[19]中华人民共和国国家知识产权局

[51]Int.Cl[7]
F02G 1/043

[12]发明专利说明书

[21] ZL 专利号 94102797.X

[45]授权公告日 2000 年 1 月 5 日

[11]授权公告号 CN 1048072C

[22]申请日 1994.2.11 [24]颁证日 1999.10.9
[21]申请号 94102797.X
[30]优先权
[32]1993.2.12 [33]US [31]08/017,265
[73]专利权人 俄亥俄州立大学
地址 美国俄亥俄州
[72]发明人 林·鲍曼 大卫·M·贝科韦兹
伊斯雷尔·乌列里
[56]参考文献

EP0505039	1992. 9.23	F25B9/14
US3822388	1974. 7. 2	F02B1/043
US4404802	1983. 9.20	F02G1/043
US4802332	1989. 2. 7	F16J1/08

审查员 23 14

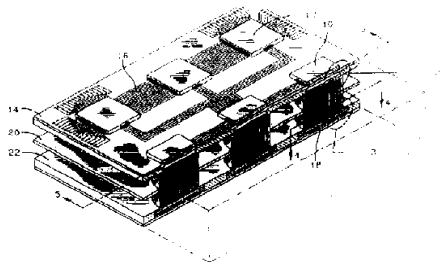
[74]专利代理机构 上海专利商标事务所
代理人 郑 立

权利要求书 6 页 说明书 18 页 附图页数 10 页

[54]发明名称 斯特林循环热机换能器

[57]摘要

利用半导体平面处理工艺制成的斯特林循环热机换能器。这种斯特林热机换能 器有硅的端板和中间回热器。端板上形成膜片和返回区,有一形成膨胀端的端板,其相对端板形成压缩端,在其间连有回热器。在膜上连有控制电路设备,用来控制其偏移的幅值、频率和相位。控制电路设备适合于使换能器在 500 赫 以上运行,还有通路和工作区,包括在回热器、膨胀区和压缩区内,它们足够 窄,以便提供一在 500 赫以上的运行频率下低于 5 的特征沃耳莫斯里数,它 表征在工作区内的工作流体的振动流发生的不可逆性。此外,膜振动的振幅足 够小,以便在 500 赫以上的运行频率下提供工作流体大约低于 0.1 的最大 马赫数。



ISSN1008-4274

权 利 要 求 书

1.一种改进的斯特林循环热机换能器，具有:

（ A ）一个压力保持容器，确定了一个封闭的工作区，其包括流体通路并含有可压缩和可膨胀的流体，该压力容器包括:

（ a ）一个热接收、流体膨胀端，具有:

（ I ）膨胀区;

（ II ）远离膨胀区的返回区;

（ III ）扰性的膨胀膜，其形成膨胀区和返回区之间的壁；以及

（ IV ）热接收、接收、热交换器，其最接近地连接着膨胀区;以及

（ b ）一个热驱出、流体压缩端，其具有:

（ I ）压缩区;

（ II ）远离压缩区的返回区;

（ III ）扰性的压缩膜，其形成压缩区和返回区之间的壁；以及

（ IV ）热驱出、热交换器，其最接受地连接着压缩区；以及

（ c ）安置在所述端部之间的回热器，其包括多孔的基体，用来使膨胀区和压缩区的流体流通；以及

（ B ）与膜连接的控制电路装置，用来控制膜偏移的方式、幅值、相位和频率，所述膜周期地形变，从而提供膨胀区和压缩区容积周期的改变，并保持一般为 90°的膨胀区容积对压缩区容积的相位超前；其特征在于，

所述控制电路装置适合于在 500 赫以上操作换能器；以及

工作区内的通道足够窄从而提供一沃耳莫斯里数，它代表在工作区内的工作流体的扰动流产生的不可逆性，其数值低于 5，且膜振动的幅值足够小，以便提供工作流体在 500 赫以上的运行频率下的低于 0.1 的最大马赫数。

2.如权利要求 1 的换能器，其特征在于，所述压缩容器至少有一端是包括高热导率材料的整体板。

3.如权利要求 2 的换能器，其特征在于，所述压力容器的膨胀

端是包括高热导率材料的整体板，压力容器的压缩端是一包括高热导率材料的隔开的平行整体板。

4.如权利要求 3 的换能器，其特征在于，进一步包括几个所述的压力容器，其设置成平行的二维阵列，其膨胀端整体制成为一板，其压缩端也形成另一板。

5.如权利要求 2 的换能器，其特征在于，高热导率材料是硅。

6.如权利要求 5 的换能器，其特征在于，硅板包括几个层制的在一个平面内连在一起的剂蚀的硅晶片。

7.如权利要求 6 的换能器，其特征在于，所述晶片借助于硅熔键合连接。

8.如权利要求 6 的换能器，其特征在于，所述晶片借助于中间玻璃膜连接。

9.如权利要求 6 的换能器，其特征在于，所述晶片借助于中间金属膜连接。

10.如权利要求 6 的换能器，其特征在于，所述热交换器的至少一端包括至少一个所述硅晶片区，其形成有横向孔。

11.如权利要求 3 的换能器，其特征在于，整体端板和回热器被连在一起成一整体结构。

12.如权利要求 11 的换能器，其特征在于，所述端板借助于中间金属膜连接。

13.如权利要求 11 的换能器，其特征在于，所述端板借助于一中间玻璃膜与回热器相连。

14.如权利要求 11 的换能器，其特征在于，所述端板借助于阳极键合连结到回热器上。

15.如权利要求 2 或 3 或 4 的换能器，其特征在于，所述安置的回热器包括一种低热导率的材料。

16.如权利要求 15 的换能器，其特征在于，所述回热器的低热导率材料包括陶瓷。

17.如权利要求 15 的换能器，其特征在于，回热器的低热导率材料包括玻璃。

18.如权利要求 15 的换能器，其特征在于，所述回热器的多孔基体包括通过回热器沿工作流体流全长的具有连续连接孔眼的网状泡沫材料。

19.如权利要求 15 的换能器，其特征在于，回热器的多孔基体包括几个平行的、隔开的平面壁。

20.如权利要求 15 的换能器，其特征在于，回热器的多孔基体包括几个隔开的同心管.

21.如权利要求 15 的换能器，其特征在于，回热器包括一螺线形绕制的低热导率的固体膜，其内有形变凸起，以便分开它的各层。

22.如权利要求 15 的换能器，其特征在于，回热器的多孔基体包括几个平行管。

23.如权利要求 15 的换能器，其特征在于，回热器的多孔基体包括几个隔开的平行的壁，在壁间限定了几个通路，其有约大于 8 的横截面积比。

24.如权利要求 2 或 3 或 4 的换能器，其特征在于，所述膜是扁的薄片。

25.如权利要求 2 或 3 或 4 的换能器，其特征在于，所述膜具有环状波纹。

26.如权利要求 2 或 3 或 4 的换能器，其特征在于，所述膜至少有一加厚区，其形成一增加质量的凸台。

27.如权利要求 1 或 2 或 3 或 4 的换能器，其特征在于，换制电路设备包括一对机电起动器，其每个被机械地连到每个膜上。

28.如权利要求 27 的换能器，其特征在于，至少一个机电换能器包括压电材料的薄膜，其安装在膜上，用来当压电材料被电信号驱动时提供冷膜机械应力。

29.如权利要求 27 的换能器，其特征在于，至少一个机电传感器包括一对导电薄膜电极，所述电极的一个被连到一个膜上，另一电极与第一个电极隔开，并连在压力容器端，用来当电极被电信号驱动时，响应电极间的静电力对膜提供应力。

30.如权利要求 27 的换能器，其特征在于，至少一个机电传感器包括一对导电的薄膜线圈，一个线圈被连到膜上，另一个膜连到压力容器端用来当线圈被电信号驱动时，响应线圈间的电磁力对膜施加机械力。

31.如权利要求 3 的换能器，其特征在于，控制装置包括一对机电起动器，其不同的一个被机械地连到每个膜上，并且其中的电导体通过所述板连到膜起动的。

32.如权利要求 2 或 3 或 4 的换能器，其特征在于，所述的至少一个膜在热机换能器的运转频率下共振。

33.如权利要求 32 的换能器，其特征在于，与共振膜相邻的返回区形成气体弹性，其有一特性弹性常数并作用在膜上，并且其中的膜质量和弹性常数被选择使得在热机转能器的运行频率下膜产生共振。

34.如权利要求 32 的换能器，其特征在于，邻近共振膜的返回区足够大，以便具有接近零的弹性常数，并且其中共振膜的质量被选择得在热机换能器的运行频率下由硅膜本身的弹性常数共振。

35.如权利要求 32 的换能器，其特征在于，返回区形成一气体弹性体，具有一特征弹性常数，并且其中共振膜有一特征第二弹性常数被选择，使其基本上在热机运行频率下使膜共振。

36.如权利要求 2 或 3 或 4 的换能器，其特征在于，膨胀端形成一个板，且其中的控制电路装置包括一种动力装置，用来驱动至少一个膜，以便使换能器作为制冷器运行，从而降低膨胀端板的温度。

37.如权利要求 36 的换能器，其特征在于，一个电子装置被热连接在膨胀端板上，使其在电子装置中产生低温。

38.如权利要求 36 的换能器，其特征在于，电子装置被集成制造在膨胀端板内，使得在电子装置中产生低温。

39.如权利要求 36 的换能器，其特征在于电子装置制成在膜内，其热连结到膨胀端板上，使其在电子装置中产生低温。

40.如权利要求 36 的换能器，其特征在于，室的内部被热连结

到膨胀端板上，以便容纳并冷却物体。

41.如权利要求 2 或 3 或 4 的换能器，其特征在于，一个热源被热连接到膨胀端，且控制装置包括从压缩膜到负载的能量转换环节，用来使换能器作为发动机运行，驱动负载。

42.如权利要求 41 的换能器，其特征在于，所述负载是一发电机。

43.如权利要求 41 的换能器，其特征在于，所述负载是流体泵。

44.如权利要求 41 的换能器，其特征在于，一形成窗口的透明片安装在膨胀端，与膨胀膜邻近，用来使膨胀膜接收太阳辐射。

45.如权利要求 44 的换能器，其特征在于，所述透明片被仿制成透镜，把光聚焦在膜上。

46.一种构成斯特林循环热机换能器的方法，其特征在于，包括:

（ a ）对每组分开的若干斯特林换能器的压力容器的热接受端、流体膨胀端形成一协同操作的膜、返回区、膨胀区和热交换器，这些是借助于剂蚀掉硅晶片上的选择的部分实现的，然后把硅晶片在一个平面内对正并连接在一起，形成一个整个的膨胀端板;

（ b ）借助于剂蚀掉硅晶片上所选择的部分对每组分开的若干斯特林换能器的压力容器的热驱出端、流体压缩端形成一协同操作的膜、返回区、压缩区和热交换器，然后把硅晶片在一个平面内对正并连接在一起，形成一个整体的压缩端板;

（ c ）制成几个回热器，并被连接在一起，形成一整个的回热器板，每个回热器具有在回热器板的相对侧的流体开孔，开孔间隔与所述端板配套，以及

（ d ）在膨胀端板和压缩端板之间放入、对准并连接回热器板，从而形成一包括几个斯特林换能器的整体结构。

47.如权利要求 46 的方法，其特征在于，进一步包括分隔选择的几个换能器之间的整体结构，从而形成换能器阵列。

48.如权利要求 47 的方法，其特征在于，进一步包括分隔换能之间的整体结构，从而形成几个单个的换能器。

49.如权利要求 46 的方法，其特征在于，整个回热器板借助于下列步骤制成:

