

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.
G01F 1/34 (2006.01)



[12] 实用新型专利说明书

专利号 ZL 200420012709.5

[45] 授权公告日 2006 年 1 月 18 日

[11] 授权公告号 CN 2752730Y

[22] 申请日 2004.11.10

[21] 申请号 200420012709.5

[73] 专利权人 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

地址 130031 吉林省长春市东南湖大路 16 号

[72] 设计人 贾宏光 吴一辉 胡友旺

[74] 专利代理机构 长春科宇专利代理有限责任公司

代理人 梁爱荣

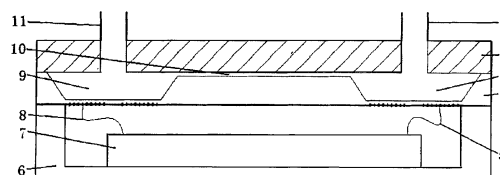
权利要求书 2 页 说明书 12 页 附图 3 页

[54] 实用新型名称

柔性平板波压差式微流量传感器

[57] 摘要

本实用新型属于微机电系统领域，涉及微流量测量的传感器。包括：入口 1、上盖 2、微腔体一 3、主体 4、导线一 5、支架 6、信号处理模块 7、导线二 8、微腔体二 9、微管道 10、出口 11。用柔性平板波提高灵敏度；用薄膜内应力测量动态范围大，提高动态范围；用双力传感器，解决背压影响和温度补偿；用非加热法实现生物兼容性；利用应力响应快提高响应速度；无运动部件，降低加工难度，提高成品率；两力传感器相隔远，无干扰，提高测量准确性。



1、柔性平板波压差式微流量传感器，包括：入口（1）、导线一（5）、支架（6）、信号处理模块（7）、导线二（8）和出口（11），从导线一（5）和导线二（8）中引出到信号处理模块（7）中，信号处理模块（7）固定于支架（6）上，其特征在于还包括：上盖（2）、微腔体一（3）、主体（4）、微腔体二（9）和微管道（10），入口（1）和出口（11）分别与上盖（2）上的通孔一（12）和通孔二（13）对准，使入口（1）和出口（11）分别固定于上盖（2）的一面上；上盖（2）与主体（4）的四周对齐，上盖（2）的另一面与主体（4）的A面固定分别形成微腔体一（3）、微腔体二（9）和连通微腔体一（3）、微腔体二（9）的微管道（10）；主体（4）的B面固定在支架（6）上，信号处理模块（7）和主体（4）之间有空隙。

2、根据权利要求1所述的柔性平板波压差式微流量传感器，其特征在于：上盖（2）包括：通孔一（12）和通孔二（13），在上盖（2）本体上制备有通孔一（12）和通孔二（13）；通孔一（12）和通孔二（13）各自的两个端口形状采用圆形或矩形等形状，当端口的形状采用圆形时，通孔一（12）和通孔二（13）采用圆形孔或圆台形孔；当端口的形状采用矩形时，通孔一（12）和通孔二（13）采用锥台形孔或矩形孔。

3、根据权利要求1所述的柔性平板波压差式微流量传感器，其特征在于：主体（4）的A面包括：薄膜一（14）、凹坑一（15）、微细沟道（16）、薄膜二（17）和凹坑二（18），微细沟道（16）呈中心对称分布在主体（4）上，且微细沟道（16）的中心与主体（4）的中心重合，在主体（4）的本体上对称分布有凹坑一（15）和凹坑二（18），在凹坑一（15）和凹坑二

(18)的底部有薄膜一(14)和薄膜二(17),凹坑一(15)和凹坑二(18)四周的侧壁分别与薄膜一(14)和薄膜二(17)组成一体。

4、根据权利要求1所述的柔性平板波压差式微流量传感器,其特征在于:主体(4)的B面包括:导电地层(19)、激励层(20)、叉指换能器一(21)、叉指换能器二(22)、叉指换能器三(23)、叉指换能器四(24),导电地层(19)的一面紧密固定在主体(4)的B面上,导电地层(19)的另一面紧密固定在激励层(20)的一面上;在激励层(20)的另一面上紧密固定叉指换能器一(21)、叉指换能器二(22)、叉指换能器三(23)、叉指换能器四(24),叉指换能器一(21)和叉指换能器四(24)两者平行且对称分布于激励层(20)的另一面上,叉指换能器二(22)和叉指换能器三(23)两者平行且对称分布于激励层(20)的另一面上。

5、根据权利要求1所述的柔性平板波压差式微流量传感器,其特征在于:微管道(10)横截面的形状采用三角形或等腰梯形或矩形形状;微管道(10)的整体形状采用直线形状或蛇形形状;单位时间内流过微管道(10)的流体体积Q为:

$$Q = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \text{其中: } a = \rho \sum_{i=1}^n \zeta_i / S^2, \quad b = \frac{c\mu l}{D_h S}, \quad c = -2\Delta p。$$

