



[12] 发明专利说明书

专利号 ZL 03822896.3

[45] 授权公告日 2008 年 10 月 29 日

[11] 授权公告号 CN 100429424C

[22] 申请日 2003.9.25 [21] 申请号 03822896.3

[30] 优先权

[32] 2002.9.27 [33] US [31] 60/414,375

[32] 2003.2.14 [33] US [31] 10/367,511

[86] 国际申请 PCT/IB2003/004206 2003.9.25

[87] 国际公布 WO2004/029475 英 2004.4.8

[85] 进入国家阶段日期 2005.3.25

[73] 专利权人 皇家飞利浦电子股份有限公司

地址 荷兰艾恩德霍芬

[72] 发明人 T·P·H·瓦梅达姆

[56] 参考文献

WO02/073318A2 2002.9.19

US6022005A 2000.2.8

JP10-252820A 1998.9.22

US5920173A 1999.7.6

CN1275448A 2000.12.6

US4083433A 1978.4.11

US6322060B1 2001.11.27

US6196514B1 2001.3.6

审查员 黄树军

[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
代理人 邹光新 张志醒

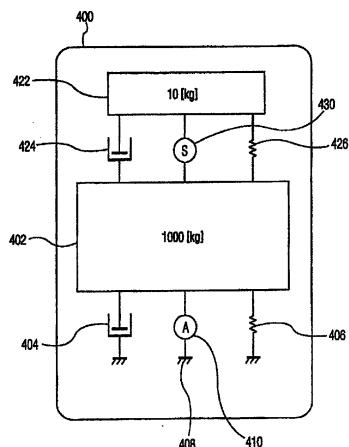
权利要求书 3 页 说明书 10 页 附图 19 页

[54] 发明名称

用于主动振动隔离和主动振动消除的系统和方法

[57] 摘要

一个减振器系统 400 包括一个传感器 430，一个电子控制器 2295 和一个激励器 410。传感器 430 测量机械振动并产生一个由振动引起的电子输入信号。传感器 430 位于一个物体和一个参考物体 422 之间。电子控制器 2295 响应该电子输入信号，生成一个电子输出信号。激励器 410 响应该电子输出信号，在所述物体和一个外部物体之间产生一个力。传感器 430 和激励器 410 位于适当的位置，以便减少延时，该延时包括激励器 410 和传感回路中的声信号延时和电信号延时的总和。



1. 一种减振器系统，包括：

传感器（2120），能够测量机械振动并且能够产生一个由振动引起的电输入信号，并且其中该传感器被安置在要减振的物体（2130）和参考物体（2180）之间；

电控制器，响应电输入信号并产生一个电输出信号；和

激励器（2110，2150），响应该电输出信号，并由此在所述要减振的物体（2130）和外部物体（2170）间产生一个力；其中传感器（2120）和激励器（2110，2150）集成在一起，由此具有基本上很小的延时；

其中该延时基本包括在激励器和传感器回路中的声信号延时和电子信号延时的总和。

2. 权利要求1所述的系统，其中传感器包括带有磁铁对的洛伦兹型线圈，并且激励器包括带有磁铁对的洛伦兹型线圈。

3. 权利要求1所述的系统，其中传感器的作用线与激励器的作用线有相同的作用点和相同的方向。

4. 权利要求1所述的系统，还包括：声学防护罩，它被放置成使声波在到达传感器的参考物体之前基本上被衰减。

5. 权利要求2所述的系统，其中传感器线圈和激励器线圈被放置成使它们的感应磁场基本垂直。

6. 权利要求2所述的系统，其中至少两个线圈包括相反极性的磁铁，其中传感器线圈被放置成可以通过传感器信号的加和减之一，基本上消除来自激励器线圈和外部源中的至少一个的磁场干扰。

7. 权利要求2所述的系统，还包括：磁防护罩（2040），其被放置成基本上衰减由激励器引发的电磁场。

8. 权利要求2所述的系统，还包括：电防护罩，其被放置成基本上衰减由激励器引发的电磁场。

9. 权利要求1所述的系统，其中延时小于1毫秒。

10. 一种用于高精度生产或检测装置的设备，包括：

要减振的物体（2130）；

参考物体（2180）；

位于要减振的物体（2130）和地面（2170）或者另外一个外部物体之间的主动振动隔离和消除的绝对减振器，该地面或者另外一个外

部物体是作为反作用力的接收者，该减振器包括：

传感器（2120, 2220），能够测量机械振动并且能够生成由该振动引起的电输入信号，并且其中该传感器位于要减振的物体（2130）和参考物体（2180）之间；

电控制器，响应该电输入信号并生成电输出信号；和

激励器（2110, 2210），响应该电输出信号并由此在要减振的物体（2130）和地面（2170）或者另外一个外部物体之间生成一个力；其中传感器和激励器集成在一起，由此在传感器和激励器之间的声延时基本很小；

其中该延时基本包括在激励器和传感器回路中的声信号延时和电子信号延时的总和。

11. 权利要求 10 所述的设备，其中传感器包括一个洛伦兹型线圈，并且激励器包括一个洛伦兹型线圈。

12. 权利要求 11 所述的设备，其中传感器的作用线与激励器的作用线有相同的作用点和相同的方向。

13. 权利要求 10 所述的设备，还包括：声学防护罩，其被放置成使声波在到达传感器之前基本上被衰减。

14. 权利要求 11 所述的设备，其中传感器线圈和激励器线圈被放置成使它们的感应磁场基本垂直。

15. 权利要求 10 所述的设备，还包括：磁防护罩，其放置成基本上衰减由激励器引发的电磁场。

16. 权利要求 10 所述的设备，还包括：电防护罩，其放置成基本上衰减由激励器引发的电磁场。

17. 权利要求 10 所述的设备，其中延时小于 1 毫秒。

18. 一种主动对振动物体进行减振的方法，该方法包括：使用传感器（2120, 2220）测量机械振动；生成由振动引起的电输入信号，并且其中传感器位于要减振的物体和参考物体之间；使用响应该电输入信号并生成电输出信号的电控制器；使用激励器（2110, 2210），其响应该电输出信号并由此在要减振的物体和外部物体之间生成一个力；以及传感器和激励器集成在一起，由此具有基本很小的延时；其中该延时基本包括在激励器和传感器回路中的声信号延时和电子信号延时的总和。

19. 权利要求 18 所述的方法，其中延时小于 1 毫秒。
20. 权利要求 18 所述的方法，其中传感器包括带有磁铁对的洛伦兹型线圈，和激励器包括带有磁铁对的洛伦兹型线圈。
21. 权利要求 20 所述的方法，其中传感器的作用线与激励器的作用线有相同的作用点和相同的方向。
22. 权利要求 20 所述的方法，其中传感器线圈和激励器线圈被放置成使它们的感应磁场基本垂直。
23. 权利要求 20 所述的方法，其中至少两个传感器线圈被放置成通过传感器信号的加和减之一，基本上消除来自激励器线圈和外部源中的至少一个的磁场干扰。
24. 一种用于控制要减振的物体（2130）相对于地面（2170）与另外一个外部物体其中之一的运动的系统，其中该系统包括：传感器（2120，2220），用于提供表示在要减振的物体和参考物体之间的运动的传感器信号；控制器，用于基于该传感器信号提供控制信号；激励器（2110，2220），用于在控制信号的控制下影响在要减振的物体和地面（2170）与另外一个外部物体其中之一之间的运动；该传感器和激励器集成在一起，使得表征运动控制的延时时间小于 1 毫秒，并且基本上仅仅依赖于传感器和激励器之间的声耦合。
25. 权利要求 24 所述的系统，其中延时小于 50 微秒。
26. 权利要求 24 所述的系统，其用于集成电路的制造。
27. 权利要求 24 所述的系统，其用于对运动进行减振。
28. 权利要求 24 所述的系统，其中传感器包括带有磁铁对的洛伦兹型线圈，并且激励器包括带有磁铁对的洛伦兹型线圈。
29. 权利要求 28 所述的系统，其中传感器的作用线与激励器的作用线有相同的作用点和相同的方向。
30. 权利要求 28 所述的系统，其中传感器线圈和激励器线圈被放置成使它们的感应磁场基本垂直。
31. 权利要求 28 所述的系统，其中至少两个传感器线圈被放置成通过传感器信号的加和减之一，基本上消除来自激励器线圈和外部源中的至少一个的磁场干扰。

用于主动振动隔离和主动振动消除的系统和方法

技术领域

本发明是关于一种振动隔离和消除的系统和方法，特别适合于高精度晶片芯片的生产和检测设备，但不局限于此应用。

背景技术

采用主动振动隔离和消除技术的产品是市场上可得到的，但是他们的有效程度有待提高。随着需要更小尺寸特征的芯片生产的发展，用于IC生产和检测设备的主动振动隔离和消除技术(也称为气垫(air mount)技术)需要变得更加有效。通常，主动振动隔离/消除系统中的激励器和传感器没有集成在一起。例如，US专利6,286,644, Schubert公开并描述了主动振动隔离器，其中在图7中，传感器‘P0’和空气弹簧激励器‘AS’是相互分离的元件。

发明内容

本发明的目的是提供主动振动隔离/消除系统，该系统集成了激励器和传感器。系统提供了大幅改进的振动消除性能。和其他类似系统相同，该系统用于实际中的所有类型的高精度生产设备(例如，用于芯片生产设备中的气垫中)，高精度显微镜和其他高精度设备。本系统的应用例如减小了在追求具有更小尺寸特征的芯片中的重要的障碍。本发明基于一个概念，即能够将主动振动隔离/消除系统中的激励器和传感器集成在一起，以便使许多已知的性能局限(如根据著名的控制论的增益和相位关系所述)移动到不再是性能局限的水平。

