

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利申请公布说明书

[21] 申请号 200710305762.2

[51] Int. Cl.

H01L 41/083 (2006.01)

H01L 41/193 (2006.01)

H01L 41/09 (2006.01)

H01L 41/22 (2006.01)

H01L 41/26 (2006.01)

H02N 2/00 (2006.01)

[43] 公开日 2008年8月6日

[11] 公开号 CN 101237021A

[51] Int. Cl. (续)

H04R 19/00 (2006.01)

F04B 43/04 (2006.01)

F04B 35/04 (2006.01)

[22] 申请日 2007.11.5

[21] 申请号 200710305762.2

[30] 优先权

[32] 2006.11.3 [33] DK [31] PA200601432

[71] 申请人 丹佛斯公司

地址 丹麦诺堡

[72] 发明人 穆罕默德·Y·本斯里曼

[74] 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

代理人 陶凤波

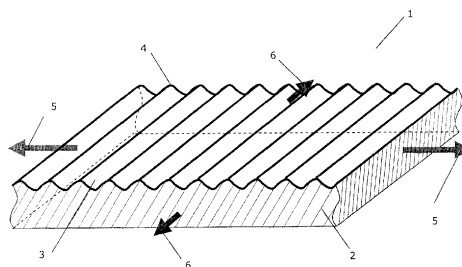
权利要求书5页 说明书29页 附图33页

[54] 发明名称

介电复合物和制造介电复合物的方法

[57] 摘要

本发明提供了一种复合物，该复合物包括介电材料制成的膜。该膜具有第一表面和第二表面，且至少该第一表面包括突起和凹陷表面部分的表面图案。另外，该膜包括第一导电层，该第一导电层沉积于该表面图案上，该导电层具有由膜表面图案形成的波纹状。由此，本发明涉及一种实质上改变了其宏观机电性能的复合物的微机械设计。



1、一种复合物，包括：

介电材料制成的膜，且该膜具有第一表面和第二表面，至少该第一表面包括具有突起和凹陷表面部分的表面图案，和

第一导电层，沉积于该表面图案上，该导电层具有由该膜的表面图案形成的波纹状，

其中该突起和凹陷表面部分具有沿该第一表面的至少一个方向周期地变化的形状和/或尺寸。

2、根据权利要求1所述的复合物，其中该导电层的弹性模量高于该膜的弹性模量。

3、根据权利要求1或2所述的复合物，设置为潜在的无限长的网。

4、根据上述任一权利要求所述的复合物，其中该介电材料为聚合物材料。

5、根据上述任一权利要求所述的复合物，其中该介电材料具有相似于弹性体的性能。

6、根据上述任一权利要求所述的复合物，其中该膜具有低于该膜平均厚度的110%的最大厚度。

7、根据上述任一权利要求所述的复合物，其中该膜具有该膜平均厚度至少90%的最小厚度。

8、根据上述任一权利要求所述的复合物，其中第一导电层具有低于第一导电层平均厚度的110%的最大厚度。

9、根据上述任一权利要求所述的复合物，其中第一导电层具有第一导电层平均厚度的至少90%的最小厚度。

10、根据上述任一权利要求所述的复合物，其中该表面图案包括形成在本质共同方向上延伸的波峰和波谷的波形，每个波形定义为波峰和相邻的波谷之间的最短距离的一高度。

11、根据权利要求10所述的复合物，其中该波形具有周期性重复的形状。

12、根据权利要求10或11所述的复合物，其中波的平均高度为1/3微米和20微米之间。

13、根据权利要求 12 所述的复合物，其中每个波定义了具有高度为最多 110% 平均波形高度的最大波形。

14、根据权利要求 12 或 13 所述的复合物，其中每个波定义了具有高度为至少 90% 平均波形高度的最小波形。

15、根据权利要求 10 - 14 的任一所述的复合物，其中该膜具有 10 和 200 微米之间的平均厚度。

16、根据权利要求 10 - 14 的任一所述的复合物，其中波的平均高度和膜的平均厚度之间的比值为 1/50 和 1/2 之间。

17、根据权利要求 10 - 14 的任一所述的复合物，其中波具有定义为两波峰之间最短距离的波长，且其中波的平均高度和平均波长之间的比值为 1/30 和 2 之间。

18、根据权利要求 10 - 17 的任一所述的复合物，其中第一导电层的平均厚度和波的平均高度之间的比值为 1/1000 和 1/50 之间。

19、根据上述任一权利要求所述的复合物，其中，该第一导电层具有 0.01 微米到 0.1 微米范围的厚度。

20、根据上述任一权利要求所述的复合物，且该复合物实质上沿长度方向方向比垂直的横向方向更长。

21、根据权利要求 20 所述的复合物，其中该表面图案定义了柔顺方向，该复合物在该方向上总体是柔顺的，其中该柔顺方向对于长度方向形成 0 度和 90 度之间的角度。

22、根据权利要求 21 所述的复合物，其中该复合物在柔顺方向上的柔性至少为在至少实质上垂直于该柔顺方向的方向上的柔性 50 倍大。

23、根据权利要求 20 - 22 的任一所述的复合物，其中该表面图案形成了实质上沿长度方向延伸的波峰和波谷。

24、根据权利要求 20 - 22 的任一所述的复合物，其中该表面图案形成了实质上沿横向方向延伸的波峰和波谷。

25、根据上述任一权利要求所述的复合物，其中该表面图案包括多个相同的子图案。

26、根据上述任一权利要求所述的复合物，其中该膜具有一表面，该表面具有一形状，该形状实质不受其与第一导电层接触的影响。

27、根据权利要求 26 所述的复合物，其中该复合物具有一形状，该形

状实质不受第一导电层的弹性模量的影响。

28、根据权利要求 26 或 27 所述的复合物，其中该膜具有一表面，该表面具有一形状，该形状实质不受第一导电层的厚度的影响。

29、根据上述任一权利要求所述的复合物，其中该膜具有一表面，该表面具有一形状，该形状实质不受膜的弹性模量的影响。

30、根据权利要求 29 所述的复合物，其中该膜具有一表面，该表面具有一形状，该形状实质不受膜的厚度的影响。

31、根据上述任一权利要求所述的复合物，包括第二导电层，该第二导电层设置在相对于该第一导电层的膜的相对表面上，以形成电活性复合物。

32、根据上述任一权利要求所述的复合物，其中该第二表面包括被导电层覆盖的表面图案。

33、根据权利要求 1 - 31 的任一所述的复合物，其中第二表面实质上是平的。

34、根据上述任一权利要求所述的复合物，其中该介电材料的电阻率大于 $10^{10}\Omega \cdot \text{cm}$ 。

35、根据上述任一权利要求所述的复合物，其中该导电材料的电阻率低于的 $10^{-4}\Omega \cdot \text{cm}$ 。

36、一种包括至少两层复合物的多层复合物，每个复合物层包括：
膜，由介电材料制成并具有前表面和后表面，该前表面包括凸出和凹陷的表面部分的表面图案，和

第一导电层，沉积于该表面图案上，该导电层具有由膜的表面图案形成的波纹形状。

37、根据权利要求 36 所述的多层复合物，其中每层复合物层的膜的突起和凹陷表面部分具有沿该前表面的至少一个方向周期地变化的形状和/或尺寸。

38、根据权利要求 36 或 37 所述的多层复合物，其中所述复合物层被设置成后表面彼此相向。

39、根据权利要求 36 - 38 的任一所述的多层复合物，其中所述复合物层被相互粘接结合。

40、根据权利要求 36 - 39 的任一所述的多层复合物，其中每层复合物层的膜包括形成沿一共同方向上延伸的波峰和波谷的波。

41、根据权利要求 40 所述的多层复合物，其中所述复合物层相对于彼此排列以提供一层的波峰和另一层的波峰之间的最短可能距离。

42、根据权利要求 40 所述的多层复合物，其中所述复合物层相对于彼此排列以提供一层的波峰和另一层的波峰之间的最长可能距离。

43、一种制造聚合物复合物的方法，该方法包括：

提供一形状定义元件，该元件具有突起和凹陷表面部分的表面图案；

提供液态聚合物成份到该表面图案上；

固化该液态聚合物以形成具有一聚合物膜，该表面具有突起和凹陷的表面部分的复制图案，使得该突起和凹陷表面部分获得沿该第一表面的至少一个方向周期地变化的形状和/或尺寸，和

沉积第一导电层到复制表面图案上，使得该导电层由该复制图案成形。

44、根据权利要求 43 所述的方法，其中涂布具有第一导电层的膜的步骤包括使用聚合物膜的形状成形导电层。

45、根据权利要求 43 或 44 所述的方法，其中该导电层能在物理气相沉积工艺中沉积到该膜上。

46、根据权利要求 43 - 45 的任一所述的方法，其中该导电层以 0.01 微米到 0.1 微米的厚度被沉积到膜上。

47、根据权利要求 46 所述的方法，其中该厚度被石英晶体微量天平控制。

48、根据权利要求 46 或 47 所述的方法，其中该导电层在溅镀工艺中制成。

49、根据权利要求 46 或 47 所述的方法，其中该导电层在电子束工艺中制成。

50、根据权利要求 43 - 49 的任一所述的方法，其中该沉积导电层的步骤包括沉积第一导电层和在该第一导电层的顶部上沉积第二导电层。

51、根据权利要求 50 所述的方法，其中该沉积第一导电层的步骤和该沉积第二导电层的步骤以不同的沉积速率进行。

52、根据权利要求 50 或 51 所述的方法，其中该沉积第一导电层的步骤包括沉积第一材料，且该沉积第二导电层包括沉积第二材料。

53、根据权利要求 43 - 52 的任一所述的方法，其中该膜通过使用液态聚合物和逆转辊工艺提供。

54、根据权利要求 43 - 53 的任一所述的方法，其中该膜通过使用液态聚合物和凹印卷绕工艺提供。

55、根据权利要求 43 - 54 的任一所述的方法，其中该膜通过使用液态聚合物和槽模具涂布工艺提供。

56、根据权利要求 49 - 55 的任一所述的方法，其中该液态聚合物包括溶剂。

57、根据权利要求 43 - 56 的任一所述的方法，其中该膜暴露于热或紫外光以初始化交联。

58、根据权利要求 43 - 57 的任一所述的方法，其中该膜用等离子体处理以改善导电层的粘接力。

59、根据权利要求 58 所述的方法，其中该处理通过已知产生温和等离子体的辉光放电而执行。

60、根据权利要求 58 或 59 所述的方法，其中在等离子体处理的步骤后和在其上沉积导电层步骤之前，粘接促进剂被施加到至少该膜的所述部分。

61、根据权利要求 60 所述的方法，其中该粘接促进剂通过在该膜和该导电层之间施加一层铬或一层钛而提供。

62、根据权利要求 60 或 61 所述的方法，其中该粘接促进剂在物理气相沉积工艺中施加到介电材料的膜上。

63、一种换能器，包括根据权利要求 1 - 35 的任一所述的复合物或包括根据权利要求 36 - 42 的任一所述的多层复合物。

介电复合物和制造介电复合物的方法

技术领域

本发明总体涉及微机电系统 (MEMS) 和微机械设计结构领域。更具体地, 本发明涉及一种实质上改变了其宏观机电性能的机械结构的微机械设计。更为具体地, 本发明涉及微机械成形一介电膜以提供该介电膜独特的机械性能, 其影响到了由该薄膜制造的换能器的宏观机电性能。

背景技术

位于一弹性体的相对表面上的两个电极之间的电位差产生引起吸引力的电场。结果, 电极间的距离产生变化, 该变化导致弹性体材料的压缩, 由此该弹性体材料变形。由于与肌肉的某种类似, 弹性体驱动器有时也称作人造肌肉。

US6376971 公开了一种柔顺电极, 该柔顺电极通过以下方式与聚合物接触放置, 使得当在电极间施加一电位差时, 电极间产生的电场使电极相对彼此收缩, 因此使聚合物偏转。由于电极实质上为刚性材料, 它们必须制成为有结构的以使得它们柔顺。

该电极被描述成具有“平面内”或“平面外”柔性。在 US6376971 中, 可通过在驱动期间以高于其正常能够拉伸的程度拉伸一聚合物, 从而提供该平面外的柔顺电极, 且刚性材料层沉积于被拉伸的聚合物表面上。例如, 该刚性材料可为当该电活化聚合物被拉伸时被固化的聚合物。在固化后, 该电活化聚合物被松弛, 且该结构被弯曲以提供有结构的表面。该刚性材料的厚度可被改变以提供任何尺寸的结构, 包括亚微米级。可选地, 有结构的表面可通过反应离子蚀刻 (RIE) 来制造。例如, RIE 可在包括硅的预应变的聚合物上采用 RIE 气体来进行, 以形成具有波谷和波峰深达 4-5 微米的表面, 该 RIE 气体包括 90% 的四氟化碳和 10% 的氧。作为又一可选的, 该电极可粘接到聚合物的表面上。粘接到聚合物的电极优选为柔顺的并遵从聚合物的改变的形状。有结构的电极可提供多于一个方向上的柔性。有粗糙结构的电极可在正交的平面方向提供柔性。

同样在 US6376971 中公开了一被构造和提供一个方向柔性的平面柔顺电极，其中金属迹线在电荷分布层上被构图为平行线，两者覆盖了聚合物的有效区域。该金属迹线和电荷分布层被涂布到聚合物的相对面。该电荷分布层有助于金属迹线之间的电荷分布，并且是柔顺的。结果，该被构造的电极允许在垂直于平行的金属迹线的柔顺方向上偏转。一般地，该电荷分布层具有大于电活化聚合物但小于金属迹线的电导率。

该聚合物可在一个或多个方向上被预应变。预应变可通过在一个或多个方向上机械拉伸一聚合物并在应变时将该聚合物固定到一个或多个实心构件（例如刚性板）而实现。保持预应变的另一技术包括使用一个或多个加强材。该加强材为置于当其处于预应变状态例如其被拉伸时的聚合物上的长刚性结构。该加强材沿其轴线方向保持预应变。该加强材可排列为平行或根据其它配置以实现换能器的定向柔性。

在 US6376971 中公开的柔顺电极可以包括导电脂，如碳脂或银脂，提供多个方向上的柔性，或者该电极可包括碳原纤维，碳纳米管，离子化导电材料或胶体悬浮物的混合物。胶体悬浮物包含亚微米尺寸颗粒，如液体载体中的石墨、银和金。

该聚合物可为商业性可获得的产品，比如商业性可获得的丙烯酸弹性体膜。它可为通过浇铸、浸渍、旋涂或喷涂而得的膜。

可选地，现有技术中已知的柔顺电极可被光刻法构图。在该情形，光致抗蚀剂被沉积于预应变的聚合物上且采用掩膜来构图。等离子体蚀刻可以移除未被期望的图案的掩膜保护的电活化聚合物的部分。而后掩膜通过合适的湿蚀刻被移除。该聚合物的活性表面被例如通过溅射沉积的金薄层覆盖。

采用在 US6376971 和 US6891317 中描述的技术制造电活化聚合物，尤其卷绕驱动器具有波纹状电极的柔顺方向非常难于控制的缺点。

最后，为了使用现有技术获得需要的柔性，需要对电极使用具有相对高电阻的材料。由于具有大量绕数的卷绕驱动器将无疑具有很长的电极，电极的总电阻将非常高。这种类型的驱动器的响应时间由 $\tau = R \cdot C$ 给出，其中 R 为电极的总电阻， C 为该复合物的电容。因此，高总电阻将导致该驱动器非常长的响应时间。因此，为了获得可接受的响应时间，绕数必须被限制，且因此，驱动力也被限制，即在设计驱动器时，必须权衡响应时间和驱动力。

发明内容

本发明的一个优选实施例的一个目的在于提供一种换能器的复合物，该复合物相对于类似的现有技术换能器的复合物有助于增加的驱动力。本发明的进一步目的在于提供一种复合物，相对于类似的现有技术换能器的复合物，其有助于增加换能器在一个方向上的柔性，有助于改善的反应时间，并潜在的提供了应用该复合物的换能器增加的寿命。就此而言，柔性意味着容易在一方向上拉伸该复合物。

根据本发明的第一方面，上述和其它的目标通过一种复合物实现，在该复合物中，介电材料膜具有第一表面和第二表面，至少该第一表面包括突起和凹陷表面部分的表面图案。第一导电层沉积于该表面图案上且在其上形成电极层。该突起和凹陷表面部分具有沿该第一表面的至少一个方向周期地变化的形状和/或尺寸。为能在一个明确的方向上延长该复合物，即提供柔性，该导电层具有波纹形状，其在长度方向改变了导电层的长度，导电层的长度在长度方向长于复合物本身的长度。该导电层的波纹形状由此有助于复合物能够沿长度方向拉伸而不必在该方向上拉伸导电层，可仅仅通过使导电层的波纹形状平坦即可。根据本发明，该导电层的波纹形状为膜表面图案的复制品。

由于该导电层被沉积于膜的表面图案上并通过膜的表面图案的形状形成，由此可界定导电层的波纹的非常精确的形状，且可通过合理设计膜上的表面图案可以提供向特定方向变形的改善的柔性。因此，当该复合物用于换能器时，该复合物能有助于增加的驱动力，或普遍而言，在机械能和电能之间增加的转换率、增加的寿命和改善的反应时间。

在现有技术的复合物中，膜和电极的图案通过在膜表面施加电极之前拉伸膜而提供。当膜的拉伸被释放后，电极起皱，且由于电极被结合到膜，该膜表面随电极起皱。由于根据本发明的导电层的形状为膜表面图案的形状的复制品，可以提供复合物本身的形状不受导电层和膜之间的接触和结合的影响。可进一步提供该形状实质上不受导电层和膜的弹性模量的影响。其可以还受导电层和膜的厚度的影响。这提供了相当于膜和导电层的材料选择上更大的自由度，且由此当复合物用于换能器时能够改善复合物的性能。

为限制复合物在其它方向上而不是在柔性的方向上的变形，该导电层可以具有远高于膜的弹性模量。因此，该导电层抗拒延长，由防止在导电层的

长度对应于如此的复合物的长度的方向上复合物的变形。

该复合物被提供至少一具有导电层的表面。一表面不足以产生其中膜可通过相对表面上的两个电极层之间的电位差而变形的活性复合物。下文中，缩写，非活性复合物被用于具有单个表面导电层的复合物，且活性复合物被用于具有双表面导电层的复合物。

可通过以层状结构施加附加的复合物而使得根据本发明的复合物为活性。一层的第一导电层成为相邻层的第二导电层。这将在后进一步详细描述。另一种使得复合物为活性的方法为在膜的相对表面上施加附加的导电层。

为从该复合物获得最大利益，例如在包含复合物的换能器内，该复合物被弯曲或缠绕以形成具有大量的层或绕圈的卷绕结构，优选地提供该复合物为很长的网。本文中，网表示在长度上可能无限的物品，因此其可以被提供成类似于粘着包装 (cling wrap)，粘着膜 (cling film)，家用箔的卷轴产品。一般的，网在长度方向上为垂直横向方向上的至少十倍长，但也甚至可在长度方向上为 100、1000 倍长或更长。

该表面图案和由此的波纹状界定了复合物最柔顺的柔顺方向，且该方向可以为从长度方向到横向方向的任意方向。

如上所述，该表面图案导致了设计的各向异性柔性。各向异性柔性由导电层引起。由于表面图案产生了一导电层，该导电层在一个方向上的长度实质上长于复合物本身的长度，所以该复合物能在一个方向上被拉伸，而无需拉伸导电层。这提供了该方向的柔性。相反，由于该导电层的可弹性变形性实质上小于膜，由该同一导电层也提供了其它方向上缺少柔性。优选地，导电层的弹性模量和膜的弹性模量之间的比例大于 200。

膜产品可通过模塑或涂布工艺中形成，而后导电层被施加使得该导电层依照膜的表面图案。当该导电层被沉积于膜上时，该导电层被形成为膜表面图案的复制品。该膜，在另一方面，相似地可以通过例如在模塑、涂布或喷涂工艺中提供液体材料到形状界定元件，并随后允许液体材料固化以形成膜而被形成。

在本文中，术语“介电材料”应被解释成意味具有大于等于 2 的相对介电常数 ϵ_r 的材料。

该介电材料可为聚合物，例如弹性体，比如硅酮弹性体，比如弱粘性硅酮。一种合适的弹性体为 Elastosil RT 625，由 Wacker - Chemie 制造。可选

地，同样由 Wacker - Chemie 制造的 Elastosil RT 622 或 Elastosil RT 601 也可被使用。作为替代，也可选择其它种类的聚合物。

在使用不为弹性体的介电材料的情形，应注意该介电材料应当具有类似弹性体的性能，例如就弹性而言。因此，该介电材料应当可变形到一定程度使得该复合物能偏转，和从而由于介电材料的变形而引起推和/或拉。

该膜和导电层可以具有相对均匀的厚度，例如具有低于膜平均厚度的 110% 的最大厚度和膜平均厚度的至少 90% 的最小厚度。相应地，该第一导电层可以具有低于该第一导电层平均厚度的 110% 的最大厚度和该第一导电层平均厚度的至少 90% 的最小厚度。在绝对项上，该导电层可以具有 0.01 微米到 0.1 微米的厚度范围，比如 0.02 微米到 0.09 微米范围内，比如 0.05 微米到 0.07 微米范围内。由此，优选地，该导电层以非常薄层施加于膜上。这有助于良好的性能，和有助于导电层在偏转时能依照膜表面的波纹图案。

该导电层可以具有 0.01 微米到 0.1 微米的厚度范围，该膜可以具有 10 微米和 200 微米之间的厚度，比如在 20 微米和 150 微米之间，比如 30 微米和 100 微米之间，比如 40 微米和 80 微米之间。本文中，膜的厚度被定义为从膜的一表面的一点到位于处于膜的波纹表面的波峰和波谷之间中途的一中间点的最短距离。

该导电层可以具有低于 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 的电阻率。通过提供具有非常低电阻率的导电层，即使使用了很长的导电层，该导电层的总电阻将不会过大。因此，在机械能和电能之间转换的响应时间能够维持在一可接受的水平，同时允许复合物大的表面面积，并由此当该复合物被用于驱动器时获得大的驱动力。在现有技术中，以前还不可以提供具有足够低电阻的波纹状的导电层，主要由于需要选择现有技术中的导电层的材料而且适当考虑材料的其它性能来提供柔性。通过本发明，因此使得可以由具有非常低电阻率的材料提供柔顺的导电层。这允许获得大的驱动力而且维持换能器的可接受的响应时间。

该导电层可优选地由金属或导电合金制成，例如选自由银、金和镍组成的组的一种金属。可选的，可以选择其它的合适的金属和导电合金。由于金属和导电合金一般具有非常低的电阻率，上述优点可通过由金属或导电合金制造导电层而被获得。

该介电材料可以具有大于 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 的电阻率。优选地，该介电材料的电阻率远高于导电层的电阻率，优选为至少 $10^{14} - 10^{18}$ 倍高。

该波纹图案可包括沿一共同方向延伸的形成波峰和波谷的波形，该波形确定了有助于沿垂直于共同方向的方向上的移动的各向异性的特征。根据本实施例，该波峰和波谷类似于驻波，具有本质上平行的波前。然而，该波形不必要为正弦波，但可具有合适的形状，只要界定了波峰和波谷。根据本实施例，波峰（或波谷）确定实质上线性等高线，即，一般而言沿具有相对于复合物等高的波纹的部分的线。该至少实质上的线性线将至少实质上平行于由其它波峰和波谷所形成的相似的等高线，和该至少实质的线性线的方向确定了该共同方向。以该方式确定的共同方向导致了产生各向异性，且有助于在垂直于共同方向的方向上复合物的移动，即该复合物，或设置在该波纹状表面上至少一导电层在垂直于该共同方向的方向上是柔顺的。连同潜在无限的网，该波峰和波谷可例如沿长度方向或横向延伸。

优选地，在柔顺方向上复合物的柔性为其在共同方向垂直于柔顺方向上的至少 50 倍大。

该波形可以具有周期性重复的形状。在一个实施例中，这可能意味着每个波峰和波谷至少实质上是相同的。可选地，该周期性可在较大的尺度获得，即，该重复图案可为几个“波长”长。例如，波峰/波谷的波长、幅度、形状等可周期性的重复。作为替代，波形的形状可为非周期性的。

每个波形可定义为波峰和相邻的波谷之间的最短距离的一个高度。在该情形，每个波形可定义具有高度为最多 110% 的平均波形高度的最大的波形，和/或每个波形可定义具有高度为至少 90% 的平均波形高度的最小的波形。根据本实施例，波形高度的变化非常小，即，获得了非常均匀的图案。

根据一实施例，波形的平均波形高度可以为 1/3 微米到 20 微米之间，比如为 1 微米和 15 微米之间，比如 2 微米和 10 微米之间，比如 4 微米和 8 微米之间。

替代地，或附加地，该波形可以具有定义为两波峰之间最短距离的波长，且波形的平均高度和平均波长之间的比值可以为 1/30 和 2 之间，比如 1/20 和 3/2 之间，比如 1/10 和 1 之间。

该波形可以具有 1 微米到 20 微米的范围的平均波长，比如 2 微米到 15 微米的范围，5 微米到 10 微米的范围。

波形的平均高度和膜的平均厚度之间的比值可以为 1/50 和 1/2 之间，比如 1/40 和 1/3 之间，比如 1/30 和 1/4 之间，比如 1/20 和 1/5 之间。

导电层的平均厚度和波形的平均高度之间的比值可以为 1/1000 和 1/50 之间，比如 1/800 和 1/100 之间，比如 1/700 到 1/200 之间。

在本发明的优选实施例中，该复合物通过以这样的方式优化上述参数而被设计，即考虑了膜以及导电层材料的介电和机械性能，和获得了具有期望性能的复合物。因此，膜的平均厚度可以在一方面适当考虑膜的相对介电常数和击穿电场，且在另一方面考虑导电层之间的电位差而选择。相似地，波峰的高度可以相对于膜的厚度被优化，从而横跨设置在导电层之间的介电材料膜获得相对均匀的电场分布。另外，导电层厚度、平均波长、和波形高度可被优化以获得期望的柔性。这将参照附图在后进一步描述。

如前所述，该复合物可通过提供附加的、相对于膜与该第一导电层相对设置的第二导电层而成为电活性。该第二导电层可类似于第一层，具有设置为膜表面图案的复制品的波纹形状。可选地，该第二导电层可实质上是平的。如果该第二导电层为平的，该复合物将仅仅在其两个平面之一上具有柔性，而该第二导电层倾向于阻止另一表面的延长。这提供了一种当横跨两个导电层施加电场时被弯曲的复合物。