柔性平板波压差式微流量传感器

技术领域：

本实用新型属于微机电系统领域，涉及微流量测量的传感器。

背景技术：

微流量传感是目前各种微流体系统（蛋白质分析、基因检测、微生物检测、定量药物释放）定量输出的核心问题之一。微小流量的检测技术不仅是决定这些微流体系统实际运行性能的关键因素，也是相关微流体科学问题（如微小管道内流体的流动特性、粘滞阻力等）研究的前提条件之一。一种具有高灵敏度、大动态范围的微小流量传感技术能使微流体系统具有更加精确的分析及定量能力，扩展其应用范围，同时，也能够使与之相关的科学问题的研究更加深入，使结果具有更高的可信度。

在各种微流体系统蓬勃发展的带动下，国内外相应开展了许多微流量的测试方法，按测试原理归纳起来，可以分为两类：非热流式微流量测量技术和热流式微流量测量技术。

非热流式微流量技术包括压阻压差式流量传感器、电容压差式流量传感器、拖曳力流量传感器、抬升力流量传感器等，它们的基本工作原理都是通过测量微量应变将流体场内某些点的压力值或速度值转化为电信号，来达到检测流量的目的。压阻压差式流量传感器和电容压差式流量传感器是通过应变测得流体流动时微细管道两端会因为管道内部及入口处的压力损失而产生的压力差值，来推算得到管道内流体流量的值；拖曳力流量传感器利用测试流体流动时对通道内垂直障碍物（比如一根小的立柱）产

生拖曳力的值也可以测得流量值；而与测试拖曳力相反，抬升力流量传感器通过测试与流动方向相同的翼状结构所受流体的抬升力也可以计算出流量的大小。以上这几种检测方法都是将流量的变化转变成薄膜或微小悬臂梁等结构的形变，再通过压阻效应或电容变化转换电信号来进行测量。

虽然非热流式微流量传感器不需要对被测流体进行加热，具有良好的生物兼容性，但是由于此类传感器采用应变敏感检测方式，而其应变的范围小，这就决定了此类传感器的动态范围小；又由于压阻式和电容式应变测量的灵敏度不高，这也限制了传感器的灵敏度；另外，此类传感器微结构工艺相对复杂；并且由于物质的弹性模量和电阻值与温度密切相关，所以绝大多数都需要温度补偿。

热流式微流量测量技术包括热线（或热薄膜）流量传感器、卡路里型流量传感器等，其主要工作原理是：流过微细管道的流体能带走置于管道侧壁的加热器上的热量，通过控制管道中加热器的加热功率不变而测试其温度变化，或为维持加热器温度不变而随流量的变化改变加热功率，均可以推算出流体的流量值，或将加热器和温度探测器分置于管道的上下游而通过测量两者之间的温差来推算出流体的流量值。

虽然此类传感器具有制作工艺相对简单、温度检测方法成熟的优点，但是与宏观流体系统不同的是，微细管道中流体的层流特性十分明显，微细管道中热量传播主要形式是以扩散，对流所起的作用十分微弱，这使流体的温度均匀性差，增大了温度检测的随机性，不利于传感器灵敏度的提高；其次由于微流量传感器加热会影响到被测量流体的生物活性，所以这不但影响了此类传感器的生物兼容性，还限制了被测流体的最高加热温

度，甚至不允许加热，从而限制了微流量传感器的测量动态范围；再次，由于热流式微流量测量技术通过温度测量流量，故而均需要温度补偿；最后，由于流体的热量平衡需要时间，所以传感器的响应速度较慢。

本实用新型的详细内容：为了解决背景技术中灵敏度、动态范围不高和需要温度补偿、热流式微流量传感器的生物兼容性不好和响应速度较慢、非热流式微流量传感器微结构工艺相对复杂、流体背压对传感器测试精度的影响等问题，本实用新型的目的是将要提供一种基于柔性平板波压力测量的压差式微流量传感器及其制作方法。

本实用新型柔性平板波压差式微流量传感器包括：入口、上盖、微腔体一、主体、导线一、支架、信号处理模块、导线二、微腔体二、微管道、出口。入口和出口分别与通孔一和通孔二对准，使入口和出口分别固定于上盖上；上盖的四周与主体的四周对准固定分别形成微腔体一、微腔体二和连通微腔体一、微腔体二的微管道；主体对准固定在支架上，从导线一和导线二中引出信号到信号处理模块中，信号处理模块固定于支架上，信号处理模块和主体之间有空隙。

上盖包括：通孔一和通孔二，在上盖本体上制备有通孔一和通孔二。

通孔一和通孔二各自的两个端口形状采用圆形或矩形等形状，当端口的形状采用圆形时，通孔一和通孔二采用圆形孔或圆台形孔；当端口的形状采用矩形时，通孔一和通孔二采用锥台形孔或矩形孔。

