



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107532902 A

(43)申请公布日 2018.01.02

(21)申请号 201680024718.1

N·努里

(22)申请日 2016.05.09

(74)专利代理机构 北京泛华伟业知识产权代理有限公司 11280

(30)优先权数据

62/159054 2015.05.08 US

代理人 王勇

(85)PCT国际申请进入国家阶段日

2017.10.27

(51)Int.Cl.

G01C 19/5719(2006.01)

G01C 25/00(2006.01)

(86)PCT国际申请的申请数据

PCT/CA2016/050534 2016.05.09

(87)PCT国际申请的公布数据

W02016/179698 EN 2016.11.17

(71)申请人 西蒙弗雷泽大学

地址 加拿大不列颠哥伦比亚省

(72)发明人 F·格尔纳拉吉 B·巴尔耶尼

A·马尔祖克 A·萨拉法恩

S·A·M·拉吉米 O·普扬法尔

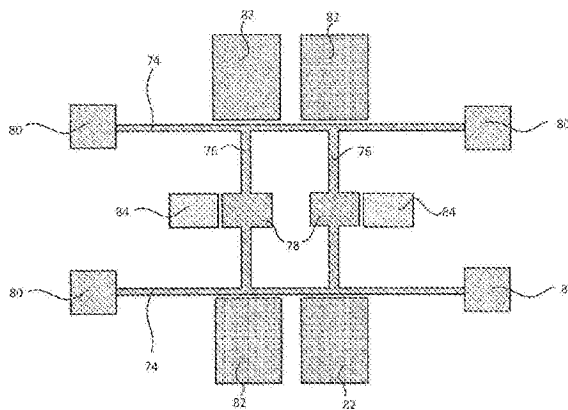
权利要求书2页 说明书7页 附图14页

## (54)发明名称

利用非线性模态相互作用的振动陀螺仪

## (57)摘要

所公开的装置利用非线性耦合的振动模式来提供鲁棒的惯性传感器,诸如陀螺仪。该致动机构在感测模式频率响应曲线中引入更宽的带宽,并且因此增强了由于操作条件和制造缺陷引起的参数波动的鲁棒性。装置的振动模式被设计为具有不同的频率,其中驱动模式固有频率是感测模式的模态频率的两倍。由内部共振引起的非线性模态相互作用也可以通过非线性反馈来放大。可以通过反馈非线性二次、三次等项来在形状、品质因数和带宽上增强感测模式响应。



1. 一种被配置为测量围绕至少一个轴的角运动的装置,包括:  
具有非线性耦合的两种不同振动模式的结构:具有感测模式频率 $f_{\text{sense}}$ 的感测模式和具有驱动模式频率 $f_{\text{drive}}$ 的驱动模式;  
振动源,其被配置为在所述驱动模式下在所述质量块中产生振动;以及  
振动检测器,其被配置为检测所述感测模式的振动。
2. 根据权利要求1所述的装置,其中非线性耦合的两种不同的振动模式具有二次非线性。
3. 根据权利要求1所述的装置,其中非线性耦合的两种不同的振动模式具有三次非线性。
4. 根据权利要求1所述的装置,其中所述感测模式振荡器的所述频率 $f_{\text{sense}}$ 是所述驱动模式振荡器的所述频率 $f_{\text{drive}}$ 的一半。
5. 根据权利要求1所述的装置,其中所述感测模式振荡器的所述频率 $f_{\text{sense}}$ 是所述驱动模式振荡器的所述频率 $f_{\text{drive}}$ 的两倍。
6. 根据权利要求1所述的装置,其中通过电子闭环反馈或其组合机械地调谐所述频率中的至少一个。
7. 根据权利要求1所述的装置,其中使用一个或多个压电致动器激励所述驱动模式。
8. 根据权利要求1所述的装置,其中使用一个或多个压电传感器来检测所述感测模式的所述振动。
9. 根据权利要求1所述的装置,其中使用一个或多个光学位移传感器来检测所述感测模式的所述振动。
10. 根据权利要求1所述的装置,其中使用一个或多个光学速度传感器来检测所述感测模式的所述振动。
11. 根据权利要求1所述的装置,其中使用一个或多个静电致动器激励所述驱动模式。
12. 根据权利要求1所述的装置,其中使用一个或多个电容传感器检测所述感测模式的所述振动。
13. 根据权利要求1所述的装置,其中使用一个或多个压阻传感器检测所述感测模式的所述振动。
14. 根据权利要求1所述的装置,其中所述驱动模式振荡器被配置为在开环中操作。
15. 根据权利要求1所述的装置,其中所述驱动模式振荡器被配置为在闭环中操作。
16. 根据权利要求1所述的装置,其中所述感测模式振荡器被配置为在开环中操作。
17. 根据权利要求1所述的方法,其中所述感测模式振荡器被配置为在闭环中操作。
18. 根据权利要求1所述的装置,其中所述感测模式信号用于检测旋转速率。
19. 根据权利要求1所述的装置,其中所述两种模式之间的所述非线性通过反馈加剧。
20. 根据权利要求1所述的装置,其中所述感测信号的所述相对幅度相对于所述驱动频率使用滤波器增强。
21. 根据权利要求1所述的装置,其中所述装置被配置为使用非线性反馈来增加所述装置的带宽。
22. 根据权利要求1所述的装置,其中所述装置被配置为使用非线性反馈来增强所述感测模式的平坦区域的形状。

23. 根据权利要求1所述的装置,其中所述装置被配置为使用非线性反馈来增加所述装置的品质因数。

24. 根据权利要求1所述的装置,其中存在两端固支梁,并且第二梁在一端处连接到所述两端固支梁的中心,并且在另一端自由;

其中检验质量块用于在所述第二梁自由的自由端处调谐;以及

其中检验质量块用于在所述第二梁连接到所述两端固支梁的连接点处调谐。

25. 根据权利要求1所述的装置,其中所述质量块包括锚定在其角部的悬挂框架;

其中检验质量块用于在所述框架的任一侧上调谐;以及

其中一个或多个连接包括在所述框架的一侧或多侧上。

26. 根据权利要求1所述的装置,其中所述装置包括锚定在中心的悬挂框架;

其中检验质量块用于在所述框架的任一侧上调谐;以及

其中一个或多个连接包括在所述框架的一侧或多侧上。

27. 一种包括根据前述权利要求中任一项所述的装置的陀螺仪,其被配置为使用检测围绕轴的旋转速率。

28. 根据权利要求26所述的陀螺仪,其中在所述驱动模式的固有共振频率周围的所述感测模式的频率响应中出现平坦区域。

29. 根据权利要求26所述的陀螺仪,其中在所述驱动模式的所述固有共振频率周围的所述感测模式的频率幅度曲线图中出现平坦区域。

## 利用非线性模态相互作用的振动陀螺仪

[0001] 相关申请的交叉引用

[0002] 本申请要求于2015年5月8日提交的美国临时申请No.62/159,054的权益,其全部内容通过引用包含于此。

### 背景技术

[0003] 经由内部共振(IR),直接激励振动模式和间接激励模式之间的能量传递是非线性模态相互作用的结果。当系统的线性固有频率相当或几乎相等时,存在内部共振,并且非线性项耦合结构模式。例如,在两自由度(DOF)系统中,如果线性固有频率被定义为 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ ,则当 $\omega_1 \approx 2\omega_2$ 或 $\omega_2 \approx 2\omega_1$ 时,IR通过二次非线性发生。内部共振是由于系统中存在的非线性而发生并且导致系统模式之间的能量传递。传递的能量的量取决于非线性的类型(即,在运动方程中表现的二次或三次非线性项)。非线性二次耦合项通过较高的固有频率模式引起较低固有频率模式的自参数激励。取决于几何和非线性项,任何物理系统中都可能发生内部共振。

[0004] 可以受益于IR独特特性的一个应用领域是惯性测量。目前,惯性传感器开发中的许多努力旨在提高微加工陀螺仪的精度和准确度,微加工陀螺仪用于最关键和精度要求最高的应用(例如军事、战术/惯性导航和空间应用)。

[0005] 常规的陀螺仪在线性状态下工作,其中在操作的信号幅度(品质因数Q)和带宽(BW)之间始终存在权衡。为了实现高灵敏度,驱动和感测共振频率通常被设计和调谐以匹配,并且装置被控制以在响应曲线的峰值处或附近操作。需要该模式匹配要求的系统由于制造缺陷和操作条件而对参数变化敏感。内部共振可用于提高陀螺仪的性能并增强其在操作条件和制造缺陷中的参数波动的鲁棒性。

[0006] 为了进一步提高响应的增益并提高频带宽度,可以应用非线性耦合项的特性检查。例如,二次和三次非线性项可被反馈到生成更宽带宽的系统,其中响应的平坦区域的形状也得到改善。

[0007] 作为基于控制的解决方案的示例,Brand等人公开了基于频率调制的陀螺仪设计,其中振动频率随输入旋转速率而变化。Sonmezogl等人利用复杂的电子电路来增加传统的幅度调制模式匹配陀螺仪的带宽和灵敏度。

[0008] Acar等人和Trusov等人提出了解决模式匹配解决方案的基于机械的方法的示例。在上述公开内容中,引入了多个检验质量块以加宽带宽,并且从而增加了陀螺仪的鲁棒性。然而,该方法导致过于复杂的机械设计。Vyas等人公开了利用内部共振以获得更高灵敏度的共振器和质量传感器。

[0009] 尽管有最近的进展,但是振动陀螺仪的进一步发展是期望的,以便优化当前的应用并扩展到新的应用。

### 发明内容

[0010] 提供本发明内容以简化形式介绍一些概念,这些概念在下面的具体实施方式中进

一步描述。

[0011] 本发明内容不旨在确定所要求保护的主题的主要特征,也不旨在用于帮助确定所要求保护的主题的范围。

[0012] 在一个方面,提供了一种被配置为测量围绕至少一个轴的角运动的装置,包括:

[0013] 具有非线性耦合的两种不同振动模式的结构:具有感测模式频率 $f_{\text{sense}}$ 的感测模式和具有驱动模式频率 $f_{\text{drive}}$ 的驱动模式;

[0014] 振动源,其被配置为在驱动模式下在质量块中产生振动;以及

[0015] 振动检测器,其被配置为检测感测模式的振动。

## 附图说明

[0016] 当结合附图参考以下详细描述时,本发明的上述方面和许多附带的优点将变得更容易理解并变得更好地理解,在附图中:

[0017] 图1是根据本文公开的实施例的内部共振的科里奥利振动陀螺仪 (Coriolis vibratory gyroscope) 的主要结构的示意图;

[0018] 图2是根据本文公开的实施例的内部共振的科里奥利振动陀螺仪 (诸如图1所示的陀螺仪) 的集中质量块-弹簧-阻尼器模型的图;

[0019] 图3A是示出第一振动模式的图1中所示的结构的示意图;

[0020] 图3B是示出第二振动模式的图1中所示的结构的示意图;

[0021] 图4是示出用于陀螺仪测试的实验设置的示意图;

[0022] 图5是示出了示例性陀螺仪感测模式响应的实验和模拟结果的曲线图,其示出了由于2:1内部共振导致的感测方向中的振动能量的升高;

[0023] 图6是示出了失谐的内部共振陀螺仪结构的带宽和增益增强的曲线图;

[0024] 图7A是根据本文公开的实施例的利用内部共振的MEMS T-结构的示意图;

[0025] 图7B示出图7A的MEMS结构的2:1内部共振的感测模式的模拟频率响应;

[0026] 图7C示出图7A的MEMS结构的2:1内部共振的感测模式的实验频率响应;

[0027] 图8A是根据本文公开的实施例的利用内部共振的陀螺仪结构的示意图;

[0028] 图8B示出作为时间的函数的驱动和感测模式的模拟响应,示出了由于图8A的MEMS结构的2:1内部共振引起的驱动器中的振动能量的损失和感测能量的增加;

[0029] 图9A是根据本文公开的实施例的利用内部共振的陀螺仪结构的示意图;

[0030] 图9B示出作为时间的函数的驱动和感测模式的模拟响应,示出了由于图9A的MEMS结构的2:1内部共振引起的驱动器中的振动能量的损失和感测能量的增加;

[0031] 图10A是在图1的设计中利用内部共振基座的陀螺仪结构的示意图;以及

[0032] 图10B示出了图10A的2:1内部共振MEMS结构的感测模式的实验频率响应。

## 具体实施方式

[0033] 所公开的实施例涉及微加工惯性传感器,诸如科里奥利振动陀螺仪 (CVG),其基于调制的激励幅度和非线性动力学测量输入旋转速率。另外的某些公开实施例涉及用于增加带宽和品质因数的非线性反馈。

[0034] 总之,所公开的实施例在惯性传感器的设计中使用内部耦合共振系统的非线性动

态特性。作为代表性实施例,本文公开并描述了基于内部共振的样本宏观和微观装置设计。作为示例,当以驱动模式的频率测量由科里奥利力引起的位移时,该装置的内部共振用于实现大的振荡幅度。在一个实施例中,系统包括主梁、致动驱动机构、次梁和感测机构。为了实现内部共振的状态,驱动模式和感测模式机械耦合。感测模式的频率响应具有两个峰值,其中较大的峰值出现在驱动模式的固有频率周围。该现象导致感测梁在驱动模式频率下的相对平坦的区域响应提供更高的带宽。

[0035] 通过使用内部共振现象,驱动和感测模式不再需要1:1的比率(模式匹配要求),因为它在大多数其它共振器和科里奥利振动陀螺仪中是常见的。结果,驱动和感测模式的频率被分离(例如,驱动频率比感测频率高两倍-即2:1的内部共振),感测的信号可以被滤波以用于达到驱动模式的频率附近的频率,减少感测模式的固有频率周围的噪声影响。通过减少电子噪声对读出电路的影响,实现传感器的长期稳定性的显著改进,从而提高传感器的灵敏度。更大的灵敏度提高了品质因数,降低了噪声的影响,这是非常有益的。

[0036] 通过利用驱动机构激励驱动模式,并且使用感测机构感测感测模式。在实施例中,宏观尺度示例,致动机构包括两个压电陶瓷贴片(附接到驱动梁),并且感测机构是在感光梁根部附近附接的应变仪。在另一个实施例中,为微尺度示例,分别通过静电致动和电容感测提供致动和感测机构。

[0037] 驱动和感测模式振荡器可以在闭环中运行,以主动监测和保持共振频率之间的比率。驱动模式在闭环中运行,提供了一种将非线性反馈给系统以用于振荡器所需的灵敏度和带宽的方法。

[0038] 在实现非线性耦合的其它实施例中,公开了微机电系统(MEMS)装置。在一个样品设计中,MEMS装置使用静电力致动,并且感测是电容性的。使用信号源激励驱动模式振荡器。激励信号的期望谐波(即,用于2:1共振的二次谐波)可以电子地产生,并且用作用于从感测模式解调信号的参考。在静电致动和感测的情况下,通常需要DC源来使致动力线性化或者使得能够直接测量感测模式的电极位移。

[0039] 驱动模式可以以预设的幅度操作,并且可以锁定驱动模式和感测模式之间的相位差,以适当和实时调谐系统。感测方向的第一固有频率在y方向上为 $f_{\text{sense}}$ ,并且驱动模式振荡器的第一固有频率在x方向上为 $2f_{\text{sense}} = f_{\text{drive}}$ (如图2所示)。

[0040] 考虑到科里奥利力在驱动力的180度相位差处出现,可以实施控制机制以将相位差保持锁定在期望值处,调节共振频率。可以实施反馈回路以抑制感测方向上的不期望的影响,并进一步放大信噪比。

[0041] 此外,当使用非线性反馈时,可以操纵感测模式的增益和带宽,使得响应的灵敏度更加鲁棒。通过反馈非线性项来控制系统的响应也减少必要的驱动电压,从而减少电信号的寄生污染并改善传感器功耗。

[0042] 首先提出了一种可用于建模具有内部共振的科里奥利振动陀螺仪的通用数学模型,以及非线性陀螺仪系统的分析。提出各种实施例以演示本发明的应用。

[0043] 操作原理

[0044] 首先说明了装置的详细操作原理。通过描述设计的动态来解释在所公开的实施例中使用的设计方法,之后描述了基于理论的若干设计实施例。图1是本文公开的内部共振科里奥利振动陀螺仪装置的主要结构的示意图。图1中所示的基本装置包括经由扭转弹簧28

耦合到第二质量块12的第一质量块10。第一质量块10通过扭转弹簧18进一步耦合到固定端24。图2是代表性实施例的示意图，示出了图1中的内部共振结构的动力学模型。指示的模型14基于2:1 (两对一) 内部共振的原理操作。

[0045] 尽管自始至终讨论了2:1内部共振的比率，但是应当理解，与该精确比率的微小偏差仍然结果是功能装置。因此，如本文所使用的，任何提及的2:1的比率表示从1.9:1至2.1:1的比率。

[0046] 需要多么接近2:1 (例如，接近于2.000:1) 取决于阻尼比 (即每个质量块的固有频率下的品质因数(QF))。例如，采用较高的QF (即较低阻尼)，该比率必须更接近于2:1 (例如2.01:1)。采用较低的QF (即较高阻尼)，比率2:1可以更为有容差 (例如，2.3:1)。

[0047] 实际上讲，频率比在1.9和2.1之间的系统可能导致结构模式之间的能量传递，并且该影响可能会受到激励幅度的显著影响。换句话说，对于远离2:1的比率，需要较大的强迫幅度。目前公开的装置的一个独特特征是调谐到精确的2:1比率是不必要的，因为1.9和2.1之间的比率仍然可能导致非线性模态相互作用和能量传递。

[0048] 质量块10和12是当定义2:1内部共振比的若干因素之间的两个因素。其它因素包括长度、宽度、厚度、材料和弹簧常数。基本上任何会影响材料的固有频率的东西都可用于调整比率。

[0049] 该模型是包括两个质量块10和12的两自由度 (DOF) 集中质量块-弹簧-阻尼器系统。质量块10和12相对于固定惯性参考系 (X,Y,Z) 16，在驱动振荡方向 (X轴) 和感测振荡方向 (Y轴) 这两个正交方向上自由振荡。质量块 $M_1$ 10对称地位于距固定端24的距离22处，并且由扭转弹簧18支撑。质量块 $M_2$ 12位于距质量块10的距离26处，由一个或多个扭转弹簧28耦合到质量块10。质量块12相对于X轴的角旋转通过角度34引入。20和30分别表达质量块10和12的扭转阻尼。

[0050] 在图3A中示出了第一振动模式40，其中质量块10的位移为零，并且质量块12旋转了从驱动轴 (即，X轴) 测量的角度34。第二振动模式42如图3B所示，其中质量块10沿着驱动轴垂直移动。在该模式中，质量块12也在没有围绕Z轴旋转34的情况下移动。

