



## (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 109217838 B

(45) 授权公告日 2021.12.24

(21) 申请号 201811050020.4

US 5691595 A, 1997.11.25

(22) 申请日 2014.06.24

JP 2011124976 A, 2011.06.23

(65) 同一申请的已公布的文献号

JP 2002141770 A, 2002.05.17

申请公布号 CN 109217838 A

CN 102651640 A, 2012.08.29

(43) 申请公布日 2019.01.15

CN 102195606 A, 2011.09.21

(30) 优先权数据

US 2012235762 A1, 2012.09.20

2013-131936 2013.06.24 JP

CN 102340292 A, 2012.02.01

(62) 分案原申请数据

US 2011156827 A1, 2011.06.30

201410286254.4 2014.06.24

US 7944132 B2, 2011.05.17

(73) 专利权人 精工爱普生株式会社

US 2010244989 A1, 2010.09.30

地址 日本东京都

CN 101847979 A, 2010.09.29

(72) 发明人 山田明法 吉田周平

CN 101356728 A, 2009.01.28

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司 11127

CN 101877575 A, 2010.11.03

代理人 李辉 黄纶伟

韩东 等.Si基薄膜体声波谐振器(FBAR)技术研究.《半导体技术》.2012,第37卷(第6期),

456-459,469.

(51) Int.Cl.

Russell Cox 等.Characteristics of laterally vibrating resonant

H03H 9/05 (2006.01)

microcantilevers in viscous liquid media.

H03H 9/21 (2006.01)

《Journal of Applied Physics》.2012,第111卷

(第1期),014907.

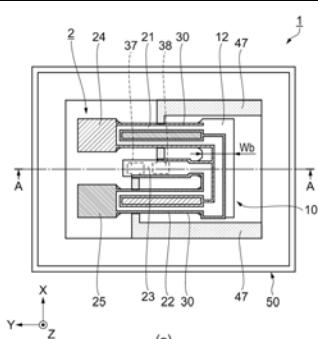
(56) 对比文件

审查员 杨苏倩

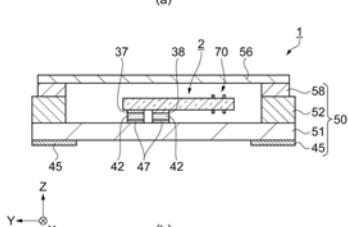
CN 1419334 A, 2003.05.21

权利要求书2页 说明书12页 附图13页

(54) 发明名称



振动片、振子、电子器件、电子设备以及移动体



(57) 摘要

本发明提供振动片、振子、电子器件、电子设备以及移动体，即使小型化，Q值也不会劣化。所述振动片包括：基部，其具有面向第1方向的第1端面和面向与所述第1方向相反的方向的第2端面；第1振动臂，其一体地设于所述基部，并与所述第1端面连续；以及第2振动臂，其沿着所述第1振动臂而一体地设于所述基部，并与所述第1端面连续，设所述第1端面与所述第2端面的最短距离为Wb，所述Wb和基部的有效宽度We满足 $0.81 \leq Wb/We \leq 1.70$ 的关系。

CN 109217838

1.一种振动片,其包括:

基部,所述基部具有第1端面以及与所述第1端面相反侧的第2端面;以及

一对振动臂,所述一对振动臂从所述基部的所述第1端面侧沿第1方向延伸,并沿着与所述第1方向垂直的第2方向隔开配置,

所述振动片的特征在于,

所述振动臂包括:

施重部;

臂部,所述臂部配置于所述基部与所述施重部之间,

当设所述第1端面与所述第2端面的最短距离为Wb时,满足以下关系:

$$\begin{aligned} Q &= \{ (\rho \times C_p) / (c \times \alpha^2 \times \Theta) \} \\ &\times [ \{ 1 + (2 \times \rho \times C_p \times W_e^2 \times f / (\pi \times k))^2 \} \\ &/ (2 \times \rho \times C_p \times W_e^2 \times f / (\pi \times k)) ] \\ 0.81 \leq W_b/W_e &\leq 1.70 \end{aligned}$$

其中,Q是所述振动片的Q值,f是所述振动片的振动频率[Hz],We是有效宽度[m], $\rho$ 是质量密度[kg/m<sup>3</sup>], $C_p$ 是热容[J/(kg×K)],c是在由所述第1方向和所述第2方向限定出的面内与所述Wb的方向垂直的方向上的弹性常数[N/m<sup>2</sup>], $\alpha$ 是在由所述第1方向和所述第2方向限定出的面内与所述Wb的方向垂直的方向上的热膨胀系数[1/K], $\Theta$ 是环境温度[K],k是所述Wb的方向上的导热系数[W/(m×K)]。

2.根据权利要求1所述的振动片,其特征在于,

所述Wb为50μm以上116μm以下。

3.根据权利要求1或2所述的振动片,其特征在于,

所述第1方向上的所述振动片的全长为760μm以上826μm以下。

4.根据权利要求1或2所述的振动片,其特征在于,满足以下关系:

$$0.91 \leq W_b/W_e \leq 1.30.$$

5.根据权利要求1或2所述的振动片,其特征在于,满足以下关系:

$$1.00 \leq W_b/W_e \leq 1.20.$$

6.根据权利要求1或2所述的振动片,其特征在于,

所述第2方向上的所述施重部的宽度比所述第2方向上的所述臂部的宽度大。

7.根据权利要求1或2所述的振动片,其特征在于,

从所述基部延伸出支承臂。

8.根据权利要求7所述的振动片,其特征在于,

所述支承臂配置在所述一对振动臂之间。

9.根据权利要求7所述的振动片,其特征在于,

所述振动片具有2个所述支承臂,

在俯视时,所述一对振动臂配置在2个所述支承臂之间。

10.根据权利要求1或2所述的振动片,其特征在于,

所述振动片具有框状的支承部,所述框状的支承部与所述基部连接,且在俯视时包围所述基部和所述振动臂。

11.一种振子,其特征在于,

所述振子具备：

权利要求1~9中的任意一项所述的振动片；以及  
内部收纳有所述振动片的容器。

12.一种振子，其特征在于，

所述振子具备：

权利要求10所述的振动片；

盖；以及

封装基座，

所述振动片的所述框状的支承部被夹持在所述盖与所述封装基座之间。

13.一种电子器件，其特征在于，

所述电子器件具备：

权利要求1~10中的任意一项所述的振动片；以及  
电路。

14.一种电子设备，其特征在于，所述电子设备具备权利要求1~10中的任意一项所述的振动片。

15.一种移动体，其特征在于，所述移动体具备权利要求1~10中的任意一项所述的振动片。

## 振动片、振子、电子器件、电子设备以及移动体

[0001] 本申请是申请日为2014年6月24日,申请号为201410286254.4,发明名称为“振动片、振子、电子器件、电子设备以及移动体”的发明专利申请的分案申请。

### 技术领域

[0002] 本发明涉及振动片、振子、电子器件、电子设备以及移动体。

### 背景技术

[0003] 在HDD(Hard Disk Drive)、移动计算机、或者IC卡等小型信息设备、便携电话、智能手机、或者平板终端等移动体通信设备等中,作为提供时序信号和同步信号的器件,振子和振荡器等电子器件被广泛使用。

[0004] 一直以来,作为振子和振荡器,已知有在封装中收纳振动片的结构(例如,参照专利文献1)。在专利文献1所公开的振动片中,为了缩短振动片的全长来实现小型化,而具有:基部;2个振动臂,它们从基部起以相互平行的方式并排延伸;以及从基部延伸出的支承臂,其位于2个振动臂之间。

[0005] 专利文献1:日本特开2002-141770号公报

[0006] 然而,在专利文献1所公开的振动片中,当欲进一步小型化,而将基部的尺寸(振动臂的延伸方向的宽度)减小到例如40μm时,存在Q值为4639这样的明显劣化的问题。

### 发明内容

[0007] 本发明是为了解决上述的课题的至少一部分而完成的,可以作为以下的方式或应用例来实现。

[0008] [应用例1]本应用例的振动片包括:基部,所述基部具有第1端面和所述第1端面的背侧的第2端面;以及一对振动臂,所述一对振动臂从所述基部的所述第1端面侧沿第1方向延伸,并在与所述第1方向垂直的第2方向上排列,所述振动片的特征在于,当设所述第1端面与所述第2端面的最短距离为Wb时,满足以下关系:

$$[0009] Q = \{(\rho \times C_p) / (c \times \alpha^2 \times \Theta)\}$$

$$[0010] \times [ \{1 + (2 \times \rho \times C_p \times We^2 \times f / (\pi \times k))^2\}$$

$$[0011] / (2 \times \rho \times C_p \times We^2 \times f / (\pi \times k)) ]$$

$$[0012] 0.81 \leq Wb / We \leq 1.70$$

[0013] 其中,Q是所述振动片的Q值,f是所述振动片的振动频率[Hz],We是有效宽度[m],ρ是质量密度[kg/m<sup>3</sup>],C<sub>p</sub>是热容[J/(kg×K)],c是在面内与所述Wb的方向垂直的方向上的弹性常数[N/m<sup>2</sup>],α是在面内与所述Wb的方向垂直的方向上的热膨胀系数[1/K],Θ是环境温度[K],k是所述Wb的方向上的导热系数[W/(m×K)]。

[0014] 根据本应用例,Wb/We满足0.81≤Wb/We≤1.70的关系,由此具有能够得到如下振动片的效果:该振动片减少了基部的第1端面和第2端面之间的尺寸的小型化所引起的热弹性损失,具有能够让振荡电路进行稳定的振荡的高Q值,并且与现有设计的振动片相比,实

现了小型化。

[0015] [应用例2]在上述应用例所述的振动片中,其特征在于,满足以下关系: $0.91 \leq W_b / W_e \leq 1.30$ 。

[0016] 根据本应用例, $W_b / W_e$ 满足 $0.91 \leq W_b / W_e \leq 1.30$ 的关系,由此具有能够得到如下振动片的效果:该振动片减少了基部的第1端面和第2端面之间的尺寸的小型化所引起的热弹性损失,具有能够让振荡电路进行更稳定的振荡的高Q值,并且与现有设计的振动片相比,实现了小型化。

[0017] [应用例3]在上述应用例所述的振动片中,其特征在于,满足以下关系: $1.00 \leq W_b / W_e \leq 1.20$ 。

[0018] 根据本应用例, $W_b / W_e$ 满足 $1.00 \leq W_b / W_e \leq 1.20$ 的关系,由此具有能够得到如下振动片的效果:该振动片减少了基部的第1端面和第2端面之间的尺寸的小型化所引起的热弹性损失,具有能够让振荡电路进行更稳定的振荡的高Q值,并且与现有设计的振动片相比,实现了进一步的小型化。

[0019] [应用例4]在上述应用例所述的振动片中,其特征在于,从所述基部延伸出支承臂。

[0020] 根据本应用例,因为从基部延伸出支承臂,由此能够减少因振动臂的弯曲振动而产生的振动泄漏,因此具有能够得到具有高Q值的振动片的效果。

[0021] [应用例5]在上述应用例所述的振动片中,其特征在于,在第1振动臂和第2振动臂之间配置有从所述基部的所述第1端面延伸出的所述支承臂。

[0022] 根据本应用例,通过在第1振动臂和第2振动臂之间配置支承臂,对振动片进行支承和固定的部分位于振动片的中央部,因此具有能够缩短振动片的全长,实现振动片的小型化的效果。