另一使得复合物电活性的方法是通过组合几个复合物为具有叠层结构的多层复合物。第二方面，本发明提供了包括至少两层复合物的多层复合物，每个复合物层包括：由介电材料制造并具有前表面和后表面的膜，该前表面包括凸出和凹陷的表面部分的表面图案，和第一导电层，被沉积于该表面图案上，该导电层具有由膜表面图案形成的波纹形状。

该结构中，可定义一电极组结构，使得每个第二导电层成为第一组的一个电极，每个中间导电层成为第二组的一个电极。两组电极之间的电位差将导致位于其之间的膜层变形，且由此该复合物为电活性。在该分层配置中，最后一层将保持非活性。因此，具有三层的多层复合物包括两层活性层，具有十层的多层复合物包括九层活性层，等。

如果导电层沉积于膜的前表面上，设置各层的后表面成相互面对将可能是有利的。以该方法，该多层复合物较少受膜上的缺陷的损伤。如果一层上的膜具有使得在其相反表面上的电极短路的缺陷，若该层设置以其后表面抵靠有问题的膜在同一位置具有缺陷，则将非常不可能产生短路。换句话说，至少膜的至少之一提供了两导电层的电隔离。

该多层复合物能通过排列该复合物层为叠层，并通过在叠层中每个相邻

的导电层之间施加电位差，使得各层向彼此偏置，而且各层同时被拉平。由于膜的物理或特征性能，以上方法可将各层结合。作为替代或附加地，各层可通过在层之间设置的粘接剂而结合。优选地，该粘接剂应被选择成不抑制多层结构的柔性。因此，可以优选地对于膜和粘接剂选择同样的材料，或至少选择其弹性模量小于膜的弹性模量的粘接剂。

多层复合物层中的复合物层应优选为同样的以确保当施加电场时各层上多层复合物的均匀的变形。另外，以使得一层的波峰相邻于相邻层的波峰或一层的波峰相邻于相邻层的波谷的方式提供每层的波纹图案可能是有利的。

第三方面，本发明提供一种制造复合物的方法，该方法包括：

提供形状定义元件，具有突起和凹陷表面部分的表面图案；

在该表面图案上提供液态聚合物成份；

固化该液态聚合物以形成具有一表面的聚合膜，该表面具有突起和凹陷表面部分的复制图案，和

在复制表面图案上沉积第一导电层，使得导电层通过该复制图案被成形。

由于导电层的形状通过膜的图案而获得，膜的图案通过形状定义元件，例如通过模塑，涂布，喷涂或通过任何相似的形状复制工艺而获得，该导电层的形状可为某一目的而特别设计。因此，若用于换能器中该复合物可提供增强的性能。

该膜可由液体介电材料制成，例如在逆转辊工艺中，凹板印刷卷绕工艺中或槽模具涂布的工艺中的液体聚合物。该液体聚合物可使用溶剂而稀释以有助于非常低厚度的膜并用于交联聚合物，该膜能暴露于热或紫外线。

为了改善导电层的粘性，该膜可通过等离子体处理。该处理通过已知产生温和等离子体的辉光放电而进行。为此，优选氩等离子体。在膜上沉积导电层之前，粘接促进剂可以被施加到膜上。粘接促进剂在膜的等离子体处理后被施加。该促进剂的例子为一层铬或一层钛。该粘接促进剂可在如物理气相沉积工艺中被施加到膜上。

等离子体清除为弹性体膜的金属化工艺中的关键步骤。它增强了被沉积材料的粘接力。然而，不是任何的等离子体都适用于处理弹性体膜，因此应当仔细选择该等离子体。如上所述，优选氩等离子体。已知等离子体在弹性

体界面上形成薄而非常硬的硅酸盐“玻璃态”层。当随后施加了导电层时，结果是具有有限柔性的波纹状的电极和由于刚性电极产生裂纹的危险而不能很大拉伸的复合物。我们选择非反应性的氩等离子体处理，因为氩为惰性气体。然而，在真空沉积室内氧气和其它反应气体的残留且与氩等离子体的结合可能有稍许的反应性。我们优化了真空室内的氩的压强和温和辉光放电的参数，以及处理的时间，使得被沉积的金属涂层非常好地粘贴到弹性体膜上。所得的波纹状的电极非常柔顺且该复合物可以被拉伸而不损伤电极。

如上所述，该导电层非常薄，且导电层的厚度相对于膜的厚度非常小。该导电层可以在物理气相沉积工艺中，例如溅镀工艺或电子束工艺中沉积到膜上。可选的，可采用喷涂工艺。为获得精确的厚度，该厚度被石英晶体微平衡控制。

石英晶体微平衡为在物理气相沉积中普遍采用的厚度测量技术。它允许以亚纳米范围的精度控制沉积的涂层，例如金属涂层或类似的厚度。

第四方面，本发明提供一种至少部分由上述类型的复合物或上述类型的多层复合物制成的换能器。

附图说明

现将参考附图进一步详细描述本发明，在附图中：

图 1a 和 1b 示出根据本发明的实施例示意了卷轴复合物的连续卷，

图 1c 是根据本发明的一个实施例的复合物的一部分的透视图，

图 2a - 2f 是根据本发明的实施例的复合物的一部分的横截面图，

图 2g 为图 2a/2b/2c/2d/2e/2f 的放大截面，

图 3a 和 3b 显示了暴露于零电位差和暴露于高电位差的电活性复合物，

图 4a - 4c 示出了将图 3a 中的电活性复合物暴露于图 3b 中所示的高电位差的效果，

图 5a 和 5b 示出了根据本发明的实施例的复合物叠层的一个例子，由此形成了电活性多层复合物，

图 5c 和 5d 示出了暴露于零电位差和暴露于高电位差的电活性多层复合物，

图 6a 和 6b 示出了根据本发明的实施例的复合物叠层的另一例子，由此形成了电活性多层复合物，

图 6c 和 6d 示出了暴露于零电位差和暴露于高电位差的另一电活性多层复合物，

图 7a - 9 示出了根据本发明的实施例的复合物的叠层原理的例子，

图 10a 和 10b 示出了卷绕的电活性复合物的例子，

图 11a 示出了根据本发明的实施例示意了复合物的一部分的例子，该复合物特别适用于具有卷绕结构的复合物，

图 11b 根据本发明的实施例的复合物的一部分的例子，该复合物特别适用于具有折叠结构的复合物，

图 12a-12c 示出了图 11 的复合物的制造工艺和生产所需的一些工具，

图 13a 示出了被形成为卷绕的复合物的图 11a 的复合物，

图 13b 示出了被形成为折叠的复合物的图 11b 的复合物，

图 14a 和 14b 示出了通过复合物的折叠的图 11 所示的复合物的叠层，

图 15a - 15c 为根据本发明的实施例的直接轴向驱动换能器的透视图，

图 16a - 16c 为根据本发明的实施例的直接轴向换能器的力作为行程的函数的曲线图，

图 17a 和 17b 为根据本发明的实施例的直接径向驱动换能器的透视图，

图 18a 示出了形成平管状结构的复合物的叠层，

图 18b 示出了被预应变的图 18a 中的扁平管状结构，

图 19a - 19c 示出了具有平结构的驱动换能器的透视图，

图 20a - 20e 示出了提供有预载荷的驱动换能器，

图 21a 和 21b 示出了具有平管状结构的两个驱动换能器，所述换能器提供有机械连接，

图 22 示出了复合物的空间移位的层叠的层的原理，

图 23 示出了提供有电接触部分和电连接器的叠层的电活性多层复合物，

图 24 和 25 示出了提供有电接触部分的电活性多层复合物的两个例子，

图 26 - 29 示出了提供有电接触部分的换能器的例子，

图 30 示出了不同的电连接器，

图 31 - 35 示出了提供有接触电极的电活性复合物，和

图 36a - 36c 为描述根据本发明的实施例的换能器的制造工艺的工艺简图。

具体实施方式

图 1a 和 1b 示出了根据本发明的实施例的卷轴的复合物 1 的连续卷，且图 1c 为复合物 1 的一部分的透视图。该复合物的比例失真以示出复合物 1 的不同的元件。复合物 1 包括由介电材料制成的膜 2，该膜 2 具有设置有突起和凹陷的表面部分的图案的表面 3，由此形成了表面 3 的设计的波纹状的轮廓。导电层 4 已经被施加到表面 3，导电材料被沉积使得导电层根据突起和凹陷的表面部分的图案而被形成。就日常物件而言，膜 2 在某些方面相似于家用包装膜。它具有相似的厚度而且相对柔软。然而，它比这种膜更具有弹性，具有明显的机械各向异性，将如下所述。

介电材料可为一种弹性体或具有相似特征的其他材料。

由于突起和凹陷表面部分的图案，导电层 4 可以随着膜 2 扩展被平坦，且当膜 2 沿箭头 5 所定义的方向收缩时恢复其原始形状，而不导致导电层 4 的损伤，由此该方向定义了柔顺方向。因此，复合物 1 被适于形成能承受大应变的柔性结构的一部分。

如上所述，在沉积导电层之前，该波纹表面轮廓被直接压印或模塑到介电膜 2 中。该波纹允许采用高弹性模量的电极材料制造柔顺的复合物，例如金属电极。这可以被获得而不需要当施加导电层 4 时对于介电膜 2 施加预拉伸或预应变，且形成的复合物 1 的波纹状的轮廓不依赖于介电膜 2 中的应变，也不依赖于导电层 4 的弹性或其它特征。因此，该波纹轮廓以一致的方式在实质上整个介电膜 2 的表面 3 上复制，并可以控制该复制。另外，该方法提供了采用标准复制和卷到卷 (reel to reel) 涂布的可能性，由此使该工艺适于大规模生产。例如，导电层 4 可采用标准商用的物理气相沉积 (PVD) 技术施加到介电膜 2 的表面 3 上。该方法的优点为各向异性通过设计被确定，实际的各向异性由于在介电膜 2 的表面 3 上提供的波纹轮廓和依照该波纹轮廓的导电层 4 的特性而被获得。

如图 1c 所示的复合物 1 被设计成具有在箭头 5 所定义的方向上在介电膜 2 的柔性范围内的柔性，和在箭头 6 所定义的方向上导电层 4 的刚性范围内的刚性。在图 1a 中，柔顺方向沿复合物 1 的长度方向，而图 1b 中的柔顺方向为横过复合物 1。这在图 1a 中通过横过复合物 1 和图 1b 中沿复合物 1 的细线表示，细线代表了形成波纹轮廓的突起和凹陷的表面部分的图案。该复合物 1 可制成很长的长度，所谓的“无限长”复合物，其可作为图 1a 和

1b 所示的卷轴而被存储。这种半成品可被用于换能器等例如驱动器的制造。

图 2a-2f 示出了根据本发明的实施例的复合物 1 的截面图的一部分,为清楚起见省略了阴影线。如在每个部分底部的对称线 10 所示,每个部分仅示出了一半复合物 1。另外,导电层 4 可被沉积于介电膜 2 的下表面上,下表面也可定义波纹表面,由此形成电活性复合物,即,至少两个导电层被介电膜所隔离。另外,每个部分仅仅示出了每个复合物长度方向的一小部分。为了图示的目的,图 2a-2g 的比例失真。图 2g 示出了图 2a/2b/2c/2d/2e/2f 的一个放大截面。图 2a-2g 中示出的复合物可以例如为图 1a 中的复合物 1。由此,复合物 1 包括由介电材料制成的介电膜 2,该介电膜 2 具有设置有突起和凹陷的表面部分的图案的表面 3,由此形成了表面 3 的波纹状的轮廓。该表面 3 提供有形成如上所述的方向性柔顺复合物的导电层(如图 2g 所示)。如图 2a-2f 所示,突起和凹陷的表面部分的图案可被设计成具有各种形状。

该波纹轮廓可通过一系列定义好和周期性的正弦波状的三维微观结构所表示。可选地,该波纹轮廓可具有三角形或方形轮廓。该波纹电极的机械柔性因数 Q 由波纹的深度 d 和导电层 4 的厚度 h (如图 2g 所示)之间的比例因数,和波纹的深度 d 和其周期 P 之间的比例因数来确定。最占主导的因素为波纹的深度 d 和导电层 4 的厚度 h 之间的比例因数。柔性因数越大,该结构柔性越大。本发明的发明人发现,如果假定理想的柔性,则对于波纹的深度 d 和其周期 P 之间的比例因数,与原始长度相比,理论上正弦轮廓可延长大约 32%,三角形轮廓大约可延长 28%,方形轮廓大约可延长 80%。然而,事实上情况并不如此,因为方形轮廓包括将导致不同的柔性的垂直和水平梁,因为垂直梁将弯曲且由此在位移方向上产生非常柔顺的移动,而水平梁刚性大很多,因为它们位移方向延伸。因此通常期望选择正弦轮廓。

在图 2a-2f 中所示的复合物 1 中,压印或模塑到介电膜 2 上的波纹图案可通过一系列定义好和周期性的类似于正弦波的三维微观结构所表示。该波纹轮廓形成于膜 2 的上表面 3,如图 2a-2f 中所示。如对称线 10 所示,第二波纹轮廓形成于膜的下表面(未显示)。图 2a-2f 内,该截面沿柔顺方向延伸。与柔顺方向垂直的平行直线表示了突起和凹陷表面部分的顶部和底部,即,正弦波状微观结构的波峰和波谷。这从图 1a 和 1c 看上去更清楚。沿这些平行直线,柔性非常低,即对于所有实际目的,复合物 1 沿该方向不柔顺。换句话说,该设计代表了一维波纹,其在施加导电层后将介电膜 2 转

换为具有各向异性的柔性的电活性复合物 1，其中该膜可自由收缩或延长，而由于由导电层 4 的机械阻力给出的内在边界条件，垂直排列的的横剖面方向被“凝固”。

在图 2a - 2g 中， d 表示平均或代表性波纹深度，即，该图案的突起部分和相邻的凹陷部分之间的平均或代表性距离。 H 表示介电膜 2 的平均厚度，且 h 表示导电层 4 的平均厚度。在优选实施例中，介电膜 2 的平均厚度 H 为 10 微米到 100 微米的范围。图 2a - 2c 显示了具有不同波纹深度 d 的复合物 1，然而，对所示的三种复合物而言，波纹周期 P 都是实质上相同的。与图 2d 和 2e 的复合物 1 相比，波纹深度 d 实质上是相同的，然而图 2e 中的复合物 1 的波纹周期 P 大于图 2d 中的复合物 1 的波纹周期 P 。与其比较，图 2f 的复合物 1 具有更小的波纹深度 d 和更大的波纹周期 P 。

具有根据本发明所述的以导电层 4 的形式的各向异性的波纹状的柔顺的金属电极的介电膜 2 的性能可通过根据由发明人开发的设计原则的设计来优化。该设计原则考虑了介电材料和导电层材料的介电和机械性能。

一方面，介电材料的相对介电常数和击穿电场，和另一方面电极之间的电位差为确定介电膜 2 的平均厚度 H 的范围的设计参数。该介电材料的特征性能典型地由介电材料生产商所提供，如 Wacker - Chemie 和 Dow Corning。

波纹深度 d ，相对于介电膜的厚度 H 而优化，以获得横跨位于电极间的介电膜上相对均匀的电场分布。该优化步骤可通过有限元模拟进行。高 d/H 比值对应于不均匀的电场分布而低 d/H 比值对应于相对均匀的电场分布。

各向异性和柔性性能为一方面通过模塑工艺而赋予介电膜例如弹性膜的表面形状和形貌，而另一方面采用波纹形状的导电层的共同结果。电极层厚度 h 和波纹周期 P 相对于波纹深度 d 被优化，从而获得具有金属电极的介电膜，该膜在一个“平面内”方向上柔顺，而在横跨“平面内”方向上几乎不柔顺。在一个方向上非常柔顺的膜为在该方向上通过施加相对低水平的力就能够在该方向很大地拉伸或延长而没有损坏电极的危险的膜，和在在横方向上施加力时在该横方向上将具有非常有限的延长的膜。为了优化电极柔性，比值 d/P 和 h/d 必须被优化。高 d/P 比值导致了非常柔顺的电极，而低 d/P 比值导致了较少柔顺的电极。高 h/d 比值导致了较少柔顺的电极，而低 h/d 比值导致了非常柔顺的电极。具有波纹电极的介电膜的各向异性程度由复合物柔顺的方向和复合物几乎不柔顺的横方向之间的柔性比值所确定。高

柔性比值导致非常各向异性的结构而低比值导致了各向同性状的结构。

一旦设计参数 (H、d、h 和 P) 的范围根据上述说明被规定, 就可以预测出具有导电层形式的金属电极的介电膜在柔顺程度以及其能承受的柔顺的方向上最大延长, 和驱动力将如何的方面的性能。同样可以预测横方向上的刚性。如果需要, 也能执行对这些参数的改进工艺。

应当注意对于给定的驱动力, 根据本发明制造的驱动器, 即由具有在其上沉积的电极的介电材料制成的驱动器, 比能够提供相当的驱动力的常规驱动器, 比如磁驱动器, 具有低得多的重量, 即至少为 1/5 小。这对于驱动器体积和重量是相关的应用而言是非常重要的。

一旦所有的设计参数被优化, 根据波纹形貌的准确规格设计模具。

基于有限元静电模拟, 本发明的发明人发现比值 d/H 应在 $1/30$ 到 $1/2$ 的范围内。例如, 具有 $1/5$ 的比值并且大约 4 微米的波纹深度, 介电膜 2 的厚度将大约为 20 微米。另外, 波纹深度 d 和波纹周期 P 之间的比值 d/P , 和导电层的厚度 h 和波纹深度 d 之间的比值 h/d , 为直接影响电极的柔性的重要的比值。在优选实施例中, 比值 d/P 在 $1/50$ 到 2 的范围内, 而比值 h/d 在 $1/1000$ 到 $1/50$ 的范围内。

当定义介电膜 2 的平均厚度 H 时另一考虑因素为所谓的介电材料相关的击穿电场。当导电层 4 沉积于介电膜 2 的每个表面从而形成电活性复合物时, 对于给定的材料厚度 H , 即相应于介电膜 2 的厚度 H 的距离, 在这些导电层之间有一个最大的电压值 V , 从而不超过材料的击穿电场, V/H 。当介电膜 2 在表面区域 3 上的厚度表现大的变化时, 则对于导电层之间给定的电压, 电场和厚度变化将为相同的数量级。因此, 具有较高的局部电场的介电膜 2 的部分将比具有较小的局部电场的部分延长得更多。另外, 在换能器中的复合物 1 在接近击穿电场工作的情形, 这样变化可能损坏该换能器, 因为介电膜 2 的部分将承受大于击穿电场的电场。因此, 当处理介电膜 2 时, 非常重要是最大可能地减少平均厚度的变化。为了处理的缘故, 10% 的平均厚度变化被考虑为可接受的。当通过设计即根据本发明的处理具有波纹电极的换能器时, 这些数值能以相对精确的方式控制。

图 3a 和 3b 示出了暴露于零电位差 (图 3a) 和暴露于高电位差 (图 3b) 的包括由介电膜 2 隔离的两导电层 4 的电活性复合物 1。如图 3b 所示, 当暴露于电位差时, 介电膜 2 被扩展, 而导电层 4 被平坦。这详细地显示于图 4a

-4c 中, 图 4a-4c 示出了随时间的不同步骤中电活性复合物 1 的剖面的部分, 为清楚起见省略了阴影线。在每图的底部示出了对称线 10, 示出复合物 1 为具有沉积于每个表面上的导电层 4 的电活性复合物。图 4a 示出了暴露于零电压差的电活性复合物 1, 波纹深度为设计深度 d , 波纹周期为设计周期 P 。在图 4b 中示出, 介电膜 2 沿柔顺方向扩展, 导致了减小的膜厚度 H' 。另外, 导电层 4 被平坦, 导致更小的波纹深度 d' 和更大的波纹周期 P' 。图 4c 示出了后一时间步骤的电活性复合物 1, 膜 2 的厚度 H'' 被更为减少, 波纹深度 d'' 更小, 波纹周期 P'' 更大。

应当注意, 根据本发明制造的电容呈现“自恢复”机理。自恢复机理为具有非常薄电极的电容的特性。当电容的介电材料呈现缺陷, 比如夹杂物、针孔等时其出现。对于具有给定厚度的这样的电容, 当电极间施加的电位差达到上述界定的所谓的击穿电压时, 平均电场接近临界击穿电场。然而, 在具有缺陷的区域中, 其将确实超过临界击穿电场, 且由于在缺陷位置上横跨介电膜的厚度的加速和碰撞的电荷的级联效应将出现, 因此引起横跨介电材料的高涌入瞬时电流。这导致了局部瞬时过热, 其特征时间为微妙范围内或更低, 这足够“耗尽/蒸发”在缺陷及其近邻附位置的非常薄的相对电极的材料。这导致环绕缺陷的区域不再有电极材料。另外, 电极材料被耗尽的区域的尺寸随局部电场而增加。然而, 电容本身并没有损坏, 且继续工作。这就是“自恢复”。只要被耗尽的区域总共代表为电容的整个面积的非常可忽略的一小部分, 这就将对电容的性能具有非常小的影响。当电容由厚电极制成时, 自恢复不发生, 因为局部过热的水平不足以耗尽缺陷处的厚电极材料。在该情形, 当达到临界击穿电场时, 随之发生的电容的瞬间损伤出现。实际上, 本发明的发明人制作了厚度达 0.2 微米的金属电极, 且经常观察到自恢复, 即使当在高于击穿电场下操作该电容时。这并没有对电容产生实质性损害, 且因此该电容继续工作。

图 5-9 示出了复合物 1 的叠层结构的例子, 由此产生了多层复合物。如图 5a 和 6a 所示, 电活性多层复合物 15、16 包括至少两个复合物 1, 每个复合物 1 包括具有前表面 20 和后表面 21 的介电膜 2, 后表面 21 与前表面 20 的相对。前表面 20 包括具有突起和凹陷部分的表面图案 3 和覆盖表面部分 3 的至少一部分的第一导电层 (未显示)。图 5a 和 6a 仅显示了多层复合物 15、16 的一部分, 为示出目的, 上述部分的比例失真。

图 5a 和 5b 显示了具有第一复合物 1 的电活性多层复合物 15, 该第一复合物 1 的前表面 20 面对相邻的复合物 1 的后表面 21, 后文将一般称为前对背 (Face-to-Back) 多层复合物 15。在该类型的叠层工艺中, 第一复合物 1 的导电层直接与第二复合物 1 的后表面相接触。该复合物 1 或者采用制造介电膜 2 所用的同样类型的弹性体来叠层, 或者可选的, 两个复合物 1 叠层而不使用粘接剂。出于某些目的, 优选该多层复合物由堆叠的复合物制成而不使用粘接剂。在某些场合, 波谷仅用空气充满。

由于突起和凹陷的表面部分 3 的图案, 每个复合物的导电层可随膜扩展而被平坦, 并且随膜沿由箭头 5 (见图 5b) 所界定的方向收缩而恢复其原状, 而不损坏导电层, 该方向由此定义了柔顺方向。因此, 如图 5b 所示的多层复合物 15 被设计为在箭头 5 所定义的方向上非常柔顺, 在由箭头 6 所定义的横方向上设计非常刚性。

图 5c 和 5d 示出了暴露于零电位差和暴露于高电位差的电活性多层复合物 15。如图 5d 所示, 当暴露于电位差时, 介电膜被扩展, 而且导电层被平坦。可以进一步看到, 当该多层复合物暴露于电位差时, 波谷的深度 (波纹深度 d) 减少。该复合物可以通过施加高电位差到堆叠的复合物而被结合, 由此, 一个复合物的膜和相邻复合物的导电层相互粘接而无需使用附加的粘接剂。因此, 它们能通过静电力实现紧密接触。可选地, 由于当介电膜由弹性体制成时具有稍许的粘性的特征, 它们也可通过将它们压在一起而相互粘接, 例如, 通过使用滚筒。

作为对其的替代, 图 6a 和 6b 示出了第一复合物 1 的电活性多层复合物 16, 第一复合物 1 设置为其后表面 21 面对相邻的第一复合物 1 的后表面 21 的, 后文将一般称为背对背 (Back-to-Back) 多层复合物 16。该复合物 1 或者通过使用具有类似于复合物 1 的介电膜 2 的特征的弹性体粘接剂被粘接结合。可选地, 两个复合物 1 被叠层而不使用粘接剂。

在图 6a 中所示的电活性多层复合物 16 中, 该波纹表面 3 在叠置复合物 1 之前或之后用导电层涂布。该背对背多层复合物 16 的优点在于若相邻层不具有紧邻的相似缺点时, 介电膜 2 的缺陷, 例如导电层的针孔等的影响将变得不那么重要。

若该单个复合物 1 在相同的生产步骤制成, 在每个复合物 1 的同一位置上存在同样缺点的可能性将增大。为减少该缺点的影响, 将复合物 1 相对于

相邻复合物 1 移动位置将是有利的，或者相对彼此旋转复合物 1。

该叠层工艺代表了制作工艺中的关键步骤。因此，将使用具有张力控制的精密叠层机器。

类似于多层复合物 15，图 6b 中示出的多层复合物 16 在箭头 5 所定义的方向上被设计成非常柔顺，在由箭头 6 所定义的横方向上设计成非常刚性。

图 6c 和图 6d 示出了暴露于零电位差和暴露于高电位差的电活性多层复合物 16。如图 6d 所示，当暴露于电位差时，介电膜被扩展，而且导电层被平坦。

图 7a 示出了，依据特别的需要，图 5a 中所示类型的电活性多层复合物 15 可还包含无穷个复合物 1。图 5a 中的该多层复合物包含两个介电膜 2 中的一个介电膜 2，其为非活性的，即，两介电膜 2 的仅一个位于两导电层（未显示）之间。图 7a 示出了，大量的复合物减少了电活性多层复合物 15 本身非活性层的影响，因为除最低的复合物 15 外全部均被位于电极之间。

图 7b 示出了形成包含无穷数目的复合物 1 的电活性多层结构 15 的另一可选方式。复合物 1 通过排列在复合物 1 之间粘接剂层 22 被叠层，从而复合物 1 相互之间不直接接触。粘接剂层 22 的材料就拉伸能力而言具有和复合物 1 的介电材料相似的性能。这是为了允许当多层结构 15 工作时，粘接剂层 22 与介电材料一起拉伸。由此，粘接剂层 22 可有利地由弹性体制成，或由具有弹性体状性能的材料制成。