[0051] 三次非线性可以产生其它谐波。作为特殊情况，使用二次非线性以2:1的比率设计所述装置。由于驱动模式 ( $2f_{\text{sense}}$ ) 42和感测模式 ( $f_{\text{sense}}$ ) 40之间的2:1频率比，以及运动方程中非线性耦合项的存在，将会发生内部共振。如果驱动模式和感测模式通过二次非线性耦合，将质量块10激励为较高频率 ( $2f_{\text{sense}}$ ) 42的共振，则将以较低频率 ( $f_{\text{sense}}$ ) 40引起质量块12的振动，并且因此通过二对一内部共振相互作用。

[0052] 结构的动力学

[0053] 通过使用拉格朗日公式获得图2所示的两DOF (自由度) 动力体系的运动方程。用于描述系统状态的广义坐标指定为32和34。10和12的速度矢量被定义为

$$[0054] \quad \vec{v}_{M_1} = r_1 \hat{i} + r_1 \dot{\theta}_1 \hat{j} \quad 1)$$

$$[0055] \quad \vec{v}_{M_2} = (r_1 - r_2(\theta_1 + \theta_2) \sin \theta_2) \hat{i} + (r_1 \dot{\theta}_1 + r_2(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2) \hat{j} \quad 2)$$

[0056] 其中 $\hat{i}$ 和 $\hat{j}$ 分别是X和Y坐标系16的单位矢量。因此，系统的动能和势能被计算并被代入拉格朗日方程连同以下形式的适当的耗散函数中：

$$[0057] \quad F_d = \frac{1}{2} \left( \frac{C_1}{L_1^2 \left( 1 - \left( \frac{r_1}{L_1} \right)^2 \right)} \right) r_1^2 + \frac{1}{2} C_2 \theta_2^2 \quad 3)$$

[0058] 运动方程如下导出

$$[0059] \quad \begin{bmatrix} M_1 + M_2 & -M_2 r_2 \sin \theta_2 \\ -M_2 r_2 \sin \theta_2 & M_2 r_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{C_1}{L_1^2 - r_1^2} & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \arcsin \left( \frac{r_1}{L_1} \right) \\ \theta_2 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} M_2 r_2 (\dot{\theta}_2^2 + \Omega_{rot}^2) \cos \theta_2 + 2M_2 r_2 \Omega_{rot} \dot{\theta}_2 \cos \theta_2 + (M_1 + M_2) r_1 \Omega_{rot}^2 + A \sin(f, t) \\ -M_2 r_2 r_1 \Omega_{rot}^2 \sin \theta_2 - 2M_2 r_2 r_1 \Omega_{rot} \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad 4)$$

[0060] 其中A是激励幅度,  $f_r$ 是激励频率, 并且  $\Omega_{rot}$ 是施加到结构的旋转速率。

[0061] 两个项  $2M_2 r_2 \Omega_{rot} \dot{\theta}_2 \cos \theta_2$  和  $2M_2 r_2 r_1 \Omega_{rot} \cos \theta_2$  是旋转诱导的科里奥利力, 导致与输入角速率  $\Omega_{rot}$  成比例的驱动和感测模式之间的动态耦合。上述运动方程中的二次非线性项是由于旋转对结构几何的影响。内部共振条件的两个必要条件的满足, 即前两种振动模式的线性固有频率的可公度性和二次非线性项的存在证实了非线性模态相互作用, 从而导致结构模式之间的能量传递增强。

[0062] 图4所示的实施例是T形结构60, 其包括两个梁, 即两端固支梁44和无固支梁46, 以及对梁44的附加质量块62。当在装置中需要进一步调整为2:1的比率时, 可选地使用附加质量块62。结合主质量块, 它也可以用于控制两个频率。T形结构60可被建模, 并被近似为图1所示的2-DOF集中质量-弹簧-阻尼器系统14。在陀螺仪结构60中, 两端固支梁44(驱动梁)沿驱动方向(X轴)自由振动(即力矩和剪切力为零), 并且无固支梁46(感测梁)可以沿感测方向(Y轴)移动。系统的两种模式是非线性耦合的。那就是当频率比为2:1时, 驱动模式的能量被传递到感测模式。

[0063] 如本文所使用的, 术语“固支”指偏转和偏转导数为零的固定端。

[0064] 在操作中, 第一步是在前两个弯曲振动模式之间建立2:1的频率比。确定驱动梁44、感测梁46和附加质量块62的几何规格, 确保了结构模式之间的2:1频率比。第一和第二振动模式分别如图3A和3B所示。在第一模式中, 感测梁46弯曲, 而驱动梁44固定。第二振动模式示出驱动方向中的驱动和感测梁(44和46)的平移运动, 而不会使感测梁46围绕Z轴偏转。

[0065] 如图3A和3B所示, 装置的致动机构是提供外部正弦力。在一个实施例中, 使用压电贴片进行激励。再次参考图4, 该装置的致动机构是四个压电贴片58, 其靠近固定支撑件48附接到驱动梁44的顶表面和底表面。用于驱动压电贴片58所需的电压由AC电压源56提供。驱动梁44的位移由指向附加质量块62的激光位移传感器50测量。类似地, 感测梁46的偏转通过指向感测梁46的尖端的另一位移传感器52捕获。

[0066] 可以使用的压电体以外的其它致动机构包括电磁振动器。通常, 只要生成必要的振荡, 就可以使用任何静电、电磁或热的方法。

[0067] 感测驱动梁的位移可以使用任何已知或未来开发的方法来实现。激光位移和电容感测在本文中被论述为示例性感测方法。附加方法包括应变仪、电磁传感器、电阻传感器和光学传感器。

[0068] 在内部共振陀螺仪60以更高的模式共振频率( $f_r \approx 2f_{\text{sense}}$ )42致动时,驱动梁44被强制共振,同时由于2:1的内部共振,振动能被传递到感测梁。二次非线性项在该能量传递中起主要作用。感测梁46以( $2f_{\text{sense}}$ )40的频率振荡,并且增长直到达到稳态条件。

[0069] 可以通过感测模式响应的频率扫描来研究所公开的装置中呈现的鲁棒性增强特性。图5示出了作为驱动频率的函数的结构的感测模式的响应。如图5所示,增加激励幅度导致感测模式46的较大带宽。较大的带宽导致装置对制造缺陷和操作参数的变化的敏感性较小。感测响应不太容易受到驱动和感测模式频率的失谐的影响。可以看出实验和模拟结果之间良好的一致性,证实了运动方程的有效性。

[0070] 使用非线性反馈系统来增强响应的行为。为了观察非线性反馈项的影响,可以将非线性二次和三次项反馈到激励信号。在运动方程中的现有非线性项被赋予恒定增益( $K_i$ ),其中反馈的幅度是激励幅度的一部分。

[0071] 非线性项的反馈由于非线性动力学的特性而增强了感测响应的带宽。由于非线性动力学特性,非线性项的反馈增强了感测响应的带宽。当驱动和感测模式频率以2:1的比率失谐时,它还会修改响应的形状和品质因数。图6示出了使用三次项的非线性反馈来增强失谐的T-结构的带宽和响应的增益。观察到感测梁的响应的带宽显著增加,而响应的形状在变得更平坦的意义上提高。

[0072] 关于用于所公开的装置的特定频率,典型的共振频率在10kHz至10MHz范围内。该范围通常是与制造相关的实际原因,诸如梁尺寸,其限制了质量大小,并且因此限制了频率。

[0073] 在图7A中所示的另一个实施例中,使用微加工工艺制造T形MEMS装置结构。图7A的结构包括被夹在68处的驱动模式部件64和感测模式部件66。驱动模式使用电极70静电激励,并且一对感测电极72用于差分电容感测。作为结构的内部共振行为的指示,图7B中示出了来自图7A的MEMS结构的频率响应模拟结果。还制造了图7A所示的结构,并且图7C中示出了感测模式的频率响应。由于两个图示出了感测模式的模拟和实验响应,从驱动到感测的能量传递对于两倍频率的驱动模式激励的带宽发生。

[0074] 另一个实施例在图8A中被呈现为另一个内部共振设计。在该实施例中,76是主要驱动模式部件,其中添加了检验质量块78以将驱动和感测的频率比调整为2:1。在84处使用电极施加激励信号。感测模式部件74在80处被夹在两侧,一对相邻电极定位在82处。图8B示出了该MEMS装置的模拟结果,其中当激励频率为 $2f_{\text{sense}}$ 时,驱动梁振荡器的能量被传递到感测梁振荡器。

[0075] 图9A中示出了装置的另一个实施例。在该实施例中,驱动模式部件包括两端连接到感测模式部件86的两个梁88和将频率比调整为2:1的质量块90。感测模式部件在中间被支持在96处。驱动和感测部件分别具有相邻的电极92和94。

[0076] 图10A中示出了装置的另一个实施例。在该实施例中,T形结构被设计在感测梁被修改的结构中,使得其中连接驱动梁100和感测梁102的点104与感测梁102的其余部分相比具有较小的宽度。感测梁的连接到驱动模式梁的这种变窄增加了结构非线性,并且可以有助于耦合模式之间的能量传递。驱动模式部件被夹在两端96处。驱动电极108和感测电极106分别与驱动和感测模式部件相邻放置。

[0077] 关于本文公开的MEMS装置的制造,可以通过各种基于硅的工艺(例如SOIMUMPS、

PiezoMUMPS等)来制造这些MEMS装置。在这些工艺中,硅是普遍的材料,其基本上构成了装置的主体以及致动和检测机构。典型的制造工艺涉及的是结构的硅沉积、光刻、蚀刻和释放。通常的制造技术是已知的,然而这里公开的装置不是。

