(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 102576593 B
(45)授权公告日 2014.12.03

(21)申请号 201080045400.4

(22)申请日 2010.08.10

(30)优先权数据
12/538,707 2009.08.10 US
12/830,849 2010.07.06 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2012.04.06

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2010/045013 2010.08.10

(87)PCT国际申请的公布数据
WO2011/019712 EN 2011.02.17

(73)专利权人 沃特拉半导体公司
地址 美国加利福尼亚州

(72)发明人 亚历山德·伊克拉纳科夫

(74)专利代理机构 北京英赛嘉华知识产权代理有限责任公司 11204
代理人 余朦 施蕾

(51)Int.Cl.
H01F 3/10(2006.01)
H01F 30/06(2006.01)
H02M 3/158(2006.01)

(56)对比文件
US 2009/0179723 A1,2009.07.16, 说明书第0131段至第0214段及图24-56.
CN 1695212 A,2005.11.09, 说明书第6页第18行至第11页第16行及图5B、6-9、10A1-、10A-2、10B-1、10B-2.
US 2008/0150666 A1,2008.06.26, 全文.
US 2008/0024259 A1,2008.01.31, 全文.

审查员 胡晓英

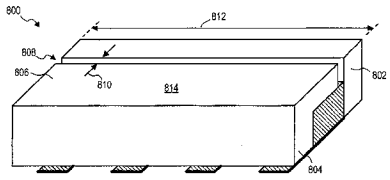
权利要求书2页 说明书11页 附图17页

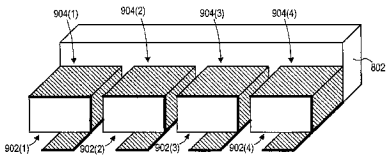
(54)发明名称

具有改进的漏电感控制的耦合电感器

(57)摘要

一种M绕组耦合电感器(800)包括第一端部磁元件(802)、第二端部磁元件(804)、M个连接磁元件(902)以及M个绕组。M是大于1的整数。每个连接磁元件(902)均设在第一端部磁元件(802)和第二端部磁元件(804)之间并且连接第一和第二端部磁元件。每个绕组(904)至少部分地绕M个连接磁元件(902)中的相应的一个连接磁元件缠绕。耦合电感器还包括至少一个顶部磁元件(806),其与M个连接磁元件中的至少两个相邻,并且至少部分在M个连接磁元件中的至少两个上延伸,以提供第一和第二端部磁元件之间的磁通量通路。电感器可以包含在M相电源中,并且电源可以至少部分地对计算机处理器供电。





CN 102576593 B

1. 一种 M 绕组耦合电感器，M 为大于 1 的整数，所述耦合电感器包括：

第一端部磁元件；

第二端部磁元件；

M 个连接磁元件，每个所述连接磁元件设在所述第一端部磁元件和所述第二端部磁元件之间并且连接所述第一和第二端部磁元件；

M 个绕组，每个所述绕组至少部分地绕所述 M 个连接磁元件中的相应的一个连接磁元件缠绕；以及

至少一个顶部磁元件，与所述 M 个连接磁元件中的至少两个连接磁元件相邻，并且至少部分在所述至少两个连接磁元件上延伸，以提供用于所述第一端部磁元件和所述第二端部磁元件之间的磁通量的通路，

所述至少一个顶部磁元件在所述第一端部磁元件之上延伸并与所述第一端部磁元件隔开第一间隙，所述至少一个顶部磁元件在所述第二端部磁元件之上延伸并与所述第二端部磁元件隔开第二间隙，所述第一间隙和所述第二间隙中的每一个包括各自的间隙材料，所述各自的间隙材料具有比形成所述磁元件的一种或多种磁性材料低的导磁率。

2. 如权利要求 1 所述的耦合电感器，每个所述绕组各自的漏电感值是所述第一间隙的厚度的函数以及所述第二间隙的厚度的函数。

3. 如权利要求 2 所述的耦合电感器，还包括选自胶和非磁性间隔件的非磁性材料，所述非磁性材料将所述至少一个顶部磁元件与所述第一端部磁元件和所述第二端部磁元件隔开。

4. 如权利要求 2 所述的耦合电感器，所述 M 个绕组中的至少一个充当所述至少一个顶部磁元件与所述第一端部磁元件和所述第二端部磁元件之间的间隔件。

5. 如权利要求 1 所述的耦合电感器，M 是大于 2 的整数。

6. 如权利要求 1 所述的耦合电感器，所述至少一个顶部磁元件包括单独的顶部磁元件。

7. 如权利要求 1 所述的耦合电感器，每个所述绕组均为具有矩形横截面的单层和单匝绕组。

8. 如权利要求 1 所述的耦合电感器，所述至少一个顶部磁元件形成外表面，所述外表面的至少一部分是平坦的。

9. 如权利要求 1 所述的耦合电感器，每个所述连接磁元件均具有各自的宽度，相邻的连接磁元件之间的分隔距离小于每一相邻的连接磁元件中的各自的宽度的 25％。

10. 如权利要求 1 所述的耦合电感器，每个所述连接磁元件具有各自的宽度，相邻的连接磁元件之间的分隔距离小于每一相邻的连接磁元件中的各自的宽度的 10％。

11. 如权利要求 1 所述的耦合电感器，所述至少一个顶部磁元件与所述 M 个连接磁元件的全部相邻并在之上延伸。

12. 如权利要求 1 所述的耦合电感器，所述耦合电感器具有第一侧，所述第一侧与第二侧相对，所述 M 个绕组中的每一个具有朝所述耦合电感器的所述第一侧延伸的各自第一端，并且所述 M 个绕组中的每一个具有朝所述耦合电感器的所述第二侧延伸的各自第二端。

13. 一种 M 相电源，M 为大于 1 的整数，所述电源包括：

耦合电感器，包括：

第一端部磁元件，

第二端部磁元件，

M 个连接磁元件，每个所述连接磁元件均设在所述第一端部磁元件和所述第二端部磁元件之间并且连接所述第一端部磁元件和所述第二端部磁元件，

M 个绕组，每个所述绕组至少部分地绕所述 M 个连接磁元件的相应的一个连接磁元件缠绕，每个所述绕组均具有各自的第一端、各自的第二端，每个所述第一端与公共第一节点电耦合，以及

至少一个顶部磁元件，与所述 M 个连接磁元件中的至少两个连接磁元件相邻，并且至少部分在所述至少两个上连接磁元件延伸，以提供用于所述第一端部磁元件和所述第二端部磁元件之间的磁通量的通路，

所述至少一个顶部磁元件在所述第一端部磁元件之上延伸并与所述第一端部磁元件隔开第一间隙，所述至少一个顶部磁元件在所述第二端部磁元件之上延伸并与所述第二端部磁元件隔开第二间隙，所述第一间隙和所述第二间隙中的每一个包括各自的间隙材料，所述各自的间隙材料具有比形成所述磁元件的一种或多种磁性材料低的导磁率，每个所述绕组各自的漏电感值为所述第一间隙的厚度的函数和所述第二间隙的厚度的函数；以及

M 个切换电路，每个所述切换电路与相应的绕组的第二端电耦合，且被构造为使所述第二端在至少两个不同的电压之间切换。

14. 如权利要求 13 所述的电源，M 是大于 2 的整数。

15. 如权利要求 13 所述的电源，每个所述连接磁元件具有各自的宽度，相邻的连接磁元件之间的分隔距离小于每一相邻的连接磁元件中的各自的宽度的 25％。

16. 如权利要求 13 所述的电源，每个切换电路配置为在至少 20 千赫的频率下使其相应的第二端在至少两个不同的电压之间切换。

17. 如权利要求 13 所述的电源，所述电源配置成作为选自升压型变换器、降压型变换器以及降压－升压型变换器的直流－直流变换器来操作。

具有改进的漏电感控制的耦合电感器

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请是2009年8月10提交的序号为12/538,707的美国专利申请的继续申请，该美国专利申请的内容均通过引用并入本文。

背景技术

[0003] Schultz等人提出的第6,362,986号美国专利（“Schultz’986”）描述了具有多相耦合电感器拓扑的直流－直流变换器，其公开的内容通过引用并入本文。这种变换器具有的优点包括电感器和切换器中具有减小的波纹电流，这能够在具有传统多相直流－直流变换器拓扑的变换器上减少每相的电感，或者减少切换频率。因此，与传统的多相拓扑相比，具有磁耦合电感器的直流－直流变换器具有优异的瞬态响应，并且不损失效率。这使得输出电容显著下降，从而使解决方案的成本更小更低。

[0004] 如Schultz’986中所描述的，采用耦合电感器的直流－直流变换器的性能受到耦合电感器的漏电感的影响。因此，会期望针对电感器的应用来定制或调节耦合电感器的漏电感。

[0005] 已经提出了一些耦合电感器。例如，图1至3示出了由沃特拉半导体公司(Volterra Semiconductor Corporation)开发的一个耦合电感器100。具体地，图1示出了耦合电感器100的侧视平面图，图2示出了其截面图，以及图3示出了其端视平面图。具有高度106的耦合电感器100包括磁芯102和两个或更多个绕组104。图4示出了耦合电感器100的一个绕组104的侧视立体图。

[0006] 作为另一示例，Dong等人在标题为“Twisted Core Coupled Inductors for Microprocessor Voltage Regulators(用于微处理器稳压器的绞合芯耦合电感器)”的论文中提出了双相“绞合芯”耦合电感器。然而，该耦合电感器具有容积利用率较低的复合芯。另外，漏电感是由垂直型芯结构之间的距离和这些结构的高度限定的，因此很难控制漏电感。而且，该绞合芯耦合电感器的泄漏通路使电感器的设计变得复杂。

[0007] 此外，Dong等人在标题为“The Short Winding Path Coupled Inductor Voltage Regulators(短绕组通路耦合电感器稳压器)”的论文中提出了一种耦合电感器。图5示出了一个耦合电感器500的俯视平面图，示出了Dong的论文中的多相耦合电感器。图5没有示出绕组以更清晰地示出芯502。但是图6示出了包括其绕组602的电感器500。

[0008] 芯502包括用于每相的相应的腿504。每个腿504都具有宽度508，并且相邻的腿504被具有宽度510的窗口506分隔开。因此，绕组602具有节距604，如图6和图7所示。窗口宽度510相对较大并与腿的宽度508相似。大的窗口宽度510需要提供用于泄漏段512的空间，其需要提供用于磁通泄漏的通路，从而使漏电感足够大。通过改变泄漏段512的尺寸和/或形状来改变漏电感，这可能需要改变芯502的尺寸和/或形状。窗口506还容纳有相应的绕组突出部，如图6所示。

[0009] 图7示出了沿着图5中A-A线的电感器500的横截面图。每个区域702对应于相应的腿504的区域，每个区域704对应于相应的泄漏段512的区域。图7中的绕组602的

厚度被夸大以用于视图清楚。如图 5-7 所示，绕组 602 之间较大的空间被要求以控制通过泄漏段 512 的漏电感。

发明内容

[0010] 在一个实施方式中，一种 M 绕组耦合电感器包括第一端部磁元件、第二端部磁元件、M 个连接磁元件以及 M 个绕组。M 是大于 1 的整数。每个连接磁元件均设在第一端部磁元件和第二端部磁元件之间并且连接第一和第二端部磁元件。每个绕组至少部分地绕 M 个连接磁元件中的相应的一个连接磁元件缠绕。耦合电感器还包括至少一个顶部磁元件，其与 M 个连接磁元件中的至少两个连接磁元件相邻并至少部分在所述至少两个连接磁元件上延伸，以提供第一和第二端部磁元件之间的磁通量通路。

[0011] 在一个实施方式中，一种 M 相电源包括耦合电感器和 M 个切换电路。M 为大于 1 的整数。耦合电感器包括 ：第一端部磁元件、第二端部磁元件、M 个连接磁元件以及 M 个绕组。每个连接磁元件均设在第一和第二端部磁元件之间并且连接第一和第二端部磁元件。每个绕组至少部分地绕所述 M 个连接磁元件的相应的一个连接磁元件缠绕。每个绕组均具有各自的第一端、各自的第二端，每个第一端与公共第一节点电耦合。耦合电感器还包括至少一个顶部磁元件，其与 M 个连接磁元件中的至少两个连接磁元件相邻，并且至少部分在所述至少两个连接磁元件上延伸，以提供用于第一和第二端部磁元件之间的磁通量的通路。每个切换电路与相应的绕组的第二端电耦合，且被构造为使第二端在至少两个不同的电压之间切换。

附图说明

[0012] 图 1 示出了一个现有技术多相耦合电感器的侧视平面图 ；

[0013] 图 2 示出了图 1 的现有技术耦合电感器的截面图 ；

[0014] 图 3 示出了图 1 的现有技术耦合电感器的端视平面图 ；

[0015] 图 4 示出了图 1 的现有技术耦合电感器的绕组的侧视立体图 ；

[0016] 图 5 示出了没有绕组的现有技术多相耦合电感器的俯视平面图 ；

[0017] 图 6 示出了图 5 的现有技术耦合电感器具有绕组时的俯视平面图 ；

[0018] 图 7 示出了图 5 和图 6 的现有技术耦合电感器的截面图 ；

[0019] 图 8 示出了根据实施方式的一个耦合电感器的俯视立体图 ；

[0020] 图 9 示出了图 8 的耦合电感器的侧视立体图，其中磁元件被去除 ；

[0021] 图 10 示出了图 8 的耦合电感器的另一侧视立体图，其中磁元件和绕组被去除 ；

[0022] 图 11 示出了图 8 的耦合电感器的又一侧视立体图，其中磁元件被去除 ；

[0023] 图 12 示出了图 8 的耦合电感器的俯视平面图 ；

[0024] 图 13 示出了图 12 的耦合电感器的侧视截面图 ；

[0025] 图 14-18 示出了能够与图 8 的耦合电感器一起使用的绕组的示例的侧视立体图 ；

[0026] 图 19 示出了图 8 的耦合电感器具有可选的绕组配置时的实施方式的俯视平面图 ；

[0027] 图 20 示出了根据实施方式的包括两个顶部磁元件的一个耦合电感器的侧视立体图 ；

[0028] 图 21 示出了根据实施方式的一个双绕组耦合电感器的侧视立体图；

[0029] 图 22 示出了根据实施方式的一个三绕组耦合电感器的端部磁元件形成开口时的侧视立体图；

[0030] 图 23 示出了根据实施方式的一个四绕组耦合电感器的端部磁元件形成开口时的侧视立体图；

[0031] 图 24 示出了图 23 的耦合电感器的侧视立体图，其中磁元件被去除；

[0032] 图 25 示出了根据实施方式的一个双绕组耦合电感器的侧视立体图；

[0033] 图 26 示出了图 25 的耦合电感器的侧视平面图；

[0034] 图 27 示出了根据实施方式的一个三绕组耦合电感器的侧视立体图；

[0035] 图 28 示出了图 27 的耦合电感器的侧视平面图；

[0036] 图 29 示出了根据实施方式的一个四绕组耦合电感器的侧视立体图；

[0037] 图 30 示出了图 29 的耦合电感器的侧视平面图；

[0038] 图 31 示出了根据实施方式的一个四绕组耦合电感器的侧视立体图；

[0039] 图 32 示出了图 31 的耦合电感器的另一侧视立体图；

[0040] 图 33 示出了图 31 的耦合电感器的可选实施方式的侧视立体图；

[0041] 图 34 示出了根据实施方式的一个耦合电感器的俯视立体图；

[0042] 图 35 示出了图 34 的耦合电感器的磁芯的俯视立体图，其中顶部磁元件被去除；

[0043] 图 36 示出了图 34 的耦合电感器具有透明地示出的磁芯时的俯视立体图；

[0044] 图 37 示出了图 34 的耦合电感器的侧视图；

[0045] 图 38-40 均示出了包括至少一个非磁性间隔件的相应的耦合电感器的俯视立体图；

[0046] 图 41 示出了图 34 的耦合电感器的可选实施方式的侧视图；

[0047] 图 42 示出了根据实施方式的一个电源；

[0048] 图 43 示出了根据实施方式的包含耦合电感器的一个计算设备。

具体实施方式

[0049] 应当注意，为使视图清楚，附图中某些元件没有按照比例示出。通过使用带有括号的数字来表示项目的具体示例（例如绕组 904(1)），而不带括号的数字则表示任意该项目（例如，绕组 904）。