在图 8 中，该类型的两电活性多层复合物 16 也同样在图 6a 中示出，即，背对背复合物被堆叠在彼此顶部。在该电活性多层复合物中，导电层为成对相互接触。两介电膜 2 位于两个导电层的这样的组的两个之间。该叠层提供了单层中的产生缺陷的减少的影响。另外，示出了第三或甚至更多的电活性多层复合物 16 可被添加到该多层复合物中。

图 9 示出了类似于图 8 中所示的叠层的多层复合物 16 的叠层。然而，在图 9 所示的情形中，该背对背多层复合物 16 被成对堆叠，该成对堆叠的多层复合物 16 而后再堆叠到一起。在图 9 中所示的叠层中，确保了相互面对的相邻成对的叠层的导电层具有同样的极性。因此，该叠层能被卷绕而没有电极短路的危险，且因此该叠层也适于被卷绕，例如形成管状换能器。

图 10a 示出了被卷绕的图 5a 中所示的前对背电活性多层复合物 15。由于复合物 1 可被制造成很长的长度，所谓的“无穷”复合物，该多层复合物

15 也可被制成很长的长度，由此允许生产包括多个绕数的卷绕的多层复合物。

图 10b 示出了围绕杆 23 卷绕多层复合物 15。该杆 23 位于多层复合物 15 的一端，该复合物 15 则如所示围绕杆 23 卷绕。由此该多层复合物 15 获得了卷绕的管状。

图 11a 和 11b 示出了复合物 24 的一部分，其适于形成卷绕的或其它叠置的换能器。该复合物 24 包括由介电材料构成的膜 2，该膜具有设置有突起和凹陷表面部分的图案的表面，由此形成设计的波纹的表面轮廓，即，该膜 2 类似于图 1c 中的复合物 1 的膜 2。该情形下，膜 2 设置有导电层，该导电层包括以交叉图案模式排列的负电极部分 25 和正电极部分 26，即负电极 25 和正电极 26 交替出现，在其之间有一间隙。在间隙中，导电层没有沉积于介电膜上。箭头 27 指示该复合物 24 可以非常长，如图 13a 中所示的“无穷长”复合物，和如图 13b 中所示的被折叠的复合物。

图 12a - 12c 示出了制造图 11 的复合物 24 的一种可能方法。图 12a 示出了在两个卷 30 上的非常长的膜 2。该导电层（未显示）利用不连续的气相沉积卷到卷方法沉积于膜 2 上。箭头 31 示出了工艺方向。该导电层通过阴影掩模 32 沉积，使得在电极部分 25、26 之间提供间隙。当导电层沉积于膜 2 的一区域上之后，该膜 2 沿箭头 31 的方向被卷绕且停止。闸门（未显示）被打开，且该导电层被沉积于膜 2 的下一区域上。该区域相邻于前述的区域，并确保在具有相同极性的电极之间的连续过渡接触。该闸门在达到所需要的导电层厚度后关闭。电极通过阴影掩模被沉积的电极沉积原则，出于实际原因，更适合于制造具有恒定宽度和间隙的电极。作为替换，该间隙也可通过激光烧蚀的方式制造。实际上，优选通过激光烧蚀的方式制造间隙，因为当使用该技术时非常易于提供每个间隙间的可变距离，且由此提供了导电层的每个部分的可变宽度。这将在后进一步详述。

图 13a 示出了形成为卷绕的复合物 35 的图 11a 和图 12a - 12b 中的复合物 24a。D 和 R 表示了复合物 24 卷绕于其上的卷 36 的直径和半径。实线表明正电极，虚线表明负电极。应当注意，为清楚起见，该被卷绕的复合物通过同心圆的方式示出。然而，应当理解，实际上该卷绕的复合物形成螺旋图案。电极 25 和 26 的宽度 w 和这些电极部分之间的间隙宽度基于卷 36 的横截面而确定： $2\pi(R)=w+\text{间隙}$ ，其中该间隙相对于 w 非常小。另外，优选的

是复合物 24a 的厚度 t 小于该间隙。否则，由该卷绕工艺形成的换能器的效率将变低。当由卷绕复合物 24a 制成绕数 n 时，间隙被在切线方向上相对于前一绕数移动了膜厚的数量级， $2\pi \cdot n$ 。由此如果间隙移动超过了间隙宽度，具有相同极性的电极将趋于重叠，且这使得电容的对应部分非活性。该方法对于制造具有有限绕数的驱动器且在预应变配置工作或平管状配置是优选的，该所述配置中电极部分和间隙在相应于平管状驱动器的平部分的介电网的部分中沉积。可替换的方法为采用激光烧蚀来设计具有可变宽度的电极，但恒定间隙宽度更适于卷绕的管状驱动器。该情形下，间隙和耗尽区的宽度由移动的激光光点尺寸所确定，且与驱动器的增长的圆周的给定绕数相关的给定电极的宽度使得宽度和间隙匹配缠绕周长。

相似地，图 13b 示出了为折叠复合物 37 的图 11b 的复合物 24b。从图 13b 中可知该复合物 24b 被仔细地折叠从而确保相反极性的电极 25、26 不直接接触。

图 14a 和 14b 通过折叠复合物 24 示出了图 11 中所示的复合物的叠层。可选地，该复合物可为图 1a 和 2 中所示的类型。该复合物 1、24 被制成长结构，由此确定复合物 1、24 的长度和宽度，以及具有表面 3，表面 3 具有突起和凹陷表面部分的图案。该图案定义了波峰和波谷，沿共同方向延伸，且该共同方向实质上沿该长结构的宽度排列。因此，复合物 1、24 在垂直于该共同方向的方向即沿该长结构的长度方向上是柔顺的。

图 14a 的该复合物 1、24 通过沿长度折叠该长结构而被层叠，使得所得的电活性多层复合物 40 的宽度与复合物 1、24 的宽度相同。由于复合物 1、24 的柔顺方向的取向，该电活性多层复合物 40 在箭头 41 所示的方向上是柔顺的。

图 14b 示出了根据本发明的另一实施例的复合物 1、24 的叠层。这非常类似于图 14a 中所示的实施例。然而，在该情形，该共同方向被实质上沿该长结构的长度排列，且复合物 1、24 因此在沿长结构的宽度方向上是柔顺的，如图 1b 的复合物。因此，所得的电活性叠层 42 将在由箭头 43 所示的方向上是柔顺的。

因此，图 14a 中所示的叠置的复合物沿叠置的复合物的长度方向上是柔顺的。这意味着图 14a 的结构能制成任意长度，以及由此的任意期望的行程长度。相似地，图 14b 的叠置的复合物沿叠置复合物的宽度是柔顺的。这意

味着图 14b 的结构能制成任意宽度。由此，可以根据预定应用的几何要求设计具有任何合适尺寸的换能器。

图 15a - 15c 为根据本发明的实施例的直接驱动换能器 50 的透视图。图 15a - 15c 的该直接驱动换能器 50 已经通过卷绕例如图 1a 或图 5 中所示类型的多层复合物而被制造。图 15a 中的该换能器 50a 为实心，而图 15b 中的该换能器 50b 为空心。该换能器 50 可具有任意延长的形式，例如实质上具有实质上形成圆，椭圆或如图 15c 所示的曲线的横截面的柱状。

在图 15a - 15c 中，该复合物被卷绕形成柱状的换能器 50，该复合物具有平行于由箭头 51 所指示的方向的柔顺方向。因此，当电能施加到直接驱动换能器 50 的电极时，该换能器 50 将沿箭头 51 的方向在轴向延长。现已发现，如果换能器 50 根据本发明的某些方面被合理制造和设计尺寸，它们能够产生抵抗轴向负载的显著的力，该轴向负载趋于抵抗轴向延长。

如本说明书中在前所述，本发明的电活性复合物是非常柔顺的，在柔韧性上类型于普通的家用粘着膜或聚乙烯购物袋片材料。该复合物与这些材料的区别在于其高弹性和机械各向异性，如前所解释，其在某一方向上易延伸而在垂直方向上则远不易延伸。

发明人现已意识到尽管复合物的柔软，柔韧性和弹性，通过卷绕足够长度的复合物而形成的卷将是相当刚性的。如果该卷相对于膜的机械各向异性被合理的缠绕，它将具有由机械各向异性而产生的轴向柔性，且它也能在轴向负载下对于纵向弯曲（buckling）有相当的抵抗力。

因此，具有导电电极层的波纹状各向异性介电膜层的复合物可以被卷绕为具有足够的绕数的管状，使得该管状元件的所得结构足够刚性以避免纵向弯曲。前文中，术语“纵向弯曲”意味由于施加的轴向负载，延长的结构通过弯曲而变形的情形。已经发现，在延长的结构中无需任何比如加强杆或弹簧的附加组件，以获得足够的刚性以避免处于轴向负载的技术有用水平下的纵向弯曲。该所需的刚性仅通过卷绕足够绕数的复合物材料而获得。

图 15a - 15c 中所示的卷绕的结构被设计以承受特定的最大水平的负载，此时上述刚性足以避免纵向弯曲。该特定的最大水平的负载可以例如为在某一延长水平的某一水平的力，或可以为最大水平的驱动力、阻挡力、或当换能器沿箭头 51 的反方向被压缩到更短的长度时所产生的更高水平的力。

如本申请中所述的直接驱动换能器的设计参数根据由本发明人开发的

设计原则来优化。该设计原则允许基于驱动器性能规格确定卷绕的驱动器（换能器）的最优尺寸。

电活性复合物的机械和静电性能被用作估计每单位面积的驱动力和行程的基础。如根据本发明所记载的卷绕的驱动器通过卷绕/缠绕如图 1a 和 1b 所示的具有微米范围厚度的非常薄电活性复合物而制成。该类型的典型的驱动器可由成千个绕数制成，并且可以包含多至每微米 100 个绕数的驱动器壁厚。

当被激活时，直接/推进驱动器可以将电能转换为机械能。部分该能量以势能的形式存储于该驱动器材料中，且当驱动器被释放时该能量又被获得。机械能的剩余部分被有效地用于驱动。将该机械能的剩余部分完全转换成驱动能只有在该驱动器结构不为机械不稳定时才有可能，该不稳定类似于公知的由于轴向压缩的引起的失效的纵向弯曲模式。这可以通过恰当地设计驱动器横截面面积相对于驱动器长度的尺寸而实现。数学上这相应于柱稳定性的欧拉理论；根据本发明，该理论也适用于通过卷绕足够绕数的电活性多层复合物所形成的驱动器柱。

该优化工艺始于对于给定的应用所需要的力水平的定义。然后，基于每单元面积的驱动力，可以估计出需要的横截面面积以达到上述力的水平。

对于柱状结构，对于圆柱体的长度和半径之间的给定比值，该临界轴向负载压力 F_c 由以下给出：

$$F_c = \frac{c \cdot \pi^2 \cdot E \cdot A}{(L/R)^2}$$

其中

c 为取决于边界状态的常数，

E 为弹性模量，

A 为圆柱的横截面面积，

L 为圆柱的长度，且

R 为圆柱的半径。

现考虑通过对其电极施加电压 V 来驱动的柱状电活化聚合物换能器。在无载状态下，该换能器仅能延长。如果被轴向负载限制，则该换能器将对负载施加力，该力随着电压 V 增加。换能器所能被驱动的最大力 F_{\max} 取决于换能器的结构。

对于给定的长度 L 和横截面 A ，这意味着电压需要被控制，以使得不允许高于 $F_{\max} < F_c$ 的力。对于给定的横截面，这意味着圆柱的长度必须小于临界长度 L_c ，即 $L < L_c$ ， L_c 定义如下。

对于具有给定横截面和选择的最大力水平的换能器 50，该最大力水平与最大电压水平相关，临界长度 L_c 能从如下公式获得：

$$L_c \leq \sqrt{\frac{c \cdot r^2 \cdot \pi^2 \cdot E}{F_{\max} / A}}$$

且设计标准为 $L < L_c$ 。

在 0% 延长下，对于选定的电压水平，具有给定横截面的换能器 50 采用给定的最大力驱动，即所谓的阻挡力 F_{bl} 。该情形下设计标准为：

$$L_c = \sqrt{\frac{c \cdot r^2 \cdot \pi^2 \cdot E}{F_{bl} / A}}$$

对于由具有 $E = 1 \text{ MPa}$ ， $F_{bl}/2 = 20 \text{ N/cm}^2$ 和 $c = 2$ 的弹性体所制成的换能器 50 应用该设计标准， $F_{\max} = F_{bl}$ 的设计原则将为 $L_{bl} = 10 \cdot r$ ，即所谓的长细比 λ 必须满足下述条件，以在负载等于阻挡力时获得非纵向弯曲结构：

$$\lambda \leq L/r = 10$$

对于相同的换能器 50 的驱动力的所替换选择的低水平，即，对于具有相同半径 r 的柱状对称换能器 50，长度 L 的设计标准可从以下公式获得：

$$L \leq L_{bl} \cdot \sqrt{F_{bl} / F}$$

这可以例如意味如果在 10% 延长时的驱动水平为 $1/4 \cdot F_{bl}$ ，则该换能器在 10% 延长时的长度 L 为：

$$L \leq L_{bl} \cdot \sqrt{1/4} = L_{bl} \cdot 2$$

欧拉理论可以应用于对于换能器行程和介电膜的延长的选择百分比有特殊需要的换能器 50。因为增加的绕数，对于增加柱状对称换能器 50a 和 50b 的横截面面积 A 没有限制，且因为满足了源于欧拉理论的设计原则，可以仅仅提供需要的绕数以获得所需要的驱动力水平。因此，上述技术使得可以建造在给定力水平和给定行程下具有非纵向弯曲特征的介电换能器。

当设计直接作用容性换能器时，需要设计其机械结构的尺寸以抵抗纵向弯曲。这可通常通过增加已知为 I 的其横截面的面积转动惯量。例如，一张具有给定厚度 (h)，宽度 (w) 和长度 (L) 的纸在平行于其长度方向上施加稍许的力时将弯曲。然而，通过在宽度方向卷绕它，则需要大得多的力使其纵向弯曲。卷绕的对平的弯曲刚性比例由 $\frac{3}{2} \cdot (1 + (\frac{w}{h/\pi})^2)$ 。这样的例子为

取 $w = 40 \text{ mm}$, $h = 1 \text{ mm}$, 则比例为约 245。

抵抗任何机械不稳定性的驱动器稳定化需要通过增加横截面的面积转动惯量 I 来设计其横截面尺寸。低 I 值导致不稳定的结构, 高 I 值导致抵抗纵向弯曲的非常稳定的结构。设计结构尺寸的设计参数为与横截面 A 和面积转动惯量 I 相关的回转半径 r_g 。低 r_g 值导致不稳定的驱动器结构, 高 r_g 值导致非常稳定的驱动器结构。在定义了面积 A 和回转半径 r_g 的最优范围后, 可以定义以 t/r_g 形式相对于 r_g 的卷绕的驱动器壁厚 t 的最优范围。面积 A 、半径 r_g 和壁厚 t 是为最大稳定性而设计驱动器横截面尺寸的设计参数。低 t/r_g 导致非常稳定的驱动器结构, 高 t/r_g 值表明不稳定的驱动器结构。

一旦横截面参数被确定, 需要对于所需的力的水平, 估计由轴向压缩引起的纵向弯曲不会出现的驱动器的最大长度。定义为长度 L 和回转半径 r_g 的比值的长细比是与欧拉理论相关的普遍使用的参数。低 L/r_g 导致抗纵向弯曲的非常稳定的驱动器结构, 高 L/r_g 值导致不稳定的驱动器结构。

一旦确定该优化工作的直接驱动器的所有设计参数, 对于具有特定的微米范围厚度的给定的电活性复合物, 可以基于驱动器壁厚 t 和每毫米绕数 n 估计出建造该驱动器所需的总绕数。

在一优选实施例中, 绕数 n 和换能器的壁厚 t 之间的比值 n/t , 应该在 10 绕/毫米到 50 绕/毫米的范围内。另外, 换能器的长度 L 和换能器的回转半径 r_g 之间的长细比应当小于 20。该回转半径 r_g 定义为 $r_g = \sqrt{I/A}$, 其中 I 为横截面的面积转动惯量, A 为换能器的横截面面积。

由此, 通过根据本发明仔细地设计换能器, 可以获得大驱动力, 即使使用非常软的介电材料。驱动力甚至可以到达相对于由更硬的材料制成的常规换能器例如磁换能器的水平。这是个很大的优点。

图 16a 为示出了在根据本发明的一个实施例的直接驱动换能器中力作为行程的函数的曲线图。当电压施加到换能器的各向异性的柔顺导电层时, 电场引发的横跨膜厚的压缩被转换成沿换能器的柔顺方向上的延长/行程。相应的应力称作麦克斯维应力, P , 且相应的驱动力被称作静电力 $F_{\text{electrostatic}}$ 。如图 16a 所示, 在延长时, 介电材料施加了随换能器行程增加的反作用力 $F_{\text{elastomer}}$ 。

因此, 如图 16b 所示, 直接驱动可获得的有效力 F_{act} 为所述两力的结果, 且 $F_{\text{act}} = F_{\text{electrostatic}} - F_{\text{elastomer}}$ 。表示力相对于直接驱动换能器的行程的特征曲线对

于力传感器而言是典型的，其中驱动力随行程增加而减少，直到达到行程的最大值，其对应于如图 16b 所示“零”驱动力。

图 16c 示出了对于直接作用的容性换能器即卷绕的换能器的不同外直径，作为换能器行程的函数的计算的直接驱动力的范围。可以产生几百到几千牛顿范围内的大驱动力。阻挡力典型地比 10% 换能器行程界定的额定驱动力大四个量级。对于 3000 伏的典型的驱动电压，由 40 微米厚的具有弹性模量范围为 0.5 - 1 Mpa 的介电材料制成的直接作用容性换能器将产生 0.1 - 0.2N/mm² 范围中的每单位面积上的力。当考虑大换能器横截面时，这对应于如图 16c 所示的大驱动力。

图 17a 和 17b 为根据本发明的可选实施例的直接驱动换能器 52 的透视图。图 17a 和 17b 的换能器 52 具有沿圆柱切线方向的柔性。因此，换能器 52 的延长发生在管状结构的周边上，由箭头 53 所示，即该换能器 52 被导致在径向上扩展和收缩。

图 18a 示出了复合物 1 的叠层以形成平管状结构 60。该复合物 1 可以有利地为图 1a 和图 2 中所示的类型。换能器 60 为足够高数量的粘接结合的复合物的叠层，以确保换能器的刚度，该刚度足以使得换能器无需被预应变即可作为驱动器工作。换能器 60 通过绕制例如图 1a 和 2 中所示类型的连续复合物为非常平的管状结构而制成。采用该设计，消除了与上述层数相关的限制。因此，换能器 60 可以被制成按需要的大功率，类似于参考图 15a - 15c 的上述内容。

图 18a 中所示的换能器 60 的平管状结构可通过围绕两个分开的棒 61 卷绕复合物 1 以形成复合物 1 的线圈模式而获得。由于复合物 1 的柔顺方向的取向，该平管状结构 60 将在由箭头 62 所示的方向上柔顺。图 18b 示出了图 18a 中的换能器被两弹簧 63 预应变。

图 19a - 19c 为具有平结构的换能器 70 的透视图。换能器 70 为足够高数量的粘接结合的复合物的多层复合物，以确保换能器的刚度，该刚度足以使得换能器无需预应变即可作为驱动器工作。换能器 70 通过叠层图 1a 和 2 中所示类型的连续复合物为平结构而制成。采用该设计，消除了与上述层数相关的限制。因此，换能器 70 可以被制成按需要的大功率，类似于参考图 15a - 15c 的上述内容。。换能器 70a 为足够高数量的粘接结合的复合物的多层复合物，以确保换能器的刚度，该刚度足以使得换能器无需预应变即

可作为驱动器工作。换能器 70b 通过堆叠许多的换能器 70a 而设计尺寸大小。可选地，换能器 70c 可被弹簧 71 或其它弹性可变形元件预应变。

换能器 70a 和 70b 提供有固定凸缘 72 以在应用中贴附换能器，例如为使换能器作为驱动器工作。箭头 73 表明了柔顺方向。

图 20a - 20e 示出了提供有预负载的驱动换能器 80。图 20a 为提供有固定凸缘 81 的平换能器 80 的透视图。图 20a 的平换能器 80 被弹簧 82 预应变。因此，平换能器 80 具有由箭头 83 所示的驱动方向。图 20b 示出了相似的平换能器 80，其中弹簧被相似的第二平换能器 80 所代替。图 20c 示出了半个换能器，该换能器类似于图 20b 的换能器，通过使用许多相同的换能器（仅示出了它们的一半）来设计尺寸。图 20d 和 20e 示出了两个可选换能器 84 和 85，每个包括许多平换能器 80，其由类似于图 18b 的换能器的相邻换能器预应变。换能器 84 和 85 横向驱动，在图 20d 中为地毯状结构，图 20e 中为壁式结构。

应当注意图 18 - 20 的换能器仅要求沿一个方向即柔顺方向上预应变。因此，根据本发明，在换能器中不要求沿柔顺方向的横向上的预应变，这在现有技术的换能器中则需要。

图 21a 示出了具有平管状结构的两个预应变换能器 90，该换能器 90 在长度方向上驱动，且由此旋转驱动轴 91。

图 21b 示出了设置有机连接 94 的两个被机械预应变平换能器 92、93，机械连接 94 通过用于滑动目的的导向部件支撑。显示了三种状态下的换能器 92、93。第一种状态下，换能器 92、93 都不是活性的。然而，它们都被机械预应变。第二种状态下，换能器 93 为活性的。由于换能器 92 为非活性，换能器 93 使得换能器 92 弛豫，从而释放了换能器 92 的一些机械预应变。在第三种状态下，换能器 92 为活性而换能器 93 为非活性。换能器 92 使得换能器 93 弛豫，从而释放了换能器 93 的一些机械预应变。由此，换能器 92、93 结合机械连接 94 形成了双重作用的换能器，其中换能器之一使另一换能器弛豫并释放了机械预应变。

图 22 中示出了一种电活性复合物，该电活性复合物包括具有第一表面 100 和与第一表面 100 相对的第二表面 101 的介电膜 2。介电膜 2 的两个表面都部分用导电层覆盖。由于导电层的形状和位置，活性部分 A 存在，其中导电层的电极部分 102、103 覆盖了介电膜 2 的两表面 100、101。该导电层

还定义第一被动部分 B，其中仅介电膜 2 的第二表面 101 被导电层之一的接触部分 104 覆盖，和第二被动部分 C，其中仅介电膜 2 的第一表面 100 被另一导电层的接触部分 105 覆盖。似乎，通过将导体结合到接触部分 104、105，电活性复合物可以被电连接到电源或连接到用于控制复合物的驱动的控制装置。即使该被示出的复合物被叠置、卷绕、或折叠以形成具有大量层的换能器，电极部分 102、103 可以容易地连接到电源，例如通过在每个接触部分 104、105 采用导电线或杆穿透这些层，并将所述线和杆连接到电源。介电膜 2 的厚度和导电层的厚度的比值仅仅为说明目的。图 22 中所示出的工艺被称作“偏移”，因为接触部分 104、105 通过在介电膜 2 的表面 100、101 上相对于彼此“偏移”地施加电极部分 102、103 而获得。

图 23a - 23c 示出了空间移位形成换能器的多层复合物的两个复合物 1 的三种不同方法，其中每个复合物 1 包括在介电膜上的导电层。该示出的复合物 1 具有当换能器被激活时它们扩展或收缩的柔顺方向。在图 23a 中，该接触部分沿柔顺方向被空间移位，图 23b 中，该接触部分垂直于柔顺方向被空间移位，图 23c 中，该接触部分在柔顺方向和垂直于柔顺方向上均被空间移位。在任何设置中，均期望将多层复合物和连接线、杆或相似导体之间形成物理接触的区域保持远离任何应力源或移动部件。图 23d 示出了多层复合物的侧视图。

由此，图 22 和图 23a - 23c 示出了提供接触部分 104、105 的两个不同原则，即图 22 中所示的“偏移”原则和图 23a - 23c 中所示的“空间移位”原则。这些原则可与各种叠层工艺组合，并且可以相应地选择适于期望的应用的原则。

图 24 示出了接触部分 104、105 形成了部分的导电层部分且形成了在电极部分 102 和 103 的一侧的延伸岛。在多层复合物中的两个相邻复合物的岛置于不同位置，使得相邻复合物的接触部分 104、105 相互远离。

图 25 示出了两复合物，每个复合物提供有导电层。当复合物结合为多层结构时，它们相对于彼此偏移，使得每个复合物上的导电层的一部分形成接触部分 104，该接触部分 104 与另一复合物上的相应接触部分 105 远离。

图 26 和 27 示出了如还在图 15a 和 15b 中示出的管状换能器 50。该管状换能器在指定的接触部分 104、105 连接到电源。

图 28 示出了具有平管状结构的换能器 110。该换能器包括在内表面上的

接触部分 104、105。该接触部分可例如经由具有导电接触部分的延长杆 111 而连接到电源。该杆 111 在图 29 中被放大显示，其中可以看出杆 111 包括两个接触部分 112、113，当杆 111 插入到管状结构内时，两个接触部分 112、113 与平管状结构的接触部分 104、105 接触。杆 111 可形成换能器在其上操作的装置的一部分。空间移位原则和偏移原则都能用于接触上述换能器结构。

图 30 示出了三种不同的连接器，即，软连接器 120、金属涂布的塑料连接器 121、和金属或金属涂布的格带连接器 122。软连接器 120 包括涂布有一层导电材料 124 的弹性体膜 123。相似地，金属涂布塑料连接器 121 包括涂布有金属层 126 的塑料部分 125。

图 31 - 35 示出了提供有电接触的复合物 1。因为本发明的复合物 1 非常软，将复合物 1 接合到有些刚性的比如线、带、格等的普通电连接器具有挑战性。

图 31 示出了连接到复合物 1 的软连接器 120，该复合物 1 包括具有波纹表面 3 的介电膜 2，表面 3 设置有一层导电材料 4。软连接器 120 和复合物 1 的各自的导电部分 124、4 经由导电粘接剂层 127 结合在一起，由此电连接复合物 1 和软连接器 120。