（ a ）制成若干基本相同的、单个的回热器;

（ b ）在一平行的、横向隔开的阵列中对正单个的回热器，以便与所述端板配套；以及

（ c ）把单个的回热器机械地连在一起，从而形成所述回热器板。

说　明　书

斯特林循环热机换能器

本发明涉及斯特林（ Stirling ）循环发动机和低温冷却器，尤其涉及一种斯特林热机换能器（ transdneers ），它被用来冷却集成电子电路到低温温度，并作为驱动微型机械的发动机。

因为在低温下各种材料呈现出优越的电子性能，已研制出多种机器，用来冷却电子设备，使得其能够在低温下运行，许多这样的制冷系统采用了斯特林循环低温冷却器。不过，这种现有的机器相当大，苯重、效率低且发出振动噪声。随着技术的发展，使得电子电路显著地微型化，因而使得大量的电子电路能被包含在相当小的容积内，而用来冷却这些电路的设备却相当大，因而增加了低温电子电路的体积和重量。因此，需要一种有效的斯特林循环低温冷却器，它可以被微型化，从而使得其尺寸和重量协调且基本上不增加电子电路的尺寸和重量，然而却能够以高速抽走热量以便维持低温温度。

抽取热能的冷却器的大小和效率的量度是其比容量。比容量是机器可以抽取的热能量对其体积或重量之比。这样，一种低温冷却器不仅能够从电子设备中抽吸足够的热量以使其保持低温，而且应该是有最小的体积和重量。因而，比容量越高，冷却器就越理想。

现有技术认为，借助于把冷却器在高频下运行，可以增加斯特林循环冷却器的比容量，而使其可以改进。如果冷却器作用较小，而可保持足够高的热能抽取速度，除非其运行频率的增加使得在每秒内有更多的热能抽取循环。

不过，现有技术也认为，熵发生过程（即不可逆性）对斯特林循环机的运动频率施加了一个上限、随着运行频率的增加，电工作流体与斯特林冷却器的内通路壁的摩擦产生的粘性损失也增加，结果，需要更多的功来移动气体前后通过高频的斯特林循环机的通路。此外，在回热器（ regenerator ）中的工作流体的现在热导率的

增加，引起大量的热被传入机器的冷端，因而在热交换器中的热传递被减小了。后者作用的发生是由于在轴向质量流量与在脉动流中发生的径向温度梯度之间的某种相位关系。结果，随着冷却器与其周围环境热交换效率的降低，必须被冷却器抽取的热量增加了。因而，增加频率会减少散走的热量。因此，现有技术对斯特林循环机有一 50 赫数量级的上限频率，并认为制造的运转在 120 赫的机器是曾经制造过的最高频率的斯特林机了。

因此，需要一种斯特林低温冷却器，它可以以足够高的速率消散热量，以使电子设备保持低温，而且它不具有足够小的体积和重量，使得其比容量是可接收的并与利用这些电子电路的设备相匹配。

近年来，微型机械技术已有所发展。虽然这种机器利用这些机构装置，例如运动转换链，机械推进机构，动力链，阀，膜，悬臂束等，其构形和运转方式和常规的相同，但它们具有数量级为几毫米或者更小的尺寸。

虽然斯特林发动机早已被用作机械原动机，仍然需要一种微型斯特林循环发动机，用来发展微型机械技术。

现有技术披露了斯特林循环热机换能器，具有一压力容纳器，包括流体通路并具有可压缩和可膨胀的工作流体。现有技术也披露了使用与运送工作流体以及斯特林循环固有的体积改变有关的挠性膜。这种膜与连接在膜上的控制电路设备或装置相结合，用来控制其偏移的方式、幅值、相位和频率。

因此，本发明的目的在于提供一种斯特林循环热机的换能器，其散热快，体积小，重量轻。本发明还提供了构成上述换能器的方法。

为实现上述目的，本发明的一种改进的斯特林循环热机换能器，具有:

（ A ）一个压力保持容器，确定了一个封闭的工作区，其包括流体通路并含有可压缩和可膨胀的流体，该压力容器包括:

（ a ）一个热接收、流体膨胀端，具有:

（ I ）膨胀区;

（ II ）远离膨胀区的返回区;

（ III ）扰性的膨胀膜，其形成膨胀区和返回区之间的壁；以及

（ IV ）热接收、接收、热交换器，其最接近地连接着膨胀区；以及

（ b ）一个热驱出、流体压缩端，其具有:

（ I ）压缩区;

（ II ）远离压缩区的返回区;

（ III ）扰性的压缩膜，其形成压缩区和返回区之间的壁；以及

（ IV ）热驱出、热交换器，其最接受地连接着压缩区；以及

（ c ）安置在所述端部之间的回热器，其包括多孔的基体，用来使膨胀区和压缩区的流体流通；以及

（ B ）与膜连接的控制电路装置，用来控制膜偏移的方式、幅值、相位和频率，所述膜周期地形变，从而提供膨胀区和压缩区容积周期的改变，并保持一般为 90°的膨胀区容积对压缩区容积的相位超前；其中，所述控制电路装置适合于在 500 赫以上操作换能器；以及工作区内的通道足够窄从而提供一沃耳莫斯里数，它代表在工作区内的工作流体的扰动流产生的不可逆性，其数值低于 5，且膜振动的幅值足够小，以便提供工作流体在 500 赫以上的运行频率下的低于 0.1 的最大马赫数。

本发明还提供了一种构成斯特林循环热机换能器的方法，其中包括:

（ a ）对每组分开的若干斯特林换能器的压力容器的热接受端、流体膨胀端形成一协同操作的膜、返回区、膨胀区和热交换器，这些是借助于剂蚀掉硅晶片上的选择的部分实现的，然后把硅晶片在一个平面内对正并连接在一起，形成一个整个的膨胀端板;

（ b ）借助于剂蚀掉硅晶片上所选择的部分对每组分开的若干斯特林换能器的压力容器的热驱出端、流体压缩端形成一协同操作的膜、返回区、压缩区和热交换器，然后把硅晶片在一个平面内对正并连接在一起，形成一个整体的压缩端板;

（ c ）制成几个回热器，并被连接在一起，形成一整个的回热器板，每个回热器具有在回热器板的相对侧的流体开孔，开孔间隔与所述端板配套，以及

（ d ）在膨胀端板和压缩端板之间放入、对准并连接回热器板，从而形成一包括几个斯特林换能器的整体结构。

本发明利用了一种控制系统的组合，其适用于操作斯特林循环热机换能器，其运行频率在 500 赫以上，例如 1000 赫，和足够窄的工作区内的通道相结合，提供一种低于 5 的沃耳莫斯里（ Wolmersley ）数，并且膜幅足够小，从而在运转频率下提供低于 0.1 的马赫（ Mach ）数。这些窄的通道以及小的膜振幅值充分减少了不可逆性或输送工作流体作的功，从而提供一种机器，它具有可接受的高的比容量。结果是，在比先前尺寸小得多的情况下可以达到实用的足够高的比容量。

本发明还旨在形成一种硅的斯特林循环装置的热端和冷端，并且利用平面处理技术，例如光刻、硅熔键合以及薄膜技术，从而使得同进制造数百个晶片等级的微型制冷器元件。本发明进一步旨在构成这种换能器阵（ arrays ），以及其作为冷却器和发动机的结构。本发明进一步的方面如下所述，或对本领域的人员来说是明显的。

图 1 是一个透视图和剖视图，说明一个使用本发明为冷却电子集成电路用的斯特林循环换能器阵。

图 2 是图 1 中局部放大图，说明细节。

图 3 是说明细节和图 1 中另一局部放大图。

图 4 是图 1 中沿线 4 － 4 的水平剖面图。

图 5 是图 1 中沿线 5 － 5 的纵剖面图。

图 5A 是图 5 结构的一部分的纵剖面图。

图 6 、 7 以及 7A 是类似于图 4 、 5 和 5A 的图，只是说明本发明的另一实施例。

图 8 、 9 是类似于图 4 、 5 的图，只是用来说明本发明的另一实施例。

图 10 、 11 是类似于图 4 、 5 的图，只是说明本发明的另一实

施例。

图 12 包括 4 幅图，说明本发明一个实施例的位移和容积变化。

图 13 - 17 是方块原理图，说明本发明的控制系统。

在描述本发明附图中所示的最佳实施例时，为清楚起见，将使用特定的术语。但是，本发明并不限于这些特定的术语，应当理解，每一特定的术语包括全部以类似方式运转以实现类似目的的技术等同物。

虽然本文用来描述本发明实施例的术语的定义对本领域的人员是熟知的，还是希望简短地回顾并明确地定义要使用的几个术语。

“换能器”是一种装置，用来把一种形式的有用的能量转变成另一种形式的有用能量。例如，能量可以从机械能转变为电能或从热能转变为机械能。此外，许多换能器能够以一种形式运转，也可以用相反的另一种形式运转。例如，一种装置可作为把电能变成机械能的电动机，也可以作为把机械能变成电能的发动机。类似地，一种斯特林换能器可以运转把热能转变成机械运动，使热能从较高的温度流向较低的温度，也可以运转利用机械能抽走热能，即把热从较低的温度转向较高的温度。因此，本发明的装置简称为斯特林循环换能器。就是说，本发明的大多数特征和实施例，可以用于发动机方式也可以用作冷却或制冷机方式。

术语“键合的（ bonded ）”采用其通常的含义，描述分别可识别的结构或层被机械地连接在一起，而不管它们是如何连接的。它不仅包括两个构体或层，它们先是分别制造，然后连接在一起，也包括两个结构或层，它们是整体制造的，生成的或淀积一个在另一个上。

图 1 说明 6 个电子集成电路，例如集成电路器和 12，它们安装在硅基片 14 上，并具有形成在基片 14 上的互联导体总线 16 。在集成电路的下面有几个斯特林冷却器，用来从集成电路除去热量。虽然图中表明一个斯特林冷却器与每一集成电路相连，但这种一对一的连接并不是必须的。这些斯特林循环冷却器的每一个，例如冷却器 18，是其它的复制品。它们被共同安排成 2 乘 3 的方阵。

中心支撑板 20 放于最上方硅基片 14 的下面，用来支撑呈中心配置的每个斯特林冷却器的回热器（ regenerator ）。虽然一个单一的支撑板被示出为沿回热器的长度中心定位，但也可以使用多个支撑板，并可位于回热器长度的任意处，包括在回热器的每一端，例如图 11 所示的端支撑板 1151 和 1152 。最下面的第二个硅基片 22 位于中心支撑板 20 的下面，且与其平行。

最上面的硅基片 14 、最下面的硅基片 22 以及每个斯特林循环冷却器的重迭部分形成斯特林冷却器的压力保持容器。每一压力保持容器限定了一个封闭的工作区，包括流体通路，且含有可压缩和可膨胀的流体，典型的是气体，它们都是为形成斯特林循环，热机换能器所必须的。具体地说，上层基片 14 形成热接受、流体膨胀端板，下层硅基片 22 形成一热驱出、流体压缩端板。热回热器在这些端板之间放入，它包括在其相对端的与端板进行流体交换的有孔的基体（ matrix ）。

在图 2 、 3 、 4 和 5 中对一个实施例的这些结构进行了极详细的说明，并参照这些附图进行描述。端板 14 和 22 每个可以包括多个层状的层。端板 14 和 22 的结构最好利用平面处理技术制成，这种处理技术用在制造电子集成电路和硅敏感器件或执行器件中。

热接受、流体膨胀端板 14 限定了膨胀区 30 、膨胀区 30 末端的返回区（ back space ） 32 ，以及挠性的膨胀膜 34 ，它位于膨胀区 30 和返回区 32 之间。热接受、热交换器最接近地连结在膨胀区 30 。在最佳实施例中，热接受热交换器是热接受端板 14 ，它沿内壁 36 与工作区相连，且包括膜 34 ，其它方案也可使用，如下所述。

