

[19] 中华人民共和国国家知识产权局



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 200580010166.0

[51] Int. Cl.

H01F 27/28 (2006.01)

H01F 27/34 (2006.01)

H01F 41/06 (2006.01)

H01F 3/14 (2006.01)

[45] 授权公告日 2009 年 12 月 30 日

[11] 授权公告号 CN 100576376C

[22] 申请日 2005.3.29

[21] 申请号 200580010166.0

[30] 优先权

[32] 2004. 3. 29 [33] US [31] 60/557,268

[86] 国际申请 PCT/US2005/010487 2005.3.29

[87] 国际公布 WO2005/096330 英 2005.10.13

[85] 进入国家阶段日期 2006.9.28

[73] 专利权人 达特默斯大学托管会

地址 美国新罕布什尔州

[72] 发明人 查尔斯·罗杰·沙利文

詹尼弗·泼洛克

[56] 参考文献

CN2201714Y 1995.6.21

US3195088A 1965.7.13

CN2475107Y 2002.1.30

EP0461712A1 1991.12.18

WO9217892A1 1992.10.15

审查员 杨玮明

[74] 专利代理机构 北京英赛嘉年华知识产权代理有限公司

代理人 余朦方挺

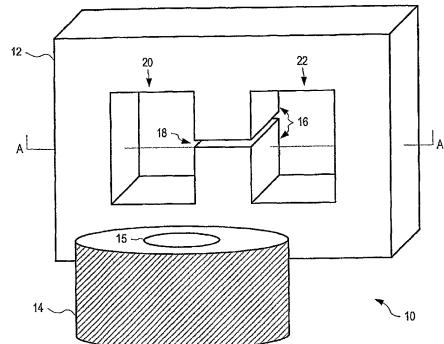
权利要求书 3 页 说明书 9 页 附图 7 页

[54] 发明名称

有隙铁芯上的磁性线圈的低交流电阻箔式绕组

[57] 摘要

公开了一种能够减小磁性线圈中的交流损耗的系统和方法，其中，所述磁性线圈的磁芯具有一个或多个间隙。将箔式绕组形成为具有一个或多个空腔，并将其设置在磁芯周围，以使得空腔位于间隙附近。



1. 一种减小磁性线圈中的交流损耗的方法，所述方法包括：

在磁芯中形成至少一个间隙，所述磁芯包括第一柱和第二柱，所述第一柱和第二柱具有重叠的轴线，所述间隙以与所述轴线相垂直的对称面为中心；

形成箔式绕组，所述箔式绕组围绕所述第一柱、所述第二柱和所述间隙，以限定出关于所述轴线对称的开口，所述开口包括从所述第一柱和所述第二柱以向外的方向延伸的空腔；以及

设置所述箔式绕组，使得所述空腔关于所述对称面对称，以减小所述交流损耗。

2. 如权利要求 1 所述的方法，所述形成箔式绕组的步骤包括由两个或多个成形的箔片形成所述箔式绕组。

3. 如权利要求 1 所述的方法，所述形成箔式绕组的步骤包括由一个具有开口的箔片形成所述箔式绕组。

4. 如权利要求 1 所述的方法，其中，所述磁芯形成绕组窗口，所述形成箔式绕组的步骤包括形成所述箔式绕组，以使得在所述间隙仅位于所述绕组窗口的一侧时，所述空腔的最大宽度等于绕组窗口宽度的两倍。

5. 如权利要求 1 所述的方法，其中，所述磁芯形成绕组窗口，所述形成箔式绕组的步骤包括形成所述箔式绕组，以使得在所述间隙位于所述绕组窗口的两侧时，所述空腔的最大宽度等于绕组窗口宽度。

6. 如权利要求 1 所述的方法，所述形成箔式绕组的步骤包括将所述箔式绕组形成为具有至少一个半圆形空腔。

7. 如权利要求 1 所述的方法，所述形成箔式绕组的步骤包括将所述箔式绕组形成为具有至少一个 V 形空腔。

8. 如权利要求 1 所述的方法，所述形成箔式绕组的步骤包括将所述箔式绕组形成为具有至少一个半圆形的空腔。

9. 具有减小的交流损耗的磁性线圈，所述磁性线圈包括：

磁芯，具有沿重叠轴线朝向彼此延伸的第一柱和第二柱，在所述第一柱和第二柱之间限定出至少一个间隙，所述间隙以与轴线相垂直的对称面为中心；以及

箔式绕组，其围绕所述第一柱、所述第二柱和所述间隙，以限定出关于所述轴线对称的开口；

所述开口包括从所述第一柱和所述第二柱以向外的方向延伸的至少一个空腔，所述空腔关于所述对称面对称。

10. 如权利要求 9 所述的磁性线圈，其中，所述磁性线圈包括：

绕组窗口，其具有绕组窗口宽度；以及

位于所述绕组窗口一侧的一个或多个间隙；

其中，各个空腔的最大宽度等于所述绕组窗口宽度的两倍。

11. 如权利要求 9 所述的磁性线圈，其中，所述磁性线圈包括：

绕组窗口，其具有绕组窗口宽度；以及

位于所述绕组窗口两侧的多个间隙；

其中，各个空腔的最大宽度等于所述绕组窗口宽度的一半。

12. 如权利要求 9 所述的磁性线圈，其中，所述至少一个空腔包括半圆形。

13. 如权利要求 9 所述的磁性线圈，其中，所述至少一个空腔包括 V 形。

14. 一种构造磁性线圈的绕组的方法，所述方法包括：

在磁芯中形成至少一个间隙，所述磁芯包括第一柱和第二柱，所述第一柱和第二柱具有重叠的轴线，所述间隙以与所述轴线相垂直的对称面为中心；

在所述绕组中形成一个或多个空腔，其中，在与磁芯组合时，各个空腔位于所述间隙附近并关于所述对称面对称，以减小由所述间隙引起的交流损耗。

15. 一种构造磁性线圈的方法，所述方法包括：

形成磁芯，所述磁芯具有沿重叠轴线朝向彼此延伸的第一柱和第二柱，在所述第一柱和所述第二柱之间限定出至少一个间隙，所述间隙以与轴线相垂直的对称面为中心；

形成绕组，所述绕组围绕所述第一柱、所述第二柱和所述间隙，以限定出关于所述轴线对称的开口，所述开口包括从所述第一柱和所述第二柱以向外的方向延伸的至少一个空腔，所述空腔关于所述对称面对称，以及

使所述绕组与所述磁芯相结合，从而使得所述间隙位于所述空腔附近。

有隙铁芯上的磁性线圈的低交流电阻箔式绕组

相关申请交叉引用

本申请要求了于 2004 年 3 月 29 日提交的第 60/557,268 号美国临时专利申请的优先权，该申请并入本文作为参考。

技术领域

本发明涉及一种能够减小磁性线圈中的交流损耗的系统和方法。

背景技术

磁性线圈可携带较大的直流电流和交流波纹电流。即使交流电流相对于直流电流而言很小，但磁性线圈中的交流损耗也可能相当大。

减小磁性线圈中的交流损耗（有时候描述为减小交流电阻）的一种方法是使用李兹（litz）线。李兹线由多个绝缘的线束形成，理论上，它具有与相同截面面积的单个线束相比较小的交流电阻。交流电流在导体表面附近流动，被称为趋肤效应（skin effect）。李兹线在被适当缠绕时可减小这一趋肤效应。造成磁性线圈中的损耗的另一效应是邻近效应（proximity effect），第一导线或线束产生的磁场在第二导线或线束中形成涡流即为邻近效应。李兹线可减小邻近效应。

李兹线的一个缺点在于，与相同截面面积的单个线束相比，李兹线具有较大的直流电阻，使其不能理想地应用于直流电流比交流电流大的情况。李兹线也比单个线束和箔具有较高成本。

减小磁性线圈中交流损耗的另一技术是使用形状优化的导线绕组，其中，导线（可以是李兹线）设置为远离磁芯中的间隙。使用形状优化的导线绕组的缺点包括绕组更复杂和昂贵，并且如果使用李兹线，则同样会增加直流电阻。