图 32 示出了如上所述即经由导电连接剂层 127 已经被结合在一起的两个复合物 1，且位于顶部上的复合物 1 被用作主电极而连接到电源。

图 33 示出了连接到复合物 1 的金属或金属涂布线或带 128。该金属或金属涂布线或带 128 适于连接到主电源。与上述的内容相似，金属或金属涂布线或带 128 通过导电粘接剂 127 结合到复合物 1 的导电层 4。然而，在该情形，导电粘接剂 127 被设置使得其环绕金属或金属涂布线或带 128 的周边，由此提供了金属或金属涂布线或带 128 和复合物 1 的导电层 4 之间的非常高效的电接触。

图 34 示出了经由导电粘接剂 127 连接到复合物 1 的金属或金属涂布的格带连接器 122。如上所述，参考图 33，导电粘接剂 127 被设置使得其完全环绕金属或金属涂布的格带连接器 122 的一部分，由此提供非常好的电接触。

图 35 示出了经由层导电粘接剂 127 连接到复合物 1 的金属涂布塑料连接器 121。如上所述，参考图 31，32，该导电粘接剂 127 层被设置于金属涂布塑料连接器 121 的金属层 126 和复合物 1 的导电层 4 之间，由此提供两者

之间的电接触。

图 36a 示出了制造用于制造复合物例如图 1 中所示的复合物 1 的工具或模的工艺。图 36b 示出了采用该工具制造复合物的工艺，且图 36c 示出了由该复合物制造换能器的工艺。

由此，我们通过制造具有期望波纹轮廓的母模来开始所述工艺。我们可以通过光致抗蚀剂涂布的玻璃上的激光干涉蚀刻，或通过硅片上的标准的光刻法来制造该模。

对于硅片上的标准的光刻法，该曝光掩膜相对简单且可以优选呈现等间距和平行的线，例如具有 5 微米宽和 5 微米间距。标准的硅微加工（micromachining）方法而后用于蚀刻硅以形成所谓的 V 槽，即具有类似于“V”的横截面形状的槽。一系列的氧化和氢氟酸的蚀刻步骤然后被执行以将该 V 槽结构转变成准正弦波纹，如果这是期望形状的话。

我们可以通过激光干涉蚀刻制造相对大尺寸的母模，比如达到 32cm × 32cm。在激光干涉蚀刻中，两激光束，每个具有以扩展的光斑直径和沿光束的剖面上具有均匀的能量分布，被用于在光致抗蚀剂涂布的玻璃衬底上导致干涉。该工艺不需要任何曝光掩膜，并依赖于光学领域所公知的干涉现象。曝光，显影和最终硬烤的结果就是被写入光致抗蚀剂中的直接正弦波形轮廓，其中轮廓周期和幅值由激光束波长、激光束照射到光致抗蚀剂上的入射角和光致抗蚀剂的厚度来决定。

在图 36 中所示的工艺的下一个步骤中，我们采用标准的无应力电镀工艺制造所需的足够数量的镍拷贝或模，以在塑料卷上获得波纹状的微结构复制品。这些镍复制品同样也被称作垫片（shim），具有 100 微米范围的厚度。这些垫片以串联结构被机械地连接以形成具有总长度精确地匹配压印鼓的圆周的一条“带”。使用薄垫片有助于弯曲它们而无需建立太大的应力而，并随后围绕鼓的圆周卷绕该“带”。每个垫片相对于其邻居被放置，使得波纹线以微米精度被调整，从而减少相邻垫片的线之间的任何角度失准。然后，由镍模得到的该压印鼓的波纹状的微结构被精确的复制到塑料卷上。我们也可以通过卷到卷（roll-to-roll）的微压印（紫外线或热固化）来这样作。卷到卷压印允许生产具有几百米范围的长度的微压印的塑料材料的卷。我们使用以带或模的形式的该微压印的塑料卷作为载体网，用于生产具有单面或双面波纹的介电膜，例如具有几百米长度范围的弹性体膜。

我们可通过已知的旋涂制造有限尺寸的波纹弹性体膜或片。这是一个不连续的工艺，且膜或片的最大尺寸被模的尺寸所确定。生产工艺可选的类型为对于聚合物工业开发的类型，比如粘接带，喷涂等，一般称作“卷到卷涂布”或“网涂布”。这些生产工艺是大规模、大容量和连续的工艺。

下一步，我们使用被微压印的塑料辊，例如采用卷到卷、逆转辊、凹印、槽模（slot die）、珠（bead）或其它任何合适类型的涂布技术来制造弹性体膜。结果，获得弹性体涂布的塑料膜。为此，逆转辊和凹印辊涂布技术被认为在其它已知的技术中最有希望的，因为它们提供具有均匀和相对良好定义的厚度的涂层。我们选择被压印的塑料辊或模和压印树脂的表面性能以至于其允许被弹性体材料润湿。我们在洁净室环境中进行弹性体膜的生产工艺以制造高品质的无针孔的弹性体膜。

我们暴露如上所述形成模上的没有固化的弹性体膜于热、紫外光或任何其它能初始化交联的源，从而导致弹性体膜固化。所选择的源将取决于所使用的弹性体材料的类型，特别是所使用材料的固化机制。

而后我们在分层工艺中从模脱模固化的膜。为此使用合适的脱模工具。优选地，我们可以选择模材料和弹性体材料以便于脱模工艺。固化的弹性体对于衬底模的非常弱的粘接力是优选的。如果粘接力非常好，该脱模工艺会失败并损坏该膜。单面波纹状的弹性体膜卷是该分层工艺的产品。

下一步，我们通过真空网金属化将金属电极沉积到弹性体膜的波纹表面上。因此，将例如银、镍、金等的涂层的金属涂层施加到该波纹状表面。由此，形成了复合物。

在具有数公里范围的长度的弹性体膜的大规模制造中的挑战不在于平膜的生产，而是在于具有精确的和非常好界定的微结构的单面或双面波纹膜的生产。另一挑战是使用比聚合物工业上通常出现的控制张力小几个量级的受控张力来处理这些非常软的材料。当涂层的厚度仅为波纹图案的深度的1/100时，带可靠涂层的波纹状弹性体膜的金属化是生产工艺中的另一挑战。

下一步，我们叠置涂布的弹性体膜即复合物，由此形成了如上所述的多层复合物。然后我们卷绕该多层复合物以形成最终的卷绕的换能器结构。该卷绕的换能器结构经过精加工和切割，并施加了电连接。

最后，我们可以将完成的换能器与控制电子装置一起集成到最终的产品中，且该换能器就可以用了。

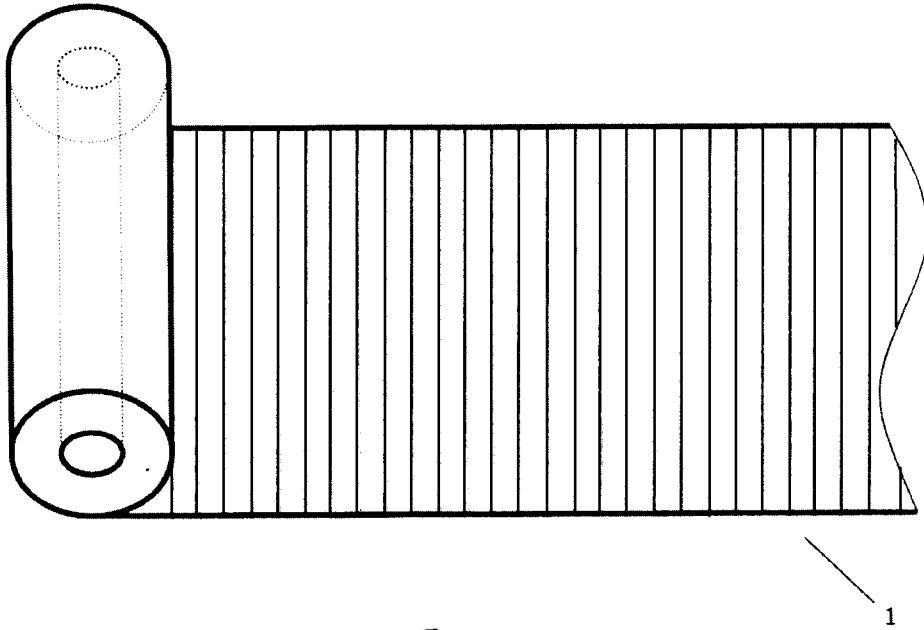


图 1a

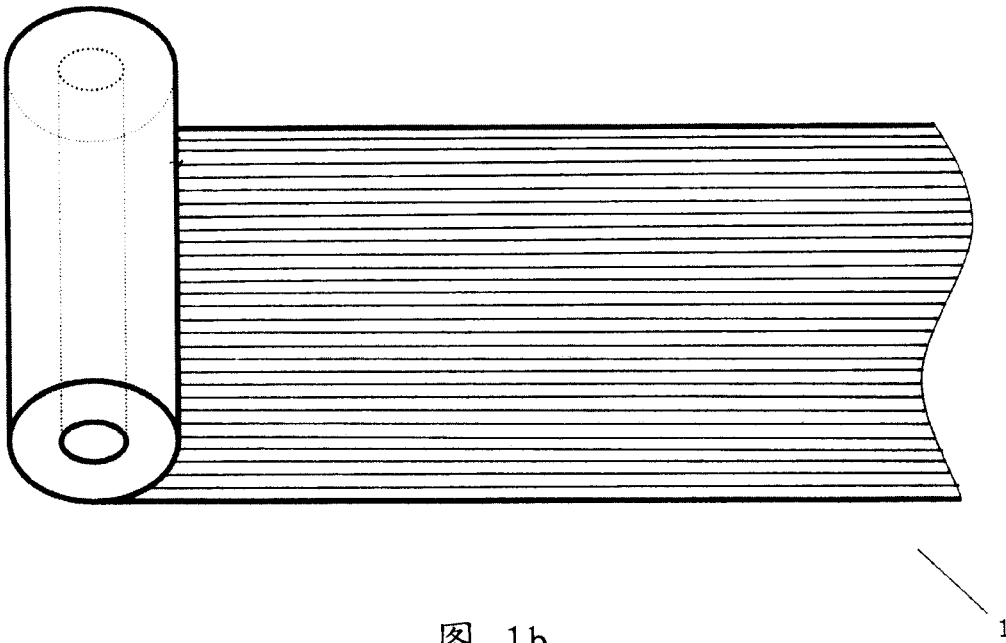


图 1b

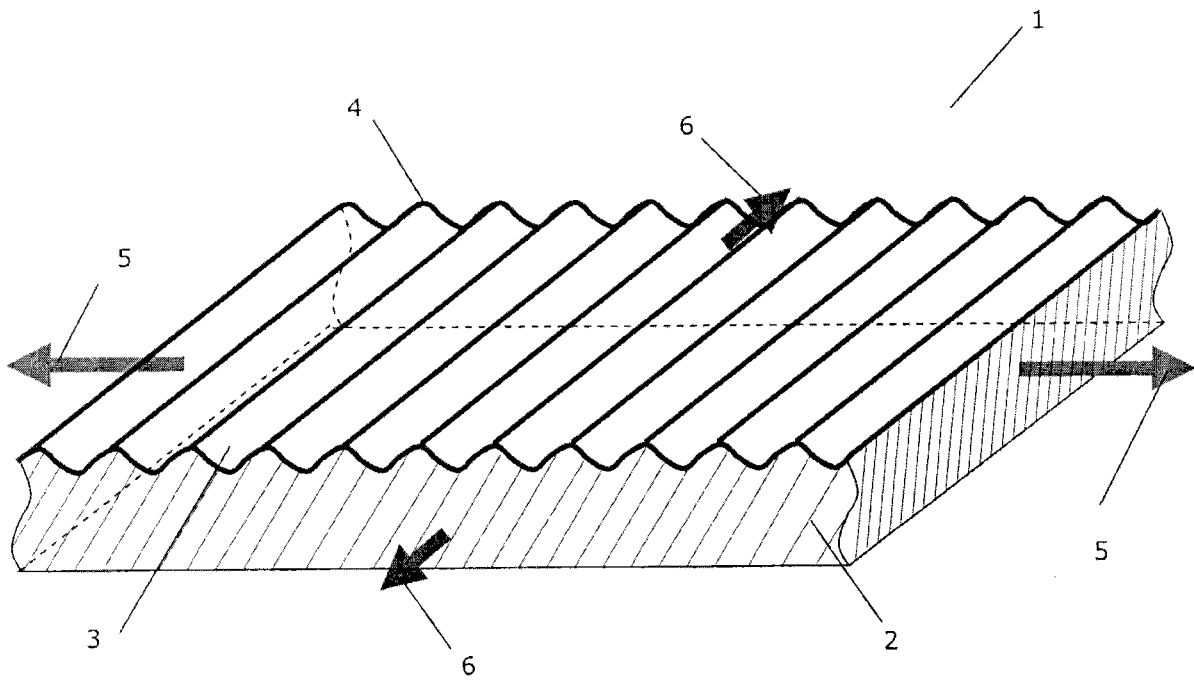
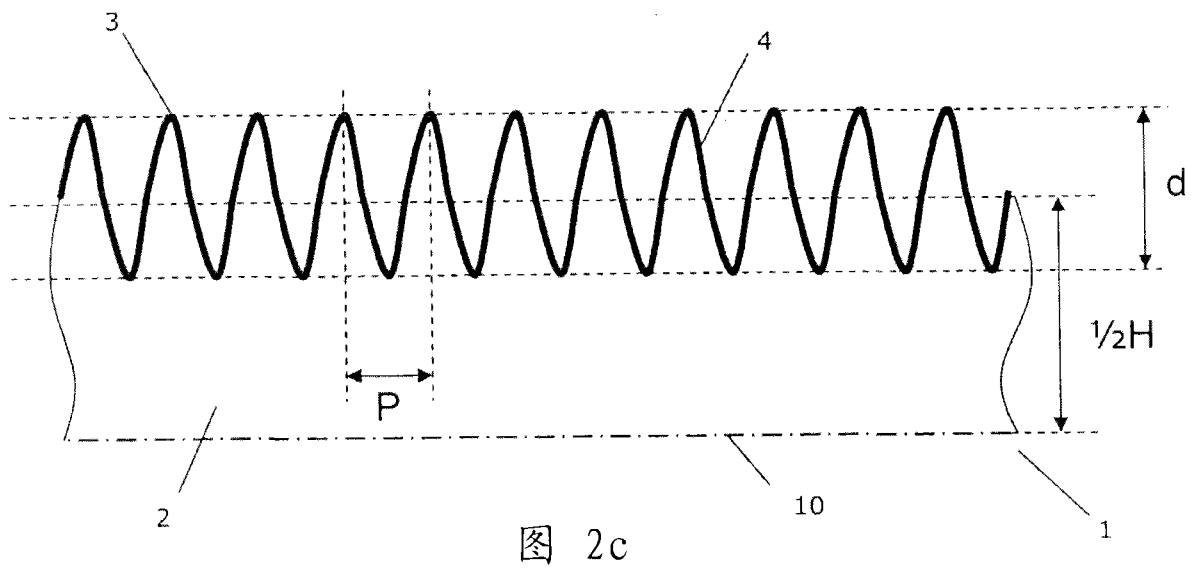
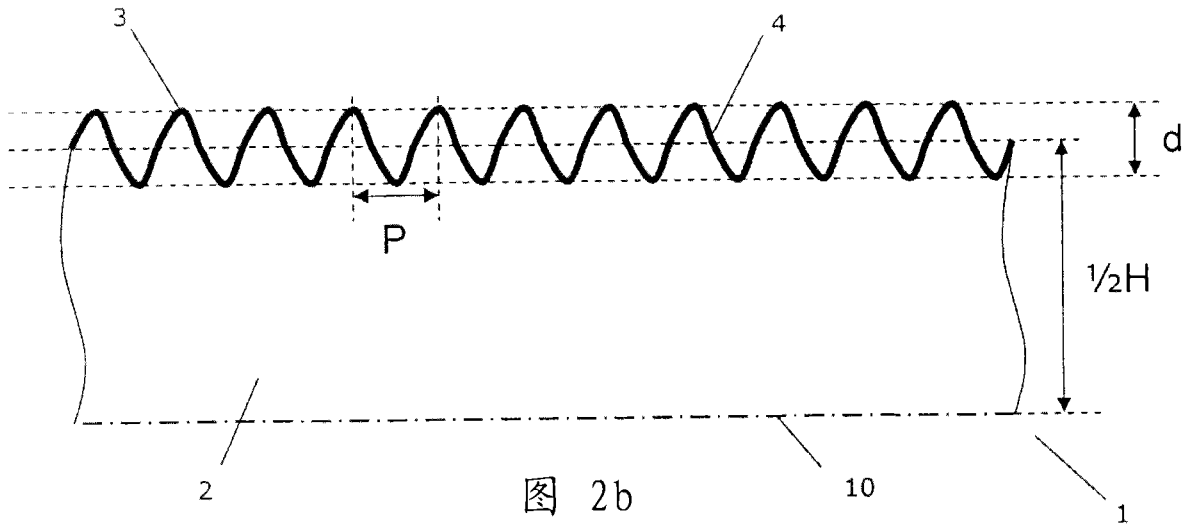
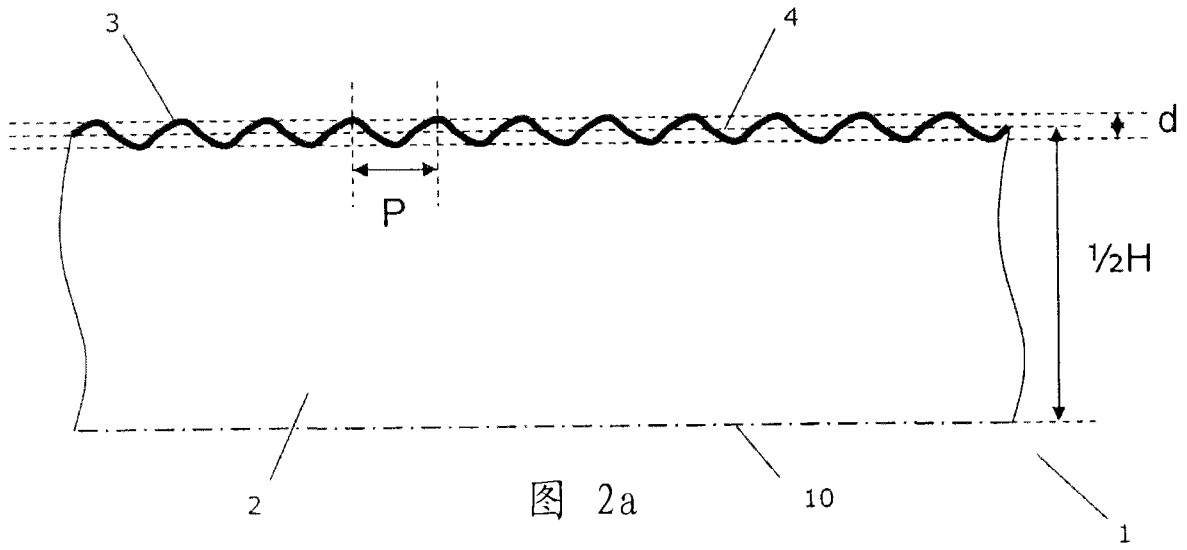
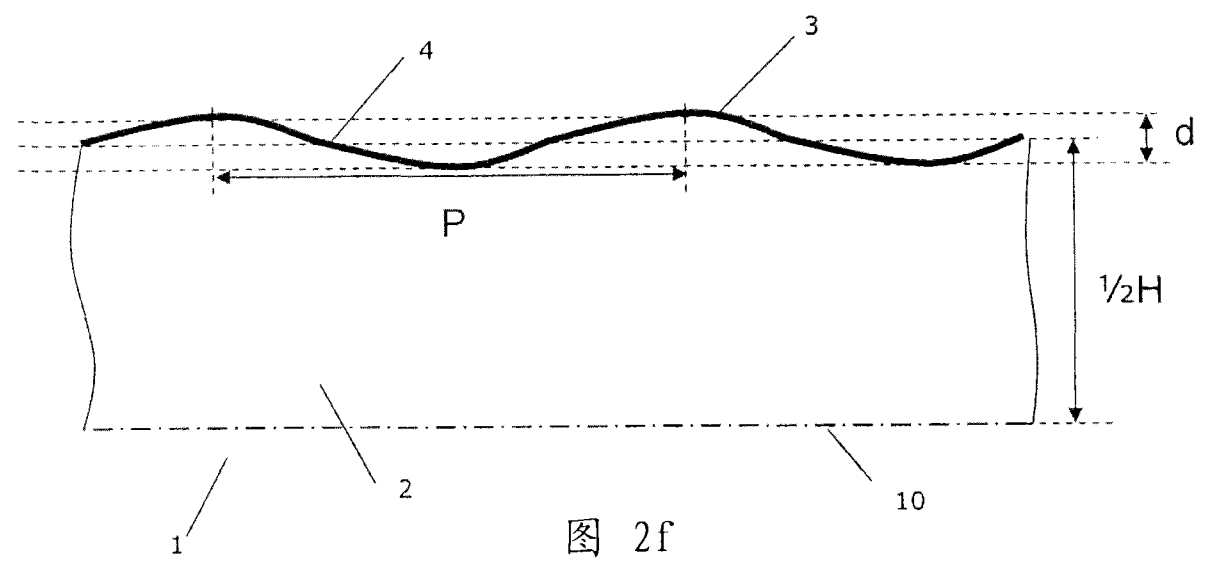
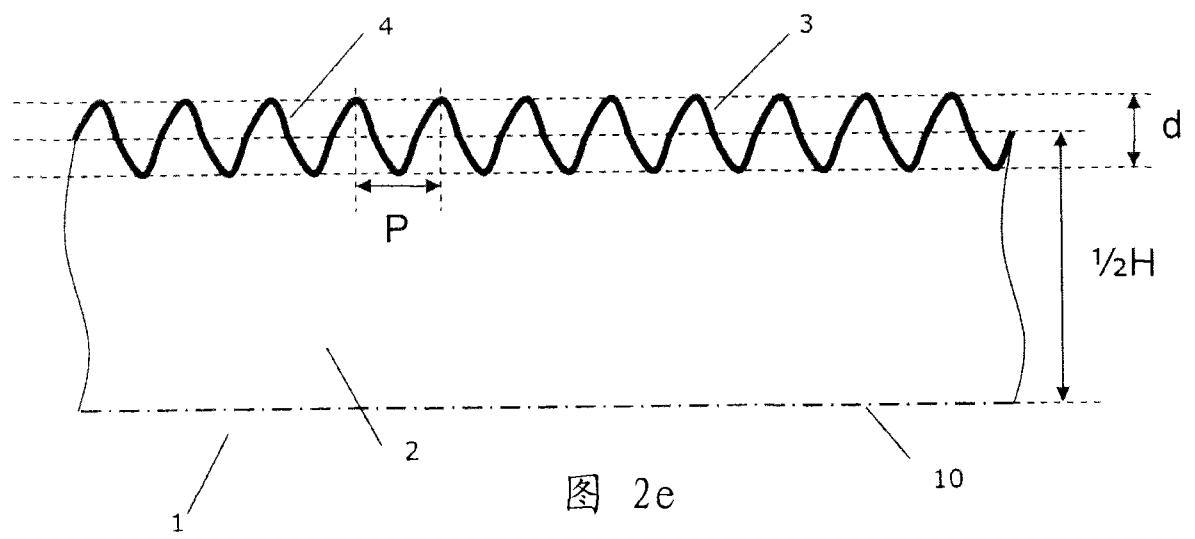
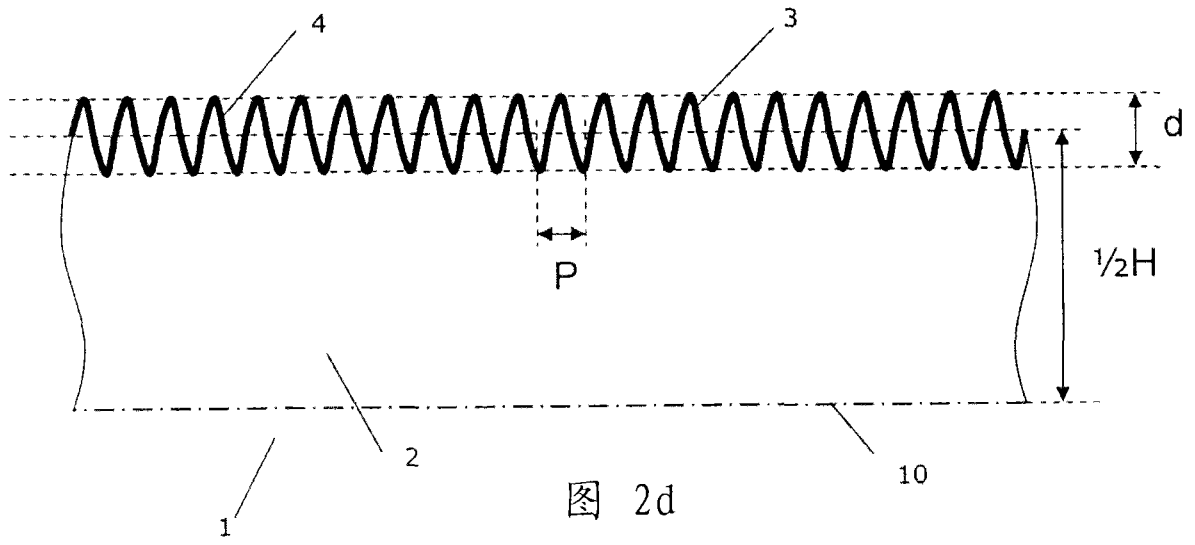