类似地、热驱出、流体压缩端板 22 限定了压缩区 40 、压缩区 40 末端的返回区 42 ，以及挠性压缩膜 44 ，它在压缩区 40 和返回区 42 之间形成一个壁。热驱出热交换器端板 22 形成，它最接近地沿内壁 46 连结压缩区 40 。

为了控制每个膜的频率相位和幅值，每个膜装有一个起动器，它是控制系统的一部分。膨胀膜 34 有一相连的起动器 35 ，压缩膜 44 有一相连的启动器 45 。例如，起动器可以包括压电材料，它与

控制系统的其余部分电气地相连。起动器在下面详细讨论。

热回热器 50 放在热接受端板 14 和热驱出端板 22 之间，被中心支撑板 50 支撑着。热回热器 50 有一典型地呈圆柱形的包围气体的不可穿透的壁 52，它包含着工作气体，并被密封地连接到端板 14 和端板 22 。在包围壁 52 的内部，一多孔蜂窝状散热管 54 被支撑着，与膨胀区 30 和压缩区 40 进行流体交换。在图 4 中解释的多孔峰窝散热管包括几个分开的平面壁 56，在其相对侧与包围壁 52 相连。最好在这些壁之间的通路有一约大于 8 的横截面平面比（ cross-sectionel aspect ratio ）。

多孔的蜂窝散热管形成回热器，可以具有不同的结构。它是一种具有通路的结构，该通路通过回热器轴向地沟通膨胀区 30 和压缩区 40 。回热器必须能够轴向地输送气体，并周期地存储和释放热量，从而使热量轴向地通过回热器，每一循环都有增加地被抽走。通道可以是材料各层之间的规则形状，也可以是一系列的均匀分布的互连的细孔，象在泡沫材料中的那样。接着描述这种回热器结构的不同的实施例。

希望回热器呈现很高的内表面区域，以便使气体/回热器交接表面最大，并具有高的热容量以存储热量。也希望使沿端板 14 和端板 22 之间的轴向通过回热器材料的热导率最小。在冷却器中，任何通过回热器材料传导的热量表示被传导回进入正在被冷却端的热量，在发动机中，代表分流的热量，它不提供机械功输出。因而，低热导率材料，例如陶瓷或玻璃是较好的，并应具有低的几何横截面（ cross-section of mass ）。

本发明极其重要的特征在于，通过回热器的多孔蜂窝散热管的通道的直径或其它相应的横向尺寸非常小。它必须足够小，以便在斯特林热机换能器的运转频率下，提供低于 5 的沃耳莫斯里（ weomersley ）数，以便使与通过这些通道输送气体有关的不可逆损失减至最小。为了把与通过上述通道输送工作流体有关的不可逆损失减至最小。本发明另一个极重要的特征在于，膜振动的幅值非常小。它必须足够小，以便在斯特林热机换能器的运转频率下提供

0.1 以下的最大马赫数。

这些不可逆性是寄生损耗的根源，是由于工作气体与通路壁之间的摩擦发热引起的。它引起粘性损失，这是由于通过回热器的工作气体增加的热传导和当工作频率升高时在热交换器中减少的热传递所致，后两种现象是扰动流所特有的，这是由在轴向流量的周期改变和径向温度梯度之间的某种相位关系引起的，在本发明中，这些流体通路的横向尺寸为 10 - 50 微米量级，膜振动的幅度为 10 - 100 微米量级，以便补偿频率的增加，使如此小的通路和振动幅值减少了这些寄生损耗。这些损耗的减少相应地增加了被斯特林循环热机换能器在输送热量或提供机械功时完成的有用功。

与扰动流在通道中有关的不可逆性的数量表示被沃耳莫斯里数给出，其由上式表示:

I. $\alpha=(2\pi f \cdot a^2 p/\mu)^{1/2}$

其中:

α=沃耳莫斯里数

f= 运行频率

a= 通道直径

p= 工作流体密度（是温度和压力的函数）

μ =工作流体动态粘度（温度的函数）

另一个与通道中的流体流有关的不可逆性的数量表达由马赫数给出，由下式所示:

II. $Ma=2\pi f \cdot X_g / C_o$

其中:

Ma= 马赫数

X_g= 扰动的轴向气体位移的幅度

C_o= 声在工作流体中的速度

轴向扰动工作流体位移膜振动幅值有关，表示为:

III. $X_g=X_d \cdot A_d / A_x$

其中:

X_d= 膜的振动幅度

A_d = 膜的振动面积

A_x = 工作流体流过的全部通道的总横截面积

在工作流体中声速已知为:

IV. $Co=(\gamma RT)^{1/2}$

其中:

γ =在定压和定容下的比热比

=5/3 （氦）

R=对工作流体的特定气体常数

= 2079 焦耳/千克开耳芬（ Kilog ramzkelvin ）（氦）

T=绝对温度（ K ）

方程 II 、 III 、和 IV 可以结合成:

V. $Ma = (2\pi f \cdot X_g \cdot A_x / A_d) / (\gamma RT)^{1/2}$

为了得到在 500 赫以上运行斯特林循环换能器的本发明的优点，通道必须做到足够窄，以便提供小于 5 的沃耳莫斯里数，并且膜振动的幅值必须足够小，以便在运行频率下提供小于 0.1 的最大马赫数。最好沃耳莫斯里数作得小于 1 ，最大马赫数小于 0.01 。

举例说明实施本发明的斯特林循环换能器的参数，该例说明了本发明的这些原理的应用。该例导致多孔热交换器的使用，如图 8 、9 所示，说明如下。

下述例子是一三部分的微型制冷器，充氦至 20 巴，在 1KH_2 下运行，因为沿轴向通过实施本发明的斯特林循环冷却器时有一温度梯度，因此，温度和其它参数在轴向的不同位置是不同的。下表表示一组参数，其中公知的雷诺数与前面定义的量有关，即

VI. $R_e = a^2X_g/a$

表 1

位置	温度 (ok)	Xg (um)	a (um)	p (Kg/m)	n ($X10^{-6}$Pa·s)	Re	a
冷热交换器	100	200	20	9.8	2.5	13	0.81
中回热器	225	300	20	4.3	16.2	10	0.82
温热交换器	350	600	30	2.8	22.8	9.7	0.85

表 2

位置	温度 (ok)	Xd (um)	Ad ($X10^{-6}m^5$)	Ax ($X10^{-6}m^5$)	Ma
冷热交换器	100	100	64	32	0.002
中回热器	225	100*	180*	32	0.004
温热交换器	350	100	290	32	0.005

*在回热器中，使用了两个膜位移和面积的平均值，因为气体位移受两个膜的影响。

用于控制膨胀膜 34 和压缩膜 44 的相位和频率的操作和不同实施例的理论已由现有技术给出，因此不再详述。以 Cooke-Yarboraugh 的专利 3,548,589 为例说明这种操作。在膜振动时，它们交替地进入或离开各自的与膨胀区和压缩区有关的位置，借以周期地改变这些区的有效容积，交替地把气体送进、排出各个膨胀和压缩区。

图 12 中，以及图 12A 、 12B 说明在回热器的相对端膜位移相对于时间的轨迹。因为这些膜在相对端彼此面对着，相反方向的运动（例如朝向中心），对改变其有关区的容积而言有着相同的效果。这样，对于膨胀区和压缩区，容积相对于时间的改变，在图 12A 、12B 中为 Ve 用 Vc，图 12C 和 12D 用来说明膨胀区容积 Ve 机压缩区容积 Vc 随时间的改变。如同这些图解释的，控制系统必须这样控制膜，使得膨胀区容积趋前压缩区容积大约 90°。不过，不需要为精确的 90°，象本领域人员熟知的那样，例如，为使效率最佳可以改变 10°或 20°之多。对于发动机或冷却器，最佳的容积相位趋前大于 90°。这一大约 90°的相位趋前对发动机和冷却器而言必须保持。

为了使膜的周期运动保持合适的相位、幅值和频率，控制系统包括起动器，例如上述的起动器 35 和 45 。最好每个起动器是机电传感器，被机械地连接到其相关的膜上。适用和传感器包括磁传感器，象上述 Cooke-Yarborough 专利中披露的。压电传感器，磁致伸

器，象上述 Cooke-Yarborough 专利中披露的。压电传感器，磁致伸缩传感器，电容传感器或其它可驱动膜的传感器。电一机传感器是最好的，因为容易连接，也容易控制电驱动信号的相位、幅值和频率。

如同熟悉膜技术领域的人员熟知的那样，装有膜的斯特林循环热换能器的一个膜实际上由工作气体压力的变化来驱动，而另一个由施加在与其相关的传感器上的能量来驱动，在冷却器中，膨胀端的膜被气体压力的改变来驱动，在发动机中，压缩端膜被气体压力的改变来驱动。不过，每个膜仍然需要起动器，因为能量必须从被气体压力改变驱动的膜上消耗，并且每个膜的振幅、频率和相位必须被控制。因此，“起动器”这一术语的含义是广义的，以便包括可以从膜上吸收或施加机械能给膜的装置，并且不限于仅给出机械功输出的装置。因此，控制系统，包括起动器在内的目的是引起膜以需要的相位关系、振幅和频率振动。

一种用于维持膜振动的所需相位、振幅和频率的有代表性的控制系统如图 13 所示。具有微型制冷器共振频率的数字脉冲串控制信号 S_c、 S_{EA} 和 S_{EE} 借助于数字计数器 1301 、译码器 1302 、乘法器 1302 以及除法器 1304 和 1305 由单独的频率为共振频率的倍数 Nfo 的单一的数字脉冲串得到。 S_{EA} 和 S_C 的相位超前借助于乘法器 1303 的“选择”输入选择任意的精度，其由计数器 1301 、译码器 1302 和乘法器 1303 的数据分支通道的宽度确定。控制信号 S_C 的基波正该分量 S_{CO} 由滤波器 1306 取出，并施加给图 15 所示的压缩膜电动一起动器 1307 。控制信号 S_{EA} 及其反相信号 S_{EE} 被分别施加给 H 桥式晶体管 Q1 － Q4 的控制端 A 、 A’与 B 、 B’，如图 14 所示。借助于控制信号 S_{EA} 和 S_{EE} 对 H 桥的激励把交流电压 V_{EG} 整流， V_{EG} 是由膨胀膜发电一起动器 1308 产生的并出现在其端子 1308a 和 1308b 上，以便给使 H 桥反向偏置的直流电源 1309 充电。图 16 、17 说明了由膨胀膜发电器一起动器 1308 在控制信号 S_{EA} 和 S_{EE} 交替相位期间通过 H 桥产生的电流的方法。用这种方案，电功率从电源 1309 流入压缩膜电动一起动器 1307 ，并由膨胀膜发电一起动器

1308 输出进入电源 1309，从电源 1309 流出与流入的电能数量之差就是微型制冷器的净功率消耗. 晶体管 Q1 - Q4 被说明为双极晶体管，不过由 MOS 或 JFET 晶体管对电路作较小的改动也能完成相同的功能。

用硅制造端板 14 和 22 给予制造斯特林循环热换能器独特的和重要的可能。因为端板一个重要的作用是导热，硅提供了优良的结果，因为它有高的热导率。其次，选择硅便可使端部元件用现有技术中硅平面处理技术来制造，这种技术过去已被用来制造集成电子电路和传感器。第三，使用硅可使被连接到膨胀端板 14 的集成电子电路具有高的可靠性，尽管该结构是热循环的。因为在集成电路和冷板间的热机应力由于其均一的热膨胀系数而被消除了。第四，使用硅使得电子电路可集成地制造在膨胀板 14 内，从而增加热导率，使从电子电路内抽出热量。