[0050] 图 8 示出了一个 M 绕组耦合电感器 800 的俯视立体图。示出的耦合电感器 800 中 M 等于四。然而，M 可以为大于 1 的任意整数。耦合电感器 800 包括第一端部磁元件 802、第二端部磁元件 804 以及顶部磁元件 806，它们中的每一个均由磁性材料形成（例如，铁氧体材料和 / 或铁粉材料）。第一和第二端部磁元件 802、804 例如彼此平行。虽然所示的第二端部磁元件 804 和顶部磁元件 806 为组合成单一的磁元件，但是这些磁元件也能够是分立的磁元件。在一些实施方式中，顶部磁元件 806 形成至少基本平坦的表面 814，这会有利于电感器 800 无需其顶部的粘着剂就可自动地设置。

[0051] 顶部磁元件 806 提供用于磁通量在第一端部磁元件 802 与第二端部磁元件 804 之间行进的通路。因此，顶部磁元件 806 提供了用于泄漏磁通量的通路，这有助于电感器 800 的绕组的漏电感值。顶部磁元件 806 还形成具有厚度 810 的间隙 808。虽然所示的间隙 808

沿耦合电感器 800 的整个长度 812 延伸，但是间隙 808 也能够配置为仅沿长度 812 的一部分延伸，例如如果需要非线性的漏电感值。

[0052] 图 9 示出了耦合电感器 800 的侧视立体图，其中去除了第二端部磁元件 804 和顶部磁元件 806，以示出连接磁元件 902 和绕组 904。耦合电感器 800 包括 M 个由磁性材料形成的连接磁元件 902，M 个连接磁元件 902 设置在第一和第二端部磁元件 802、804 之间并连接第一和第二端部磁元件 802、804。因此，顶部磁元件 806 与连接磁元件 902 中的每一个相邻，并且至少部分在连接磁元件 902 中的每一个上延伸。相应的绕组 904（用平行阴影线示出）至少部分地绕 M 个连接磁元件 902 中的相应的一个连接磁元件缠绕。图 10 示出了耦合电感器 800 的侧视立体图，其中去除了第二端部磁元件 804、顶部磁元件 806 以及绕组 904，以便更好地示出连接磁元件 902。每个连接磁元件 902 均具有各自的宽度 1002。虽然所示的连接磁元件 902 为矩形并具有相同的宽度 1002，但是它们的形状可以改变（例如，圆形的），并且连接磁元件 902 的每一个示例不需具有等同的宽度 1002。

[0053] 间隙 808 包括（例如至少部分地填充有）这样的材料，其导磁率低于形成第一端部磁元件 802、第二端部磁元件 804、顶部磁元件 806 以及连接磁元件 902 中的一种或多种磁性材料。例如，间隙 808 可包括非磁性材料，例如空气、绝缘带、塑料、胶和 / 或纸。作为另一示例，间隙 808 可以选择性地包括可饱和磁性材料，其在耦合电感器 800 的预期的正常运行期间饱和，从而使绕组 904 具有非线性的漏电感值。顶部磁元件 806 和间隙 808 通常是每一个绕组 904 的各自漏电感的最主要来源。因此，通过改变间隙 808 的厚度 810 可以改变漏电感，其中漏电感与厚度 810 成比例地增加。

[0054] 图 11 示出了与图 8-10 的侧视立体图相对的电感器 800 的侧视立体图。在图 11 中，第一端部磁元件 802 被去除。图 12 是耦合电感器 800 的俯视平面图，其中短划线表示被磁元件遮蔽的绕组 904 的轮廓。绕组 904 具有节距 1202，节距 1202 例如等于在其中设置有耦合电感器 800 的直流 - 直流变换器的功率级的节距，从而使电路板迹长最小化以及使直流 - 直流变换器的功率密度最大化。虽然所示的节距 1202 为每一对绕组 904 的节距相同，但是节距 1202 也可以在各对绕组中改变，例如以容纳功率级的几何结构。

[0055] 图 13 示出了沿图 12 的线 B-B 所得的电感器 800 的截面图。区域 1302 表示连接磁元件 902 的区域，连接磁元件 902 被具有各自的宽度 1306 的窗口 1304 分隔。区域 1308 表示顶部磁元件 806 的截面。图 13 中绕组 904 的厚度被夸大以用于使视图清楚。每一个窗口 1304 不必具有相同的宽度 1306。窗口宽度 1306 能够变小，因为连接磁元件 902 无需隔开来提供用于泄漏段的空间以增加漏电感。相反，如以上所讨论的，漏电感主要由顶部磁元件 806 和间隙 808 造成。实际上，窗口宽度 1306 能够尽可能的小，例如仅大到防止绕组 904 短路。例如，在一些实施方式中，窗口宽度 1306 小于连接磁元件宽度 1002 的 50％、25％或 10％。因此，在一些实施方式中，相邻的连接磁元件 902 分隔的分隔距离（即，窗口宽度 1306）小于其中任一相邻的连接磁元件的各自的宽度 1002 的 50％、25％或 10％。构造耦合电感器 800 使得窗口宽度 1306 相对较小，可以有利地增加耦合电感器 800 中用于将绕组有磁性地耦合在一起的容积的部分，如以下所讨论的那样。

[0056] 绕组 904 例如为具有至少基本矩形横截面的单匝、单层绕组，以有助于使绕组电阻最小化。图 14 示出了一个绕组 904 的侧视立体图，图 15 示出了一个绕组 904 的部分透明的视图。然而，绕组 904 能够具有其它构造。例如，图 16-18 示出了其它可能的绕组构造

的示例。作为另一示例，图 19 示出了一个耦合电感器 1900 的俯视平面图，其是耦合电感器 800 的三绕组的实施方式。耦合电感器 1900 包括绕组 1902，绕组 1902 例如由传导材料（例如，铜）的矩形片材形成。在图 19 的俯视平面图中不可视的绕组 1902 的边缘用虚线画出。另外，在图 19 的俯视平面图中无法看到的连接磁元件的边缘也用虚线画出。

[0057] 虽然所示的每一个绕组 904 均具有从侧面 1204 和 1206 之一延伸出的端部（参见图 12），但是绕组 904 能够以不同的方式从电感器 800 延伸，或者完全不延伸。例如，一个或多个绕组 904 的每个端部可从电感器 800 的公共侧伸出，例如以符合功率级的布局要求。另外，绕组 904 能够改为包括通孔销或耦合于通孔销。

[0058] 顶部磁元件 806 的构造能够变化。例如，顶部磁元件 806 能够用两个或更多个顶部磁元件替换，例如图 20 所示。具体地，图 20 示出了一个耦合电感器 2000 的侧视立体图，其是耦合电感器 800 的可选实施方式。在耦合电感器 2000 中，第一顶部磁元件 2002 在连接磁元件之上从第一端部磁元件 2004 延伸出，而第二顶部磁元件 2006 在连接磁元件之上从第二端部磁元件 2008 延伸出。顶部磁元件 2002、2006 形成间隙 2010。

[0059] 在 M 相对较大的耦合电感器 800 的实施方式中，电感器 800 的长度 812 会相对较长，以容纳 M 个连接磁元件 902 中的每一个连接磁元件。电感器 800 的这种相对长的长度 812 将增加与厚度 810 正交的间隙 808 的截面面积，从而增加绕组 904 的漏电感值。如果漏电感不期望的大，那么能够通过增加间隙 808 的厚度 810 来减小漏电感。因此，当绕组数增加时，间隙 808 的厚度 810 可以增加以保持所期望的漏电感。

[0060] 顶部磁元件 806、第一端部磁元件 802 和 / 或第二端部磁元件 804 的构造也能够改变，以确定绕组的漏电感值。例如，在邻近于磁元件 806 的端部磁元件 802、804 中的一个或者多个中能够形成开口，从而在绕组数增加的情况下保持所需的间隙截面面积（并由此保持所需的漏电感值）。图 21-24 示出了这种技术的一个示例。

[0061] 图 21 示出了一个耦合电感器 2100 的侧视立体图，其是耦合电感器 800 的双绕组的实施方式。耦合电感器 2100 包括第一端部磁元件 2102、第二端部磁元件 2104 以及形成间隙 2108 的顶部磁元件 2106。间隙 2108 具有厚度 2110，厚度 2110 主要确定电感器的绕组的漏电感值。

[0062] 图 22 示出了一个耦合电感器 2200 的侧视立体图，其是耦合电感器 800 的三绕组的可选实施方式。耦合电感器 2200 包括第一端部磁元件 2202、第二端部磁元件 2204 以及顶部磁元件 2206。第一端部磁元件 2202 形成开口 2208，这导致顶部磁元件 2206 形成两个间隙 2210，每个间隙 2210 均具有各自的厚度 2212，厚度 2212 与电感器 2100（图 21）的间隙 2108 的厚度 2110 相同。选择开口 2208 的尺寸，以使得与两个间隙 2210 的厚度 2212 正交的两个间隙 2210 的全部截面面积约等于与电感器 2100 的间隙 2108 的厚度 2110 正交的间隙 2108 的截面面积。因此，尽管电感器 2200 具有更多的绕组以及与电感器 2100 相同的间隙厚度，但是耦合电感器 2200 具有大约与电感器 2100 相同的绕组漏电感值。

[0063] 图 23 示出了一个耦合电感器 2300 的侧视立体图，其是耦合电感器 800 的四绕组的实施方式，耦合电感器 2300 包括第一端部磁元件 2302、第二端部磁元件 2304 以及顶部磁元件 2306。耦合电感器 2300 与耦合电感器 2200 类似（图 22）。但是，耦合电感器 2300 包括四个绕组，并且第一端部磁元件 2302 中所形成的开口 2308 的尺寸被选择，以使得与间隙 2310 的厚度 2312 正交的间隙 2310 的全部截面面积约等于与电感器 2100（图 21）的间

隙 2108 的厚度 2110 正交的间隙 2108 的截面面积。每个间隙 2310 的厚度 2312 均与电感器 2100 的间隙 2108 的厚度 2110 相同。因此，尽管耦合电感器 2300 具有更多的绕组以及与电感器 2100 和 2200 相同的间隙厚度，但是耦合电感器 2300 具有大约与耦合电感器 2100 和 2200 相同的绕组漏电感值。

[0064] 图 24 示出了电感器 2300 的侧视立体图，其中第二端部磁元件 2304 和顶部磁元件 2306 被去除。在图 24 中可以看见连接磁元件 2402 和绕组 2404。

[0065] 因此，如图 21-24 所示，通过在与顶部磁元件邻近的端部磁元件中增加开口，能够在绕组数增加时将漏电感保持在期望值处，这里开口的尺寸被选择以实现期望的全部间隙的总截面面积，并因而实现期望的绕组漏电感。在具有大量绕组的实施方式中，开口尺寸通常稍微大于实现期望的间隙截面面积所需的开口尺寸，这是因为一些磁通量将会经过该开口。

[0066] 顶部磁元件 806 的构造也能够改变，从而在绕组数增加时保持所需的间隙截面面积（并因而保持所需的绕组漏电感值）。图 25-30 示出了这种技术的一个示例。

[0067] 图 25 示出了一个耦合电感器 2500 的侧视立体图，其是耦合电感器 800（图 8）的双绕组的可选实施方式。图 26 示出了耦合电感器 2500 的侧视平面图。耦合电感器 2500 包括第一端部磁元件 2502、第二端部磁元件 2504 以及形成间隙 2508 的顶部磁元件 2506。例如由非磁性材料形成的间隔件（未示出）可选地包含在间隙 2508 中，以利于在制造电感器 2500 期间对间隙 2508 进行控制。间隙 2508 跨越耦合电感器 2500 的全部长度 2510，并且间隙 2508 具有厚度 2602（参见图 26）。整个顶部外表面 2512 例如至少为基本平坦的，以利于无需耦合电感器 2500 顶部的粘着剂就可自动放置电感器 2500。

[0068] 图 27 示出了一个耦合电感器 2700 的侧视立体图，图 28 示出了其侧视平面图，耦合电感器 2700 是耦合电感器 2500 的三绕组可选实施方式。耦合电感器 2700 包括第一端部磁元件 2702、第二端部磁元件 2704 以及形成具有厚度 2802 的间隙 2804（参见图 28）的顶部磁元件 2706，厚度 2802 与间隙 2508 的厚度 2602 相同。然而，与耦合电感器 2500 相比，间隙 2804 没有跨越电感器 2700 的整个长度 2710。相反地，顶部磁元件 2706 被构造使得与间隙 2804 的厚度 2802 正交的间隙 2804 的截面面积约等于与间隙 2508 的厚度 2602 正交的电感器 2500 的间隙 2508 的截面面积。因此，尽管电感器 2700 具有更多的绕组以及与电感器 2500 相同的间隙厚度，但是电感器 2700 的绕组漏电感值大约与电感器 2500 相同。

