



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112954558 A

(43) 申请公布日 2021.06.11

(21) 申请号 202011291572.1

H04R 19/00 (2006.01)

(22) 申请日 2020.11.18

B81B 3/00 (2006.01)

(30) 优先权数据

62/946,348 2019.12.10 US

(71) 申请人 楼氏电子(苏州)有限公司

地址 215131 江苏省苏州市相城经济开发区漕湖街道春兴路20号

(72) 发明人 M·纳瓦扎 S·C·汤普森

M·佩德森 P·洛佩特

Z·斯比亚

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司 11127

代理人 王青芝 王小东

(51) Int. Cl.

H04R 19/04 (2006.01)

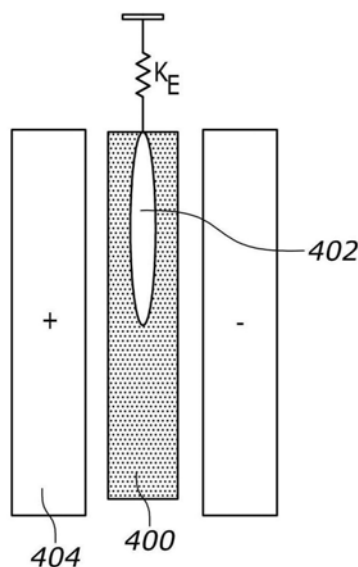
权利要求书2页 说明书9页 附图13页

(54) 发明名称

力反馈致动器和微机电系统电容换能器

(57) 摘要

本发明涉及力反馈致动器和微机电系统电容换能器。公开了一种力反馈致动器和MEMS电容换能器。该力反馈致动器包括一对电极和介电构件。一对电极彼此间隔开以形成间隙。介电构件至少部分地设置在间隙内。介电构件包括具有第一介电常数的第一部分和具有与第一介电常数不同的第二介电常数的第二部分。介电构件和一对电极被构造成相对于彼此移动。



1. 一种力反馈致动器,所述力反馈致动器包括:
一对电极,所述一对电极彼此间隔开以形成间隙;以及
介电构件,所述介电构件至少部分地设置在所述间隙内,所述介电构件包括具有第一介电常数的第一部分和具有第二介电常数的第二部分,所述介电构件和所述一对电极被构造造成相对于彼此移动。
2. 根据权利要求1所述的力反馈致动器,其中,所述第二部分至少部分地设置在所述第一部分内。
3. 根据权利要求1所述的力反馈致动器,其中,所述介电构件的介电常数在与所述介电构件和所述一对电极之间相对移动的方向垂直的方向上变化,或沿着所述介电构件与所述一对电极之间相对移动的方向变化。
4. 根据权利要求1所述的力反馈致动器,其中,所述一对电极是被布置成梳状的多对电极中的一对电极,并且其中,所述介电构件是插设在所述多对电极中的所述一对电极之间的多个介电构件中的一个介电构件。
5. 根据权利要求1所述的力反馈致动器,其中,所述第一部分由氮化硅材料制成,并且其中,所述第二部分由多晶硅材料制成。
6. 根据权利要求1所述的力反馈致动器,其中,当在穿过所述一对电极和所述介电构件的横截面中观察时,所述第二部分在至少三面上被所述第一部分包围。
7. 根据权利要求1所述的力反馈致动器,其中,所述介电构件的高度在 $3\mu\text{m}$ 至 $10\mu\text{m}$ 之间的范围内。
8. 根据权利要求1所述的力反馈致动器,其中,所述介电构件的宽度在 $1\mu\text{m}$ 至 $3\mu\text{m}$ 之间的范围内。
9. 根据权利要求1所述的力反馈致动器,其中,所述第一部分的厚度在 100nm 至 300nm 之间的范围内。
10. 根据权利要求1所述的力反馈致动器,其中,所述第一部分与所述一对电极中的一个电极之间的间隙的宽度在 100nm 至 300nm 之间的范围内。
11. 根据权利要求1所述的力反馈致动器,其中,所述力反馈致动器形成微机电系统换能器的一部分。
12. 一种微机电系统电容换能器,述微机电系统电容换能器包括:
腔室;
第一电极,所述第一电极设置在所述腔室中;
第二电极,所述第二电极设置在所述腔室中并且与所述第一电极间隔开,所述第一电极与所述第二电极电隔离;
介电构件,所述介电构件设置在所述腔室中,根据所述介电构件与所述第一电极和所述第二电极之间的相对移动的程度,所述介电构件至少部分地位于所述第一电极与所述第二电极之间,
所述介电构件包括具有第一介电常数的第一部分和具有第二介电常数的第二部分。
13. 根据权利要求12所述的微机电系统电容换能器,其中,当在所述第一电极与所述第二电极之间施加电场时,与不具有介电常数不同的部分的介电构件相比,包括具有所述第一介电常数的所述第一部分和具有所述第二介电常数的所述第二部分的介电构件在该介

电构件与所述第一电极和所述第二电极之间的更大的相对移动范围内提供相对恒定的恢复静电力。

14. 根据权利要求12所述的微机电系统电容换能器,其中,施加在所述第一电极与所述第二电极之间的电场提供恢复静电力,所述恢复静电力抵消由机械力引起的所述介电构件与所述第一电极和所述第二电极之间的相对移动。

15. 根据权利要求12所述的微机电系统电容换能器,其中,所述介电构件包括具有如下特点的介电常数:所述第一部分与所述第二部分之间的介电常数的离散变化垂直于所述介电构件与所述第一电极和所述第二电极之间的相对移动的方向或沿着所述介电构件与所述第一电极和所述第二电极之间的相对移动的方向。

16. 根据权利要求12所述的微机电系统电容换能器,其中,所述介电构件的所述第一部分是氮化硅,并且所述介电构件的所述第二部分是多晶硅。

17. 根据权利要求12所述的微机电系统电容换能器,其中,垂直于所述介电构件与所述第一电极和所述第二电极之间相对移动的方向,或者沿着所述介电构件与所述第一电极和所述第二电极之间相对移动的方向,所述介电构件具有不同的介电常数。

18. 根据权利要求12所述的微机电系统电容换能器,其中,所述腔室被至少部分地抽真空,并且所述介电构件或者所述第一电极和所述第二电极联接到所述腔室外部的构件,其中,施加到所述腔室外部的所述构件上的机械力引起所述介电构件与所述第一电极和所述第二电极之间的所述相对移动。

19. 根据权利要求18所述的微机电系统电容换能器,其中,设置在所述腔室外部的所述构件是振膜。

20. 根据权利要求12所述的微机电系统电容换能器,其中,由所述介电构件中的气穴提供介电梯度。

力反馈致动器和微机电系统电容换能器

技术领域

[0001] 本发明涉及力反馈致动器和微机电系统电容换能器。

背景技术

[0002] 麦克风被配置在各种类型的设备(诸如个人计算机、蜂窝电话、移动设备、头戴式耳机、耳机和助听器设备)中。但是,随着设备变小,它们需要更小的麦克风。较小的麦克风会经受因设备内的气流和热损失而导致的较高声音噪声,并且比更大的麦克风相比,通常具有更低的信噪比。

发明内容

[0003] 本发明的一方面涉及力反馈致动器,所述力反馈致动器包括:一对电极,所述一对电极彼此间隔开以形成间隙;以及介电构件,所述介电构件至少部分地设置在所述间隙内,所述介电构件包括具有第一介电常数的第一部分和具有第二介电常数的第二部分,所述介电构件和所述一对电极被构造成相对于彼此移动。

[0004] 本发明的另一方面涉及微机电系统电容换能器,所述微机电系统电容换能器包括:腔室;第一电极,所述第一电极设置在所述腔室中;第二电极,所述第二电极设置在所述腔室中并且与所述第一电极间隔开,所述第一电极与所述第二电极电隔离;介电构件,所述介电构件设置在所述腔室中,根据所述介电构件与所述第一电极和所述第二电极之间的相对移动的程度,所述介电构件至少部分地位于所述第一电极与所述第二电极之间,所述介电构件包括具有第一介电常数的第一部分和具有第二介电常数的第二部分。

附图说明

[0005] 结合附图,根据以下描述和所附权利要求,本发明的前述特征和其它特征将变得更加完全显而易见。这些附图仅描绘了根据本发明的多个实施方式,因此不应视为对本发明的范围的限制。下面结合附图更详细地描述各种实施方式。

