



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101893539 B

(45) 授权公告日 2012. 10. 10

(21) 申请号 200910172188.7

(22) 申请日 2009.09.15

(30) 优先权数据

10-2009-0043803 2009. 05. 20 KR

(73) 专利权人 仁荷大学校产学协力团

地址 韩国仁川广域市

(72)发明人 李升杰 朴镜德 金大燦

(74) 专利代理机构 北京信慧永光知识产权代理

有限责任公司 11290

代理人 梁兴龙 武玉琴

(51) Int. Cl.

G01N 13/10 (2006.01)

(56) 对比文件

JP 11108940 A, 1999. 04. 23.

JP 2005164544 A, 2005. 06. 23,

JP 2006113082 A, 2006. 04. 27,

JP 2009025037 A, 2009.02.05.

CN 2639998 Y, 2004. 09. 08.

JP 2007298314 A, 2007. 11. 15.

CN 2729693 Y, 2005. 09. 28,

CN 101329247 A, 2008. 12. 24,

审查员 杨莉莎

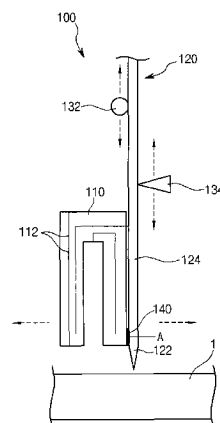
权利要求书 1 页 说明书 12 页 附图 15 页

(54) 发明名称

机械连结的音叉-扫描探针振动系统

(57) 摘要

本发明提供一种机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统, 该系统包括: 由于施加到其上的交流电压而振动的音叉; 连接到该音叉一侧并由于该音叉而振动的扫描探针; 以及接触件, 接触该扫描探针的侧表面并调节该接触件与该扫描探针相接触的接触点的位置, 以改变该音叉和该扫描探针相互组合的组合体的固有频率。通过使用利用接触件的动态振动控制方法, 该机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统的固有频率更接近于音叉本身的固有频率, 使得其能量损失可以最小, 品质因数可以最大, 可以主动地控制品质因数, 不论待检测试样的环境如何, 并且可以高分辨率地检测在空气中的试样和在高粘度液体介质中的试样。



1. 一种机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统,所述系统包括:
音叉,由于施加到其上的交流电压而振动;
扫描探针,连接到所述音叉一侧并由于所述音叉而振动;以及
接触件,接触所述扫描探针的侧表面并调节所述接触件与所述扫描探针相接触的接触点的位置,以改变所述音叉和所述扫描探针相互组合的组合体的固有频率,其中所述接触件包括:
针点式支持件,接触所述扫描探针的侧表面并可沿所述扫描探针的纵向移动;以及
刃口式秤,接触与所述针点式支持件的接触面相对的所述扫描探针的侧表面并可沿所述扫描探针的纵向移动,位于所述音叉和所述扫描探针相互接触的接触点与所述针点式支持件之间。
2. 如权利要求 1 所述的系统,其中所述扫描探针和所述音叉相互连接,使得所述音叉的纵向与所述扫描探针的纵向相互平行或相互垂直。
3. 如权利要求 1 所述的系统,其中所述扫描探针插入粘性介质中,从而检测浸泡在所述粘性介质中的试样的光学特性。
4. 如权利要求 1 所述的系统,其中所述音叉包括安装在其中并检测所述音叉的振幅和相位的检测电路,且所述音叉由氧化硅构成,以及所述扫描探针大致呈横梁形状,且由玻璃或光纤构成。

机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统

[0001] 相关专利申请的交互参照

[0002] 本申请要求于 2009 年 5 月 20 日在韩国知识产权局提交的韩国专利申请 No. 10-2009-0043803 的优先权,在此引入其全部公开内容作为参考。

技术领域

[0003] 本发明涉及一种用于扫描探针显微镜的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统,更具体而言,涉及一种在宽广范围内品质因数最大化或受控制而使得可以高分辨率地检测扫描探针的检测尖端与试样表面之间的距离或者可以缩短检测时间的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统。

背景技术

[0004] 近场扫描光学显微镜 (NSOM) 是一种扫描探针显微镜,其中厚度等于或小于 100nm 的非常小的孔贯穿在具有尖端的长探针中,并且在探针相对于试样表面前后左右相对移动时,检测待观察的试样表面的高度和试样的光学特性。一般的光学显微镜以远场检测为基础,因此,光发生衍射,使得光学显微镜具有约 200nm 的分辨率极限。另一方面,在 NSOM 中,使用数值孔径 (NA) 等于或小于 100nm 的扫描探针来检测近场。因此,可以克服一般的光学显微镜的分辨率极限,并且可以同时检测关于试样表面的三维形状的信息和其光学信息。

[0005] 图 1A 和图 1B 示意性示出常规的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统。参照图 1A 和图 1B,常规的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统包括音叉 10 和扫描探针 20,音叉 10 中安装有检测电路 (图未示) 并检测系统的振幅和相位变化,扫描探针 20 通过粘合剂 30 连接到音叉 10 上并包括截面端部尺寸为几微米或者等于或小于几微米的检测尖端 22。图 1A 和图 1B 所示的系统检测施加在扫描探针 20 与试样表面之间的剪切力的变化,并调节扫描探针 20 与试样表面之间的距离达到纳米级。剪切力是当长度等于或小于 20nm 的扫描探针 20 接近试样表面时在检测尖端 22 与试样表面之间产生的范德华力 (Van der Waal's force)。

[0006] 在图 1A 和图 1B 的系统中调节扫描探针 20 与试样表面之间的距离时,首先,将具有预定频率的交流电压施加到连接有扫描探针 20 的音叉 10 上,使得音叉 10 和扫描探针 20 振动。然后,当扫描探针 20 接近试样表面并且施加在扫描探针 20 与试样表面之间的剪切力降低了扫描探针 20 的振动时,由于音叉 10 的振幅和相位变化使得扫描探针 20 与试样表面之间的距离被调节到纳米级,因而可以通过检测电路检测音叉 10 的振动降低。

[0007] 当施加到音叉 10 上的交流电压的频率变化并且检测音叉 10 中安装的检测电路的输出电压时,在常规的机械连结的音叉 10-扫描探针 20 振动系统的共振频率时记录最高输出电压,并且随着施加到音叉 10 上的交流电压的频率远离常规的机械连结的音叉 10-扫描探针 20 振动系统的共振频率时,安装在音叉 10 中的检测电路的输出电压降低。根据施加到音叉 10 上的交流电压的频率检测的输出电压被称作常规的机械连结的音叉 10-扫描探针 20 振动系统的频率响应曲线。在这种情况下,通过用常规的机械连结的音叉 10-扫描探

针 20 振动系统的共振频率除以频率响应曲线的半宽求得的值被称作品质因数。通过常规的机械连结的音叉 10- 扫描探针 20 振动系统的品质因数确定调节扫描探针 20 的检测尖端 22 与试样表面之间的距离的精度。也就是说,当长度等于或小于 20nm 的扫描探针 20 的检测尖端 22 接近试样表面时,常规的机械连结的音叉 10- 扫描探针 20 振动系统的物理特性由于剪切力作用的原因变化,并且常规的机械连结的音叉 10- 扫描探针 20 振动系统的共振频率变化,频率响应曲线向左或向右移动。在这种情况下,当没有检测到剪切力时,即在常规的机械连结的音叉 10- 扫描探针 20 振动系统的物理特性由于剪切力的原因变化之前,施加到音叉 10 上的交流电压的频率是常规的机械连结的音叉 10- 扫描探针 20 振动系统的共振频率。因此,随着频率响应曲线向左或向右移动,音叉 10 的输出电压降低。在调节扫描探针 20 的检测尖端 22 与试样表面之间的距离的精度方面,当常规的机械连结的音叉 10- 扫描探针 20 振动系统的品质因数很大时,由于剪切力的原因,音叉 10 的输出电压的变化变得更大。因此,可以更精确地检测距离的变化。

[0008] 换言之,随着常规的机械连结的音叉 10- 扫描探针 20 振动系统的品质因数增加,在扫描探针显微镜中可以更灵敏地检测剪切力,这意味着可以更精确地调节扫描探针 20 的检测尖端 22 与试样表面之间的距离。

[0009] 然而,当象在图 1A 和图 1B 示出的常规的机械连结的音叉 10- 扫描探针 20 振动系统中那样扫描探针 20 连接在音叉上时,因为音叉 10 的两个叉股的质量不平衡、将要施加到音叉 10 上的阻力增加、常规的机械连结的音叉 10- 扫描探针 20 振动系统的固有频率不同于音叉 10 的固有频率以及常规的机械连结的音叉 10- 扫描探针 20 振动系统振动所需的能量发生损失的原因,与音叉 10 的固有品质因数相比,系统的品质因数下降约 1/20 以上。特别是,在 NSOM 中,使用具有大长度的扫描探针 20,因此,品质因数降低严重。因此,不能精确地调节扫描探针 20 的检测尖端 22 与试样表面之间的距离。

