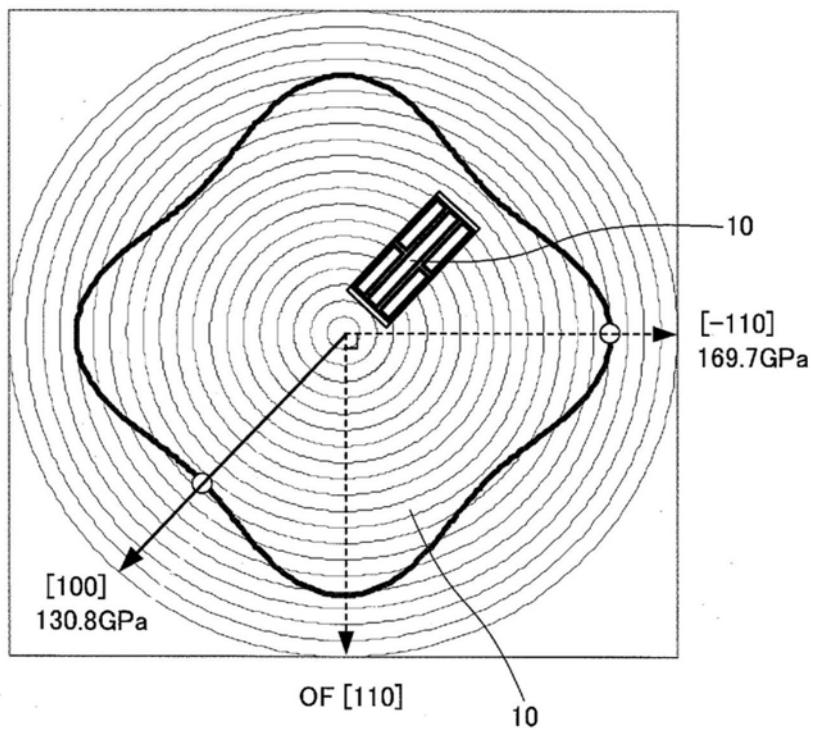


图21

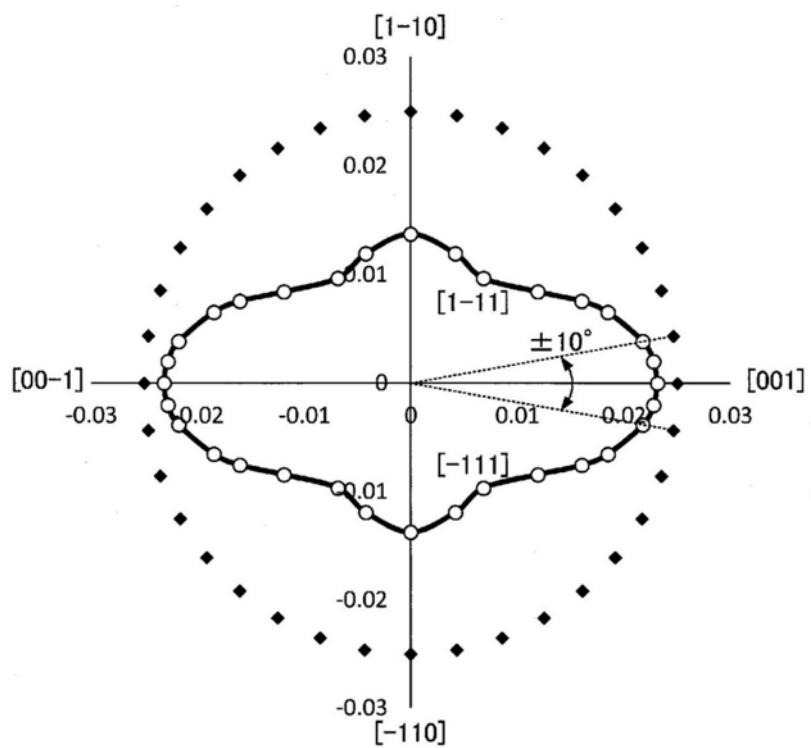


图22