[0078] 虽然已经示出和描述了说明性的实施例,但是应当理解,在不脱离本发明的精神和范围的情况下,可以在其中进行各种改变。

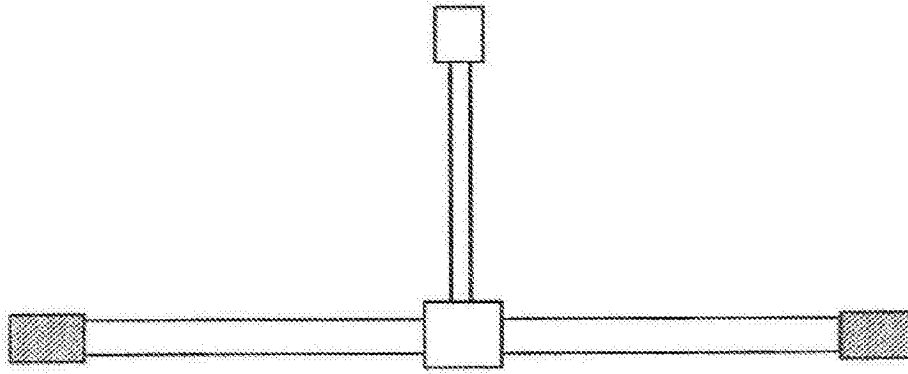


图1

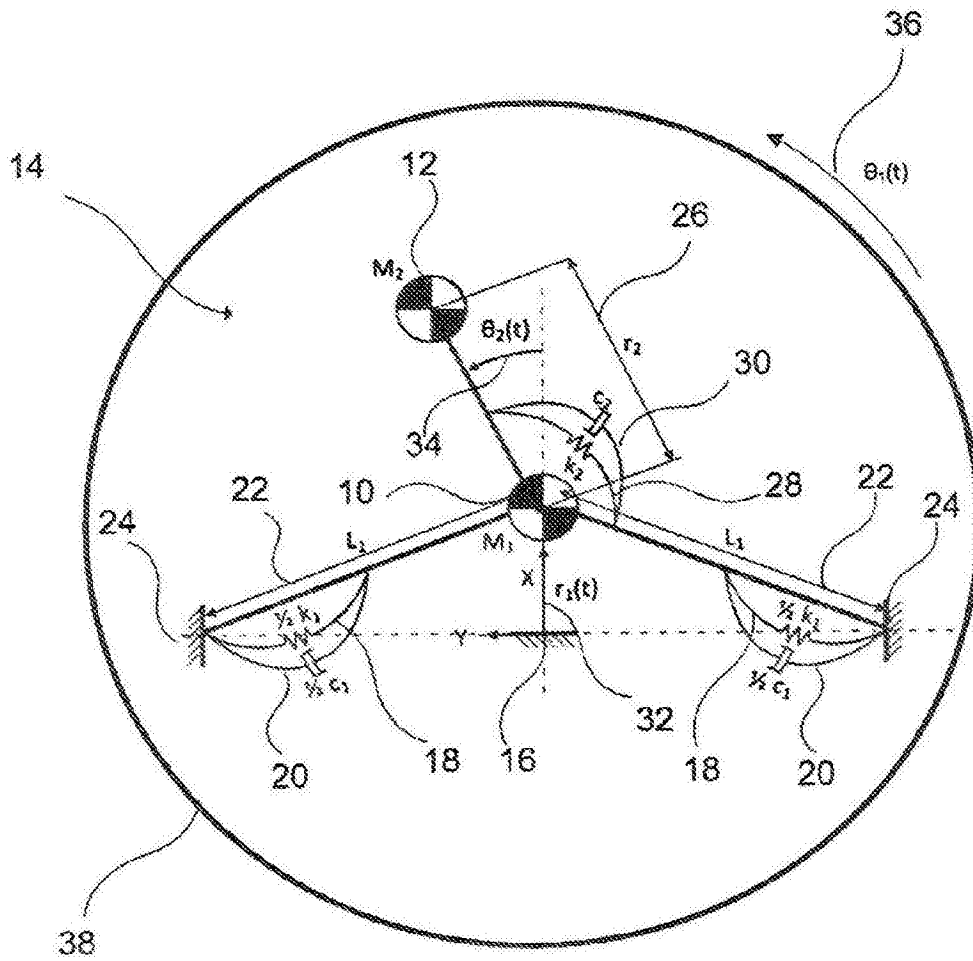


图2