减小磁性线圈中交流损耗的又一技术是在磁芯中使用多个小间隙而不是单个大间隙。但是，这会增加磁性线圈的成本，而且已经显示，

优化的绕组形状可优于使用多间隙磁芯的方法。

通常，使用箔式绕组来构造携带较大直流电流的磁性线圈（例如，大功率电感器、回扫变压器等）。箔式绕组具有较小直流电阻，但与多层绕组一样，在某些情况下，交流损耗与层数的平方成比例。动力应用中使用的磁性线圈通常需要磁芯中具有空气间隙，以避免磁饱和，从而控制电感以及存储磁能。在高频应用（以及低频应用）中，例如并入开关功率变换器的应用中，空气间隙附近的磁场引起磁性线圈（尤其是间隙附近的绕组的部分）中的较大交流损耗。

虽然以上技术、尤其是形状优化的绕组可能有效，但并入这些技术的设计中的直流电流比交流电流大得多，因此，由于直流电阻的显著增加而不可接受。对于大直流电流绕组而言，经常使用铜箔，这是因为使用铜箔可获得比使用圆线更高的充填因数（绕组窗口容纳铜的部分）。但是，铜箔绕组尤其易受来自于间隙弥散场的感应涡流的影响。这是因为弥散场包含与箔的平面垂直的磁通量分量，即使在绕组中的交流电流比直流电流小得多的情况下，这也可能引起显著的损耗。

图 1 示出了箔缠绕磁性线圈 10 的分解的三维视图。所示的磁性线圈 10 具有磁芯 12 和箔缠绕线圈 14。为了说明目的，箔缠绕线圈 14 被示出为从磁芯 12 的中心柱 16 上移除（即，在正常工作时，中心柱 16 通过箔缠绕线圈 14 的中心孔 15 延伸，参见图 2、图 3A 和图 3B）。中心柱 16 具有间隙 18，以避免磁性线圈 10 在工作期间的磁饱和。磁芯 12 具有两个绕组窗口 20 和 22。图 2 示出了磁性线圈 10 的正面图，显示了磁芯 12 具有安装在中心柱 16 上的箔线圈 14。

图 3A 示出了穿过磁性线圈 10 的垂直剖面 A-A，在磁芯 12 的中心柱 16 上安装有箔缠绕线圈 14。图 3A 示出了磁芯 12 和箔缠绕线圈 14 的铜箔绕组 30。所示的铜箔绕组 30 填充磁芯 12 的绕组窗口 20 和 22。

图 3B 显示了图 3A 的剖面 A-A 的间隙 18 周围区域的放大部分 40。放大部分 40 显示了围绕中心柱 16 的内部铜箔绕组 30 以及在磁性线圈 10 工作期间发生在间隙 18 周围的间隙弥散场 32。特别地，间隙弥散场 32 在铜箔绕组 30 中引起涡流，这将会增加交流损耗，尤其是对于

高频交流电流而言。

因此，希望能够去除或最小化间隙弥散场 32 对于箔式绕组 30 的影响，以减小交流损耗，而不会明显增加磁性线圈 10 的直流电阻。

发明内容

本发明为了克服现有技术存在的缺陷，更具体地说，本发明的目的是希望能够去除或最小化间隙弥散场 32 对于箔式绕组 30 的影响，以减小交流损耗，而不会明显增加磁性线圈 10 的直流电阻。

根据本发明的一个方面，提供了一种减小磁性线圈中的交流损耗的方法，所述方法包括：在磁芯中形成至少一个间隙，所述间隙以与所述磁芯的第一柱和第二柱所限定的轴线相垂直的对称面为中心；形成箔式绕组，所述箔式绕组围绕所述第一柱、所述第二柱和所述间隙，以限定出关于所述轴线对称的开口，所述开口包括从所述第一柱和所述第二柱以向外的方向延伸的空腔；以及设置所述箔式绕组，使得所述空腔关于所述对称面对称，以减小所述交流损耗。

根据本发明的另一个方面，提供了一种具有减小的交流损耗的磁性线圈，所述磁性线圈包括：磁芯，具有沿轴线朝向彼此延伸的第一柱和第二柱，在所述第一柱和第二柱之间限定出至少一个间隙，所述间隙以与轴线相垂直的对称面为中心；以及箔式绕组，其围绕所述第一柱、所述第二柱和所述间隙，以限定出关于所述轴线对称的开口；所述开口包括从所述第一柱和所述第二柱以向外的方向延伸的至少一个空腔，所述空腔关于所述对称面对称。

附图说明

图 1 示出了现有技术中的箔缠绕磁性线圈 10 的分解三维视图；

图 2 示出了图 1 的磁性线圈的正面图；

图 3A 示出了通过图 1 的磁性线圈的垂直剖面；

图 3B 显示了图 3A 的剖面中、间隙周围区域的放大部分；

图 4 是示出了中心柱中具有单个间隙并且铜箔绕组中具有形状优化的空腔的磁芯的、通过磁性线圈的垂直剖面；

图 5 显示了通过图 4 的磁性线圈的水平剖面，示出了绕组中的、磁芯的中心柱周围的空腔；

图 6 示出了具有能形成如图 4 所示空腔的开口的箔；

图 7 是示出了中心柱中具有单个间隙的磁芯以及示出了具有 V 形空腔的箔式绕组的、通过磁性线圈的垂直剖面；

图 8 显示了具有能形成图 7 的空腔的开口的箔；

图 9 是通过磁性线圈的垂直剖面，该磁性线圈的磁芯在绕组形成的空腔外部的柱中具有间隙；

图 10 显示了具有能形成图 9 所示空腔的圆形开口的箔；

图 11 显示了图 9 的绕组，其中去除了磁芯，以示出由图 10 的圆形开口形成的锥形空腔；

图 12 是示出了具有多个间隙的磁芯的、通过磁性线圈的垂直剖面；

图 13 显示了具有适合于制造图 12 的绕组的开口的箔；

图 14 示出了具有六个间隙的磁芯和形成空腔的绕组；

图 15 显示了适合于制造图 14 的绕组的箔。

具体实施方式

以下描述的磁性线圈使用具有一个或多个间隙的磁芯以及未完全通过磁芯中的间隙区域中的绕组窗口延伸的箔式绕组，从而能够减小磁性线圈的交流电阻并从而减小交流损耗。

图 4 是通过磁性线圈 400 的垂直剖面，示出了具有分为两个部分

的中心柱 406 的磁芯 402。图 4 是示意性的，并未按比例绘制。中心柱 406 的两个部分限定出轴线 407；单个间隙 408 以垂直于轴线 407 的对称平面 B-B 为中心。铜箔绕组 404 围绕中心柱 406 的两个部分以及间隙 408，如图所示。磁芯 402 具有绕组窗口 410 和 412，绕组窗口 410 和 412 容纳铜箔绕组 404，如图所示。所示的由间隙 408 形成的间隙弥散场 415 位于绕组窗口 410 中。窗口 412 中具有类似的弥散场，但为了清晰说明而未示出。铜箔绕组 404 具有去除了铜的部分，以形成以对称平面 B-B 中的间隙 408 为中心的空腔 414，如图所示。空腔 414 避免或减小了间隙弥散场 415 在绕组 404 中形成将导致磁性线圈 400 中的交流损耗的涡流。

如图所示，铜箔绕组 404 在间隙 408 附近被切开有空腔 414。空腔 414 示出了适合于较大交流电流（即，箔式绕组 404 内的交流电流为直流电流中较大部分的情况）的近似半圆空腔形状（即，最大箔间隙 g_f 的宽度近似等于绕组窗口 412 的宽度 h ）。随着箔式绕组 404 中交流电流变为直流电流中较小部分，由于交流损耗变得不甚显著，因而可减小箔间隙 g_f 。由于为形成空腔 414 而去除箔增加了绕组 404 中的直流损耗而减小了交流损耗（例如，与没有空腔 414 的绕组 404 相比），因此间隙 408 附近的空腔 414 的大小和形状可调节，以优化直流损耗和交流损耗之间的折衷。