主体的A面包括：薄膜一、凹坑一、微细沟道、薄膜二和凹坑二，微细沟道呈中心对称且其中心与主体的中心重合，凹坑一和凹坑二以中心对称分布在主体里，在凹坑一和凹坑二的底部有薄膜一和薄膜二，凹坑一和

凹坑二四周的侧壁分别与薄膜一和薄膜二组成一体。

主体的B面包括：导电地层、激励层、叉指换能器一、叉指换能器二、叉指换能器三、叉指换能器四，导电地层的一面紧密固定在主体的B面上，导电地层的另一面和激励层的一面紧密固定；在激励层的另一面上紧密固定有叉指换能器一、叉指换能器二、叉指换能器三、叉指换能器四。

叉指换能器一和叉指换能器四两者平行且对称分布于激励层的另一面上，叉指换能器二和叉指换能器三两者平行且对称分布于激励层的另一面上。

微管道的横截面的形状采用三角形或等腰梯形或矩形形状。

微管道的整体形状采用直线形状或蛇行形状。

经过理论计算， Q 为单位时间内流过微管道的流体的体积，其表达式为：

$$Q = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$\text{其中： } a = \rho \sum_{j=1}^n \zeta_j / S^2, \quad b = \frac{c\mu l}{D_h S}, \quad c = -2\Delta p。$$

上式中： ρ 为流体的密度； ζ_j 局部损失系数，是一个无量纲数， ζ_j 数值大小主要由微管道的几何形状和尺寸决定，同时也受流体流动特性的影响，因此也是管流雷诺数的函数； n 为流体流经本实用新型传感器时经过的形状变化和弯折的次数； S 为微管道的横截面面积； c 为常数，其具体数值与截面形状有关； μ 为流体的粘度； l 为微管道的长度； D_h 为微管道的水力直径； Δp 为微管道两端的压力差。

本实用新型柔性平板波压差式微流量传感器的工作原理：

本实用新型包含两个柔性平板波力传感器。由叉指换能器一、叉指换能器二、薄膜二和位于它们中间的导电地层及激励层组成第一个柔性平板波力传感器；由叉指换能器三、叉指换能器四、薄膜一和位于它们中间的导电地层及激励层组成第二个柔性平板波力传感器。

当本实用新型的流量传感器工作时：信号处理模块发出交变电压信号驱动叉指换能器一、叉指换能器三，使叉指换能器一、叉指换能器三与导电地层之间的电压差呈周期性交流变化，交流变化的电压使激励层产生周期性伸缩振动，从而在激励层上形成了柔性平板波，柔性平板波的波动在薄膜一和薄膜二上传播，当波动信号分别传播到叉指换能器二和叉指换能器四上时，在叉指换能器二和叉指换能器四中形成电信号并将电信号送给信号处理模块进行信号处理来得到薄膜一和薄膜二内应力。由于薄膜一和薄膜二中的内应力与微腔体一、微腔体二中流体的压力有关，这样我们可以通过第一个柔性平板波力传感器和第二个柔性平板波力传感器来分别测量微腔体一和微腔体二中的流体压力。

当流量传感器工作时，微腔体一、微腔体二和微管道内均充满了流体，流体通过入口进入微腔体一，经过微管道流向另一个微腔体二，由出口流出本实用新型流量传感器。由于流体有粘性，所以当经过微管道时，流体必然受到来自微管道侧壁的粘滞阻力；粘滞阻力的大小与微管道的几何尺寸、流体本身的特性以及流体与微管道的相对流动速度有关，故在粘滞阻力的影响下，当本实用新型工作时在微腔体一和微腔体二之间有一定的压力差来驱动流体顺利流动。所以本实用新型通过用两个柔性平板波力传感器来分别测量微腔体一和微腔体二中流体的压力得到压力差，进而得到流

体在微管道中的流动速度，最终得到流体在某时间段的流量，实现流体的微流量测量。

本实用新型的优点：本实用新型利用的柔性平板波是一种机械波，它只在厚度比其波长小的薄膜上传播并且具有多种传播模态。由于零阶非对称模态（即 A_0 模）柔性平板波在液体中的传播速度小于声波在液体中的传播速度， A_0 模柔性平板波在液体中的衰减很小，而 A_0 模柔性平板波在气体的传播更加微弱，所以 A_0 模柔性平板波适合于关于流体特性的测量；又由于柔性平板波，特别是其 A_0 模对传播薄膜的内应力和薄膜质量极其敏感；所以，利用 A_0 模柔性平板波作为传感媒介的柔性平板波力传感器被用于流体特性的测量。在柔性平板波力传感器中，当有柔性平板波在薄膜上传播时，由于薄膜两侧压力差变化而导致其内应力变化时，薄膜上的柔性平板波的波动特性也会发生变化（如共振频率将会发生偏移等），则可以通过测定柔性平板波波动特性的变化来算出薄膜内应力的变化。由于采用高灵敏度、高动态范围的频率计量方式来测量共振频率的偏移，所以本实用新型的柔性平板波力传感器具有很高的灵敏度和动态范围。