图 1c





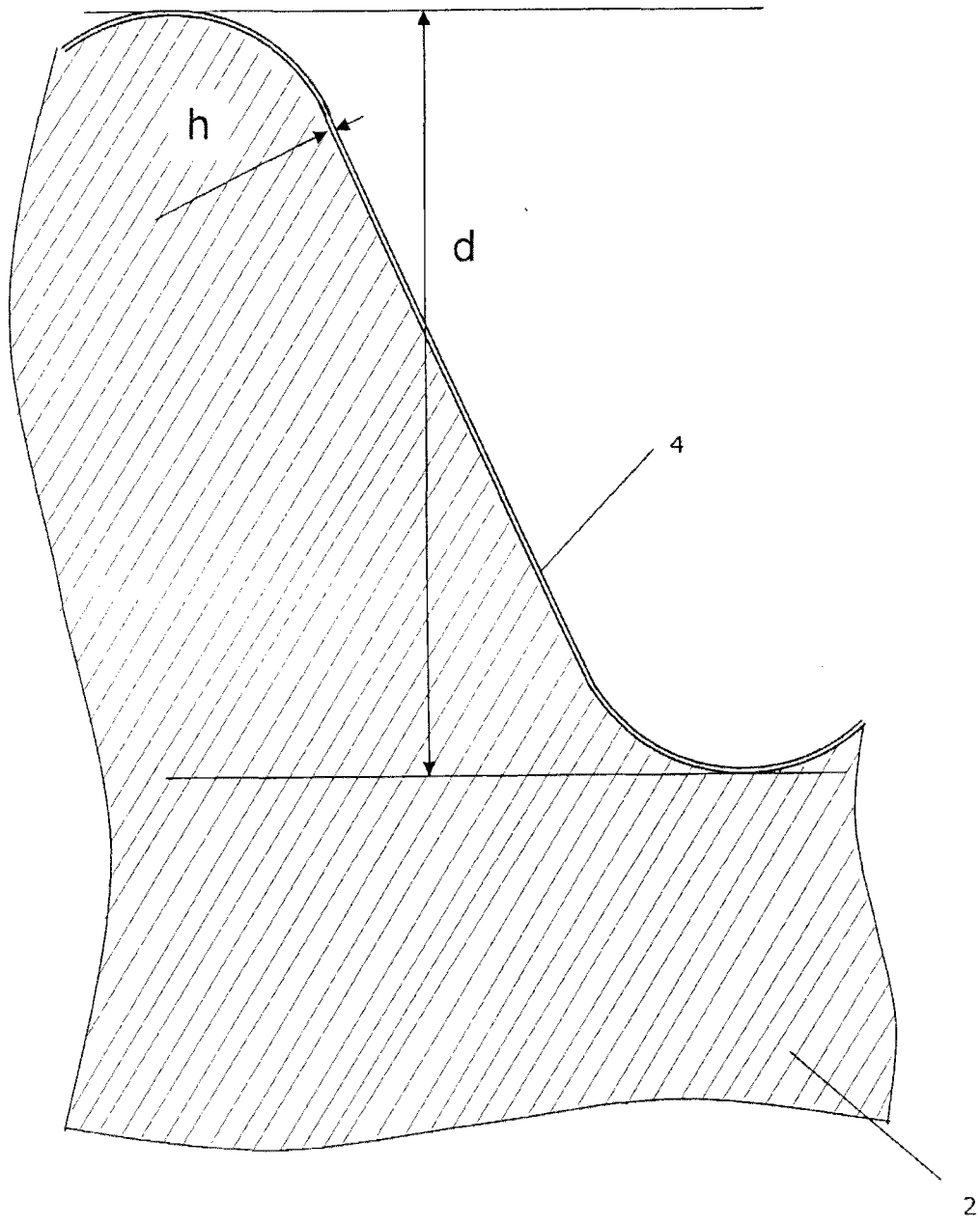


图 2g

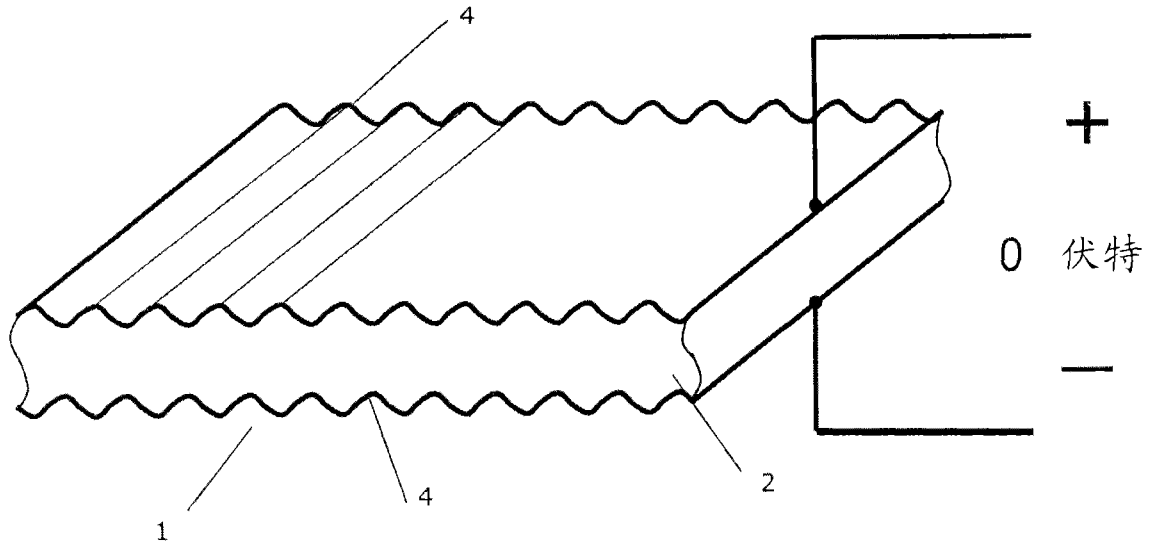


图 3a

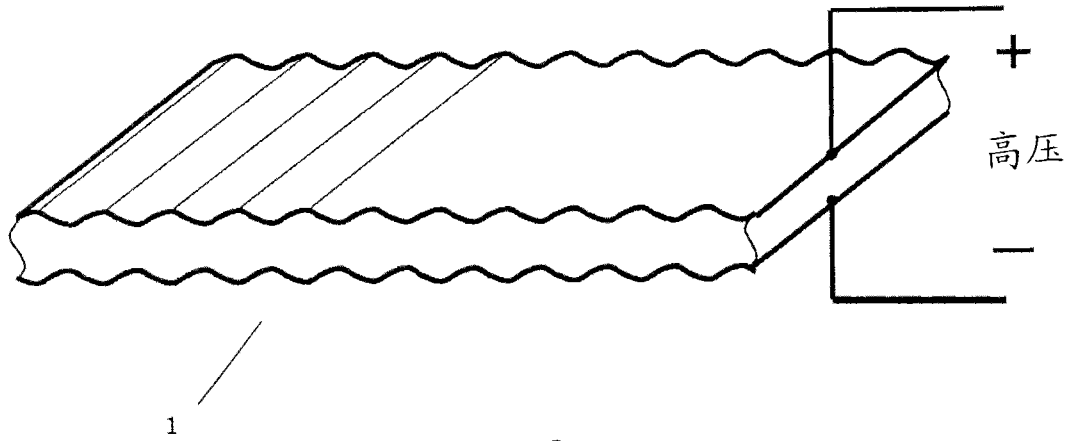


图 3b

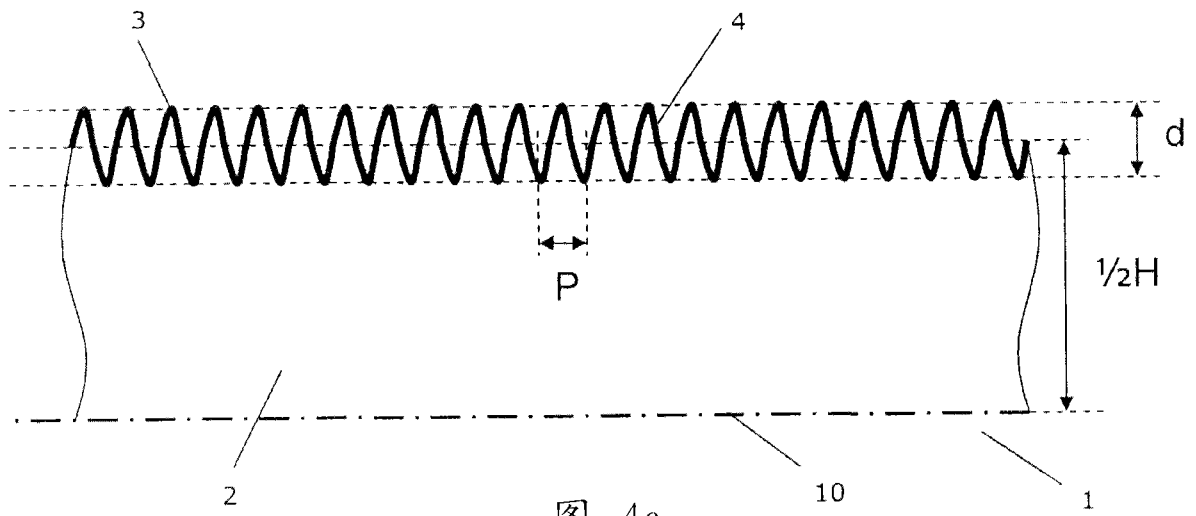


图 4a

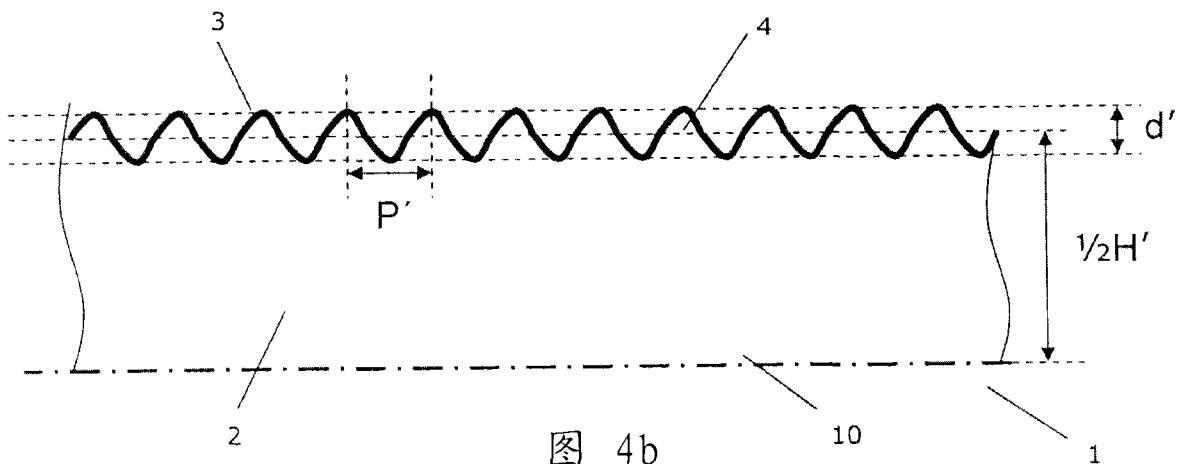


图 4b

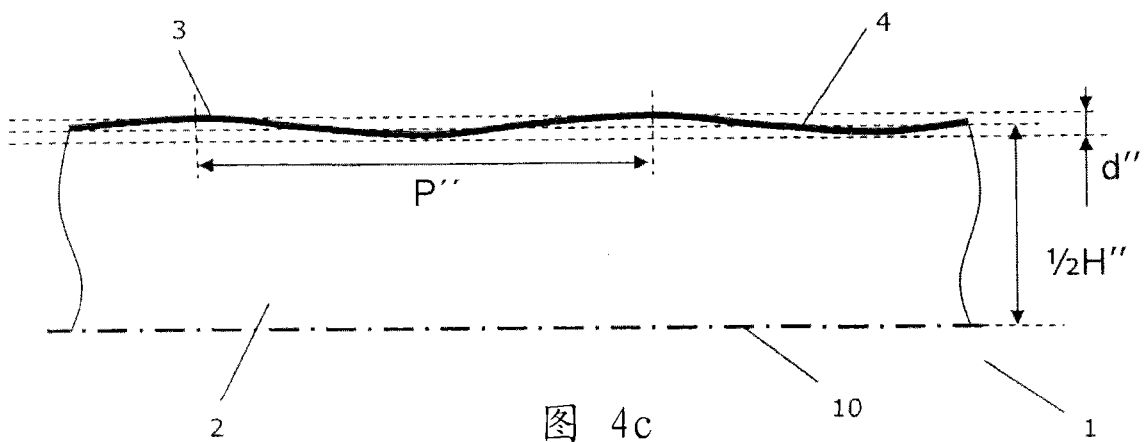


图 4c

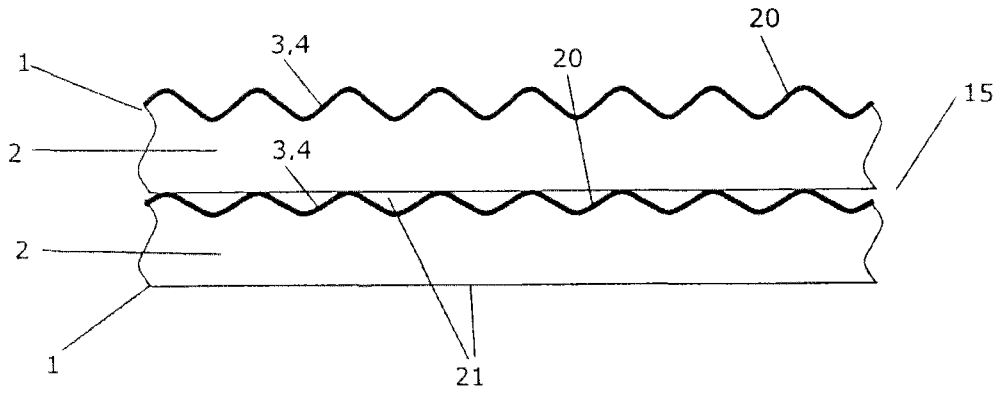


图 5a

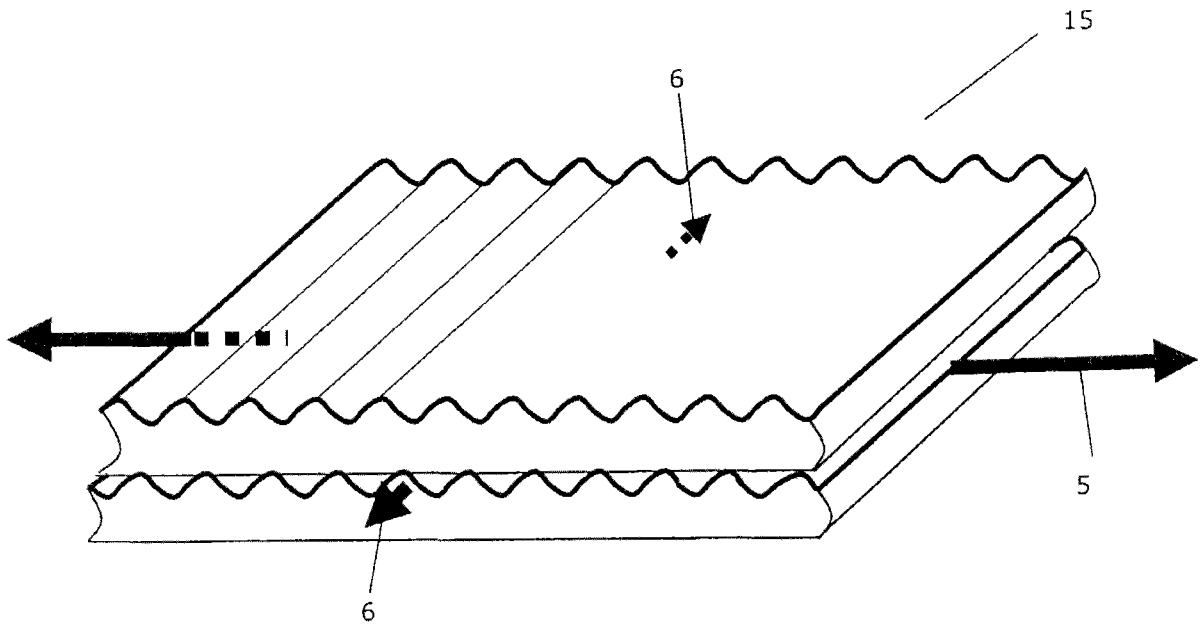
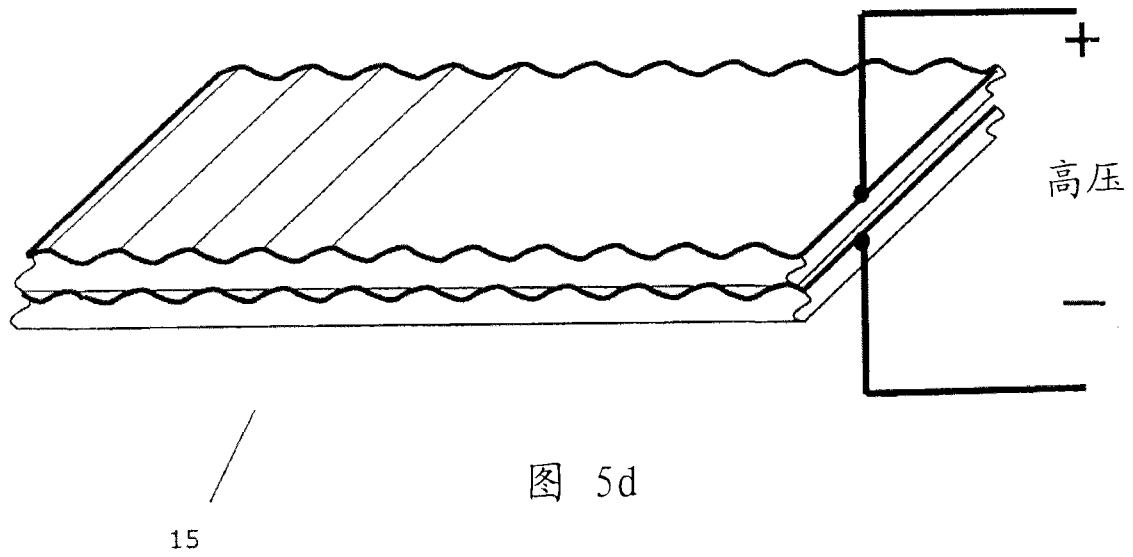
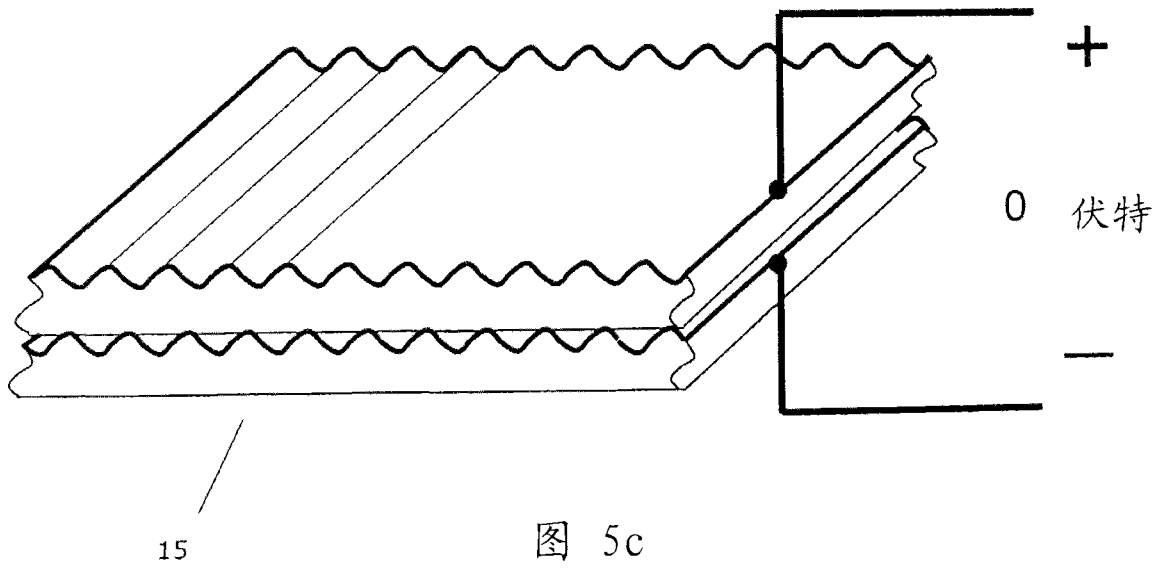


图 5b



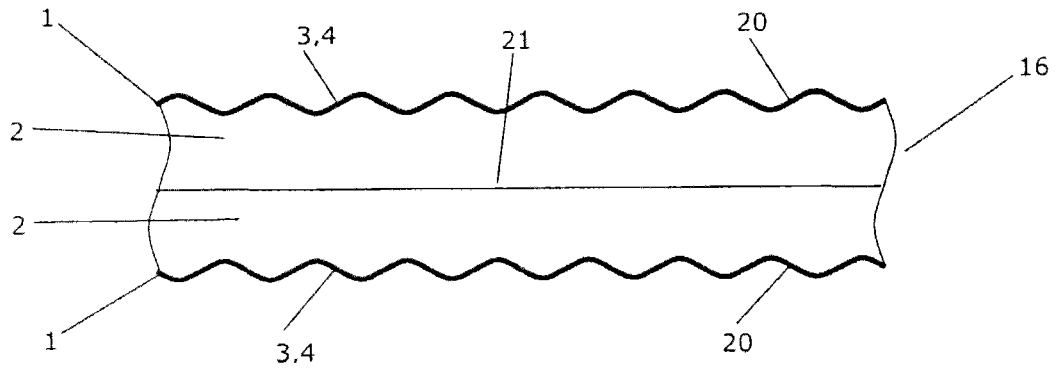


图 6a

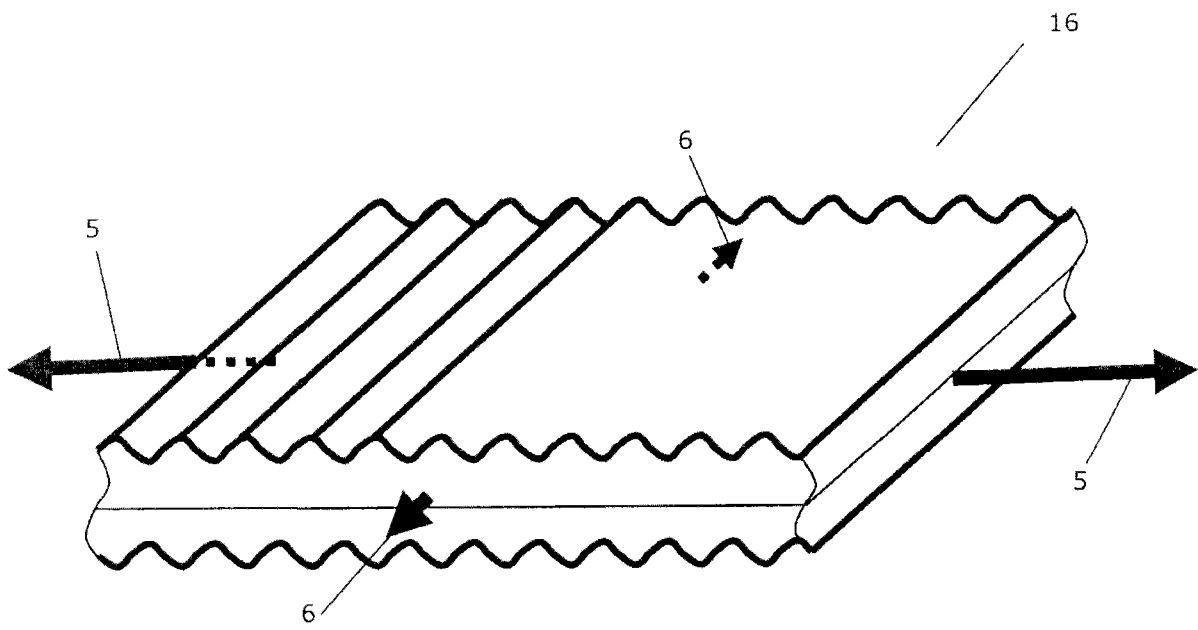
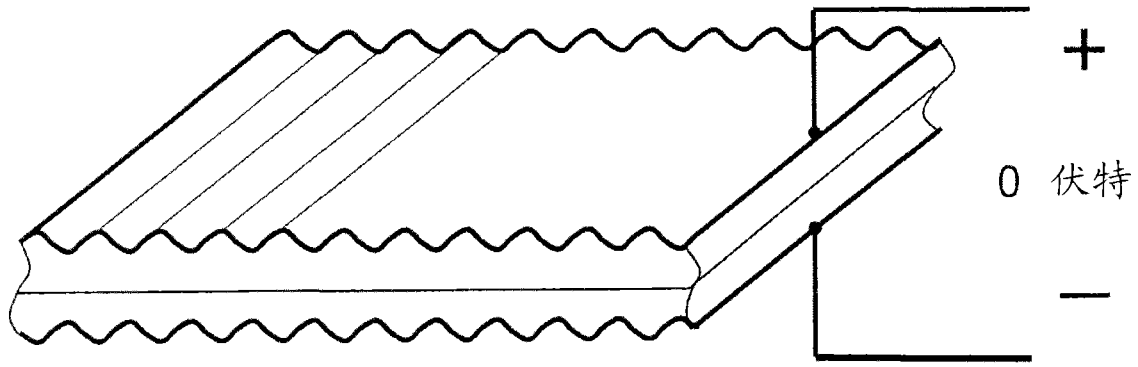
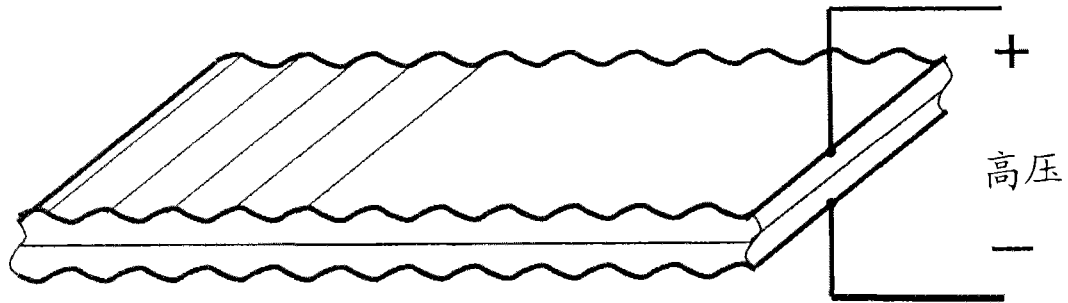