[0023] [应用例6]在上述应用例所述的振动片中,其特征在于,以夹着所述第1振动臂和所述第2振动臂的方式配置有一对所述支承臂。

[0024] 根据本应用例,通过以夹着第1振动臂和第2振动臂的方式配置一对支承臂,具有能够得到抗振动强度和抗掉落强度优异的振动片的效果。

[0025] [应用例7]本应用例的振子的特征在于,其具备上述应用例所述的振动片和内部收纳有所述振动片的容器。

[0026] 根据本应用例,能够得到搭载有小型化且具有高Q值的振动片的振子。

[0027] [应用例8]本应用例的振子的特征在于,所述容器的所述内部为真空。

[0028] 根据本应用例,通过使内部空间成为真空,减小了粘性阻力,因此能够使振动片稳定地振动。

[0029] [应用例9]本应用例的电子器件的特征在于,其具备上述应用例所述的振动片、和电路。

[0030] 根据本应用例,能够由小型化且具有高Q值的振动片和对振动片进行稳定的激励的振荡电路构成,因此具有能够得到具有稳定的振荡特性的小型电子器件的效果。

[0031] [应用例10]本应用例的电子设备的特征在于,其具备上述应用例所述的振动片。

[0032] 根据本应用例,由于使用了小型化且具有高Q值的振动片,因此具有如下效果:能够构成具备拥有着稳定的振荡特性的小型电子器件的电子设备。

[0033] [应用例11]本应用例的移动体的特征在于,其具备上述应用例所述的振动片。

[0034] 根据本应用例,能够使用小型的振子,所述振子具备小型且具有高Q值的振动片,并且频率再现性和频率老化(aging)特性优异,因此具有如下效果:能够构成具备稳定且准确的电子控制单元等的移动体。

## 附图说明

[0035] 图1是示出本发明的实施方式的振子的结构的概略图,其中,(a)是俯视图,(b)是沿(a)所示的A-A线的剖视图。

[0036] 图2是示出在本发明的实施方式的振子中使用的振动片的结构的概略图,其中,(a)是俯视图,(b)是沿(a)所示的B-B线的剖视图,(c)是示出具有与基部12的宽度Wb的方向相同方向的宽度We的假想的梁的俯视图。

[0037] 图3是对振子的等温区域和隔热区域进行说明的示意图。

[0038] 图4是示出振子的试制条件和特性结果的图。

[0039] 图5是示出试制的振子的与Wb/We对应的Q值的图。

[0040] 图6是示出在本发明的实施方式的振子中使用的振动片的电极结构的俯视图,其中,(a)是上表面的图,(b)是下表面的图(透视图)。

[0041] 图7是沿图6(a)所示的C-C线的剖视图。

[0042] 图8是示出在本发明的实施方式的振子中使用的振动片的制造方法的振动臂和支承臂的剖视图。

[0043] 图9是示出在本发明的实施方式的振子中使用的振动片的变形例的俯视图,其中,(a)是变形例1,(b)是变形例2,(c)是变形例3,(d)是变形例4。

[0044] 图10是示出在本发明的实施方式的振子中使用的振动片的变形例的俯视图,其中,(a)是变形例5,(b)是变形例6,(c)是变形例7,(d)是变形例8。

[0045] 图11是示出本发明的实施方式的电子器件的结构的概略图,其中,(a)是俯视图,(b)是沿(a)所示的D-D线的剖视图。

[0046] 图12是示出作为具备本发明的实施方式的振子的电子设备的移动型(或者笔记本型)的个人计算机的结构的立体图。

[0047] 图13是示出作为具备本发明的实施方式的振子的电子设备的便携电话机(也包括PHS)的结构的立体图。

[0048] 图14是示出作为具备本发明的实施方式的振子的电子设备的数码照相机的结构的立体图。

[0049] 图15是示出作为具备本发明的实施方式的振子的移动体的汽车的结构的立体图。

## 标号说明

[0051] 1:振子;2:振动片;3:电子器件;6:第1端面;7:第2端面;10:振动基板;12:基部;18、19:缩窄部;21:第1振动臂;22:第2振动臂;23:支承臂;24、25:施重部;28a、28b、29a、29b:槽;30:电极;30a:电极膜;31:第1驱动用电极;32:第2驱动用电极;33a、33b、34a、34b:侧面;35a、35b、35c、35d、35e、35f、36a、36b、36c、36d、36e、36f:配线;37:第1导电盘;38:第2导电盘;40:保护膜;42:接合部件;44:键合线;45:安装端子;46、47:连接电极;48:连接端子;50:封装主体;51:第1基板;52:第2基板;56:盖部件;58:密封部件;60:封装主体;62:IC

芯片；64：连接端子；70、72：腔室；100：显示部；1100：个人计算机；1102：键盘；1104：主体部；1106：显示单元；1200：便携电话机；1202：操作按钮；1204：听筒；1206：话筒；1300：数码照相机；1302：壳体；1304：受光单元；1306：快门按钮；1308：存储器；1312：视频信号输出端子；1314：输入输出端子；1430：电视监视器；1440：个人计算机；1500：汽车；1510：电子控制单元。

## 具体实施方式

[0052] 以下，基于附图对本发明的实施方式进行详细说明。

[0053] (振子)

[0054] 图1是示出本发明的实施方式的振子的结构的概略图，图1(a)是俯视图，图1(b)是沿图1(a)所示的A-A线的剖视图。图2是示出在本发明的实施方式的振子中使用的振动片的结构的概略图，图2(a)是俯视图，图2(b)是沿图2(a)所示的B-B线的剖视图。另外，在图1(a)中，为了方便说明振子1的内部结构，图示出卸下了盖部件56的状态。并且，在各图中，为了方便说明，作为相互垂直的3个轴，图示出X轴、Y轴及Z轴。而且，为了方便说明，在从Z轴方向观察时的俯视观察下，设+Z轴方向的面为上表面、-Z轴方向的面为下表面进行说明。

[0055] 如图1所示，振子1由振动片2、用于收纳振动片2的矩形的箱状的封装主体50、以及盖部件56构成，其中，盖部件56由玻璃、陶瓷、金属等制成。

[0056] 图1所示的振动片2由以下部分构成：具备基部12、第1、第2振动臂21、22、施重部24、25和支承臂23的振动基板10；设在该振动基板10上的驱动用的电极30；以及设在支承臂23的下表面的第1、第2导电盘37、38。

[0057] 如图1(b)所示，封装主体50以层叠第1基板51、第2基板52和安装端子45的方式形成。在第1基板51的外部底面具备多个安装端子45。并且，在第1基板51的上表面的规定位置处设有多个连接电极47，所述连接电极47经由未图示的贯通电极、层间配线而与安装端子45电导通。第2基板52是中央部被去除的环状体，设有用于收纳振动片2的腔室(内部空间)70。另外，腔室70内形成为大致真空的负压空间。通过将内部空间形成为真空，粘性阻力变小，因此振动片2能够稳定地振动。

[0058] 收纳在封装主体50的腔室70内的振动片2以使设于支承臂23的下表面的第1、第2导电盘37、38与设于封装主体50的第1基板51的上表面的2个连接电极47分别对应的方式进行对位，并借助接合部件42进行接合。接合部件42例如使用由金属或焊料等形成的连接盘或导电性粘接剂等导电性的接合部件，从而能够在实现电连接的同时进行机械的接合。

[0059] 振动基板10是晶体材料，例如，作为压电基板，由石英基板特别是Z切石英板构成。由此，振动片2能够发挥优异的振动特性。Z切石英板是将石英的Z轴(光轴)作为厚度方向的石英基板。优选Z轴与振动基板10的厚度方向一致，但是，从减小常温附近的频率温度变化的观点出发，形成为相对于厚度方向稍稍(例如，大约小于15°)倾斜。

[0060] 另外，振动基板10不限于石英基板，在对振动片进行压电驱动的情况下，存在铌酸锂( $\text{LiNbO}_3$ )、钽酸锂( $\text{LiTaO}_3$ )、四硼酸锂( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ )、铌酸钾( $\text{KNbO}_3$ )、磷酸镓( $\text{GaPO}_4$ )、硅酸镓镧( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ )等。

[0061] 此外，在对振动片进行静电驱动的情况下，存在单晶硅、多晶硅等。

[0062] 封装主体50的第1基板51和第2基板52由具有绝缘性的材料构成。作为这样的材

料,没有特别限定,例如可以使用氧化物类陶瓷、氮化物类陶瓷、碳化物类陶瓷等各种陶瓷。并且,对于在封装主体50中设置的各电极、端子或者将它们电连接起来的配线图案和层内配线图案等,一般是通过丝网印刷将钨(W)、钼(Mo)等金属配线材料印刷到绝缘材料上进行烧制,并在其上实施镍(Ni)、金(Au)等的镀覆来设置的。

[0063] 盖部件56优选由透过光的材料、例如硼硅玻璃等构成,并利用密封部件58进行接合,由此将封装主体50的腔室70内气密地密封。由此,在封装主体50的盖密封后,从外部向振动片2的末端附近照射激光,使设在这里的电极一部分蒸发,由此能够通过质量削减方式进行频率调整。另外,在不进行这样的频率调整的情况下,盖部件56可以由可伐合金等金属材料形成。

[0064] (振动片)

[0065] 以上,对振子1的结构进行了简单说明。接下来,参照图2对振动片2进行详细说明。

[0066] 如图2所示,振动片2的振动基板10具有:基部12,其具有面向第1方向即Y轴方向的第一端面6和第二端面7;第一、第二振动臂21、22,它们从基部12向+Y轴方向突出,并且在第二方向即X轴方向上排列设置;以及支承臂23,其从基部12的第一端面6向+Y轴方向突出,并且位于第一、第二振动臂21、22之间。

[0067] 第一、第二振动臂21、22在X轴方向上排列设置,并分别从基部12向+Y轴方向延伸(突出)。并且,在第一、第二振动臂21、22的末端设有施重部24、25。通过设置这样的施重部24、25,能够实现振动片2的小型化,并且能够降低第一、第二振动臂21、22的弯曲振动的频率。另外,施重部24、25可以根据需要而具有多个宽度,也可以省略。

[0068] 并且,第一、第二振动臂21、22在主面的正反的各个主面上设有开放的有底的槽28a、28b、29a、29b。这些槽28a、28b、29a、29b以沿Y轴方向延伸的方式设置,并形成为彼此相同的形状。因此,如图2(b)所示,第一、第二振动臂21、22形成为大致“H”状的横截面形状。

[0069] 通过形成这样的槽28a、28b、29a、29b,由弯曲振动产生的热难以扩散(热传导),从而在弯曲振动频率(机械弯曲振动频率)f比热弛豫频率 $f_0$ 大的区域( $f > f_0$ )即隔热区域中,能够抑制热弹性损失。另外,可以根据需要设置槽28a、28b、29a、29b,也可以省略。

[0070] 支承臂23从基部12向+Y轴方向延伸,并且位于第一、第二振动臂21、22之间。支承臂23为长条形状,在长度方向的整个区域内宽度(X轴方向的长度)大致恒定。并且,在支承臂23的下表面设有第一、第二导电盘37、38,它们用于与设于封装主体50的连接电极47电连接。而且,在支承臂23和基部12之间设有缩窄部18、19,以便减少基部12的振动向支承臂23的传递。

[0071] (小型化)

[0072] 接下来,对作为课题的振动片2(振子1)的小型化进行详细说明。

[0073] 图3是对振子的等温区域和隔热区域进行说明的示意图。

[0074] 从外部经由安装端子45、连接电极47、接合部件42、第一、第二导电盘37、38、电极30对将Z切石英板作为振动基板10的振子1施加驱动信号,由此,振动片2以规定的频率(例如,32.768kHz)进行振荡(谐振)。

[0075] 振动片2被设定为机械振动频率f比热弛豫频率 $f_0$ 大( $f > f_0$ )。由此,振动片2在隔热区域中进行弯曲振动。

[0076] 这里,对隔热区域进行概略的说明。图3是对隔热区域进行说明的示意图。

[0077] 一般而言,关于进行弯曲振动的振动体的热弹性损失(因在弯曲振动的振动片的压缩部处的温度上升和拉伸部处的温度降低之间发生的热传导而产生的振动能量的损失),在弯曲振动模式的振动片中,振动频率f在与弛豫频率 $f_m = 1 / (2 \times \pi \times \tau)$ (其中,式中 $\pi$ 是圆周率,若将e设为纳皮尔常数,则 $\tau$ 是温度差经过热传导而成为 $e^{-1}$ 倍所需的弛豫时间)相等时,达到最大。

[0078] 一般,已知利用下式(1)求出振动臂为平板结构时的弛豫频率 $f_0$ 。

$$f_0 = (\pi \times k) / (2 \times \rho \times C_p \times a^2) \dots (1)$$

[0080] 这里, $\pi$ 是圆周率,k是振动臂的振动方向(弯曲振动方向)的导热系数[W/(m×K)], $\rho$ 是振动臂的质量密度[kg/m<sup>3</sup>], $C_p$ 是振动臂的热容[J/(kg×K)](heat capacity per unit mass at constant pressure,恒压下每单位质量的热容),a是振动臂的振动方向(弯曲振动方向)的宽度[m]。