本发明的另外一个目的是在绝对减振器中应用所提议的主动振动隔离/消除系统。通过结合减振技术和气垫技术，可以实现大幅度提高的气垫性能。本发明的绝对类型的(运动)减振器典型地但不排它地包括两个部分，这两个部分是至少在减振方向上可以彼此相对移动。该类型减振器的第一部分连接在第一物体(通常是要减振的物体)上，该部分可以包含激励器线圈和完整的传感器装置。在该类型的传感器的感应器件为磁铁和线圈型的情况下，其中一个部分例如传感器线圈连接在第一物体上，其他部分例如本发明的传感器磁铁可以相对于要减振的运动自由地连接在第一物体上。本发明人提议将传感器磁铁附着在参考物体上，

该物体应该不会受来自其他物体的振动的负面影响。参考物体可以是浮动物体（松散地连接在第一物体）。在绝对减振器中，该浮动物体作为绝对参考。该类型减振器的第二部分牢固地连接在第二物体（通常为地面或者不移动的参考物）上，其可以包括激励器磁铁。相对于减振器工作时仅仅要求第二物体用于提供反作用力，作为由激励器产生的作用在第一物体上的作用力的反作用力。也可以使用附加物体，在其中保存该反作用力。在低频率下，这会造成较低的性能，但是在某些情况下是优选的。在以上和以下的描述中，线圈和磁铁位置能够互换，同时不影响本发明的总的构思。是否交换线圈和磁铁的位置是一个讨论，它取决于许多因素，并且可能根据不同的实施而改变。然而，通常来说，优选地将具有最低惯性的元件装配在其运动将被减振和被控制的物体上。

然而，本发明的各个方面还可以应用于相关的减振器，因此并不局限于绝对减振器。通常相关类型的（运动）减振器包括两个部分，这两个部分是至少在减振方向上可以彼此相对移动。该类型减振器的第一部分可以包含激励器线圈和传感器线圈，该第一部分牢固地连接在第一物体上。该类型减振器的第二部分包括激励器磁铁和传感器磁铁，该第二部分牢固地连接在第二物体上。

在一个优选实施例中，将一个洛伦兹（Lorenz）型线圈用作传感器，另外一个用作激励器，这是由于它们有接近理想的性能。通过采用特定的线圈设计，可以将传感器线圈和激励器线圈之间的潜在串扰减少到可以忽略的程度。减振器提供了与运动速度方向相反的力。由于洛伦兹型线圈（也称为音圈）能够感知速度并且提供力，因此很明显，它们可以用作传感器和激励器。在实际应用中（例如在主动气垫中），由于以上原因和其他原因，它们被频繁地使用。也能采用其他类型的传感器和激励器。然而，它们可能需要进行信号调节或者其他操作来使它们可用。另一种类型的传感器的一个例子是激光干涉仪。

本发明的一个重要方面在于如下观察，即优选地配置传感器和激励器，使得组合（它是减振器的一部分）具有特定的相关属性。相关属性之一是由激励器引起的机械信号到传感器的传递时间短。在激励器引起机械运动后，传感器测量该机械运动。本发明的传感器与激励器的组合具有声延迟，在一个优选实施例中，该声延迟远远小于一毫秒（通常快于 40 微秒）。此外，应该最小化在传感器与激励器之间的直接通路的质

量，而应该最大化它的刚度。通过将传感器和激励器基本彼此靠近，能够实现所有这些规定。由于机械信号的传递时间有限，并且（在激励器与传感器之间）没有任何实质的串扰，这允许减振器具有十分稳定的高增益反馈控制回路。此外，本发明的减振器优选地但不排它地具有小于1微秒的电延时（它在传感器与激励器之间）。这就意味着，在传感器检测由机械运动引起的信号中，可以有很快的反应（该反应命令激励器产生一个力）。

本发明的另外一个目的是使串扰和干扰最小，特别是在传感器与激励器之间。发明人发现，尤其通过使用磁性类型的激励器和非磁性类型的传感器，降低了串扰。非磁性类型的传感器的例子是光学传感器。实现使不想要的串扰最小的额外的新颖方式是将激励器线圈和传感器线圈相互垂直放置。通过采用该方法，由激励器的激励器线圈产生的磁场会使在传感器线圈中的感应电流最小。传感器线圈不会产生场，因此串扰仅仅由一种方式产生。

通过使用两个而不是一个传感器线圈，并且通过使用参考物体中相反极性的磁铁，就会形成两个传感器，在出现运动时，这两个传感器产生相反的信号，而在出现电干扰或者磁性干扰时，它们产生相等的信号。通过将两个传感器信号相减，就可以放大运动的测量值，同时消除所有的常规干扰。一个具有相同效果的方法是采用相同的磁铁布置和相反的线圈缠绕方向。

发明人发现，另外一种减少不需要的串扰的方法是在激励器和传感器间采用防护罩。当使用包含导电体的防护罩（例如铜防护罩）时，可以实现用于EM波的防护罩。后一种防护罩也有益于降低由外部EM源造成的（例如由50/60Hz电源线造成的）负面影响。防护罩应该应用在传感器与激励器和或外部EM源之间。例如，能够用铜箔包装激励器和或传感器。为了降低不想要的串扰，需要使用磁防护罩。可以通过例如用所谓的 μ 金属包围住传感器线圈的方法来实现该防护罩。

发明人还发现，当用防止噪声的防护罩覆盖减振器时，减振器的性能进一步提高。这是因为，发明人发现声波与电流一样在线圈上产生干扰。发明人发现，在绝对型的减振器中，特别是在浮动参考物体周围提供声学防护罩是有益处的。该防护罩应该不接触参考物体。在一个典型的但不排它的实施例中，传感器磁铁松散地连接在要减振的物体上。当

由理想电流源向激励器线圈进行馈送时，第二物体的运动不能在激励器线圈中感应出电流。第二物体（激励器磁体安置在其上）仅仅提供激励器的作用力的反作用力（否则就不会引起向着要减振的物体的运动）。当电流源被设计为接近理想源时，来自第二物体的运动的干扰有望很小甚至没有（除了第二物体的剧烈运动以外，由该剧烈运动引发碰撞，在该情况下，存在结构错误）。

在一个优选实施例中，传感器和激励器两者都安装在需要减振的物体上，但是并不互相连接（例如，在现有技术中，传感器和激励器两者都安装在一个组件中，该组件安装在要减振的对象上）。这样做的缺点是性能变得依赖于组件与要减振的物体之间的连接的好坏。即使是在最好的情况下，这样做也是有局限性的。使传感器和激励器拥有它们自己的接合部位，则可以消除这种依赖性。通过将传感器和激励器相互并行地（代替串行）安装，因为传感器将仅测量对象的运动，要减振的对象可以不受由减振中的形变（例如由有限的硬度）造成的影响，同时没有由激励器力造成的减振器中的形变的负面影响。

在另一个优选实施例中，传感器的作用线（或者多个传感器的组合）与激励器的作用线有相同的作用点和相同的方向（这与现有技术中的情况不同）。该实施例提高了物体的减振性，因为减振作用恰好是在测量干扰的位置实施的。当可以预测干扰并且可以将预期的补偿信号馈送给减振器的补偿装置（例如，连接在激励器上的电气电路）时，减振特性进一步得到改善。

其他附加的优点和新颖特性在以下的描述中阐明，并且根据以下解释，对本领域技术人员来说其一部分是显而易见的，或者通过本发明的实现来了解它们。

附图说明

以下会通过例子并且参考附图，更加详细地解释本发明：

图 1 示出了一个基本减振原理的系统；

图 2 是一个图表，示出了市场中的一种气垫的性能；

图 3 是一个图表，示出了影响主板的地面振动；

图 4 示出了系统的示意图，其表示了改进的气垫；

图 5 是一个图表，示出了具有控制器的改进型系统的开环性能；

图 6 是一个图表，示出了改进型气垫系统的性能提高；

- 图 7 是一个图表，示出了对地面振动的灵敏度；
图 8 是一个图表，示出了传统系统对于 1[N] 脉冲的响应；
图 9 是一个图表，示出了改进系统对于 1[N] 脉冲的响应；
图 10 是一个图表，表示在功率下降后，启动改进系统需要多长的时间；
图 11 示出了作为相同的相应距离的势能动能的总和；
图 12 示出了通过使用微分滤波器，该系统在中频范围内的性能提高；
图 13 示出了闭合回路系统对于改进系统主板上的力的响应；
图 14 示出了改进系统的地面振动的响应；
图 15 示出了对于改进系统主板上的脉冲的时间响应；
图 16 示出了主板对于改进系统的参考物体上的脉冲的响应；
图 17 示出了主板运动的频率响应函数，作用在改进系统的参考物体上的力导致该主板的运动；
图 18 示出了图 16 中的图表的能量的衰减速率；
图 19 示出了本发明的减振器，它的激励器相对传感器垂直放置；
图 20 示出了本发明的减振器，它的激励器相对传感器垂直放置，并且使用了磁防护罩；
图 21 示出了本发明的绝对减振器，它带有浮动物体；和
图 22 示出了主动减振器的示意图。

具体实施方式

可以采用控制论中的增益和相位关系描述主动隔离/消除系统的性能的局限性。

图 1 示出了系统 100 的示意图，该系统阐明了基本减振原理。示意图 100 包括大约 1000[kg] 的主板 102，地面减振器 104，刚体（也称为地弹簧）106 和地面 108。主板 102 和地面 108 通过刚体 106 和减振器 104 相互连接。刚体 106 如此坚硬以致其提供 1Hz 的谐振频率。减振器 104 的值通常使得整个系统 100 被临界减振。这样的系统的力灵敏度在图 2 中示出。

在低频率中，1[N] 的力将给出小于 1[mm/s²] 的振动。在大于 1[Hz] 时，振动幅度将是恒量 1[mm/s²]。从目前市场上的产品来看，这是合理的气垫的性能。然而很多公司抱怨它并非足够好。干扰常常大于 1[N]，平版印刷机和电子光学机器需要比这里提供的振动水平更低的振动水

平。

振动的主要误差源为地面。地面振动通过地面减振器和地弹簧影响了主板。该影响如图 3 所示。10 [Hz] 的 10 微米的地面振动将造成 $10e-6 [m] * 500 [1/s^2] = 5 [mm/s^2]$ 的主板振动。