有几种方式来解释这种结构可带来的一些优点。一种解释是，在间隙 408 的区域中具有较少的铜，因此由间隙弥散场 415 引起的涡流较小。另一种解释涉及绕组 404 中高频电流的分布。也就是说，在层厚与趋肤深度可比的简单箔式绕组中，反向电流在绕组的相反侧上流动，从而使得底部绕组层在面向间隙 408 的表面上具有为末端电流 N 倍的电流，其中， N 是匝数（对于箔式绕组而言，等于层数）。在第一层中，该电流在间隙 408 附近集中，高频电流主要在铜箔绕组 404 的各匝的外露边缘 405 附近流动（所示的边缘 405 位于窗口 412 中，但并非所有边缘 405 均被标出，并且为了清楚说明，边缘 405 并未在窗口 410 中示出）。由于在交流电流流动的位置与间隙 408 之间没有铜插入，因此间隙 408 导致的磁场不会引起附加的（或可感知的）涡

流。虽然由空腔 414 导致的外露边缘 405 与总的箔截面积（例如，绕组窗口 410 的面积）相比较小，但所形成的交流电阻减小了（例如，与如图 1 所示的现有技术相比）。在 g_f 近似等于绕组窗口 412 的宽度 h 并且空腔 414 为半圆形时形成较小交流电阻（以及因此形成较小交流损耗）的原因在于，边缘 405 与间隙 408 近似等距离，从而使得在绕组 404 的各个边缘 405 内出现近似相等的交流电流密度。

当 g_f 增加超过宽度 h 时（参见图 4），交流电阻增加（交流电阻增加）。但是，在某些情况下，较大的 g_f 值可能是理想的，这是因为，与没有空腔的箔式绕组中的交流损耗相比，在 g_f 大于绕组窗口 412 的宽度 h 的两倍时交流损耗仍然会减小。

在仅使用高频交流电流的箔式绕组中并入空腔时，同样具有优势。

图 5 显示了通过图 4 的磁性线圈 400 的水平剖面 B-B，示出了磁芯 402 的中心柱 406 周围的绕组 404。图 5 是示意性的，并未按比例绘制。所示的绕组 404 绕中心柱 406 被切除一部分，从而使得由间隙 408 导致的间隙弥散场 415 不会在绕组 404 中引起较大的涡流。

图 6 示出了箔 600 中的开口 606。当箔 600 从端部 602 开始被缠绕时，可创建图 4 的空腔 414，箔 600 的内边缘 605 形成图 4 的边缘 405。如图所示，开口 606 在端部 602 处具有与空腔 414 的宽度 g_f 相对应的宽度 g_f 。为了说明目的，所示的箔 600 被缩小（即，未按比例显示）。在用以创建绕组 404 的箔缠绕过程之前或之中，箔 600 可被切割以形成开口 606。

图 7 和图 8 可结合以下描述一起参看。图 7 和图 8 是示意性的，并未按比例绘制。图 7 是通过磁性线圈 700 的垂直剖面，示出了在中心柱 406 中具有单个间隙 408 的磁芯 402 以及具有 V 形空腔 714 的铜箔绕组 704。图 8 显示了具有开口 806 的箔 800，从而在（从端部 802 开始）缠绕以形成绕组 704 时形成空腔 714。箔 800 和绕组 704 与磁性线圈 400 的绕组 404 相比可以较容易、因此较便宜地制造。在一个实施方案中，箔 800 可由两个或更多的单个梯形箔片构成，其被缠绕在一起以形成具有空腔 714 的绕组 704。

虽然用于最小化交流电阻的理想空腔形状可为半圆形，但 V 形可

较容易切割，在很多情况下，使用 V 形而不是半圆形以节省成本。使用半圆形获得的较小的改进在磁性线圈中出现较大交流电流时能获得更好的性能。另外，在绕组中交流电流相对于直流电流较小的情况下，空腔的大小可按几种方式减小：a) 可减小半圆的宽度，使它变成椭圆；b) 可减小半圆的直径（即，可根本不切除距离间隙最远的绕组层）；以及 c) 可使用椭圆和 V 形的特征。可使用其它形状（可以近似于半圆和/或 V 形，也可以不同于半圆和/或 V 形）用于空腔 414 和 714，而并未背离本发明的范围。

图 9 是通过磁性线圈 900 的垂直剖面，该磁性线圈 900 的磁芯 902 在绕组 904 外部的柱 910 中具有间隙 908。图 9 是示意性的，并未按比例绘制。绕组 904 绕磁芯 902 的无隙柱 906 缠绕，并具有 V 形空腔 914。图 10 显示了具有椭圆开口 1006、1008、1010 和 1012 的箔 1000。开口 1006、1008、1010 和 1012 是伸长的，以保持从间隙 908 到箔 1000 绕各个开口的边缘等距离。图 10 是示意性的，并未按比例绘制。开口 1012 的形状例如可包括与开口 1012 的平面中的间隙 908 的直线性相对应的（顶部和底部的）直线。开口 1006、1008、1010 和 1012 隔开，它们的大小被设置为使得当箔 1000（从端部 1002 开始）被缠绕以形成绕组 904 时，开口 1012 位于开口 1010 的上方、开口 1010 位于开口 1008 的上方、以及开口 1008 位于开口 1006 的上方。开口 1006、1008、1010 和 1012 从而在绕组 904 中形成空腔 914。图 11 显示了将绕组 904 从磁芯 902 移出以示出由开口 1006、1008、1010 和 1012 形成的锥形空腔 914。图 11 是示意性的，并未按比例绘制。可以理解，可在箔 1000 上以适当间隔形成更多或更少的开口，以形成绕组 904 的空腔 914。在另一实施方案中，可使用切割工具来在形成绕组 904 之后形成空腔 914。

图 12 是通过磁性线圈 1200 的垂直剖面，示出了分别在三个柱 1204、1206 和 1208 中具有多个间隙 1214、1216 和 1218 的磁芯 1202 以及箔式绕组 1219。图 12 是示意性的，并未按比例绘制。磁芯 1202 具有绕中心柱 1206 的绕组窗口 1210 和 1212，它们容纳铜箔绕组 1219，如图所示。铜箔绕组 1219 在环绕间隙 1214、1216 和 1218 的区域中去

除了铜，如空腔 1220、1222 和 1224 所示，以避免或抑止将在磁性线圈 1200 中造成交流损耗的涡流。

磁性线圈 1200 的绕组窗口 1212 具有宽度 h 。由于绕组窗口 1212 在各侧都具有间隙 1216 和 1218，因此空腔 1222 和 1224 的最佳宽度 g_f 近似等于 $h/2$ 。类似地，由于绕组窗口 1210 具有与绕组窗口 1212 相等的尺寸，因此空腔 1220 的最佳宽度同样约为 $h/2$ 。

图 13 显示了具有适合于形成图 12 的绕组 1219 的开口 1306、1308、1310、1312、1314、1316 和 1318 的箔 1300。图 13 是示意性的，并未按比例绘制。箔 1300（从端部 1302 开始）被缠绕，从而使得开口 1306 形成空腔 1222、开口 1308、1312 和 1316 位于彼此上方以形成空腔 1220、以及开口 1310、1314 和 1318 位于彼此上方以形成空腔 1224。可以理解，可在箔 1300 上以适当间隔形成更多或更少的开口，以形成绕组 1219 的空腔 1220、1222 和 1224。

通过在磁性线圈的磁芯中包含多个间隙以及在每个间隙附近的箔式绕组中形成空腔，可进一步减小设计用于大交流电流的磁性线圈中的交流电阻。图 14 示出了具有磁芯 1402 的磁性线圈 1400，其中，磁芯 1402 具有六个间隙。具体而言，磁芯 1402 在左柱 1404 中具有两个间隙 1410、1412，在中心柱 1406 中具有两个间隙 1414、1416，在右柱 1408 中具有两个间隙 1418、1420。图 14 是示意性的，并未按比例绘制。绕组 1419 包括位于间隙 1410 附近的空腔 1422、位于间隙 1412 附近的空腔 1423、位于间隙 1414 附近的空腔 1424、位于间隙 1416 附近的空腔 1425、位于间隙 1418 附近的空腔 1426、以及位于间隙 1420 附近的空腔 1427。