[0069] 图 29 示出了一个耦合电感器 2900 的侧视立体图，图 30 示出了耦合电感器 2900 的侧视平面图，耦合电感器 2900 是耦合电感器 2500 的四绕组可选实施方式。耦合电感器 2900 包括第一端部磁元件 2902、第二端部磁元件 2904 以及形成具有厚度 3002 的间隙 3004（参见图 30）的顶部磁元件 2906，厚度 3002 与间隙 2508 的厚度 2602 相同。与电感器 2700 类似，顶部磁元件 2906 被构造使得与间隙 3004 的厚度 3002 正交的间隙 3004 的截面面积约等于与电感器 2500（图 25）的间隙 2508 的厚度 2602 正交的间隙 2508 的截面面积。因此，尽管电感器 2900 具有更多的绕组以及与电感器 2500 和 2700 相同的间隙厚度，但是电感器 2900 的绕组漏电感值大约与电感器 2500 和 2700 相同。

[0070] 图 31 示出了一个耦合电感器 3100 的侧视立体图，其是耦合电感器 800（图 8）的可选实施方式并且包括耦合电感器 2300（图 23）和耦合电感器 2900（图 29）的一些特征。耦合电感器 3100 包括第一端部磁元件 3102、第二端部磁元件 3104 以及顶部磁元件 3106，

顶部磁元件 3106 提供用于磁通量在第一端部磁元件 3102 与第二端部磁元件 3104 之间行进的通路。顶部磁元件 3106 还形成间隙 3108。顶部磁元件 3106 形成延伸部 3110，延伸部 3110 延伸进第一端部磁元件 3102 中的开口 3112，但是不接触第一端部磁元件 3102。图 32 示出了与图 31 的侧视立体图相对的电感器 3100 的侧视立体图。由于间隙 3108 的整个截面面积相对较大，所以电感器 3100 的绕组漏电感值可能相对较大。然而，电感器 3100 的大量间隙 3108 可以提供在确定绕组漏电感值时显著的灵活性。

[0071] 图 33 是一个耦合电感器 3300 的侧视立体图，其是耦合电感器 3100（图 33）的可选实施方式。耦合电感器 3300 与耦合电感器 3100 类似。然而，与耦合电感器 3100 相比，耦合电感器 3300 的顶部磁元件 3302 没有在全部连接磁元件 3304 上延伸，从而减少了间隙截面面积。因此，耦合电感器 3300 通常具有比类似的实施方式的耦合电感器 3100 更小的漏电感值。

[0072] 耦合电感器 800 与其它耦合电感器相比可具有一些潜在优势。一个潜在优势在于耦合电感器 800 与具有类似的电感以及电流容量特性的其它耦合电感器相比可具有更小的占重面积 (footprint)。具体地，漏电感主要通过顶部元件 806 和间隙 808 产生并控制。因此，无需用于增加漏电感的其它特征，这些特征通常会增加电感器的占重面积大小。例如，在耦合电感器 800 中不需要电感器的端部或者绕组之间的泄漏段中所添加的具有间隙的外置腿（例如，参见图 5-7 的电感器 500），这些外置腿被用在其它耦合电感器中以增加漏电感值。

[0073] 另外，如上所述，漏电感能够通过改变间隙 808 的厚度 810 来调节。因此，可容易地调节漏电感，例如通过仅对顶部磁元件 806 进行磨压。相反地，必须改变磁芯几何结构和 / 或泄漏段来调节耦合电感器 100（图 1-3）或耦合电感器 500（图 5-7）的漏电感。

[0074] 此外，耦合电感器 800 无需具有绕组之间的宽窗口宽度 1306，从而有助于使对于磁性地耦合绕组可用的磁芯截面的一部分最大化。例如，在图 13 中，大部分的截面被使绕组 904 耦合在一起的磁性材料占据一仅窗口 1304 没有包括磁性材料。因此，电感器 800 可具有比具有类似的绕组节距的其它电感器更大的磁化电感，这增加了绕组之间的磁耦合、增加了漏电感的均匀性以及绕组之间的磁化电感、增加了对由于绕组电流失配而引起饱和的抗性和 / 或减少了磁芯损耗。另外，耦合电感器 800 的一些实施方式提供的大量磁耦合可采用导磁率较低的芯材，从而减少磁芯损耗。

[0075] 相反地，在一些其它的耦合电感器中，例如耦合电感器 100（图 1-3）或耦合电感器 500（图 5-7），电感器容积的大部分不用于将绕组磁性耦合在一起。通过对比图 7 和图 13 可以理解这样的事实，与相同的绕组节距的耦合电感器 500 相比，耦合电感器 800 包括明显更多的将绕组磁性耦合在一起的磁性芯材。

[0076] 另外，耦合电感器 800 的某些实施方式允许绕组 904 具有较短的长度和较宽的宽度，从而减小绕组电阻以及相关的功率损耗。相反地，一些现有技术的耦合电感器需要长得多的绕组，例如耦合电感器 100 的绕组 104 的长度所示的那样（参见图 4）。

[0077] 而且，耦合电感器 800 的一些实施方式不需要薄的磁芯片，从而利于机械强度、制造、运输、处理和 / 或组装。相反地，一些其它的耦合电感器需要薄的磁芯片，这些薄的磁芯片易碎且难于制造、运输、处理和 / 或组装。例如，耦合电感器 100（图 1）的芯 102 可能需要薄的顶片和薄的底片。

[0078] 图 34 示出了一个 M 绕组耦合电感器 3400 的俯视立体图。所示的耦合电感器 3400 中的 M 等于四。然而，M 可以是大于 1 的任意整数。耦合电感器 3400 与耦合电感器 800 类似，但包括与其主要的泄漏通量通路相连的两个间隙。具体地，耦合电感器 3400 包括磁芯 3402，磁芯 3402 包括第一和第二端部磁元件 3404 和 3406 以及顶部磁元件 3408。第一间隙 3410 将顶部磁元件 3408 与第一端部磁元件 3404 隔开，而第二间隙 3412 将顶部磁元件 3408 与第二端部磁元件 3406 隔开。第一和第二间隙 3410、3412 均包括各自的间隙材料（例如，空气、绝缘带、塑料、胶和 / 或纸），这些间隙材料具有比形成磁芯 3402 的一种或多种磁性材料更低的导磁率。顶部磁元件 3408 形成外表面或上表面 3422，并且在某些实施方式中，至少一部分的表面 3422 至少为基本平坦的。

[0079] 图 35 示出了芯 3402 的俯视立体图，其中顶部磁元件 3408 被去除。芯 3502 包括设在第一和第二端部磁元件 3404、3406 之间并连接第一和第二端部磁元件 3404、3406 的 M 个连接磁元件 3414。因此，顶部磁元件 3408 与连接磁元件 3414 中的每一个相邻，并且至少部分在连接磁元件 3414 中的每一个之上延伸。第一和第二端部磁元件 3404、3406 例如彼此平行，以使得磁芯 3402 形成梯状芯。虽然所示的芯 3402 的磁元件为接合以形成磁芯 3402 的分立磁元件，但是磁元件中的一个或多个能够组合成单独的磁元件（例如，连接磁元件 3414 和第一端部磁元件 3404 能够组合成单独的磁元件）。

[0080] 耦合电感器 3400 还包括至少部分绕每一个连接磁元件 3414 缠绕的相应的绕组 3416。图 36 示出了耦合电感器 3400 的俯视立体图，其中所示的磁芯 3402 为透明的以示出绕组 3416。绕组 3416 的构造可以改变为，例如类似于图 16-18 的示例中的那些。图 37 示出了耦合电感器 3400 的侧部 3418 的视图。

[0081] 非磁性材料 3708（图 37），例如，胶、环氧树脂和 / 或一个或多个非磁性间隔件通常设置在磁性 3402 的顶部磁元件 3408 与一个或多个其它元件之间（例如，第一和第二端部磁元件 3404、3406），以将顶部磁元件 3408 与第一和第二端部磁元件 3404、3406 隔开，从而产生第一和第二间隙 3410、3412。磁性间隔件可选地为粘合剂，并且在这种情况下，将顶部磁元件 3408 至少部分地固定至第一和第二端部磁元件 3404、3406。也可以使用胶将顶部磁元件 3408 至少部分地固定至第一和第二端部磁元件 3404、3406。图 38-40 分别示出了耦合电感器 3800、3900 以及 4000 的俯视立体图，其中的每一个均为耦合电感器 3400 的实施方式，其包括将顶部磁元件 3408 与第一和第二端部磁元件 3404、3406 隔开的一个或多个非磁性间隔件 3802。图 38-40 中所示的芯 3402 为透明的，以示出非磁性间隔件 3802。

[0082] 在某些可选的实施方式中，耦合电感器的绕组中的至少一个绕组充当芯的顶部磁元件与一个或多个其它元件之间的间隔件。例如，图 41 示出了耦合电感器 4100 的侧视图，其是耦合电感器 3400 的可选实施方式，其中绕组 4102（类似于绕组 3416）有助于使顶部磁元件 4104 与第一和第二端部磁元件 4106、4108 隔开。例如胶或环氧树脂的粘合材料（未示出）通常被用于将顶部磁元件 4104 保持在耦合电感器 4100 的剩余部。这种粘合材料通常也有助于使顶部磁元件 4104 与端部磁元件 4106、4108 隔开。使用绕组 4102 作为顶部磁元件 4104 与端部磁元件 4106、4108 之间的间隔件可以有助于精确地控制间隙厚度 4110、4112。

[0083] 顶部磁元件 3408 提供用于磁通量在第一端部磁元件 3404 与第二端磁元件 3406 之间行进的通路。因此，顶部磁元件 3408 提供用于泄漏磁通量的通路，并且第一和第二间

隙 3410、3412 均与顶部磁元件 3408 的泄漏通量通路相连。因此，顶部磁元件 3408 以及第一和第二间隙 3410、3412 通常是每个绕组 3416 的各自的漏电感的最主要来源。因此，可以通过改变第一间隙 3410 的厚度 3702 和 / 或第二间隙 3412 的厚度 3704（参见图 37）改变漏电感，这里漏电感与厚度 3702、3704 成比例地增加。由于耦合电感器 3400 在其泄漏通量通路中包括两个间隙 3410、3412，所以间隙 3410、3412 通常会比在其泄漏通量通路中仅包括单个间隙的电感器的泄漏通量通路更薄。

[0084] 虽然所示的厚度 3702、3704 与图 37 相同，但是厚度 3702 不必与厚度 3704 相同。此外，虽然所示的第一和第二间隙 3410、3412 中的每一个均沿耦合电感器 3400 的整个长度 3420 延伸，但是第一和第二间隙 3410、3412 中的一个或多个可改为仅沿部分长度 3420 延伸。另外，第一和第二间隙 3410、3412 中的一个或多个可具有沿耦合电感器 3400 的宽度 3420 和 / 或沿其深度 3706 不均匀的厚度 3702、3704，例如以产生非线性的漏电感值。另外，电感器 3400 耦合改为在顶部磁元件 3408 的泄漏通量通路中包括除第一和第二间隙 3410、3412 之外的一个或多个间隙。

[0085] 耦合电感器 3400 的某些实施方式具有与以上关于耦合电感器 800 所讨论的那些类似的优势，例如，比具有类似的电感以及电流容量特性的一些其它耦合电感器更小的占重面积、容易调节漏电感的能力、将相邻的绕组紧密放置在一起的能力以及使用较短和 / 或较宽的绕组的能力。另外，如以下将讨论的，耦合电感器 3400 的某些实施方式具有未必通过耦合电感器 800 的某些实施方式实现的其它优势。

[0086] 例如，在耦合电感器 3400 的某些实施方式中，至少一部分的顶部表面 3422 没有间隙而且是基本平坦的（间隙 3410、3412 位于表面 3422 的侧面），从而潜在地使得无需在表面 3422 上使用标签或者覆盖件就能够取放组件。不必使用标签或者覆盖件可以有利地降低材料和劳动力成本、降低耦合电感器 3400 的高度 3424 和 / 或促进热量从顶部表面 3422 传送到电感器的外界。

[0087] 作为另一实施例，耦合电感器 3400 的某些实施方式包括由若干简单成型（例如，基本上矩形）的磁元件所形成的芯，由此促进低磁芯成本和可制造性。这种磁元件可以是对称的，从而减少形成芯 3402 所需的磁元件的数量。例如，在某些实施方式中，第一和第二端部磁元件 3404、3406 是可互换的，从而减少贮备以形成磁芯 3402 的不同磁元件的数量。

[0088] 作为又一实施例，间隙厚度 3702、3704 由顶部磁元件 3408 相对于第一和第二端部磁元件 3404、3406 的位置而确定的事实使得能够相对简单地控制间隙厚度。例如，在某些实施方式中，间隙厚度主要由将顶部磁元件 3408 与第一和第二端部磁元件 3404、3406 隔开的非磁性间隔件和 / 或胶的厚度来控制。

[0089] 作为另一实施例，使用两个间隙 3410、3412 而不是单个间隙可以减少从耦合电感器 3400 发出的杂散磁场。具体地，如以上所讨论的，间隙 3410、3412 通常比在电感器的泄漏通量通路中仅包括单个间隙的电感器的泄漏通量通路的间隙更薄。这种更小的间隙可以减少杂散磁场，进而可减少来自耦合电感器 3400 的电磁干扰。杂散磁场的减少还可以减少因杂散磁场在金属部件中诱导的电流所引起的相邻金属部件中的损失。

[0090] 本文所公开的耦合电感器的一种可能应用是电源，例如直流 - 直流变换器。因此，用于形成本文所公开的耦合电感器的磁芯的磁性材料通常是在切换电源时常见的高切换频率（例如，至少 20KHz）展示相对较低的磁芯损耗的材料（例如，铁氧体材料或铁粉材

料）。

[0091] 图 41 示意性地示出了一个电源 4200，其是本文所讨论的耦合电感器的一种可能应用。虽然所示的电源 4200 具有三相，但是电源 4200 能够具有大于 1 的任意数量的相数。

[0092] 电源 4200 包括耦合电感器 4202，其例如为本文所讨论的耦合电感器之一的三个绕组的实施方式（例如，耦合电感器 800、1900、2000、2100、2200、2300、2500、2700、2900、3100、3300、3400 或者 4100 中的一个耦合电感器的三个绕组的实施方式）。耦合电感器 4202 包括磁芯 4204 和三个绕组 4206。每个绕组 4206 具有第一端 4210，第一端 4210 与公共第一节点 4212 电耦合。每个第一端 4210 可选地从电感器 4202 的一个公共侧延伸（例如，图 12 中的侧 1204）。每个绕组 4206 还包括第二端 4208，第二端 4208 与相应的切换电路 4214 电耦合。每个第二端 4208 可选地从电感器 4202 的另一公共侧延伸（例如，图 12 中的侧 1206）。绕组 4206 缠绕在磁芯 4204 上，以使得从绕组 4206 第二端 4208 经过绕组 4206 流到绕组 4206 第一端 4210 的电流在每一其他绕组 4206 中诱导从其第二端 4208 流到其第一端 4210 的电流。切换电路 4214 被构造和设置为使它们各自的绕组 4206 的第二端 4208 在至少两个不同的电压之间进行切换。控制器 4218 控制切换电路 4214，并且控制器 4218 可选地包括反馈连接器 4220，例如至第一节点 4212。第一节点 4212 可选地包括滤波器 4216。