[0010] 特别是,当使用振动扫描探针 20 检测液体中含有的生物试样时,由于液体粘度的原因,很大的阻力被施加到液体中的扫描探针 20 上。因此,常规的机械连结的音叉 10- 扫描探针 20 振动系统的品质因数大大降低,或者音叉 10 不振动。在图 1A 和图 1B 示出的常规的机械连结的音叉 10- 扫描探针 20 振动系统中,很难高分辨率地检测到液体中的试样形状。

发明内容

[0011] 本发明提供一种机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统,其中,为了即使当扫描探针连接到音叉上时,与音叉的品质因数相比,机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统的品质因数也没有大幅降低,针点式支持件和刃口式秤接触扫描探针的一侧,调节针点式支持件和刃口式秤相互接触的位置,动态控制机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统的振动特性,使得可以精确地调节扫描探针的检测尖端与试样表面之间的距离或者可以缩短检测时间。

[0012] 本发明还提供一种机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统,其中通过调节包括针点式支持件和刃口式秤的接触件的接触位置进行动态振动控制,使得即使当扫描探针插入高粘度介质中时,也可以保持机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统的高品质因数,可以检测在高粘度介质中的试样形状,并且可以使用扫描探针显微镜精确地检测液体中的生物试样和空气中的试样。

[0013] 根据本发明的一个方面,提供一种机械连结的音叉-扫描探针振动系统,所述系统包括:音叉,由于施加到其上的交流电压而振动;扫描探针,连接到所述音叉一侧并由于所述音叉而振动;以及接触件,接触所述扫描探针的侧表面并调节所述接触件与所述扫描探针相接触的接触点的位置,以改变所述音叉和所述扫描探针相互组合的组合体的固有频率。

[0014] 所述接触件可以包括:针点式支持件,接触所述扫描探针的第一侧的表面并可沿所述扫描探针的纵向移动;以及刃口式秤,接触所述扫描探针的第二侧的表面并可沿所述扫描探针的纵向移动,位于所述音叉和所述扫描探针相互接触的接触点与所述针点式支持件之间,以及所述针点式支持件和所述刃口式秤可由沿 X、Y 和 Z 轴方向精确移动的平移台支持。

[0015] 所述扫描探针和所述音叉可以相互连接,使得所述音叉的纵向与所述扫描探针的纵向相互平行或相互垂直。相应于所述扫描探针端部的检测尖端可以插入粘性介质中,从而检测浸泡在所述粘性介质中的试样的光学特性。

[0016] 所述音叉可以包括安装在其中并检测所述音叉的振幅和相位的检测电路,且所述音叉可以由氧化硅(SiO_2)构成,所述扫描探针可以呈具有预定截面和长度的大致横梁形状,且由玻璃或光纤构成,以及所述扫描探针面对试样的第一侧可以是截面尺寸为几微米或者等于或小于几微米的检测尖端。

附图说明

[0017] 通过结合附图详细描述示例性实施例,可以更清楚本发明的上述和其他特征以及优点,在附图中:

[0018] 图 1A 和图 1B 示意性示出常规的机械连结的音叉-扫描探针振动系统;

[0019] 图 2 是根据本发明实施例的机械连结的音叉-扫描探针振动系统的立体图;

[0020] 图 3 和图 4 分别是图 2 所示的机械连结的音叉-扫描探针振动系统的音叉、扫描探针和接触件的主视图和侧视图;

[0021] 图 5 和图 6 分别是主视图和侧视图,示出扫描探针连接到音叉前表面的情况,其中,扫描探针和音叉包括在根据本发明另一实施例的机械连结的音叉-扫描探针振动系统中;

[0022] 图 7 和图 8 分别是主视图和侧视图,示出扫描探针和音叉相互垂直连接的情况,其中,扫描探针和音叉包括在根据本发明另一实施例的机械连结的音叉-扫描探针振动系统中;

[0023] 图 9 和图 10 分别是主视图和侧视图,示出扫描探针连接到音叉侧表面的情况,其中,扫描探针和音叉包括在根据本发明另一实施例的机械连结的音叉-扫描探针振动系统中;

[0024] 图 11 和图 12 分别是前视图和侧视图,示出图 2 的机械连结的音叉-扫描探针振动系统检测浸泡在液体介质中的试样的情况;

[0025] 图 13A 和图 13B 是显示通过建造图 2 的机械连结的音叉-扫描探针振动系统的音叉和扫描探针的模型所获得的图 2 的机械连结的音叉-扫描探针振动系统的共振频率变化的理论计算的示意图;

[0026] 图 14A 和图 14B 是显示比较被表达作通过建造图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统的音叉和扫描探针的模型所获得的值的振动特性与被表达作通过实验所获得的值的振动特性的结果的示图；

[0027] 图 15A 和图 15B 是声表面波滤波器的图像,其中通过使用图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统的扫描探针显微镜来检测图像；

[0028] 图 16A 和图 16B 是显示在扫描探针暴露于空气中和浸泡在图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统的液体介质中这两种情况下的频率响应曲线和振动特性的示图；

[0029] 图 17 是显示相对于音叉和扫描探针的接触点与图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统的扫描探针的端部之间的距离变化的振动特性的示图；

[0030] 图 18A 和图 18B 分别是通过使用图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统的扫描探针显微镜拍摄的声表面波滤波器在空气中的图像和声表面波滤波器在液体介质中的图像；和

[0031] 图 19 和图 20 示出根据比较例的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统。

具体实施方式

[0032] 下面,参照附图更为全面地描述本发明,在附图中显示了本发明的示例性实施例。

[0033] 图 2 是根据本发明实施例的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的立体图；图 3 和图 4 分别是图 2 所示的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的音叉、扫描探针和接触件的主视图和侧视图。

[0034] 参考图 2,根据本实施例的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 包括音叉 110(由于施加到音叉 110 上的交流电压而振动)、连接到音叉 110 一侧的扫描探针 120、接触扫描探针 120 以改变音叉 110 和扫描探针 120 相互组合的组合体的固有频率的接触件 130 以及支持接触件 130 的平移台 300。

[0035] 参照图 3 和图 4,音叉 110 具有包括分为两部分的叉股形状,可以是由氧化硅(SiO_2)构成的石英振动器。然而,本发明不仅限于此,音叉 110 可以是具有其他形状的石英振动器,如用作音叉 110 的 PZT 或棒型音叉。另外,检测电路 112 安装在音叉 110 中,从而可以检测音叉 110 的振幅和相位。当具有预定频率的交流电压施加到音叉 110 上时,音叉 110 振动,同时它的两个叉股反复关闭和开放,由检测电路 112 检测振动,检测电路 112 将电信号传递至外部检测设备(图未示)。检测电路 112 可以是检测音叉 110 的振幅和相位的单元。同样,外部检测设备可以是检测从检测电路 112 输出的电信号的设备。检测电路 112 和外部检测设备是本领域技术人员公知的一般设备,因此,这里未提供详细说明。

[0036] 扫描探针 120 呈横梁形状,其截面具有预定尺寸,并且长度比截面更大。扫描探针 120 面对试样 1 的第一侧可以是截面尺寸为几微米或者等于或小于几微米的检测尖端 122,扫描探针 120 的第二侧可以是截面尺寸比检测尖端 122 更大的自由端 124。

[0037] 音叉 110 和扫描探针 120 通过粘合剂 140 相互连接。具体来说,扫描探针 120 连接到音叉 110 的两个叉股之一的一侧,使得扫描探针 120 的检测尖端 122 从音叉 110 和扫描探针 120 相互接触的接触点 A 露出约 1mm 的长度。

[0038] 相对于扫描探针 120 的自由端 124 具有非常小接触面的接触件 130 接触接触点 A,并改变扫描探针 120 的固有频率以及音叉 110 和扫描探针 120 相互组合的组合体的固有频

率。在这种情况下,接触件 130 可以在扫描探针 120 的自由端 124 沿扫描探针 120 的纵向自由调节接触点 A 的位置。因此,扫描探针 120 的固有频率以及音叉 110 和扫描探针 120 相互组合的组合体的固有频率可以变化。此外,通过调节施加到扫描探针 120 上的接触压力,接触件 130 可以接触扫描探针 120。

[0039] 接触件 130 可以接触扫描探针 120 的两侧并被支持,使得可以更精确地控制音叉 110 和扫描探针 120 的振动特性。因此,接触件 130 包括接触扫描探针 120 的第一侧并发挥针点作用的针点式支持件 132 和接触扫描探针 120 的第二侧的刃口式秤 134,其中扫描探针 120 的第二侧面对第一侧。在这种情况下,刃口式秤 134 可以配置在针点式支持件 132 和接触点 A 之间。此外,刃口式秤 134 配置在基于扫描探针 120 与接触点 A 的相对侧,使得由刃口式秤 134 将接触压力施加到其上的扫描探针 120 可被压向音叉 110,并且针点式支持件 132 可以配置在基于扫描探针 120 与刃口式秤 134 的相对侧。这是因为,当刃口式秤 134 的位置与针点式支持件 132 相对时,扫描探针 120 脱离(远离)音叉 110 的微小压力被施加到刃口式秤 134 上,使得由于扫描探针 120 的原因,可以控制音叉 110 的振动特性,可以降低音叉 110 的品质因数,并且可以增大音叉 110 的能量损失。