图 15 显示了适合于制造图 14 的绕组 1419 的箔 1500。图 15 是示意性的，并未按比例绘制。箔 1500（从端部 1502 开始）被缠绕以形成绕组 1419。箔 1500 的开口 1506 和 1508 分别形成绕组 1419 的空腔 1424 和 1425。开口 1510、1514 和 1518 形成空腔 1422；开口 1522、1526 和 1530 形成空腔 1423；开口 1512、1516 和 1520 形成空腔 1426；而开口 1524、1528 和 1532 形成空腔 1427。可以理解，开口 1506 至 1532 是示意性的，可在形成绕组 1419 之前在箔 1500 中形成更多或更

少的开口。

可以理解，可使用其它构造的箔开口来形成绕组的空腔，以用于具有不同数量的间隙的磁性线圈，或用于在不同位置具有间隙的磁性线圈。一个实施例是 UU 铁心而不是 EE 铁心（其中，U 和 E 代表铁心件形状），并在两个柱中均具有间隙（线圈缠绕在每个柱上），或者可仅在一个柱中具有间隙。在另一实施例中，可使用 UI 或 EI 铁心（其中，U、I 和 E 代表铁心件形状），在 I 件和 U 件之间或 I 件和 E 件之间的接合处具有间隙，并且对应地设置空腔。

注意，本发明对于包含一个或多个较大低频交流分量和一个或多个较小高频交流分量的电流波形也能正常发挥作用，只要低频分量的频率足够低，以使得这些频率处的电阻接近于绕组的直流电阻即可。

可在不背离本发明的范围的前提下对以上方法和系统进行改变。因此应该理解，以上说明书中包含的或附图中显示的内容应被视为示意性而非限制性。所附的权利要求旨在覆盖本文描述的一般的和特殊的特征，本发明的方法和系统的范围在文字上的陈述应由权利要求来限定。

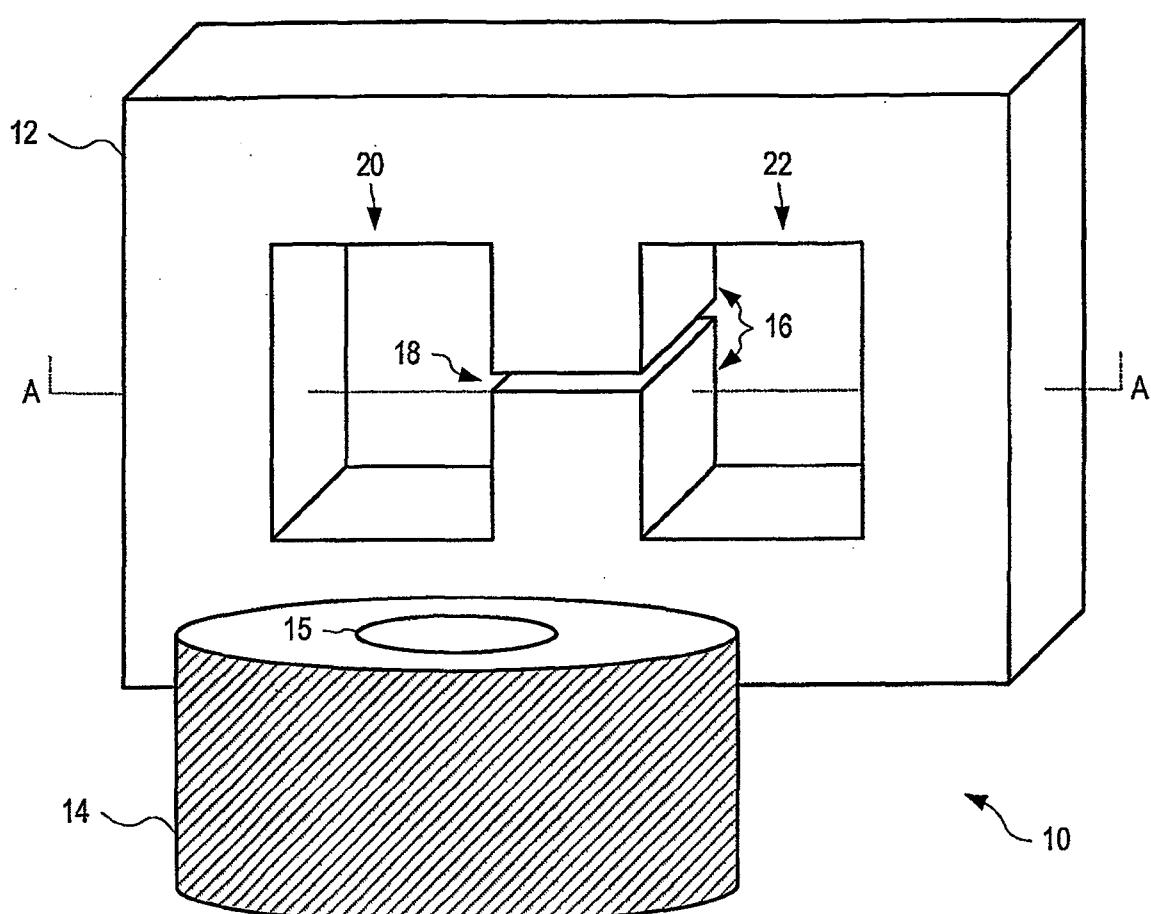


图 1
(现有技术)

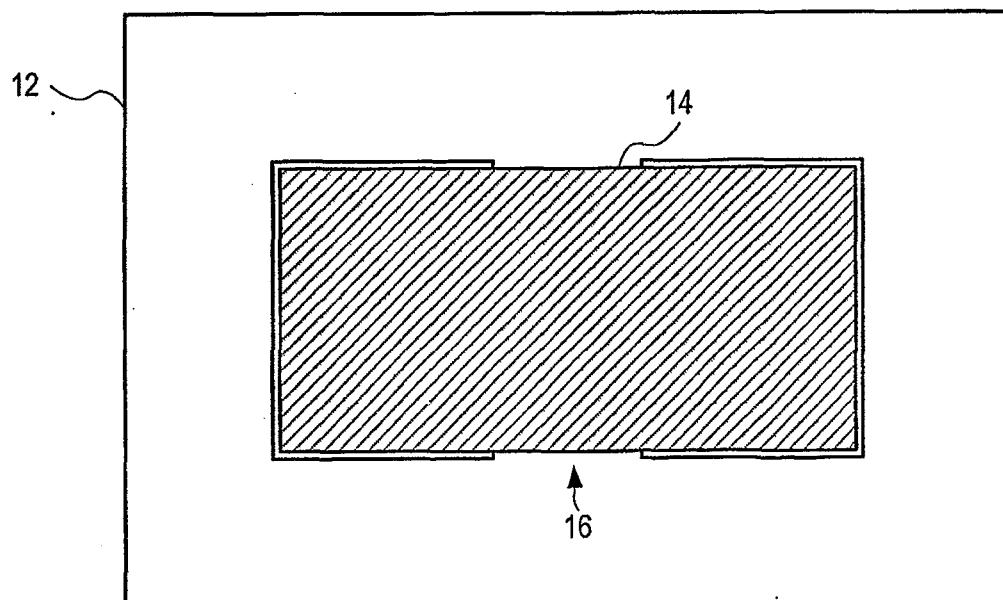


图 2
(现有技术)