例如，参见图 5，端 14 可以包括两个硅层，一个内层 60 和一个表层 62 。膜 36 借助于常规平面处理刻蚀技术形成，从而形成返回区 32，并剩下膜 34 。借助于连续表层 62 到内层 60 上，使得两个硅片用现有技术在一个平面内连在一起，从而使返回区 32 封闭。例如硅膜连接或使用一中间玻璃或金属膜或阳极键合。类似的或相关的技术也可以用来形成返回区 42 和压缩端板 22 内的工作区 40，压缩端板由内层 64 和外层 66 构成。

膨胀和压缩膜的面积可以是相同的也可以是不同的，如图 5 所示。

在本发明的实施例中，热通过膨胀端板 14 被传导并输送进膨胀区 30，也由压缩区 40 传入然后通过压缩端板 22 传导。如上所述，这些端板内和这些端板处的工作区部分的内表面壁可作为热交换器，用来传递在膨胀和压缩区内的工作气体及其相关的端板之间的热量。

不过，图 9 说明了具有分开的热交换器结构的另一种结构。图 9 的实施例有一膨胀端板 914 和一压缩端板 922 。它还有一膨胀膜 934 和一压缩膜 944，与图 5 相应的部分类似。不过，一个单独的硅热

交换器层 980 被粘结在硅层 960 上，并被置于该硅层 960 和回热层 950 之间．该热交换器层 980 有几个轴向孔 982，用来沟通膨胀区 930 和回热器 950 的内部．最好这些孔呈被一系列平行的叶片隔开的槽状．一个类似的热交换器层 984 被粘结在压缩端板层 964 上，用来沟通回热器 950 的内部和压缩区 942．它也有几个横向孔 986．

平面处理技术除形成平片结构外也允许形成硅膜结构，这在图 5 中说明了．例如，图 7 说明了具有环形波纹的膨胀膜 734 和压缩膜 744．膨胀膜 734 具有环形波纹 784，压缩膜 744 有环形波纹 786．波纹可借助于在膜内刻蚀上槽形成．这些波纹使得膜的压力对位移的特性更接近线性，象在设计纸压敏感元件例如气压表中公知的那样。

图 9 说明在膜 934 上借助于平面处理技术形成一增加质量（ mass ）的凸台区域，为了使设计者控制振动膜 934 的质量．这会帮助设计者把膜设计成共振型的．

膜的位移对施加在其上的力之比可以借助于这样形成所述膜来增加，即使其在运行频率下共振．如普通物理学所公知的那样，机械系统的振动固有频率是一熟知的振动质量和相连的能量储存装置的弹性常数的函数，能量存储装置例如弹簧，用于吸收和释放能量．在本发明的实施例中，膜的质量以及作用在膜上的全部弹力的合成弹性系数可以选择得使膜在运转频率下共振。

该质量可以借助于膜的尺寸选择，也可以如上所述借助于提供凸台来增加．作用在膜上的弹力原理上是硅膜本身的弹性引起的弹力，由返回区限定的气体产生的气体弹力和电工作区限定的气体产生的气体弹力，这些气体弹力与各个膜相邻．因而，气体弹力，具体地说返回区的容积可以如此设计，使得膜具有等于运行频率的振动固有频率，即共振频率．另外，当然返回区的容积可以是如此之大，使其有一负的弹性系数，这样，共振频率将原理上为工作区气体弹力的弹性系数和硅膜本身弹性系数与其质量的函数．如果硅的弹性作为主要的弹性系数，则返回区 10 可以全部取消，例如向一相邻的微型制冷装置的返回区开孔，该微型制冷装置的膜作相差

180°的振动。

膜的弹性系数可借助于把膜做得非常薄来减小，也可以由设计者借助于在其上形成氧化层或金属层或在其中扩散进其它物质来增大，因而可使用多层膜。

作为控制系统一部分的机电起动器被机械地连接到每个膜上，对本领域的人员来说，显然可以使用可用于本发明的各种机电起动器，例如静电的、电磁的、压电的或磁致伸缩原理的。

图 5 说明一种压电起动器 45，它借助于施加于其导电端 47、49 的电信号运转。

图 5A 详细地说明了这种起动器。它包括单个或多个金属或导电膜电极 510、512 和 514，它们被电气地连接在一起并连接到导电引线 4a 上，另一个单个的或分开的多个金属或导电膜电极 516、518 和 520，它们在压电层 522 的两对侧，例如可以是氧化锌，它们被连在一起并被连接到导电引线 47 上。这种传感器可以这样制造：借助于在硅膜 526 上形成一氧化层 524，然后借助于常规技术形成金属或导电膜条 510、512 和 514，然后在金属或导电膜条和氧化层 524 上淀积氧化锌或其它压电层 522，然后再次使用常规技术在压电层 522 上淀积金属或导电膜条 516、518 和 520。如果需要，另一个绝缘氧化层 528 可以淀积在顶上，以便提供一保护层和电绝缘层。

在操作时，控制系统施加一周期信号引线 47、49，其频率等于运行频率，借以在压电层 522 上产生应力，并使压电层 522 产生应变，由此使膜 526 运动。

图 7 和图 7A 说明一个起动器，它借助于在每个膜 734、744 处形成相关的电容器 760、762 利用静电力。

图 7A 更详细地说明电容器 762。它有一在氧化层 765 上制造的板 764，氧化层 765 被淀积在膜 734 上并与导电引线 766 相连，如图 7 所示。它还有第二个电容器板 767，类似地被制造在绝缘氧化层 768 上，它被淀积在端板 769 上并与导电引线 770 电气连接。

应用周期性的电控制信号，交替地以运行频率对电容器极板

764 、 767 用相同与相反电荷充电，引起周期的吸力，用来驱动膜 734 作机械振动.

图 9 说明用来驱动膜 944 的另一起动器。它包括一对薄膜线图 972 、 974，其被制成平面导电螺线管，分别位于端板 922 和膜 944 上。平面线图 972 与导电引线 978 、 979 相连，平面线图 974 与导电引线 991 、 993 相连，用来传导控制电流。尽管一个电流可以是直流的，但另一个（如果第一个不是直流的话，则为每一个）是频率为运行频率的周期电流，从而提供一随时间改变的磁场，交替地从静线图 972 吸引或排斥膜，以对膜施加机械应力，使其在合适的运转相位和频率下振动。

图 7 说明一种回热器 750 ，它有一网状泡沫材料 754 ，位于外圆的压力保持容器壁 752 内。网状泡沫材料 754 沿着回热器的全长具有网眼空隙或腔，通过它们工作流体流动。这种回热器可以使用目前在陶瓷过滤器中领域中用的技术制造。

图 8 、 9 说明了另一种回热器，它由多个平行管 954 ，置于外圆柱形的压力保持容器壁 952 内制成。回热器通路由通过每个管中心的通路和管之间的通路构成。

图 11 说明另一种回热器 1150 ，它包括几个分开的同心的管 1154 ，置于与其同轴的外圆柱形压力维持容器 1152 内。

回热器也可以制成螺线制的低热导率的固体膜。例如 3 微米厚的玻璃箔，在膜内有变了形的凸起，使得它向上螺线地绕制时，每层被互相分开，从而提供轴向通路。

从上述本发明的描述中，可以看出本发明一个主要的优点是因为实施本发明的斯特林循环冷却器可以用平面处理、薄膜以及其它技术制造，这些技术是在制造集中成电子电能中通常制造，使得其在物理上及热学上与电子电路有着紧密的联系，冷却器可以制成电子电路的一部分成作为电子电路的延伸。而且，这些技术允许同时制造数百个微型制冷器，并密切际与数百个集成电路相结合。每个电子电路的制造是容易和方便的，使得其与膨胀端板呈紧密地热联系，以便高效地从电子器件上抽走热量，从而使电子元件得以在低

温度下运行。电子器件可以集成地直接制造在膨胀端板或膜内，或与膨胀端板呈热联系的并附加在其上的分立元件或集成电路内。

而且，如图 9 所示，可以制成制冷器室，借助于附加与端板 914 有关的外壁 926，用来容纳电子电路 921 或其它被冷却的物体，并装一可除去的盖 928。这提供了一个抽空的 929，其中的物品与除去压缩端板 922 外的环境呈热隔离，用来容纳并冷却物品，例如电子电路 921。制冷器这一术语用来指示作为热能泵的，在膨胀端从较低温度抽取热量，到压缩端的较多温度。术语制冷器并不限于应用于一个被冷却的室。

本发明的斯特林循环热机换能器也可以设计成并作为发动机运行，以便给机械负载提供机械能。为此把一个从压缩端膜到负载的能量转换环节。负载必须是控制系统的一部分，因为复杂的负载阻抗是决定上述膜振动的幅值、相位和频率的动态系统的一部分。

图 11 说明了一个压缩端膜 1110，通过杆 1114 与机械负载 1112 连结，作为能量转换环节。例如，负载 1112 可以是电发生器，复式微型制冷器或流体泵。

本发明的图 9 中的线图可以用于作为发动机运行的本发明的实施例中，用于发出电能的目的。

以任意方便的方式可以把热能施加于膨胀端板 1116，由此把热能施加于斯特林特环发动机，包括入射的太阳辐射，燃烧，放射性同位素辐射或工业废热。

本发明给出了制造微型发动机的可能性，它可以被利用于太阳能或其它热能高效地转换为电能或机械能。因为目前利用的光电池借助于称为光电效应的光电过程直接把太阳辐射能转换成电能，它们与本发明相比有若干缺点。首先，用斯特林发动机进行的热机转换的效率优于光电太阳电池的光电转换效率。此外，借助于斯特林发动机进行转换的可利用的太阳能比光电池的多，虽然在太阳光谱中只有大约 25 % 的能量在能激发光电效应的波段内，但是全部太阳光谱的能量都可以被转换成驱动斯特林循环的热能。因此，用光电池，为转换可利用的能量不能借助于集中太阳辐射来增加，因为

那样会增加光电池的温度远超过合适的温度，在这温度下所零的半导体的电子性能被丧失了。相反，太阳辐射可以被集中在斯特林微型发动机的硅热接收器上，因为它利用硅的热一机性能而不用其电子性能。

本发明的实施例最好采用目前使用的平面集成电路制造方法制造。这些方法包括微光剂，各种氧化方法，淀积，掺杂，剂蚀以及用在集成电路和硅敏感器和起动器工业的其它技术。要被冷却到室温以下的电气集成电路片可以制造成相同晶片的一部分，象使用本发明的低温冷却器那样，低温冷却器的硅表面可以是在其上或其内制造电子电路的基片。

本发明结构也适用于在单一晶片上制造大量的相同器件，然后把晶片分离成单个实施例或一组实施例。例如，借助于为几个斯特林换能器压力容器的每个分开的热接收端、流体膨胀端形成协同操作的膜、返回区、膨胀区和热交换器来制造这些实施例。这可以借助于刻蚀掉硅晶片的选择的部分，然后把晶片对平并在该平面内连接在一起，作为一个整个的膨胀端板来实现。类似地，借助于剂蚀掉多个硅晶片上的选择的部分，然后把硅晶片在平面内对平并连接在一起，作为整个的压缩端板也可以形成一组斯特林换能器压力容器的各自的相互分开的热区出端和流体压缩端以及协同动作的膜返回区、压缩区和热交换器。