[0006] 图1是示例麦克风组件的侧视横截面图。

[0007] 图2是示例微机电系统(MEMS)换能器的立体截面图。

[0008] 图3是示出根据一对电极与介电(dielectric)构件之间相对位置的理想化介电致动器的电容的图。

[0009] 图4是示出图3的理想化介电致动器根据一对电极与介电构件之间相对位置的静电恢复力的图。

[0010] 图5是用于MEMS换能器的示例介电致动器的侧视横截面图。

[0011] 图6是图5的介电致动器根据一对电极与介电构件之间相对位置的静电恢复力的图。

[0012] 图7A是在图2的线7-7处截取的MEMS换能器的介电致动器的侧视横截面图。

[0013] 图7B是介电致动器的另一示例的侧视横截面图。

- [0014] 图8是作用在图7A和图7B的介电致动器上的静电恢复力的示意图。
- [0015] 图9是图8的介电致动器根据一对电极与介电构件之间的相对位置的静电恢复力的图。
- [0016] 图10是示例MEMS换能器的俯视图。
- [0017] 图11是另一示例MEMS换能器的俯视图。
- [0018] 图12是另一示例MEMS换能器的俯视图。
- [0019] 图13是另一示例MEMS换能器的俯视图。
- [0020] 图14是制造用于MEMS换能器的介电致动器的示例方法的流程图。
- [0021] 图15是沉积到绝缘层上的电极材料的侧视横截面图。
- [0022] 图16是图15的电极材料在蚀刻操作之后的侧视横截面图。
- [0023] 图17是图15的电极材料在沉积牺牲材料之后的侧视横截面图。
- [0024] 图18是图15的电极材料在沉积第一介电材料之后的侧视横截面图。
- [0025] 图19是图15的电极材料在沉积第二介电材料之后的侧视横截面图。
- [0026] 图20是图15的电极材料在从电极材料与第一介电材料之间移除牺牲材料之后的侧视横截面图。
- [0027] 在下面的详细描述中,参照附图描述了各种实施方式。技术人员将理解,附图是示意性的并且为了清楚而被简化,因此附图仅示出了对于理解本发明必不可少的细节,而省略了其它细节。贯穿全文,相同的附图标记指代相同的元件或部件。因此,将不必关于各个附图详细描述相同的元件或部件。

具体实施方式

[0028] 麦克风中(尤其是微机电系统(MEMS)麦克风中)的性能损失是由于来自设备内气流阻力的粘性损耗而引起的。粘性损耗限制了麦克风的信噪比(SNR)。为了改善SNR,可以将麦克风封装起来并置于减小的压力(例如,接近真空)下。一旦被封装,麦克风的感测振膜会经受与大气压力波动相关联的负荷。在一些实施方式中,力反馈致动器可以用于补偿所感测到的这些大气压力波动。力反馈致动器包括与导电引脚阵列啮合的介电梳结构或介电栅(dielectric grid)。介电栅具有两个功能。第一个功能是作为致动器工作以向压力振膜提供力反馈,以便抵消由大气压力产生的反作用力。当向相邻的引脚施加电压时,会在介电栅上产生一个力,以平行于引脚来拉动介电栅,进一步使介电栅与引脚啮合,从而增加引脚之间的电容。介电栅的第二个功能是作为传感器。感测信号的低频部分提供了一种调节力反馈电压以补偿大气压力变化的方式,而感测信号的高频部分则代表了所期望的声学信号。力反馈致动器设计的示例在2018年11月19日提交的美国专利No.62/769,468、2018年11月30日提交的美国专利申请No.62/773,989和2019年3月20日提交的PCT/US2019/023260中提供,其全部内容通过引用整体并入本文。

[0029] 介电栅设置在相邻引脚之间形成的间隙中,并且被构造成响应于声学活动和大气压力的变化而相对于引脚移动。已经发现,沿着该介电栅与引脚之间移动方向的、介电栅的材料性质的变化会影响力反馈致动器的性能。特别地,由于栅相对于引脚移动时静电力中的梯度,材料性质的这些变化会引起不稳定性。

[0030] 本发明提供了一种用于力反馈致动器的改进的介电栅。该介电栅的结构被设计

成,通过对制造过程中在介电栅的各个介电构件中形成的空隙的尺寸和位置进行控制,来提高力反馈致动器的灵敏度并增加整体工作范围。已经发现,这些空隙的尺寸和位置直接影响在工作期间遇到的静电力的梯度(例如,静电力随着介电栅相对于引脚的相对位置的变化)。

[0031] 如图1所示,一种实现涉及麦克风组件10。麦克风组件10包括壳体12、MEMS换能器100和集成电路(IC) 14。壳体12包括基板16和联接至基板16的上表面20的盖18。将基板16沿着盖18的周界紧固至基板16。盖18和基板16一起形成内部22(例如,中空的空腔等)。盖18可以包括大气平衡通风口26(例如,开口、孔等),大气平衡通风口26在壳体12周围的环境与内部22之间提供流体连通。大气平衡通风口26防止损坏壳体12和/或麦克风组件10的其他部件,否则这种损坏可能会由于麦克风组件10周围环境中的极端温度和/或压力波动而发生。MEMS换能器100和IC 14被定位在内部22内并且连接到上表面20。

[0032] 基板16包括与MEMS换能器100对准的声端口28,以使MEMS换能器100通过声端口28而暴露于压力变化。在各种说明性实施方式中,MEMS换能器100与声端口28之间的相对位置可以不同。例如,声端口28可以形成在盖18上而不是基板16上,并且MEMS换能器100可以与声端口28相邻。在这些情况下,MEMS换能器100可以与图1中所示的情况相反。MEMS换能器100基于通过声端口28传送至MEMS换能器100的压力变化来生成电信号。压力变化可以是周围大气压力(例如,麦克风组件10周围环境的压力)的变化和/或由诸如声音之类的声学刺激引起的压力变化。IC 14联接到MEMS换能器100,并且被配置为解释由MEMS换能器100产生的电信号。如图1所示,使用引线和迹线30将IC 14硬连线到MEMS换能器100,以在MEMS换能器100与IC 14之间形成电连接。IC 14还电连接到基板16和焊盘(pad) 32,以与麦克风组件10所连接到的设备(例如,个人计算机、蜂窝电话、移动设备、头戴式耳机、耳机设备、助听器设备等)进行通信。在一些实施方式中,IC 14包括声学信号和大气信号处理电路和/或软件,以解释来自MEMS换能器100的电信号。

[0033] MEMS换能器100被配置为感测声学活动和大气压力的变化。MEMS换能器100包括压力振膜102和联接到压力振膜102的力反馈致动器200(例如,介电致动器、梳状致动器等)。如图1所示,压力振膜102与声端口28流体连通,并且被构造成将压力波动传递到力反馈致动器200。具体地,压力振膜102被构造成通过在压力振膜102与力反馈致动器200之间延伸的刚性支撑件34(例如,突出部)来传递压力波动。

[0034] 如图1所示,力反馈致动器200的至少一部分相对于麦克风组件10周围的环境(例如,声端口28和内部22)是密封的。具体地,力反馈致动器200的至少一部分设置在第一换能器基板104与压力振膜102之间形成的封闭腔室106内。封闭腔室106在接近真空的低压下被密封。在一些实施方式中,封闭腔室106具有小于或基本等于30Pa的压力。在一些实施方式中,封闭腔室106具有小于或基本等于10Pa的压力。如图1所示,压力振膜102的下表面与封闭腔室106外部的、麦克风周围的环境(例如,声端口28)流体连通。

[0035] 图2示出了图1的力反馈致动器200的立体图。力反馈致动器200包括支撑结构202、悬臂振膜(cantilever diaphragm) 206和多个固定指208。支撑结构202联接到悬臂振膜206和固定指208,并且被构造成在相对于固定指208的某一位置上支撑悬臂振膜。如图1所示,支撑结构202被“夹设”或以其他方式设置在第一换能器基板104与压力振膜102之间。如图2所示,支撑结构202包括基部210(例如,硅晶片)和沉积在基部210的上表面上的绝缘层212。

基部210限定了从基部210的上表面延伸穿过下表面的中心开口214。绝缘层212的合适材料包括二氧化硅、氮化硅和氮氧化硅。

[0036] 悬臂振膜206联接到绝缘层212的上表面并且在中心开口214上方延伸,使得悬臂振膜206基本覆盖中心开口214。悬臂振膜206的第一端联接到绝缘层212,而第二端(例如,无支撑端)设置在靠近基部210的内周的中心开口214上方。悬臂振膜206的结构被设计成,响应于来自压力振膜102(例如,来自压力振膜102与悬臂振膜206之间延伸的刚性支撑件34(如图1所示))的输入力,在平行于基部210的中心轴的方向(例如,如图2所示的向上和向下)上移动。如图2所示,悬臂振膜206包括设置在第二端的多个可动指216。可动指216形成多个矩形翅片(fin),所述多个矩形翅片以相对于彼此基本平行的取向进行布置。在其他实施方式中,可动指216的形状可以不同。

[0037] 如图2所示,固定指208在基部210的与悬臂振膜206的第一端相对的端上联接到绝缘层212的上表面。固定指208跨中心开口214的上边缘以相对于彼此基本平行的取向进行布置。固定指208彼此间隔开以形成多个通道或间隙218,所述多个通道或间隙218被构造成为在其中容纳悬臂振膜206的可动指216。换句话说,可动指216插设在固定指208之间,使得固定指208中的每一者都在至少两面上被可动指216包围。

[0038] 可动指216被构造成为,响应于入射到MEMS换能器100(例如,参考图1所述的压力振膜102)上的压力波动而相对于固定指208移动以生成电信号。在图2所示的实现中,固定指208是布置在彼此电隔离的两个交错组中的引脚或导体。导体可以由多晶硅材料或另一种合适的导体制成。第一组导体通过第一金属互连219(例如,多晶硅材料或另一种合适的导体)彼此电连接,第一金属互连219跨第一组导体的上表面延伸以形成第一电极220。第二组导体通过第二金属互连222彼此电连接,第二金属互连222跨第二组导体的上表面延伸以形成第二电极224。