[0081] 一般表示该Q值与频率的关系时,如图3示出的线C所示。在图3中,Q值为极小值时的频率是热弛豫频率 $f_0$ 。

[0082] 而且,在振动臂为平板结构的情况下,以 $f/f_0 = 1$ 为界,振动频率f比热弛豫频率 $f_0$ 大、频率比高于1的区域( $1 < f/f_0$ )为隔热区域,频率比低于1的区域( $1 > f/f_0$ )为等温区域。

[0083] 另外,若把在振动臂的处于正反关系的两个主面(面向与弯曲振动的方向垂直的方向的2个主面)中的至少一方上形成有槽的结构的情况下热弛豫频率设为 $f_1$ ,则以 $f/f_1 = 1$ 为界,振动频率f比热弛豫频率 $f_1$ 大、频率比高于1的区域( $1 < f/f_1$ )为隔热区域,频率比低于1的区域( $1 > f/f_1$ )为等温区域。

[0084] 另外,在振动臂的处于正反关系的两个主面中的至少一方上形成有槽的结构的情况下,在弯曲振动的振动片的压缩部处的温度上升和拉伸部处的温度降低之间产生的热的流动路径比平板结构的情况长,因此上述弛豫时间也变长。即,热弛豫频率 $f_1$ 比平板结构的热弛豫频率 $f_0$ 小( $f_1 < f_0$ )。从而, $f_1 < (f_0 \times f_1)^{1/2} < f_0$ 的关系成立。因此,在振动臂形成为平板结构的情况下,优选满足 $1 < f/f_0$ 的关系(隔热区域),在振动臂的正反主面中的至少一方上形成有槽的结构的情况下,优选满足 $1 < f/f_1$ 的关系(隔热区域),进一步优选满足 $f > (f_0 \times f_1)^{1/2}$ 的关系,最优选满足 $1 < f/f_0$ 的关系。

[0085] 通过满足该关系,振动片2的第1、第2振动臂21、22所产生的热弹性损失变小。

[0086] 另外,在振动臂的正反主面中的至少一方上形成有槽的结构的情况下,根据振动臂的宽度(弯曲振动的方向的长度)利用式(1)算出的 $f_0$ 和振动频率f的关系若满足 $f > f_0$ ,则自然满足 $1 < f/f_1$ 的关系。

[0087] 并且,在基部12,伴随着第1、第2振动臂21、22进行反复交替地彼此相离和接近这样的弯曲振动,基部12产生如下的弯曲振动:如图2(c)所示,以基部12的X轴方向的长度为梁的长度、且以基部12的Y轴方向的长度为梁的宽度(弯曲振动方向的长度)的弯曲振动体产生在Y轴方向上存在位移的弯曲振动。因此可知:由于基部12的第1端面6和第2端面7反复地进行压缩和拉伸而产生热弹性损失,成为具备振动片2的振子1的Q值的劣化的主要原因。

[0088] 因此,在本发明中,着眼于振动片2的基部12处的尺寸和热弹性损失的关系,想到了对因第1、第2振动臂21、22的弯曲振动而产生的基部12的弯曲振动所引起的热弹性损失、与将振子1的Q值换算成基部12的弯曲振动后的热弹性损失的关系进行比较。

[0089] 在基部12中,宽度(Y轴方向长度)最窄的部分因为刚性最低,因此弯曲变形最大,

所以是Q值的劣化最大的部分,即:在该部分的宽度方向的两端部交替施加压缩变形和拉伸变形而产生热量,该热量扩散而产生的热弹性损失导致Q值的劣化最大。如图2(c)所示,设想具有与基部12的宽度最窄的部分的宽度Wb的方向相同的方向的宽度的假想的梁13,将设定成该假想的梁的弯曲振动的Q值与振子1的整体的Q值相等的假想梁的宽度定义为We,建立关于其与假想梁的弯曲振动的热弛豫频率 $f_{0e}$ 的关系式,通过实现宽度Wb和假想的梁的宽度We(以下,称为有效宽度)的比(Wb/We)的最优化,减少了与振动片2的小型化相伴的Q值的劣化。

[0090] 下式(2)是表示振子1整体的Q值的式子,下式(3)是利用上式(1)来表示使Q值为极小值时的频率即热弛豫频率 $f_{0e}$ 的式子。

$$[0091] Q = \{(\rho \times C_p) / (c \times \alpha^2 \times \Theta)\} \times [ \{1 + (f/f_{0e})^2\} / (f/f_{0e}) ] \cdots (2)$$

$$[0092] f_{0e} = (\pi \times k) / (2 \times \rho \times C_p \times We^2) \cdots (3)$$

[0093] 这里,We是有效宽度(假想梁的宽度)[m],f是由振子(将振动片搭载在封装中的状态)得到的实际的振动频率[Hz], $f_0$ 是振子的有效的热弛豫频率(假想梁的热弛豫频率)[Hz],Q是由振子得到的实际的Q值。

[0094] 根据式(2)、(3)求得下式(4)。根据该式(4)可知,Q值是We的关系式。

$$[0095] Q = \{(\rho \times C_p) / (c \times \alpha^2 \times \Theta)\}$$

$$[0096] \times [ \{1 + (2 \times \rho \times C_p \times We^2 \times f / (\pi \times k))^2\}$$

$$[0097] / (2 \times \rho \times C_p \times We^2 \times f / (\pi \times k)) ] \cdots (4)$$

[0098] 并且,以下常数是若材料确定则(若石英的切角确定则根据与晶轴的关系)唯一确定的常数, $\rho$ 是质量密度[kg/m<sup>3</sup>], $C_p$ 是热容[J/(kg×K)],c是在面内与Wb的方向垂直的方向上的弹性常数[N/m<sup>2</sup>], $\alpha$ 是在面内与Wb的方向垂直的方向上的热膨胀系数[1/K], $\Theta$ 是环境温度[K],k是Wb的方向上的导热系数[W/(m×K)]。

[0099] 从而,在式(2)、(3)中,未知的仅有We,因此能够根据该式(4)算出有效宽度We。

[0100] 接下来,使用有限元法的数值分析对使振动片2的基部12的Wb尺寸变化而试制出的振子1的Q值和We的相关性进行调查,研究Wb/We的最优化。

[0101] 图4是示出振子的数值分析条件和特性结果的图。并且,图5是示出数值分析出的振子的相对于Wb/We的Q值的图。

[0102] 另外,振子的数值分析条件中Wb以外的尺寸如下。

$$[0103] L1 = 573 [\mu m]$$

$$[0104] L2 = Wb$$

$$[0105] L3 = 137 [\mu m]$$

$$[0106] W1 = 40 [\mu m]$$

$$[0107] W2 = 255 [\mu m]$$

$$[0108] W3 = 550 [\mu m]$$

$$[0109] T1 = 130 [\mu m]$$

$$[0110] T2 = 60 [\mu m]$$

[0111] 而且,式(2)和式(3)中的各参数如下。

[0112] 另外,振动基板10是Z切石英板(切角为0度),因此 $\alpha = \alpha_{11} = \alpha_{22}$ 、 $c = c_{11} = c_{22}$ 。

$$[0113] \rho = 2649 [kg/m^3]$$

[0114]  $C_p = 735.3718 [J / (kg \times K)]$

[0115]  $\alpha = \alpha_{11} = \alpha_{22} = 1.37 \times 10^{-5} [1/K]$

[0116]  $c = c_{11} = c_{22} = 8.67 \times 10^{10} [N/m^2]$

[0117]  $\Theta = 298.15 [K]$

[0118]  $k = 8.47 [W / (m \times K)]$

[0119] 并且,振动臂21、22的槽28a、28b、29a、29b的形状是以考虑到湿法蚀刻时的各向异性的形状进行分析的。

[0120] 根据图4和图5可知,使基部12的Wb的尺寸在25~200μm内变化的情况下,Q值在1484~9018的范围内较大地变化,Wb/We为大约1以上时,Q值为大约8500以上,Wb/We为大约1.3以上时,Q值几乎固定在大约9000。

[0121] 根据这些结果,与具有Wb(=L2)为200μm的全长(L1+L2+L3)910μm的现有设计的振动片2的振子1相比,通过使Wb/We处于0.81以上1.70以下的范围,能够得到Wb处于50μm~116μm的范围、Q值处于6672~8971的范围、全长处于760μm~826μm的范围的振动片2。这具有如下效果:Q值可取值为能够让振荡电路进行稳定的振荡的振动片的Q值,优选Q值为6600以上,并且能够得到与现有设计的振子相比,全长实现了9.2%~16.5%的小型化的振子1。

[0122] 并且,通过使Wb/We处于0.91以上1.30以下的范围,能够得到Wb处于约60μm~89μm的范围、Q值处于7867~8882的范围、全长处于770μm~799μm的范围的振动片2。这具有如下效果:Q值为能够让振荡电路进行更稳定的振荡的7800以上,并且能够得到与现有设计的振子相比,全长实现了12.2%~15.4%的进一步小型化的振子1。

[0123] 而且,通过使Wb/We处于1.00以上1.20以下的范围,能够得到Wb处于70μm~80μm的范围、Q值处于约8500~8800的范围、全长处于约780μm~790μm的范围的振动片2。这具有如下效果:Q值为能够让振荡电路进行更稳定的振荡的8500以上,并且能够得到与现有设计的振子相比,全长实现了约13.2%~14.3%的进一步小型化的振子1。

[0124] 另外,在振子1的振动频率f比将基部12看做弯曲振动体时的热弛豫频率 $f_{0b}$ 高的隔热区域中,优选Wb/We处于上述范围。

[0125] 这里, $f_{0b}$ 是替代式(1)中的a而将Wb代入所得到的热弛豫频率,可以用下式(5)表示。

$$[0126] f_{0b} = (\pi \times k) / (2 \times \rho \times C_p \times Wb^2) \cdots (5)$$

[0127] 并且,在振子1的振动频率f比所述热弛豫频率 $f_{0b}$ 低的等温区域中,在图3中代替 $f_0$ 而置换成 $f_{0b}$ 来考虑可知,若将振动频率f固定来考虑,则热弛豫频率 $f_{0b}$ 越大,热弹性损失越小,Q值越大。即,与热弛豫频率 $f_{0b}$ 成倒数关系的热弛豫时间越小,即热的传递路径Wb越小,热弹性损失越小,Q值越大,因此优选Wb/We处于1.00以下的范围。

[0128] (电极结构)

[0129] 以上,对振动片2(振子1)的小型化进行了说明。接下来,对在振动片2的振动基板10上设置的电极30进行说明。

[0130] 图6是示出在本发明的实施方式的振子中使用的振动片的电极结构的俯视图,图6(a)是上表面的图,图6(b)是图6(a)的下表面的图(透视图)。并且,图7是沿图6(a)所示的C-C线的剖视图。

[0131] 如图6及图7所示,电极30具有:多个第1驱动用电极31;第1导电盘37;连接所述多

个第1驱动用电极31和第1导电盘37的配线35a、35b、35c、35d、35e、35f；多个第2驱动用电极32；第2导电盘38；以及连接所述多个第2驱动用电极32和第2导电盘38的配线36a、36b、36c、36d、36e、36f。

[0132] 第1驱动用电极31设在第1振动臂21的各槽28a、28b的内表面和第2振动臂22的各侧面34a、34b。槽28a的第1驱动用电极31经由跨过基部12的上表面和侧面而设置的配线35c，与侧面34b的第1驱动用电极31连接，槽28b的第1驱动用电极31经由跨过基部12的下表面和侧面而设置的配线35e，与侧面34b的第1驱动用电极31连接。另外，配线35c、35e在基部12的侧面相连接。

[0133] 接着，侧面34b的第1驱动用电极31经由设于施重部25的配线35f而与侧面34a的第1驱动用电极31连接。并且，侧面34a的第1驱动用电极31经由设于基部12的上表面和下表面的配线35b和配线35d而与设于支承臂23的上下表面和侧面的配线35a连接。而且，配线35a与设于支承臂23的下表面的第1导电盘37电连接。