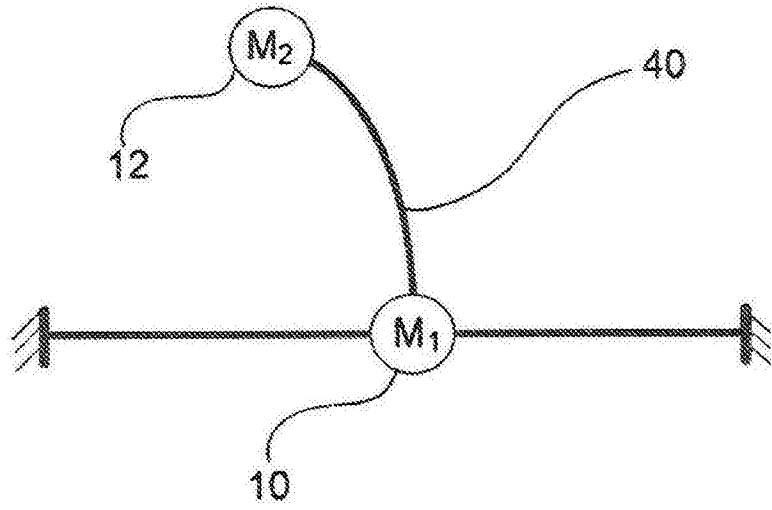


图3A

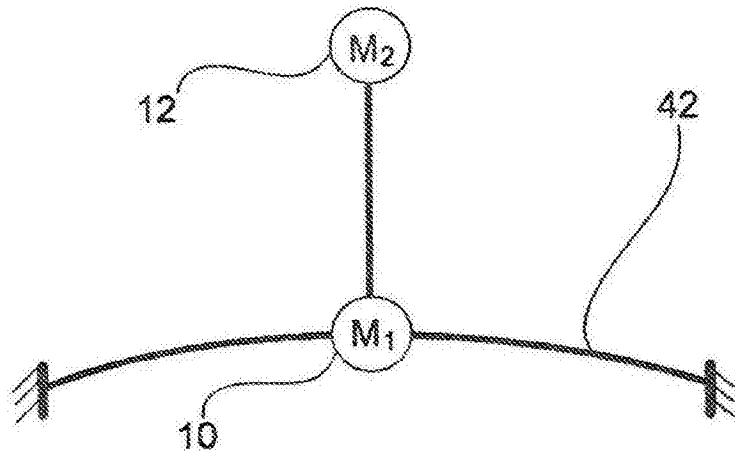


图3B

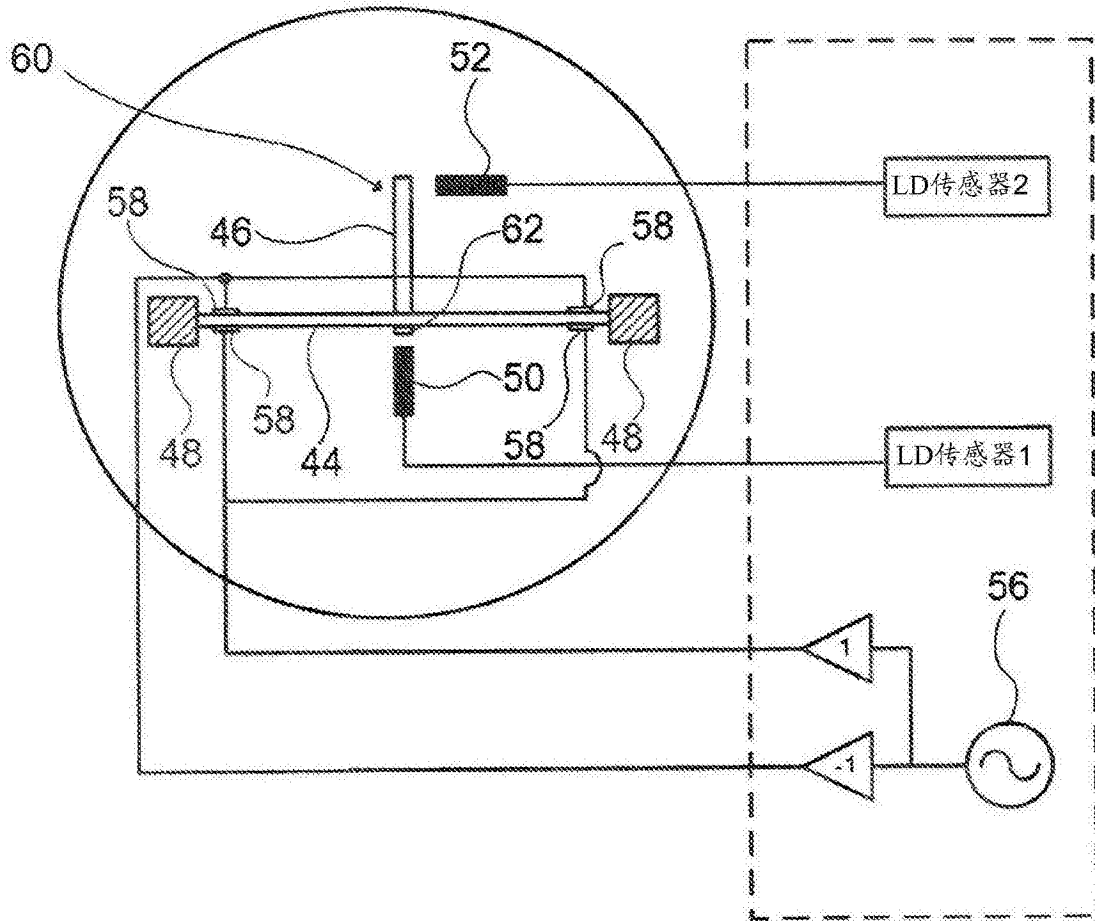


图4