[0040] 针点式支持件 132 配置在刃口式秤 134 的相对侧,使得可以在相对于诸如风、振动等环境条件没有位置变化的情况下很好地固定。

[0041] 针点式支持件 132 和刃口式秤 134 均可由沿 X、Y 和 Z 轴方向精确移动的平移台 300 支持,从而可以精确地移动相对于扫描探针 120 的接触位置。然而,本发明不仅限于此。可以使用支持针点式支持件 132 和刃口式秤 134 并精确地移动到扫描探针 120 的单元。每个平移台 300 是一般的转移设备,这里没有提供详细说明。

[0042] 下面说明图 2 中示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 的操作。

[0043] 在图 2 的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 中,与音叉 110 连接并振动的扫描探针 120 的检测尖端 122 接近待观察的试样 1 的表面,通过音叉 110 的检测电路 112 检测在扫描探针 120 和试样 1 之间起作用的剪切力的变化,计算扫描探针 120 与试样 1 的表面之间的距离并调节到纳米级,动态控制与音叉 110 连接的扫描探针 120 的振动特性,使得可以提高机械连结的音叉 110-扫描探针 120 振动系统 100 的品质因数,并且扫描探针 120 可以在未受到构成周围环境的介质的粘度影响下自由地振动。

[0044] 在动态控制扫描探针 120 的振动特性的情况下,参照图 2,针点式支持件 132 和刃口式秤 134 接触与音叉 110 连接的扫描探针 120,使得可以在新的边界条件下动态控制音叉 110 和扫描探针 120 的振动特性,可以调节机械连结的音叉 110-扫描探针 120 振动系统 100 的固有频率,并且可以提高品质因数。在这种情况下,可以调节针点式支持件 132 和刃口式秤 134 的接触位置,使得可以主动地控制机械连结的音叉 110-扫描探针 120 振动系统 100 的品质因数。

[0045] 在使用针点式支持件 132 和刃口式秤 134 动态控制机械连结的音叉 110-扫描探针 120 振动系统 100 的振动特性的情况下,首先,针点式支持件 132 和刃口式秤 134 动态控制与扫描探针 120 连接的音叉 10 的振动特性,使得音叉 10 可以在未受到构成周围环境的介质的粘度影响下自由地振动,并且在检测过程中产生的机械连结的音叉 10-扫描探针 20 振动系统 100 的固有频率可以与音叉 110 的固有频率相同。即使当试样 1 包含在具有高粘度的介质中时,音叉 110 的品质因数也保持在高水平,使得可以检测试样 1,并且可以精确

地调节扫描探针 120 与试样 1 的表面之间的距离,因此,可以高分辨率地检测包含在具有高粘度的介质中的试样 1。后面说明包含在具有高粘度的介质中的试样 1。

[0046] 在图 2 示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 中,通过接触件 130 可以增加音叉 110 的品质因数,并且根据检测目的,通过降低音叉 10 的品质因数可以减少扫描探针显微镜的扫描探针 120 的扫描时间。在本发明的实施例中,通过接触件 130 可以主动地控制音叉 110 的品质因数。

[0047] 换句话说,接触件 130 允许针点式支持件 132 接触设置在扫描探针 120 的接触点 A 上方的自由端 124 的第一侧,并允许刃口式秤 134 在扫描探针 120 的自由端 124 的第二侧的位置接触接触点 A 和针点式支持件 132 之间的空间。在这种情况下,针点式支持件 132 和刃口式秤 134 允许接触点 A 的位置沿扫描探针 120 的纵向移动,并可以调节针点式支持件 132 和刃口式秤 134 的接触点的位置,从而以扫描探针 120 的共振频率变化的方式设置预定的边界条件。此外,可以调节由针点式支持件 132 和刃口式秤 134 施加到扫描探针 120 上的接触压力。

[0048] 图 2 中示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 利用音叉 110 在横向振动的特性。因此,通过应用梁的横向振动理论来解释该振动。图 2 中示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 被解释为五梁组合系统,其中音叉 110 的两个梁和扫描探针 120 的三个梁相互组合。这里,五个梁涉及到音叉 110 的两个叉股、接触点 A 和扫描探针 120 的检测尖端 122 之间的梁、接触点 A 和刃口式秤 134 之间的梁以及刃口式秤 134 和针点式支持件 132 之间的梁。

[0049] 这里,在横向振动梁中,使用以下方程表达相对于长度分量 l 的横向振幅:

$$[0050] \quad U(l) = a \cos(\beta l) + b \sin(\beta l) + c \cosh(\beta l) + d \sinh(\beta l)。$$

[0051] 这里, $\beta^4 = \omega_r^2 \rho S / EI$, 其中 ω_r 是共振频率, ρ 是密度, S 是截面积, E 是杨氏模量, I 是转动惯量。通过从上述方程导出关于图 2 中示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 的五个梁的横向振幅的 5 个方程,并将音叉 110 和扫描探针 120 的变量代入 5 个方程,设置 20 个边界条件。在这 20 个边界条件中,扫描探针 120 设置在针点式支持件 132 和刃口式秤 134 之间的边界条件如下。

[0052] 在针点式支持件 132 位置的两个边界条件是 $U_1(0) = 0$ 和 $U_1'(0) = 0$, 在刃口式秤 134 位置的四个边界条件是 $U_1(l_1) = 0$ 、 $U_2(l_1) = 0$ 、 $U_1''(l_1) = U_2''(l_1)$ 和 $U_1'''(l_1) = U_2'''(l_1)$ 。这里, U_1 是关于刃口式秤 134 和针点式支持件 132 之间的梁的横向振幅的方程, U_2 是关于接触点 A 和刃口式秤 134 之间的梁的横向振幅的方程, l_1 是从针点式支持件 132 到刃口式秤 134 的长度。

[0053] 通过应用根据本实施例的新边界条件的针点式支持件 132 的位置来确定根据刃口式秤 134 的位置变化的图 2 中示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 的共振频率的变化形状。换句话说,根据刃口式秤 134 的位置变化的图 2 中示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 的共振频率涉及单一模式或两种模式由针点式支持件 132 的位置确定,如图 13A 和图 13B 所示,它们是显示其中设置有图 2 中示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 的针点式支持件 132 和刃口式秤 134 的音叉 110 和扫描探针 120 的组合结构的振动特性的理论计算的示意图,后面将提供详细说明。

[0054] 因此,在图 2 示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 中,当扫描探针 120

和音叉 110 相互连接时,针点式支持件 132 和刃口式秤 134 接触与扫描探针 120 的检测尖端 122 相对的自由端 124 第一侧的指定位置,使得可以精确地调节扫描探针 120 与试样 1 的表面之间的距离。因此,图 2 中示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 可以很容易地用在一般的扫描探针显微镜中。

[0055] 此外,图 2 中示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 主动地控制其品质因数。因此,可以提高图 2 中示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 的品质因数,使得可以精确地调节距离。当需要快速检测时,可以降低图 2 中示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 的品质因数。这里,在品质因数、精确的距离调节和检测时间的相关性方面,图 2 中示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 的高品质因数能够实现精确的距离调节,但会导致扫描时间增加,因为当音叉 110 的振动降低并且音叉 110 由于外部原因而稳定时,稳定化时间 τ 满足 $\tau = Q/\omega_0$ 。

[0056] 这里, ω_0 是音叉 110 的共振频率。因此,当检测具有大面积的试样 1 或者由于试样 1 的状态变化而需要快速检测时,可以使用低品质因数。因此,图 2 中示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 可以广泛地应用于各个领域,不论试样 1 的介质特性如何。

[0057] 如上所述,在图 2 示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 中,针点式支持件 132 和刃口式秤 134 被设置为在通过粘合剂 140 与音叉 110 连接的扫描探针 120 的表面上具有预定边界条件,使得针点式支持件 132 和刃口式秤 134 的接触位置沿扫描探针 120 的自由端 124 的纵向变化,并且扫描探针 120 的固有频率可以变化。因此,音叉 110 和扫描探针 120 的固有频率的组合效应变化。可以实现其中音叉 110 和扫描探针 120 相互组合以获得最大组合效应的组合体的共振频率,使得与常规的机械连结的音叉-扫描探针振动系统相比,图 2 中示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 的品质因数可以增加 20 倍。