图 6b



16

图 6c



16

图 6d

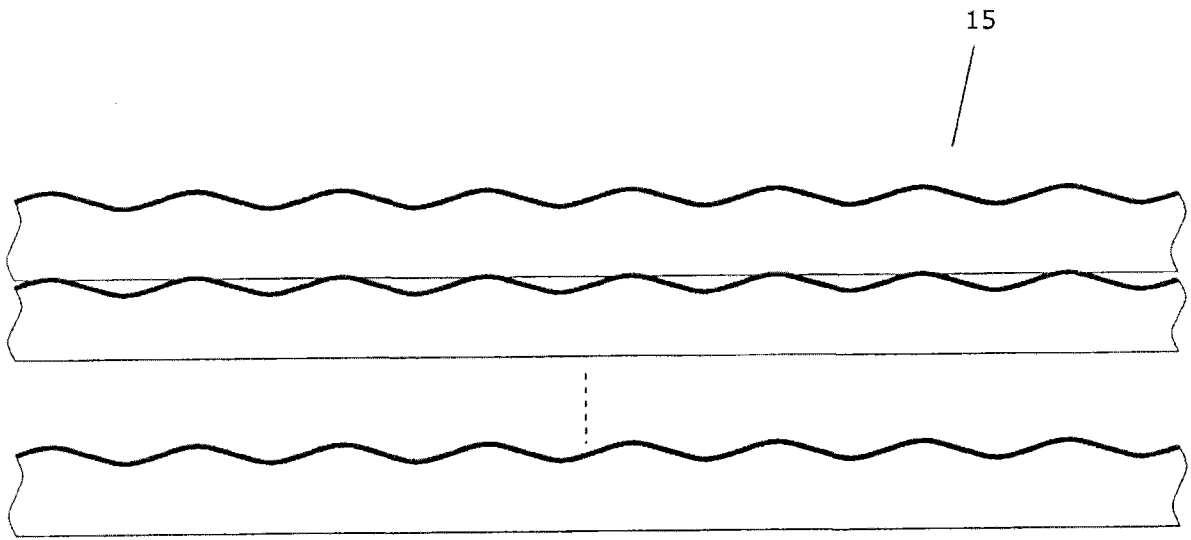


图 7a

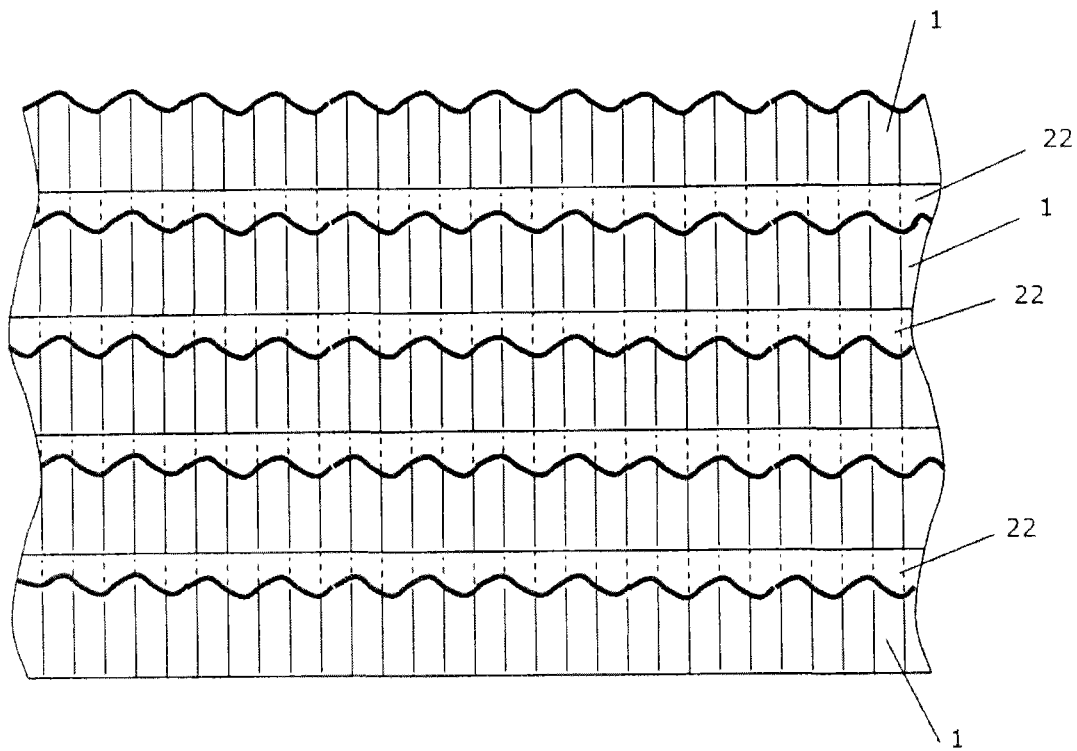


图 7b

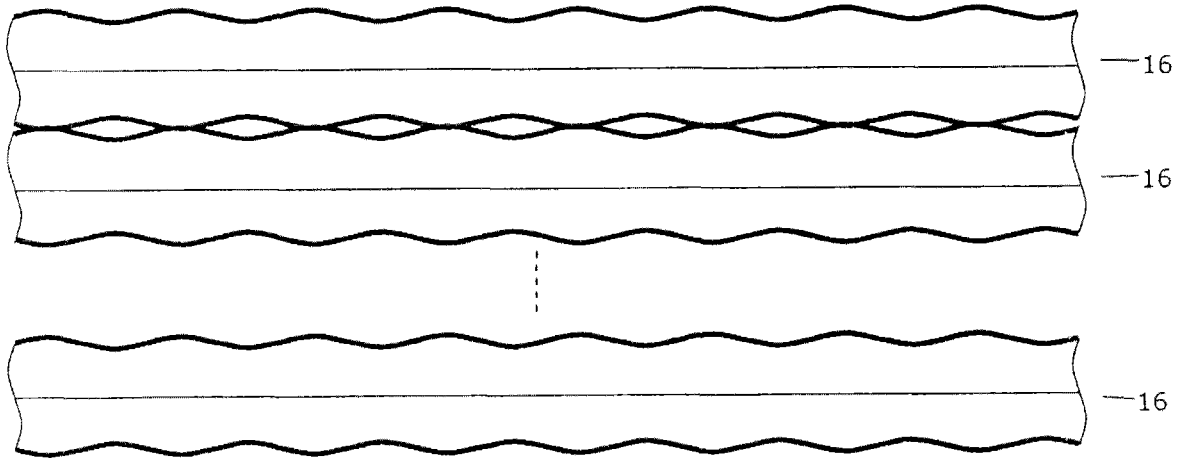


图 8

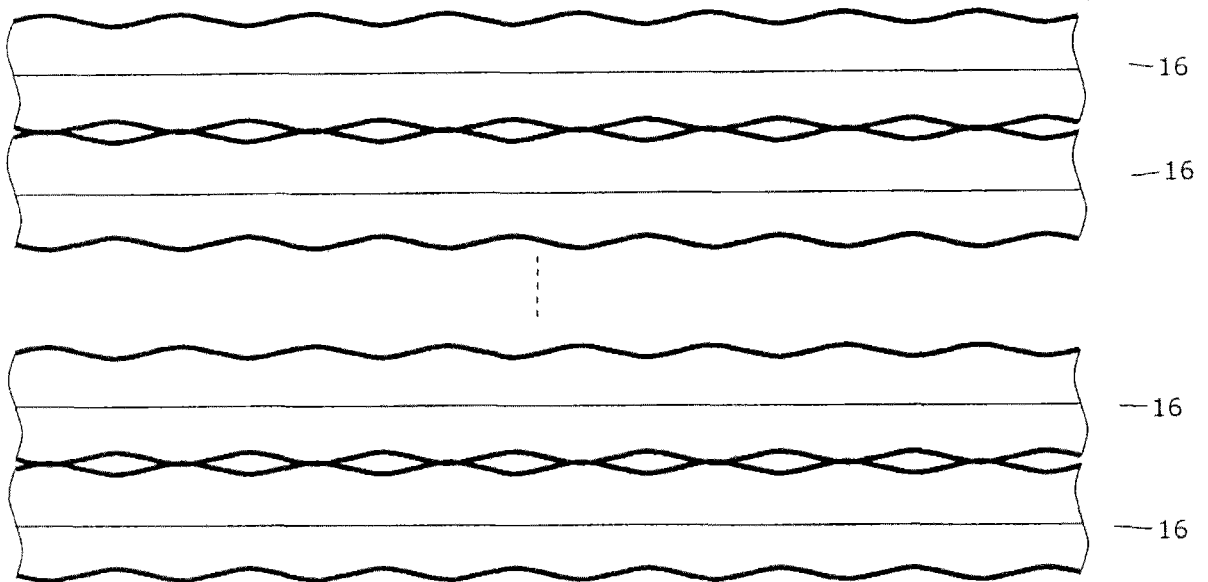


图 9

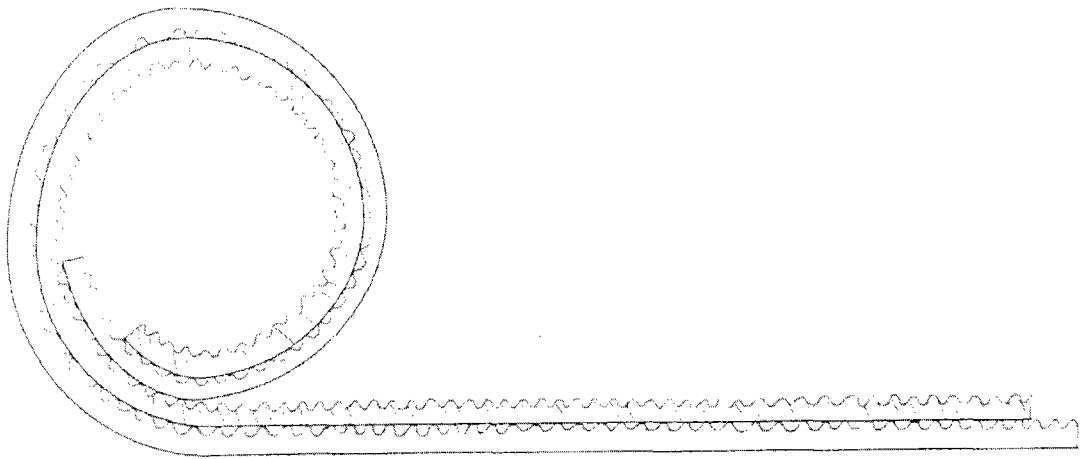


图 10a

15

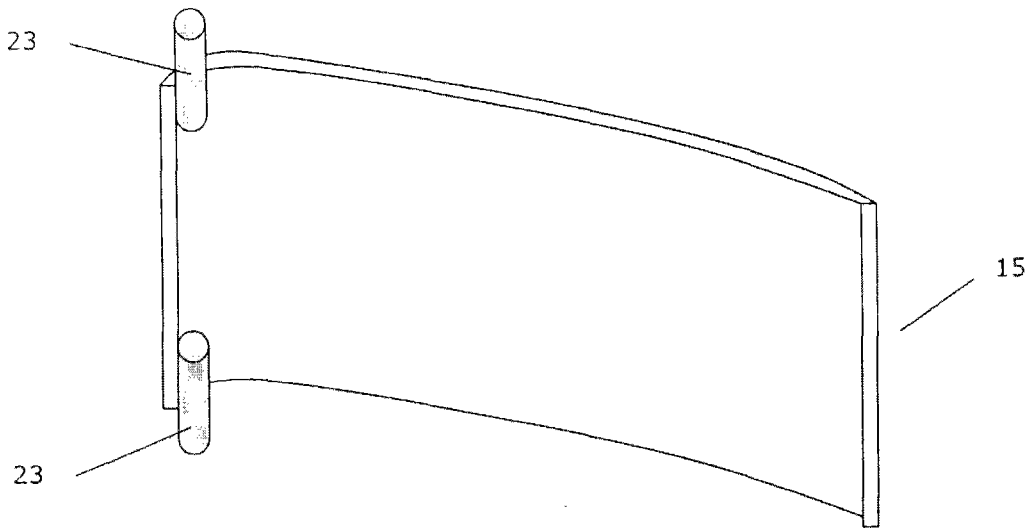


图 10b

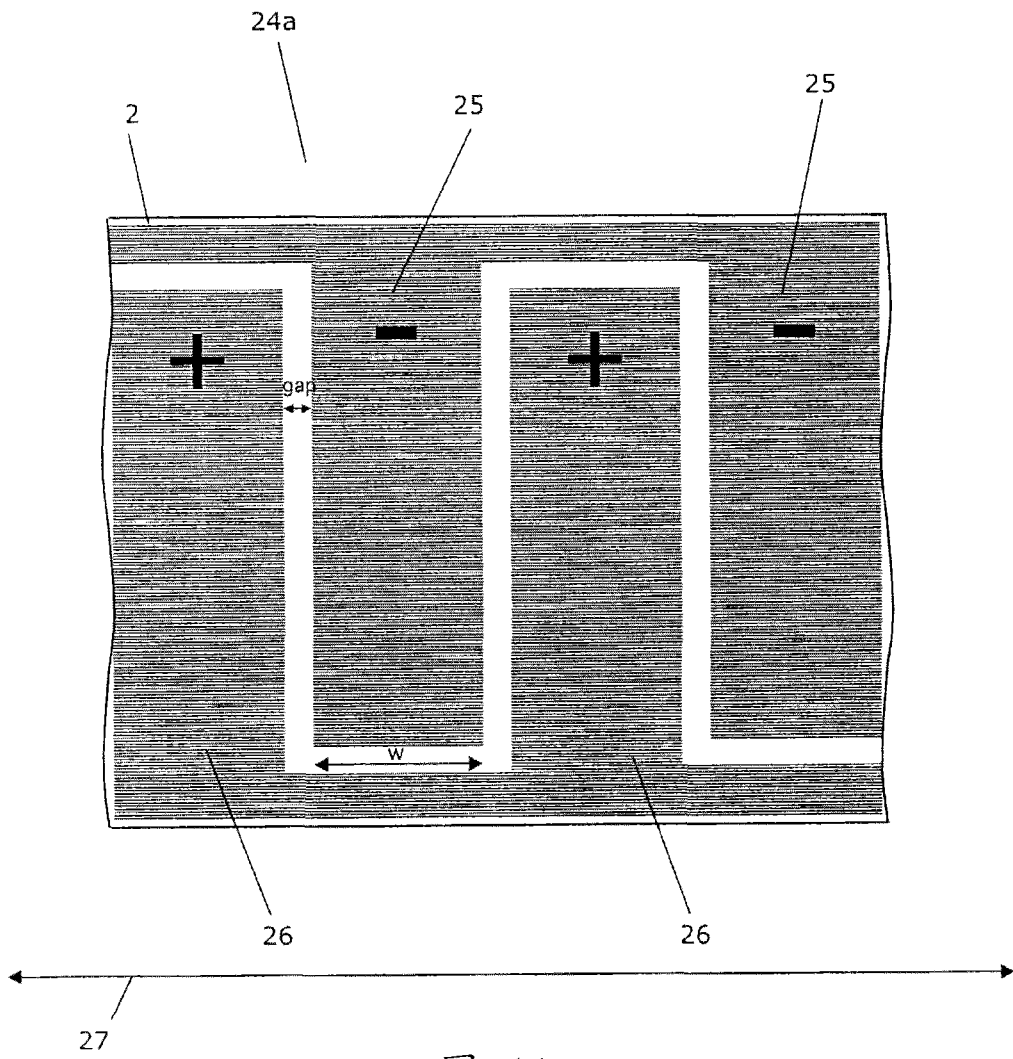


图 11a

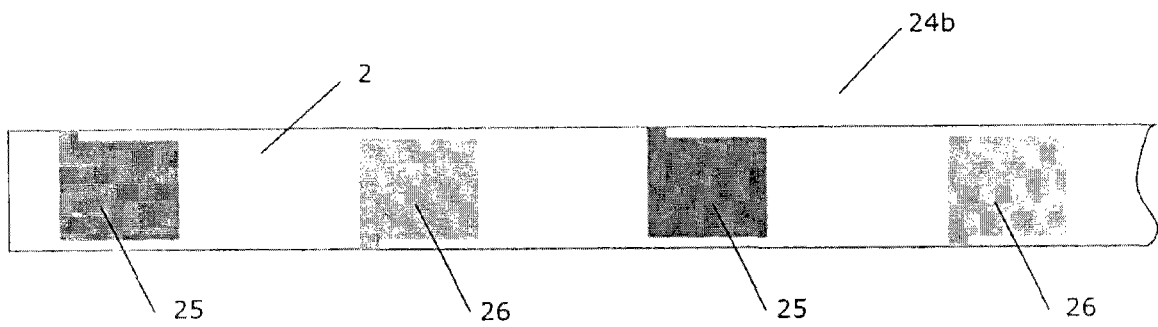


图 11b

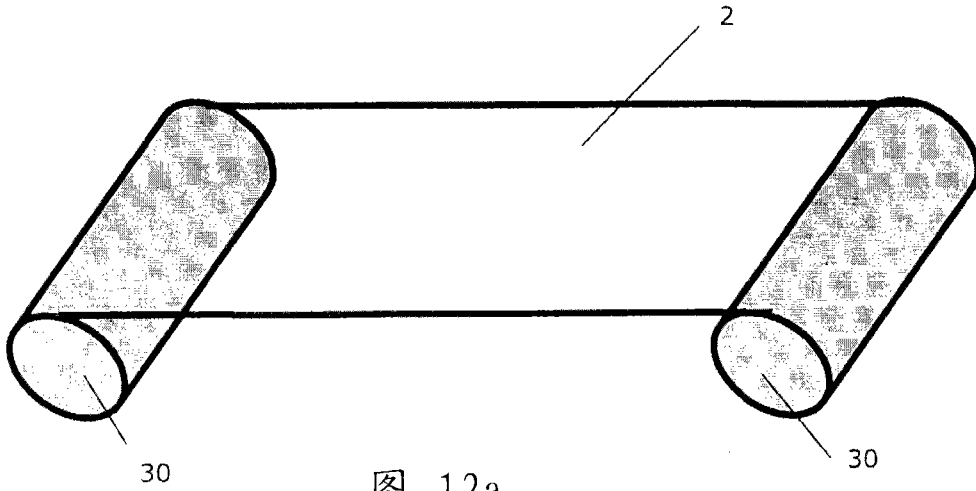


图 12a

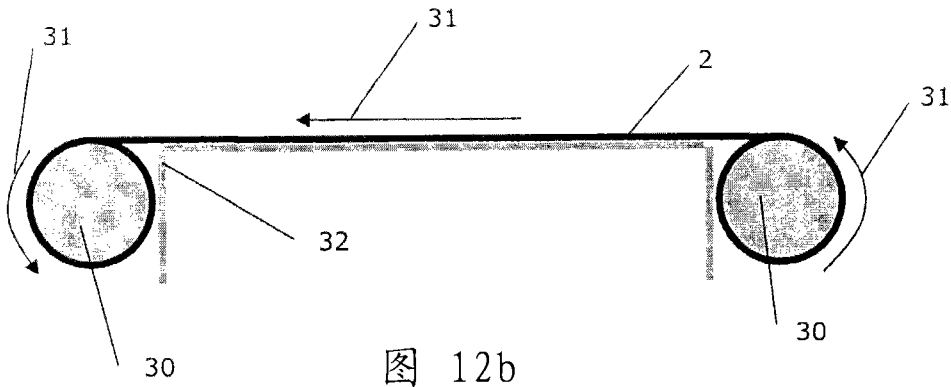


图 12b

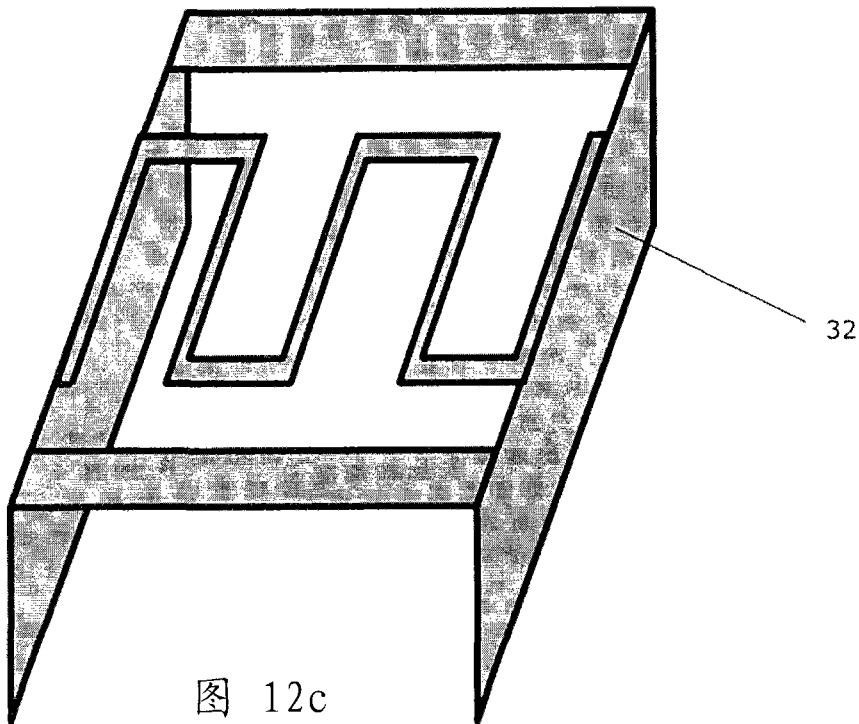


图 12c

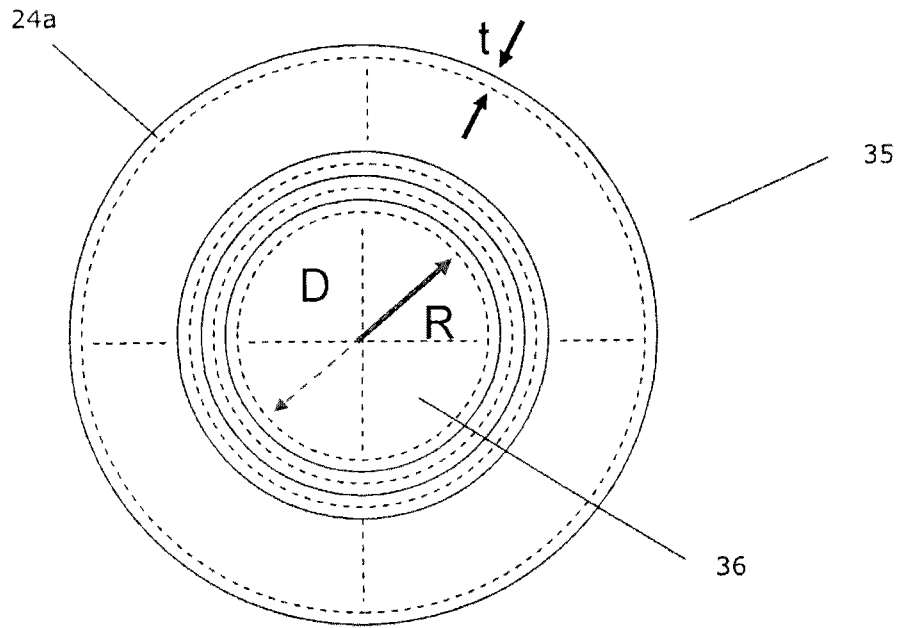


图 13a

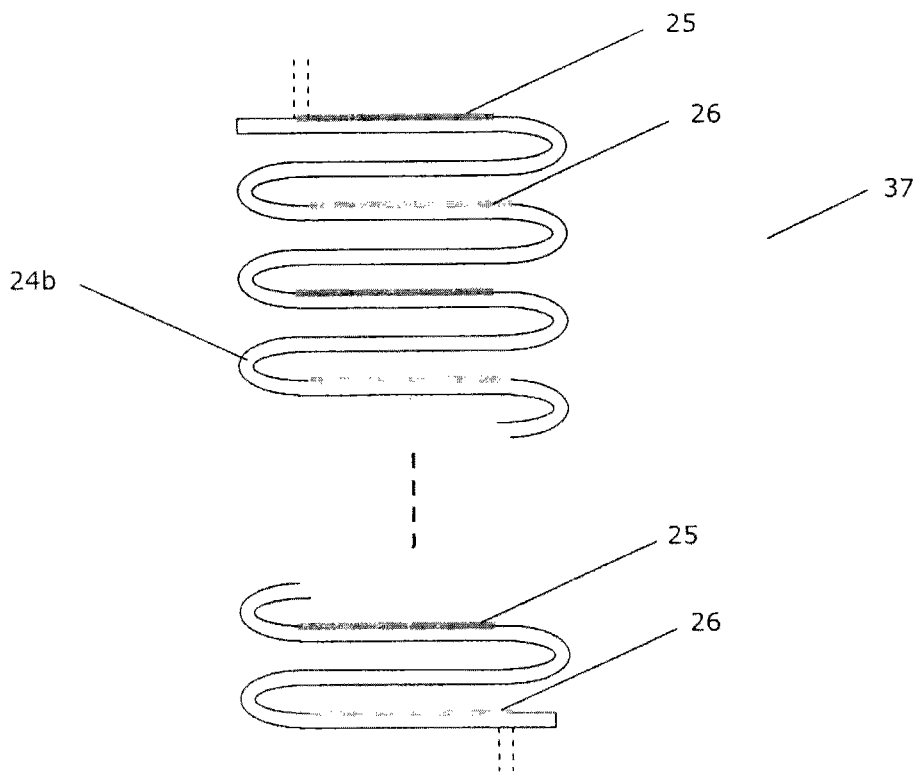


图 13b

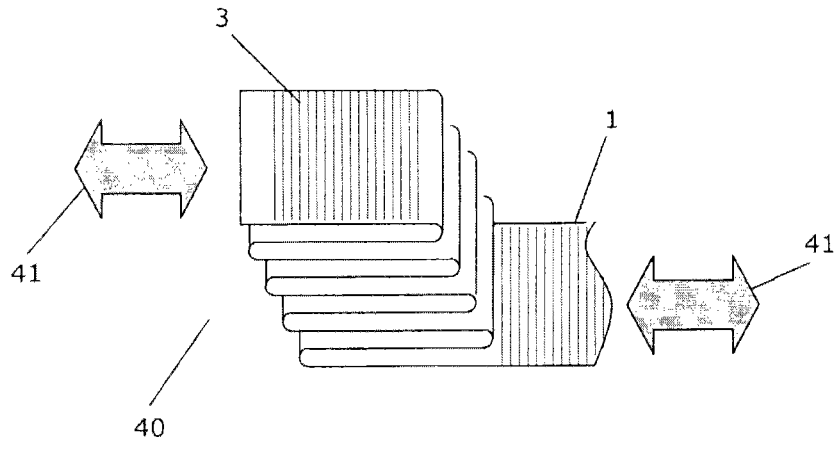


图 14a

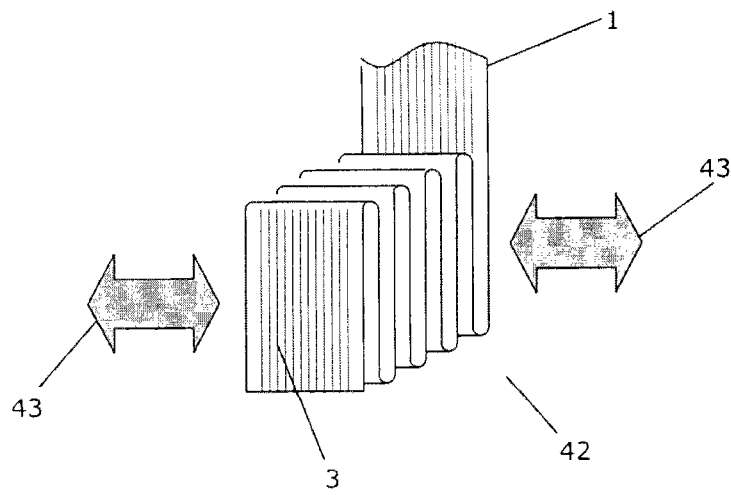


图 14b

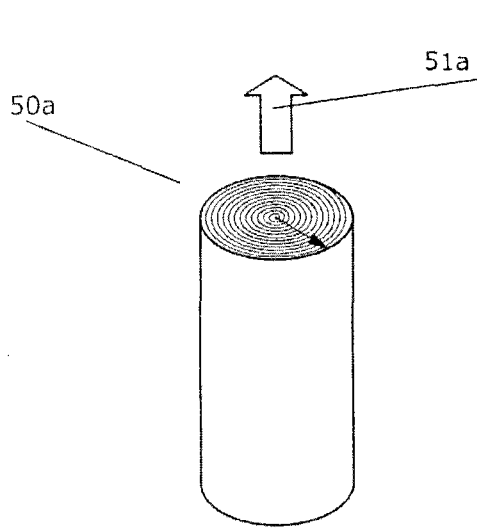


图 15a

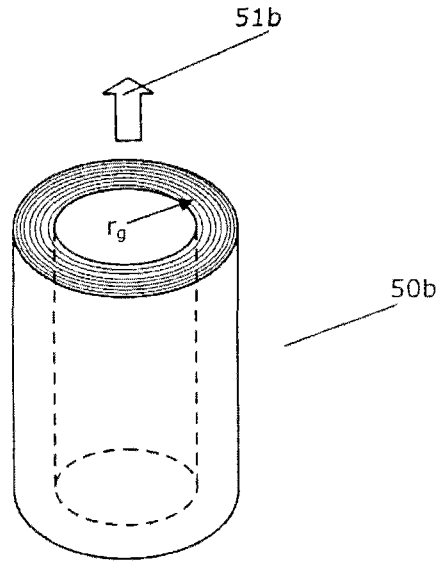