[0039] 可动指216形成力反馈致动器200的介电栅。各个可动指216均由诸如氮化硅之类的介电材料制成。在工作时,当悬臂振膜206在声压下移动时,可动指216(例如,介电构件)在相邻导体之间的间隙218内上下移动。在第一电极220与第二电极224之间施加偏置电压,并且基于因可动指216的位置而测得的电压变化来提取电信号。所施加的偏置电压在第一电极220与第二电极224之间生成静电场,该静电场提供恢复静电力,所述恢复静电力抵消介电构件与电极之间的相对移动(例如,抵消由压力振膜102施加至悬臂振膜206的机械力)。在其他益处中,通过介电材料将第一电极220与第二电极224分隔开而显著减小了使电极朝向彼此塌陷(collapse)的横向力。电极之间横向力的减小减小了与可用于力反馈致动器200的指的几何形状相关联的限制(例如,指的宽度/厚度、指在中心开口214上方延伸的长度等),与其他构造相比,这又可以允许优化几何形状以产生更高的输出信号。

[0040] 参照图2描述的力反馈致动器200的设计不应被视为限制。在不脱离本文公开的发明构思的情况下,许多变型是可能的。例如,在一些实施方式中,用于固定指208和可动指216的材料可以相反,使得电极相对于固定介电材料移动(例如,使得可动指216由导电材料制成,并且固定指208由绝缘材料制成)。在一些实施方式中,悬臂振膜206和可动指216可以一体地形成为单个整体结构。在其他实施方式中,可动指216可以由沉积到或以其他方式联接到悬臂振膜206的第二端上的不同材料制成。在将可动指216用作电极的实现中,金属互连219、222可以沿着可动指216的上表面布置。在各种说明性实施方式中,金属互连219、222

相对于固定指208或可动指216的精确位置也可以不同。

[0041] 图3至图4概念性地示出了力反馈致动器300的性能,该力反馈致动器300具有与参照图2描述的力反馈致动器200类似的构造。特别地,图3至图4示出了理想的力反馈致动器300的性能,其中,介电构件316(例如,可动指)的材料性质在整个介电构件316中是均匀的。图3示出了根据介电构件316与一对电极320之间相对位置的力反馈致动器的电容变化,而图4示出了在类似位置范围内的介电构件316与电极320之间的静电恢复力(即,牵引力)。在各图上方,以通过(例如,在图2中由线7-7指示的位置处的)可动指和固定指形成的叉指式梳状结构的横截面图示出了介电构件316相对于电极320的实际位置。需要注意的是,这些图示出了力反馈致动器的有用的工作范围(例如,在约 $0.5\mu\text{m}$ 至 $4.5\mu\text{m}$ 之间的范围)内,电容约呈线性变化(图3),从而导致几乎恒定的静电力(图4)。

[0042] 力反馈致动器的性能特性将与图3至图4中所示的理想关系有所不同。特别地,诸如介电构件中的空隙、不均匀的材料性质以及对周围环境的电边缘场之类的缺陷将影响静电力梯度以及可以通过力反馈致动器实现的相应灵敏度。在其他可能性中,介电构件中的空隙和其他缺陷是由于制造期间材料的自然堆积(例如,材料沉积)而引起的。图5示出了材料性质是如何在介电构件400的整个横截面中变化(作为内部空隙402的结果)的示例。如图6所示,介电构件400中的空隙402引起介电常数沿着介电构件400的高度(例如,在介电构件400的上下表面之间垂直地)变化,这影响了静电恢复力,因为介电构件400相对于电极404有所移动。在图6中,该变化被示作在约 $0.5\mu\text{m}$ 至 $2.75\mu\text{m}$ 之间的静电力梯度。图6中所示的静电力梯度将根据空隙402的形状和空隙402延伸到介电构件400中的深度而变化。

[0043] 图7A示出了通过图2的力反馈致动器200的可动指(例如,介电构件)和固定指(例如,电极)的横截面图。具体地,图7A示出了通过一对电极(例如,第一电极220和第二电极224)和介电构件216的横截面。介电构件216在该介电构件216的上表面与下表面之间的高度217在约 $3\mu\text{m}$ 至 $10\mu\text{m}$ 之间的范围内。介电构件216在一对电极之间的横向方向上的总宽度221在约 $1\mu\text{m}$ 至 $300\mu\text{m}$ 之间的范围内。在其他实施方式中,介电构件216的总尺寸可能不同。如图7A所示,一对电极彼此间隔开以形成间隙218。介电构件216设置在一对电极之间的间隙218内的中心位置处。介电构件216的宽度小于间隙218的宽度,使得介电构件216与第一电极220和第二电极224两者都间隔开。在一些实现中,介电构件216与第一电极220和第二电极224中的至少一者之间的间隙218的宽度226在约 100nm 至 300nm 之间的范围内。在其他实施方式中,介电构件216与电极220、224之间的间隔可以不同。

[0044] 介电构件216包括在穿过介电构件216的至少两个方向上的介电梯度。如本文所提及的,介电梯度是指在给定方向上沿着介电构件216的材料性质和/或介电常数的变化。可以通过使用二次材料和/或通过经由蚀刻工艺在介电构件216中形成气穴(air pocket)来产生介电梯度。特别地,介电构件216包括在一对电极之间沿着横向方向堆叠或以其他方式布置的多个介电材料(例如,部分)。换句话说,介电构件216包括具有以下特征的受控介电梯度:相对介电常数的离散变化(例如,与第一介电材料与第二介电材料之间的材料性质的变化相关联的离散变化)垂直于介电构件216与一对电极之间的相对移动方向(例如,如图7A所示的水平方向,多个指之间的横向方向等)。介电构件216还包括由于介电构件216的下端附近的材料性质的变化而沿着介电构件216与一对电极之间相对移动的方向的受控介电梯度。

[0045] 如图7A所示,介电构件216包括示作第一介电材料228的第一部分和示作第二介电材料230的第二部分,第二介电材料230至少部分地设置在第一介电材料228内。在其他实施方式中,如图7B所示,介电构件250中的介电梯度由蚀刻到第一介电材料254中的气穴252(例如,代替图7A中所示的第二介电材料230的气穴,在第二介电材料230中的气穴等)提供。在一些实现中,可以以与图7A所示的第二介电材料228基本相同的形状或另一合适的形状将气穴252蚀刻到第一介电材料254中,以减小在力反馈换能器200的工作范围内的静电力梯度。在图7B的实施方式中,气穴252以一定的锥度被蚀刻到第一介电材料254中,使得气穴252的宽度在介电构件250的上端附近比下端大。

[0046] 如图7A所示,第二介电材料230被居中设置在第一介电材料228内,使得第二介电材料230在至少三面上被第一介电材料228包围。第二介电材料230沿着介电构件216的大部分高度向下延伸到第一介电材料228中。如图7A所示,第一介电材料228的厚度232沿着第二介电材料230的周界是大致均匀的。在一些实现中,第一介电材料228的厚度232在约100nm至300nm之间的范围内,和/或与第一介电材料228与第一电极220和第二电极224中的每一者之间的间隙218的宽度226大致相同。需要注意的是,第二介电材料230的形状在介电构件216的整个深度上大致均匀,从而导致介电常数的离散变化垂直于介电构件216与一对电极之间的相对移动方向。在图7A所示的实施方式中,当以横截面观察时,第二介电材料230具有矩形形状。在其他实施方式中,第二介电材料230的形状可以不同。例如,图8中所示的矩形的下角可以是圆形的。第一介电材料228的内侧壁(在该内侧壁处,第二介电材料230与第一介电材料228啮合)可以基于制造约束和/或所期望的力反馈致动器200的性能以一定角度(例如,5°等)或另一角度呈现锥形。例如,第二介电材料230可以代替图7B中所示的气穴252(例如,第二介电材料230可以沉积或以其他方式形成到图7B所示的气穴252中,使得第二介电材料230的宽度在介电构件的上端附近大于下端)。换句话说,第二介电材料230可以在第二介电材料230与第一介电材料228啮合处(例如,在第一介电材料228与第二介电材料230之间的界面处)至少部分地形成V形。锥形化导致介电常数沿着第二介电材料228的高度连续变化。

[0047] 将第一介电材料228和第二介电材料230的材料性质选择成使得跨介电构件216的介电常数的变化最小化。在图7A的实施方式中,第一介电材料228由氮化硅材料制成,并且第二介电材料230由多晶硅材料制成。可以调整材料的组合以及各个材料层的相对厚度,以获得所期望的介电构件216的材料性质(例如,跨介电构件216的平均介电常数等)。在其他益处中,可以以比氮化硅更低的压力沉积多晶硅材料,这降低了在制造期间形成内部空隙的风险。外部氮化硅确保了在加载下介电构件216具有足够的机械强度。

[0048] 图8至图9示出了通过使用具有受控介电梯度(例如,多个部分,各个部分具有不同的介电常数)的介电构件216可以实现的静电力梯度的改善。不同于图6中观察到的静电力的较大变化(例如,梯度),图7A和图8中所示的介电构件216呈现出根据较大工作范围内(例如,在约0.5 μm 至4.5 μm 之间)的位置的几乎恒定的(例如,平坦的)静电恢复力。

[0049] 应当理解,介电构件216的设计可以用于各种另选的力反馈致动器构造中。例如,图10示出了类似于图2的力反馈致动器200的力反馈致动器500。同样地,可动指和固定指形成叉指式梳状结构,该叉指式梳状结构被设置在悬臂振膜506的单侧(例如,如图10所示的左侧)上。通过振膜锚固件834将悬臂振膜506的相对端紧固至换能器基板510上,该相对端

可以包括沉积在悬臂振膜506上方或下方的氧化硅层。图11示出了力反馈致动器600,该力反馈致动器600包括在可移动振膜606的两侧上的叉指式梳状结构。振膜606在换能器基板610的上侧以及与上侧相反的下侧两者处联接至换能器基板610(例如,基部)。振膜606包括在振膜606的任一侧(例如,如图11所示的左侧和右侧)上的可动指616,该可动指616在平行于振膜(例如,平行于换能器基板610的上表面)的方向上远离振膜606向外延伸。