可以制造几外热回热器并把其连接在一起，作为一整个回热器板，每个回热器在回热器板的相对侧有流体孔。开孔是分开的，以便和端板配套。然后把回热器板插在膨胀端板和压缩端板之间并与其对准连接，这可利用例如 Mallory 美国专利 3,397,278 中描述的技术，来形成包含一组斯特林的环热机换能器的整体结构。这整体结构可被分成单个的换能器或几个多个换能器阵列。

形成整体回热器板的一种方式是制成几个单个的基本相同的回热器，然后把这些回热器连结在前述支撑板的一个或多个孔内，这些孔平行设置，横向间隔与端板配套。然后把每个回热器阵列机械地连在一起，形成一回热器板，然后把回热器板连结在端板之间。

从上述显见，在本发明的实施例中，在扰动流中熵发生过程被大大减少了，这便使得该实施例运转在比以前认为可能频率高得多的频率下，并因而使机器小型，具有实际的抽热能力和所需的比容。虽然现有技术中的斯特林循环机可能已经运转在沃耳莫斯里数小于 5 的较低的频率下，但通道尺寸和沃耳莫斯里数之间以及位移幅度和马赫数之间关系的重要性从未与建立小的高频率的机器相关起来过。

本发明广泛的构思在于通道的组合，它表现出低于 5 的特征沃耳莫斯里数和低于 0.1 的马赫数与高于 500 赫的运行频率结合起来。

因为随温度下降硅的导热率急剧，硅用作低温热交换和热传导元件是极为合适的材料。同时，硅用作连结或制造硅片是最理想的基底材料，因为在基底和片之间的热膨胀系数没有差别，否则在低温冷却器中发生的极大的温差会导致断裂或分离。