[0058] 图 3 中示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 处于剪切力模式,其中扫描探针 120 与音叉 110 连接,使得扫描探针 120 的纵向平行于音叉 110 的两个叉股之一的纵向,并且扫描探针 120 相对于试样 1 的表面沿水平方向振动。然而,本发明不仅限于此。图 3 中示出的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 100 可以处于轻敲模式,其中扫描探针 120 和音叉 110 相互接触的接触点 A 变化,或者扫描探针 120 与音叉 110 连接,使得扫描探针 120 的纵向垂直于音叉 110 的两个叉股之一的纵向,并且扫描探针 120 相对于试样 1 的表面沿垂直方向振动。

[0059] 图 5 和图 6 分别是主视图和侧视图,示出扫描探针连接到音叉前表面的情况,其中,扫描探针和音叉包括在根据本发明另一实施例的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 200 中;图 7 和图 8 分别是主视图和侧视图,示出扫描探针和音叉相互垂直连接的情况,其中,扫描探针和音叉包括在根据本发明另一实施例的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 300 中;图 9 和图 10 分别是主视图和侧视图,示出扫描探针连接到音叉侧表面的情况,其中,扫描探针和音叉包括在根据本发明另一实施例的机械连结的音叉-扫描探针振动系统 400 中。

[0060] 参照图 5 和图 6,机械连结的音叉-扫描探针振动系统 200 处于剪切力模式,其中扫描探针 220 与音叉 210 的两个叉股之一连接,使得扫描探针 220 的纵向和音叉 210 的叉股之一的纵向相互平行,并且扫描探针 220 相对于试样表面沿水平方向振动。在图 5 和图 6 中,扫描探针 220 未如图 2 所示那样接触音叉 210 的侧表面的下部,而是接触音叉 210 的

前表面的下部。

[0061] 图 7 ~ 图 10 分别示出根据本发明其他实施例的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 300 和机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 400。机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统的 300 或 400 处于轻敲模式,其中扫描探针 320 或 420 与音叉 310 或 410 的两个叉股之一连接,使得扫描探针 320 或 420 的纵向垂直于音叉 310 或 410 的两个叉股之一的纵向,并且扫描探针 320 或 420 相对于试样表面沿垂直方向振动。更具体地说,图 7 和图 8 示出扫描探针 320 与音叉 310 的前表面的下部连接的情况,图 9 和图 10 示出扫描探针 420 与音叉 410 的侧表面的下部连接的情况。在扫描探针 420 与音叉 410 的侧表面的下部连接的情况下,当机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统的 400 处于轻敲模式时,甚至当音叉 410 和扫描探针 420 沿垂直方向固定时,音叉 410 的叉股的振幅非常小,也就是说,等于或小于 0.4nm。因此,通过针点式支持件 332 或 432 和刃口式秤 334 或 434 可以稳定地进行动态振动控制。

[0062] 对图 5 ~ 图 10 中示出的各机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 200、300 或 400 的各音叉 210、310 或 410、各扫描探针 220、320 或 420、各刃口式秤 234、334 或 434 以及各针点式支持件 232、332 或 432 的详细说明基本上与图 2 中示出的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的音叉 110、扫描探针 120、刃口式秤 134 和针点式支持件 132 相同,因此,这里没有提供对图 5 ~ 图 10 中示出的各机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 200、300 或 400 的结构和操作的说明。

[0063] 图 11 和图 12 分别是前视图和侧视图,示出图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 检测浸泡在液体介质 2 中的试样的情况。参照图 11 和图 12,在图 2 示出的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 中,为了使用动态控制方法以光学检测浸泡在液体介质 2 中的试样,扫描探针 120 的检测尖端 122 露出音叉 110 的端部大约 3mm,使得检测尖端 122 可以插入液体介质 2 中,并且可以检测试样。这里,检测尖端 122 的长度可以根据液体介质 2 的厚度(深度)和物性而变化。在这种情况下,如图 10 所示,即使当露出的扫描探针 120 的检测尖端 122 的长度变化时,通过使用根据本发明的动态控制方法的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率的变化的形状也不发生变化。如图 9 所示,即使当检测尖端 122 浸泡在液体介质 2 中时,通过使用根据本发明的动态控制方法的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率的变化的形状也与在空气中相同。由于液体介质 2 的粘度的原因,机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统的 100 的品质因数略有下降。然而,在本实施例中,即使当扫描探针 120 的检测尖端 122 浸泡在液体介质 2 中时,机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统的 100 也具有 2800 的高品质因数。

[0064] 换句话说,常规的扫描探针显微镜的问题是,当诸如图 11 和图 12 的扫描探针 120 浸泡在诸如图 11 和图 12 的液体介质 2 中时,由于诸如图 11 和图 12 的液体介质 2 的高粘度的原因,诸如图 11 和图 12 的音叉 110 的品质因数下降,并且不能高分辨率地检测浸泡在诸如图 11 和图 12 的液体介质中的试样,这些问题在根据本实施例的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 中得以解决。在本实施例中,使用动态振动控制方法,这样,即使当扫描探针 120 浸泡在具有高粘度的液体介质 2 中时,音叉 110 也具有非常高的品质因素,并且可以高分辨率地检测浸泡在液体介质中的试样。在目前的结构中,从音叉 110 和扫描探针 120 的接触点 A 到检测尖端 122 的长度比试样在空气中的情况长约 3mm,使得扫描探针 120 可以很容易地插入液体介质 2 中。

[0065] 图 13A 和图 13B 是显示通过建造图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的音叉 110 和扫描探针 120 的模型所获得的图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率变化的理论计算的示意图。

[0066] 图 13A 显示通过建造使用动态振动控制方法的音叉 110 和扫描探针 120 的模型所获得的图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率变化的理论计算的结果,其中,通过理论上建造与实验结构相同条件的模型而导出的值来获得结果。参考图 13A,横轴代表音叉 110 和扫描探针 120 的接触点 (图 3 的 A) 与刃口式秤 134 之间的距离,纵轴代表图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率,其由刃口式秤 134 和针点式支持件 132 的位置确定。音叉 110 和扫描探针 120 的接触点 (图 3 的 A) 与针点式支持件 132 之间的距离分别按 11.0mm、11.4mm、11.8mm 和 12.2mm 的情况计算。音叉 110 和扫描探针 120 的接触点与刃口式秤 134 之间的距离按以 0.2mm 的间距从 2.0mm ~ 10.2mm 的情况计算。

[0067] 图 13B 显示通过建造使用动态振动控制方法的音叉 110 和扫描探针 120 的组合物模型所获得的图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率变化的理论计算的结果。参照图 13B,横轴代表音叉 110 和扫描探针 120 的接触点 (图 3 的 A) 与刃口式秤 134 之间的距离,纵轴代表图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率,其由刃口式秤 134 和针点式支持件 132 的位置确定。音叉 110 和扫描探针 120 的接触点 (图 3 的 A) 与针点式支持件 132 之间的距离分别按 12.6mm、13.0mm、13.4mm 和 13.8mm 的情况计算。音叉 110 和扫描探针 120 的接触点与刃口式秤 134 之间的距离按以 0.2mm 的间距从 2.0mm ~ 10.2mm 的情况计算。

[0068] 参照图 13A 和图 13B,根据刃口式秤 134 的位置而变化的图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率涉及单一模式或两种模式由针点式支持件 132 的位置确定。图 13A 中示出的四个图代表接触点 A 与针点式支持件 132 之间的距离分别是 11.0mm、11.4mm、11.8mm 和 12.2mm 的情况。图 13B 中示出的四个图代表接触点 A 与针点式支持件 132 之间的距离分别是 12.6mm、13.0mm、13.4mm 和 13.8mm 的情况。这里,当接触点 A 和针点式支持件 132 之间的距离是 12.2mm、12.6mm 和 13.0mm 时,共振频率的变化涉及两种模式。换句话说,在本发明中,当通过调节针点式支持件 132 的位置使共振频率的变化以单一模式发生时,图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率更接近于音叉 110 的固有频率。因此,图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的品质因数可以增加。当通过调节针点式支持件 132 的位置使共振频率的变化以两种模式发生时,可以主动地控制图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的低品质因数。结果表明,通过使用针点式支持件 132 和刃口式秤 134 的功能可以不同方式控制图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100。在图 13A 和图 13B 中,在约 32600Hz 部分标记的虚线代表图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的音叉 110 的固有频率。由于图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率更接近于灰色虚线,所以由于扫描探针 120 造成的音叉 110 的能量损失最小,使得可以增大图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的品质因数。因此,在本实施例中,在通过调节针点式支持件 132 的位置确定图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率的方式的数量之后,通过在新的边界条件下调节刃口式秤 134 的位置,可以精确地控制图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系

统 100 的共振频率和品质因数。

[0069] 图 14A 和图 14B 是显示比较被表达作通过建造图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的音叉 110 和扫描探针 120 的模型所获得的值的振动特性与被表达作通过实验所获得的值的振动特性的结果的示图。

[0070] 图 14A 是比较其中安装有图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的针点式支持件 132 和刃口式秤 134 的音叉 110 和扫描探针 120 的组合结构的实验振动特性与理论振动特性的示图,即在图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率涉及单一模式的情况下。横轴代表接触点 A 和刃口式秤 134 之间的距离,上图显示共振频率,下图显示音叉 110 的输出电压的振幅。矩形黑色点代表计算值,圆形空白点代表实验值。图 14A 显示由于针点式支持件 132 位置的原因,共振频率涉及单一模式的情况。