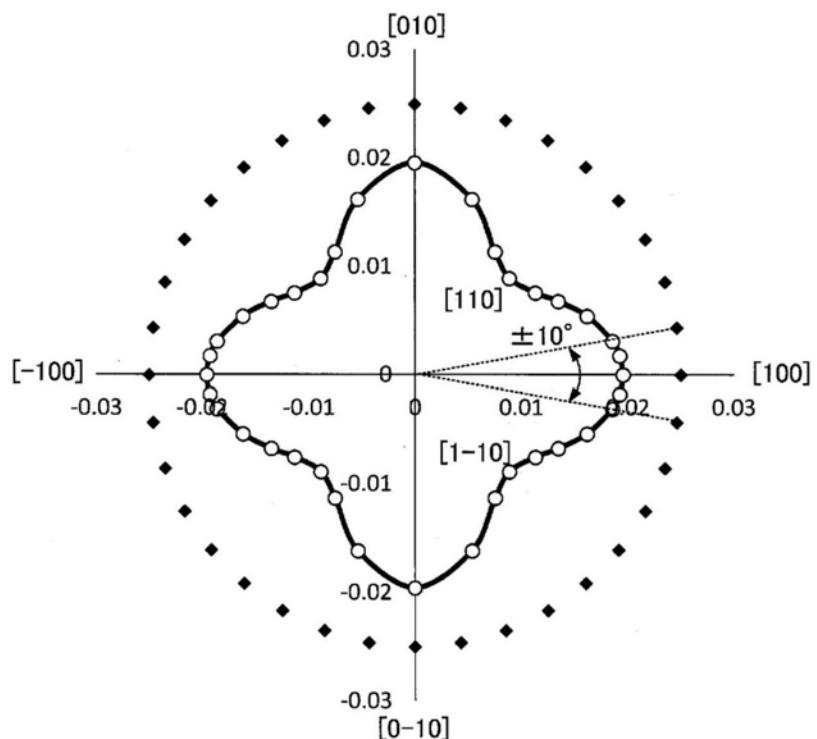


图23

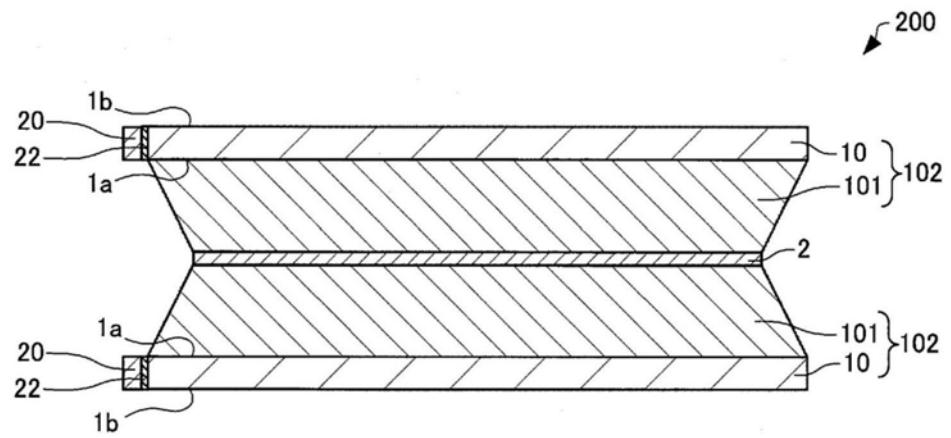


图24

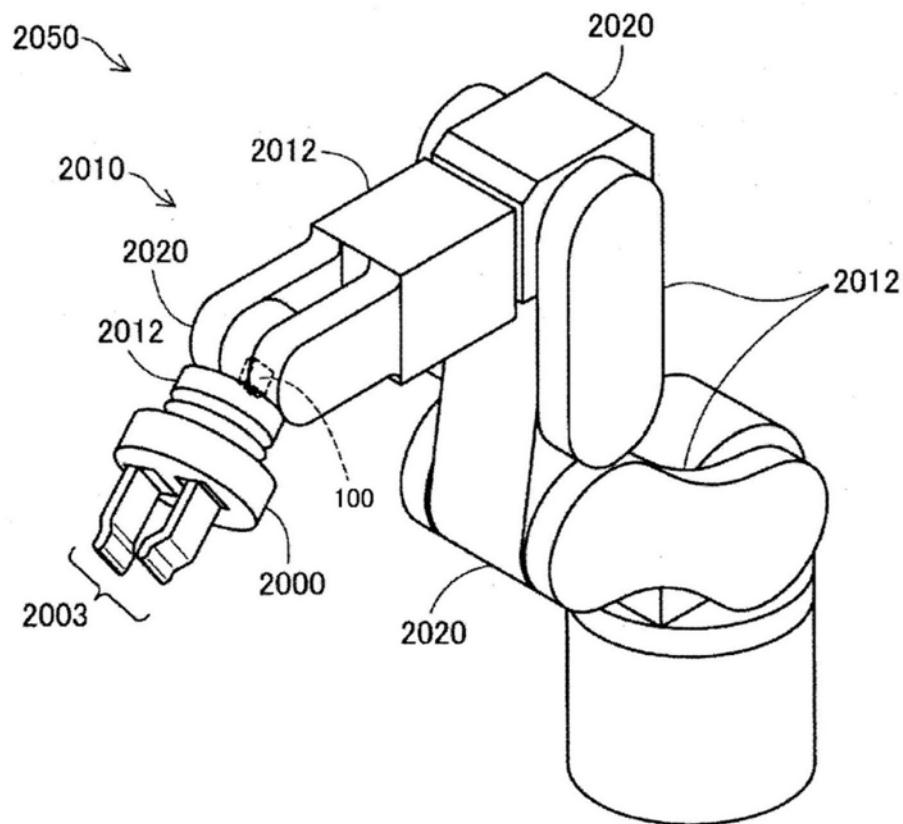