图 4 示出了包括改进的气垫的系统 400 的示意图。它包括从主板 402 到参考物体 422 的附加的传感器 430, 和在主板 402 和地面 408 之间的激励器 410。该系统的其它部分包括地面减振器 404, 刚体 406, 另一个减振器 424 和另一个刚体 426。如果传感器 430 检测到运动, 则命令激励器 410 以使运动减小。这实际上是额外的减振器。参考物体 422 有效地起指示主板何时向传感器移动的装置, 并由此在传感器中产生信号。

从以前的机电减振器的经验可以得知, 可以实现 $1e6 [Ns/m]$ 的性能。在一个典型的但不排它的实施例中, 以 $0.5 [Hz]$ 支撑参考物体。该电子附件需要控制器来实现具有高增益的稳定系统。图 5 示出了带有控制器的新系统的可能的开环性能。这并不是让它工作的唯一方法; 这仅仅是一个例子。因为负载是 4 阶系统 (激励器连接在第一物体上, 传感器连接在第二物体上), 则期望产生总量为 360 度的相移。在低频下刚体占主导, 结合速度传感器的微商作用, 在低频下提供具有 +270 度相移的 +3 的斜率。然后, 可以发现谐振的两个点结束于 -1 的斜率并有 -90 度的相位。通过在 +3 的斜率上加入双局部滞后超前的滤波器, 可以获得稳定的系统, 该系统允许相当大的增益。为了显示, 在图 5 中采用了 $5e7$ 的尖峰增益。在右手边, 是开环传递函数的极坐标图。Nyquist -1 点被半径为 0.5 的红色圆圈所围绕, 该圆圈表示最小的稳定裕度。绿色圆圈的半径为 $\sqrt{0.5}$, 这对于减振时域响应来说是一个好的距离。

气垫系统的性能提高是很重要的 (参见图 6)。在低频下, 开始是相同的。这是因为在该处的性能是由地弹簧的刚度所主导的, 其保持一致。但是传统的减振器在 $1 [Hz]$ 开始升高, 而新减振器在 $0.003 [Hz]$ 开始升高。在 $1 [Hz]$, 振动级别为 $1 [nm/s^2]$ (提高了 $1e6$ 倍)。性能持续显著地提高并超过 $1000 [Hz]$ 。在 $1000 [Hz]$, 仍然有因数为 1000 的提高。

图 7 是一个图表, 其示出了地面振动的灵敏度。图 7 表明在宽的频率范围内, 衰减比传统方法要优越多个数量级。

由于新方法的低频特性, 新方法会表现出比我们在传统方法中找到的明显更长的稳定性能。在图 8 中我们看到针对在仿真开始后的 $0.1 [s]$

时给出的 0.1 [s] 长度的 1 [N] 脉冲的传统的响应。图 9 是新系统针对相同脉冲的响应。

主动系统的响应有大约低 1500 倍的振幅，和长 300 倍的时标。这两个数字对于我们所希望的低加速级别是有益的，但是有理由关心在断电之后启动系统需要多长时间。一个类似的关心是系统如何响应参考物体的干扰。为了研究它，在图 10 中也对参考物体执行（大的）1 [N], 0.1 [s] 脉冲。由于系统设置成积极地跟随参考物体，因此产生很大的主板响应。事实上，这些很大的力从没有加在参考物体上，但是一旦参考物体开始移动（例如由于唤醒振动），则它会持续长时间的振动，理解这一点是很重要的。

在图 10 中，我们看到缓慢衰减的参考物体的移动的信号。我们能够尝试寻找测量该衰减速度的表达式。可以通过能量分析得到它。能够将残余振动建模为物体、减振器和弹簧系统。然后，给出这些参数，我们可以计算势能 ($0.5kx^2$) 和动能 ($0.5mv^2$) 的和。该和表示为等效的相应距离 ($\sqrt{(0.5x^2) + 0.5mv^2/k}$)。该距离如图 11 所示。我们看到，在 1200 秒的末端，在静止之前仍然有实质距离要进行 (0.1 [m])。此外，下降速率很慢。

由于参考物体的状态在启动时必须假设为未知状态，因此上述的缓慢接近静止的方法是有缺点的。控制器中的改变能够改善此性能。首先，提高参考物体的谐振频率至 10 [Hz]。这会将大部分抑制移至高频。结果，在低频就有较少的运行，从而改善低频的恢复。结合刚度的增加，整个增益也降低了。该目的是在降低低频抑制的同时维持高频抑制。作为第三种测量，开环曲线到 -1 点的距离增加了。这种增加会在闭环响应中引入更多的减振。为了改善中间频率范围，将微分滤波器放置在 5 [Hz]，将积分滤波器放置在 50 [Hz]。见图 12。

在图 13 中，我们发现闭环系统对于在主板上的力的响应，图 14 有地面振动的响应。

以上系统的性能更加适度，但是相对于无源系统，仍然（在 1 到 100 [Hz] 范围内）有更好的因数 10。从 8 到 16 Hz，10 微米的地面上振动会造成小于 0.01 [mm/s²] 的主板振动。在 1 [Hz]，最差点仍然有 0.1 [mm/s²] 的良好数值。这比无源方法好 5 倍。在图 15 中，示出了对于主板上的脉冲的时间响应。与无源系统相比，抑制好 15 倍，6 秒的稳定时间比其长 4 倍并有 1.5 倍的周期。合并起来，其加速度有 $14 * (4/1.5)^2 = 100$ 倍的

降低。

在图 16 中，示出了主板对于参考物体上脉冲的响应。这里，响应时间似乎合理。性能更好的原因在图 17 中得到部分的解释。

图 17 是由参考物体上的力引起的主板运动的频率响应函数。我们看到从 0.2 [Hz] 向前的一条直线，指明了在大于该频率时，主板很好地受控于参考物体线 ($1/10 [\text{kg}]$ ，并与造成位移的力有 -180 度的相移)。在 0.2 [Hz] 附近，我们几乎看不到任何峰值，系统被很好地减振。在 0.2 [Hz] 以下，系统有 +3 斜率。这意味着系统对于小于 0.2 [Hz] 的频率极度地不敏感。在 0.2 [Hz] 以下，参考物体与地面参考相通。这意味着，基于减振的量，我们将期望等待 5 秒钟用于稳定。如果减振很少，则该时间很容易变成 50 秒，但是在我们的系统中，该系统被构造成具有足够的减振能力，在第一个 5 秒之后消减能量的 90%。经过 5 秒后，我们不再看到振动，而是指数衰减，这说明我们的系统不是简单的二阶系统，是不同部分的集合，每个部分都有其自己的减振性能。

我们也可以看到在图 16 的图表中的能量的衰减速率。该速率在图 18 中给出。我们看到，从 9 [s] 到 15 [s]，剩余距离呈直线减少，从 $2e-4$ 到 $2e-5 [\text{m}]$ 。因此每隔 6 秒，振动级别减少因数 10。这对于大多数上电顺序来说是足够快了。

所推荐的气垫相对于无源气垫好很多。性能是上电速度和减振性能之间的折衷。一个实际设计，带有 10 [Hz] 参考支撑和相对高频滤波器（接近 0.5 [Hz]，而不是 0.002 [Hz]），并且没有任何积分器，该设计似乎为气垫提供好的结果。本发明可以带来更好的结果。某些控制选项能够更加优化。这就也有可能在启动期间使用最近 (last) 的控制器，并且一旦系统稳定并静止，就会切换至高性能的控制器。这有望提供更好的结果。

无源系统在主板和地面之间的刚体不再起到重要作用并且能够被松弛。减振器可以完全取消。在性能表中，我们看到在 2 [Hz] 的气垫谐振附近没有任何改变。取消减振器减小了从地面振动到主板的传送。改变刚体不会影响该力灵敏度，但是它会影响地面的传送性。

参考物体的质量并不重要，重要的是谐振频率，这是由于谐振频率决定了在什么地方有最大的改善。

参考物体的机械减振越低，它的可移动性就越强，并且产生的感应

信号也就越多。这就是为什么在图 6 和 7 中，在 0.5 [Hz] 处有一个下降。

可预见的应用的具体调谐是对有效负载（刚体模型）的质量和刚度进行调谐，和对前馈信号进行调谐。去掉减振器之间的串扰是与调谐前馈信号相同的过程。

图 19 示出了减振器的框图，该减振器包括相对于一对传感器线圈 1920 垂直放置的激励器线圈 1910。激励器 1910 和传感器 1920 连接在要减振的物体 1930 上。通过将激励器 1910 和传感器 1920 相互垂直放置，可以使不想要的串扰（例如，在传感器和激励器都是洛伦兹型线圈时的 EM 串扰）最小，这是由于传感器和激励器线圈的 EM 场的矢量相互是 90 度，并由此它们不能看到彼此的 EM 场。

图 20 示出了一个与图 19 类似的框图，但是现在使用了附加的磁串扰防范措施。图 20 包括减振器，要减振的物体 2030 和磁防护罩 2040，该减振器包括激励器 2010，该激励器与一对传感器 2020 垂直放置。磁防护罩包括 μ 金属的材料，并且典型地放置在作为传感器 2020 的一部分的传感器线圈周围。该磁防护罩还能有导体层，用来使来自激励器或者周围环境的 EM 串扰最小。该磁防护罩还有质量和刚度，以削弱来自周围环境的声学干扰。

图 21 示出了本发明的绝对减振器，它带有浮动参考物体。图 21 包括激励器线圈 2110，激励器磁铁 2150，其安装在连接到地面 2170 的臂 2160 上，要减振的物体 2130，在其上安装有传感器线圈 2120 并且在其上通过弹簧 2190 连接磁铁组件 2180。磁铁组件 2180 包括参考物体和传感器磁铁。磁铁组件 2180 还可以包括磁防护罩和电子防护罩，用来保护传感器（包括线圈 2120 和传感器磁铁）免受激励器（包括激励器线圈 2110 和激励器磁铁 2150）干扰和其它外部的电的或磁的干扰。