图 15b

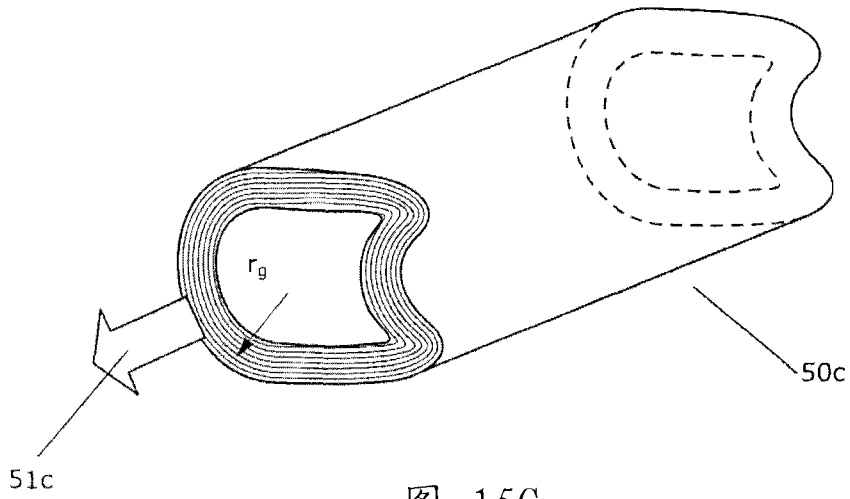


图 15c

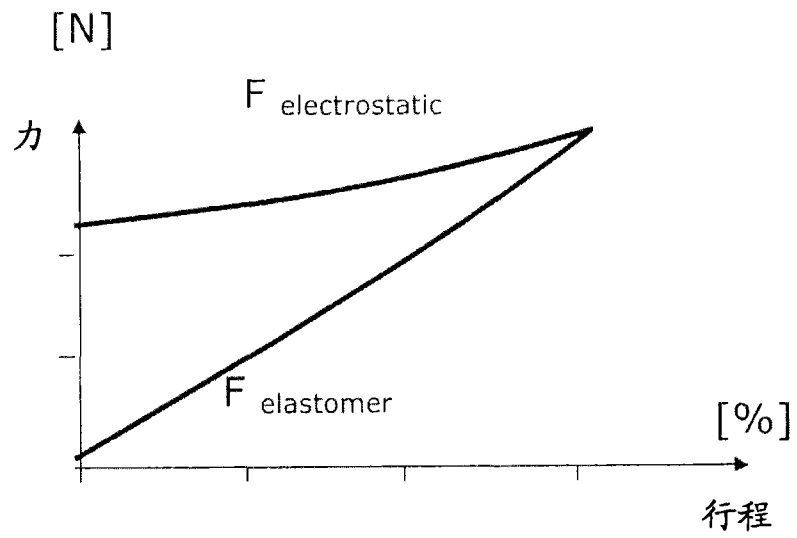


图 16a

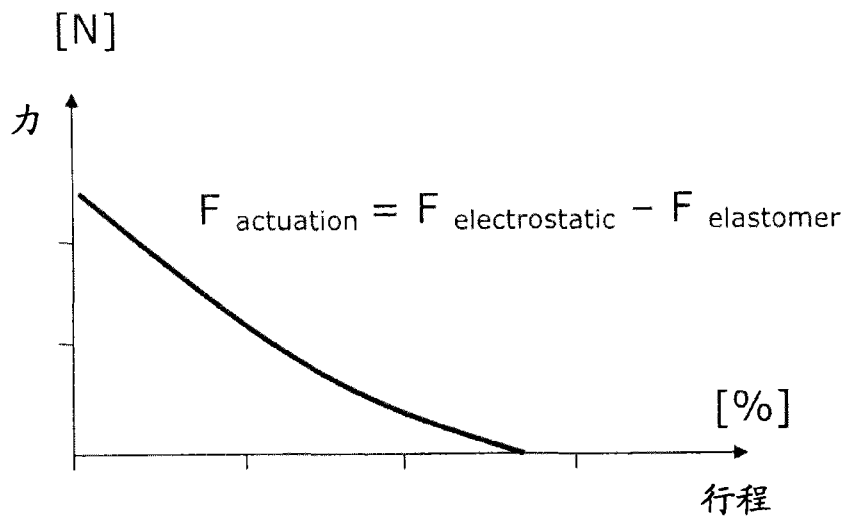


图 16b

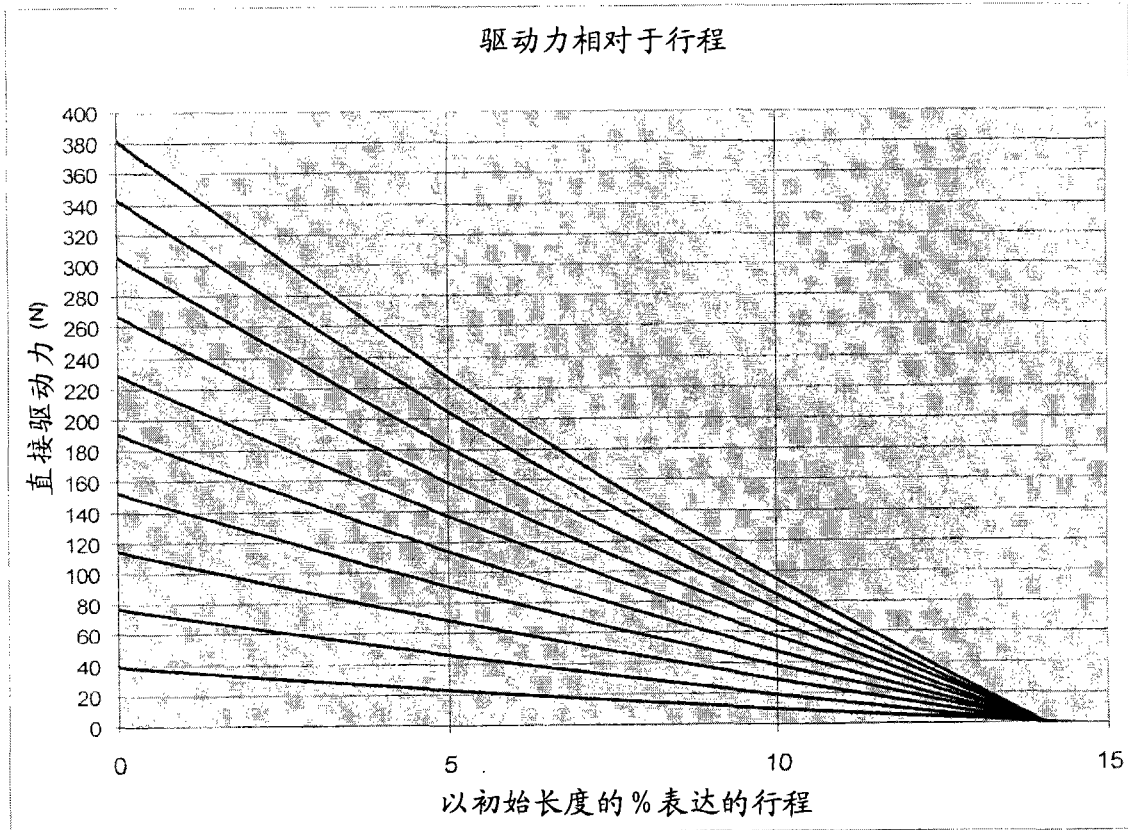


图 16c

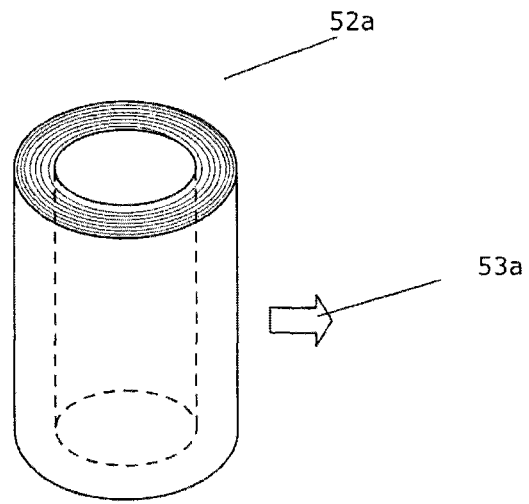


图 17a

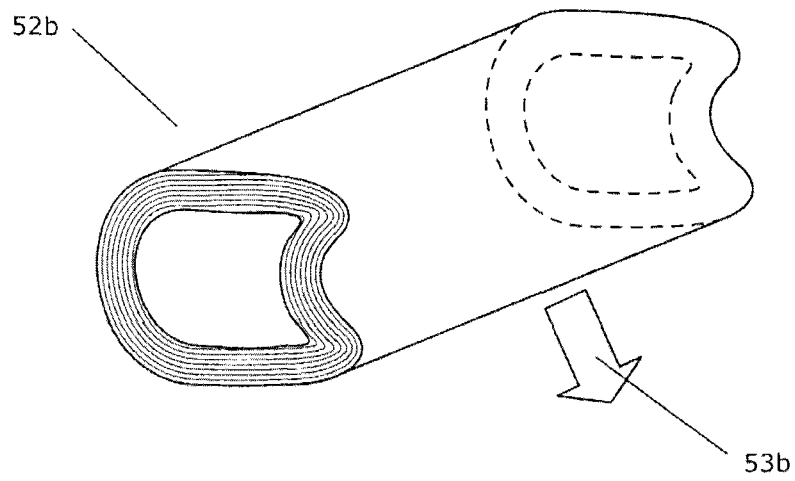


图 17b

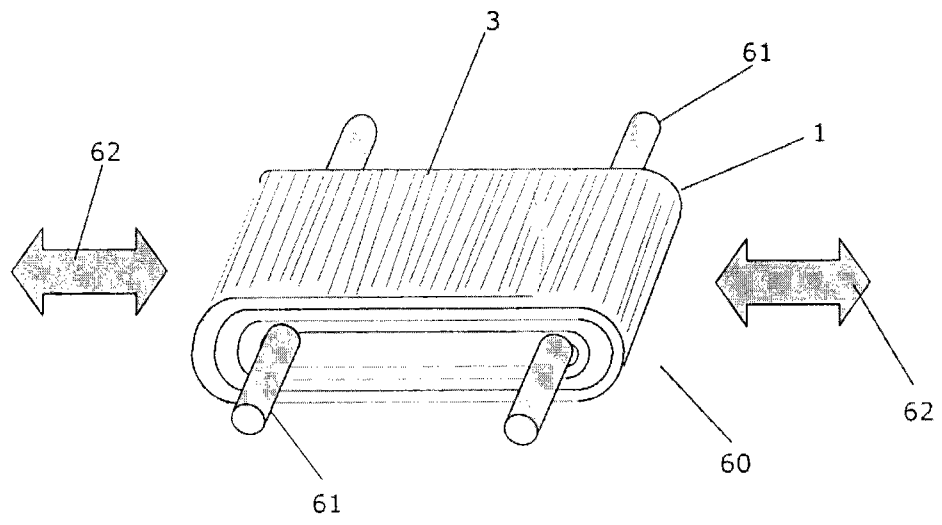


图 18a

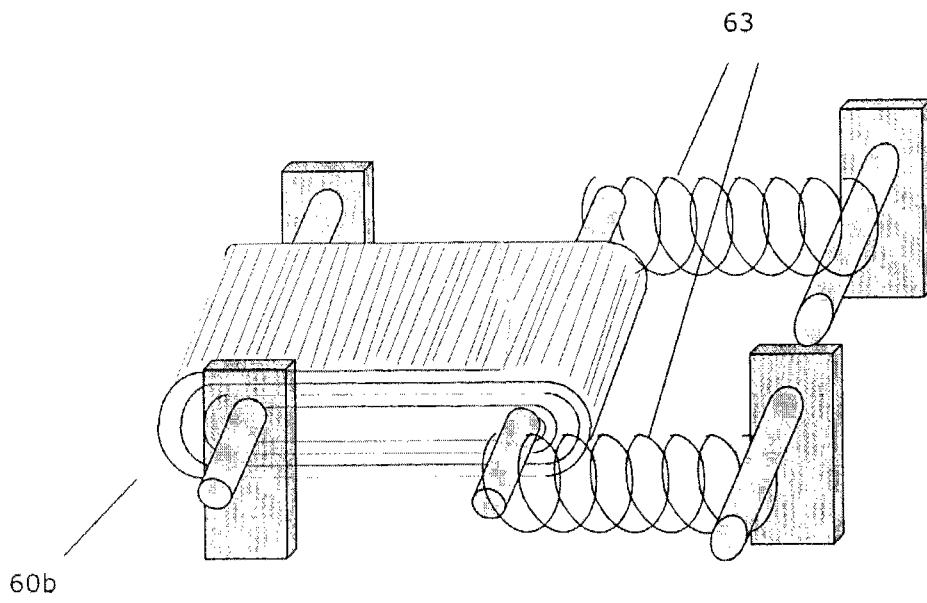


图 18b

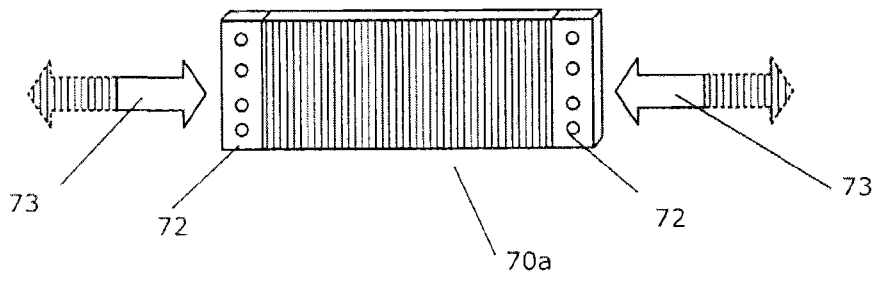


图 19a

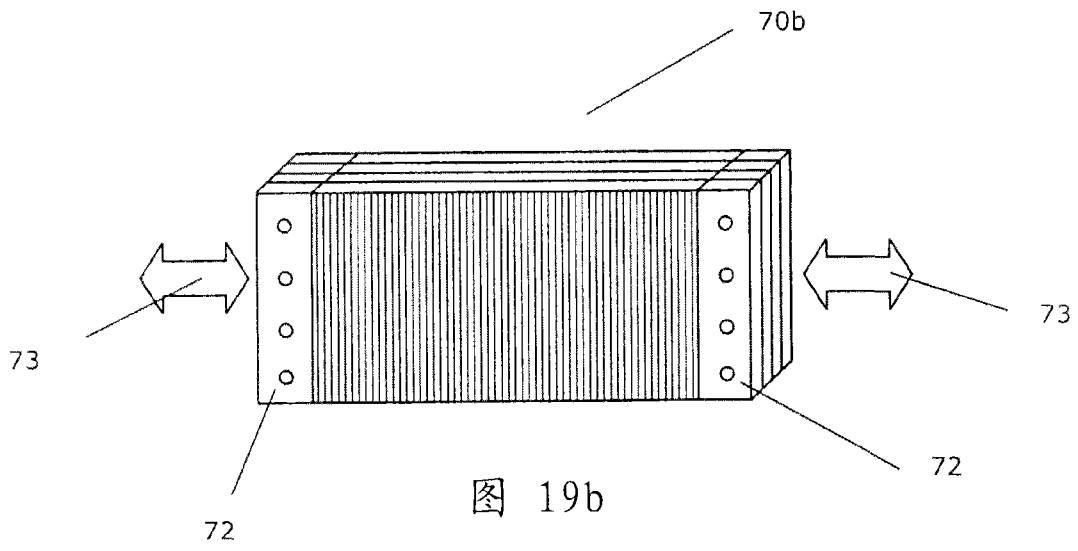


图 19b

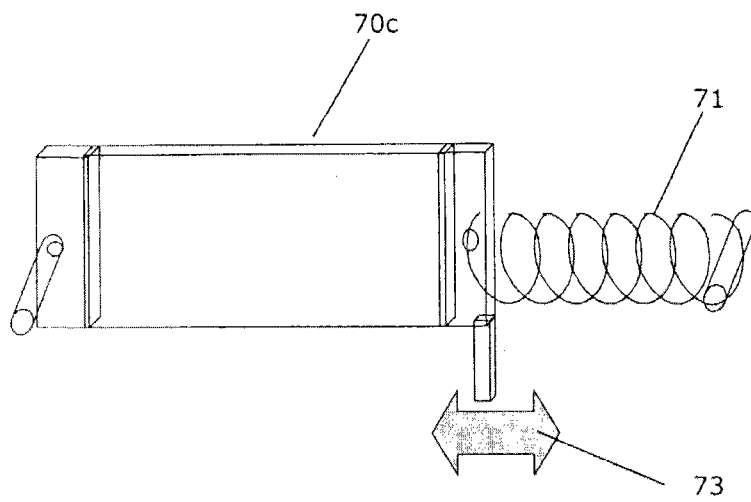


图 19c

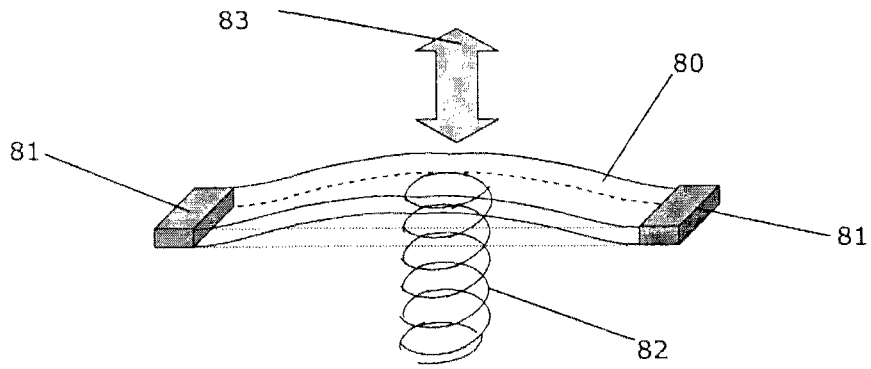


图 20a

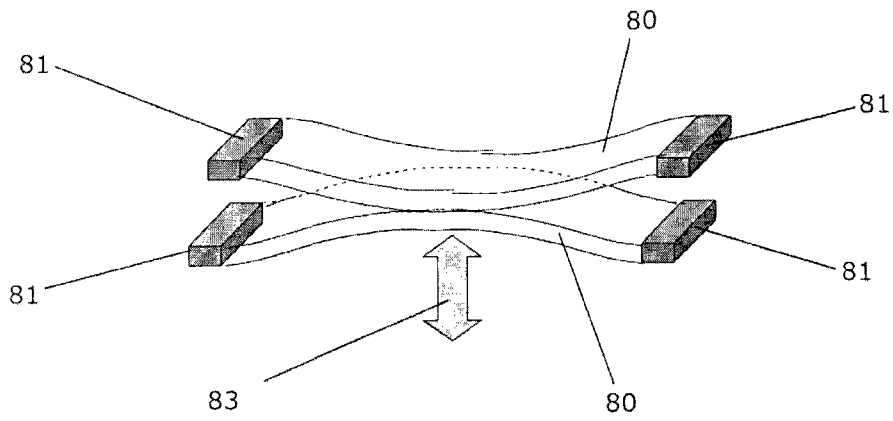


图 20b

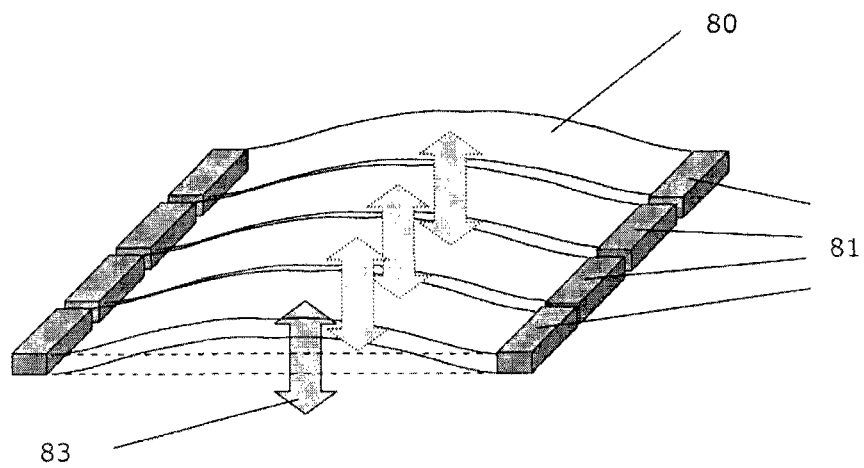


图 20c

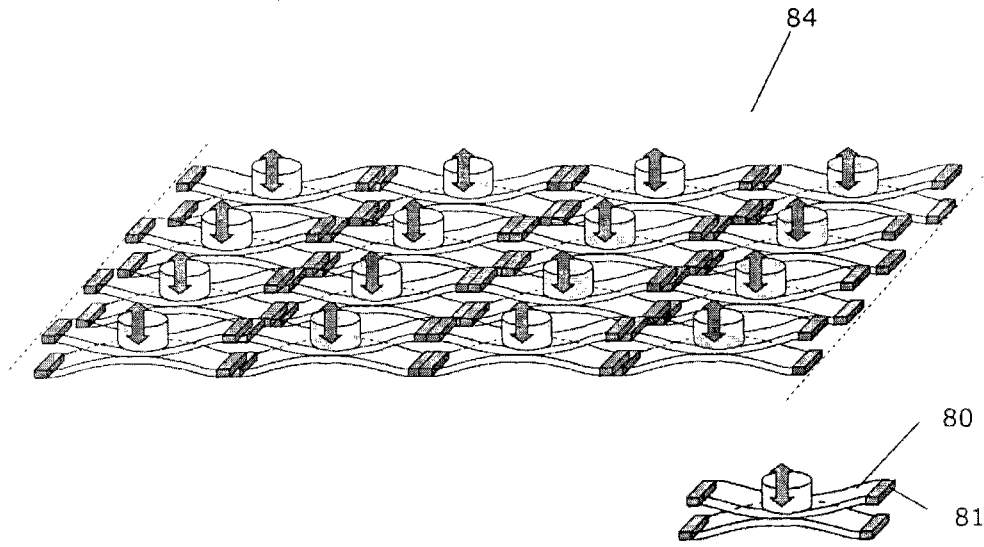


图 20d

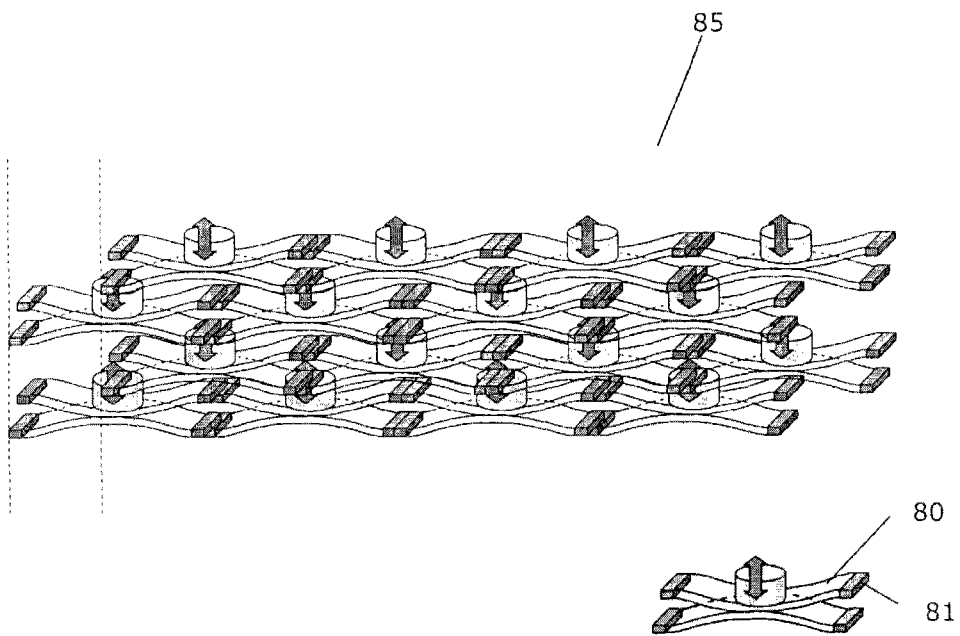


图 20e

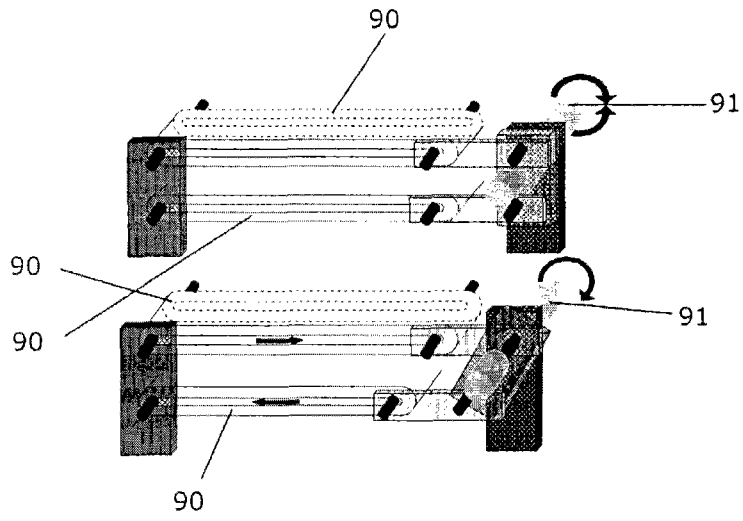


图 21a