①本实用新型采用柔性平板波为探测媒介，利用其高灵敏度解决了背景技术中的流量传感器的灵敏度低的问题；②本实用新型采用测量薄膜内应力的方式得到流体的压力，利用薄膜内应力的测量动态范围大（可达 40-50dB）的优点，使本实用新型传感器具有大的动态范围；③本实用新型采用双柔性平板波力传感器的探测方法，不但克服了流体背压对传感器测试精度的影响，而且实现了很好的温度补偿，有效地消除温度变化对测量结果产生的误差；④本实用新型采用非加热式探测方法，避免了加

热对被测流体生物活性的影响，实现了良好的生物兼容性；⑤本实用新型采用薄膜内应力的测量方式，利用应力变化的响应速度快的优点，提高了传感器的响应速度；⑥本实用新型采用柔性平板波来探测，没有运动部件，降低了微流量传感单元本身的加工难度，实现了成品率的提高；⑦由于本实用新型采用的两组叉指换能器相隔较远，而且由于薄膜一和薄膜二之间主体的厚度比薄膜的厚度要大许多且超过波动的波长，使得柔性平板波不能在主体上传播，两组叉指换能器之间没有相互干扰，故两个柔性平板波力传感器之间没有干扰，因此提高了本实用新型微流量测量的准确性。

附图说明：

图 1 是本实用新型结构示意图；

图 2 是本实用新型上盖 2 结构示意图；

图 3 是本实用新型主体 4 的 A 面的结构示意图；

图 4 是本实用新型主体 4 的 B 面的结构示意图；

图 5 是本实用新型微管道 10 为直线形状时微细沟道 16 的结构示意图；

图 6 图 7 是本实用新型微管道 10 为蛇形形状时微细沟道 16 的结构示意图。

具体实施方式：

本实用新型柔性平板波压差式微流量传感器如附图 1、图 2、图 3、图 4、图 5、图 6、图 7 所示，包括：入口 1、上盖 2、微腔体一 3、主体 4、导线一 5、支架 6、信号处理模块 7、导线二 8、微腔体二 9、微管道

10、出口 11。

入口 1 和出口 11 采用普通细胶管,用 502 胶或高性能结构 AB 胶等粘合剂对准紧密固定在上盖 2 上;另外,当本实用新型流量传感器与外部微流体系统集成时,入口 1 和出口 11 的材料采用硅或聚二甲基硅氧烷(PDMS)等材料。

如图 2 所示:上盖 2 采用硅片或玻璃或有机玻璃等硬质材料,通孔一 12 和通孔二 13 对称或不对称分布于上盖 2 上。

当上盖 2 采用硅片时,通孔一 12 和通孔二 13 端口的形状采用圆形或矩形等形状:

(1)当通孔一 12 和通孔二 13 的端口形状采用圆形时:通孔一 12 和通孔二 13 可采用圆形孔或圆台形孔;

(2)当通孔一 12 和通孔二 13 的端口形状采用矩形时:通孔一 12 和通孔二 13 采用锥台形孔或矩形孔;当采用锥台形时其两端面由两个不同尺寸且形状相似的矩形构成锥台形孔;当采用矩形孔时其两端面由两个相同形状和尺寸的矩形构成矩形孔。

当上盖 2 的坯体选用硅时,本实用新型上盖的制备方法步骤是:

- a. 首先对上盖坯体进行氧化,在上盖坯体上形成二氧化硅层;
- b. 对步骤 a 中有二氧化硅层的上盖坯体上进行涂胶、光刻在上盖坯体上形成带图形的光刻胶层;
- c. 对步骤 b 中有带图形光刻胶层的上盖坯体用氢氟酸腐蚀未被光刻胶掩盖保护的二氧化硅层并去胶,在上盖坯体上形成带图形的二氧化硅层;

d. 对步骤 c 中利用电感耦合等离子刻蚀 (ICP) 得到圆形柱状或矩形柱状的通孔一 12 和通孔二 13, 则完成上盖 2 的制作; 或利用湿法腐蚀工艺制作通孔一 12 和通孔二 13 得到锥台形孔或圆台形孔, 则完成上盖 2 的制作;