因为硅是用作电子电路的最通常的材料，它提供了把电路在微型制冷器和热交换器内部制造的可能性。

在冷却端热交换器内制造的电路可以是用设计的机器冷却的电路，也可以是控制或运行该机器的电路。

这种机器小的尺寸和高的频率使其可运行在接近隔热条件下，这与前述的较大的较高频率的机器运行在低效的绝热条件下不同。

虽然本发明的某些实施例已描述了，应当理解，只要不脱离本发明的构思或下述权利要求的范围，可以作出各种改型。

说　明　书　附　图

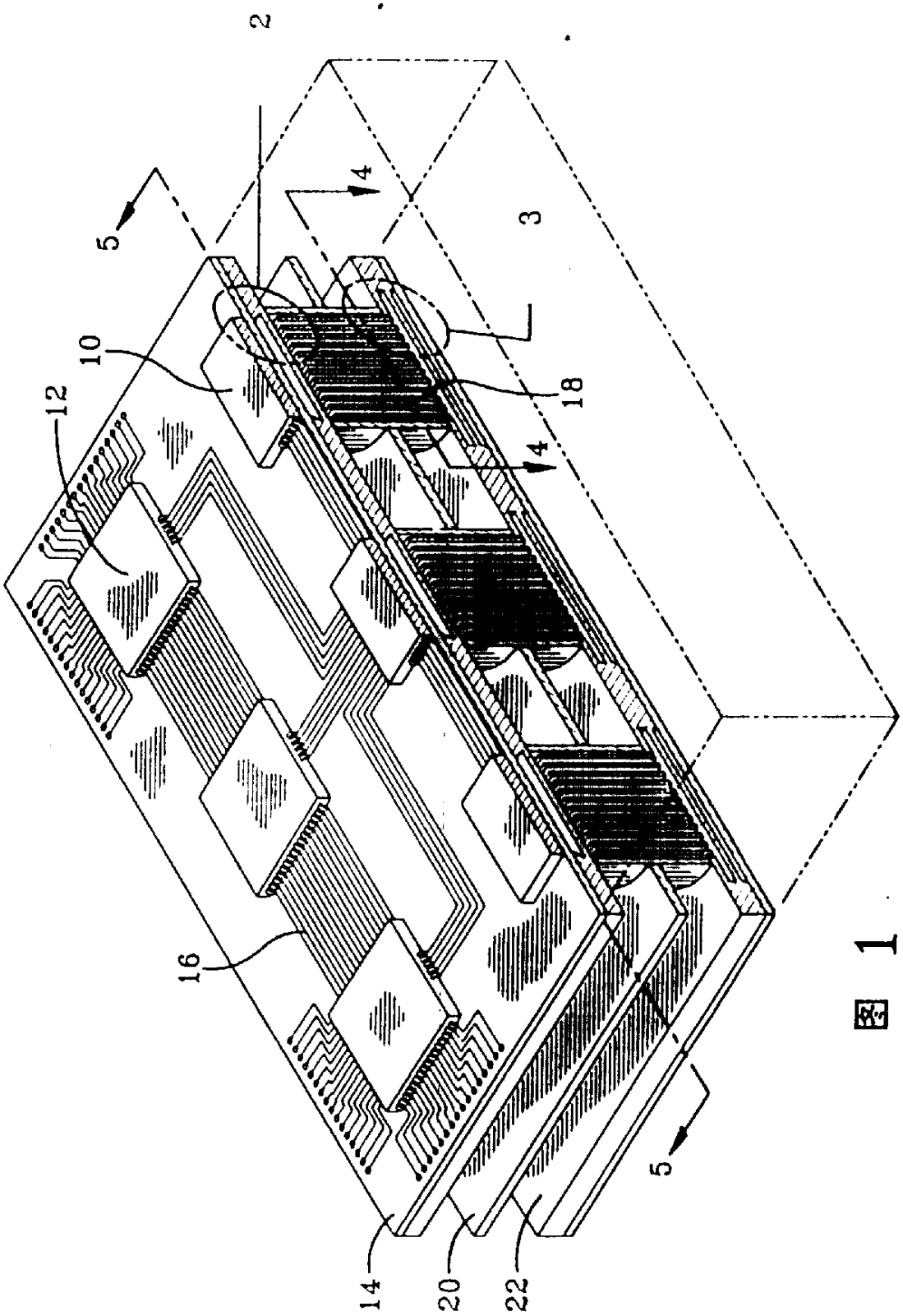


图 1

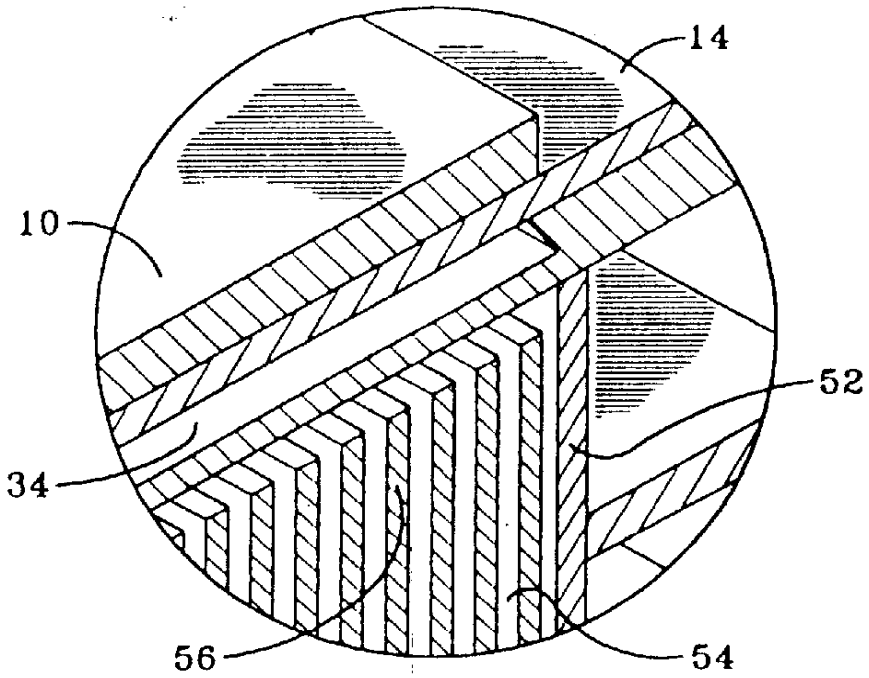


图 2

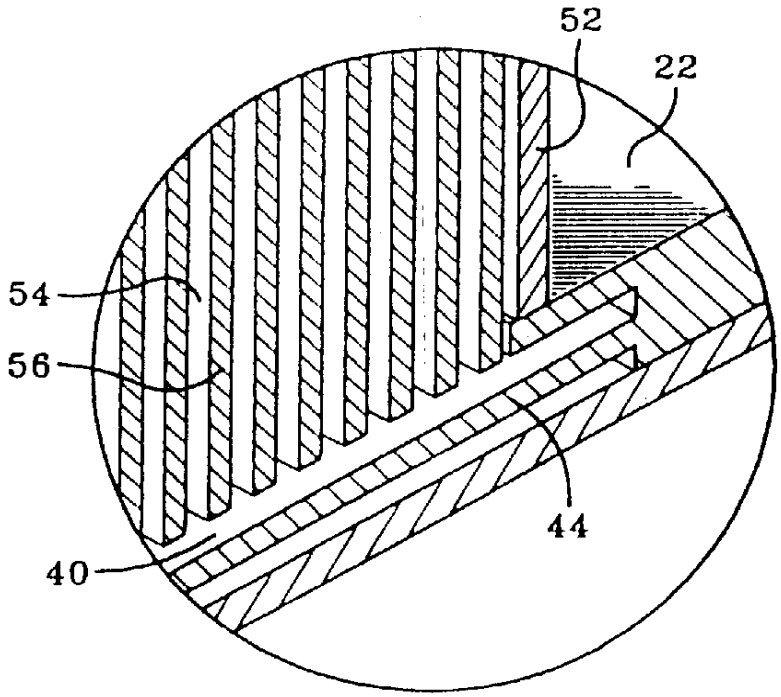


图 3

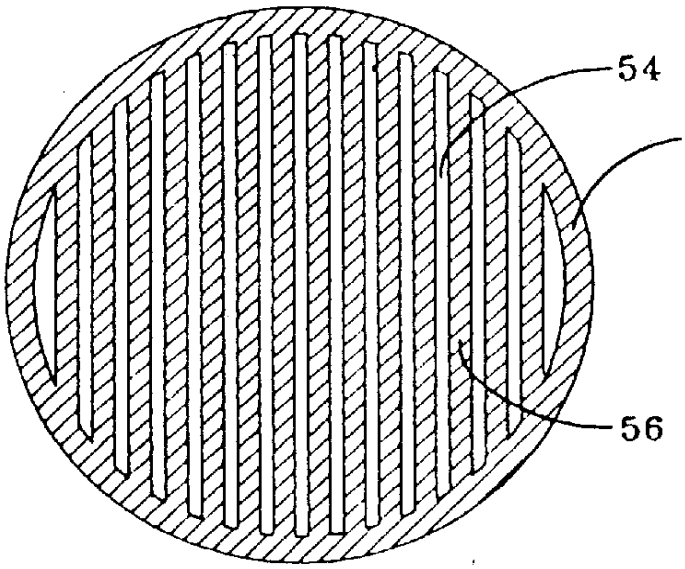


图 4

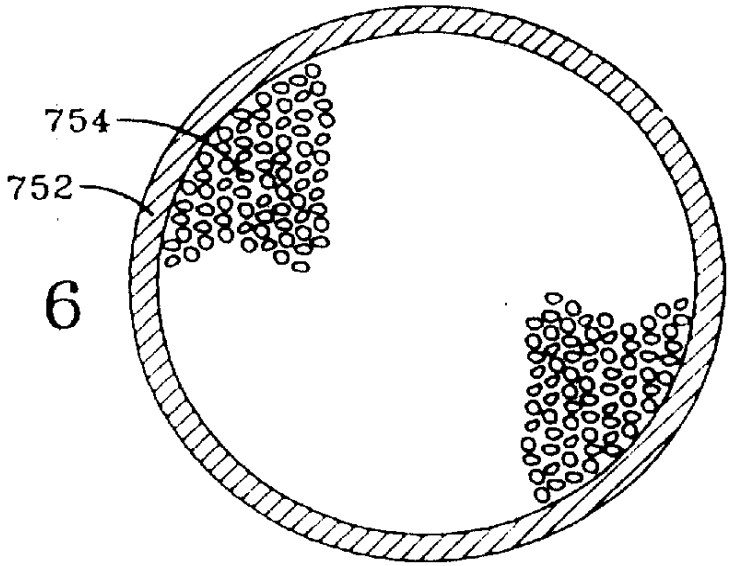


图 6

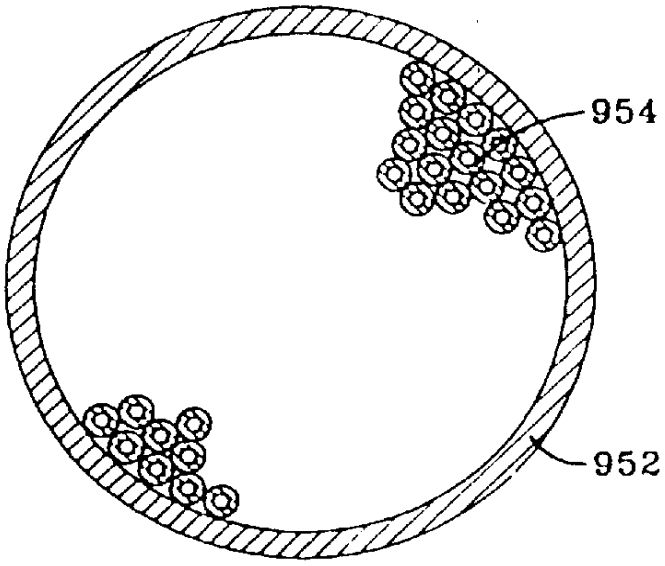


图 8