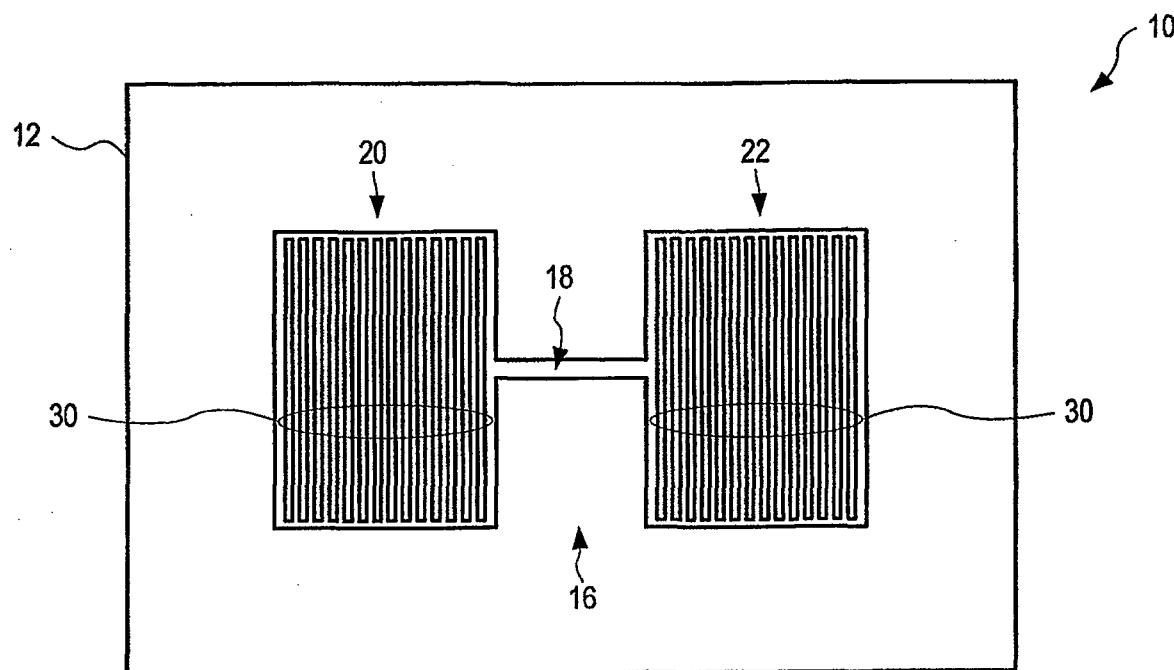


图 3A
(现有技术)

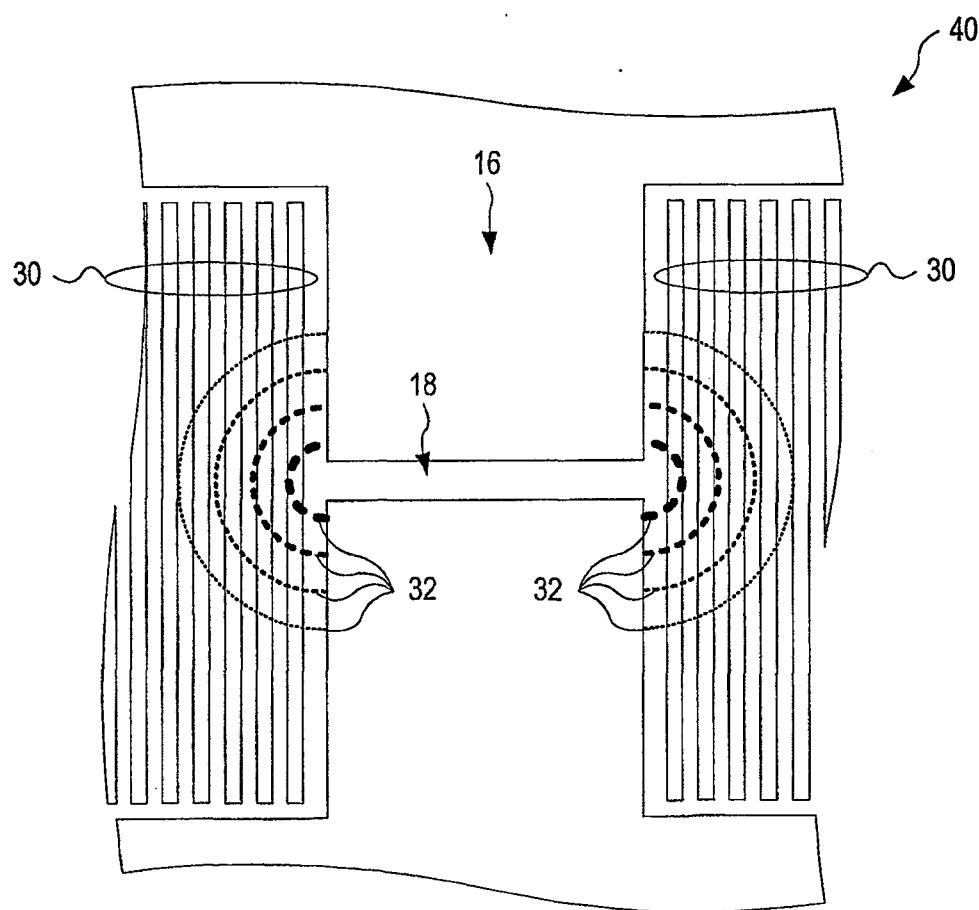


图 3B
(现有技术)