当上盖 2 的材料采用玻璃或有机玻璃时, 本实用新型上盖的制备方法步骤是: 将上盖坯体可通过钻孔等机械加工的方式制作得到圆形柱状通孔一 12 和通孔二 13。

主体 4 的 A 面结构如图 3 所示, 包括: 主体 4、薄膜一 14、凹坑一 15、微细沟道 16、薄膜二 17、凹坑二 18。主体 4 的坯体材料采用硅片, 硅片的晶向为 (100)。

主体 4 的制造工艺为:

e. 首先将主体坯体的 A 面和 B 面氧化形成二氧化硅层;

f. 对步骤 e 中主体坯体的 A 面上的二氧化硅层进行涂胶、光刻在主体坯体 A 面上形成;

g. 对步骤 f 中带光刻胶层的主体坯体 A 面用氢氟酸腐蚀未被光刻胶掩盖保护的二氧化硅层并去胶, 在主体坯体 A 面上形成带图形的二氧化硅层 (在此腐蚀过程中, 注意不能让氢氟酸损坏主体坯体 B 面的二氧化硅层), 去胶得到主体坯体 A 面有二氧化硅层作为掩模的主体坯体;

h. 对步骤 g 中有掩模的主体坯体进行强碱溶液 (如氢氧化钾溶液或氢氧化钠等) 第一次湿法腐蚀得到带有两个腐蚀坑的主体坯体, 腐蚀坑的深度比凹坑一 15 和凹坑二 18 的深度小 $15\ \mu\text{m}$ 或 $50\ \mu\text{m}$ 或 $60\ \mu\text{m}$ 或 $70\ \mu\text{m}$ 或 $80\ \mu\text{m}$ 或 $90\ \mu\text{m}$ 或 $100\ \mu\text{m}$ 或 $150\ \mu\text{m}$, 腐蚀坑的深度可以由湿法腐蚀

的时间来控制；当微管道 10 的横截面采用三角形形状时，则对步骤 g 中有掩模的主体坯体进行强碱溶液的第一次湿法腐蚀得到微细沟道 16；

i. 对步骤 h 中带有腐蚀坑的主体坯体的 B 面溅射或蒸发导电地层 19，导电地层 19 是一层金属，导电地层 19 一般为铝、金、铜等；

j. 对步骤 I 在主体坯体 B 面的导电地层 19 上溅射激励层 20，激励层 20 为压电陶瓷，一般为氮化铝 (AlN)、钛锆酸铅 (PZT)、氧化锌 (ZnO) 等，

k. 对步骤 j 在激励层 20 上溅射或蒸发金属层，一般为铝、金、铜等，然后在金属层上涂胶、光刻、腐蚀金属层得到叉指换能器一 21、叉指换能器二 22、叉指换能器三 23、叉指换能器四 24；或对步骤 j 用剥离工艺 (Liftoff)，即在激励层 20 上涂胶、光刻，再溅射或蒸发金属层，最后去胶剥离留下仍粘附在激励层 20 上的金属层得到叉指换能器一 21、叉指换能器二 22、叉指换能器三 23、叉指换能器四 24；注意：腐蚀坑的主体坯体的 B 面清洗洁净，否则导电地层 19、激励层 20 和叉指换能器一 21、叉指换能器二 22、叉指换能器三 23、叉指换能器四 24 粘附不牢固，导致传感器不能正常工作；

当微管道 10 的横截面采用等腰梯形形状时，对步骤 j 在主体坯体的 A 面进行涂胶、光刻、氢氟酸腐蚀未被光刻胶掩盖的二氧化硅得到带有腐蚀坑和二氧化硅掩模的主体坯体；

l. 对步骤 k 中带有叉指换能器一 21、叉指换能器二 22、叉指换能器三 23、叉指换能器四 24 的主体坯体放入强碱溶液中进行第二次湿法腐蚀，使得薄膜一 14 和薄膜二 18 的厚度达到要求值 ($3\mu\text{m}$ 或 $5\mu\text{m}$ 或 $10\mu\text{m}$ 或

15 或 $20\ \mu\text{m}$ 或 $25\ \mu\text{m}$), 其中薄膜一 14 和薄膜二 18 的厚度由湿法腐蚀的时间来控制, 最后得到主体 4。当微管道 10 的横截面采用等腰梯形形状时, 对步骤 k 进行第二次湿法腐蚀得到微细沟道 16; 注意: 在对带有叉指换能器一 21、叉指换能器二 22、叉指换能器三 23、叉指换能器四 24 的主体坯体进行第二次湿法腐蚀时, 一定要对主体坯体 B 面的图形进行完好地保护, 确保 B 面结构不会被强碱腐蚀。其二, 导线一 5、导线二 8 和由导电地层 19 引向信号处理模块的导线应彼此绝缘;

上盖 2 和主体 4 的键合:

(1) 当采用硅片时, 则有两种键合方案:

其一是: 通过硅硅键合工艺直接将上盖 2 和主体 4 键合在一起。

其二是: 先将制好的上盖 2 再通过硅高温氧化工艺氧化使其表面有一层二氧化硅, 再通过阳极键合工艺实现上盖 2 和主体 4 的键合。

(2) 当上盖 2 采用玻璃, 则通过阳极键合工艺键合上盖 2 和主体 4。

(3) 当上盖 2 采用有机玻璃, 则用 502 胶或高性能结构 AB 胶等粘合剂将上盖 2 和主体 4 两个部件粘在一起。粘接时切实注意不要让粘合剂流到微腔体一 3、微腔体二 9 和微管道 10 上, 以免发生堵塞, 阻止流体流动、使传感器不能工作。

主体 4 的 A 面与上盖 2 对准紧密键合后, 形成微腔体一 3、微腔体二 9 和微管道 10。微管道 10 的横截面的形状采用矩形、三角形、等腰梯形等形状。

上盖 2 和主体 4 之间的键合必须相当紧密并且有一定的强度, 以确保上盖 2 和主体 4 的四周没有任何缝隙且不会在微腔体一 3、微腔体二 9 和

微管道 10 内有一定流体内压力时流体从键合面流出。当主体 4 和上盖 2 键合完成后，分别从叉指换能器一 21 与叉指换能器二 22、叉指换能器三 23 与叉指换能器四 24 本体的上下两侧的电极处引出两组导线，这两组导线的另一端接入信号处理模块 7；另外，导电地层 9 有一根接地导线引向信号处理模块 7，这样就形成了导线一 5（包括从叉指换能器一 21 与叉指换能器二 22 引出的四根导线和一根接地导线）和导线二 8（包括从叉指换能器三 23 与叉指换能器四 24 引出的四根导线）；然后将主体 4 的 B 面对准夹紧固定在支架 6 上。信号处理模块 7 对准夹紧固定在支架 6 凹槽的底部。信号处理模块 7 根据需要自制。信号处理模块 7 和主体 4 的 B 面之间的空隙可选择 0.1cm 或 1cm 或 3cm 或 5cm 或 10cm 或 15 cm 或 20cm。