[0071] 图 14B 是比较其中安装有图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的针点式支持件 132 和刃口式秤 134 的音叉 110 和扫描探针 120 的组合结构的实验振动特性与理论振动特性的示图,即在图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率涉及单一模式的情况下。横轴代表接触点 A 和刃口式秤 134 之间的距离,上图显示共振频率,下图显示音叉 110 的输出电压的振幅。矩形黑色点代表计算值,圆形空白点代表实验值。图 14B 显示由于针点式支持件 132 位置的原因,共振频率涉及两种模式的情况。

[0072] 图 14B 是显示比较被表达作通过建造其中使用动态振动控制方法的图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的音叉 110 和扫描探针 120 的模型所获得的值的振动特性与被表达作通过实验所获得的值的振动特性的结果的示图,即在图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率涉及两种模式的情况下。

[0073] 图 15A 和图 15B 是声表面波滤波器的图像,其中通过使用图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的扫描探针显微镜来检测图像。

[0074] 图 15A 是在扫描探针显微镜中通过使用其中安装有图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的针点式支持件 132 和刃口式秤 134 的音叉 110 和扫描探针 120 的组合结构来检测的格子图案为 70nm 高的声表面波滤波器的表面形状的图像。扫描面积为 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$,并且扫描探针显微镜以 50nm 的间距沿横向方向移动。在本实施例中,根据检测结果,可以主动地控制 90 的低品质因数,使得图像的分辨率不高。

[0075] 图 15B 是在扫描探针显微镜中通过使用其中安装有图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的针点式支持件 132 和刃口式秤 134 的音叉 110 和扫描探针 120 的组合结构来检测的格子图案为 70nm 高的声表面波滤波器的表面形状的图像。扫描面积为 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$,并且扫描探针显微镜以 50nm 的间距沿横向方向移动。在本实施例中,根据检测结果,可以主动地控制 5600 的高品质因数,使得图像的分辨率很高。

[0076] 图 16A 和图 16B 是显示在扫描探针暴露于空气中和浸泡在图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的液体介质中这两种情况下的频率响应曲线和振动特性。

[0077] 图 16A 是显示在扫描探针 120 暴露于空气中和浸泡在使用图 3 示出的动态振动控制方法的图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的液体介质 2 中这两种情况下的频率响应曲线的示图,其中通过使施加到音叉 110 上的电压的振幅不变并改变图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的频率来检测的音叉 110 的输出电压的振幅。这里,通过用图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率除以频率响应曲线的半

宽来定义图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的品质因数。当扫描探针 120 在空气中时,品质因数是 4200,当扫描探针 120 浸泡在液体介质 2 中时,品质因数是 2800。

[0078] 图 16B 是显示在如图 3 所示扫描探针 120 暴露于空气中和如图 11 所示浸泡在图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的液体介质 2 中这两种情况下比较其中安装有针点式支持件 132 和刃口式秤 134 的音叉 110 和扫描探针 120 的组合结构的实验振动特征值的结果的示意图。横轴代表接触点 A 和刃口式秤 134 之间的距离,上图显示共振频率,下图显示音叉 110 的输出电压的振幅。矩形黑色点代表当扫描探针 120 处于空气中时获得的值,圆形空白点代表当扫描探针 120 浸泡在液体介质 2 中时获得的值。当扫描探针 120 浸泡在液体介质 2 中时,图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率几乎保持在相同水平,并且音叉 110 的输出电压下降。

[0079] 图 17 是显示相对于音叉 110 和扫描探针 120 的接触点与图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的扫描探针 120 的端部之间的距离变化的振动特性的示意图。在理论上建造图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的结构模型时,通过使音叉 110 和扫描探针 120 的接触点 A 与针点式支持件 132 之间的距离保持不变并将从接触点 A 到刃口式秤 134 的长度从 2mm 改变为 10.2mm 来计算图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的共振频率。图 17 中示出的三个图分别显示从接触点 A 到检测尖端 122 的距离分别为 1.5mm、2.5mm 和 3.5mm 的情况。

[0080] 参照图 17,即使当从接触点 A 到检测尖端 122 的长度变化时,共振频率变化的形状也得以保持。因此,图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的振动特性受到其中安装有针点式支持件 132 和刃口式秤 134 的那部分的很大影响,即,基于接触点 A 与检测尖端 122 相对的那部分。这意味着通过刃口式秤 134 和针点式支持件 132 可以主动地控制图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的品质因数。

[0081] 图 18A 和图 18B 分别是通过使用图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的扫描探针显微镜拍摄的声表面波滤波器在空气中的图像和声表面波滤波器在液体介质中的图像。

[0082] 图 18A 是在扫描探针显微镜中通过使用其中安装有图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 的针点式支持件 132 和刃口式秤 134 的音叉 110 和扫描探针 120 的组合结构来检测的格子图案为 70nm 高的声表面波滤波器在空气中的表面形状的图像。扫描面积为 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$,并且扫描探针显微镜以 50nm 的间距沿横向方向移动。图 18B 是在扫描探针显微镜中通过浸泡在诸如图 11 的液体介质 2 中的扫描探针 120 并通过使用音叉 110 和扫描探针 120 的组合结构来检测的格子图案为 70nm 高的声表面波滤波器在液体介质中的表面形状的图像。扫描面积为 $5 \times 5 \mu\text{m}^2$,并且扫描探针显微镜以 50nm 的间距沿横向方向移动。

[0083] 当比较图 18A 和图 18B 时,以与拍摄图 18A 所示图像时使用的分辨率相同的分辨率来检测图 18B 所示的图像。因此,图 2 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统 100 适于高分辨率地检测浸泡在液体介质 2 中的试样。

[0084] 图 19 和图 20 示出根据比较例的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统。

[0085] (比较例 1)

[0086] 图 19 示出根据比较例 1 的机械连结的音叉 - 扫描探针振动系统。根据比较例 1,在扫描探针 20c 的自由端固定在固定件 30c 上之后,音叉 10c 接触与其垂直的扫描探针

20c 的固定部分和检测尖端之间的空间,然后,通过调节音叉 10c 的位置寻找机械连结的音叉-扫描探针振动系统的最高品质因数。在这种情况下,随着音叉 10c 的位置变化,扫描探针 20c 的固有频率变化,并在预定点接近音叉 10c 的固有频率,使得音叉 10c 发生强烈的振动,并且机械连结的音叉-扫描探针振动系统的品质因数提高。然而,当音叉 10c 和扫描探针 20c 的位置被优化,然后音叉 10c 和扫描探针 20c 通过粘合剂固定时,最佳条件可能会发生变化,并且在最佳条件下相互连接音叉 10c 和扫描探针 20c 之后,不能调节机械连结的音叉-扫描探针振动系统的品质因数,该方法是通过调节音叉 10c 的位置的优化方法,因此在一般的扫描探针显微镜中不容易使用。

[0087] (比较例 2)

[0088] 图 20 示出根据比较例 2 的机械连结的音叉-扫描探针振动系统。根据比较例 2,通过熔化扫描探针 20a 到直径等于或小于 $25\mu\text{m}$ 并通过将扫描探针 20a 与音叉 10a 连接可以大幅提高机械连结的音叉-扫描探针振动系统的品质因数。然而,在这种情况下,非常难于处理扫描探针 20a,并且当扫描探针 20a 浸泡在高粘度的介质中时,可能不会平稳地发生振动。

[0089] 因此,在本发明的实施例中,接触件接触扫描探针的表面,并且根据目的接触件的位置沿扫描探针的纵向变化,使得可以主动地控制机械连结的音叉-扫描探针振动系统的品质因数。此外,音叉的位置根据音叉的固有频率变化,使得可以提高机械连结的音叉-扫描探针振动系统的品质因数。因此,可以高分辨率地检测在空气中的一般的固体试样和浸泡在诸如图 11 和图 12 的具有高粘度的液体介质 2 中的试样。

[0090] 如上所述,在根据本发明的机械连结的音叉-扫描探针振动系统中,可以获得以下效果。

[0091] 第一,机械连结的音叉-扫描探针振动系统的品质因数可以控制到与音叉的固有品质因数相比没有减少,并且与常规的机械连结的音叉-扫描探针振动系统相比,该机械连结的音叉-扫描探针振动系统具有极高的品质因数,使得可以灵敏地检测到扫描探针的检测尖端与试样表面之间的极小剪切力,并可以高分辨率地检测试样。

[0092] 第二,可以精确地检测诸如生物试样等软试样,可以检测在生命科学领域待研究的细胞、细菌或病毒的精确形状,并可以分析软试样的光学特性。

[0093] 第三,在使用针点式支持件和刃口式秤的动态振动控制方法中,可以主动和精确地控制机械连结的音叉-扫描探针振动系统的品质因数,不论试样的周边环境如何。因此,控制品质因数的范围极宽,这样可以提供比使用常规电路方法的品质因数控制更好的性能。