[0093] 电源 4200 通常具有至少约 20k Hz 的切换频率，切换电路 4214 在该频率进行切换，以使得因切换电流而导致的部件移动产生的声音高于人能够感知的频率范围。在高切换频率（例如，至少 20kHz）而不是低切换频率操作切换电源 4200 还可以利于 (1) 能量存储部件（例如，耦合电感器 4202 和滤波电容器）的尺寸的减少，(2) 涟波电流和涟波电压幅值的减少和 / 或 (3) 改进的变换器瞬变响应。为了能够在高切换频率进行有效的操作，形成耦合电感器 4202 的磁芯 4204 的一种或多种磁性材料通常是在高频率操作下具有相对低的磁芯损耗的材料。

[0094] 在一些实施方式中，控制器 4218 控制切换电路 4214，以使得每一个切换电路 4214 与另一个切换电路 4214 异相地操作。以不同的方式说明，在这些实施方式中，每个切换电路 4214 提供到其相应的第二端 4208 的切换波形相对于另一个切换电路 4214 提供到其相应的第二端 4208 的切换波形是相位移动的。例如，在电源 4200 的某些实施方式中，切换电路 4214(1) 提供到第二端 4208(1) 的切换波形相对于切换电路 4214(2) 提供到第二端 4208(2) 的切换波形以及切换电路 4214(3) 提供到第二端 4208(3) 的切换波形均为 120 度异相。

[0095] 电源 4200 能够被构造和设置成具有不同的构造。例如，切换电路 4214 可使它们各自的绕组 4206 的第二端 4208 在输入电压节点（未示出）和接地之间切换，从而使电源 4200 构造为降压型变换器，第一节点 4212 为输出电压节点，且滤波器 4216 是输出滤波器。在该示例中，每个切换电路 4214 包括至少一个高侧切换装置和至少一个环流二极管 (catch diode)，或者包括至少一个高侧切换装置和至少一个低侧切换装置。在本文的上下文中，切换装置包括但不限于双极结晶体管、场效应晶体管（例如 N 沟道或 P 沟道金属氧化物半导体场效应晶体管、结型场效应晶体管或金属半导体场效应晶体管）、绝缘栅极双极结晶体管、晶体闸流管或者可控硅整流器。

[0096] 作为另一个示例，电源 4200 可被构造为升压型变换器，以使节点 4212 为输入电源节点，并且切换电路 4214 使它们各自的绕组 4206 的第二端 4208 在输出电压节点（未示出）

和接地之间切换。另外，电源 4200 例如可被构造为降压 - 升压型变换器，使得节点 4212 为公共节点，且切换电路 4214 使它们各自的绕组 4206 的第二端 4208 在输出电压节点（未示出）和输入电压节点（未示出）之间切换。

[0097] 另外，作为又一个示例，电源 4200 可形成独立的拓扑。例如，每个切换电路 4214 可包括变压器、与变压器的主绕组电耦合的至少一个切换装置以及整流电路，该整流电路耦合在变压器的次级绕组和相应绕组 4206 的第二端 4208 之间。该整流电路可选地包括至少一个切换装置以提高效率。

[0098] 电源 4200 的一种可能应用是计算设备，例如图 43 所示的计算设备 4300。计算设备 4300 例如是个人计算机或服务器主板、服务器处理板、具有计算能力的移动电话，或者个人数字助理。电源 4302 是电源 4200 的一个实施方式，其至少部分地为处理器 4304 供电。电源 4302 包括耦合电感器 4306，耦合电感器 4306 例如是本文所讨论的耦合电感器中的一个耦合电感器的实施方式（例如，耦合电感器 800、1900、2000、2100、2200、2300、2500、2700、2900、3100、3300、3400 或者 4100 中的一个耦合电感器的实施方式）。

[0099] 可以对以上方法和系统进行修改而不脱离本发明范围。因此应注意，以上描述中包含的以及附图中示出的主题应理解为示例性的，而不是限制的意思。所附的权利要求书旨在覆盖本文所描述的一般的和具体的特征，以及本方法和系统的全部保护范围，作为主题可认为落入一般的和具体的特征之间。

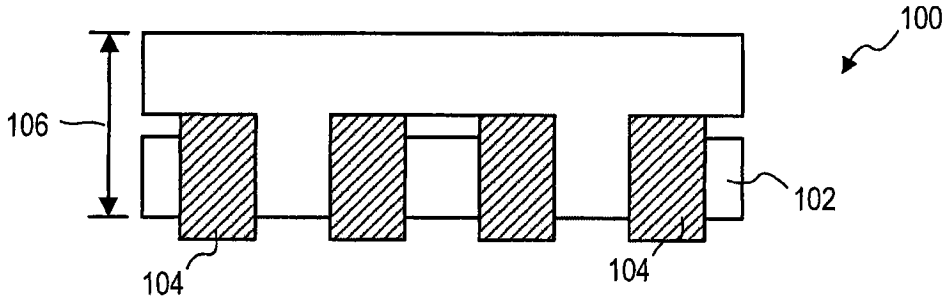


图 1（现有技术）

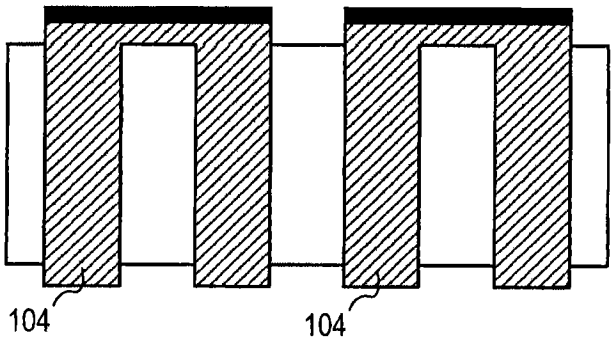


图 2（现有技术）

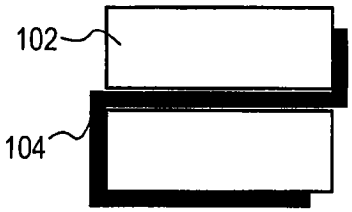


图 3（现有技术）

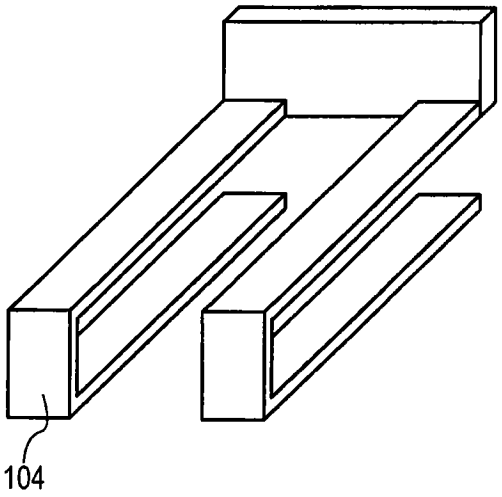


图 4（现有技术）

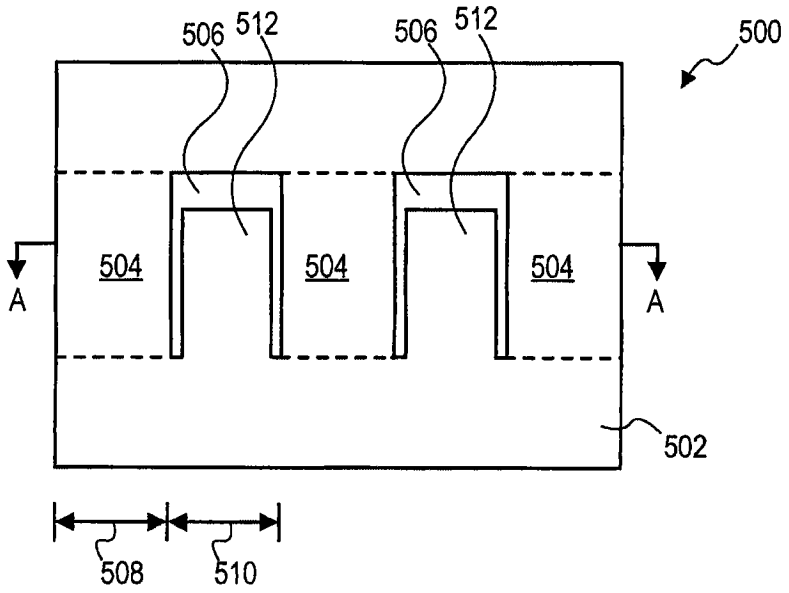


图 5（现有技术）

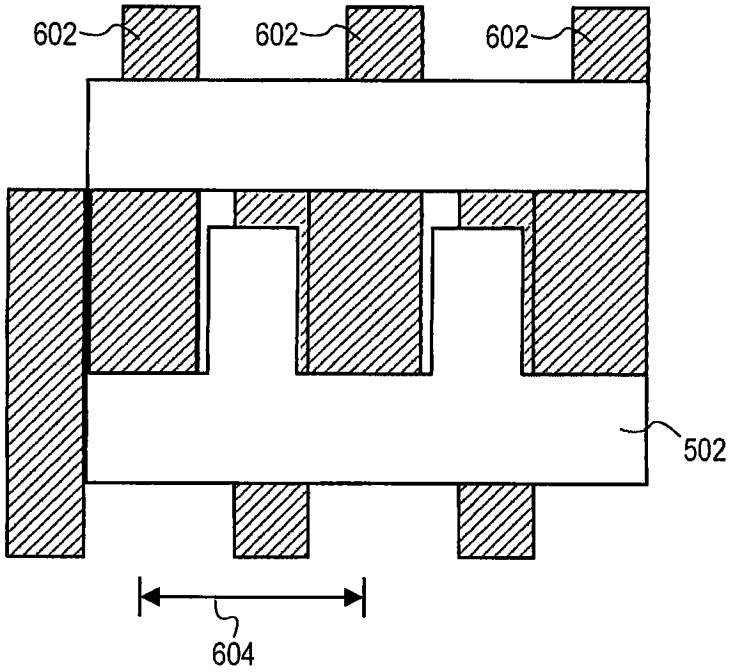


图 6（现有技术）

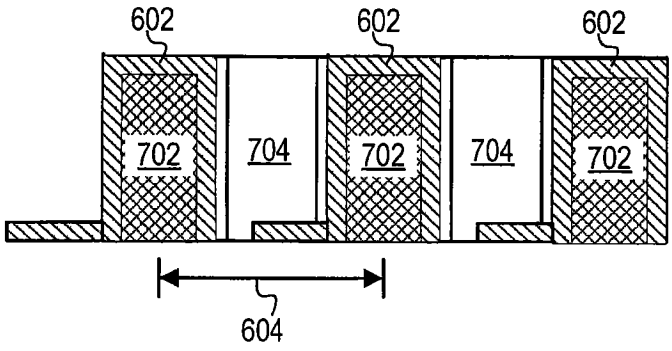

602
602
602
702
704
702
704
702
604

图 7（现有技术）

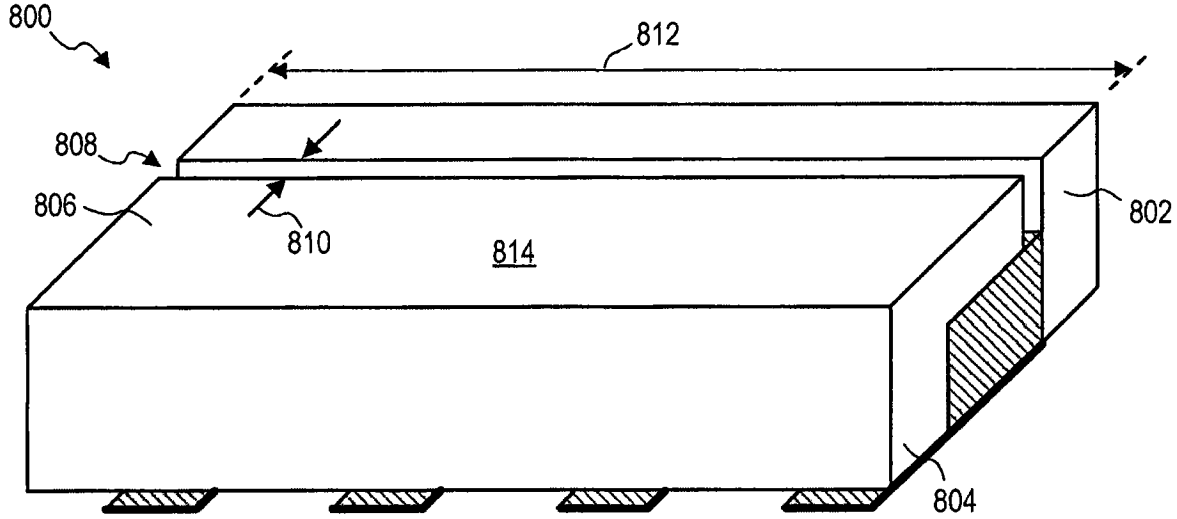

800
812
808
806
810
814
802
804

图 8

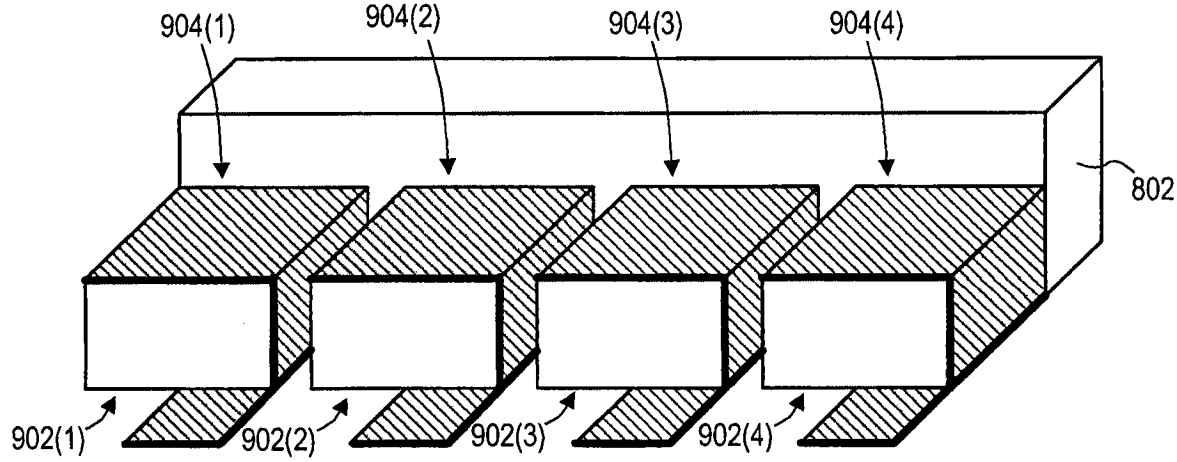

904(1)
904(2)
904(3)
904(4)
802
902(1)
902(2)
902(3)
902(4)