微管道的整体形状采用如图 5 所示的直线形状或如图 6、图 7 中所示等蛇行形状。

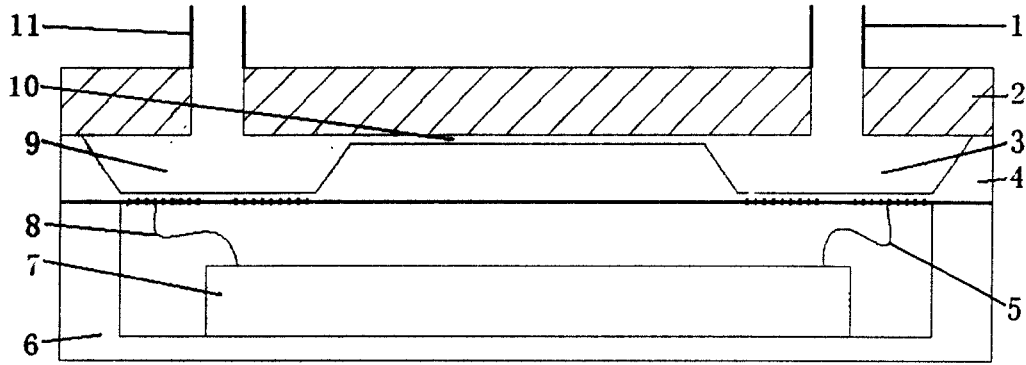


图 1

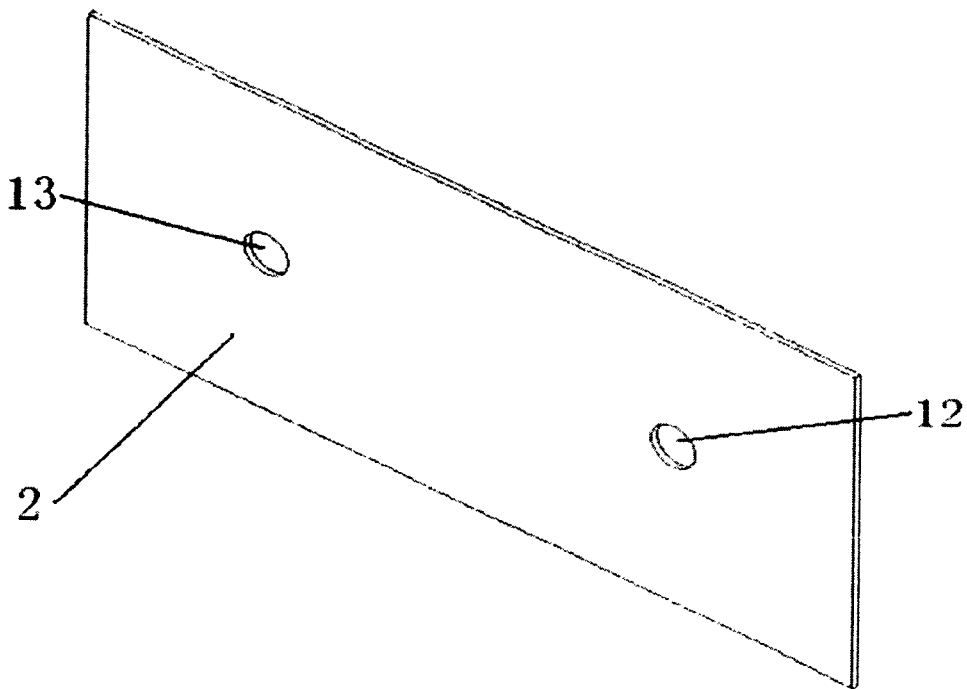


图 2

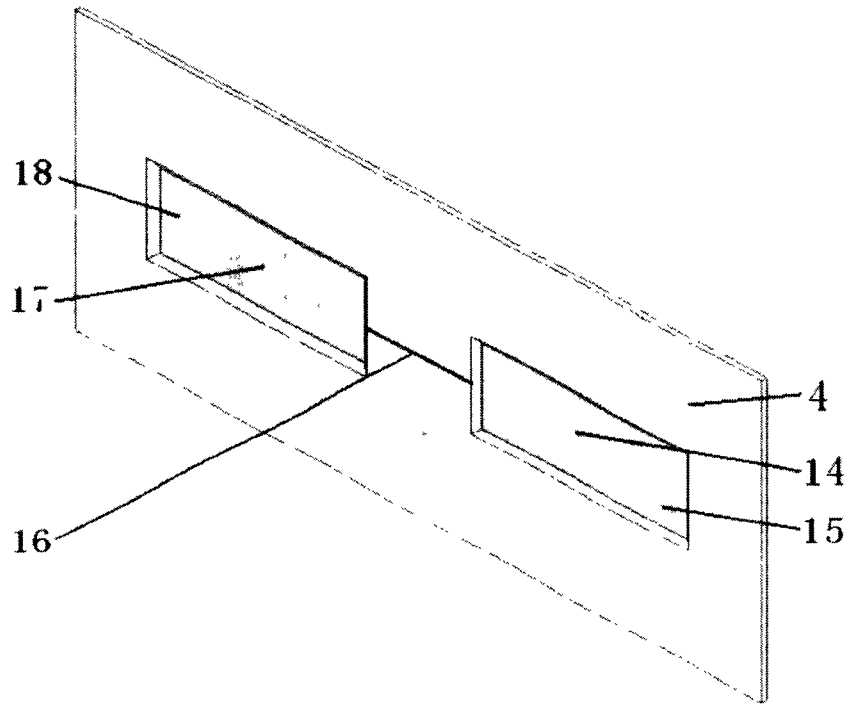