图 22 示出了主动减振器的示意性图。图 22 包括传感器线圈 2220，激励器线圈 2210，传感器磁铁 2280，激励器磁铁 2250，要减振的物体 2230 和电控制器 2295。磁铁 2250 安装到地面 2270 上。磁铁 2280 安装到参考物体上。线圈 2210 和 2220 以刚性方式安装到要减振的物体 2230 上。传感器线圈 2220 在相对于传感器磁铁 2280 运动时生成电信号 I-s。在该主动减振器的例子中，电控制器包括低通滤波器放大器和高通滤波器放大器，信号 I-s 饲送给该高通滤波器放大器。此外还有许多其它类型的电控制器能够用于本发明。放大器的输出被相加并生成电信号 I-a。

放大和滤波器参数能够根据系统的参数进行调节和计算，主动减振器是该系统的一部分。电信号 I-a 会引起激励器线圈 2210 相对于激励器磁铁 2250 运动。只有主动减振器能够在期望的频率范围内以期望的减振特性隔离振动并且消除该振动时，主动减振器才被适当地调节和计算。尽管图 22 所示的减振器是一种相对类型，但是绝大多数电控制器也能用于绝对减振器。

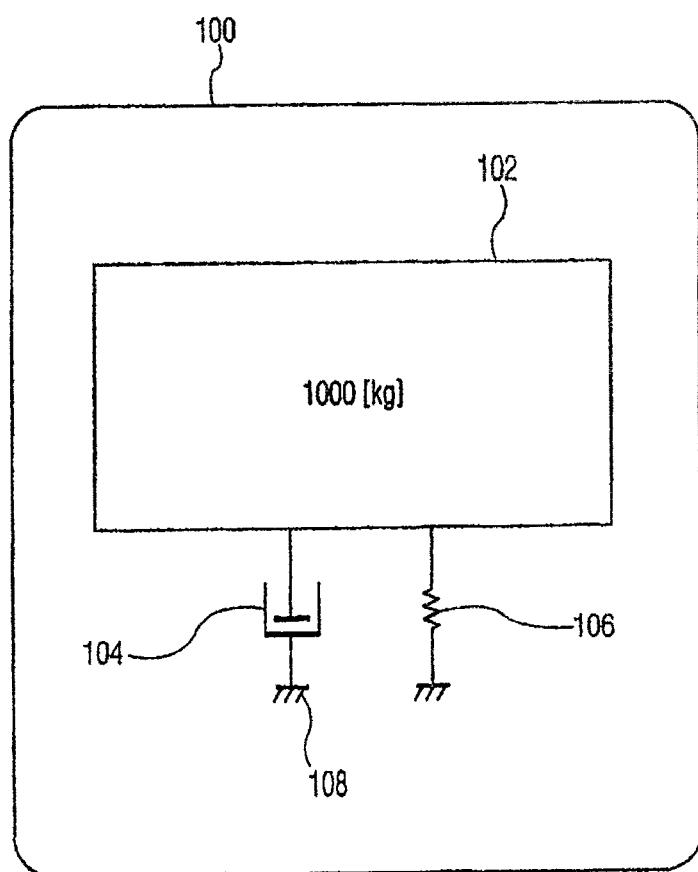


图 1

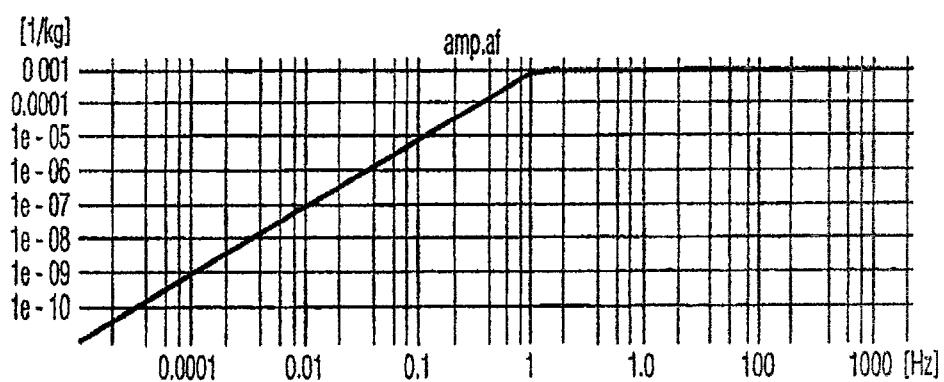


图 2A

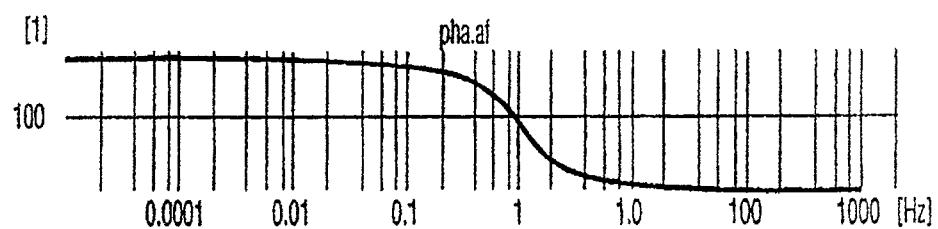


图 2B

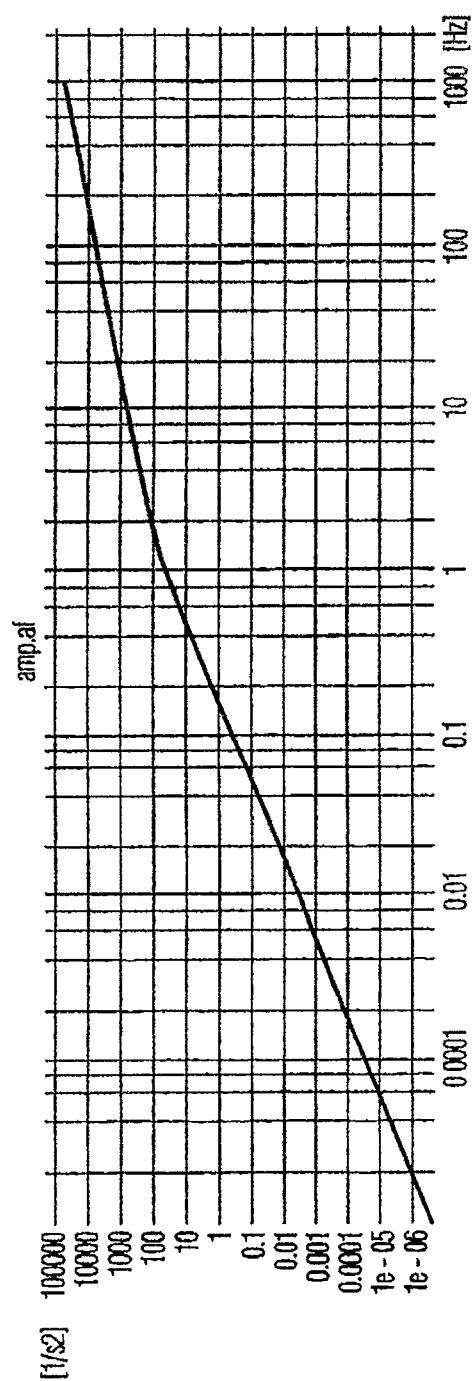


图 3A

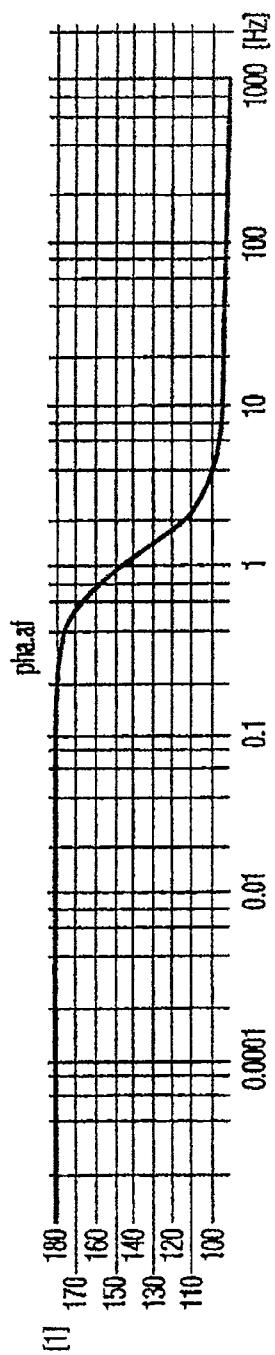


图 3B

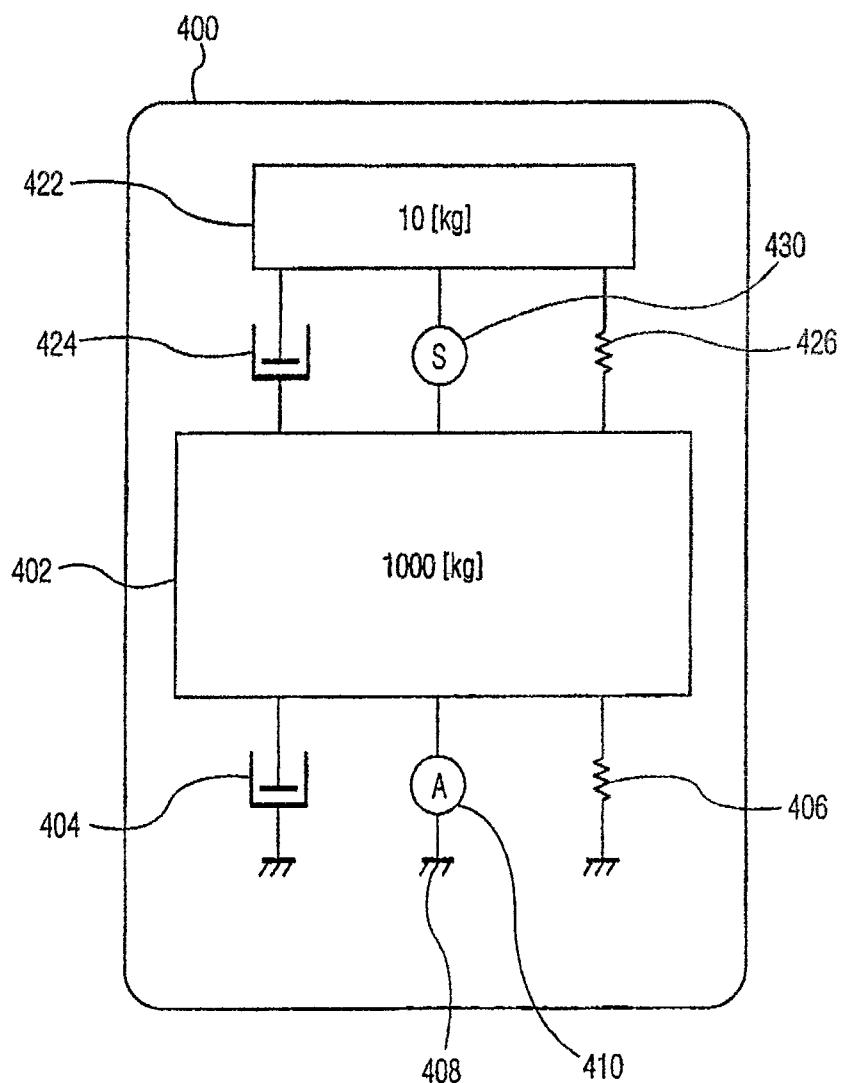


图 4

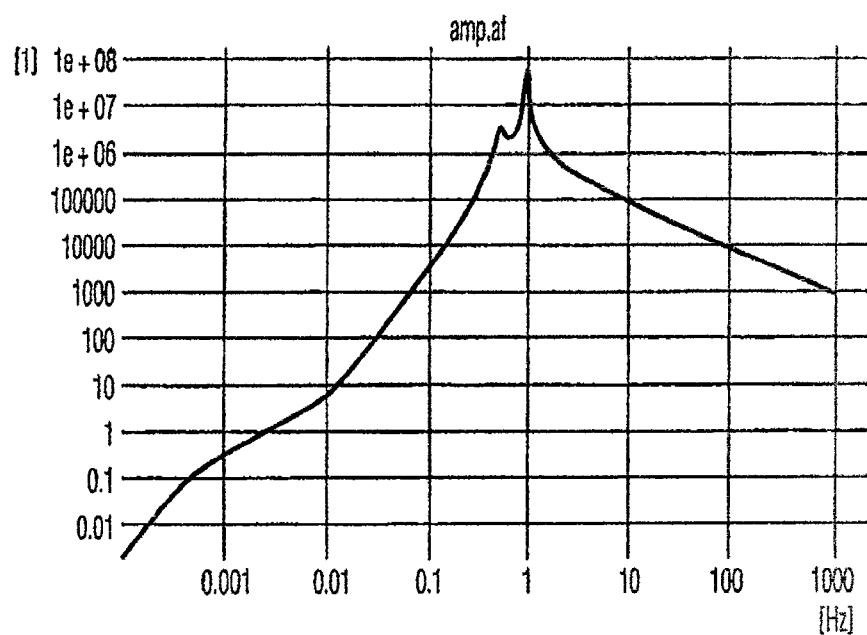


图 5A