图 9

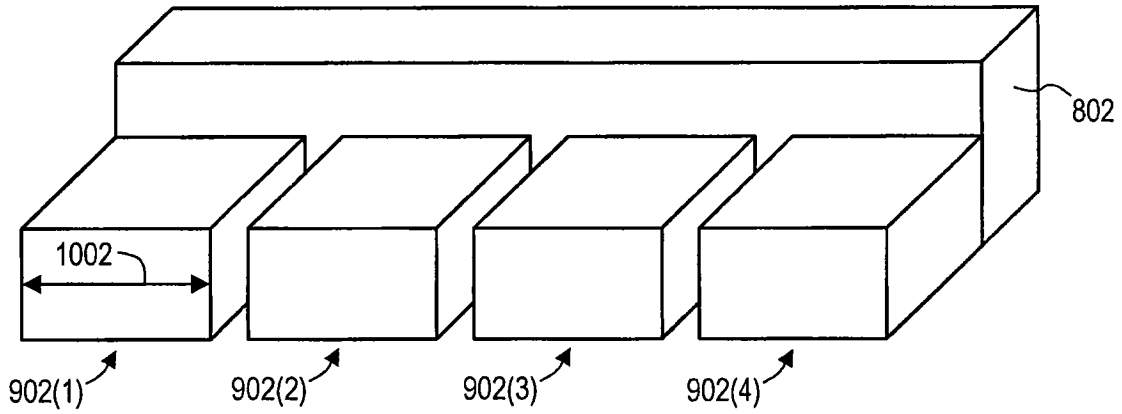

802
1002
902(1)
902(2)
902(3)
902(4)

图 10

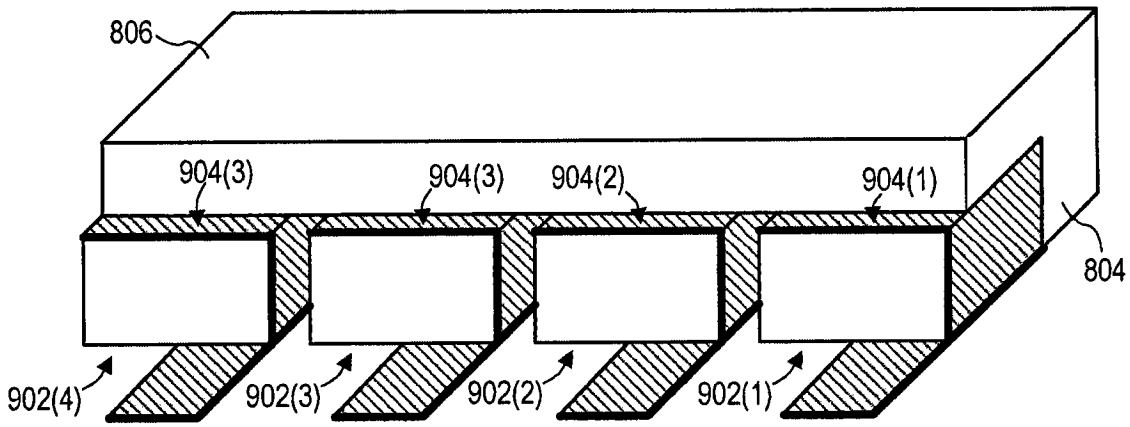

806
904(3)
904(3)
904(2)
904(1)
804
902(4)
902(3)
902(2)
902(1)