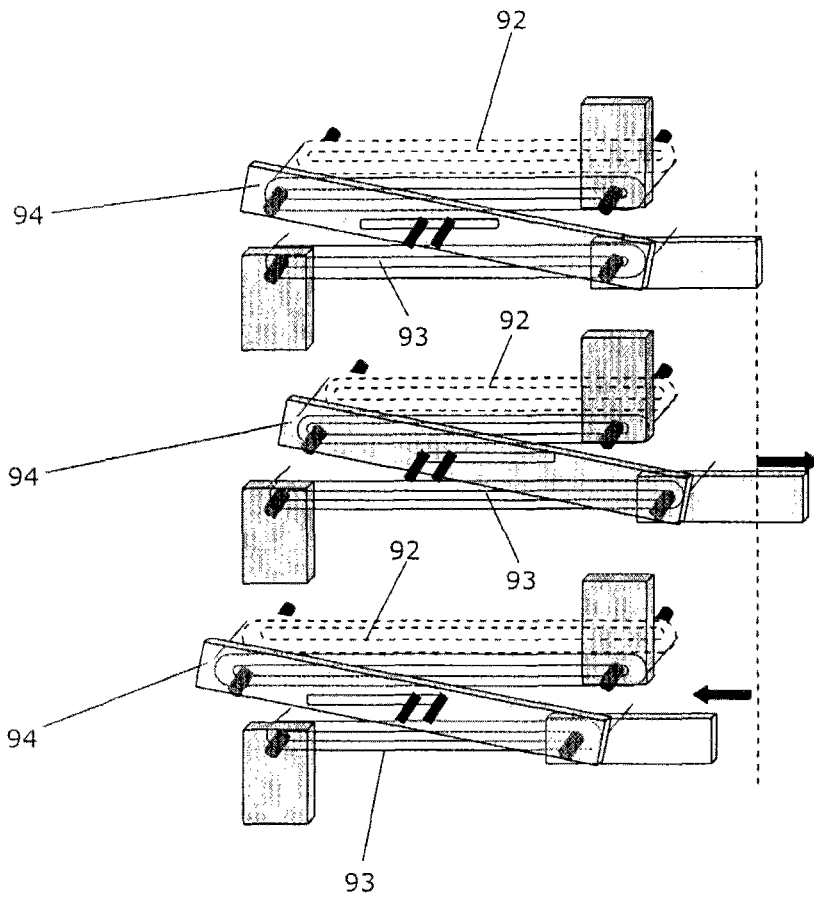


图 21b

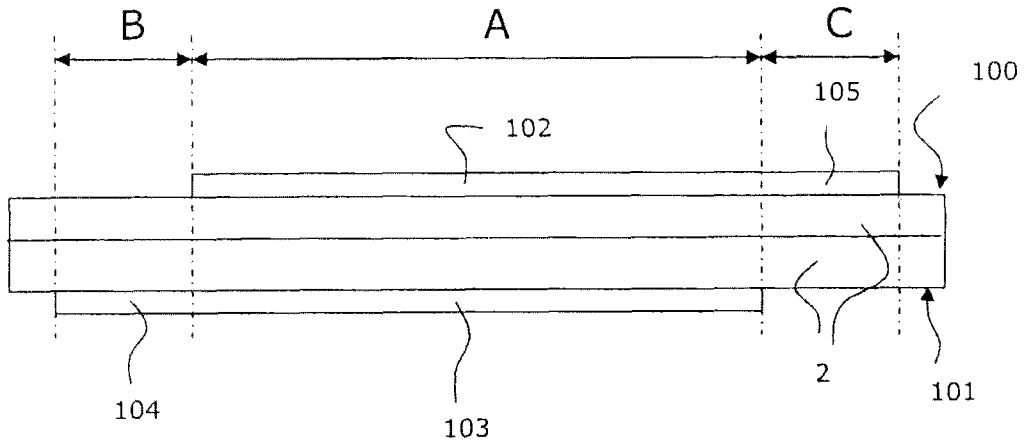


图 22

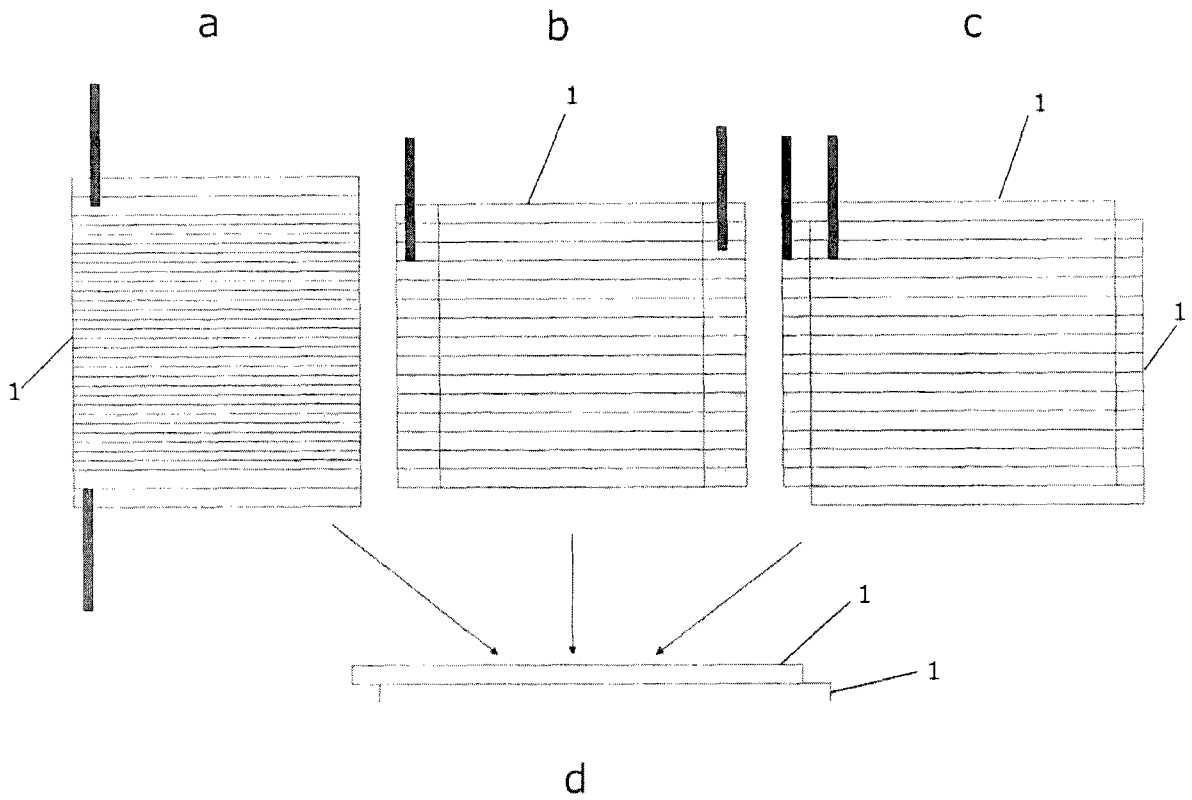


图 23

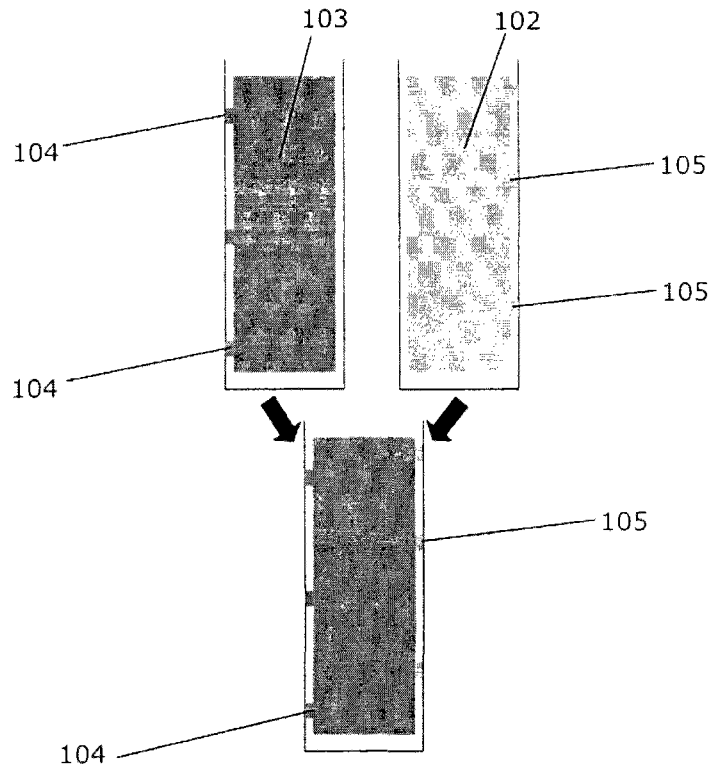


图 24

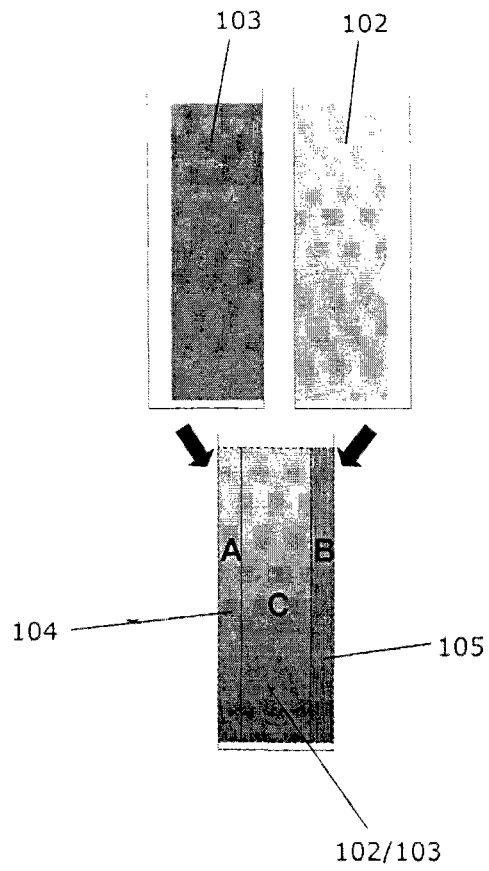


图 25

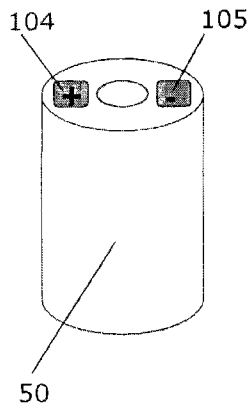


图 26

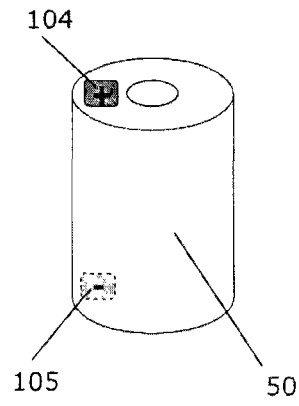


图 27

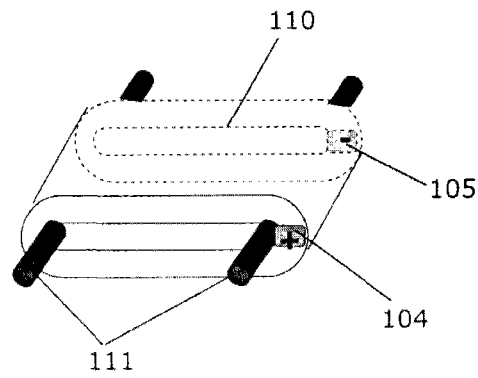


图 28

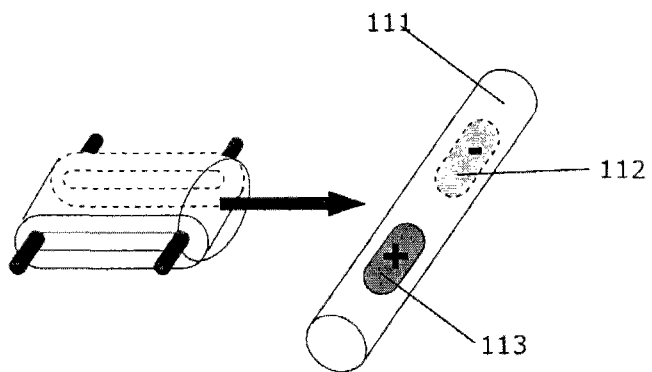


图 29

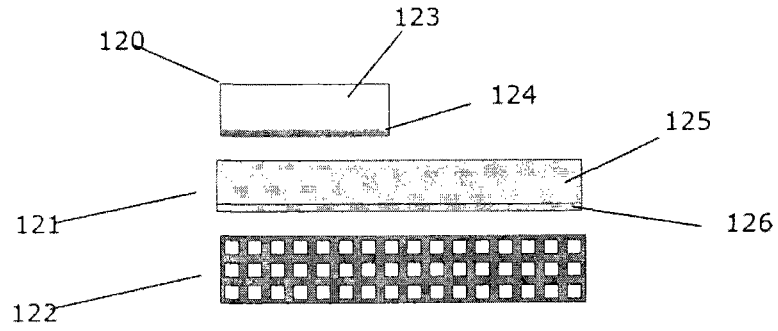


图 30

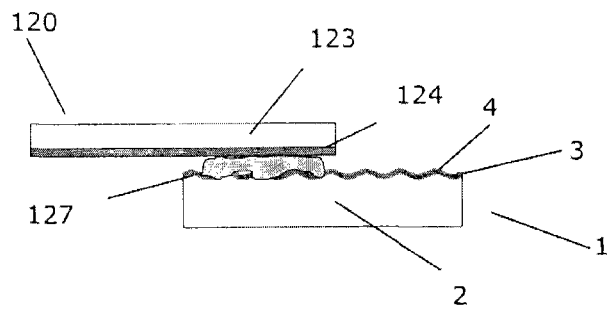


图 31

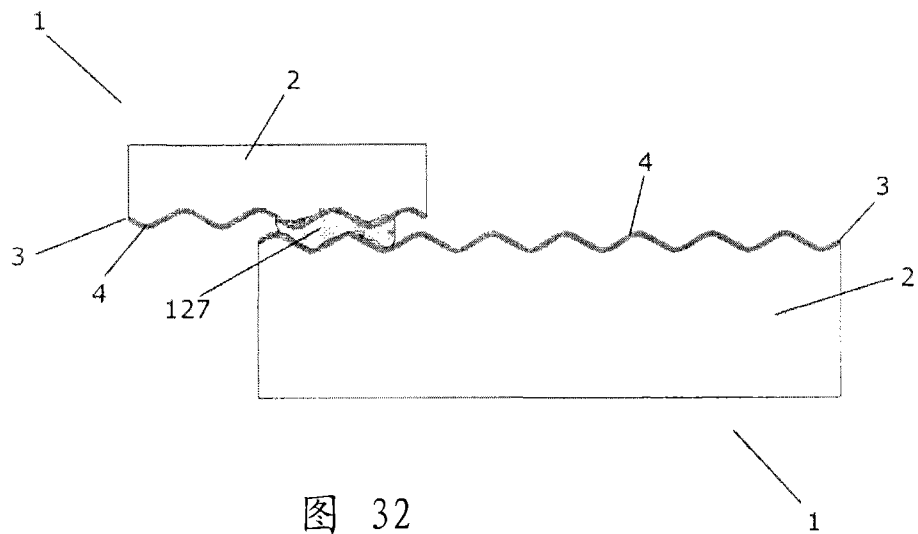


图 32

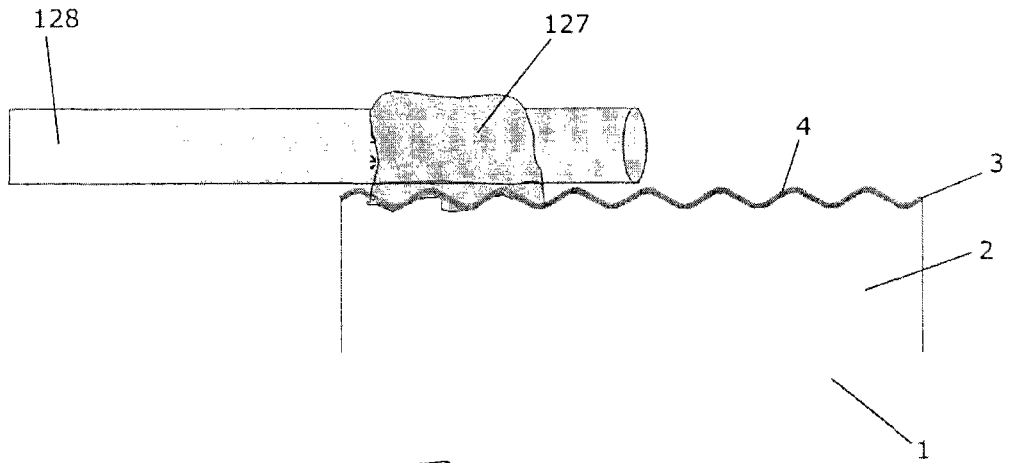


图 33

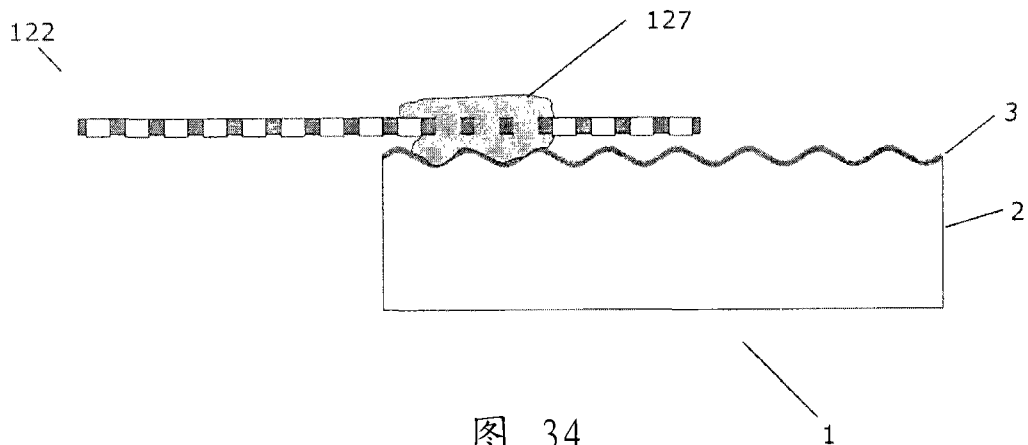


图 34

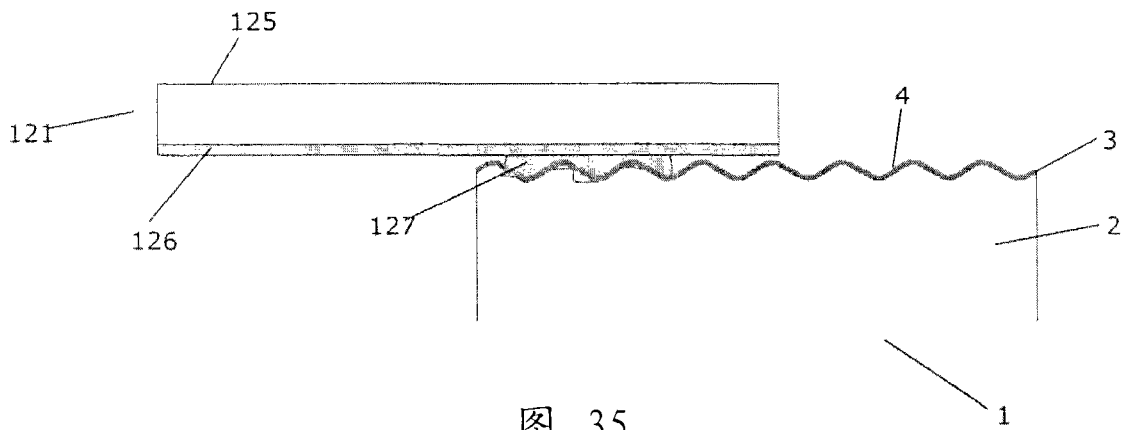


图 35

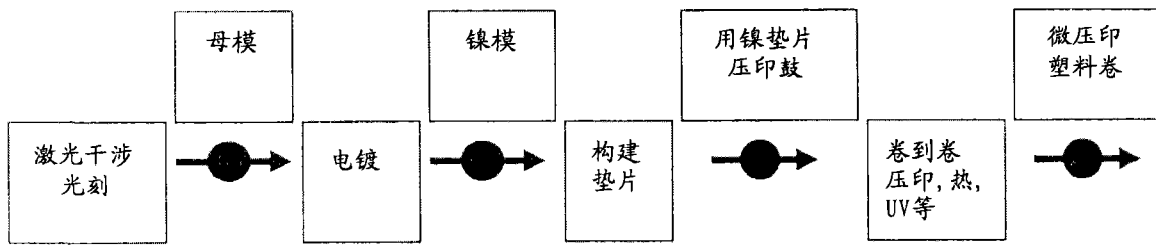


图 36a

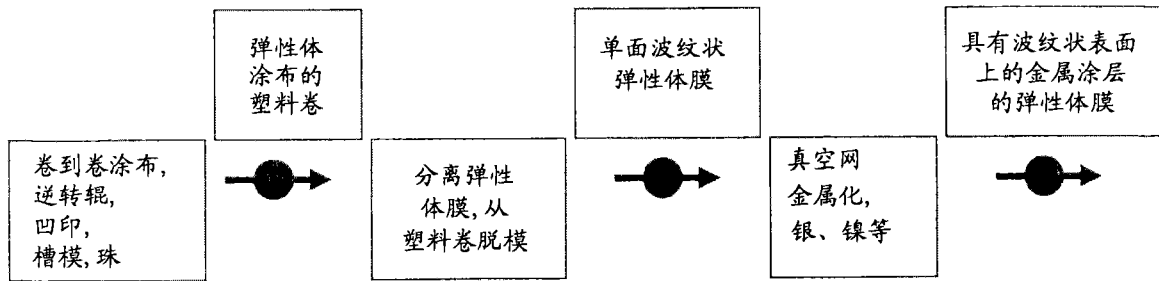


图 36b

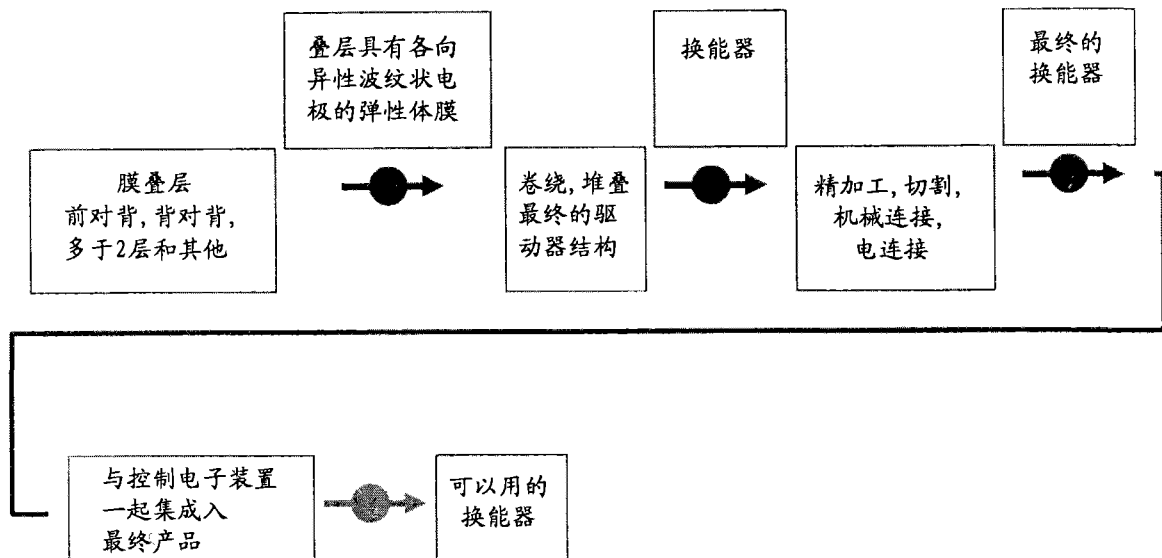


图 36c