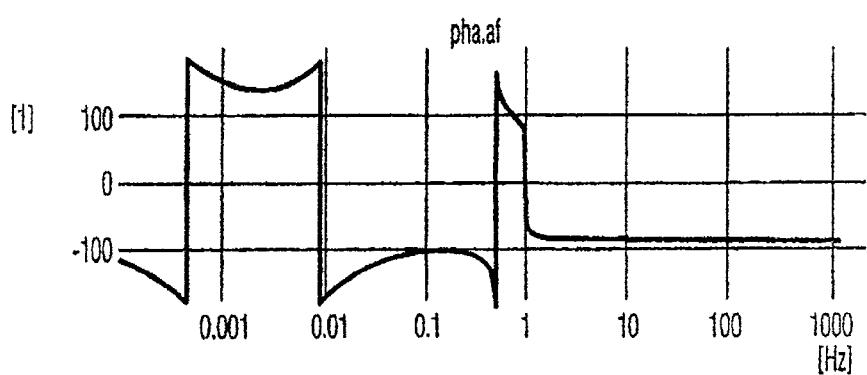


图 5B

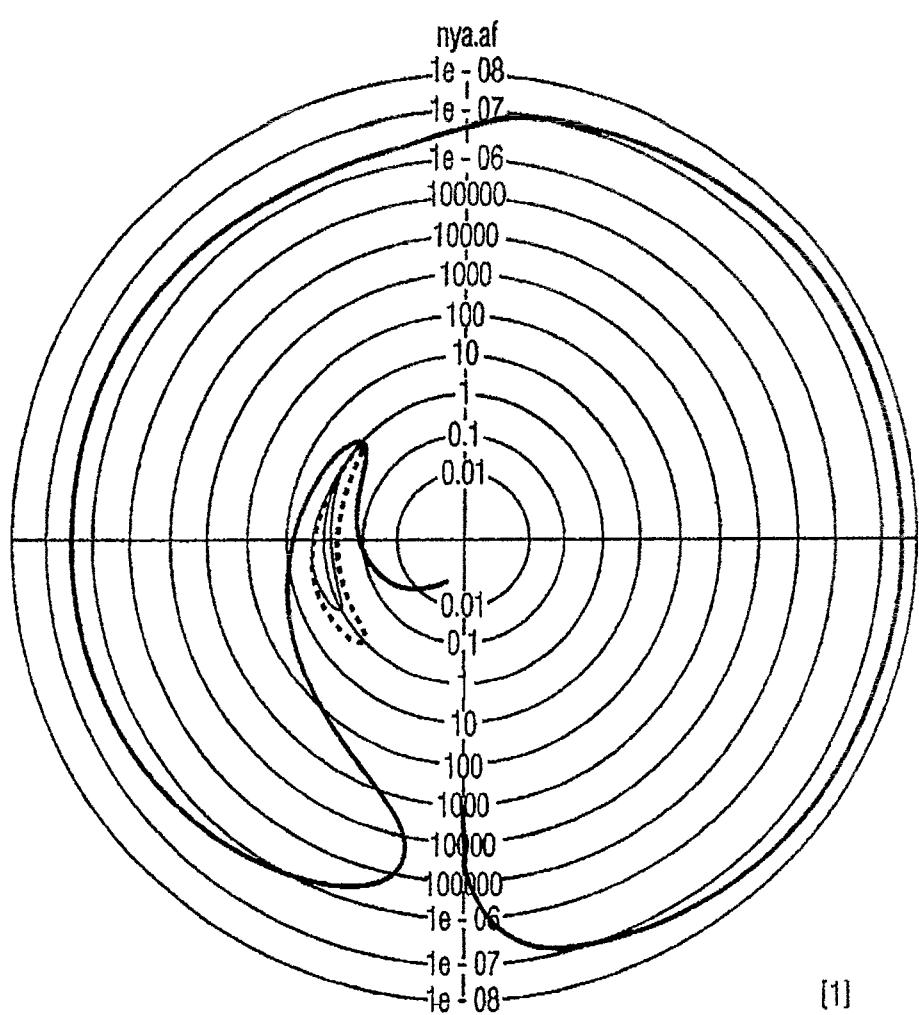


图 5C

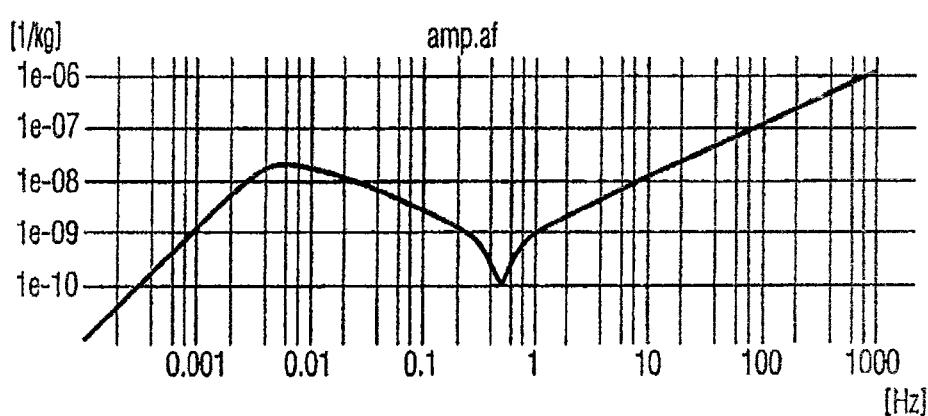


图 6A

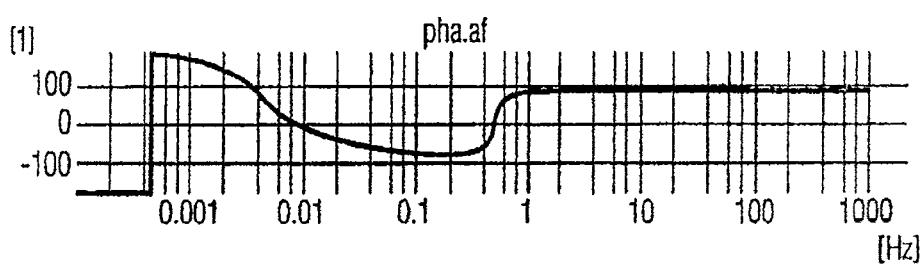


图 6B

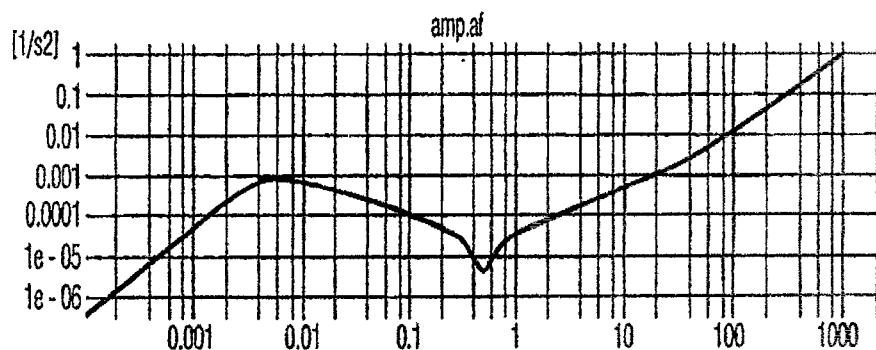


图 7A

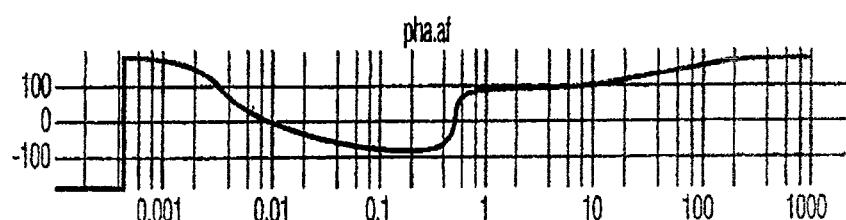


图 7B

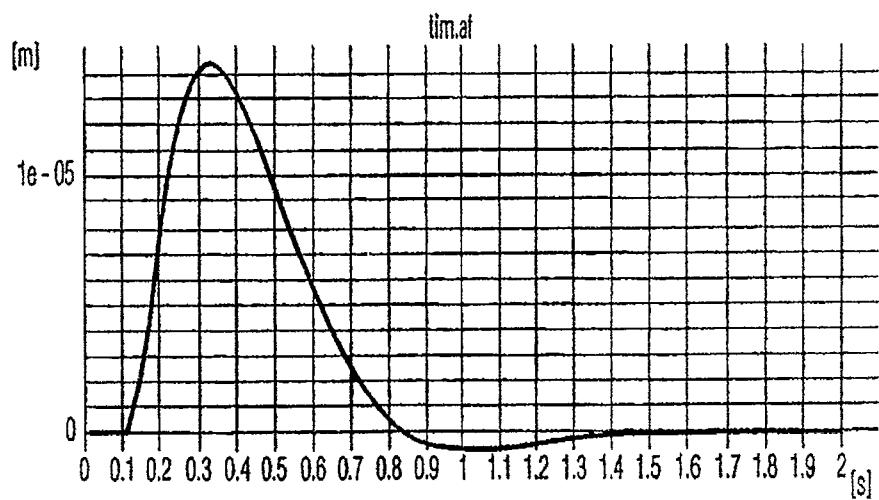


图 8

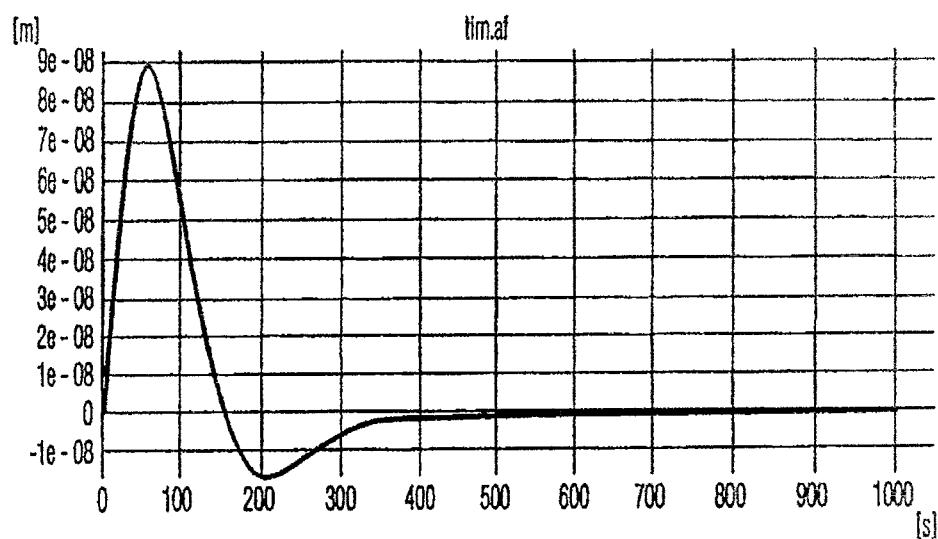


图 9

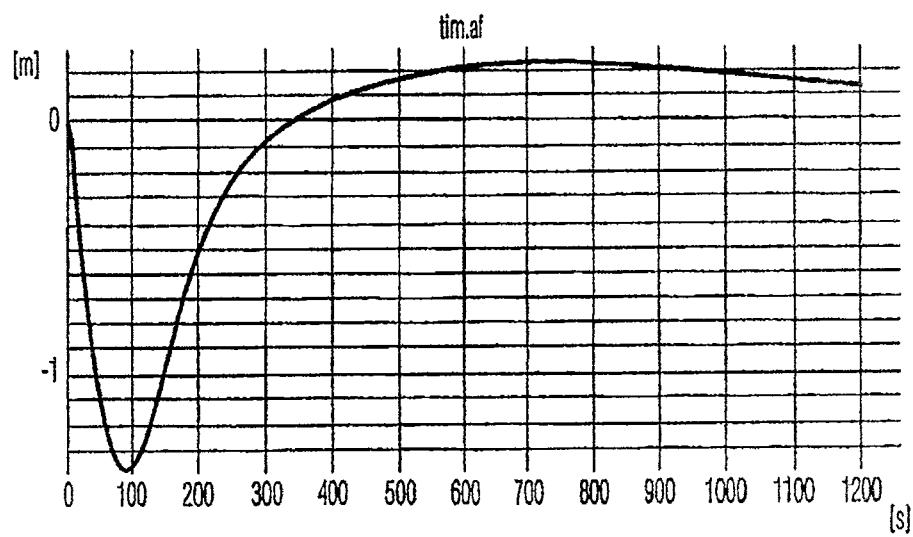


图 10