图 11

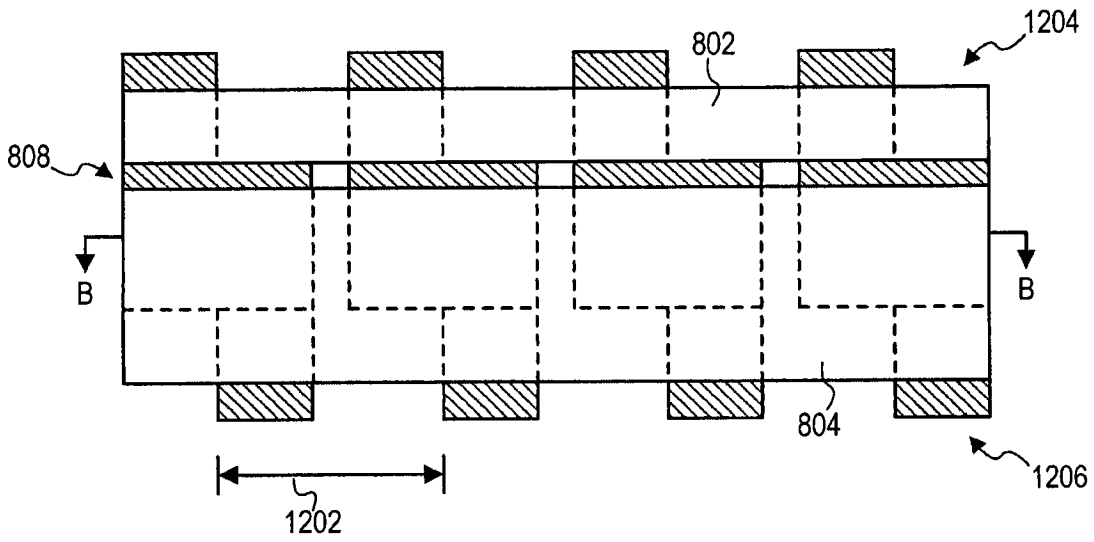

1204
802
808
B
B
804
1206
1202

图 12

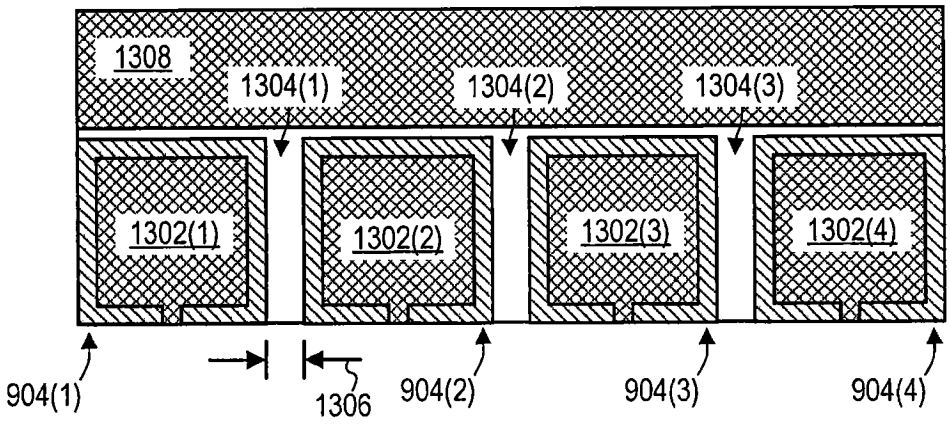


图 13

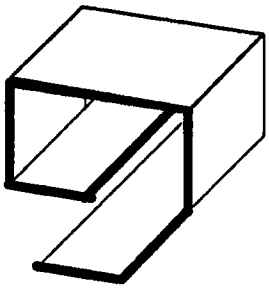


图 14

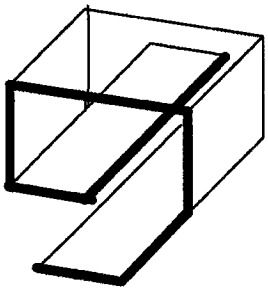


图 15

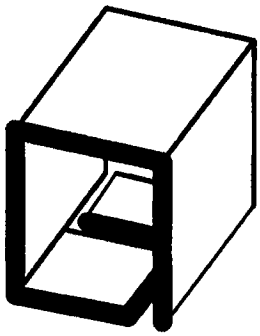


图 16

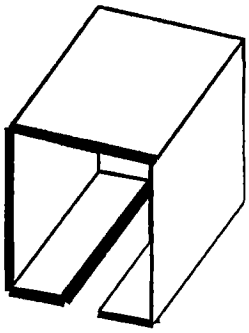


图 17

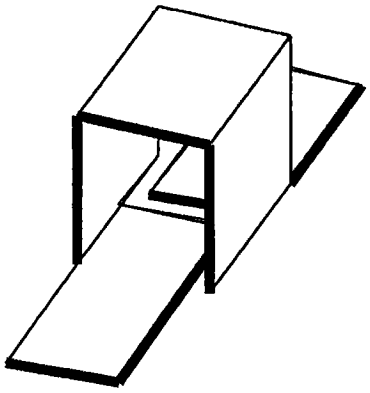


图 18

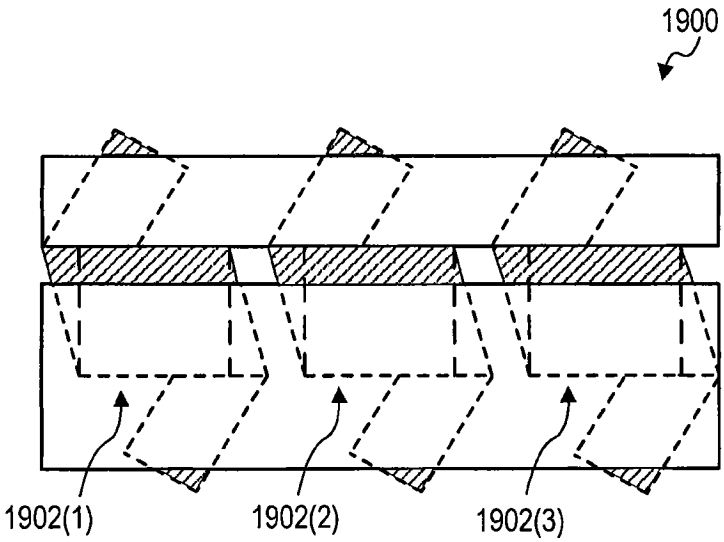


图 19

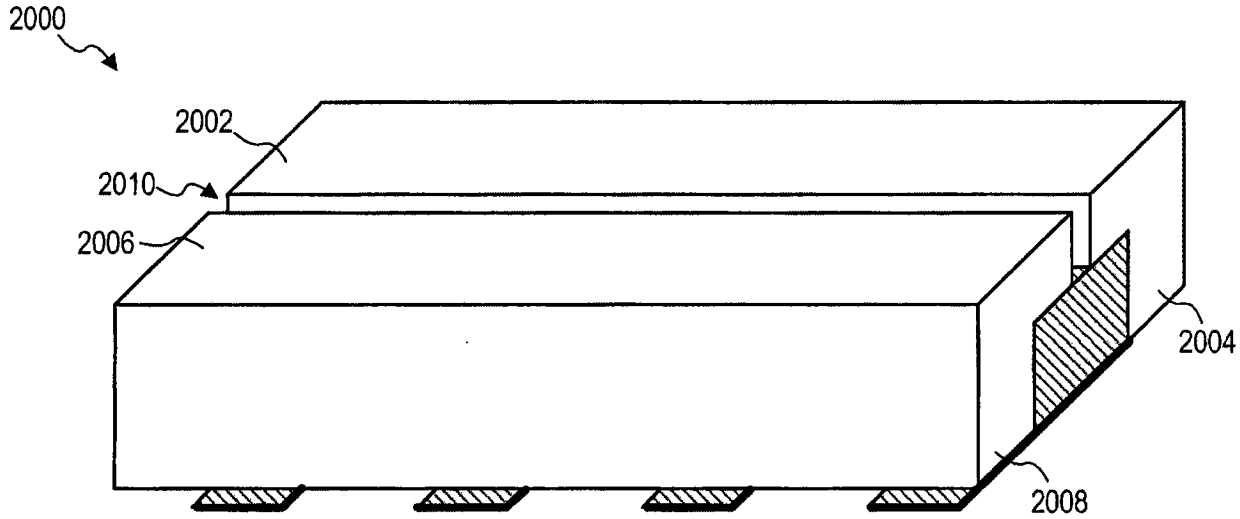


图 20

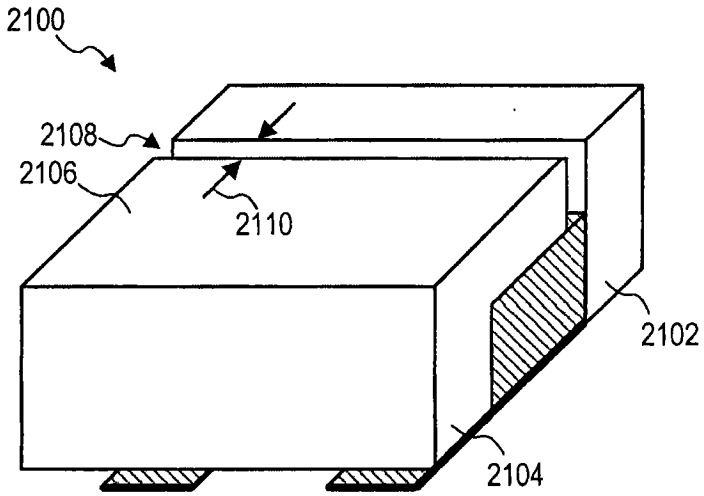


图 21

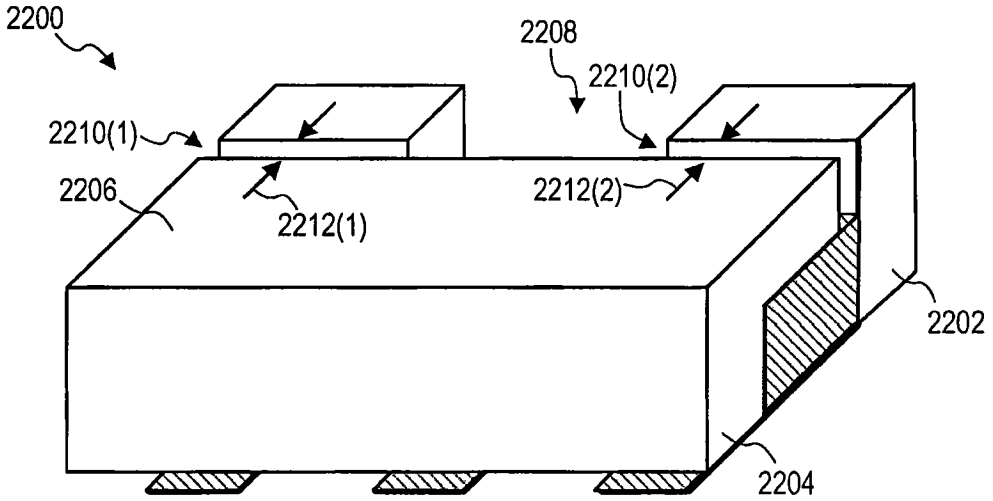

2200
2208
2210(2)
2210(1)
2206
2212(1)
2212(2)
2202
2204

图 22

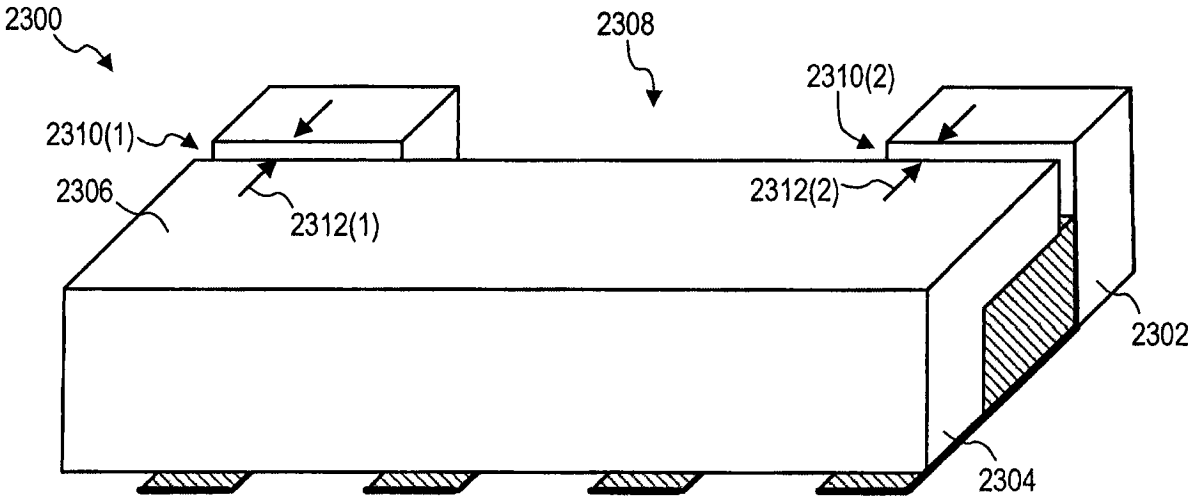

2300
2308
2310(2)
2310(1)
2306
2312(1)
2312(2)
2302
2304

图 23

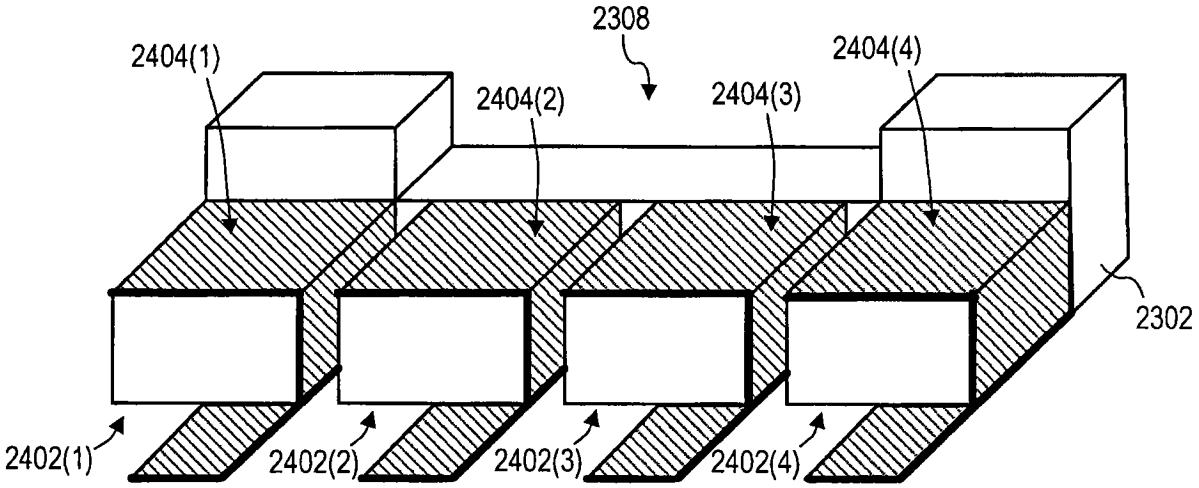

2308
2404(1)
2404(2)
2404(3)
2404(4)
2302
2402(1)
2402(2)
2402(3)
2402(4)

图 24

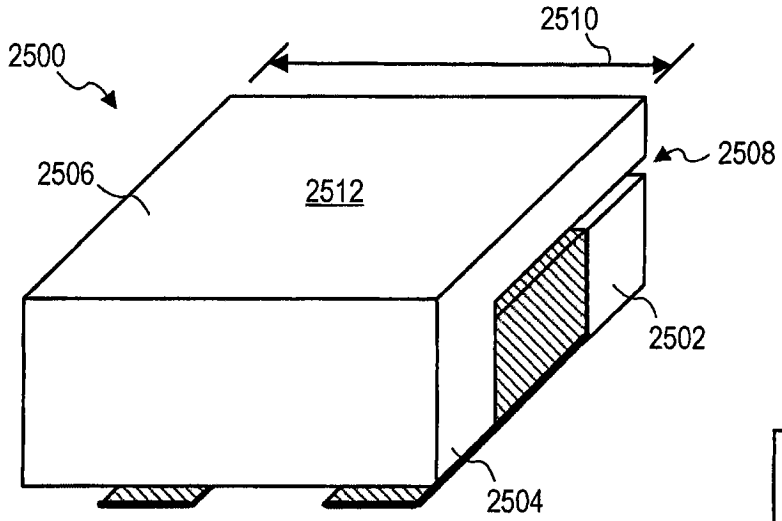

2510
2500
2508
2506
2512
2502
2504

图 25

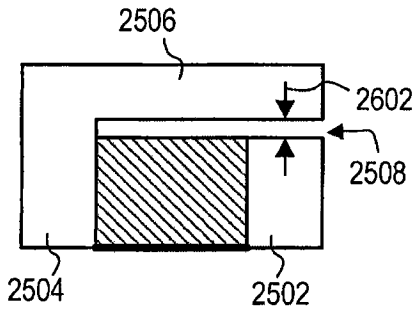

2506
2602
2508
2504
2502

图 26

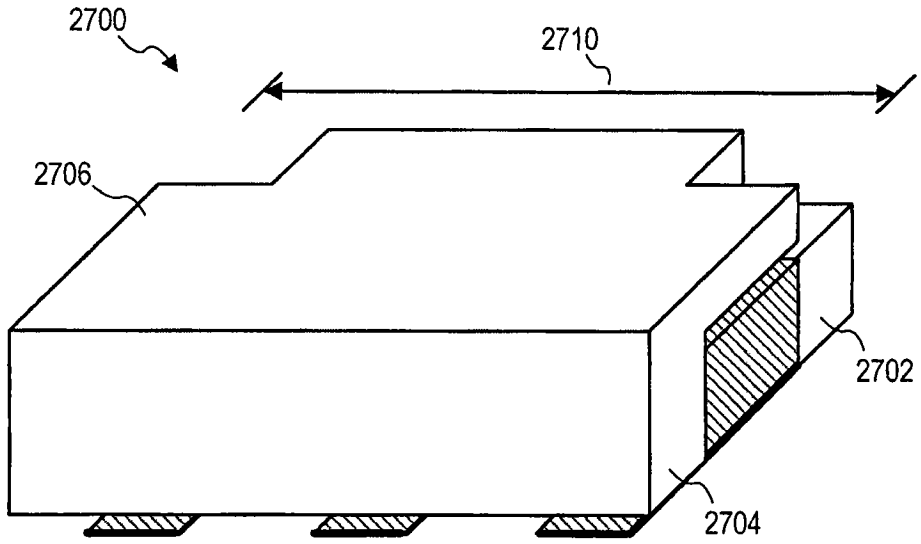

2700
2710
2706
2702
2704

图 27

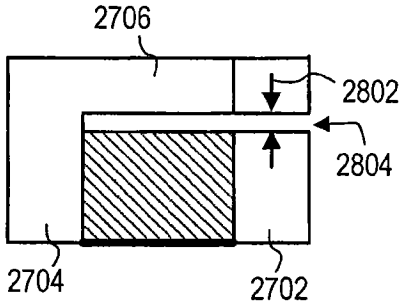

2706
2802
2804
2704
2702

图 28

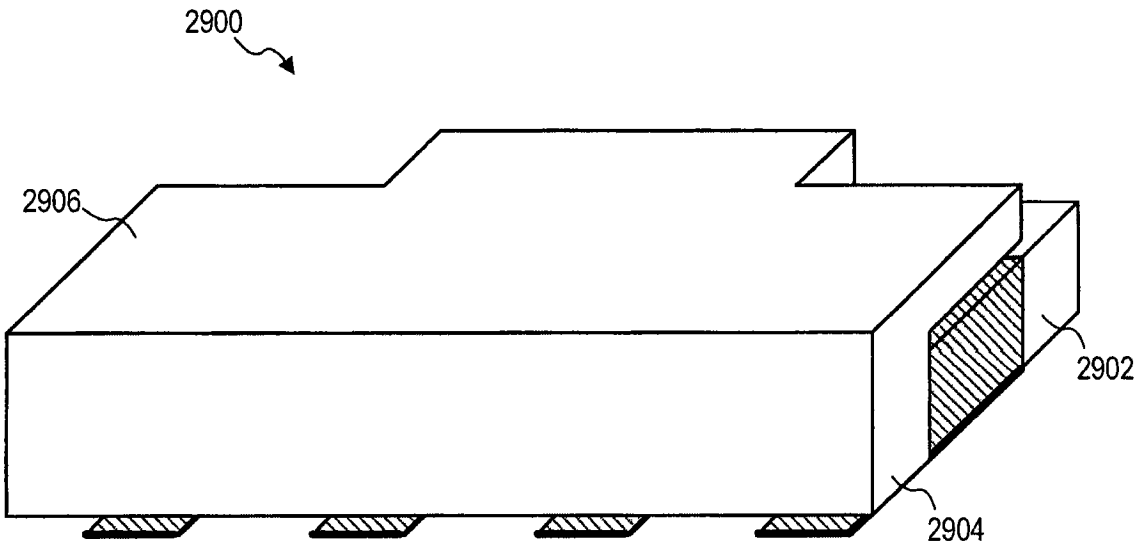

2900
2906
2902
2904

图 29

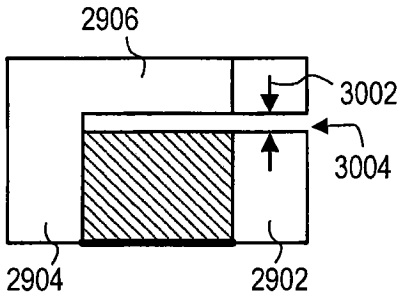

2906
3002
3004
2904
2902

图 30

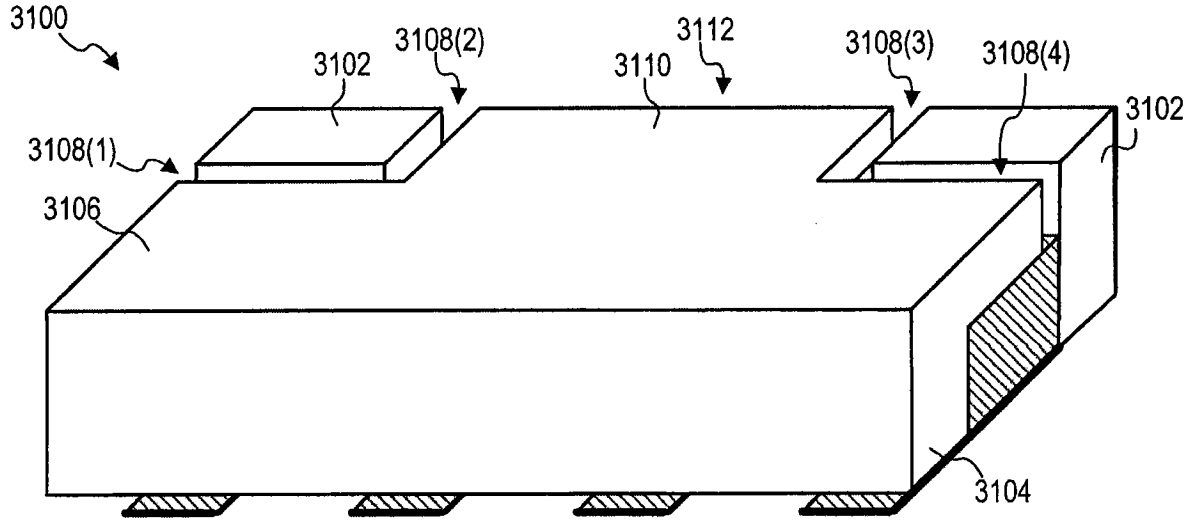

3100
3102
3108(2)
3110
3112
3108(3)
3108(4)
3102
3108(1)
3106
3104

图 31

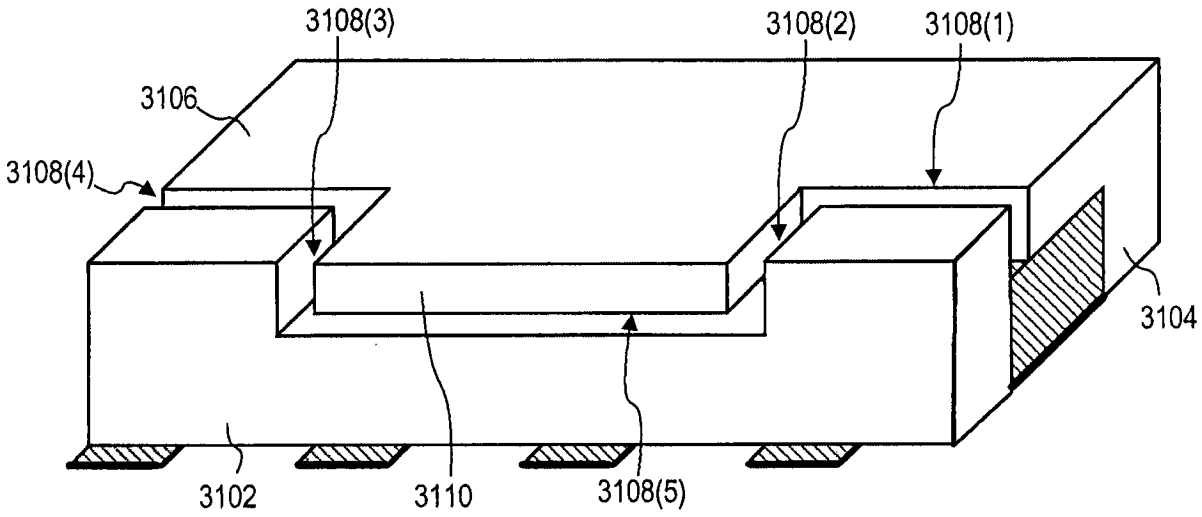

3108(3)
3108(2)
3108(1)
3106
3108(4)
3104
3102
3110
3108(5)