[0050] 图12示出了另一示例力反馈致动器700。力反馈致动器700包括振膜706,振膜706以与图11的振膜606相似的方式构造。但是,与图11不同的是,图12的致动器700中所示的可动指716以相对于振膜706基本垂直的取向(例如,平行于由换能器基板710限定的中心开口的轴线)从振膜706向下延伸。固定指708被设置在振膜706下方,并且在两端均联接到换能器基板710,使得固定指708跨中心开口延伸。可动指716延伸到在相邻的固定指708之间形成的间隙中。这样,固定指708和可动指216可以至少部分地设置在中心开口内。在工作中,可动指216在平行于中心开口的轴线方向上移入和移出中心开口(如图12所示,移入和移出页面)。

[0051] 图13示出了力反馈致动器800的又一实现。力反馈致动器800包括平行于中心开口的轴线延伸的多个支柱816。支柱816由金属互连819、822支撑在中心开口内,金属互连819、822的任一端均联接到换能器基板。振膜806是包括多个开口815的华夫结构。各个开口815被构造成在其中容纳相应的一个支柱816。振膜806的外端被设置在形成于换能器基板810的上表面中的沟槽中。力反馈致动器800附加地包括振膜锚固件834,该振膜锚固件834被构造成支撑振膜806的端部并防止振膜806在正常工作期间与换能器基板810分离。图10至图13中所示的固定指和可动指的数量和几何形状在各种示例性实施方式中可以不同。

[0052] 图14示出了根据说明性实施方式的制造用于MEMS换能器的力反馈致动器的方法900的流程图。方法900可以用图1至图2的力反馈致动器200来实现。因此,可以关于图1至图2来描述方法900。附加地,在图15至图20中概念性地示出了方法900的各个步骤,其以通过力反馈致动器的可动指和固定指的横截面图(参见图2的线7-7)示出了各个步骤。

[0053] 在902处,提供多晶硅层(例如,固定指208)。可以将多晶硅层沉积或以其他方式形成在氮化硅(例如,换能器基板或基部210)的绝缘层上。在904处,对多晶硅层进行蚀刻,以将多个沟槽(例如,间隙218)形成到多晶硅层中。沟槽延伸穿过多晶硅层的厚度,从而形成多个指,所述多个指通过绝缘层彼此电隔离。在图16所示的实现中,各个沟槽的宽度226约为 $1.4\mu\text{m}$,并且各个沟槽的深度227约为 $5\mu\text{m}$ 。在其他实现中,沟槽尺寸可以不同。

[0054] 在906处,沿着各个沟槽的内壁、沿着多晶硅层和绝缘层的外表面沉积牺牲层(例如,氧化物层213)。牺牲层的厚度229约为 200nm ,尽管厚度229可以根据力反馈致动器的设计参数而不同。在908处,将第一介电材料(例如,氮化硅,第一介电材料228)沉积在牺牲层的顶部上(参见图18)。同样地,第一介电材料的厚度232可以根据设计参数而变化。在图18所示的实现中,第一介电材料的厚度232约为 200nm 。第一牺牲材料限定空隙或气穴。

[0055] 在910处,将第二介电材料(例如,多晶硅,第二介电材料230)沉积到由第一介电材料形成的空隙中。框910可以包括利用第二介电材料完全填充空隙。框910可以附加地包括从第一多晶硅层(例如,电极220、224)的上表面蚀刻掉第一介电材料和第二介电材料的残留层(例如,进行平坦化)。在912处,将牺牲氧化物层蚀刻掉,以从多晶硅的固定指释出第一介电材料和第二介电材料(例如,介电构件216)。在其他实现中,方法900可以包括附加的、

更少的和/或不同的操作。

[0056] 在本文描述的主题有时例示了包含在不同的其它部件内或与其相连接的不同部件。将理解,这样描绘的架构仅仅是示例性的,而事实上,可以实现获得相同功能的许多其它架构。在概念意义上,用于实现相同功能的部件的任何布置都有效地“关联”,以使实现期望功能。因而,在本文为获得特定功能而组合的任何两个部件都可以被视作彼此“相关联”,以使实现期望功能,而与架构或中间部件无关。同样地,这样关联的任何两个部件还可以被视作彼此“在工作上连接”,或“在工作上联接”,以实现期望功能,并且能够这样关联的任何两个部件也可以被视作能够彼此“在工作上联接”,以实现期望功能。在工作上联接的具体示例包括但不限于,物理上可配合和/或物理上相互作用的部件和/或可无线地交互和/或无线地交互的部件和/或逻辑上交互和/或逻辑上可交互的部件。

[0057] 关于本文中复数和/或单数术语的使用,本领域技术人员可以根据上下文和/或申请在适当时候从复数翻译成单数和/或从单数翻译成复数。为清楚起见,可以在本文中明确地阐述各种单数/复数置换。

[0058] 本领域技术人员将理解,通常,本文尤其是所附权利要求(例如,所附权利要求的主体)使用的术语通常旨在作为“开放”术语(例如,用语“包括”应被解释为“包括但不限于”,用语“具有”应被解释为“至少具有”,用语“包括”应解释为“包括但不限于”等)。

[0059] 尽管附图和描述可以例示方法步骤的特定顺序,但是除非上文另外指定,否则这些步骤的顺序可以与所描绘和所描述的步骤不同。另外,除非上文另外指定,否则可以同时或部分同时执行两个或更多个步骤。这种变型可以例如取决于所选择的软件和硬件系统以及设计者的选择。所有这些变型都在本发明的范围内。同样,可以利用具有基于规则的逻辑和其它逻辑的标准编程技术来完成所描述的方法的软件实现,以完成各种连接步骤、处理步骤、比较步骤和决策步骤。

[0060] 本领域技术人员将进一步理解,如果意图陈述特定数量的引用的权利要求,则将在权利要求中明确地陈述这样的意图,并且在没有这样的陈述的情况下,不存在这样的意图。例如,为了帮助理解,以下所附权利要求可以包含介绍性短语“至少一个”和“一个或更多个”的使用以引入权利要求陈述。然而,这些短语的使用不应被解释为暗示由不定冠词“一”或“一个”引述权利要求的引用将包含这种引用的权利要求陈述的任何特定权利要求限制于仅包含一个这样的陈述的发明,即使相同的权利要求包括介绍性短语“一个或更多个”或“至少一个”,并且诸如“一”或“一个”的不定冠词(例如,“一”和/或“一个”通常应被解释为意指“至少一个”或“一个或更多个”);对于使用用于引用权利要求陈述的定冠词也是如此。另外,即使明确地陈述了特定数量的引用的权利要求陈述,本领域技术人员也将认识到,这种陈述通常应该被解释为至少意指所陈述的数目(例如,没有其它修饰语的“两个陈述”的详细陈述通常意指至少两个陈述,或两个或更多个陈述)。

[0061] 此外,在使用类似于“A、B和C等中的至少一个”的惯例的那些情况下,一般而言,这样的构造意图在本领域技术人员将理解该惯例的意义上(例如,“具有A、B和C中的至少一个的系统”将包括但不限于以下系统:单独具有A,单独具有B,单独具有C,一起具有A和B,一起具有A和C,一起具有B和C,和/或一起具有A、B和C等)。在使用类似于“A、B或C等中的至少一个”的惯例的那些情况下,一般而言,这样的构造意图在本领域技术人员将理解该惯例的意义上(例如,“具有A、B或C中的至少一个的系统”将包括但不限于以下系统:单独具有A,单独

具有B,单独具有C,一起具有A和B,一起具有A和C,一起具有B和C,和/或一起具有A、B和C等)。本领域技术人员将进一步理解,实际上呈现两个或更多个另选术语的任何析取词和/或短语,无论是在说明书、权利要求书还是在附图中,都应该被理解为考虑包括这些术语中的一者、术语中的任一者或两个术语的可能性。例如,短语“A或B”将被理解为包括“A”或“B”或“A和B”的可能性。

[0062] 此外,除非另有说明,否则使用词语“约”、“约”、“近似”、“大致”等意指加或减百分之十。

[0063] 已经出于例示和描述的目的呈现了例示性实施方式的前述描述。并非旨在穷举或限制于所公开的精确形式,并且根据上述教导可以进行修改和变型,或者可以从所公开实施方式的实践中获得修改和变型。本发明的范围旨在由所附权利要求及其等同物限定。