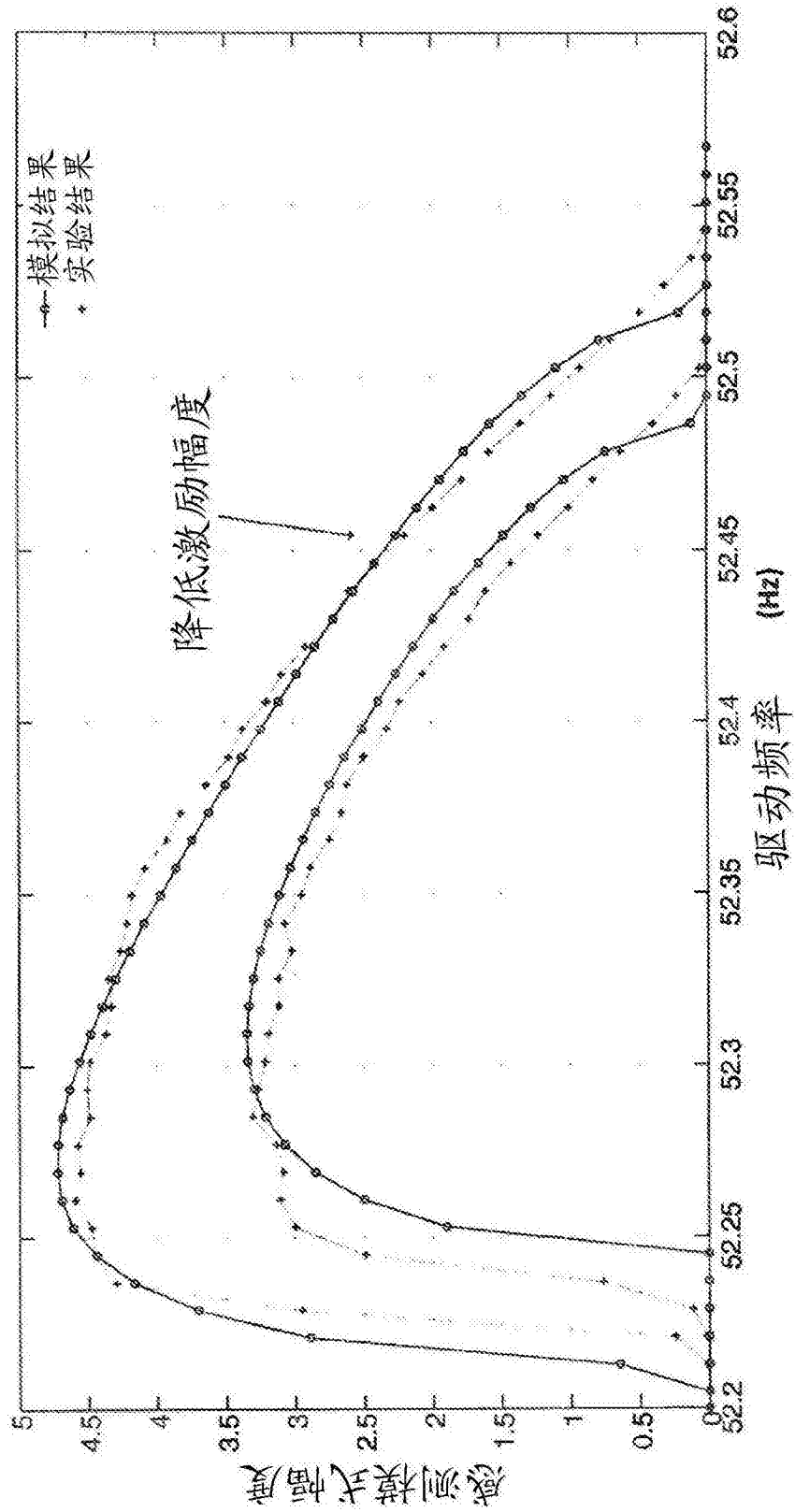


图5

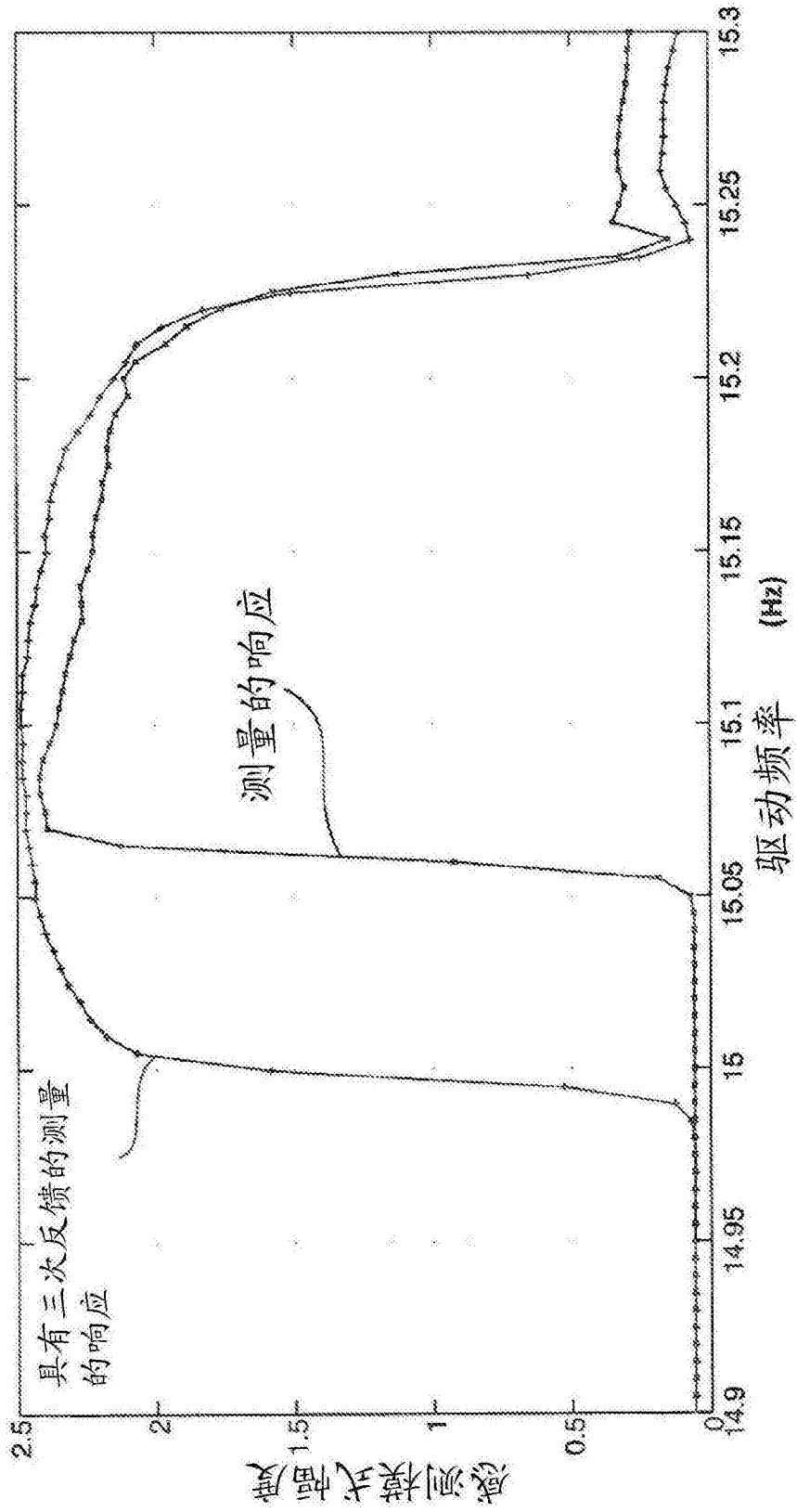


图6

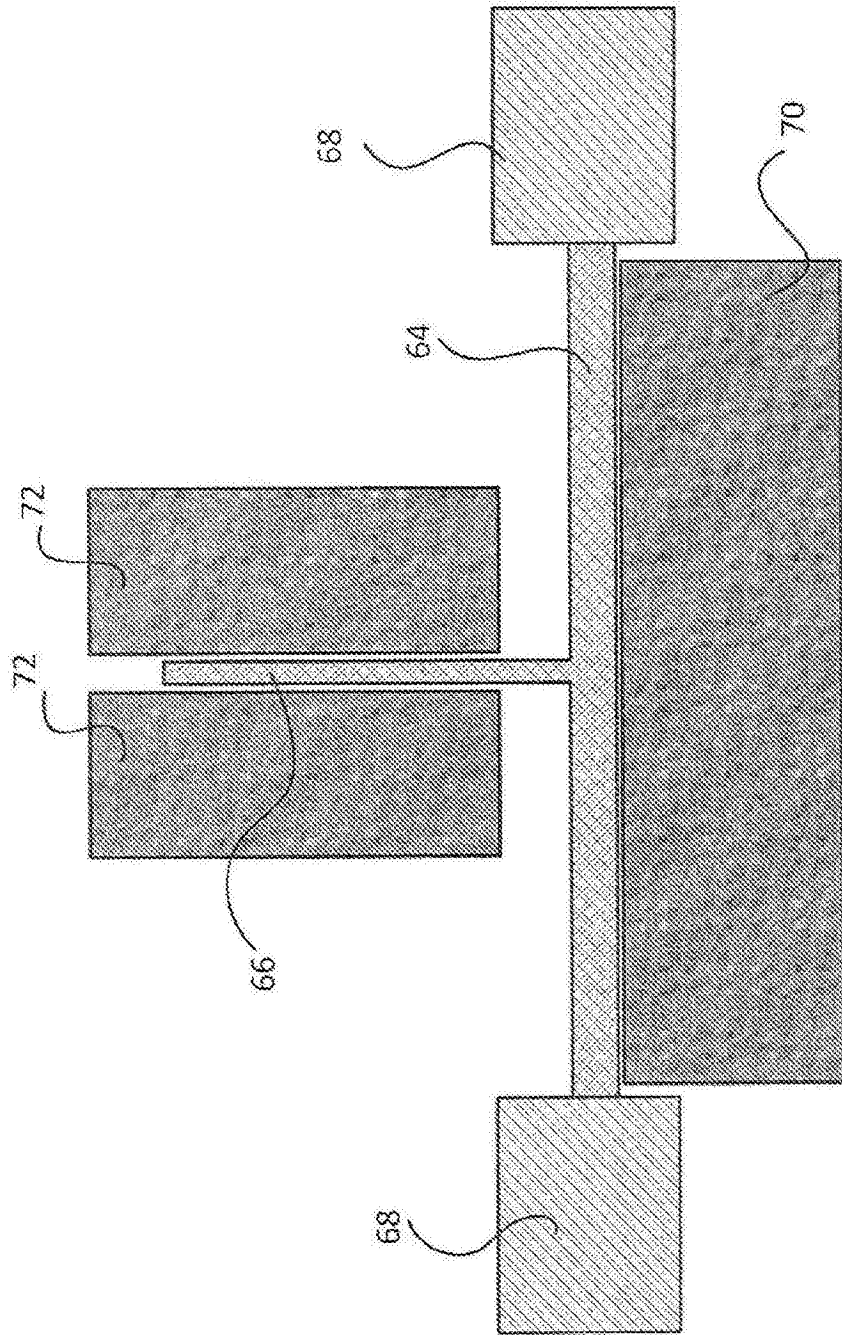


图7A

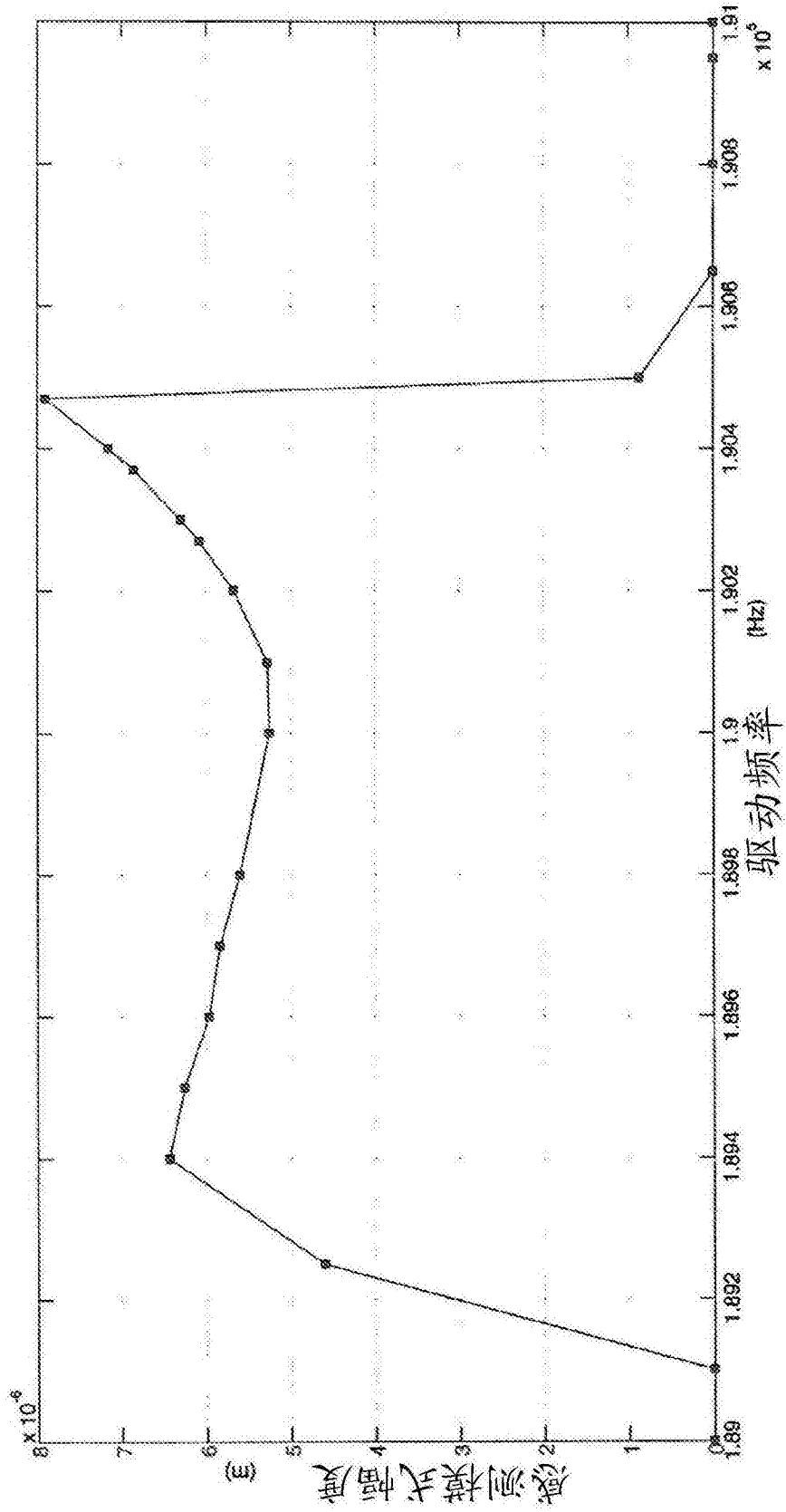