图25

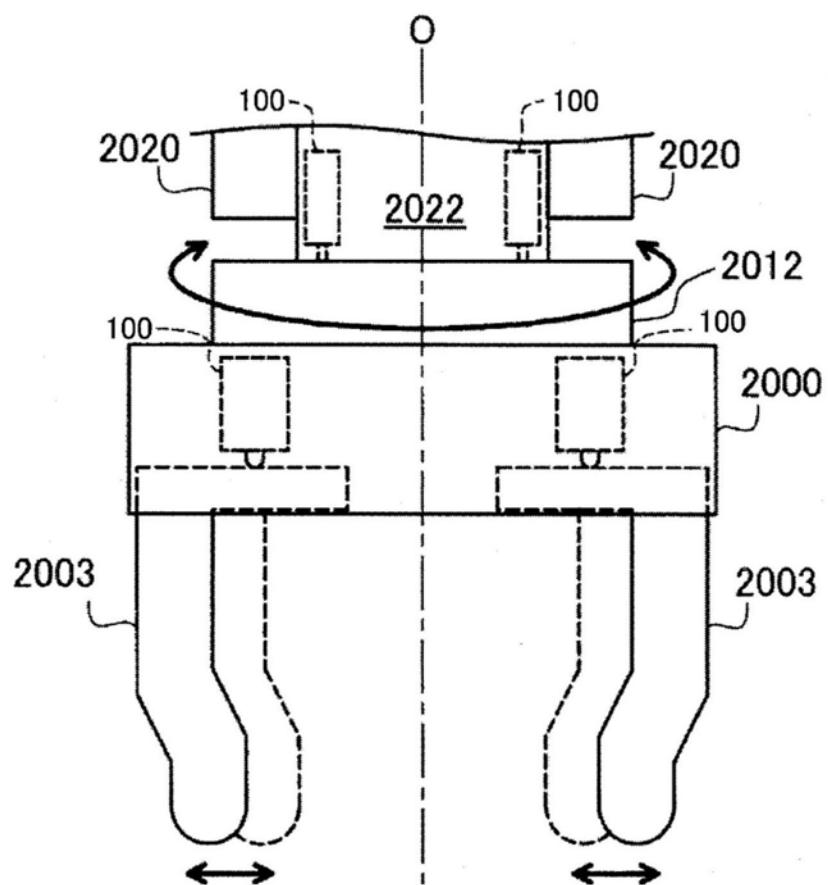


图26

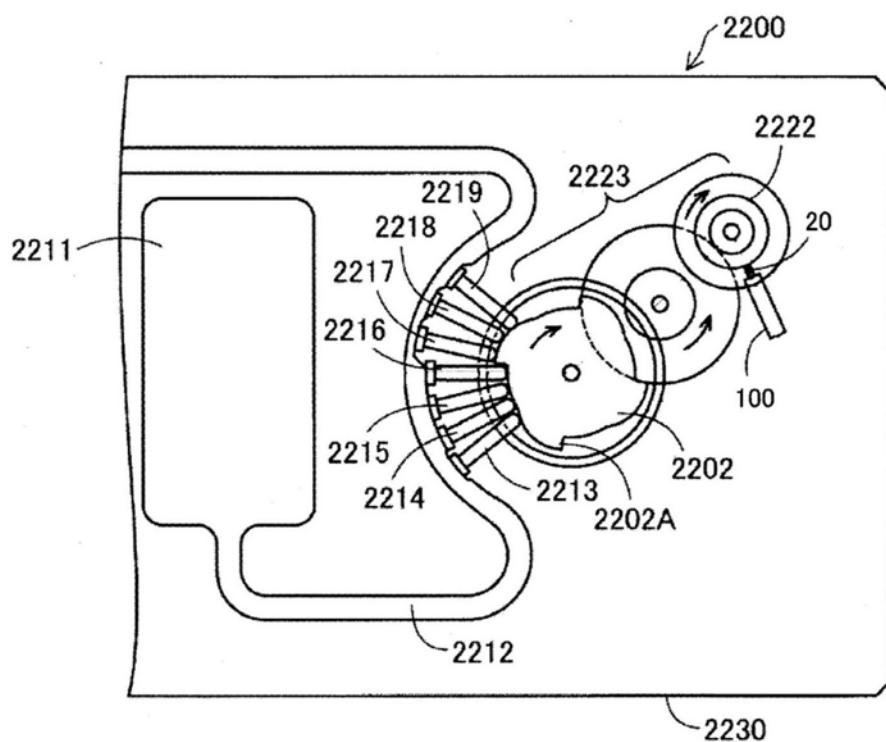


图27