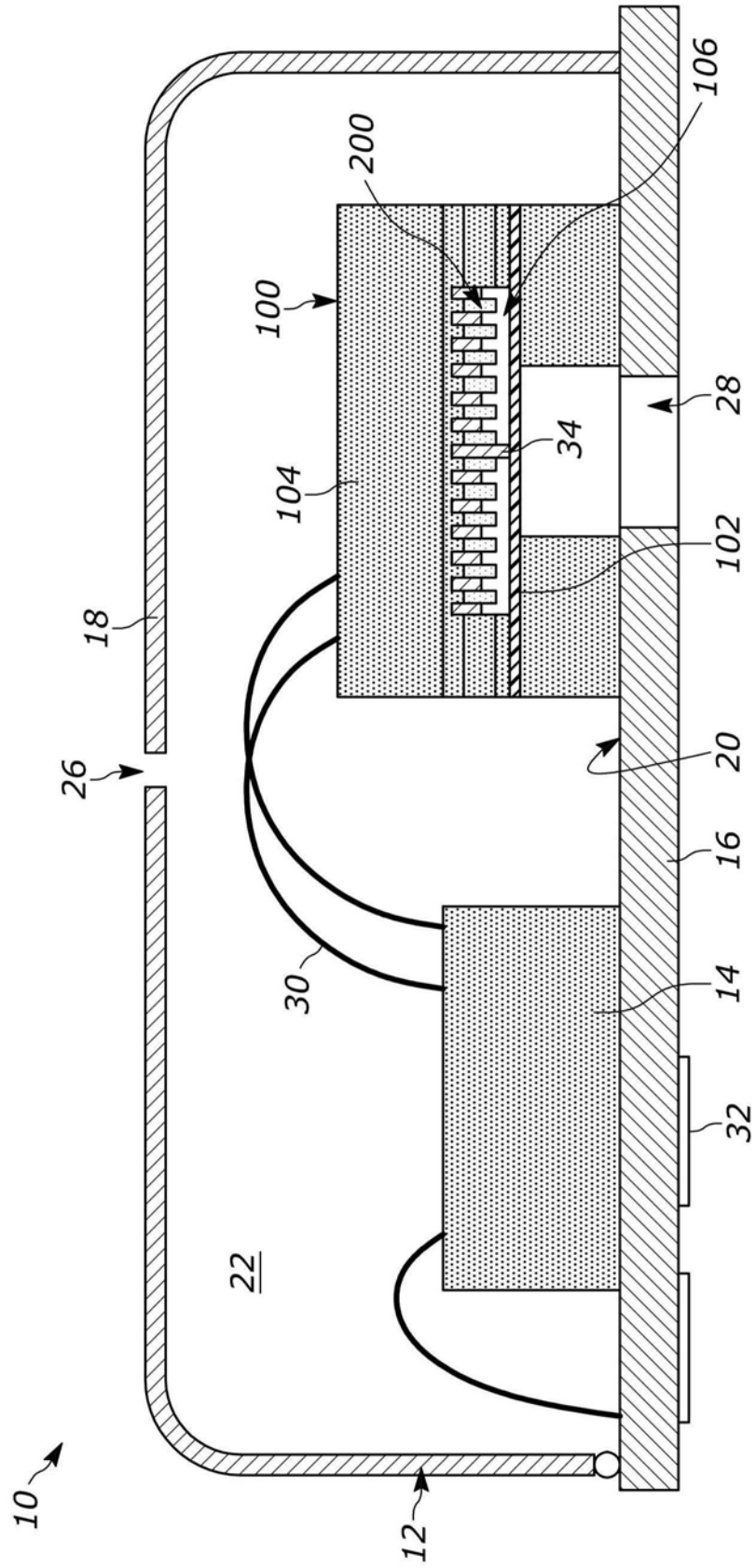


图1

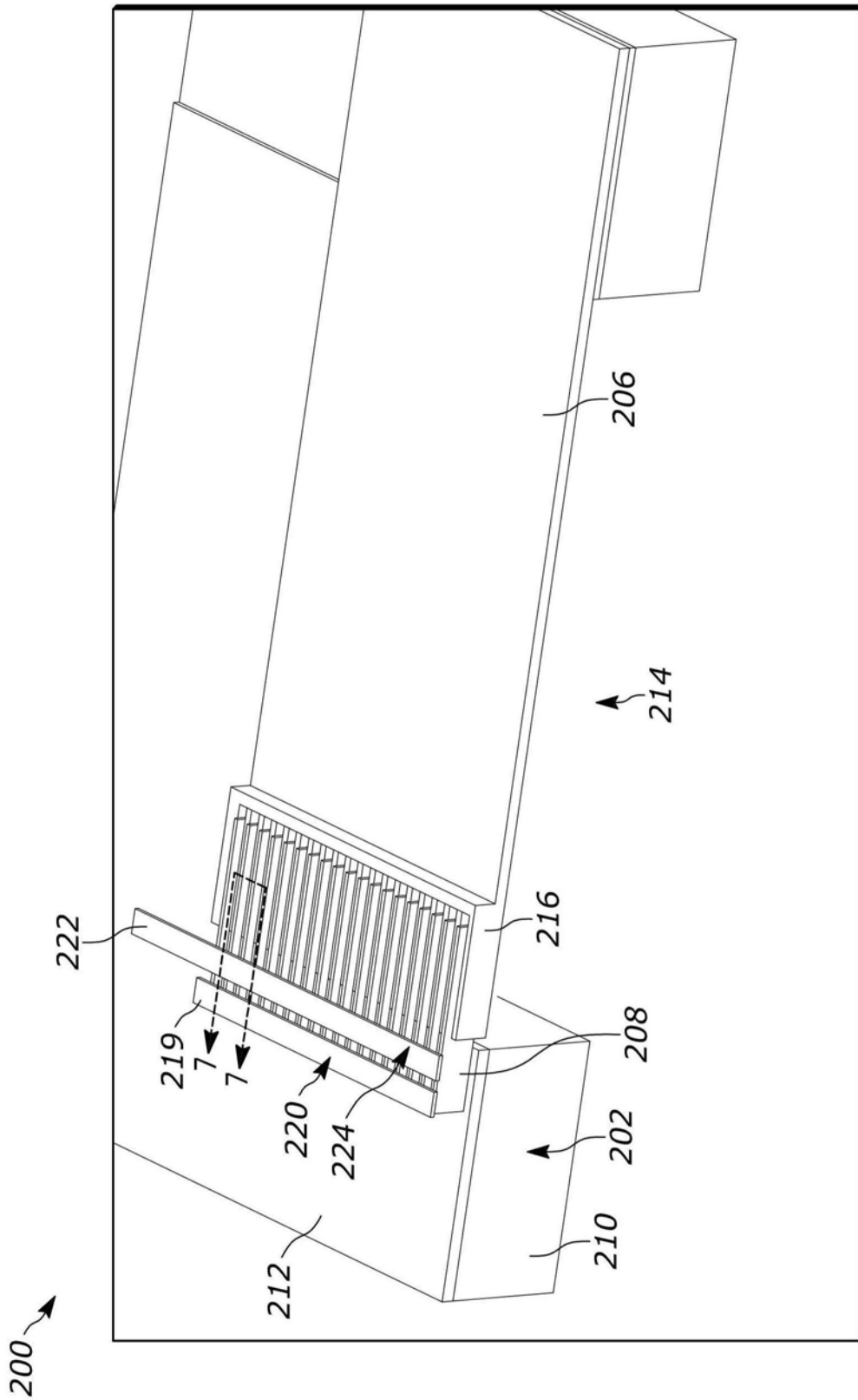


图2

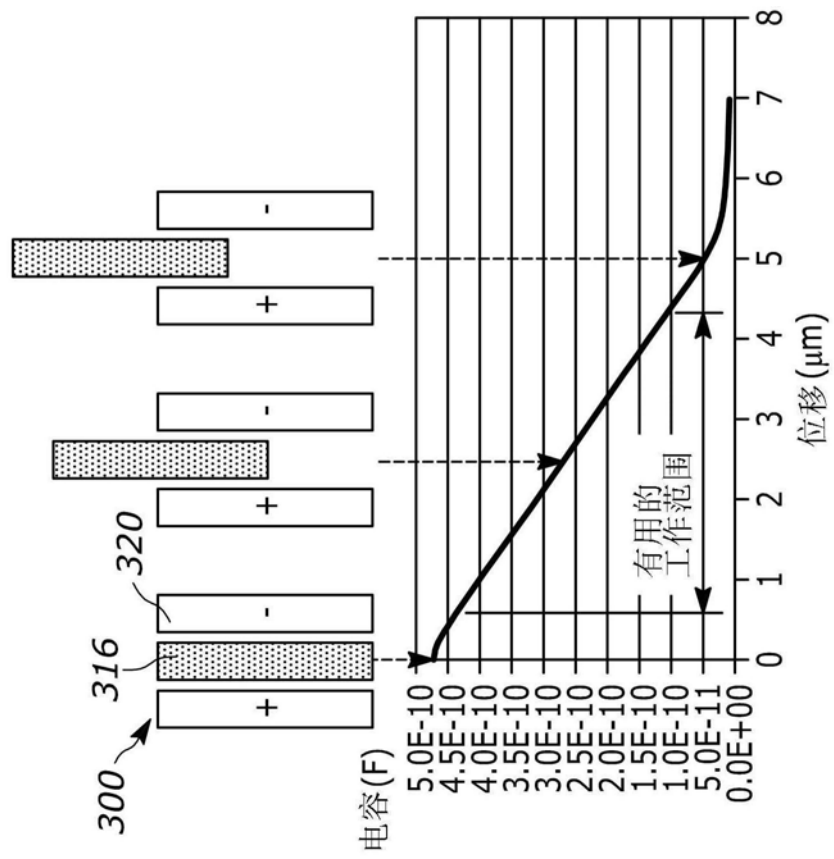


图3

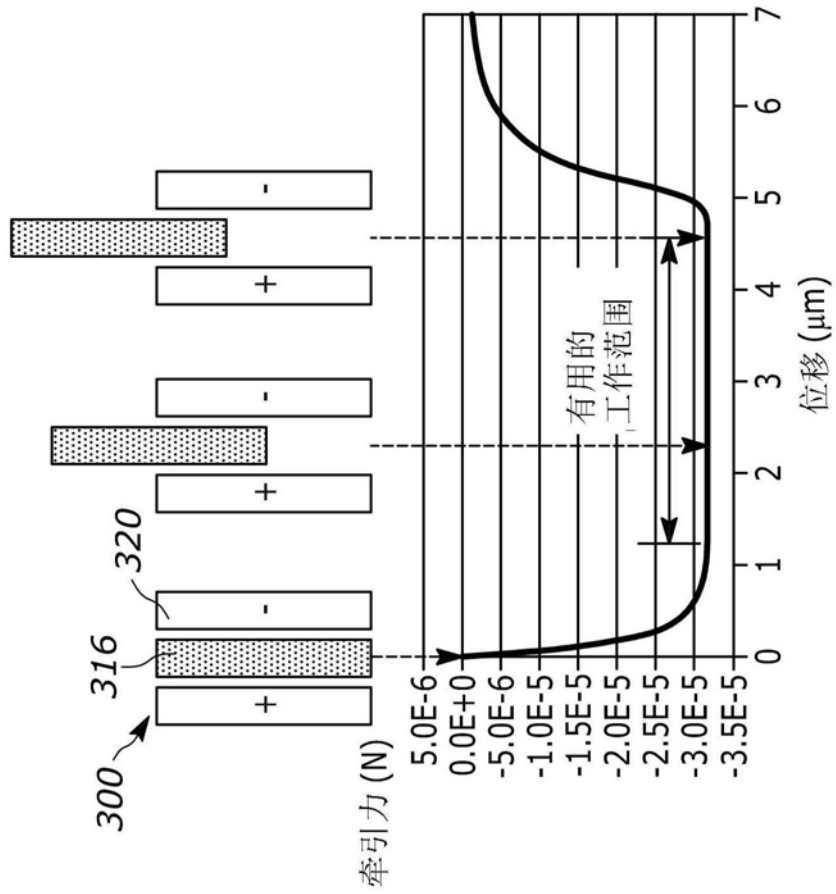


图4

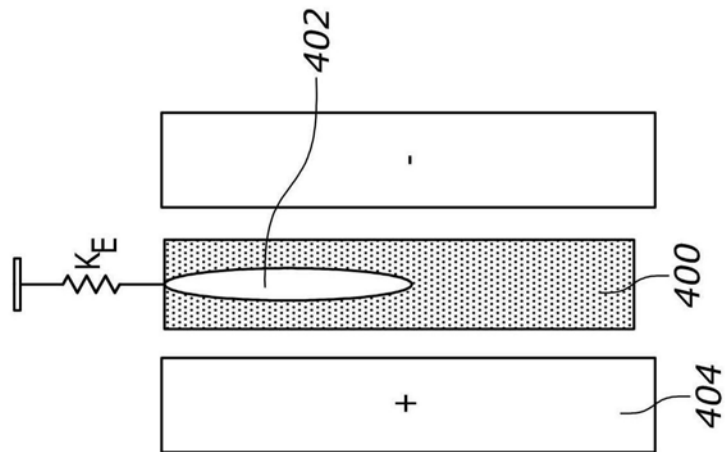


图5