图7B

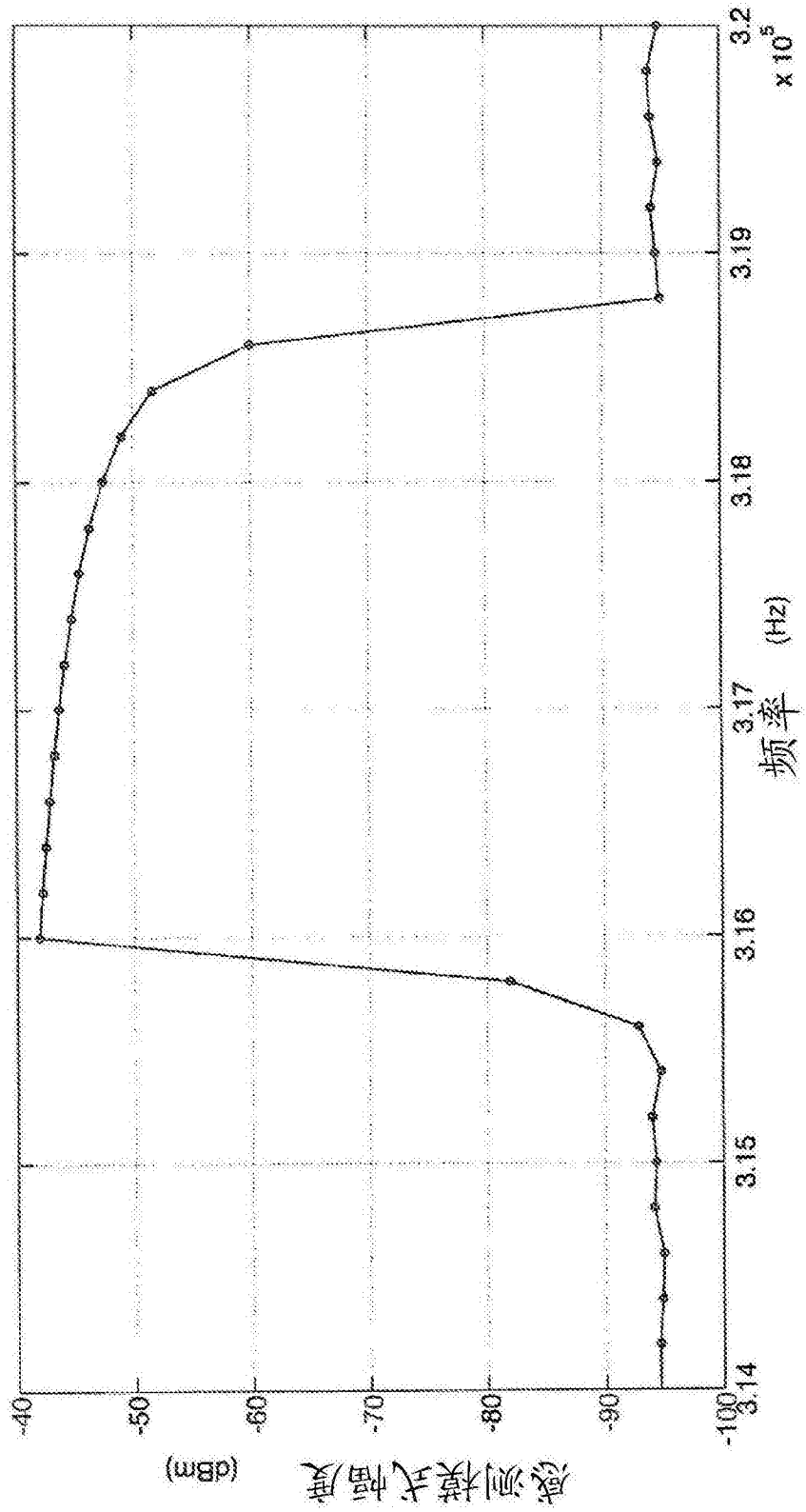


图7C



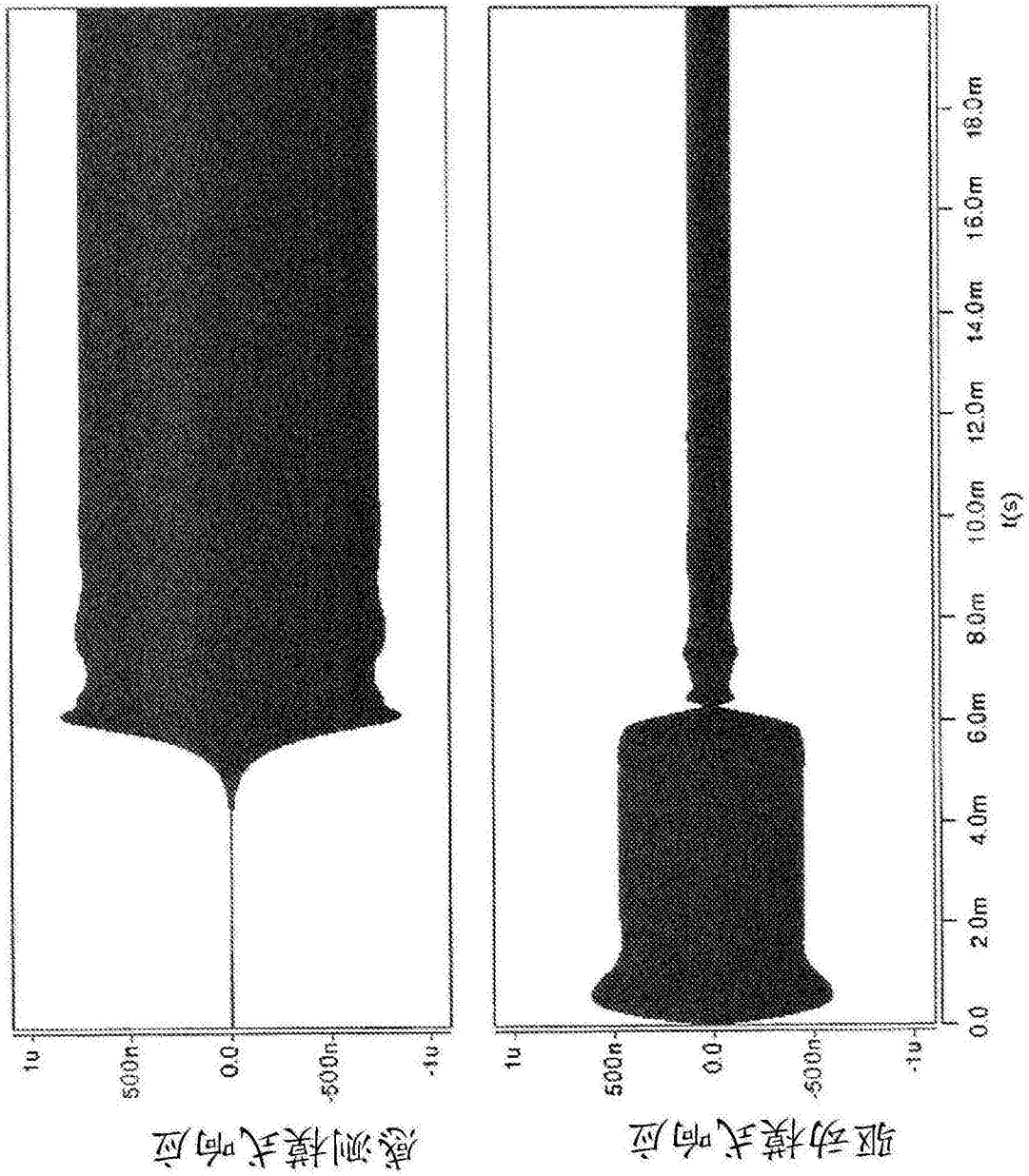


图8B

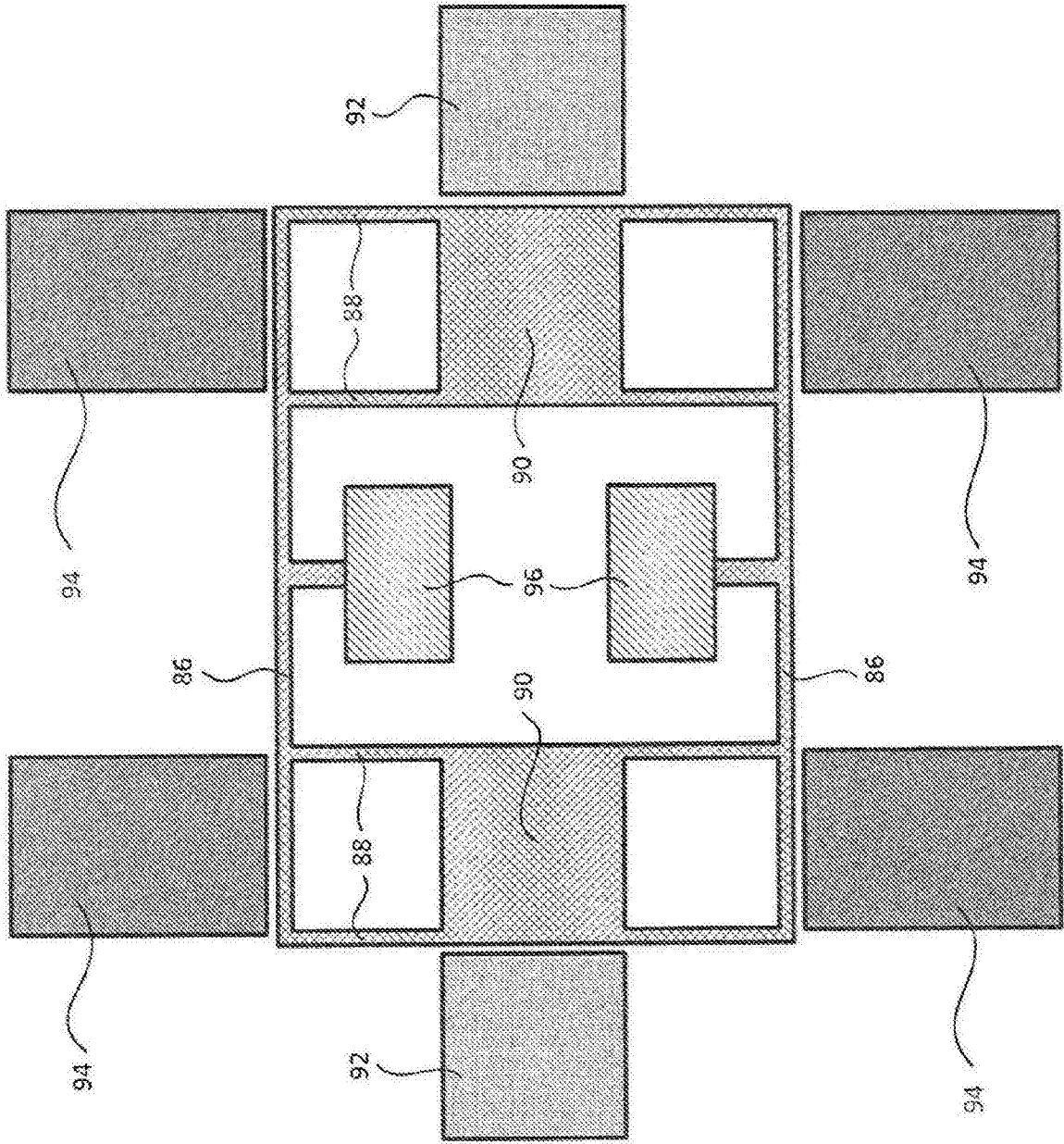