[0094] 第四,可以主动地控制机械连结的音叉-扫描探针振动系统的品质因数,使得可以主动地调节检测时间,并且可以选择适于试样情况和检测目的的方法,这样可以扩大机械连结的音叉-扫描探针振动系统的使用范围。

[0095] 第五,可以高分辨率地检测在空气中的试样和浸泡在液体介质中的试样,使得该机械连结的音叉-扫描探针振动系统可以广泛地用在诸如医学和生物学研究等各个领域。

[0096] 虽然已经参照示例性实施例具体地显示和说明了本发明,但本领域技术人员可以理解的是,在未脱离所附权利要求书限定的本发明精神和范围的情况下可以做出形式和细节上的各种变化。

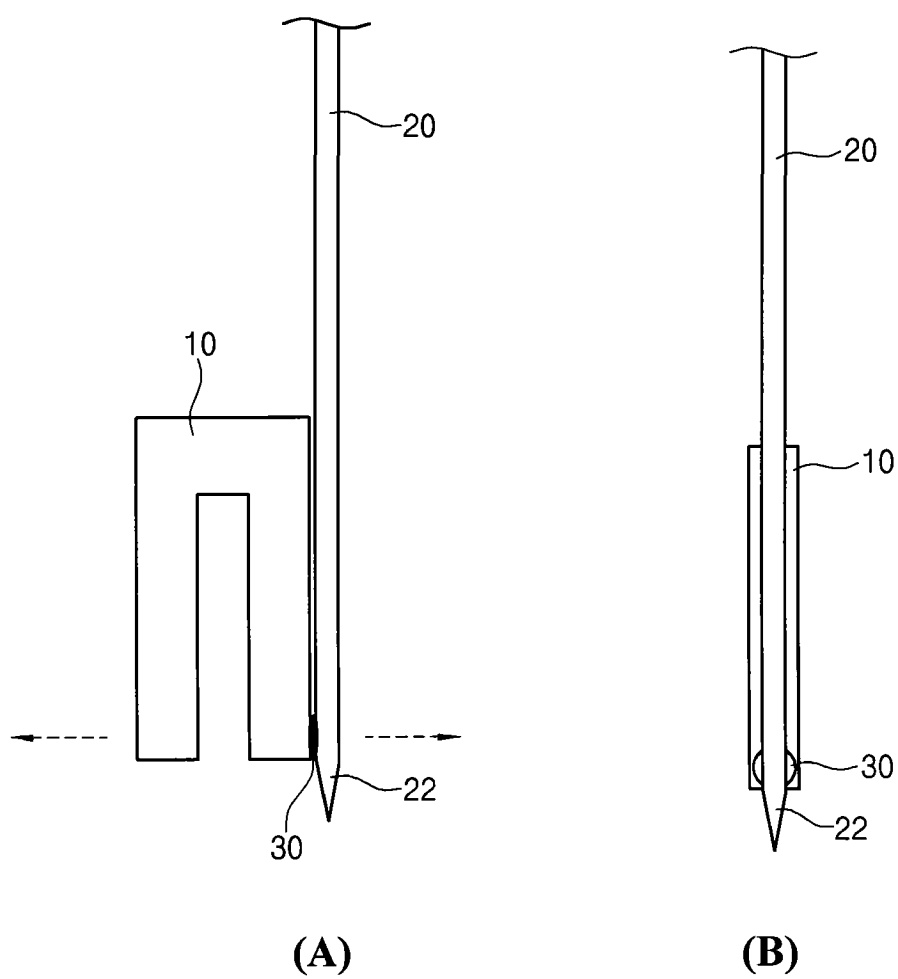