图 3

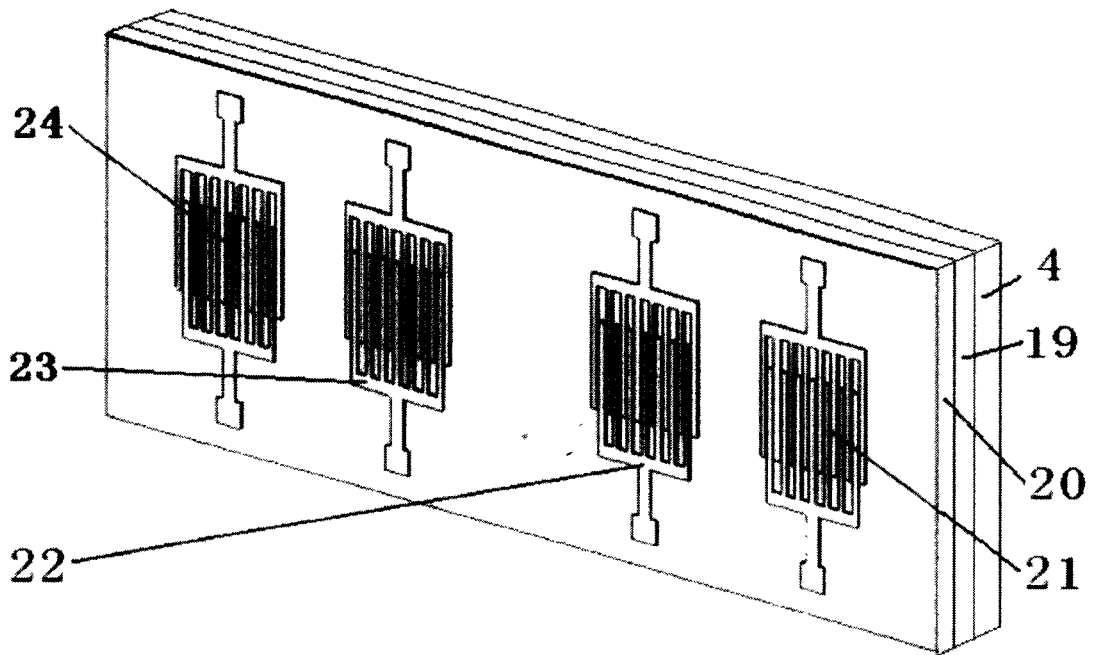


图 4

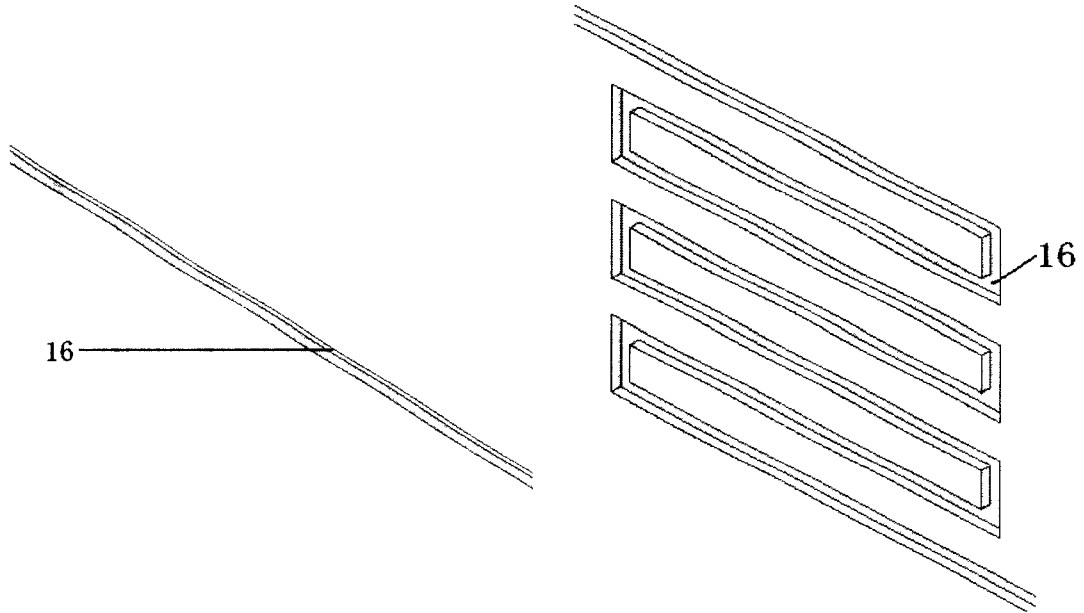


图 5

图 6

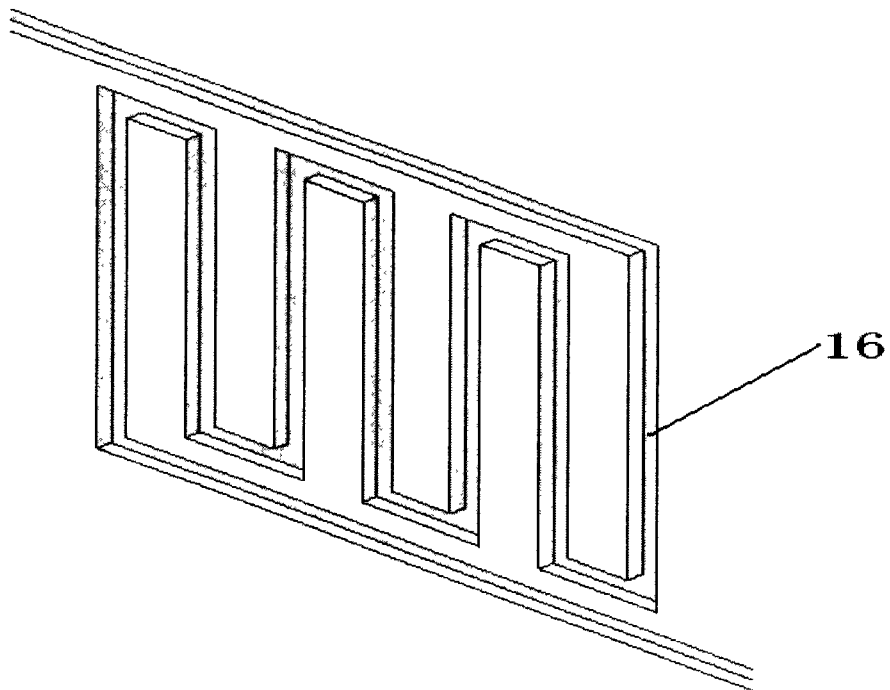


图 7