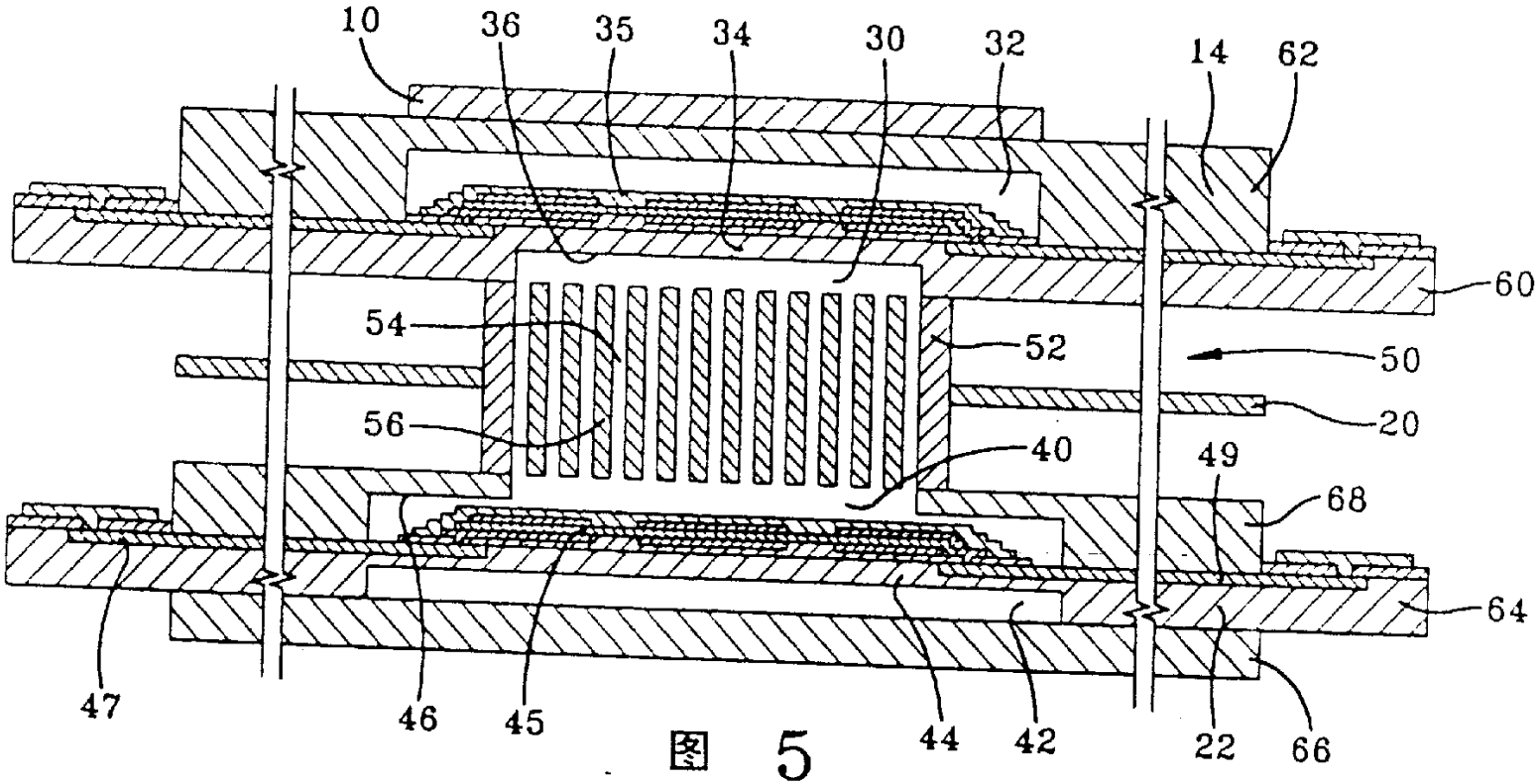

10
36
35
34
30
32
14
62
60
54
52
50
56
20
40
49
68
64
47
46
45
44
42
22
66

图 5

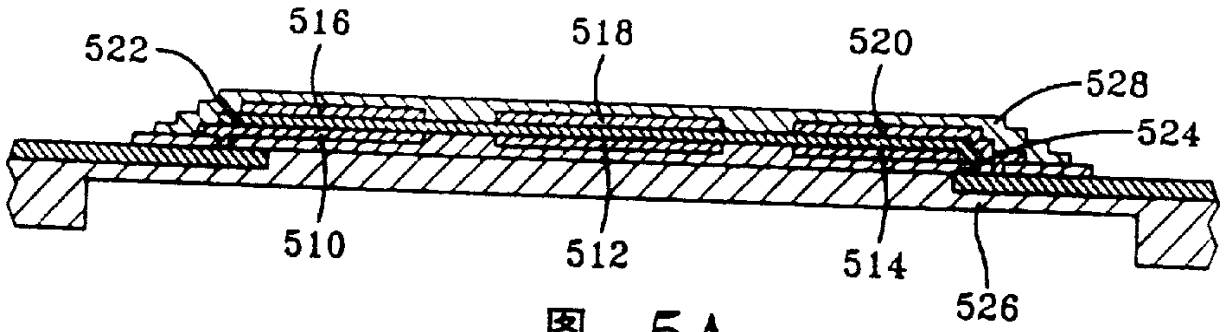

522
516
518
520
528
524
510
512
514
526

图 5A

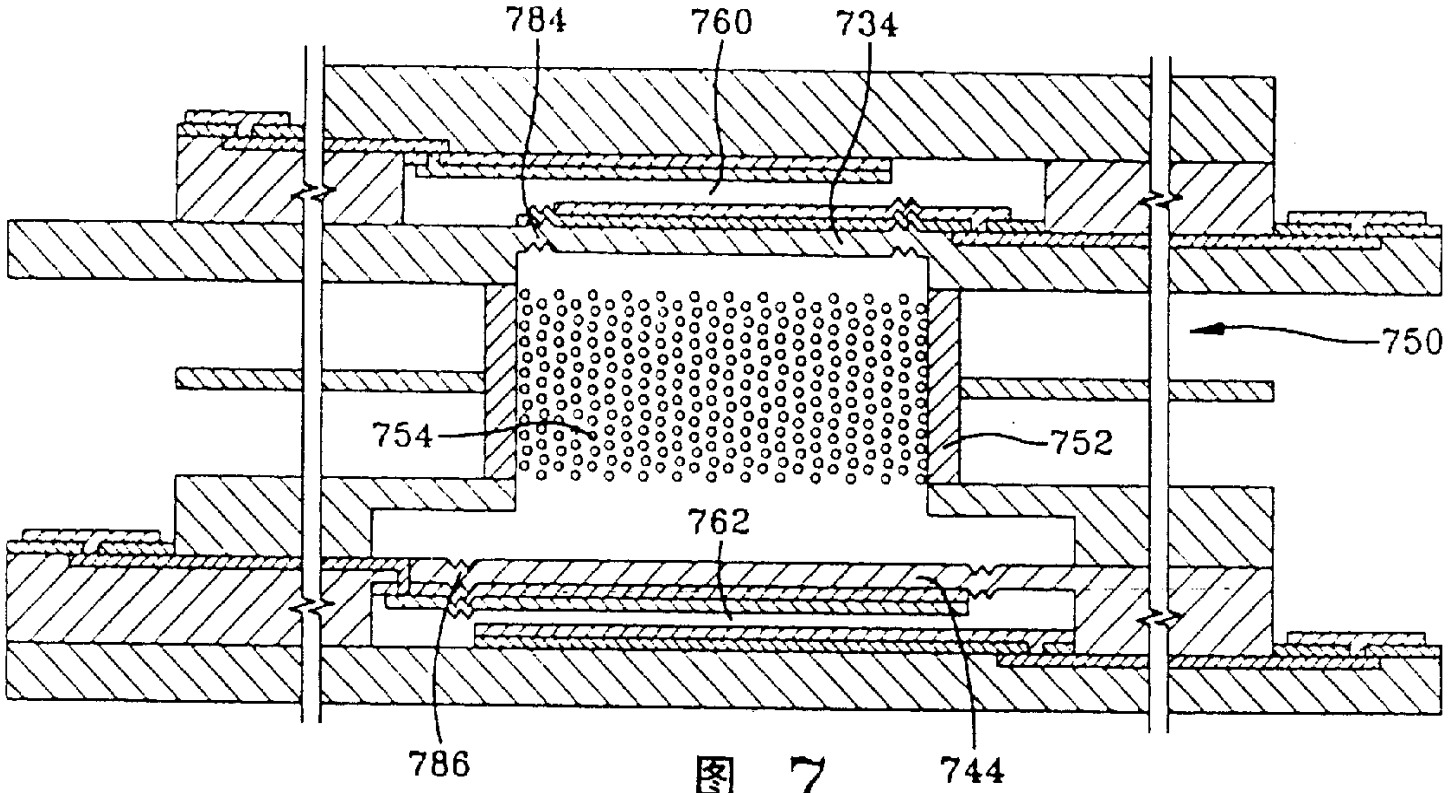

784
760
734
750
754
752
762
786
744

图 7

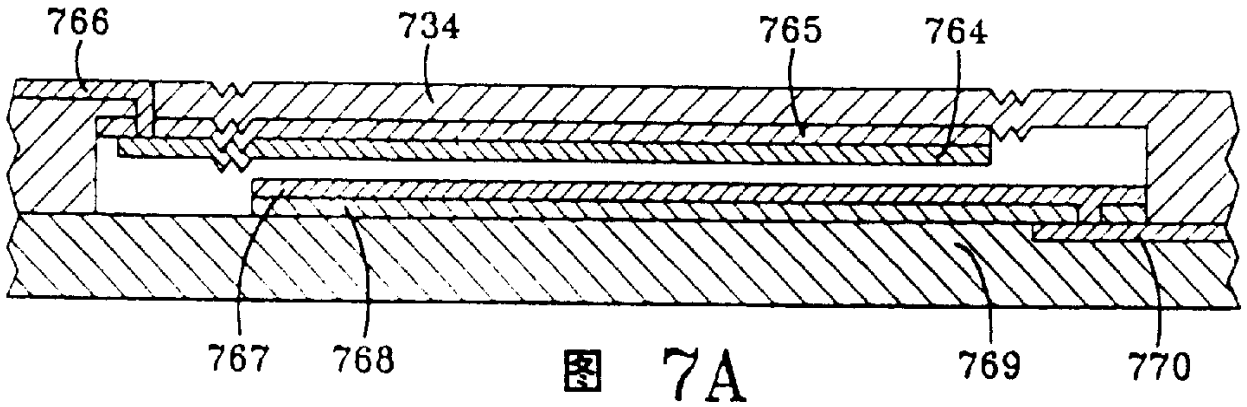

766
734
765
764
767
768
769
770

图 7A

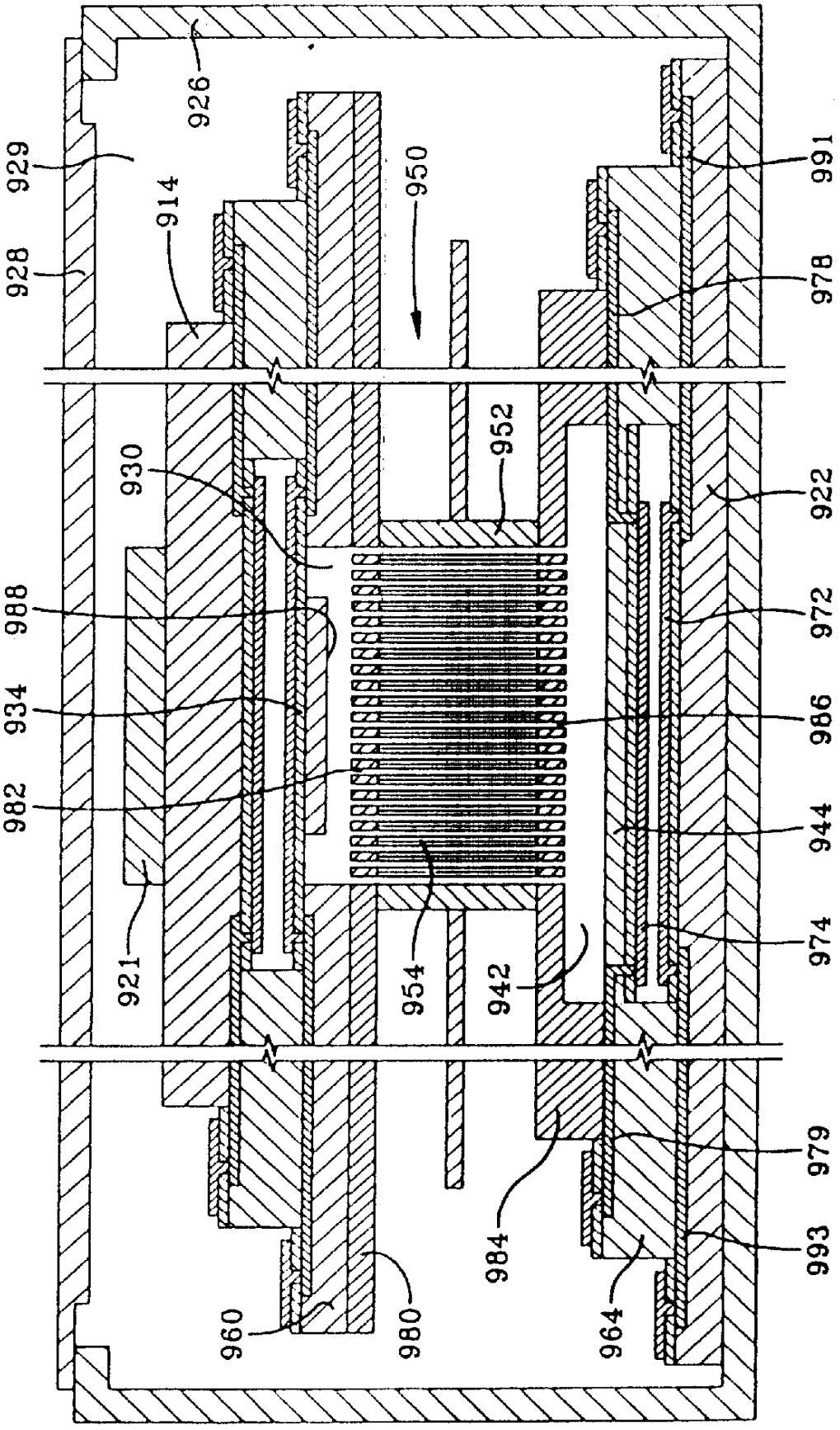

926
929
914
928
950
991
978
930
952
922
988
972
934
986
982
944
921
954
942
974
979
993
984
960
980
964