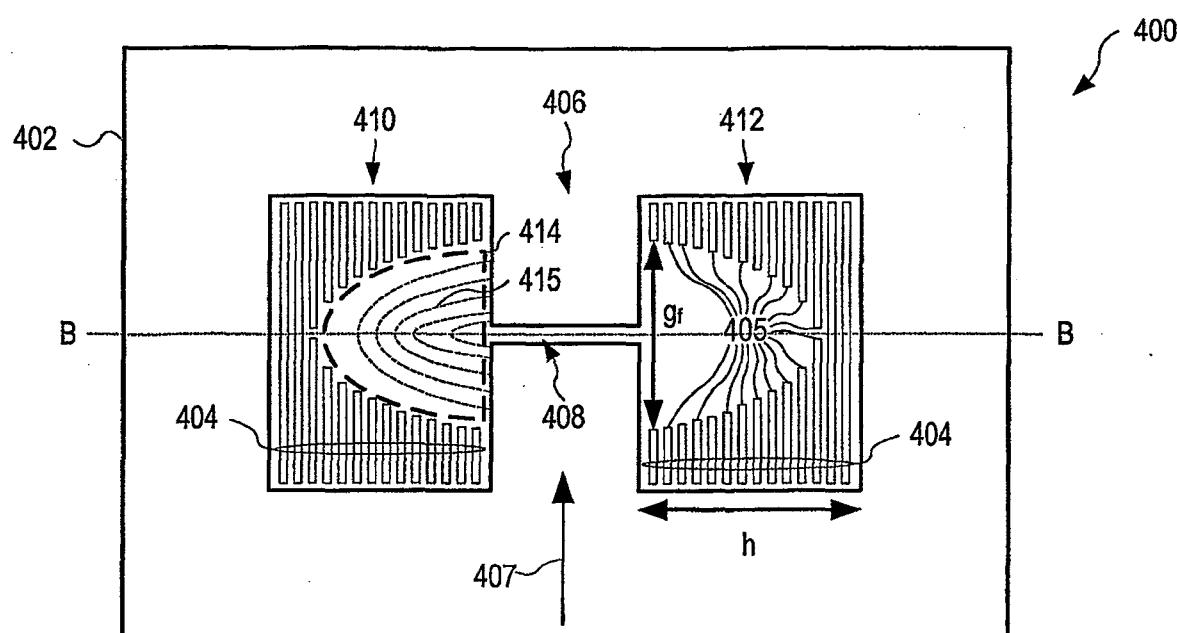


图 4

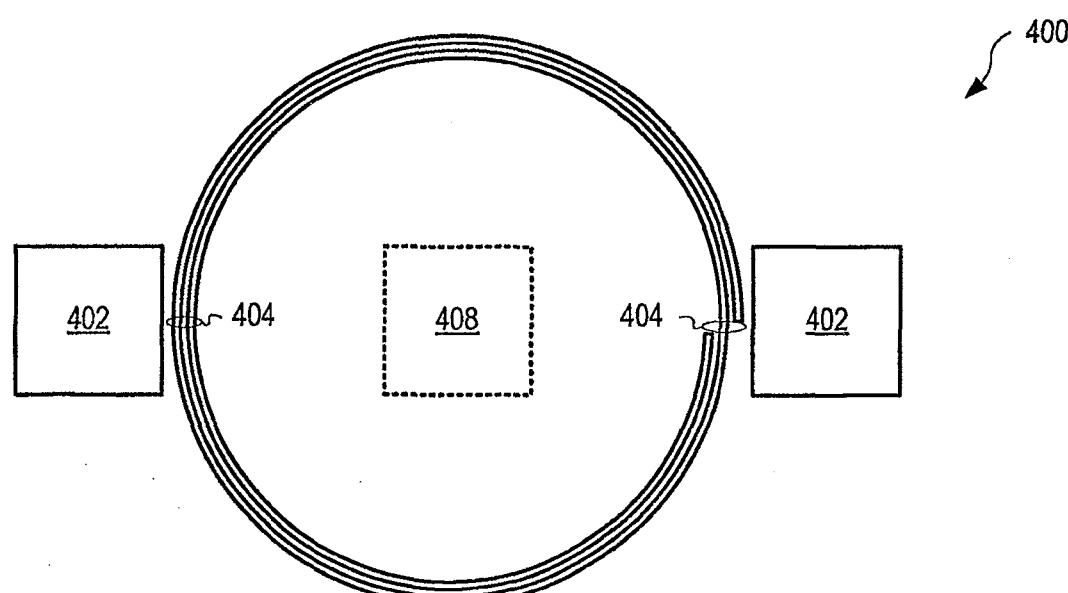


图 5

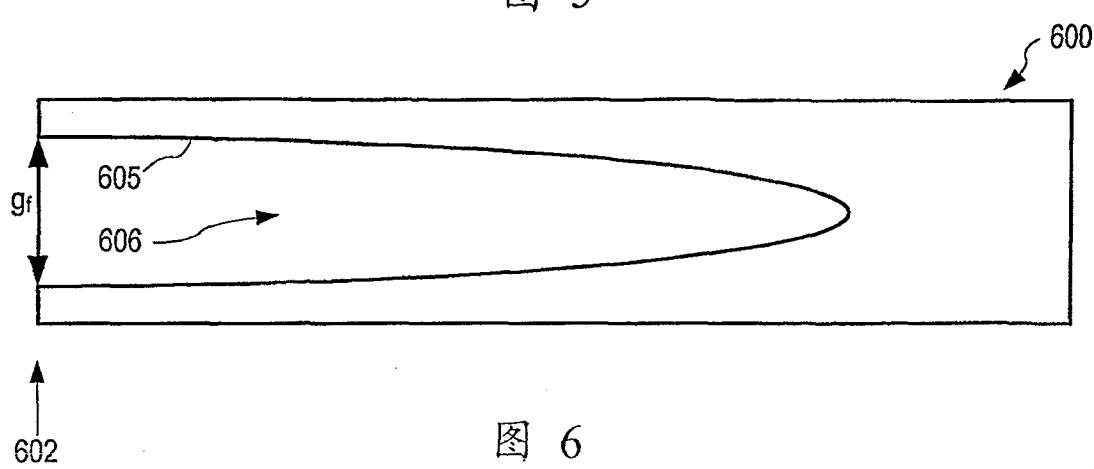


图 6

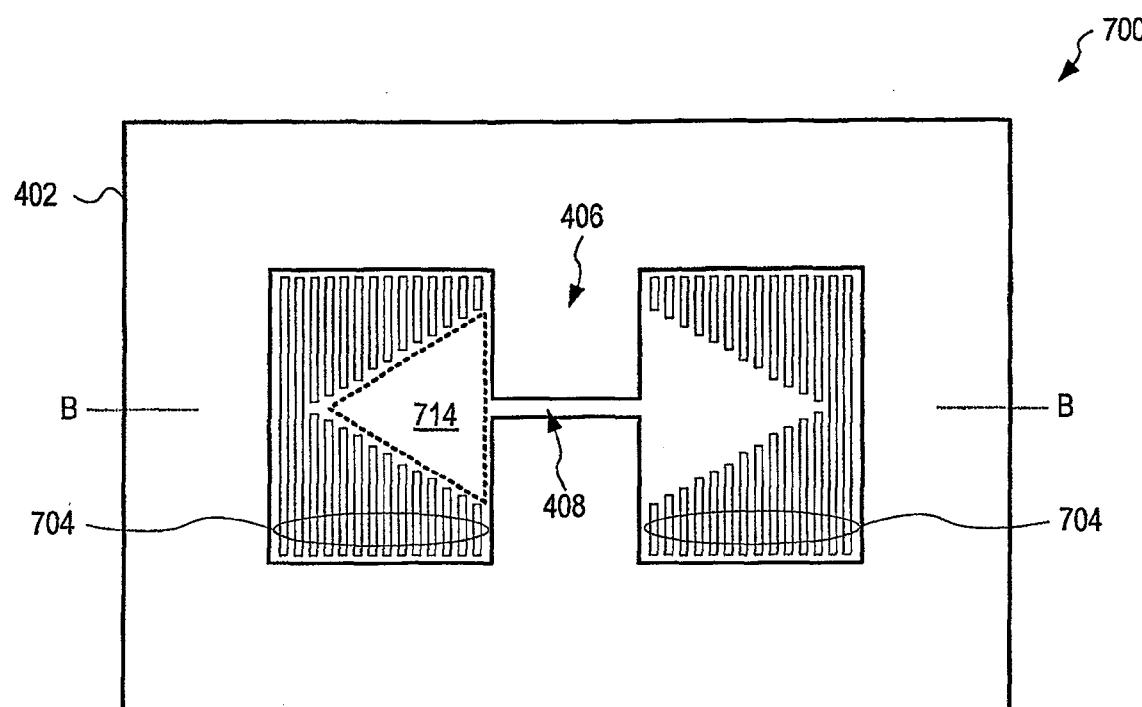


图 7