图 1

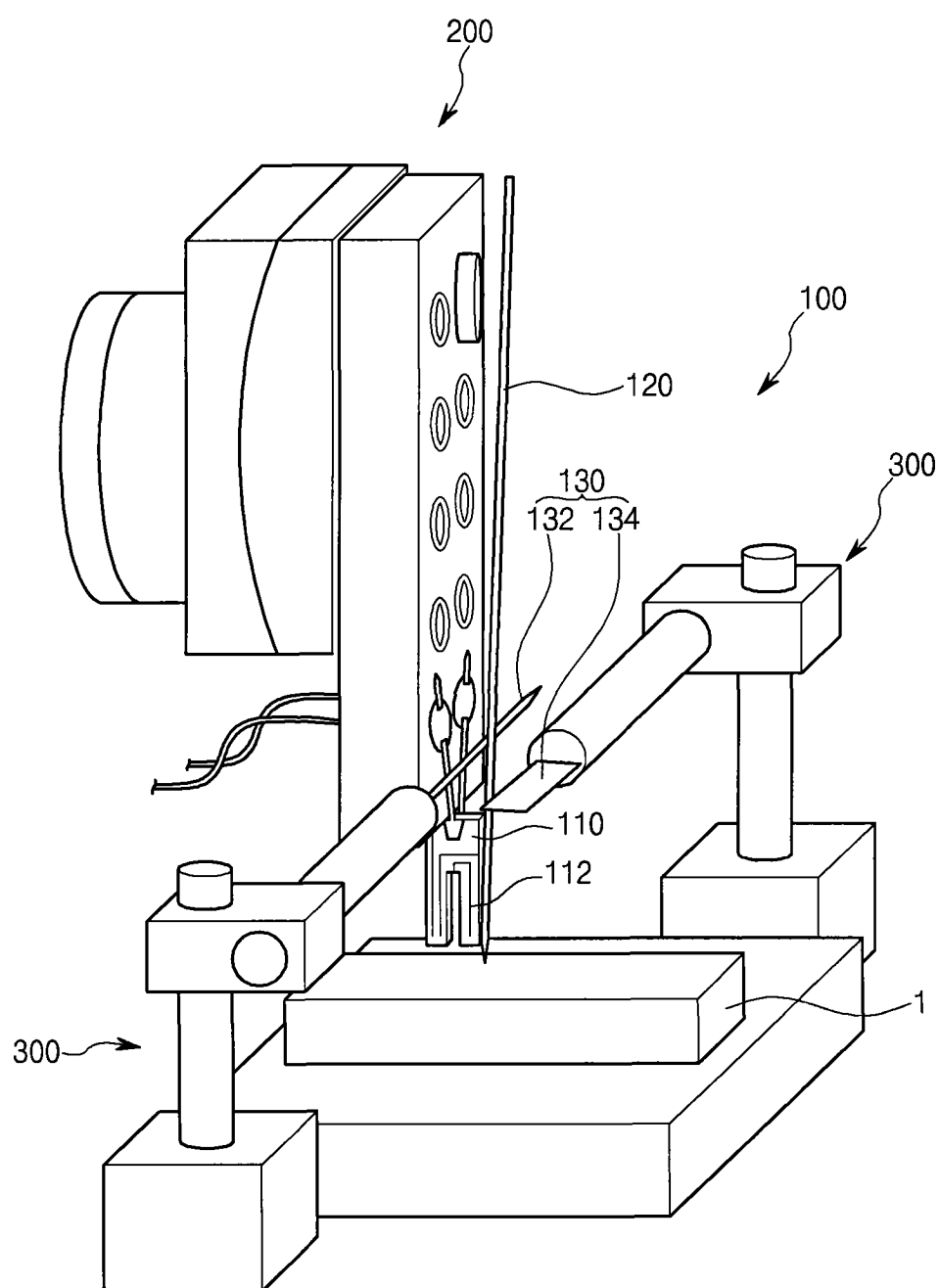


图 2

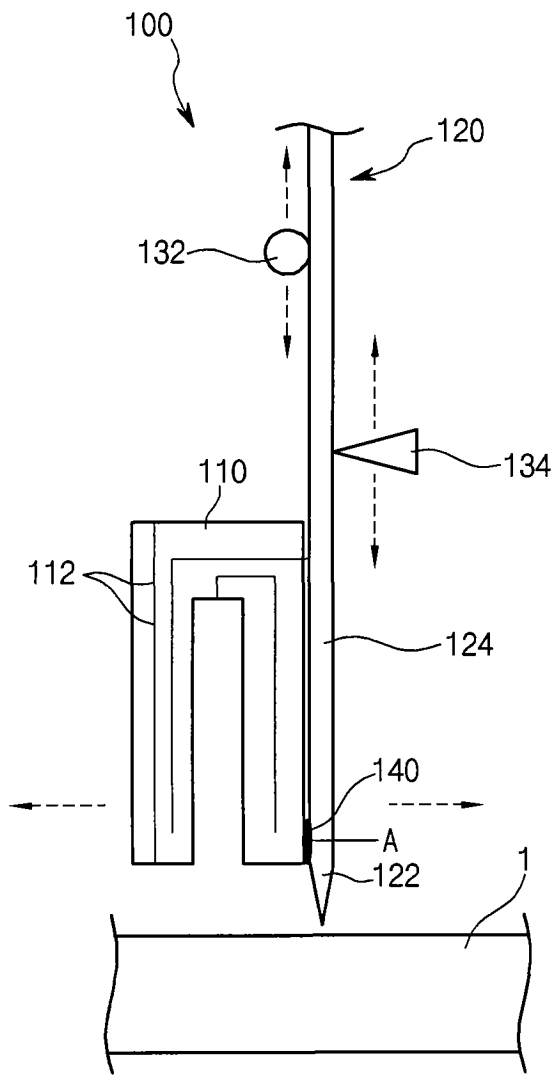


图 3

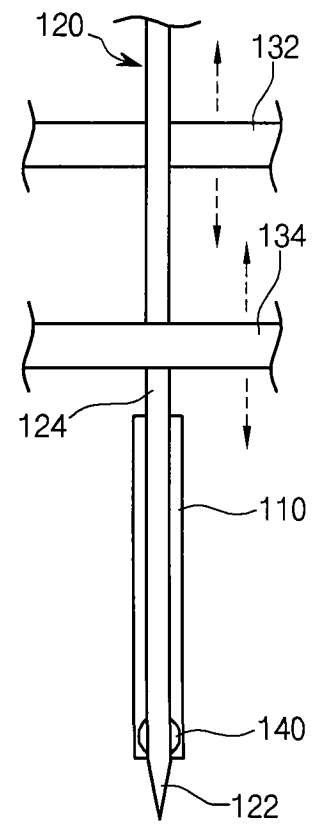


图 4

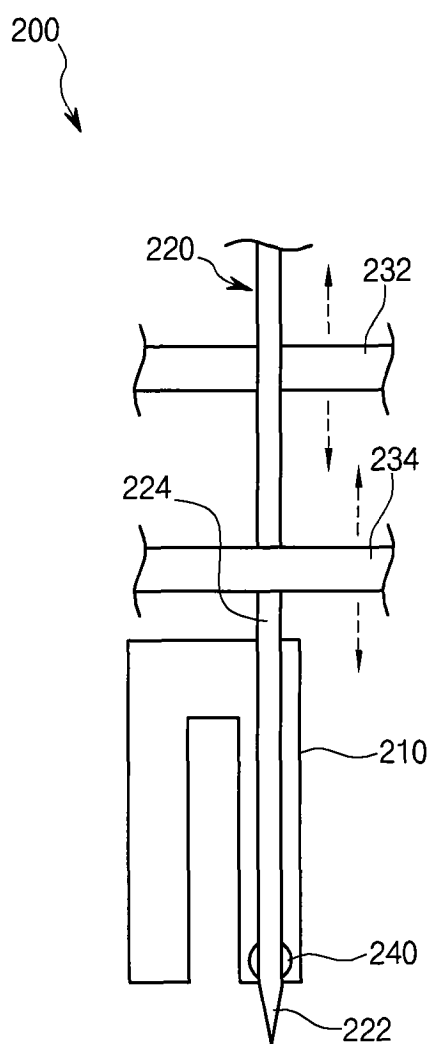


图 5

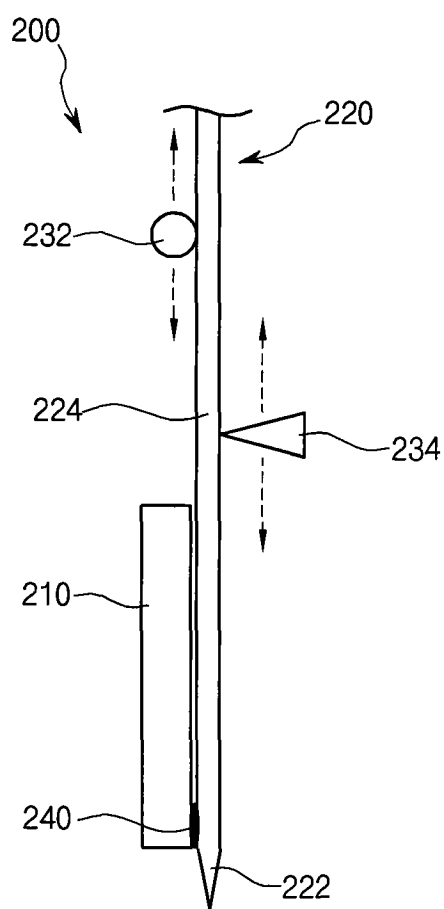


图 6

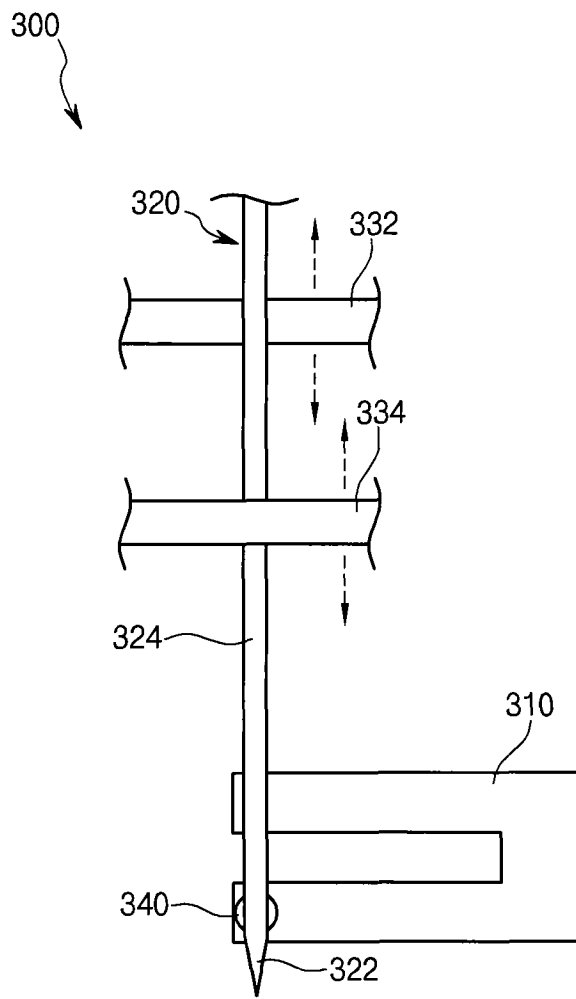