图 32

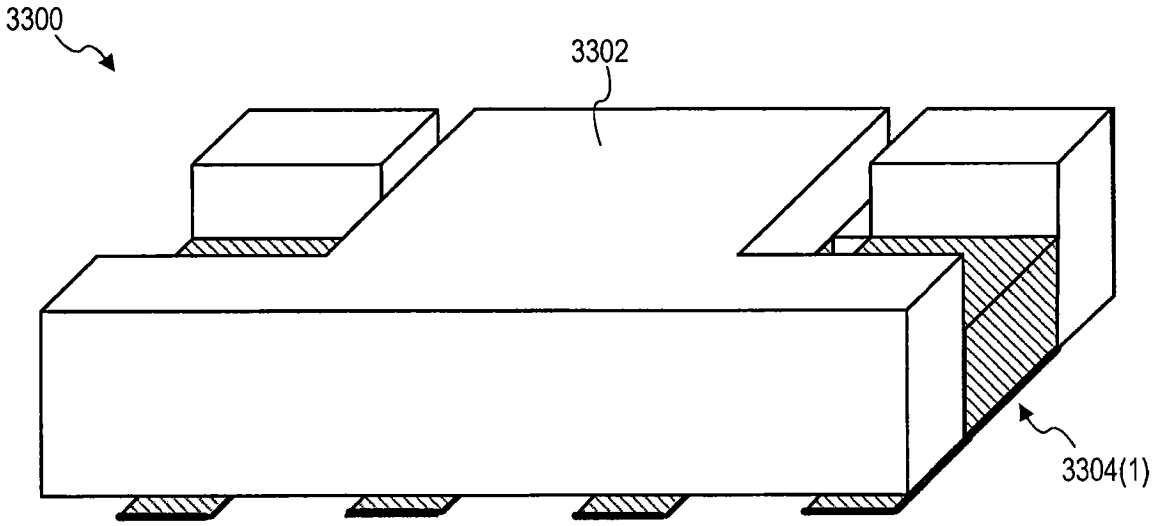

3300
3302
3304(1)

图 33

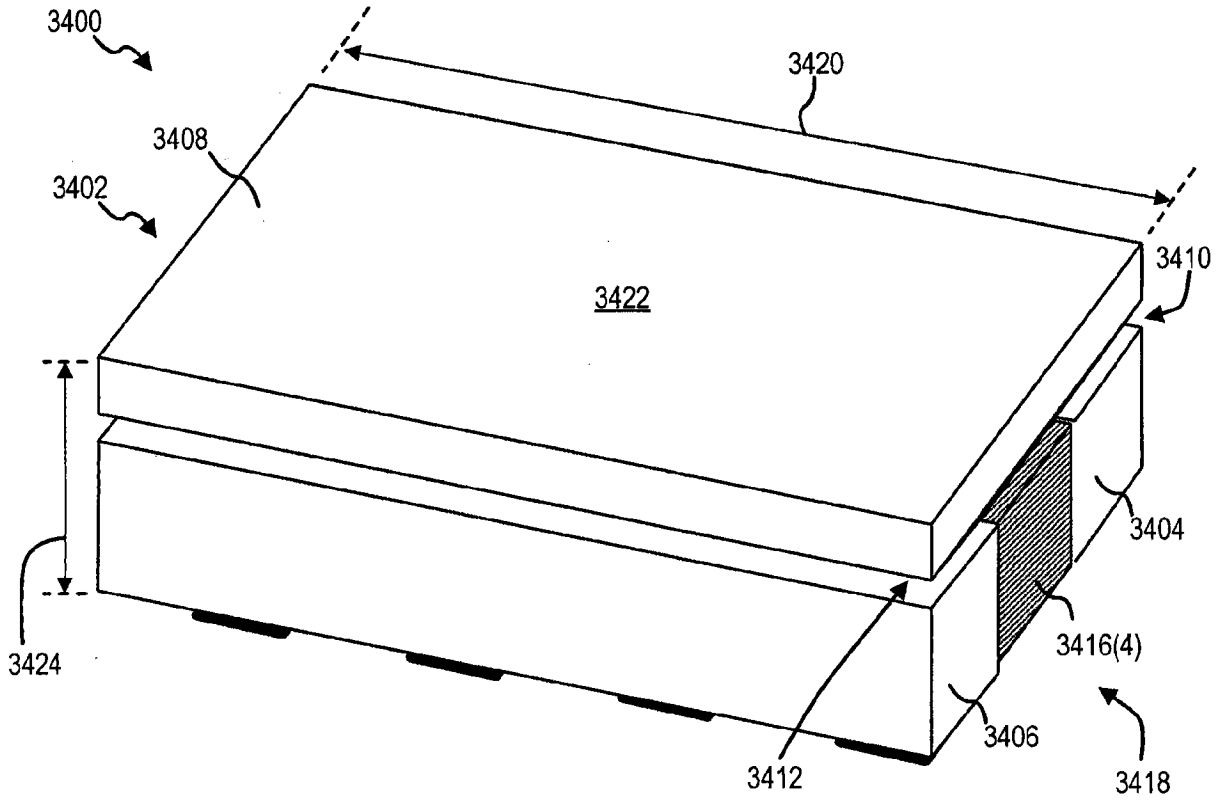

3400
3420
3408
3402
3410
3422
3404
3424
3416(4)
3406
3412
3418

图 34

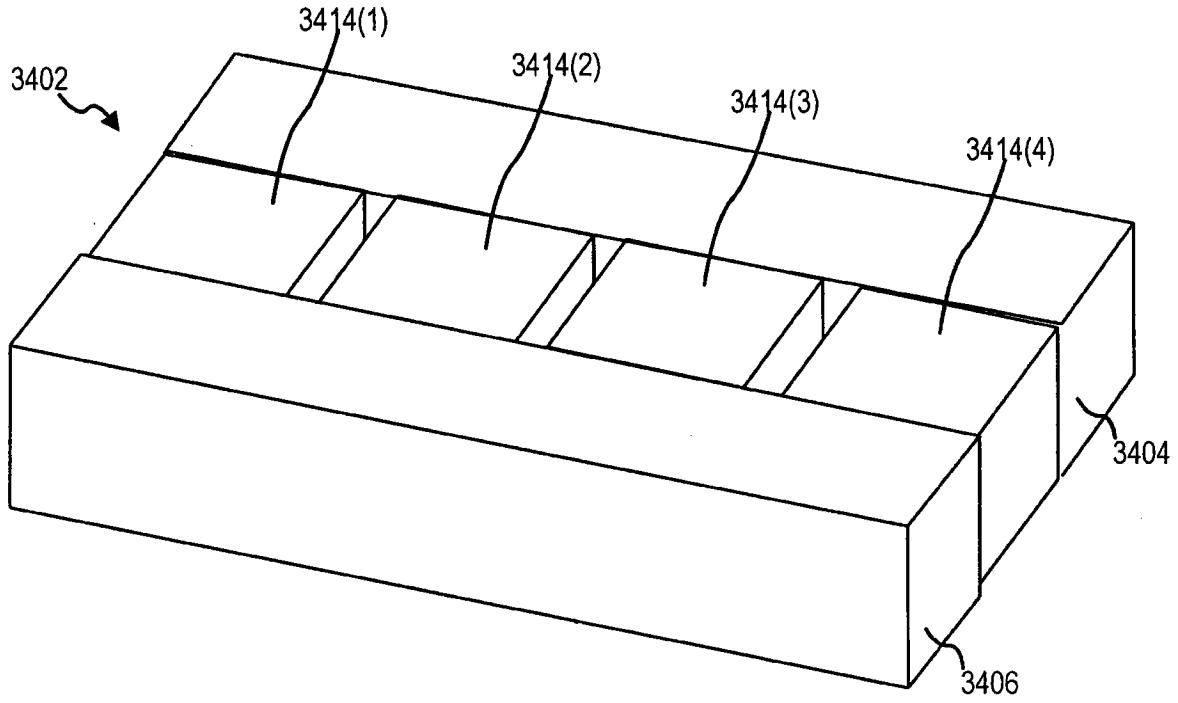

3414(1)
3402
3414(2)
3414(3)
3414(4)
3404
3406

图 35

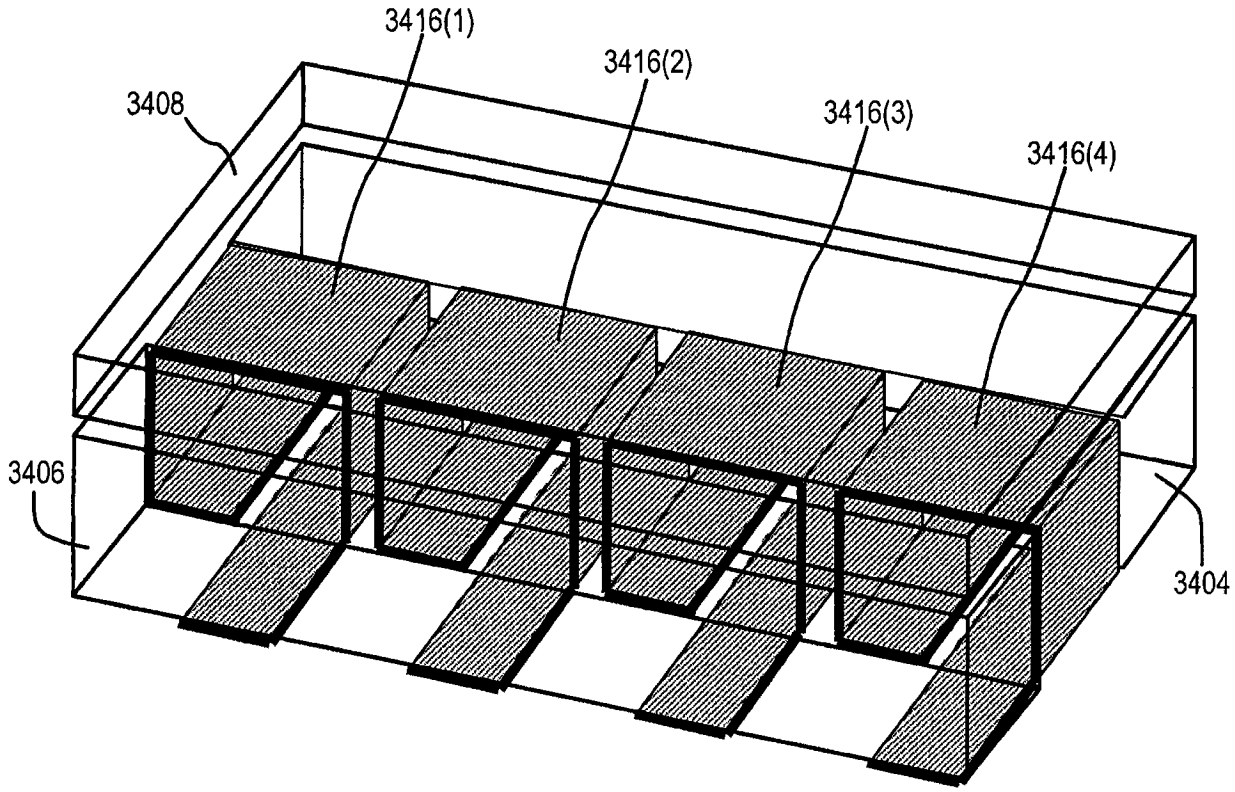

3416(1)
3416(2)
3408
3416(3)
3416(4)
3406
3404

图 36

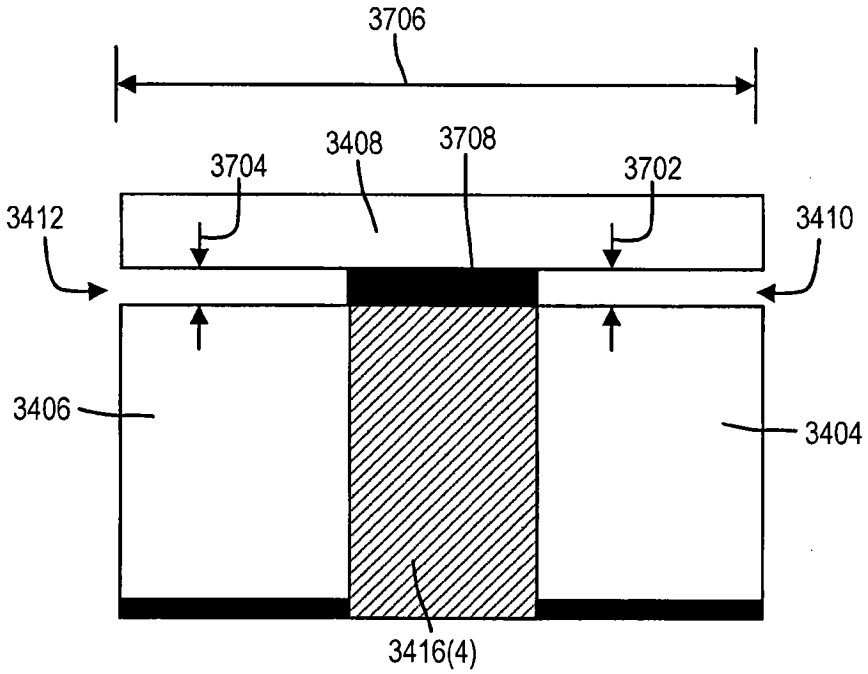

3706
3704
3408
3708
3702
3412
3410
3406
3404
3416(4)