[0134] 另一方面，第2驱动用电极32设在第2振动臂22的各槽29a、29b的内表面和第1振动臂21的各侧面33a、33b。槽29a的第2驱动用电极32经由设于基部12的上表面的配线36b而与侧面33b的第2驱动用电极32连接，槽29b的第2驱动用电极32经由设于基部12的下表面的配线36c而与侧面33b的第2驱动用电极32连接。

[0135] 接着，设于侧面33b的第2驱动用电极32经由设于施重部24的配线36d而与设于侧面33a的第2驱动用电极32连接。并且，基部12的上表面的配线36b经由设于基部12的上表面的配线36e，基部12的下表面的配线36c经由设于基部12的下表面的配线36f，而分别与设于支承臂23的上下表面和侧面的配线36a连接。而且，配线36a与设于支承臂23的下表面的第2导电盘38电连接。

[0136] 由此，从第1、第2导电盘37、38通过各配线对第1、第2驱动用电极31、32施加驱动电压，由此在振动片2的振动臂内适当地产生电场，2个第1、第2振动臂21、22以相互接近、离开的方式以规定的频率在大致面内方向(XY平面方向)上进行振动。

[0137] 作为电极30的构成材料，没有特别限定，例如可以使用金(Au)、金合金、铂(Pt)、铝(Al)、铝合金、银(Ag)、银合金、铬(Cr)、铬合金、铜(Cu)、钼(Mo)、铌(Nb)、钨(W)、铁(Fe)、钛(Ti)、钴(Co)、锌(Zn)、锆(Zr)等金属材料、氧化铟锡(ITO)等导电材料。

[0138] (制造方法)

[0139] 以上，对振动片2的电极结构进行了说明。这样的振动片2可以通过以下方式制造。另外，以下说明的制造方法只是1个例子，也可以通过其他制造方法制造振动片2。

[0140] 图8是用于对本发明的实施方式的振子1中使用的振动片2的制造方法进行说明的、设有槽28a、28b、29a、29b的第1、第2振动臂21、22和支承臂23的剖视图。

[0141] 首先，如图8(a)所示，准备振动基板10。振动基板10可以通过对Z切石英基板实施振动片外形形状的构图，并进行湿法蚀刻来制造。

[0142] 接下来，如图8(b)所示，例如，通过蒸镀或溅射等，在振动基板10的整个面上形成电极膜30a。

[0143] 然后，如图8(c)所示，在电极膜30a上涂布抗蚀剂膜40(正型光致抗蚀剂膜)，通过曝光/显影来进行构图，由此形成与电极30的形状对应的抗蚀剂图案。

[0144] 接下来，对从抗蚀剂图案中露出的部分的电极膜30a进行湿法蚀刻而将其去除后，

去除抗蚀剂图案,由此形成电极30。由此,如图8(d)所示,得到形成有电极30的振动片2。

[0145] (振动片的变形例)

[0146] 接下来,对在本发明的实施方式的振子1中使用的振动片2的变形例进行说明。

[0147] 图9是示出在本发明的实施方式的振子中使用的振动片的变形例的俯视图,图9(a)是变形例1,图9(b)是变形例2,图9(c)是变形例3,图9(d)是变形例4。

[0148] 图10是示出在本发明的实施方式的振子中使用的振动片的变形例的俯视图,图10(a)是变形例5,图10(b)是变形例6,图10(c)是变形例7,图10(d)是变形例8。

[0149] 以下,对于变形例,以与前述的实施方式的不同点为中心进行说明,对于相同的结构,标以相同的标号,对于相同的事项,省略其说明。

[0150] 图9(a)所示的变形例1的振动片2a在基部12a的第2端面7a侧具有朝向-Y轴方向宽度逐渐减小的宽度缩小部16a。通过具有这样的宽度缩小部16a,能够抑制第1、第2的振动臂21、22的弯曲振动的振动泄漏,能够得到具有高Q值的振动片2a。

[0151] 图9(b)所示的变形例2的振动片2b与变形例1同样,在基部12b的第2端面7b侧具有朝向-Y轴方向宽度逐渐减小的圆弧形的宽度缩小部16b,抑制了第1、第2振动臂21、22的弯曲振动的振动泄漏,因此能够得到具有高Q值的振动片2b。

[0152] 图9(c)所示的变形例3的振动片2c是支承基部12c的结构,是在第1、第2振动臂21、22之间不具有支承臂的结构,因此能够减小振动片2c的宽度(X轴方向)尺寸,能够得到宽度小的小型的振动片2c。

[0153] 图9(d)所示的变形例4的振动片2d与变形例3同样,是在第1、第2振动臂21、22之间不具有支承臂的结构,因此能够减小振动片2d的宽度(X轴方向)尺寸。并且,在基部12d的第一端面6d处具有朝向+Y轴方向宽度逐渐减小的圆弧形的宽度缩小部17d、而且在基部12d的第2端面7d处具有朝向-Y轴方向宽度逐渐减小的圆弧形的宽度缩小部16d,所以能够进一步抑制第1、第2振动臂21、22的弯曲振动的振动泄漏,能够具有高的Q值。因此,能够得到小型且具有高Q值的振动片2d。

[0154] 图10(a)所示的变形例5的振动片2e在基部12e的第一端面6e和第2端面7e处具有朝向+Y轴方向宽度逐渐减小的圆弧形的宽度缩小部17e和朝向-Y轴方向宽度逐渐减小的圆弧形的宽度缩小部16e,并且在第1、第2振动臂21、22之间具有支承臂23e,在支承臂23e的末端部设有支承部26e。因此,由于在基部12e上具有圆弧形的宽度缩小部16e、17e,并且能够对处于远离基部12e的位置的支承部26e进行支承和固定,因此能够进一步抑制第1、第2振动臂21、22的弯曲振动的振动泄漏,能够得到具有高Q值的振动片2e。

[0155] 图10(b)所示的变形例6的振动片2f的支承部26f形成为包围第1、第2振动臂21、22和基部12f的框状。因此,能够得到支承部26f被盖和封装基座夹持、且支承部26f兼用作未图示的封装的一部分的、平面尺寸与振动片2f相等的振子1。

[0156] 图10(c)所示的变形例7的振动片2g在基部12g的X轴方向的两端设有支承臂23g,因此能够对2个支承臂23g进行支承和固定,因此能够得到抗振动强度和抗掉落强度优异的振动片2g。

[0157] 图10(d)所示的变形例8的振动片2h与变形例6同样,支承部26h形成为包围第1、第2振动臂21、22和基部12h的框状。因此,能够得到支承部26h被盖和封装基座夹持、且支承部26h兼用作未图示的封装的一部分的、平面尺寸与振动片2h相等的振子1。

[0158] 并且,可以使用压电体材料以外的材料形成振动片。例如,也可以使用硅半导体材料等形成振动片。此外,振动片的振动(驱动)方式不限于压电驱动。除了使用压电基板的压电驱动型的振动片以外,在使用了静电的静电驱动型和利用了磁力的洛伦兹驱动型等的振动片中,也能够发挥本发明的结构及其效果。此外,在说明书或者附图中,对于至少一次与更广义的用语或同义的不同用语一起记载的用语,在说明书或者附图的任何地方都可以置换成该不同用语。

[0159] (电子器件)

[0160] 接下来,对应用了本发明的振子1的电子器件3进行说明。

[0161] 图11是示出本发明的电子器件的结构的概略图,图11(a)是俯视图,图11(b)是沿图11(a)所示的D-D线的剖视图。

[0162] 电子器件3由以下部分构成:振子1;具有用于驱动振子1的振荡电路的IC芯片(芯片部件)62;收纳振子1和IC芯片62的封装主体60;以及由玻璃、陶瓷、金属等制成的盖部件56。

[0163] 如图11(b)所示,封装主体60与本实施方式的振子1同样,以层叠第1基板51、第2基板52和安装端子45的方式形成。并且,封装主体60具有上表面敞开的腔室72。另外,收纳振子1和IC芯片62的腔室72内被气密密封成负压环境或氮气等惰性气体环境。

[0164] 在第1基板51的外部底面设有多个安装端子45。并且,安装端子45经由未图示的贯通电极、层间配线而与设置在第1基板51的上表面的连接电极46和连接端子48电导通。

[0165] 在封装主体60的腔室72内收纳有振子1和IC芯片62。振子1借助焊料或导电性粘接剂而固定于设在第1基板51的上表面的连接电极46。IC芯片62借助焊料或粘接剂等接合部件42而固定于第1基板51的上表面。并且,在腔室72中设有多个连接端子48。连接端子48通过键合线44与设于IC芯片62的上表面的连接端子64电连接。

[0166] IC芯片62具有用于控制振子1的驱动的驱动电路(振荡电路),当通过该IC芯片62驱动振动元件1时,能够获取规定频率的信号。

[0167] (电子设备)

[0168] 接下来,基于图12~图14对应用了本发明的振子1的电子设备进行详细说明。

[0169] 图12是示出作为具有本发明的振子的电子设备的移动型(或笔记本型)的个人计算机的结构的立体图。在该图中,个人计算机1100由具有键盘1102的主体部1104和具有显示部100的显示单元1106构成,显示单元1106经由铰链结构部可转动地支承于主体部1104。在这样的个人计算机1100中,内置有振子1。

[0170] 图13是示出作为具有本发明的振子的电子设备的便携电话机(也包括PHS)的结构的立体图。在该图中,便携电话1200具有多个操作按钮1202、听筒1204以及话筒1206,在操作按钮1202和听筒1204之间配置有显示部100。在这样的便携电话机1200中,内置有振子1。

[0171] 图14是示出作为具有本发明的振子的电子设备的数码照相机的结构的立体图。另外,在该图中还简单地示出与外部设备的连接。这里,通常的照相机利用被摄体的光像对银盐胶片进行感光,而数码照相机1300则利用CCD(Charge Coupled Device:电荷耦合器件)等摄像元件对被摄体的光像进行光电转换来生成摄像信号(图像信号)。

[0172] 在数码照相机1300的壳体(主体)1302的背面设置有显示部100,成为根据CCD的摄像信号进行显示的结构,显示部100作为将被摄体作为电子图像进行显示的取景器发挥功

能。并且，在壳体1302的正面侧(图中背面侧)设置有包括光学镜头(摄像光学系统)、CCD等的受光单元1304。

[0173] 当摄影者确认了显示在显示部100的被摄体像并按下快门按钮1306时，将该时刻的CCD的摄像信号传送到存储器1308进行存储。并且，在该数码照相机1300中，在壳体1302的侧面设置有视频信号输出端子1312和数据通信用的输入输出端子1314。

[0174] 并且，如图所示，根据需要，将电视监视器1430与视频信号输出端子1312连接，将个人计算机1440与数据通信用的输入输出端子1314连接。而且，成为通过规定的操作，将存储在存储器1308内的摄像信号输出到电视监视器1430或个人计算机1440的结构。在这样的数码照相机1300中，内置有振子1。

[0175] 另外，具有本发明的振子1的电子设备除了图12中的个人计算机(移动型个人计算机)、图13中的便携电话机、图14中的数码照相机以外，还可以应用于例如喷墨式排出装置(例如喷墨式打印机)、膝上型个人计算机、电视机、摄像机、录像机、车载导航装置、传呼机、电子记事本(也包含带通信功能的电子记事本)、电子词典、计算器、电子游戏设备、文字处理器、工作站、可视电话、保安用电视监视器、电子双筒望远镜、POS终端、医疗设备(例如电子体温计、血压计、血糖计、心电图计测装置、超声波诊断装置、电子内窥镜)、鱼群探测器、各种测定设备、计量仪器类(例如车辆、飞机、船舶的计量仪器类)、飞行模拟器等。

[0176] (移动体)

[0177] 接下来，对应用了本发明的振子1的移动体进行说明。

[0178] 图15是概略地示出作为本发明的移动体的一例的汽车的立体图。在汽车1500上搭载有振子1。振子1可广泛地应用于无钥匙门禁、防盗器、导航系统、空调、防抱死制动系统(ABS:Antilock Brake System)、安全气囊、轮胎压力监测系统(TPMS:Tire Pressure Monitoring System)、发动机控制器、混合动力汽车和电动汽车的电池监视器、车身姿态控制系统等的电子控制单元(ECU:electronic control unit)1510。

[0179] 以上，根据图示的实施方式对本发明的振子1、振动片2、电子器件3、电子设备以及移动体进行了说明，然而本发明不限于此，各部分的结构可以置换为具有相同功能的任意结构。并且，也可以向本发明附加其它任意的构成物。此外，还可以适当组合各实施方式。