图9A

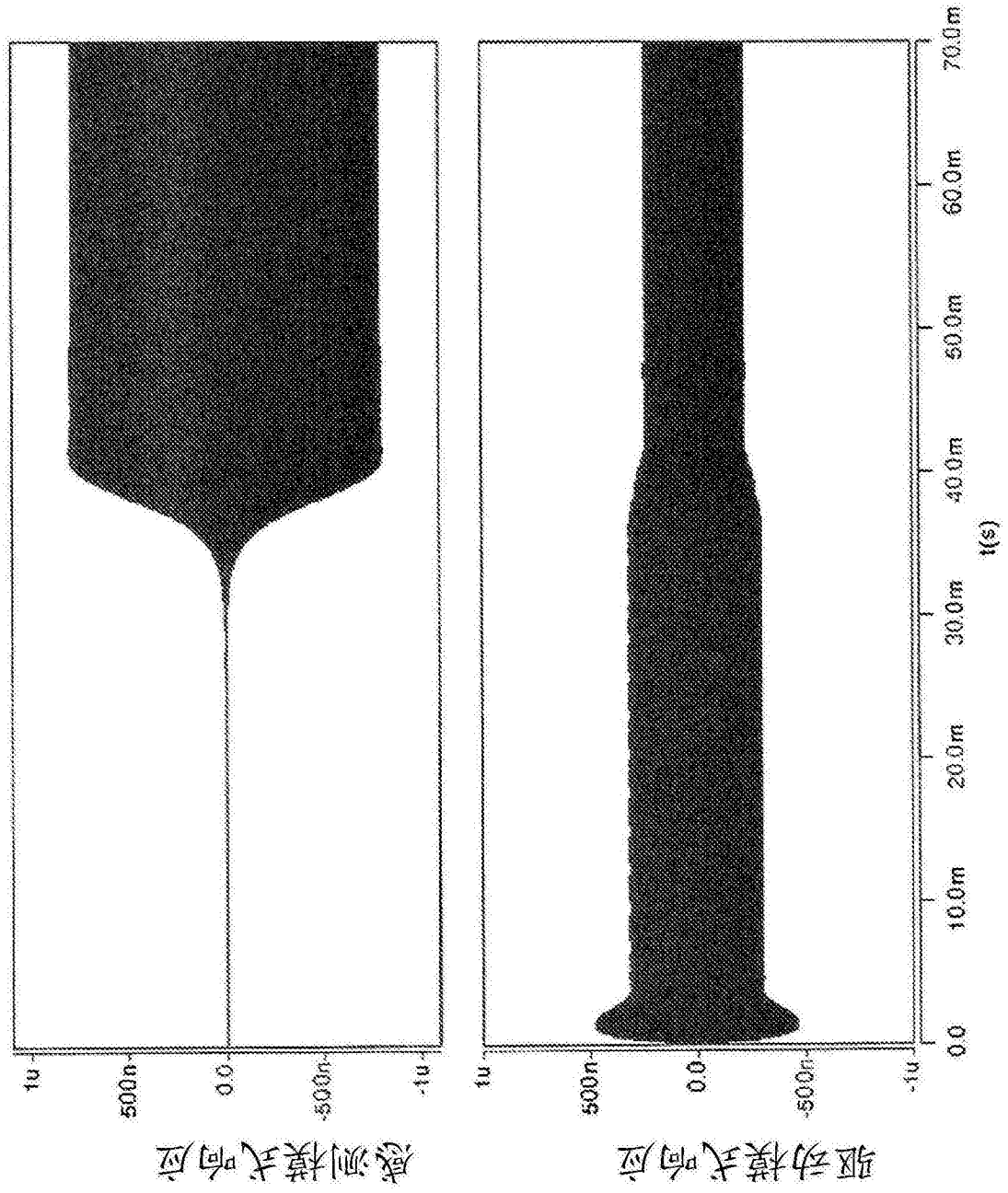


图9B

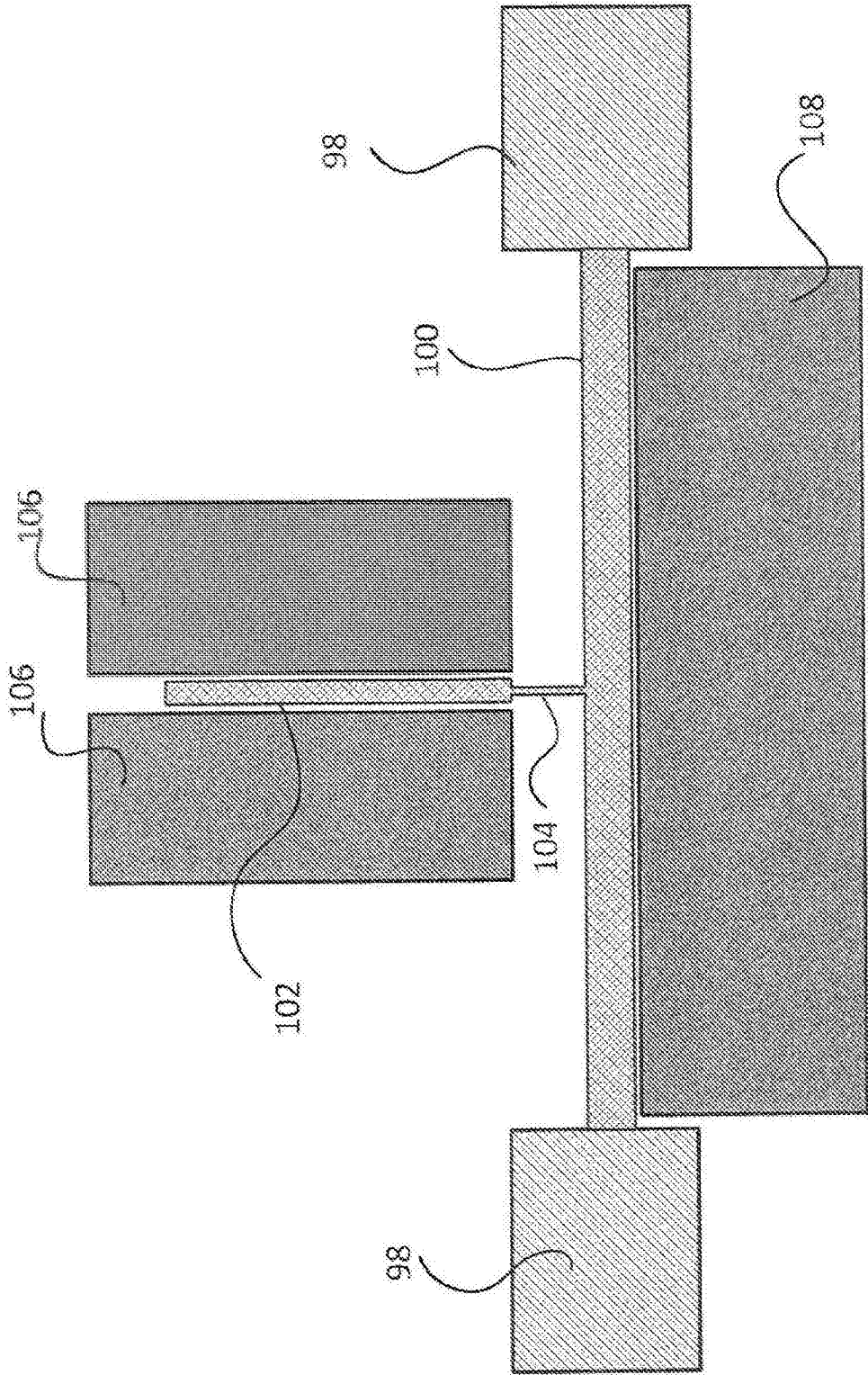


图10A

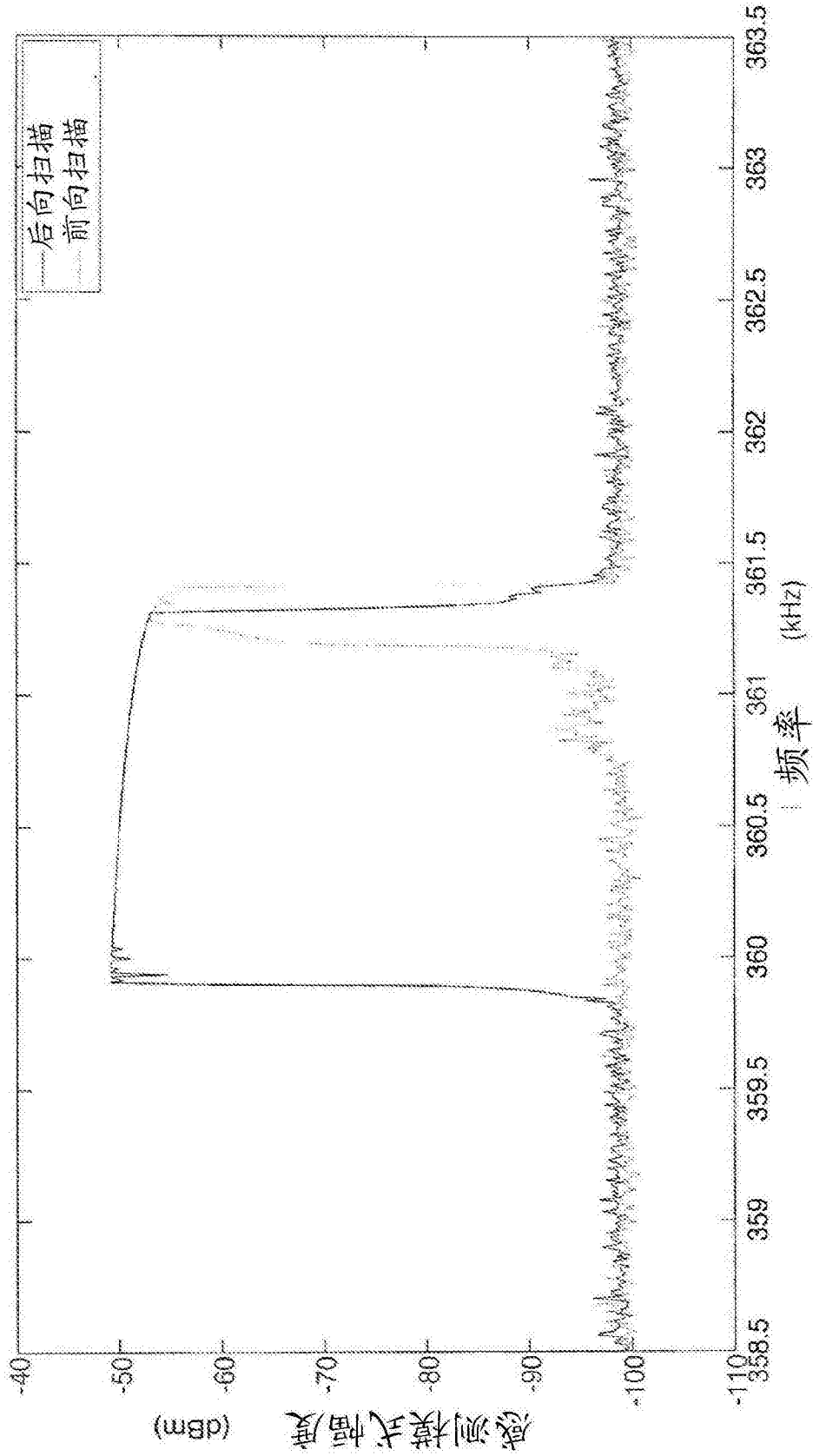


图10B