图 37

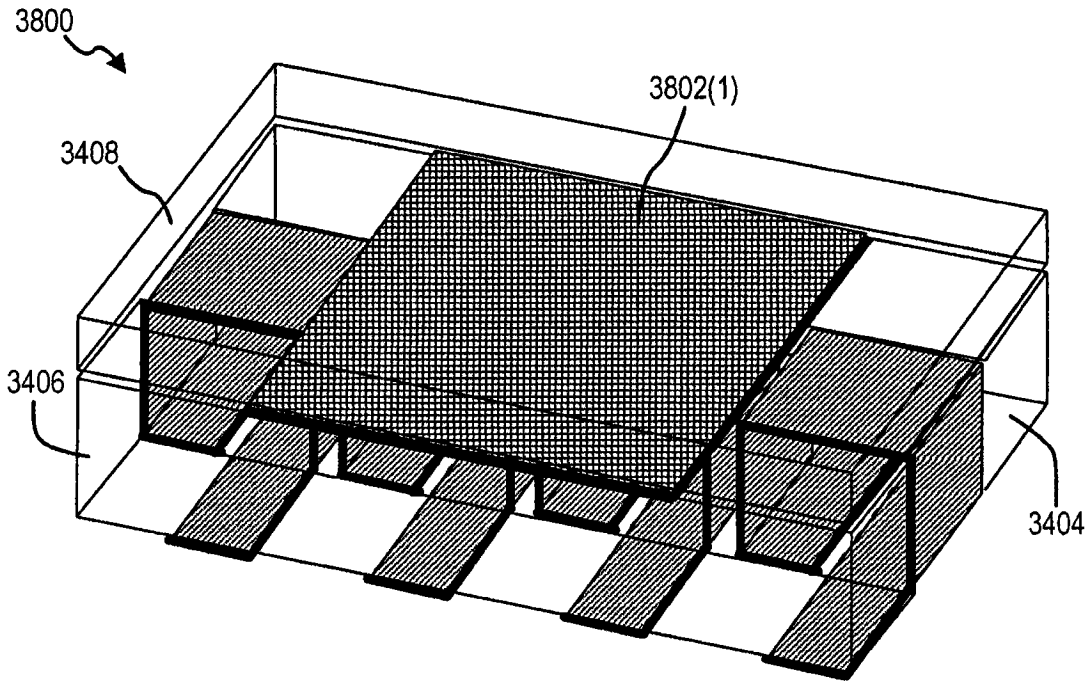

3800
3802(1)
3408
3406
3404

图 38

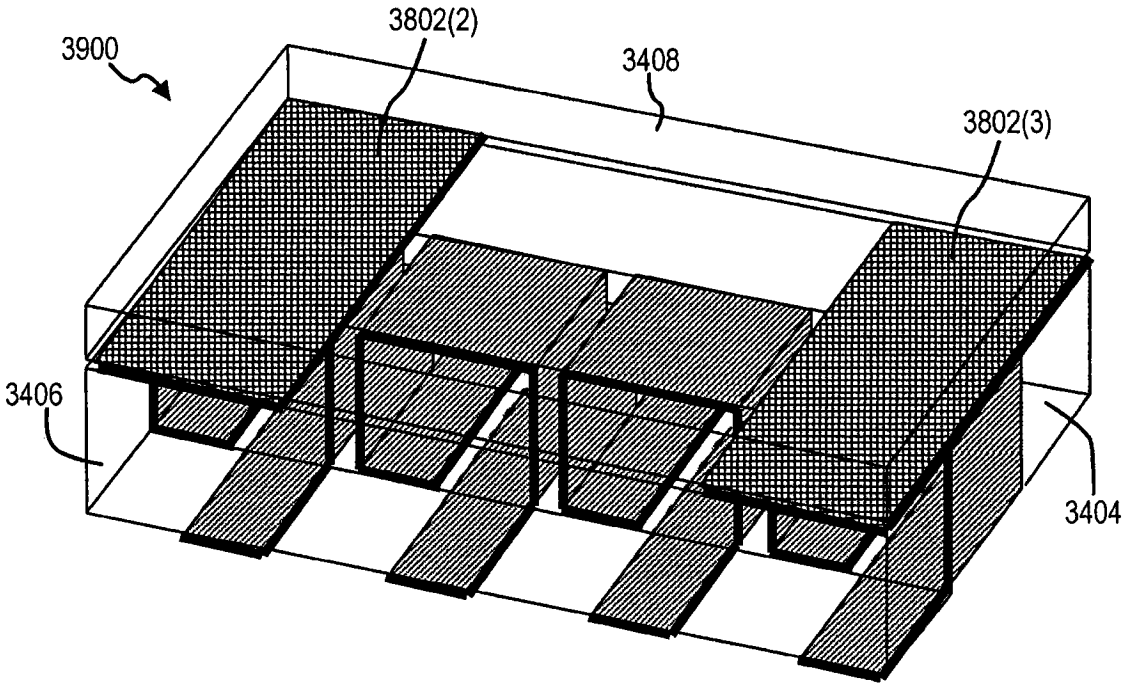

3900
3802(2)
3408
3802(3)
3406
3404

图 39

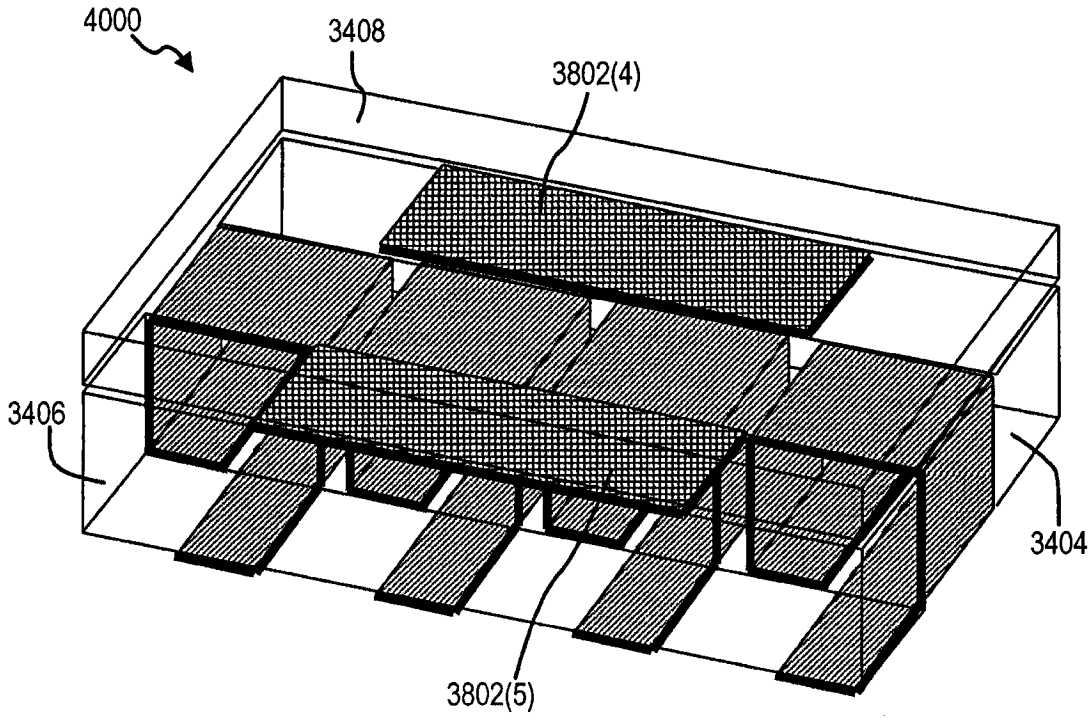

4000
3408
3802(4)
3406
3404
3802(5)

图 40

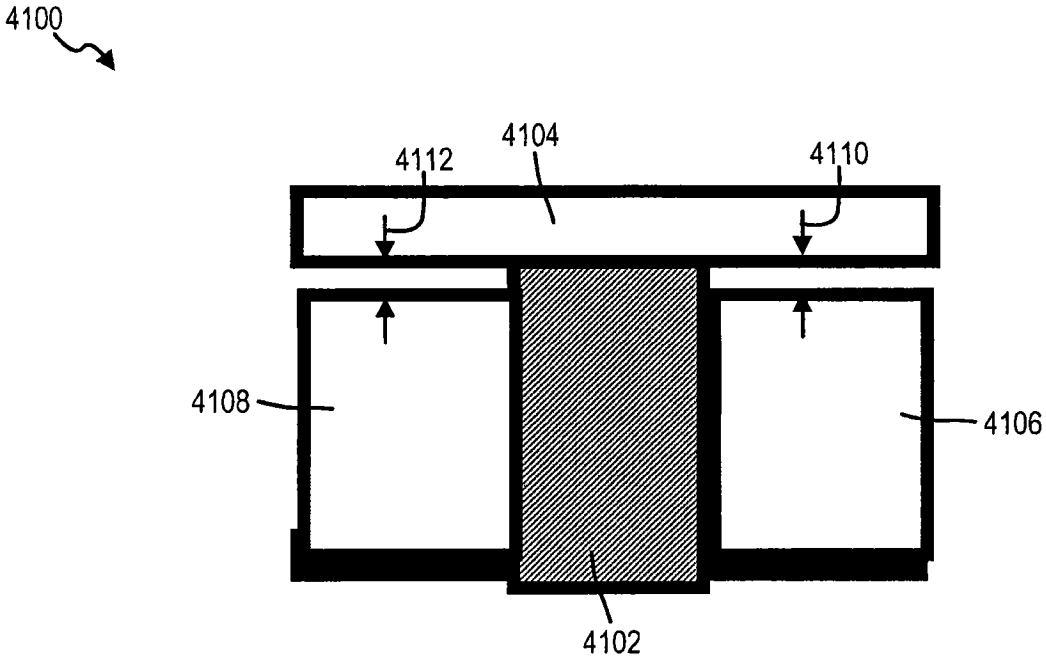


图 41

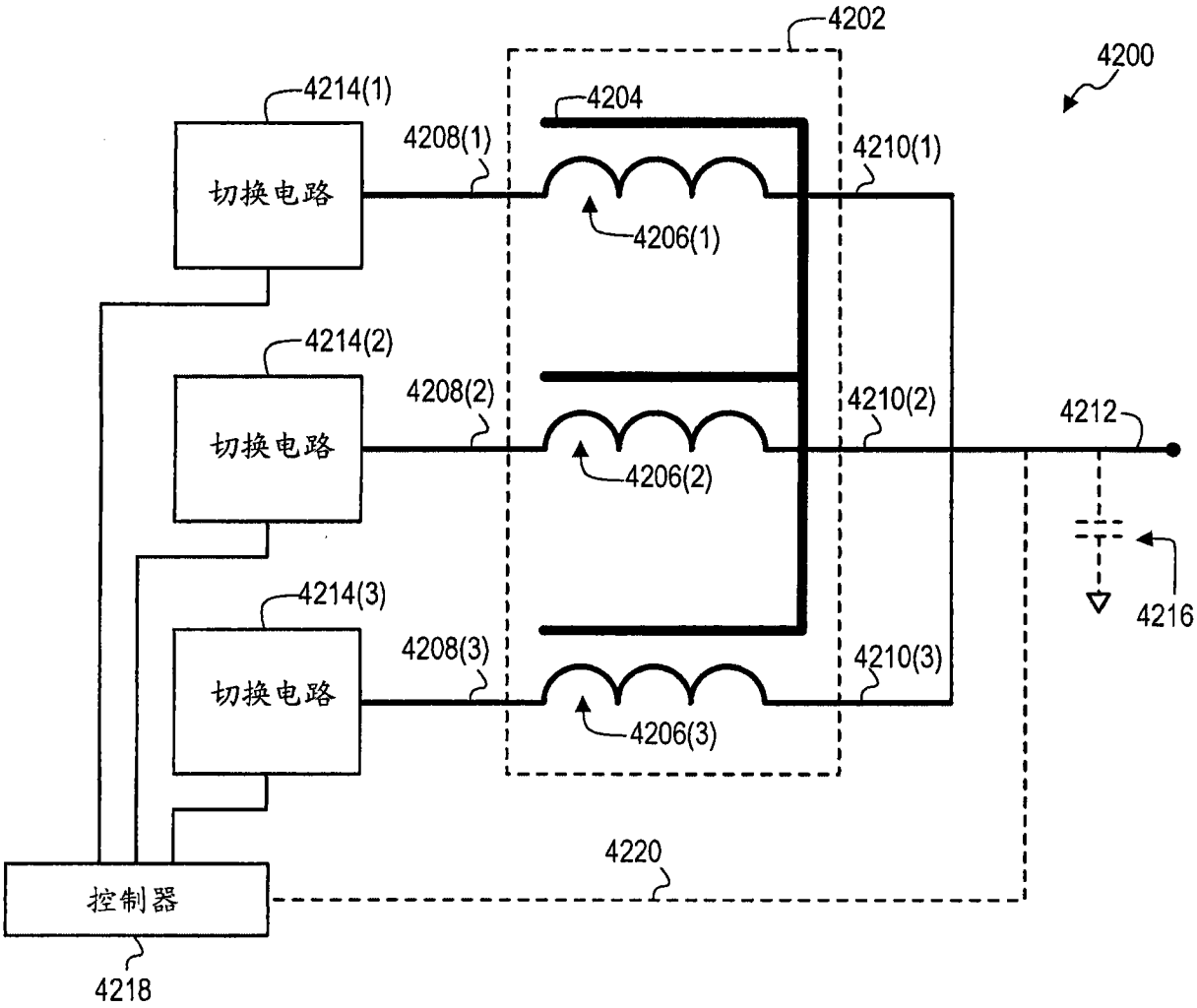

4202
4200
4214(1)
4204
4208(1)
4210(1)
切换电路
4206(1)
4214(2)
4208(2)
4210(2)
4212
切换电路
4206(2)
4216
4214(3)
4208(3)
4210(3)
切换电路
4206(3)
4220
控制器
4218

图 42

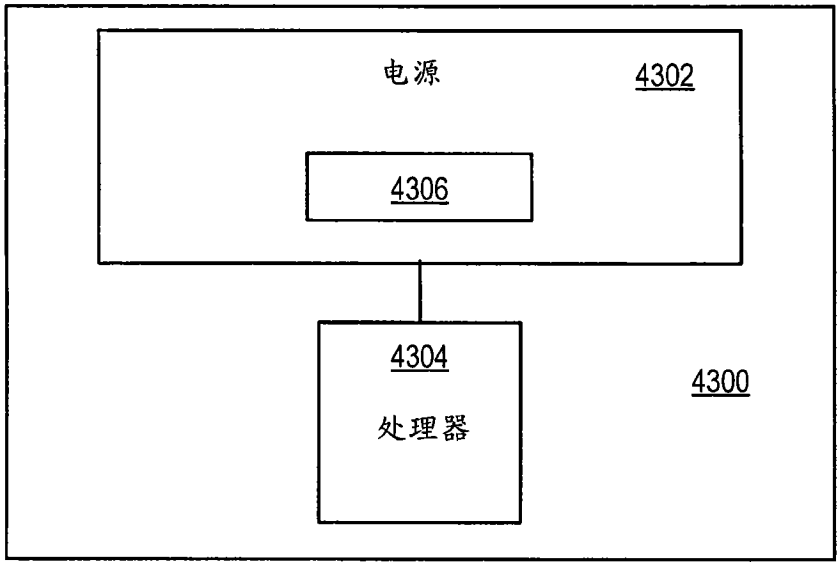


图 43