[0180] 另外，在前述的实施方式和变形例中，作为振动片的构成材料使用了石英，但作为振动片的构成材料，不限于此，例如可以使用氮化铝(A1N)、铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)、钽酸锂(LiTaO<sub>3</sub>)、锆钛酸铅(PZT)、四硼酸锂(Li<sub>2</sub>b<sub>4</sub>O<sub>7</sub>)、硅酸镓镧(La<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>SiO<sub>14</sub>)等氧化物基板、或使氮化铝和五氧化二钽(Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)等压电体材料层叠到玻璃基板上而构成的层叠压电基板、或者压电陶瓷等。

[0181] 此外，可以使用压电体材料以外的材料形成振动片。例如，还可以使用硅半导体材料等形成振动片。此外，振动片的振动(驱动)方式不限于压电驱动。除了使用压电基板的压电驱动型的振动元件以外，在使用了静电的静电驱动型和利用了磁力的洛伦兹驱动型等的振动片中，也能够发挥本发明的结构及其效果。此外，在说明书或者附图中，对于至少一次与更广义的用语或同义的不同用语一起记载的用语，在说明书或者附图的任何地方都可以置换成该不同用语。

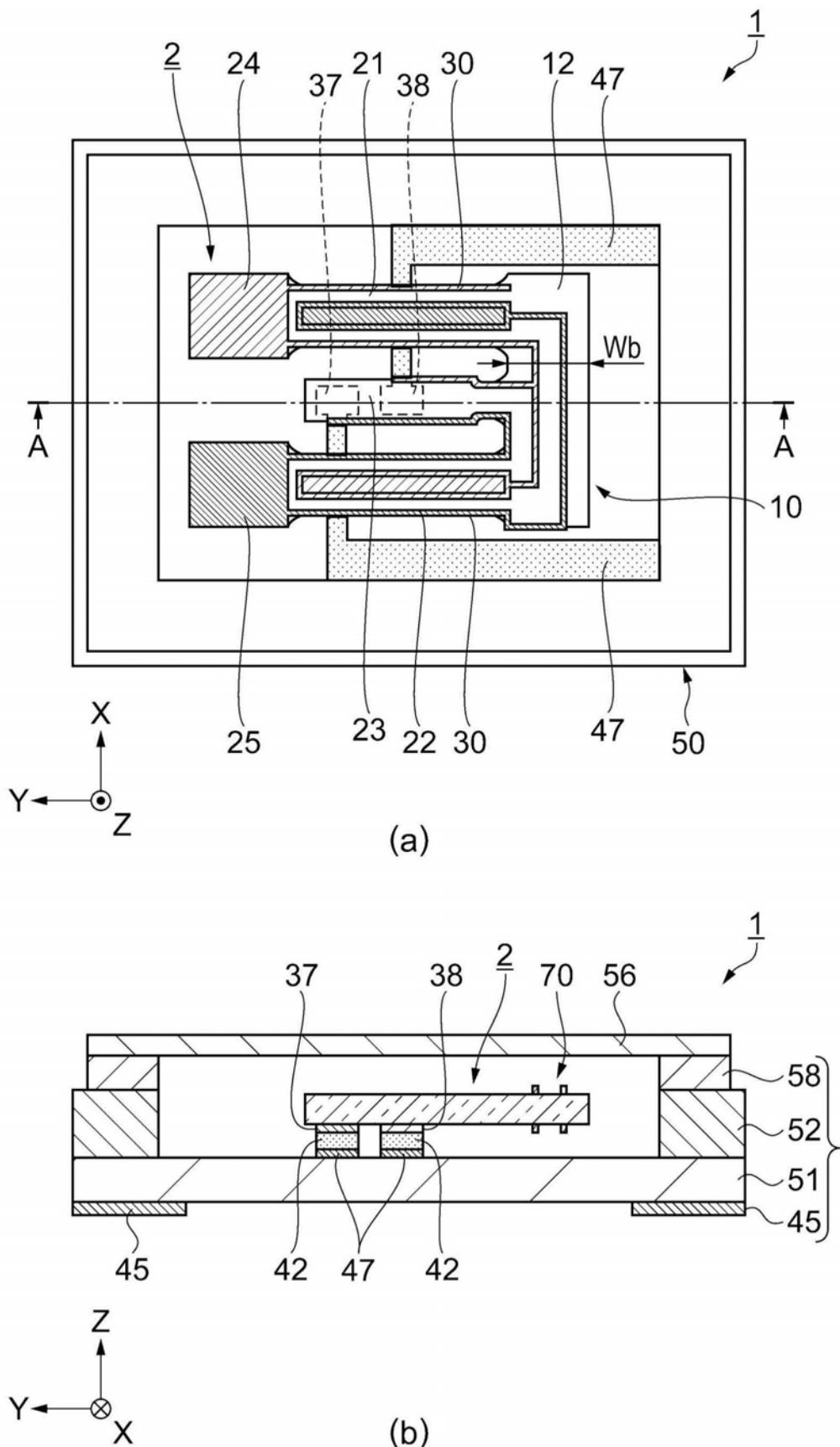


图1

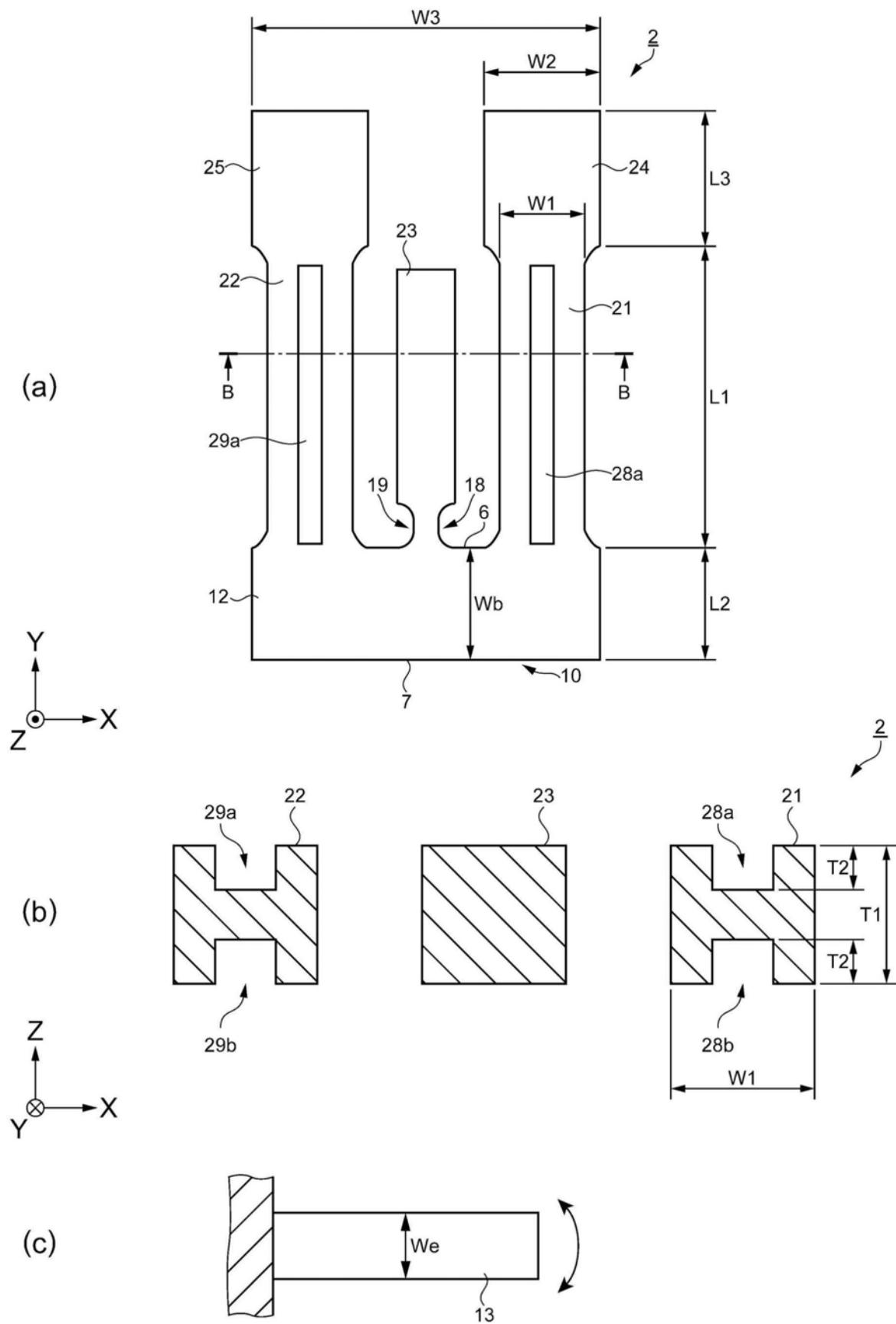


图2

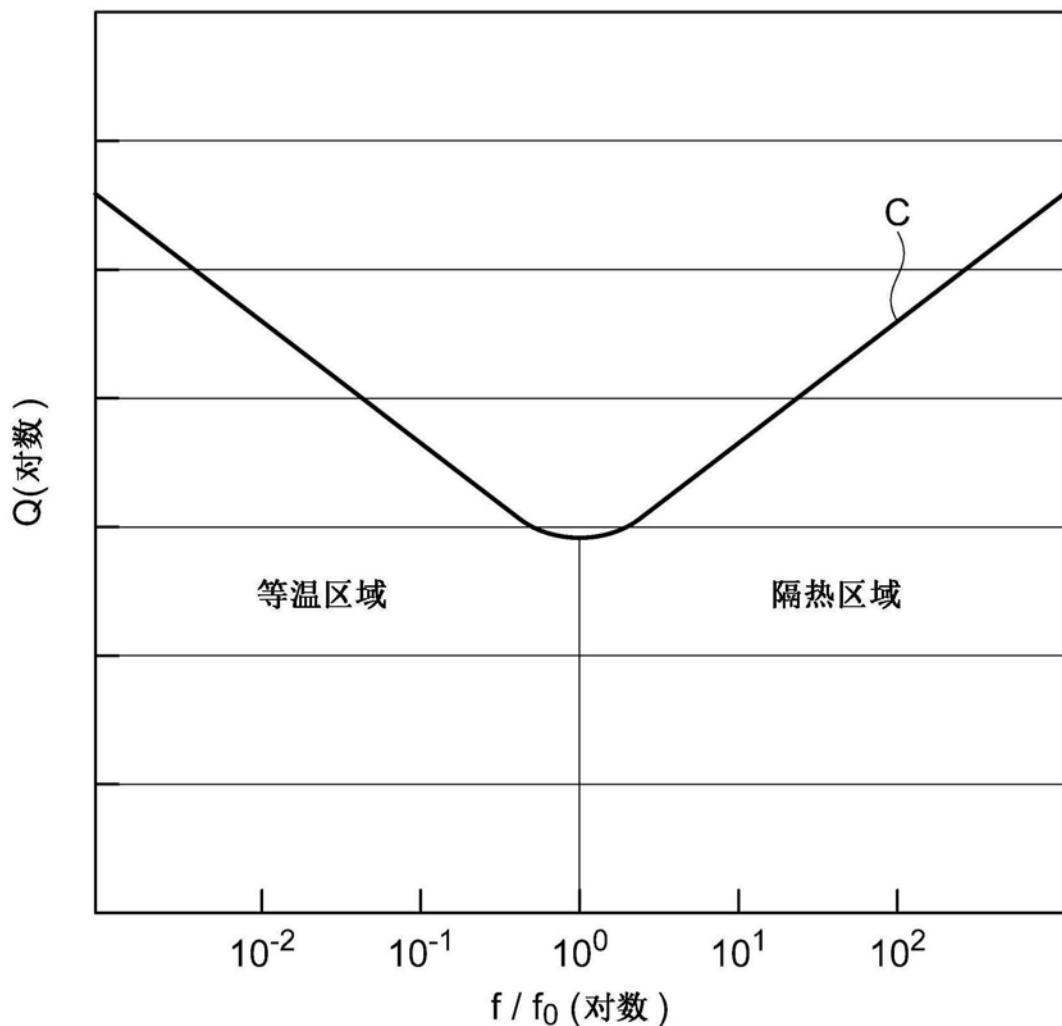


图3

$W_b [\mu m]$	$f [kHz]$	$Q$	$W_e [\mu m]$	$W_b / W_e$
25.0	20.101	1,484	34.0	0.74
35.0	25.382	3,434	47.6	0.73
40.0	27.104	4,639	53.8	0.74
50.0	29.359	6,672	62.1	0.81
60.0	30.643	7,867	66.0	0.91
70.0	31.401	8,467	67.6	1.03
80.0	31.873	8,823	68.5	1.17
90.0	32.176	8,888	68.5	1.31
100.0	32.381	8,952	68.5	1.46
150.0	32.793	9,011	68.3	2.20
200.0	32.895	9,018	68.2	2.93