图 9

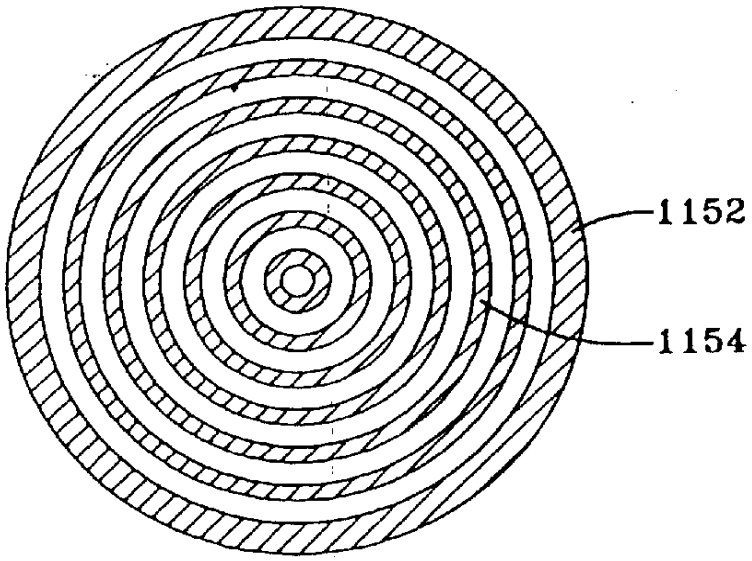


图 10

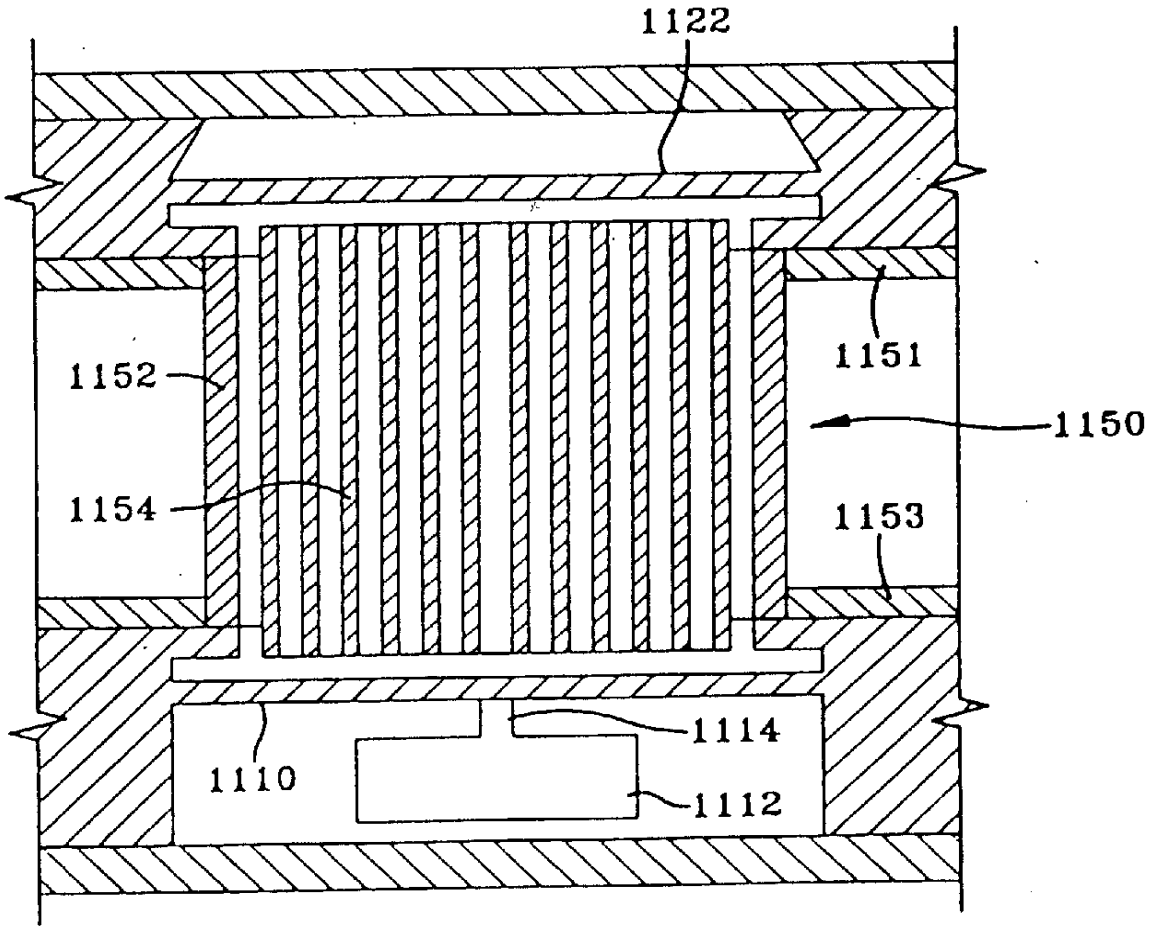


图 11

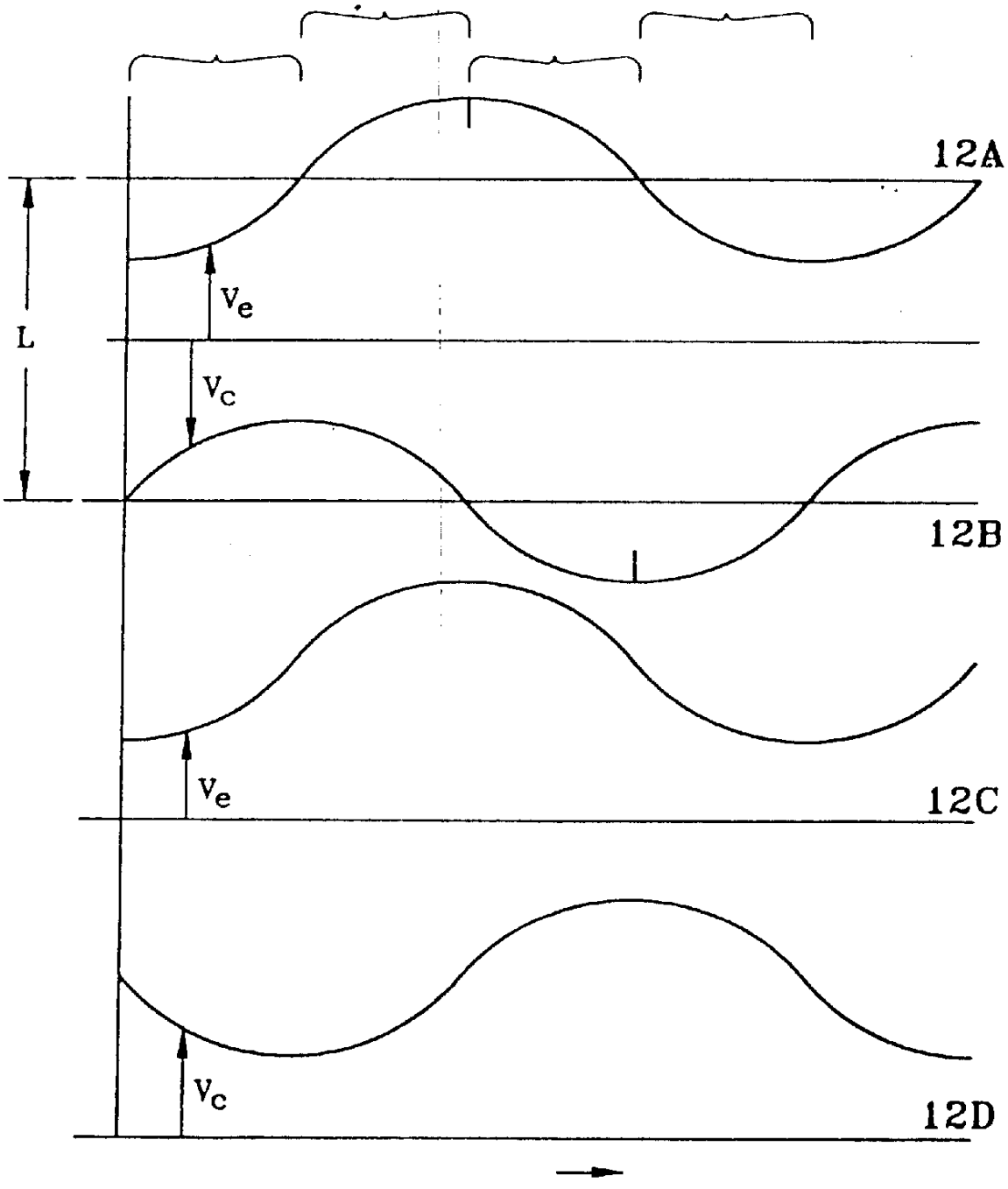
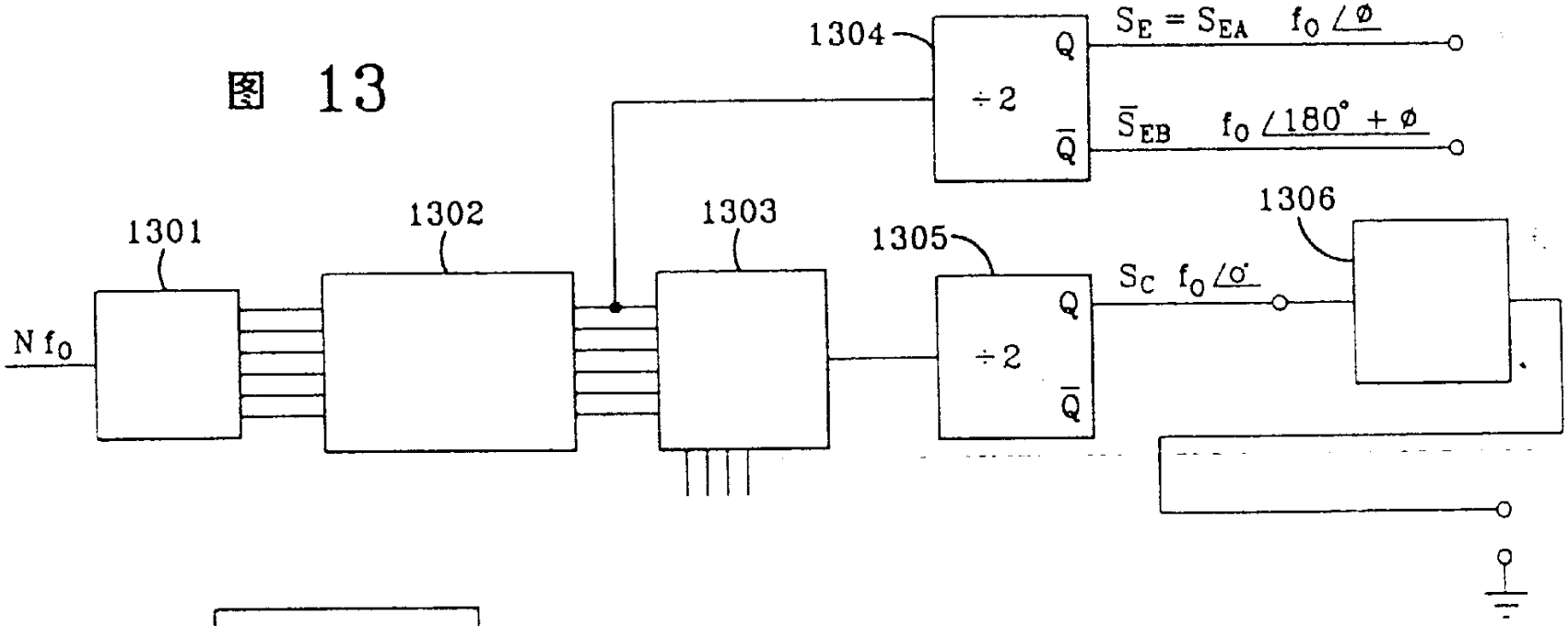


图 12

图 13


1304
÷2
Q
$\bar{Q}$
$S_E = S_{EA}$ $f_0 \angle \phi$
$\bar{S}_{EB}$ $f_0 \angle 180° + \phi$
1301
1302
1303
1305
1306
N f_0
÷2
Q
$\bar{Q}$
S_C $f_0 \angle 0°$

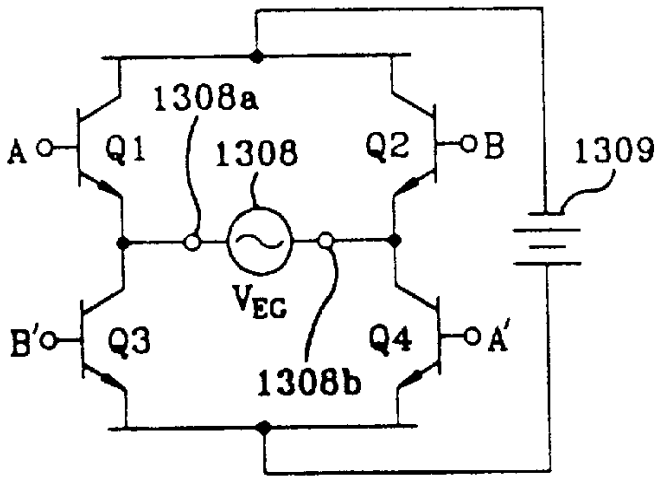

1308a
A
Q1
1308
Q2
B
1309
V_{EC}
B'
Q3
Q4
A'
1308b

图 14

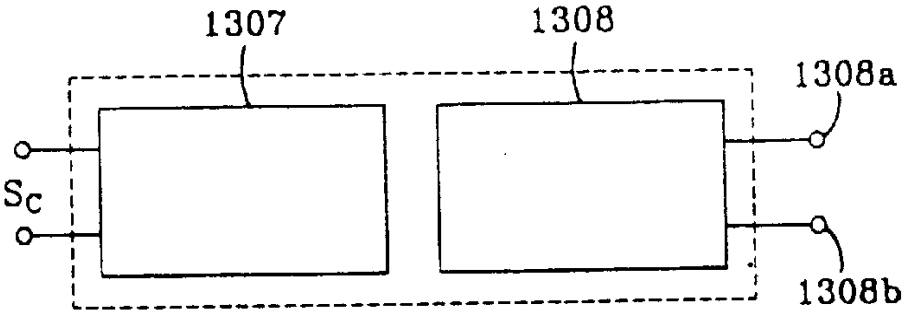

1307
1308
1308a
S_C
1308b

图 15

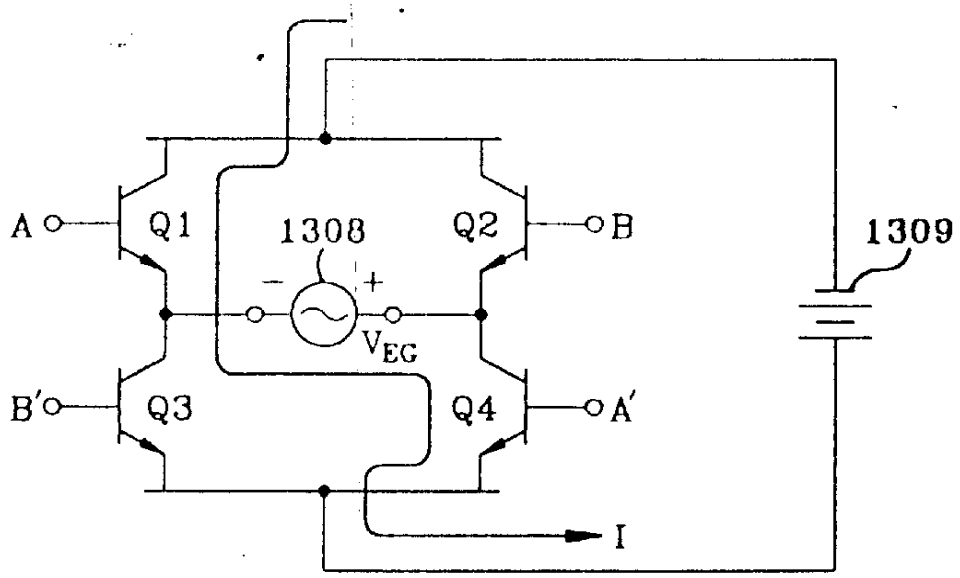


图 16

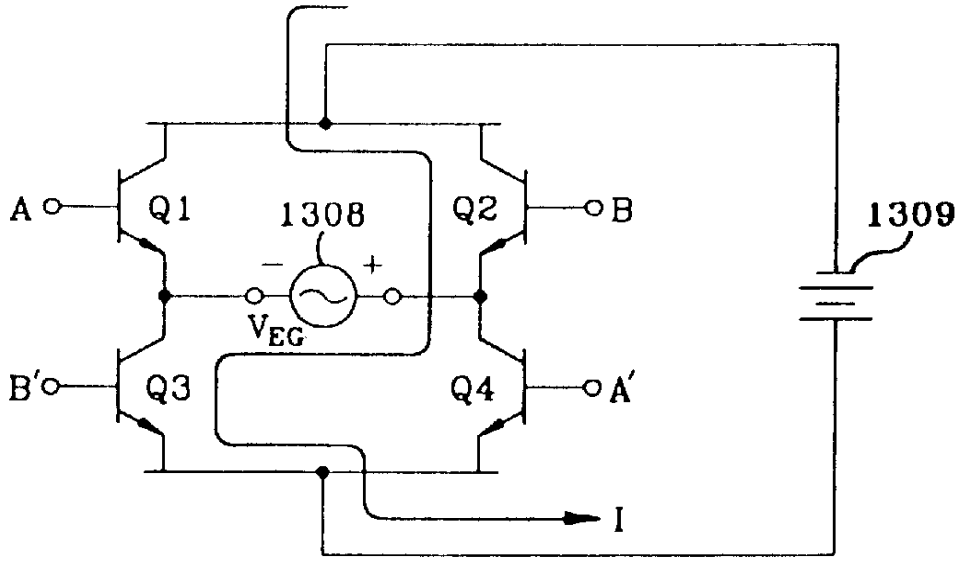


图 17