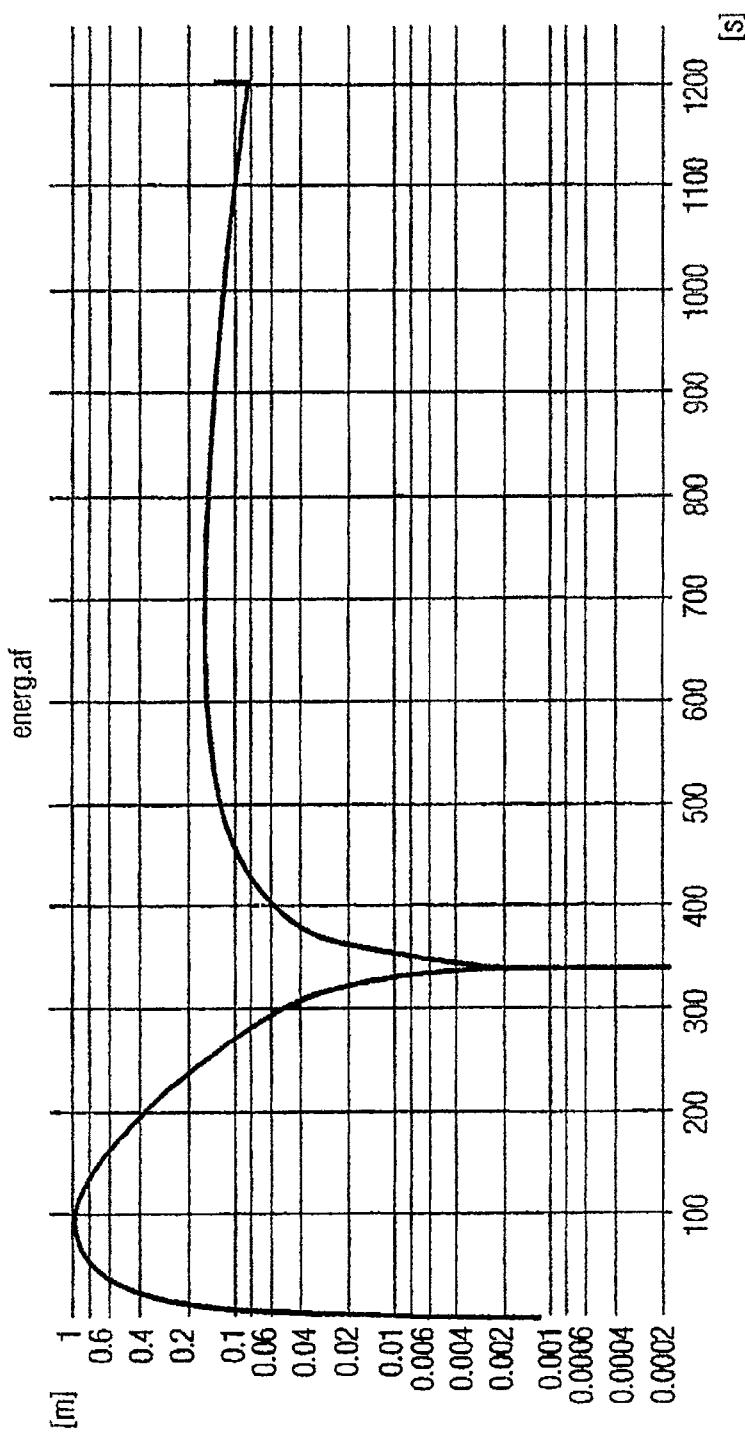


图 11

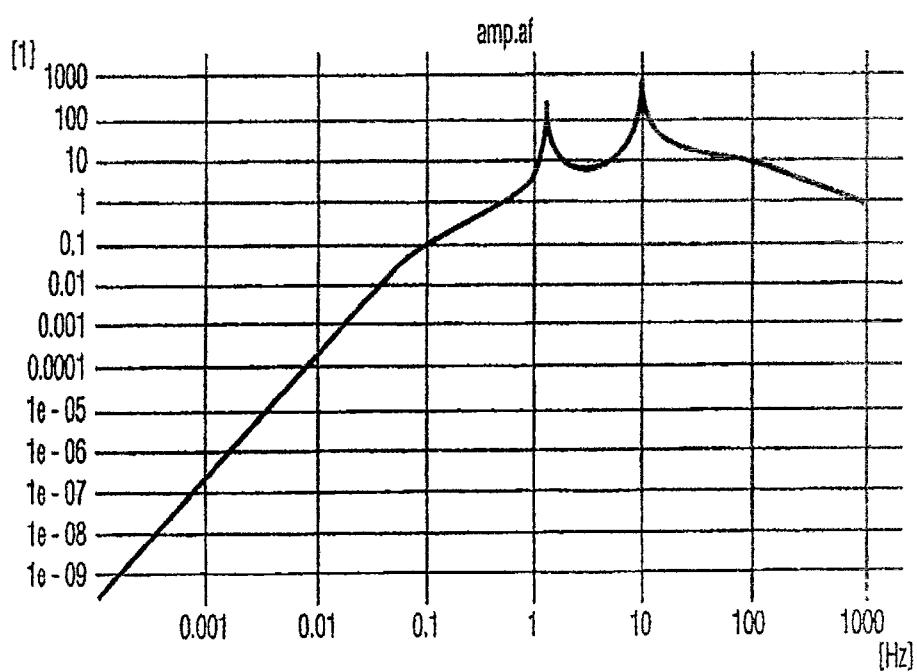


图 12A

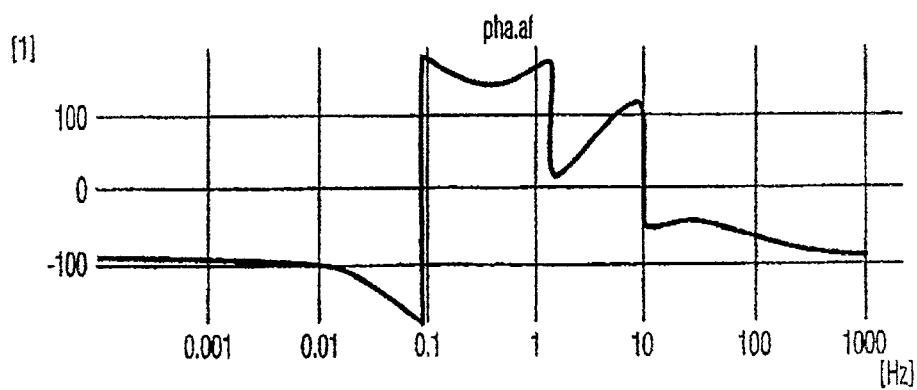


图 12B

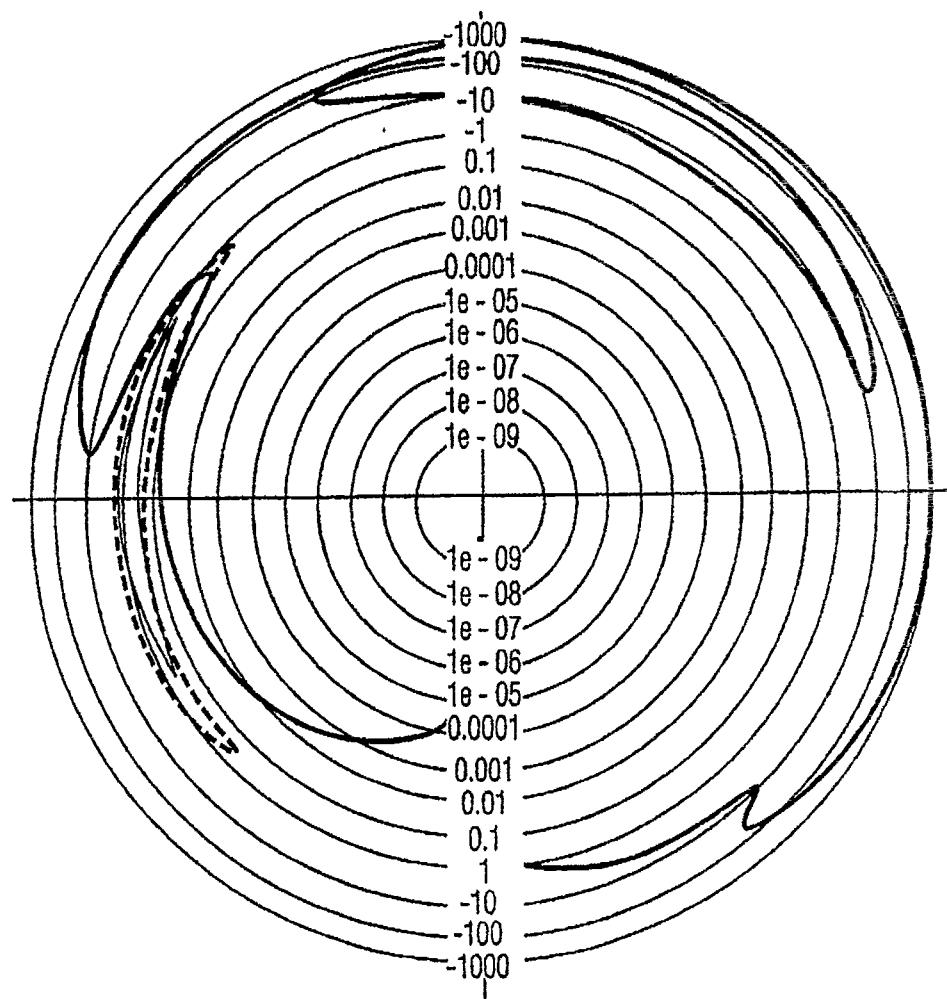


图 12C

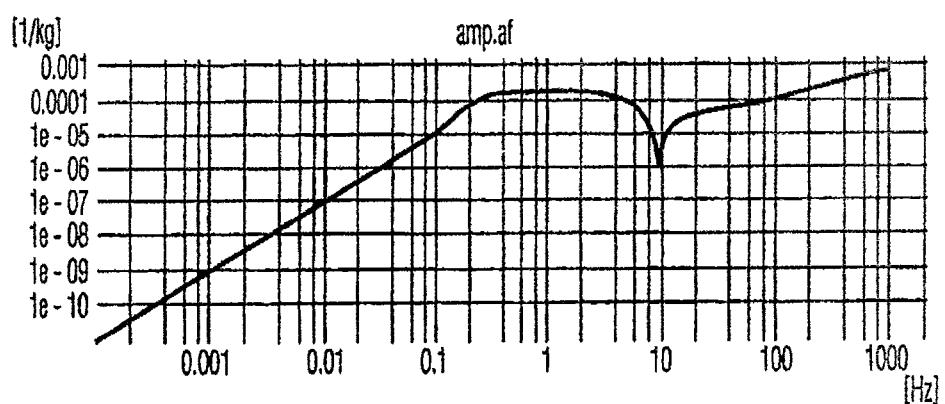


图 13A

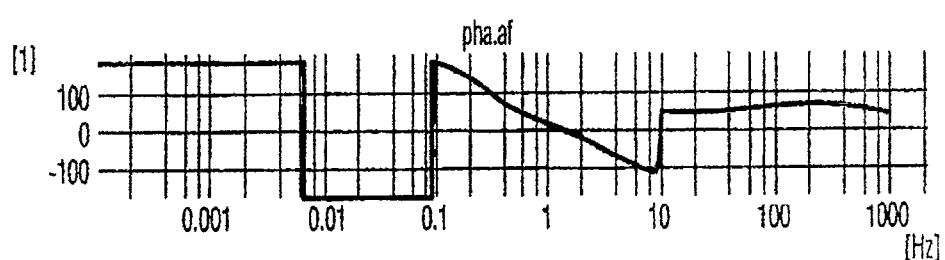


图 13B

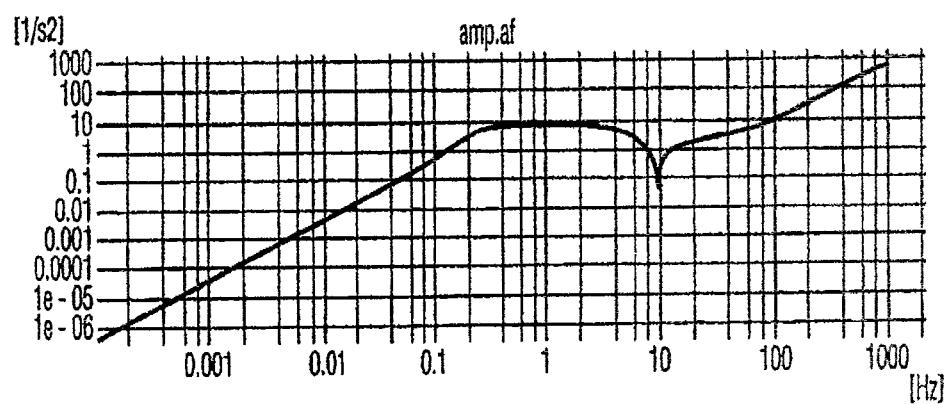


图 14A

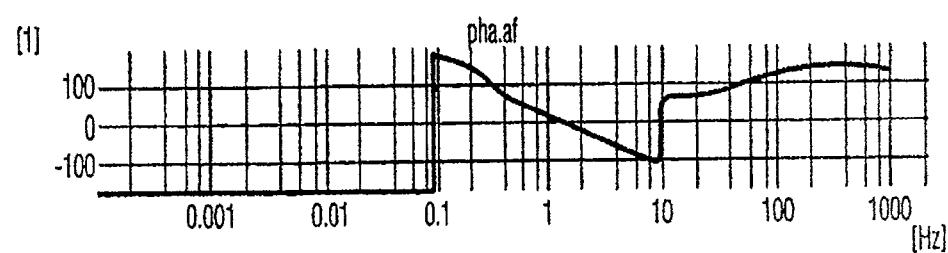


图 14B