图4

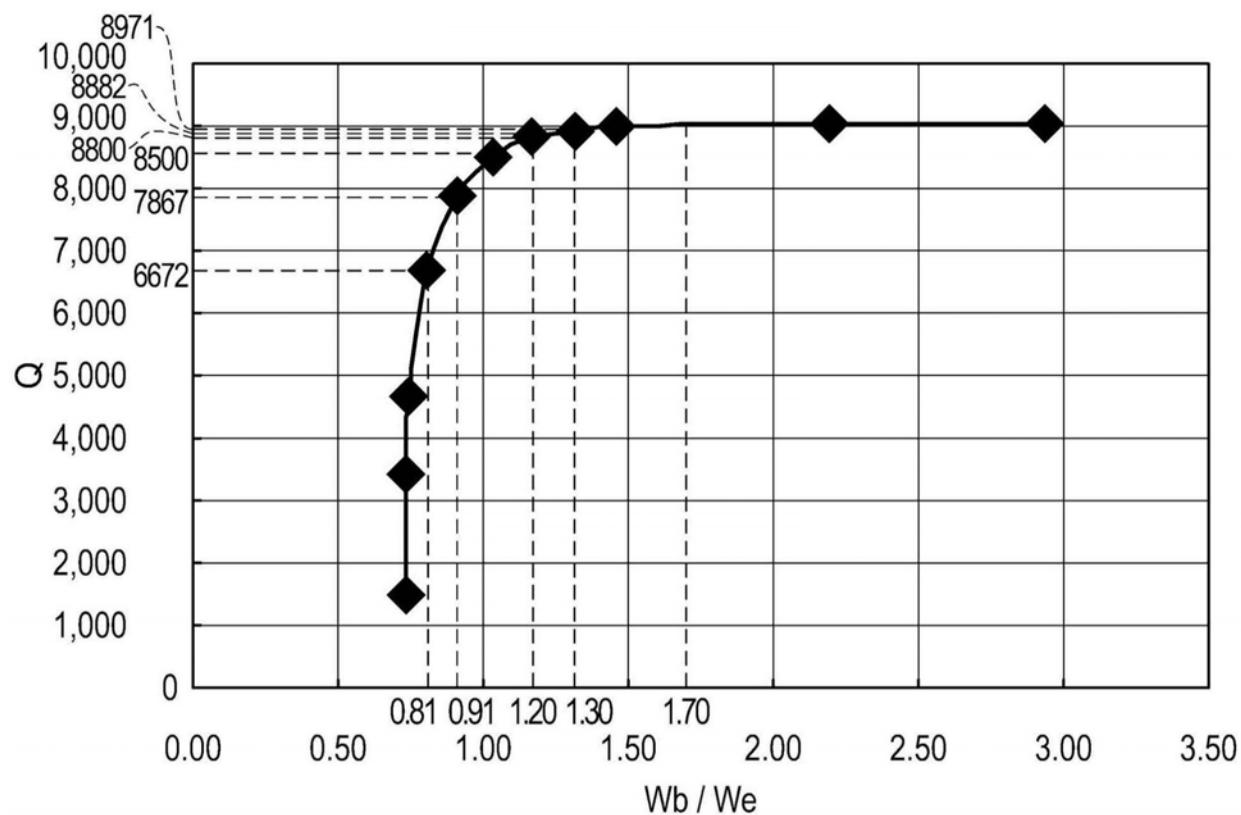
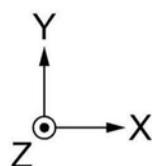
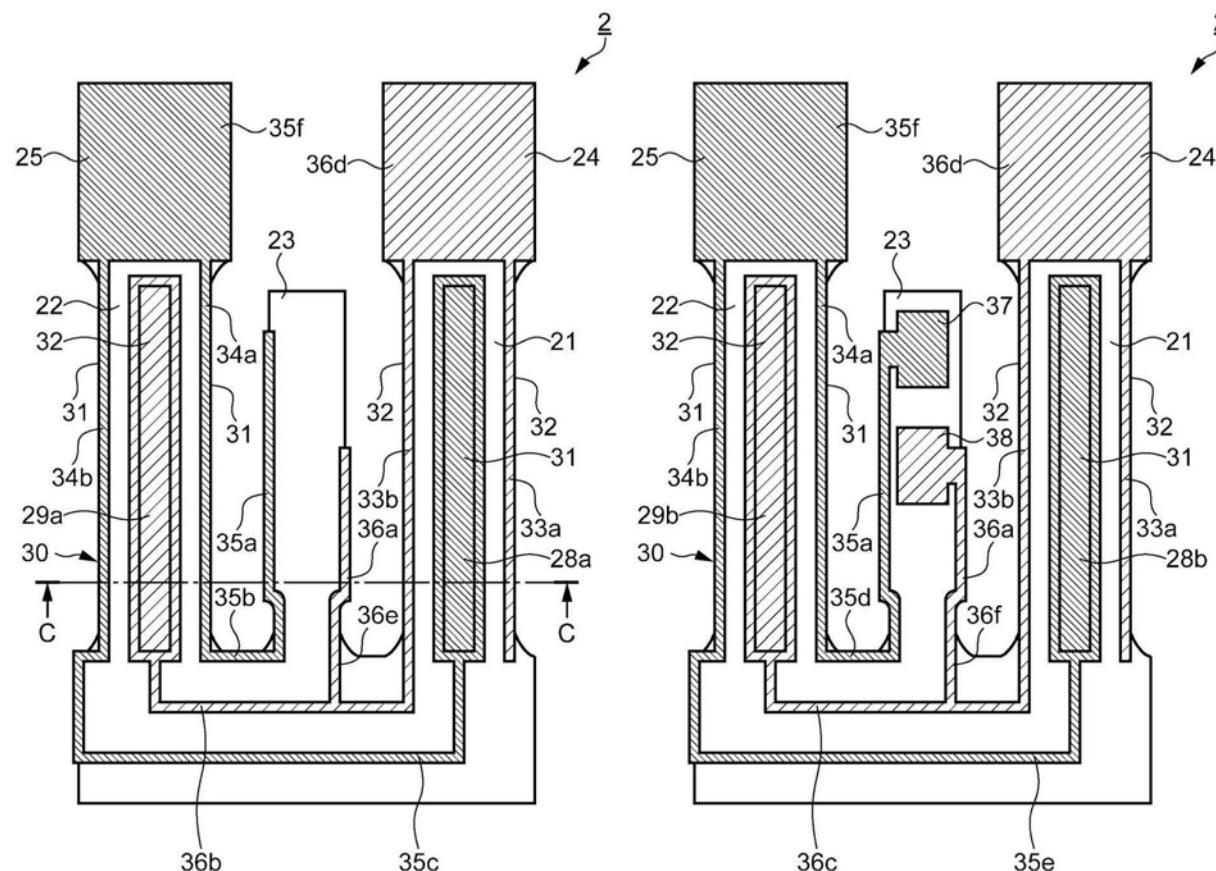
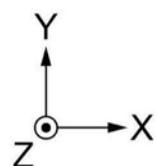


图5



(a)



(b)