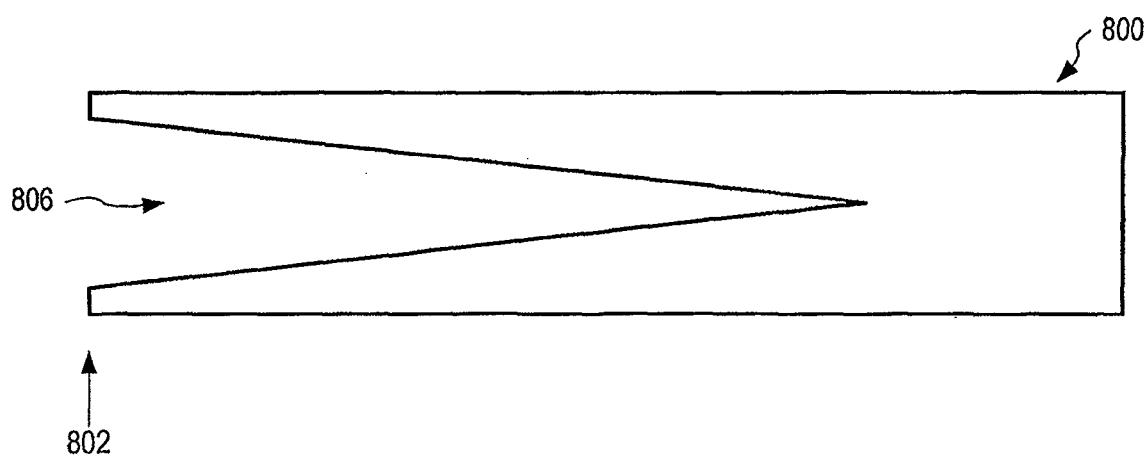


图 8

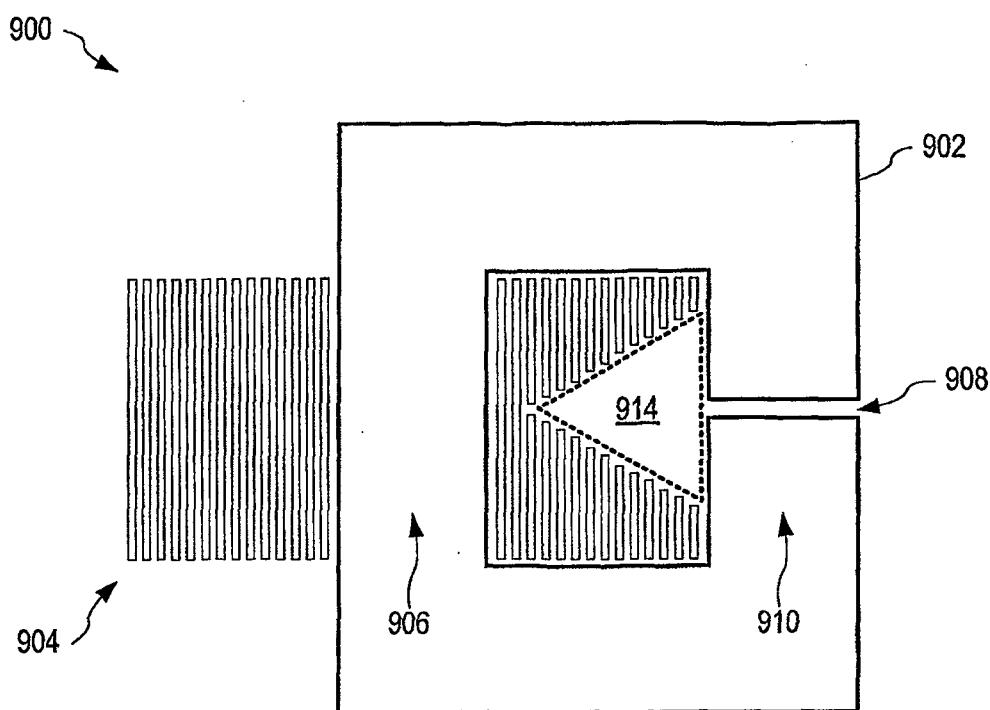


图 9

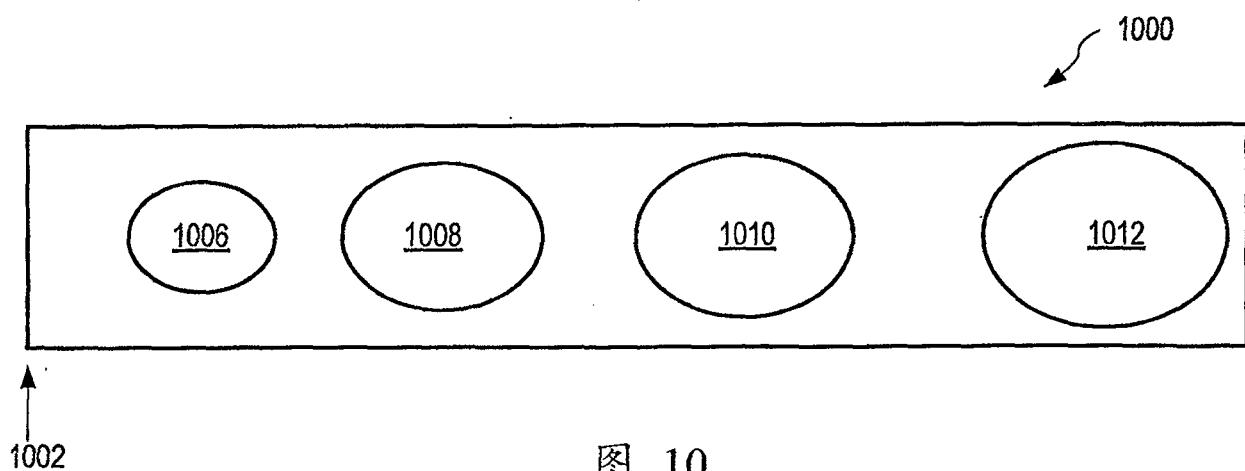


图 10

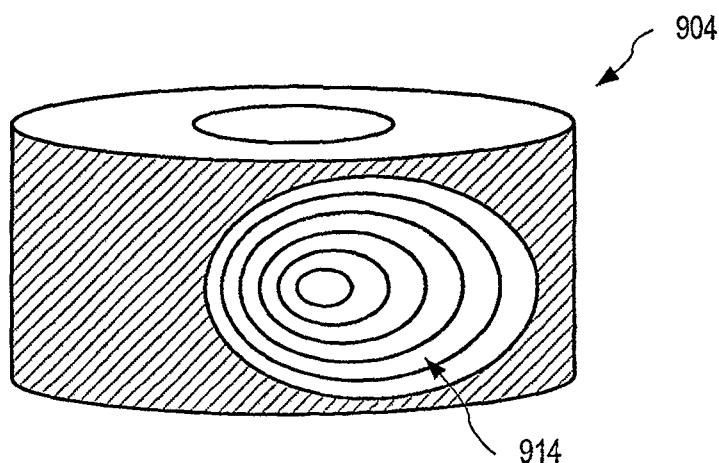


图 11