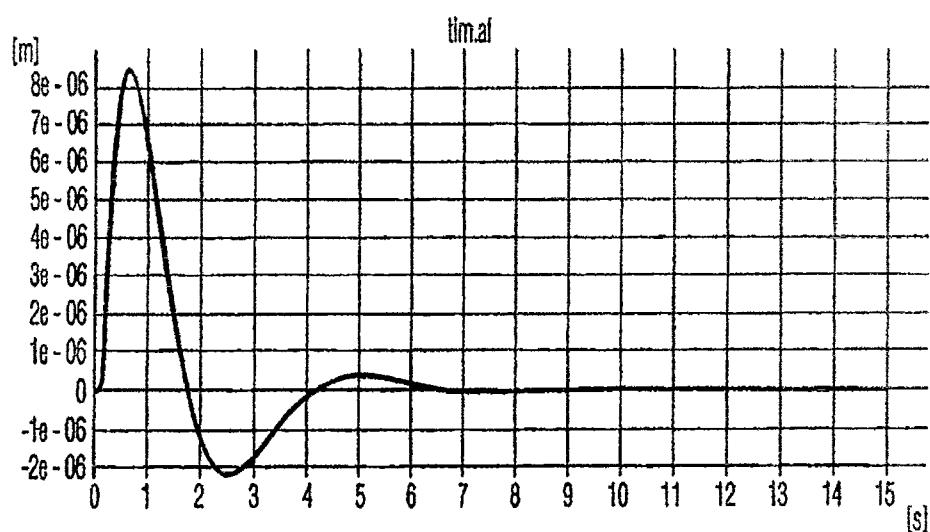


图 15

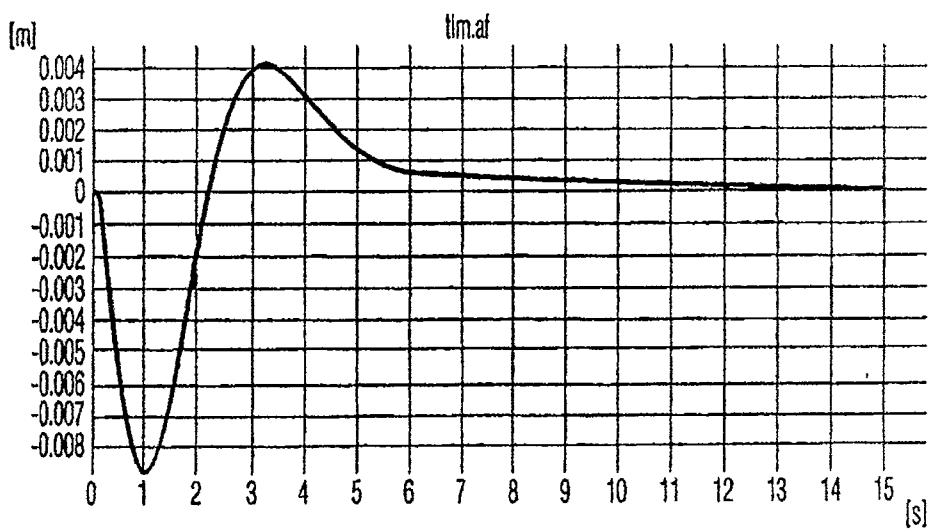


图 16

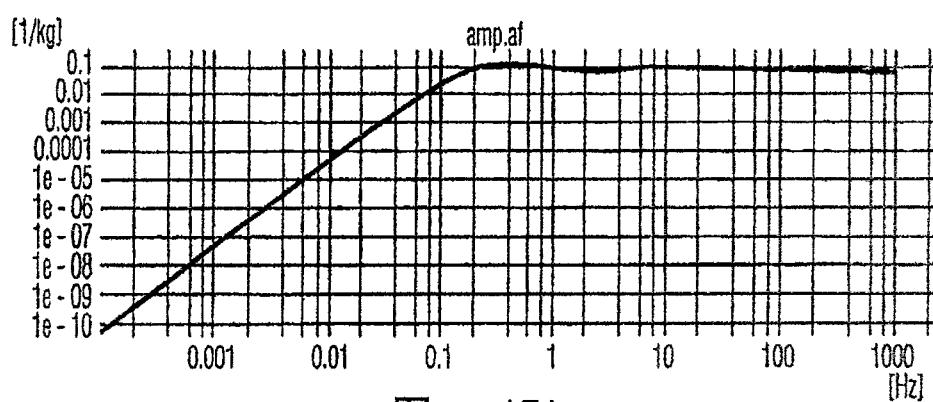


图 17A

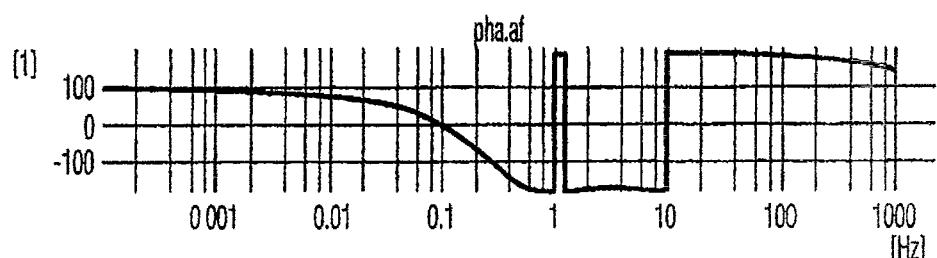


图 17B

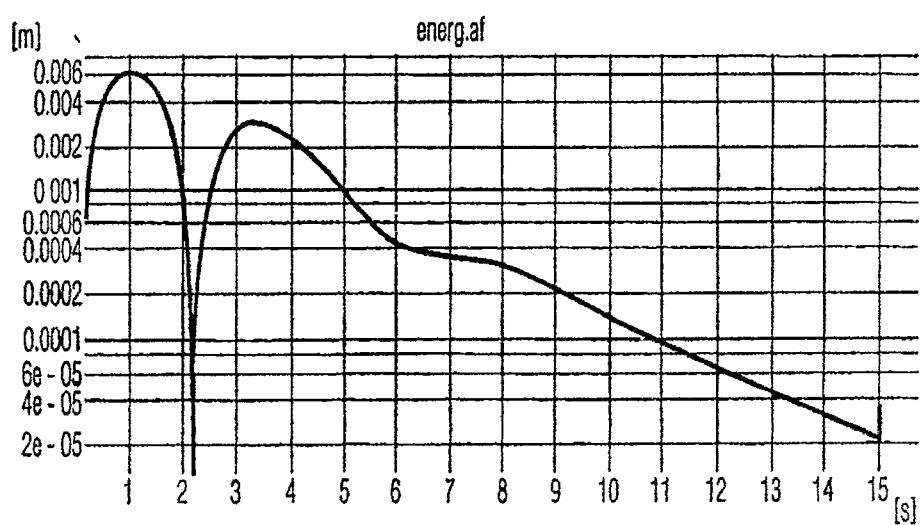


图 18

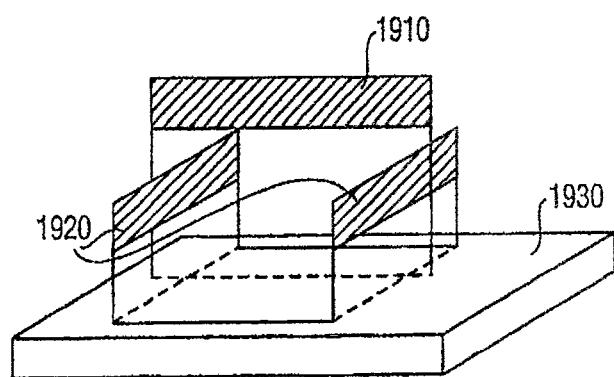


图 19

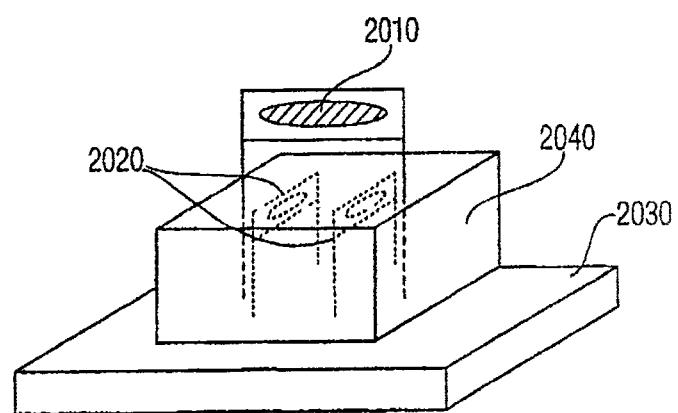


图 20

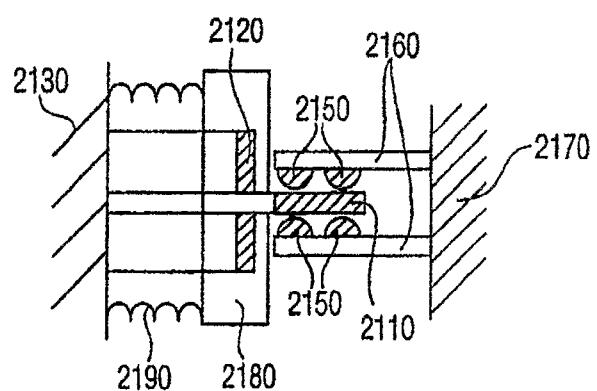


图 21

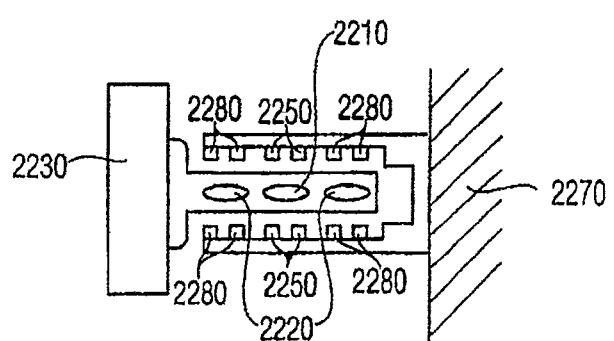


图 22