图6

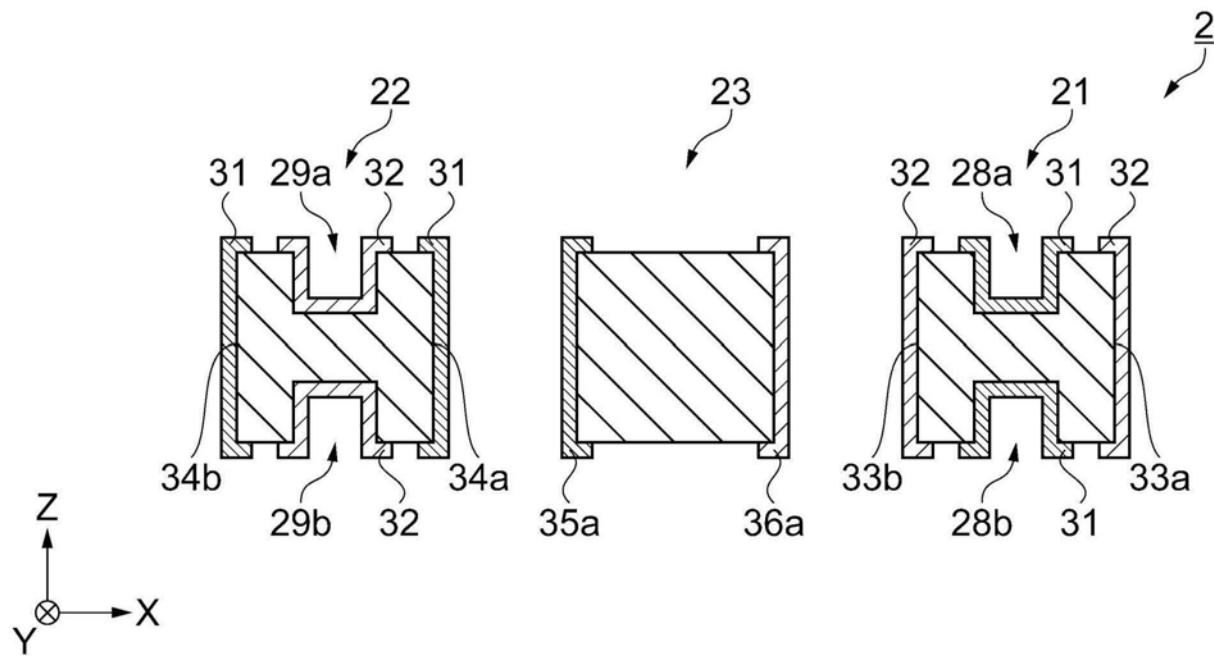


图7

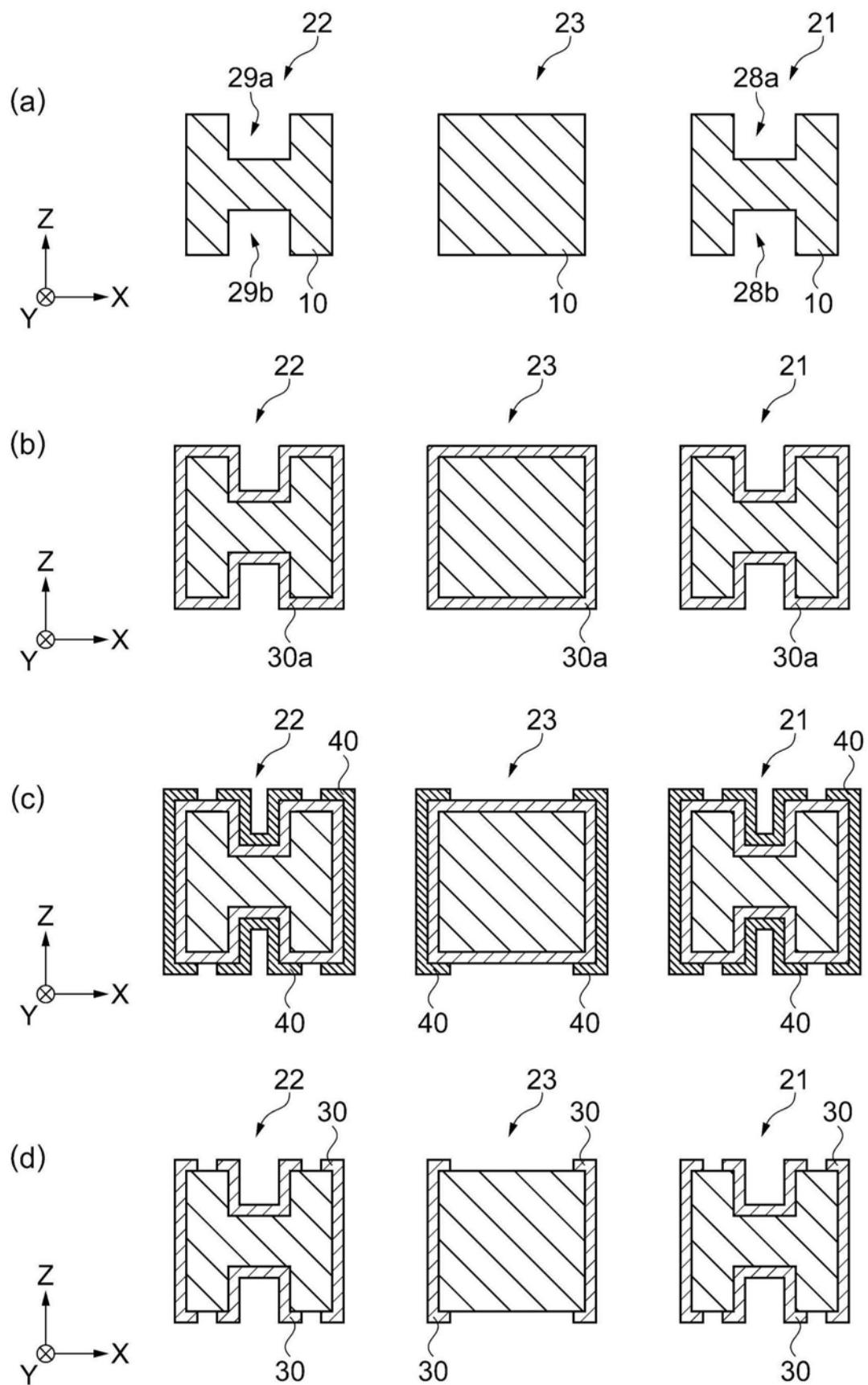


图8

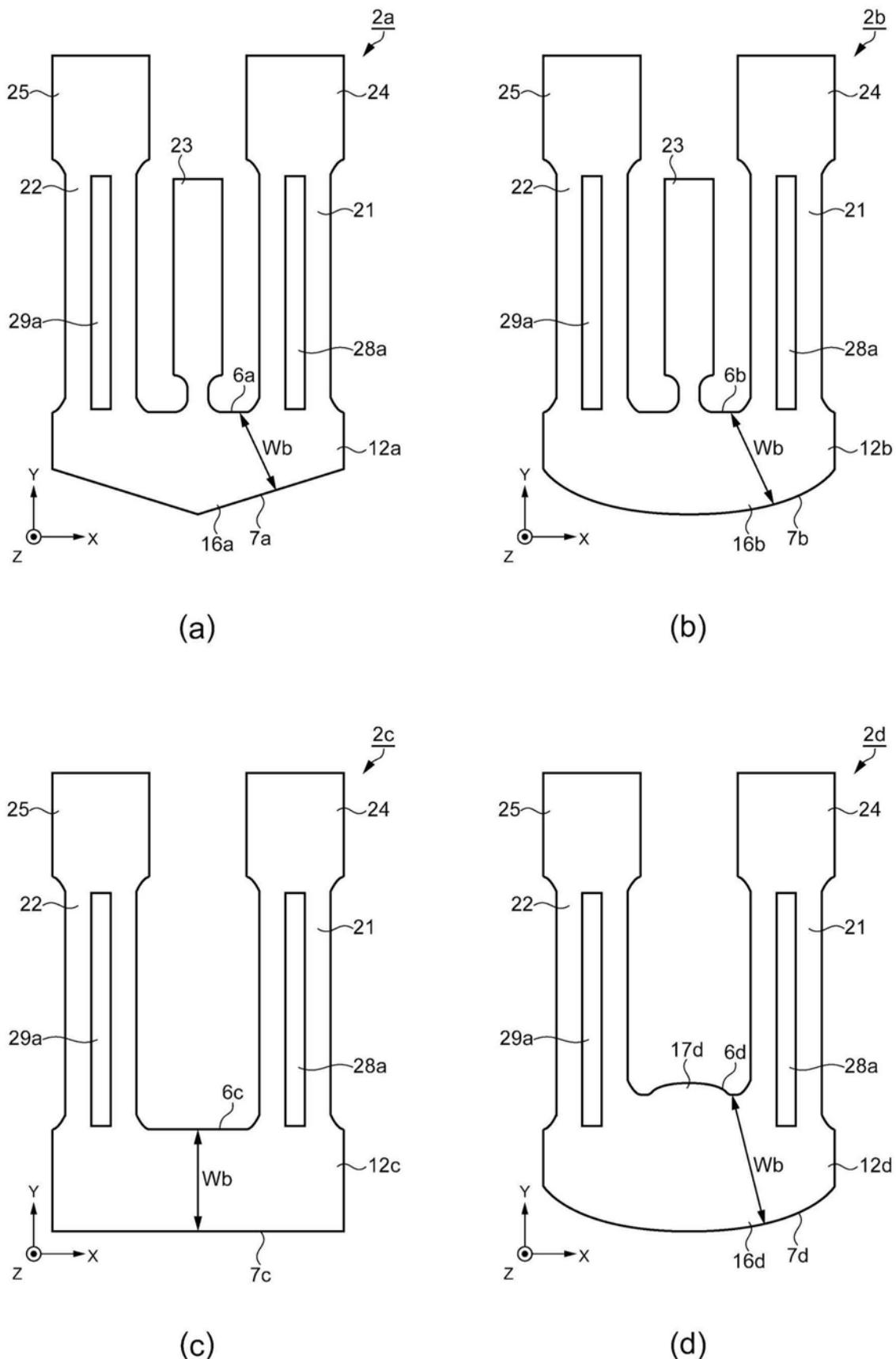


图9

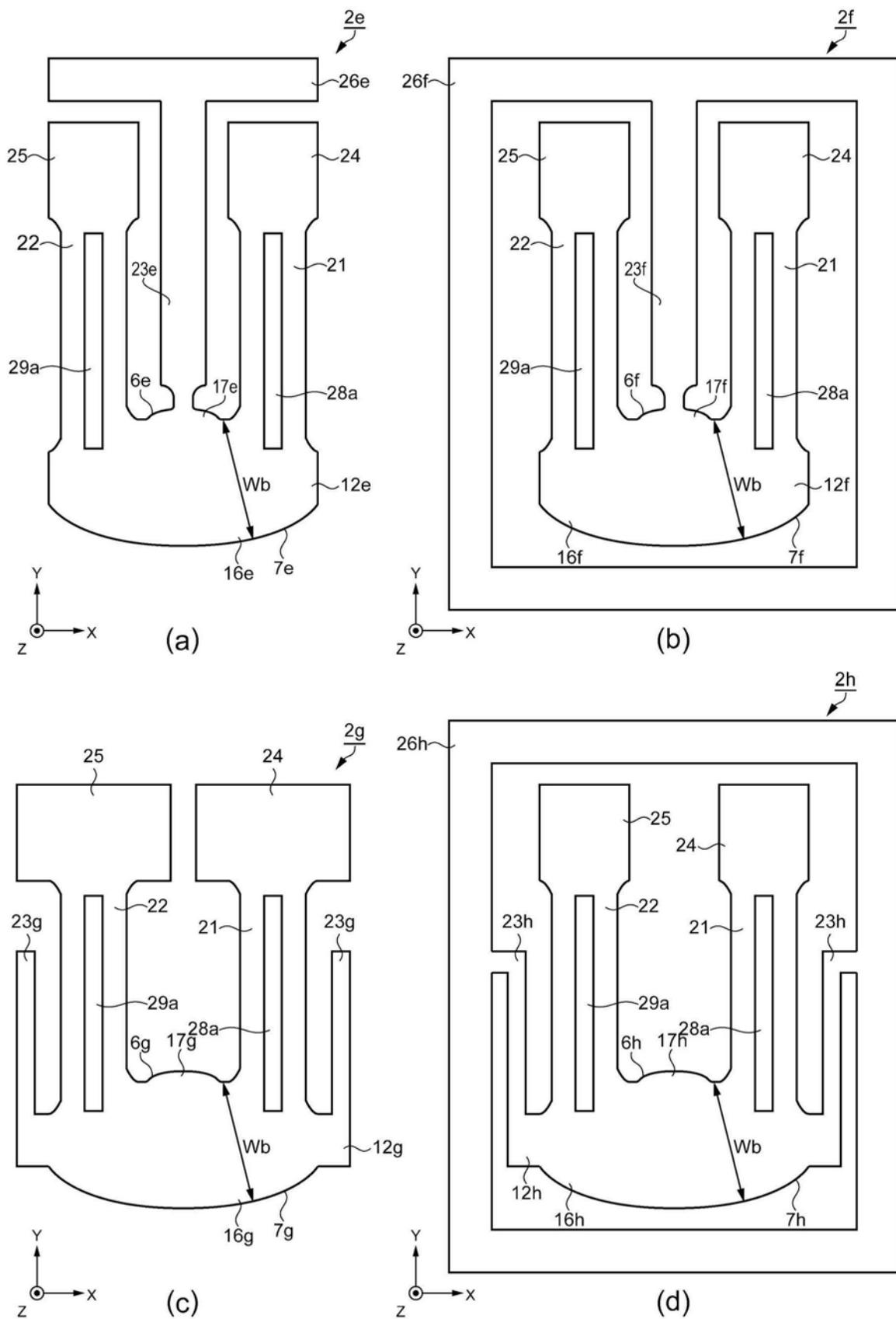
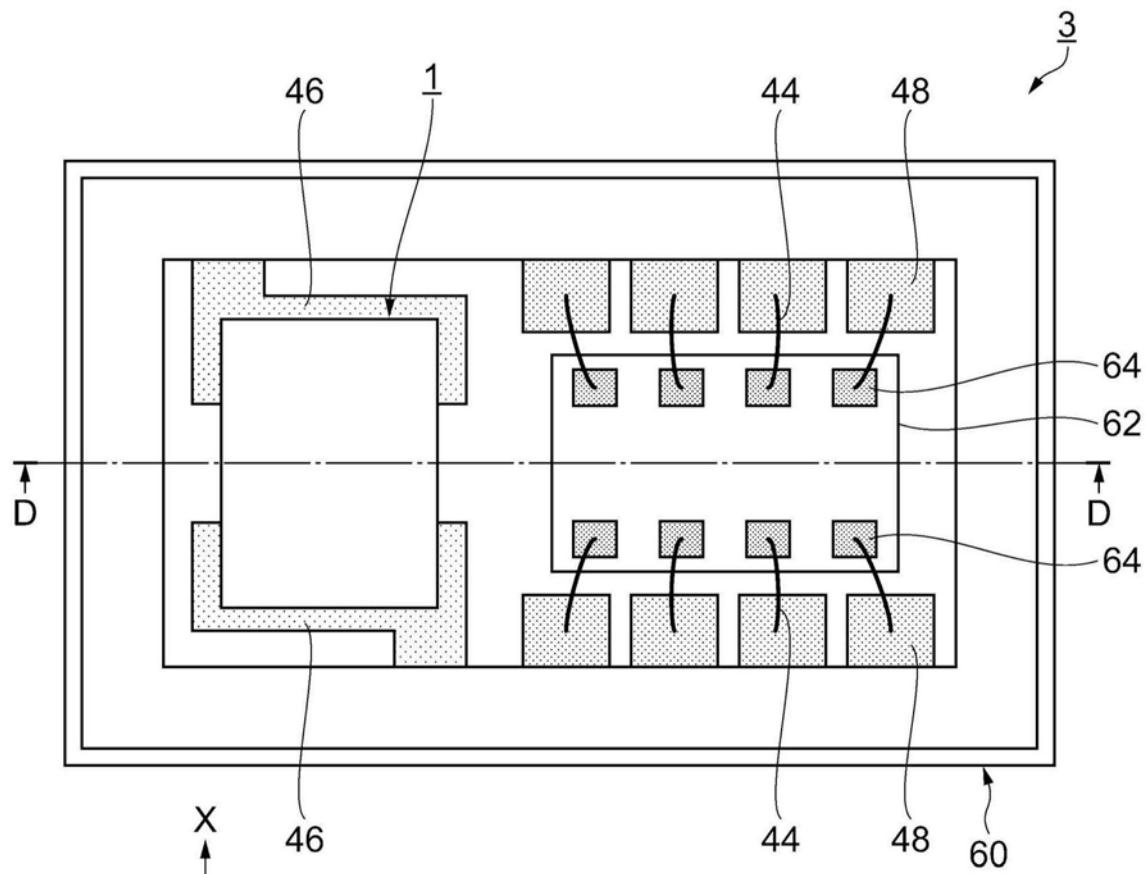
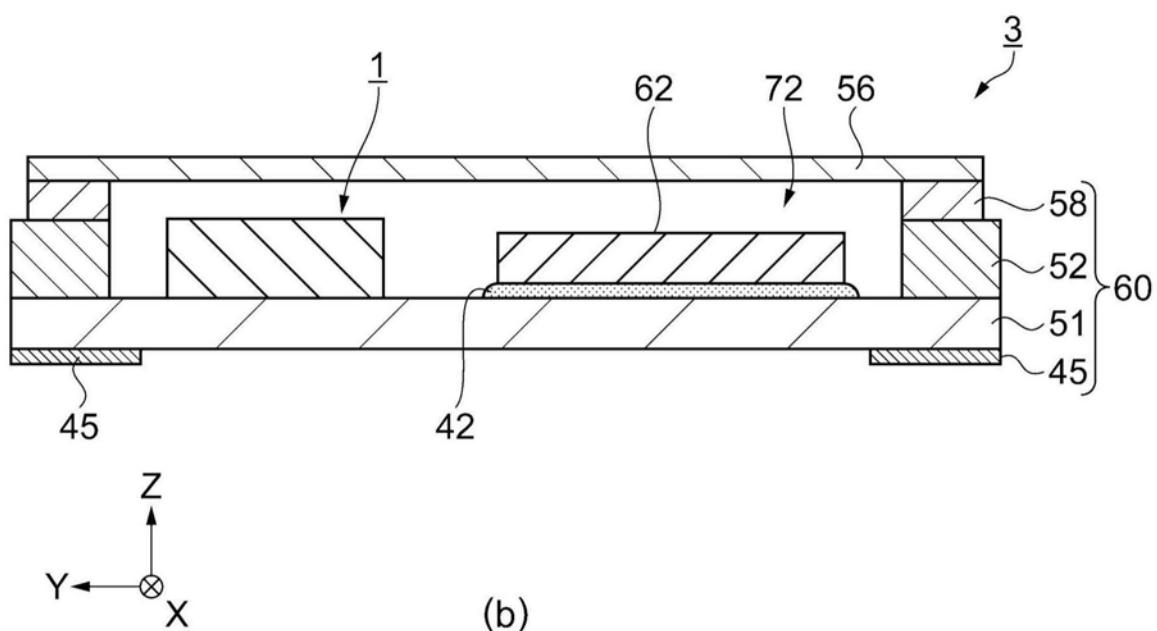