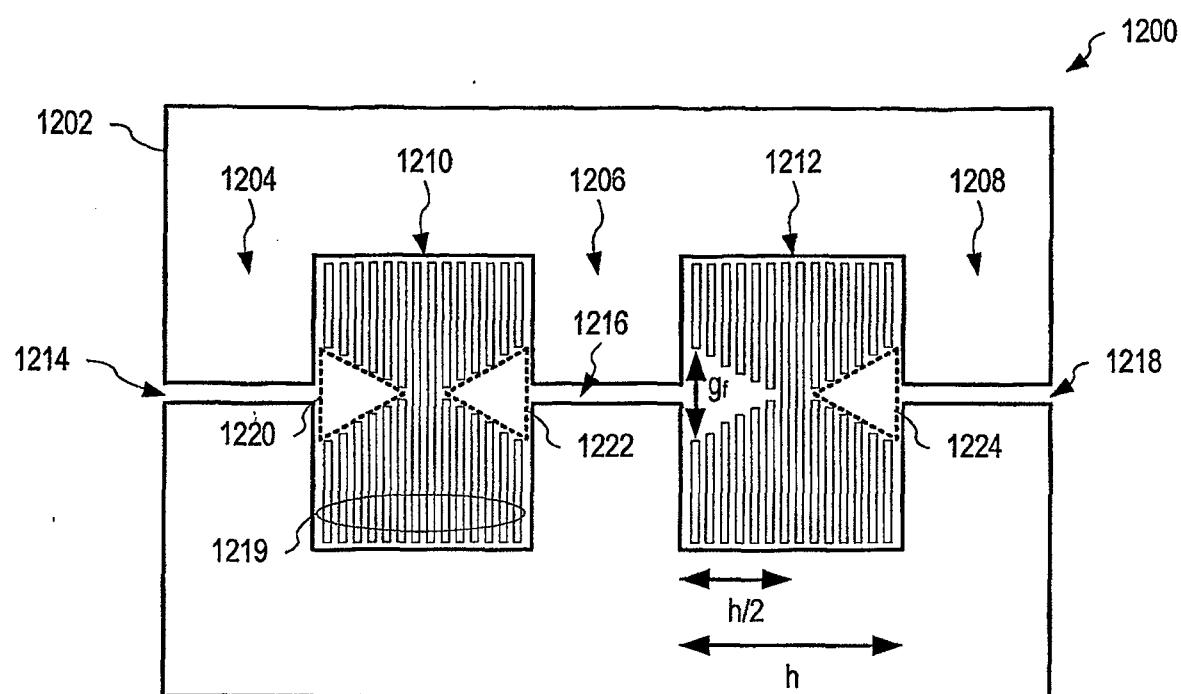


图 12

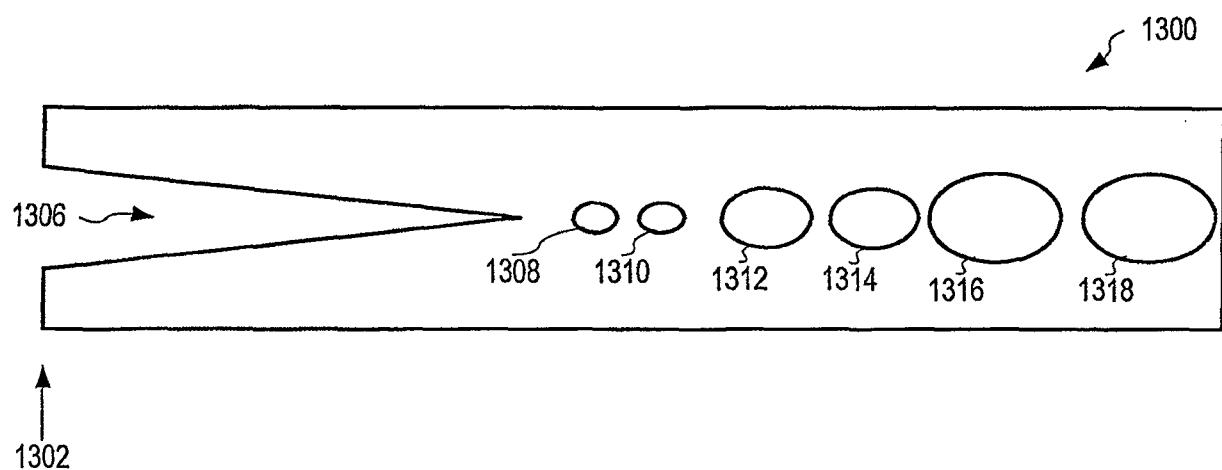


图 13

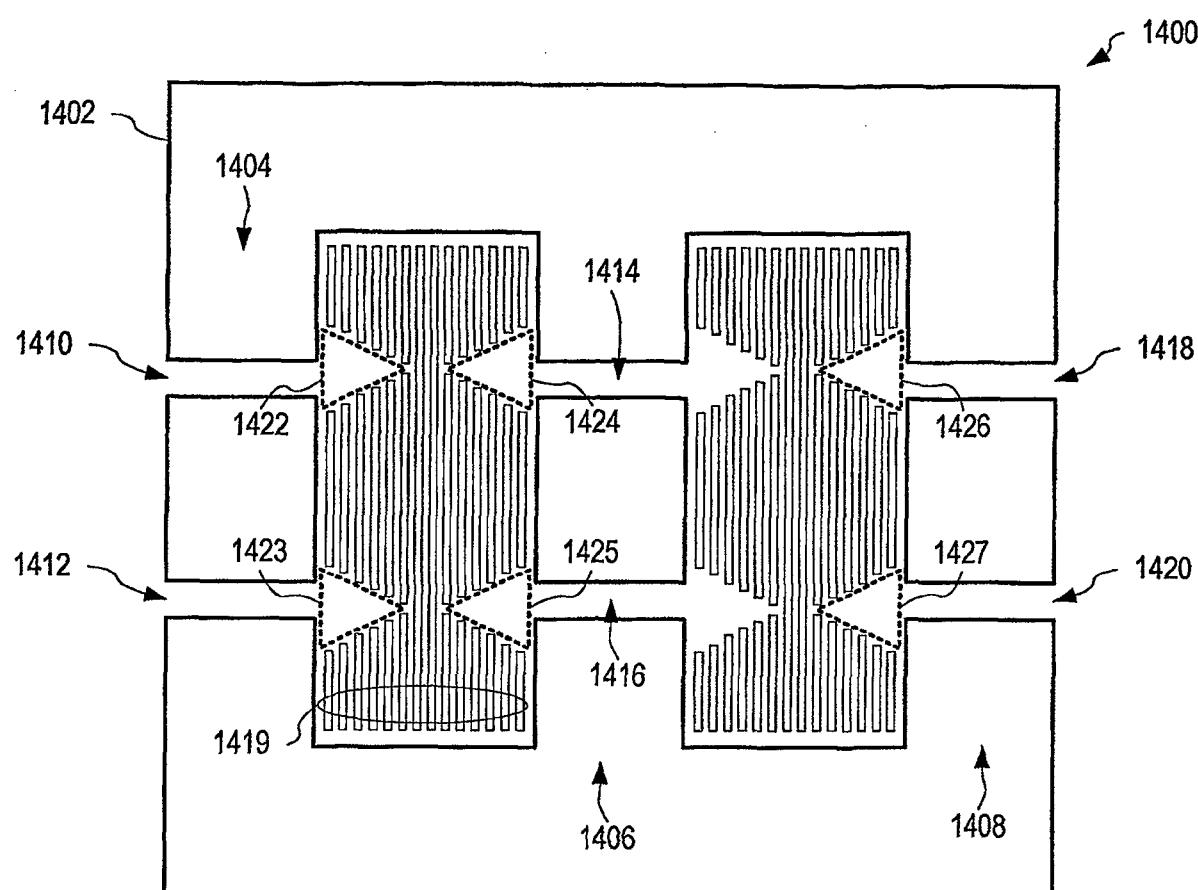


图 14

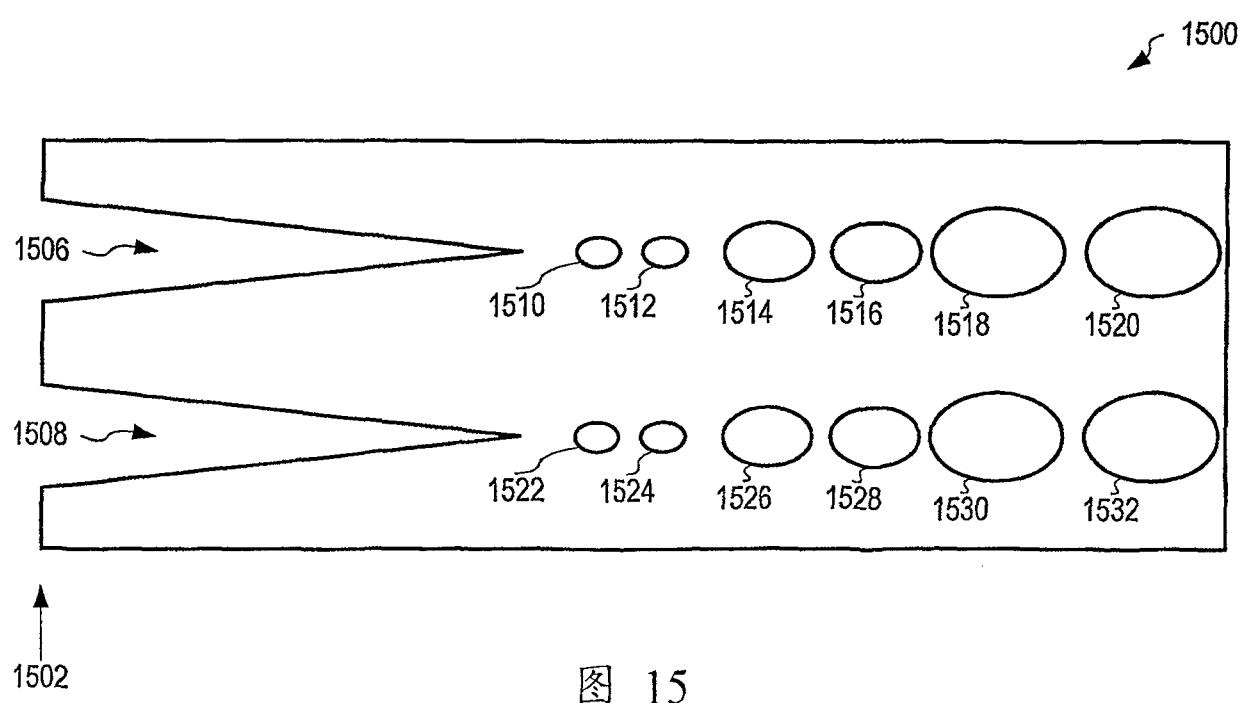


图 15