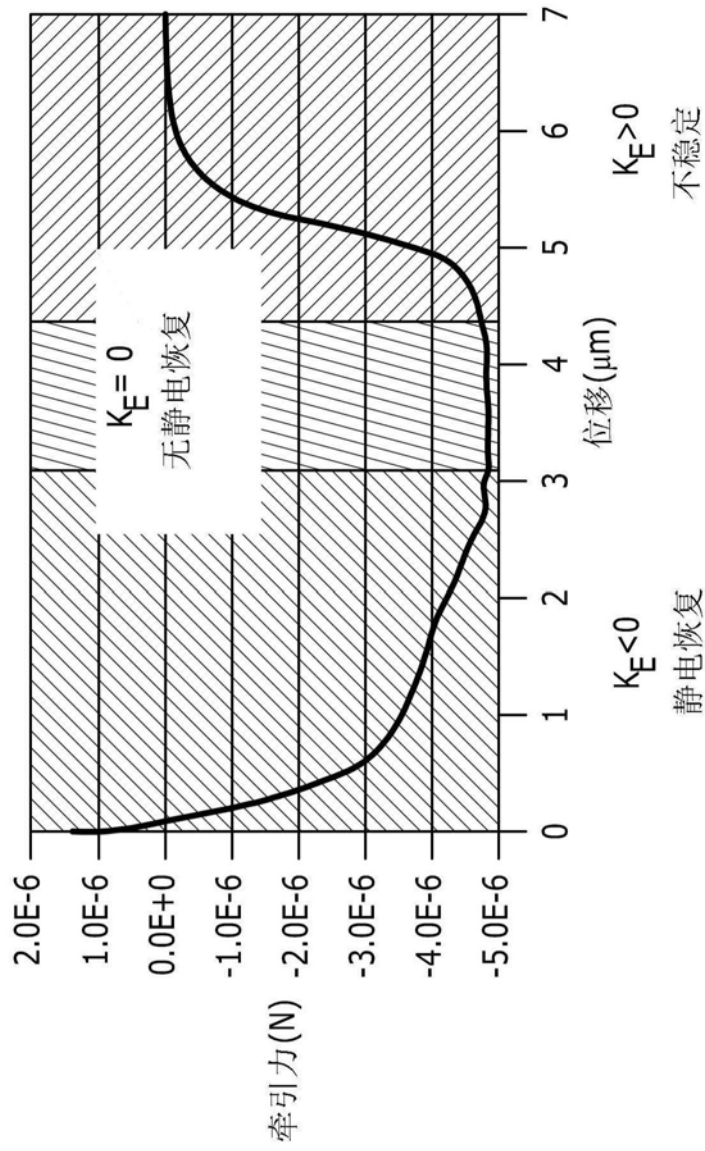


图6

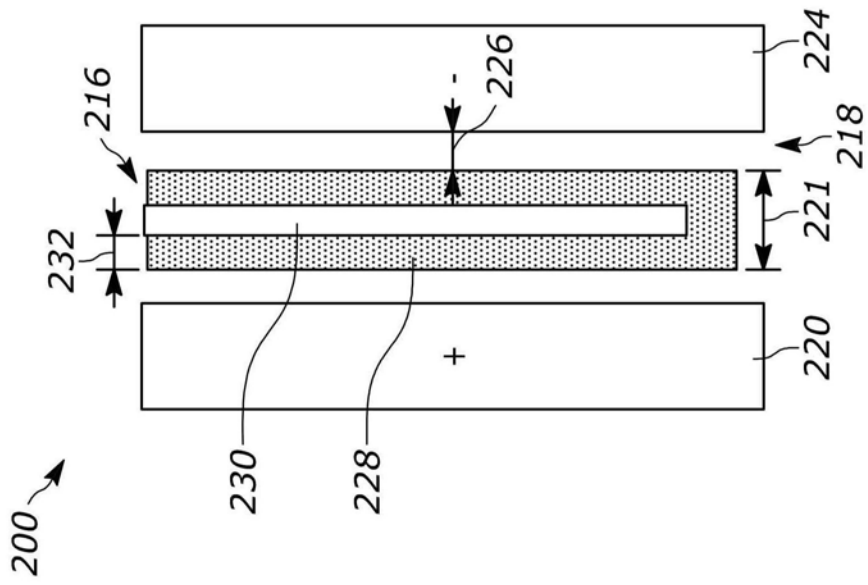


图7A

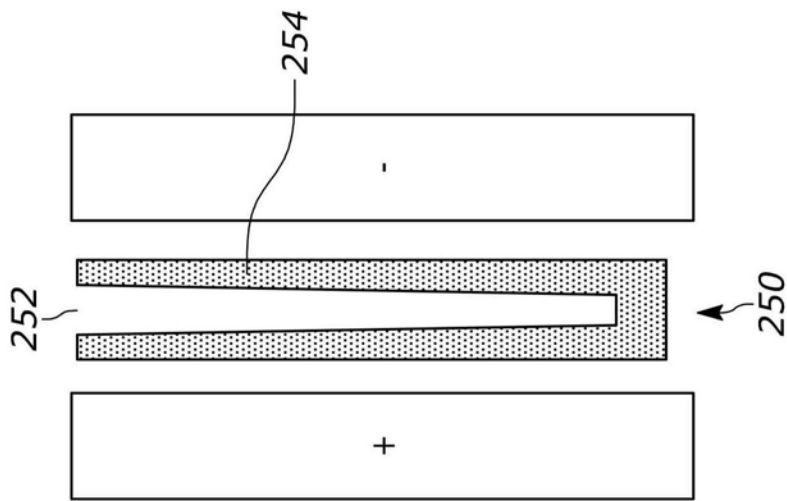


图7B

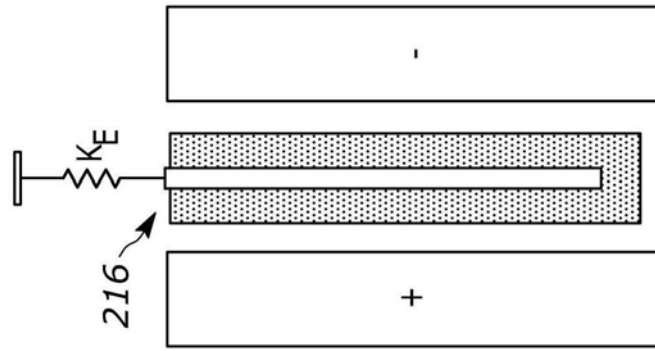


图8

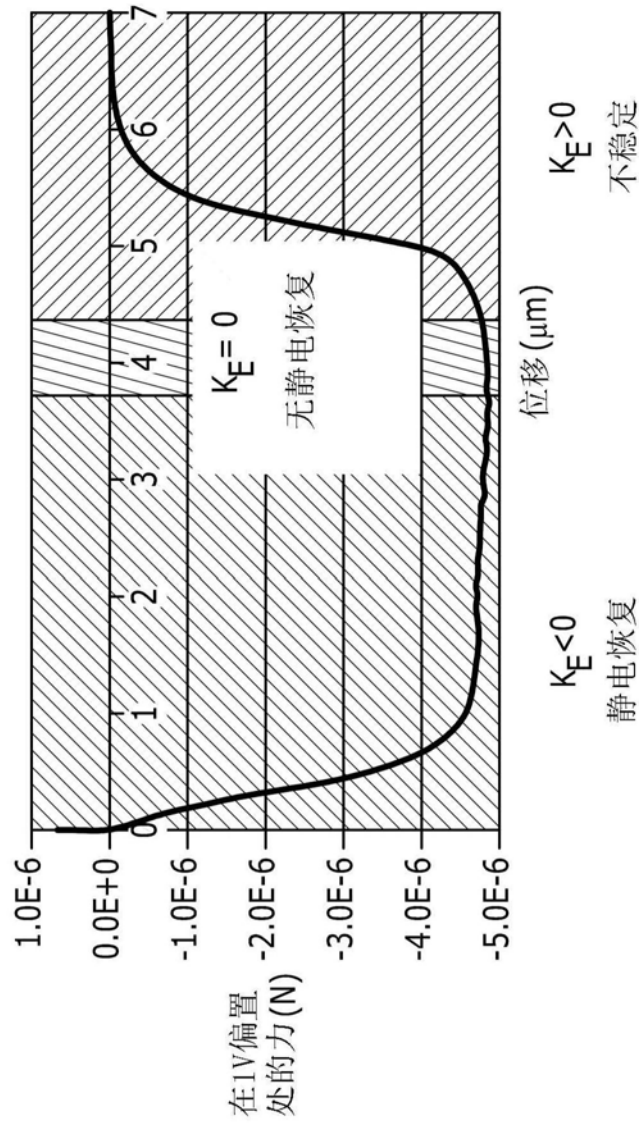


图9

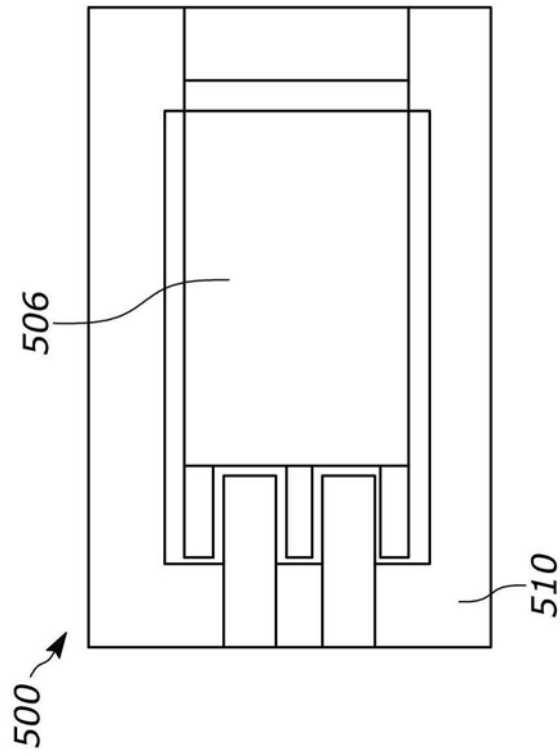