图10



(a)



(b)

图11

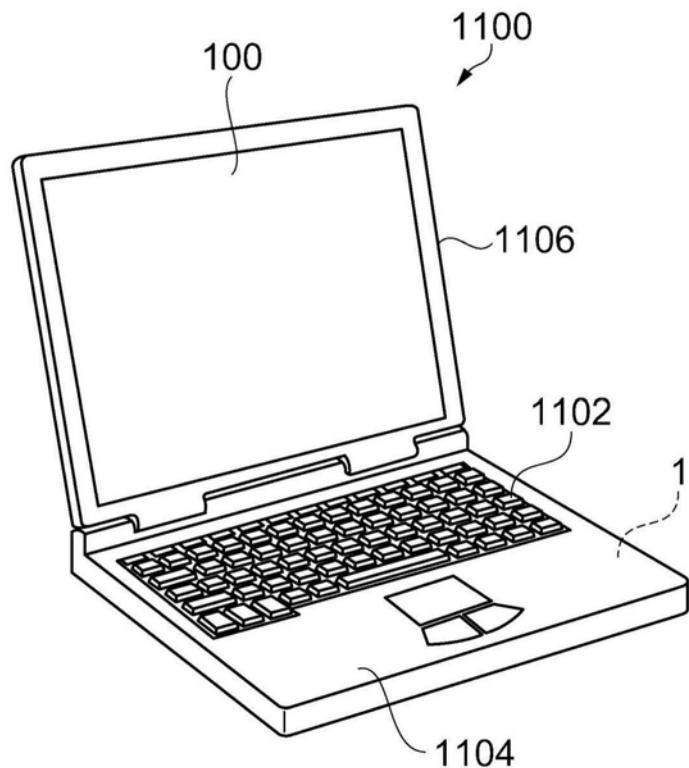


图12

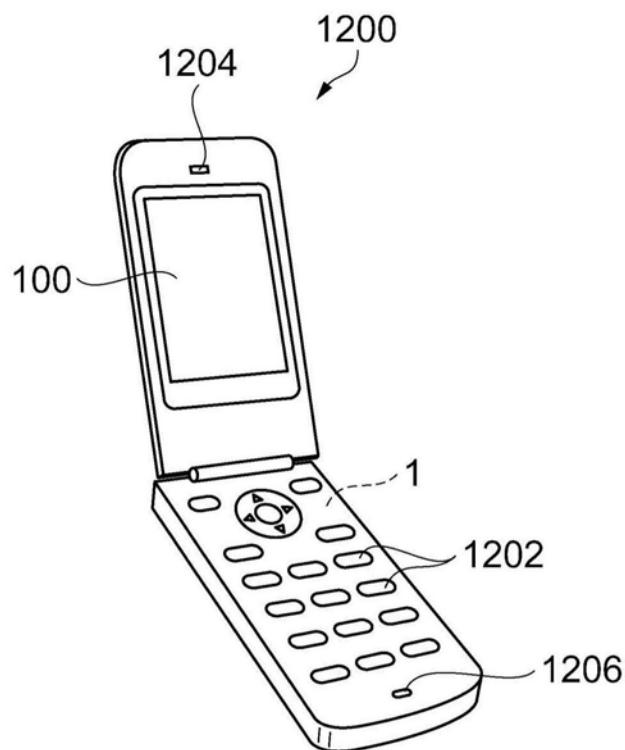


图13

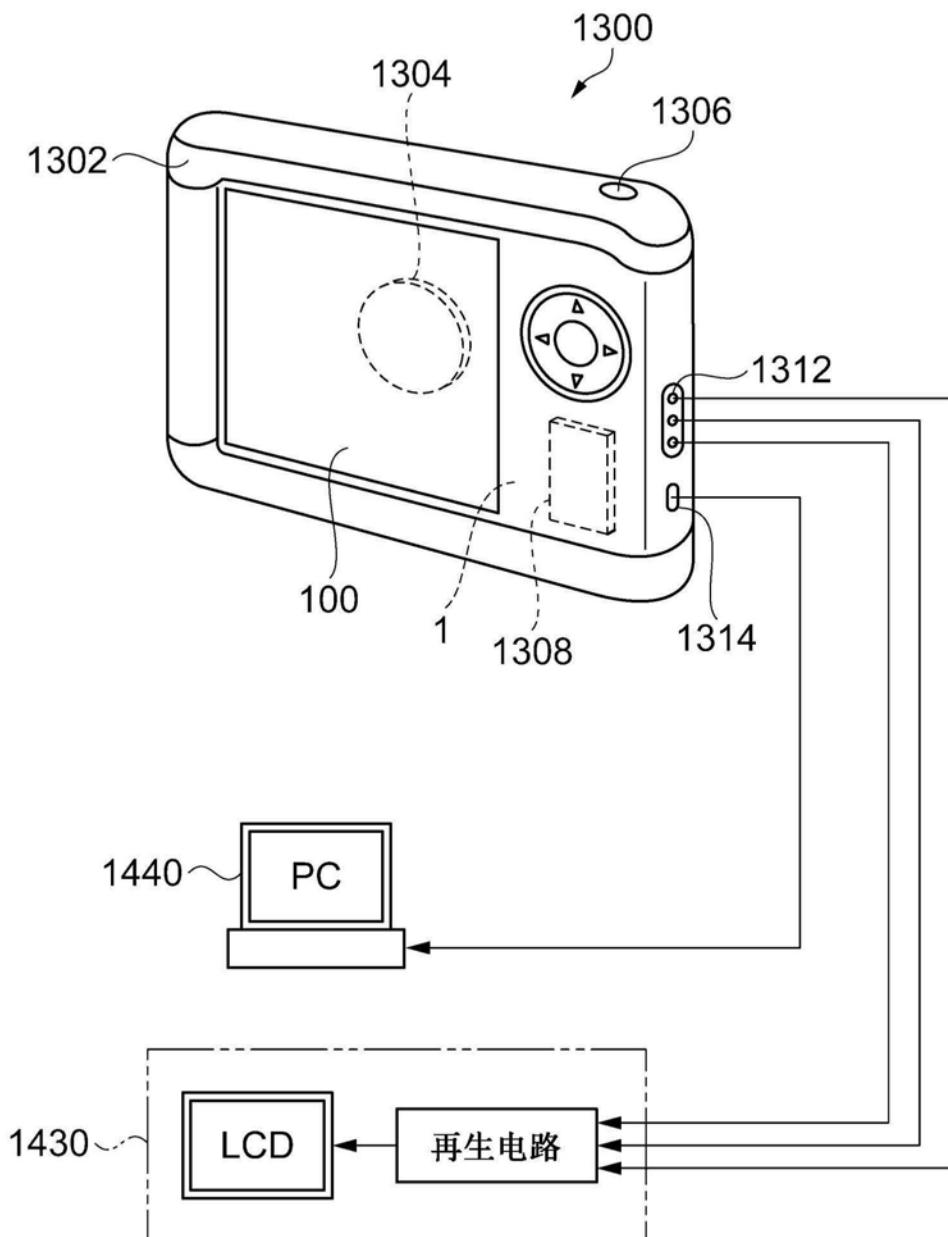


图14

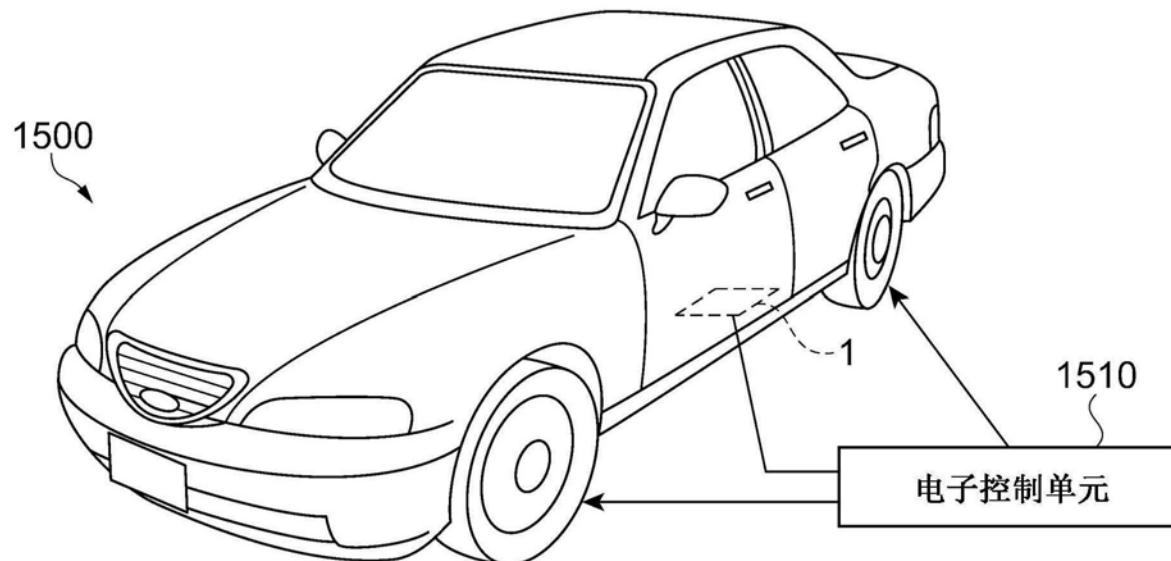


图15