图10

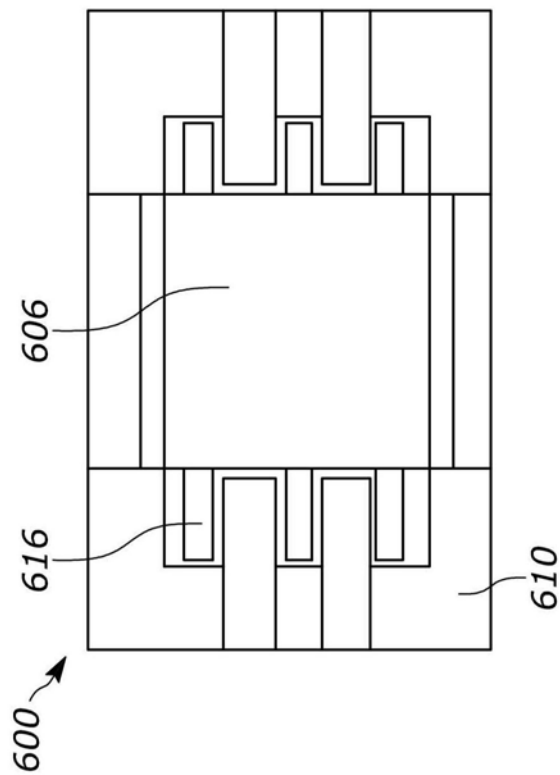


图11

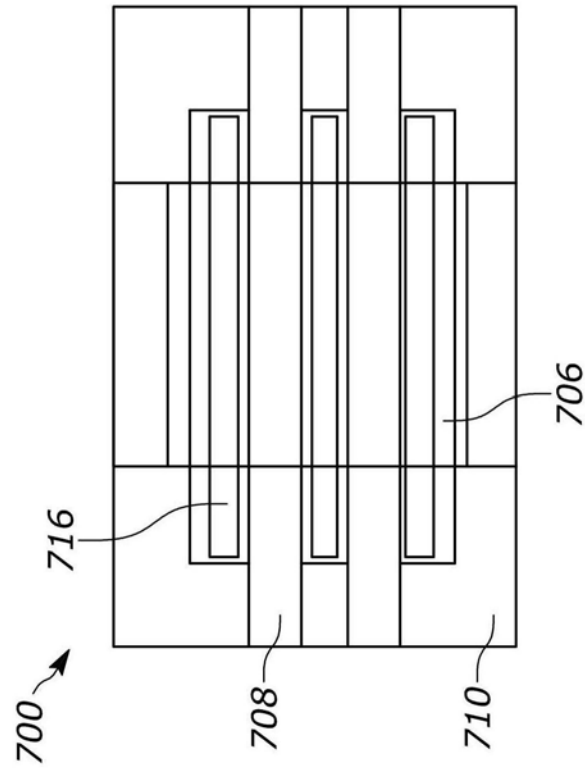


图12

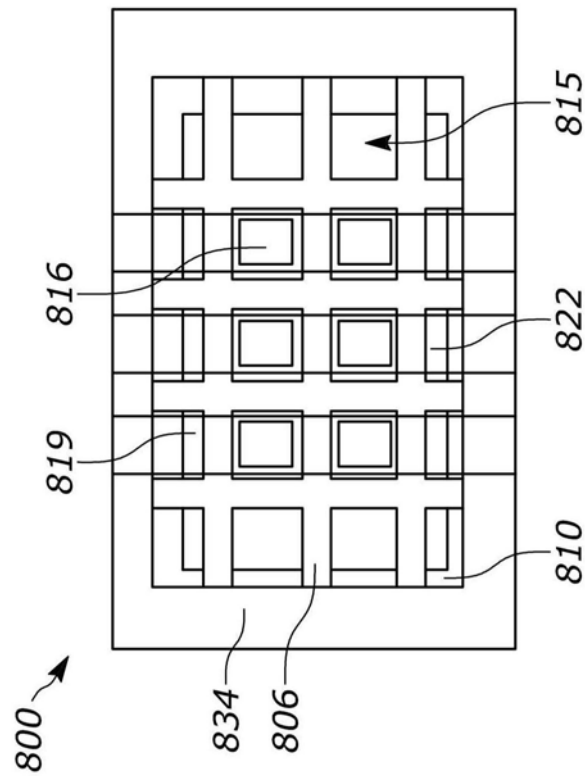


图13

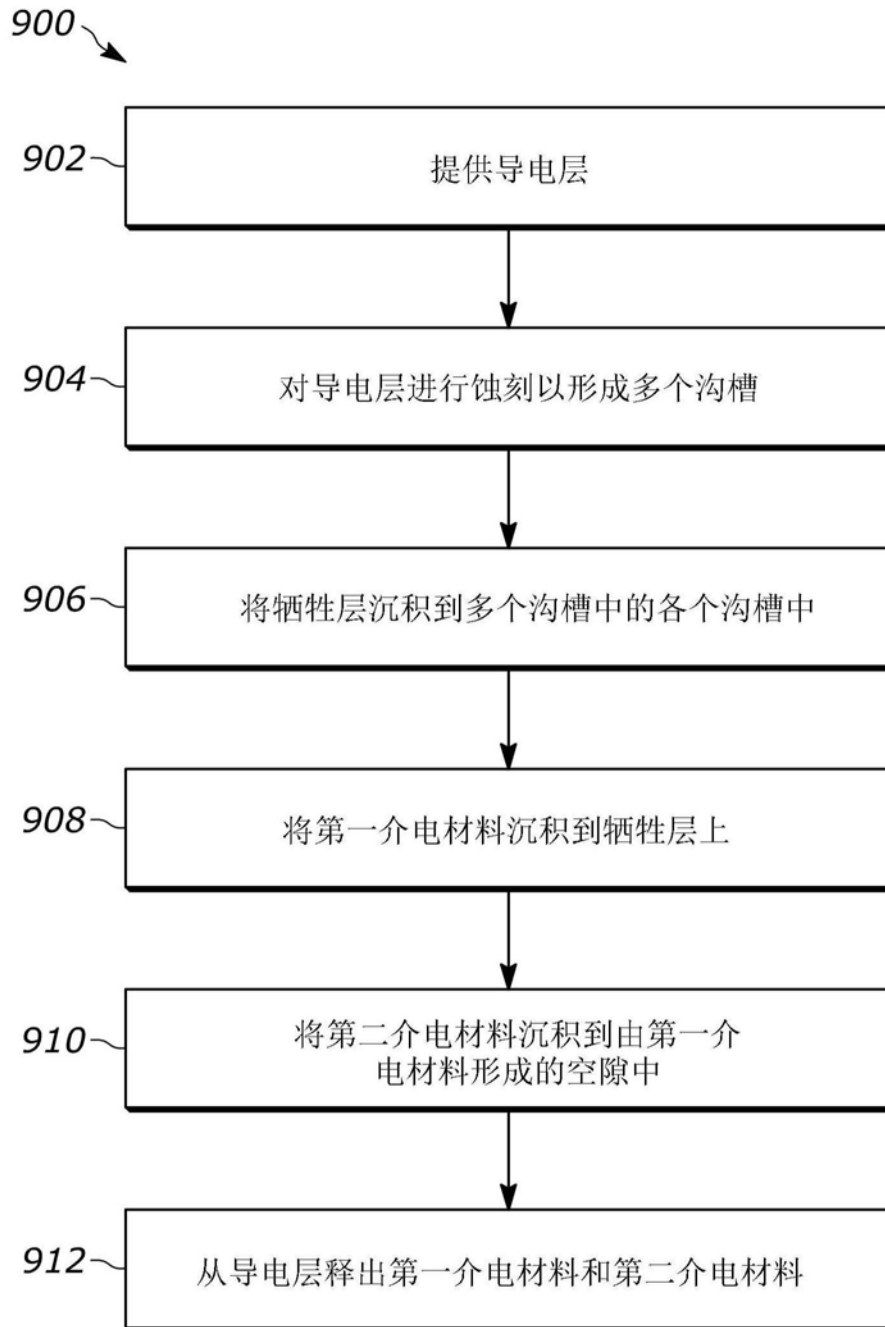


图14

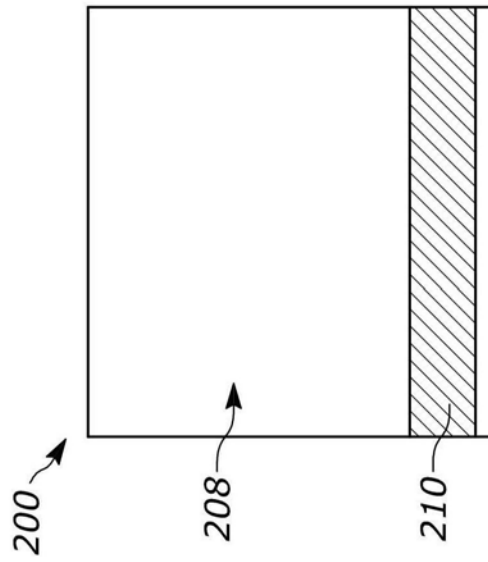


图15

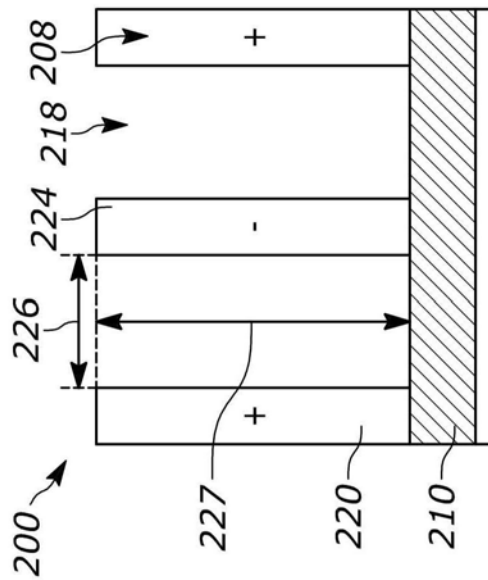


图16

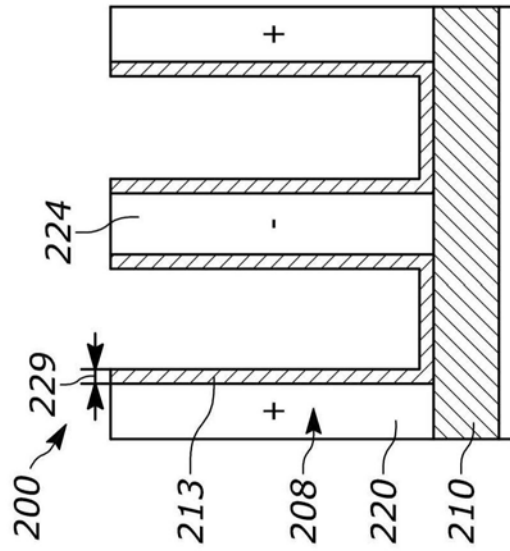


图17

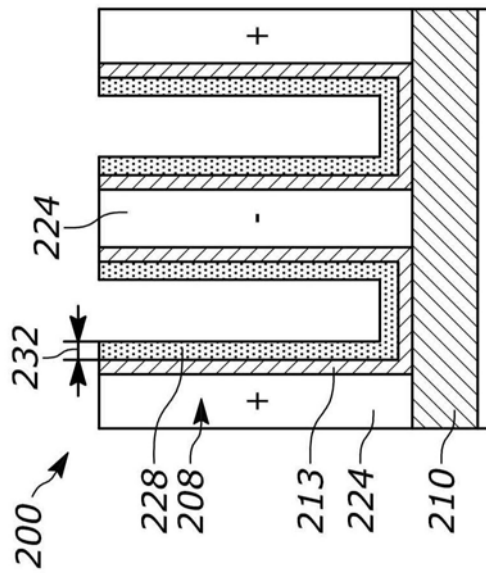


图18

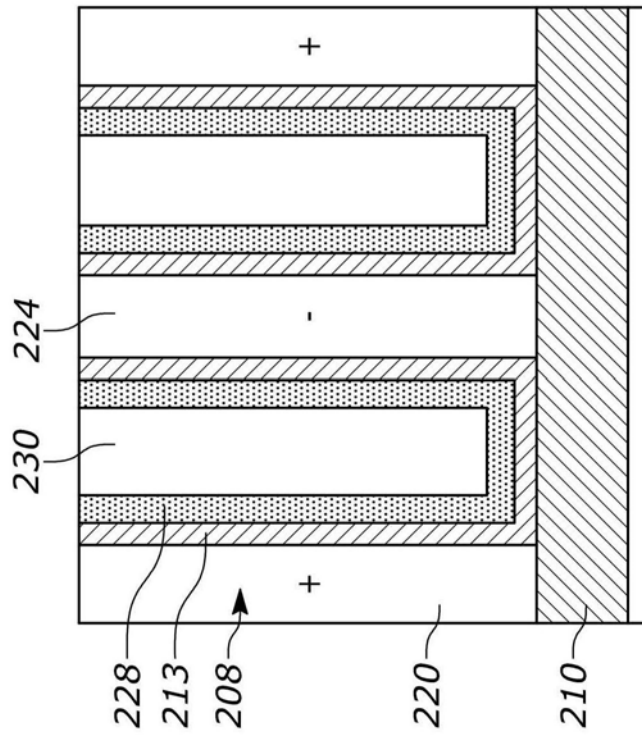


图19

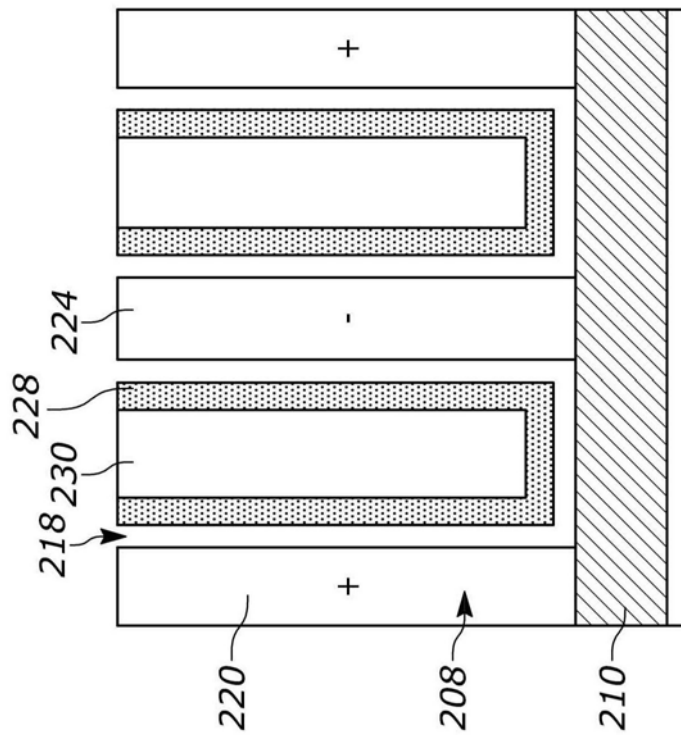


图20