图 7

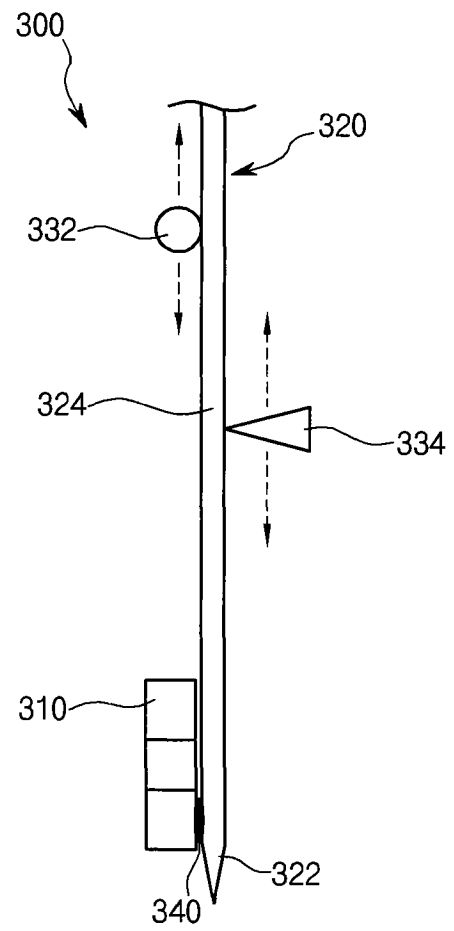


图 8

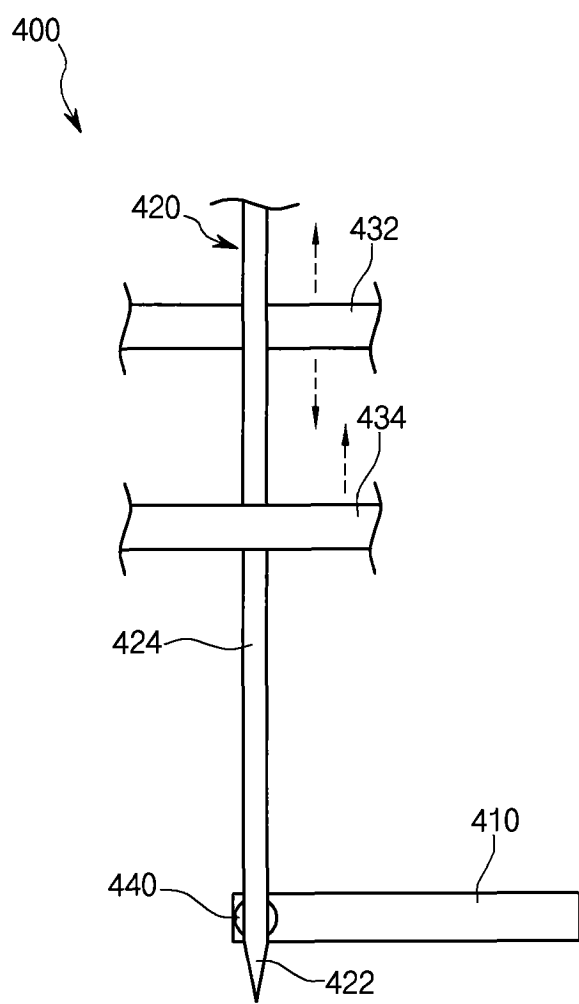


图 9

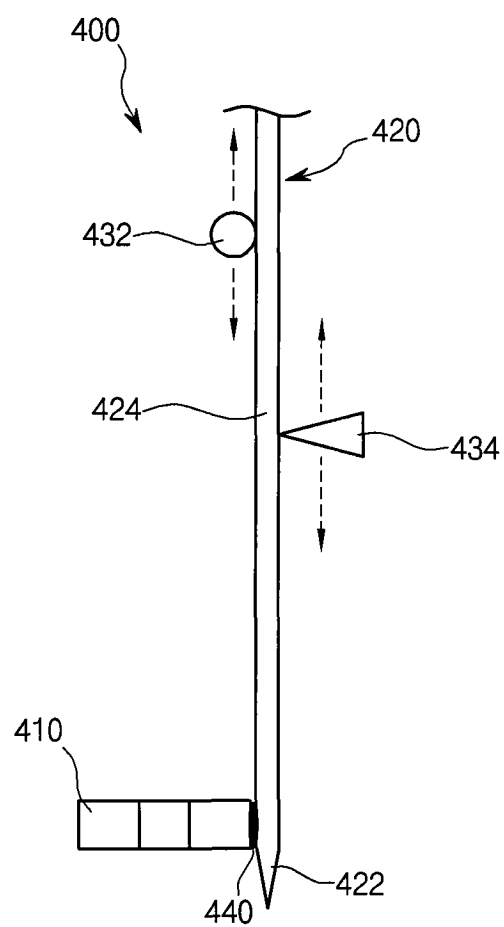


图 10

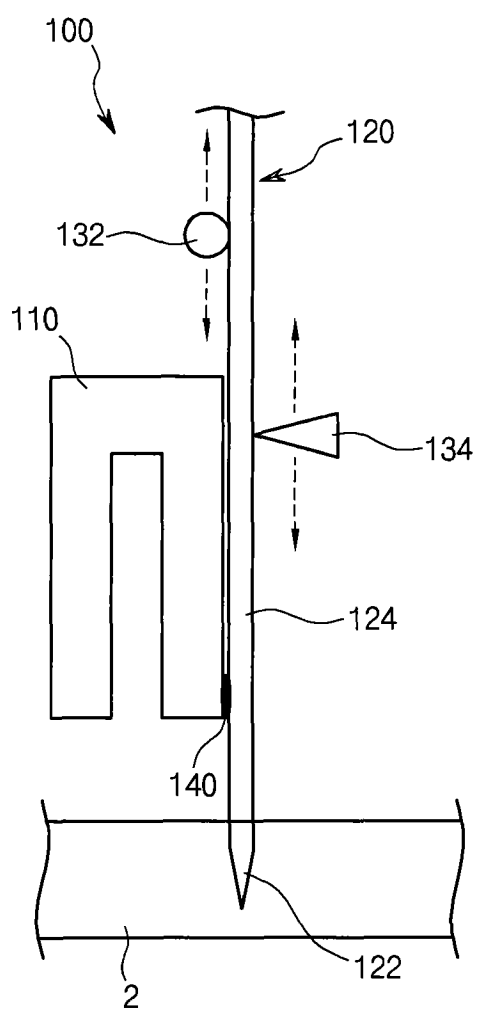


图 11

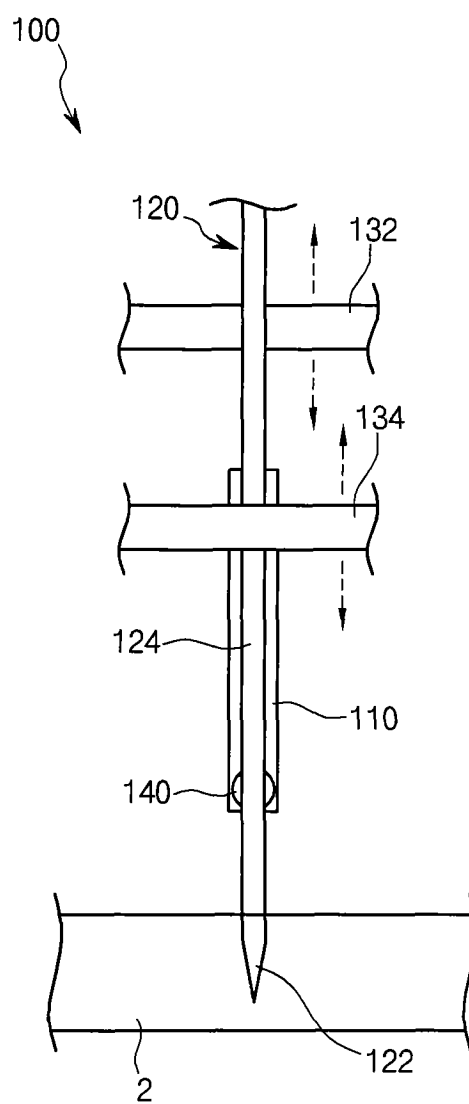


图 12

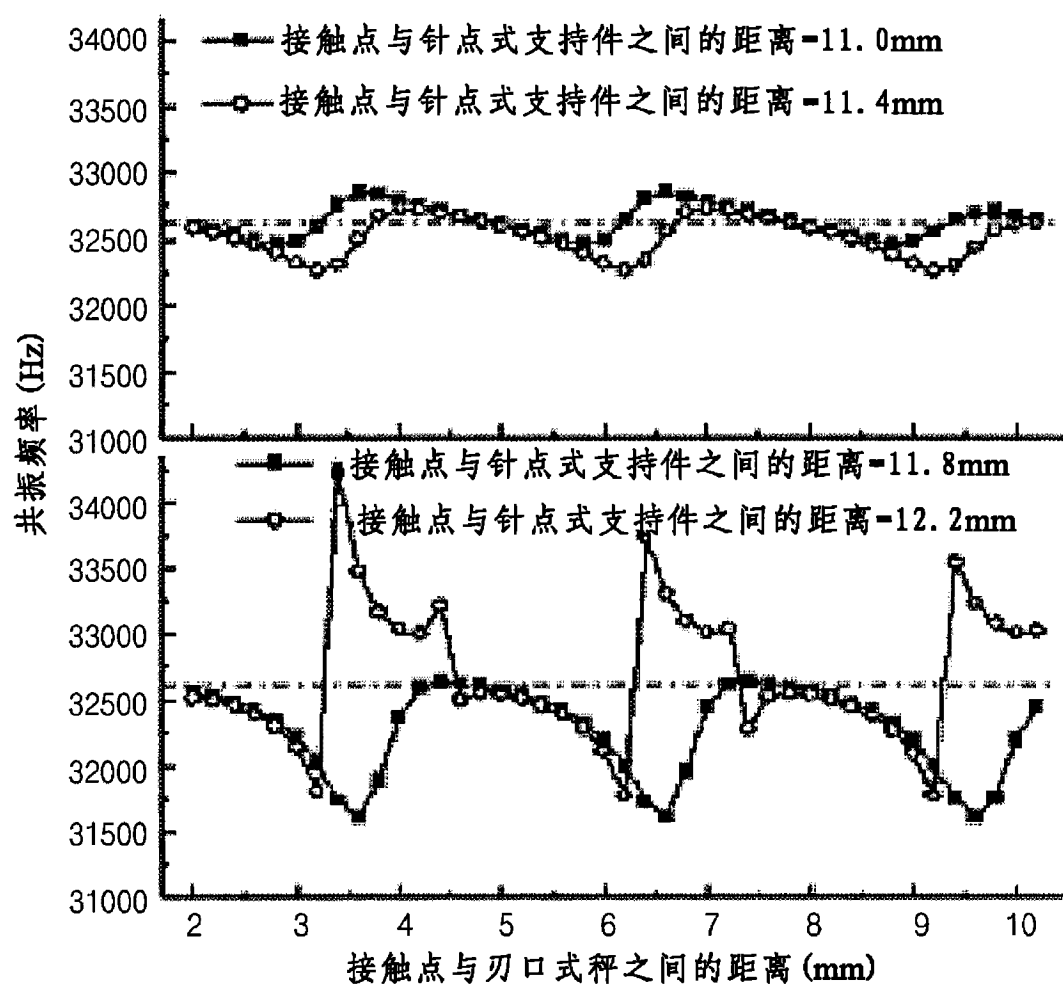


图 13A

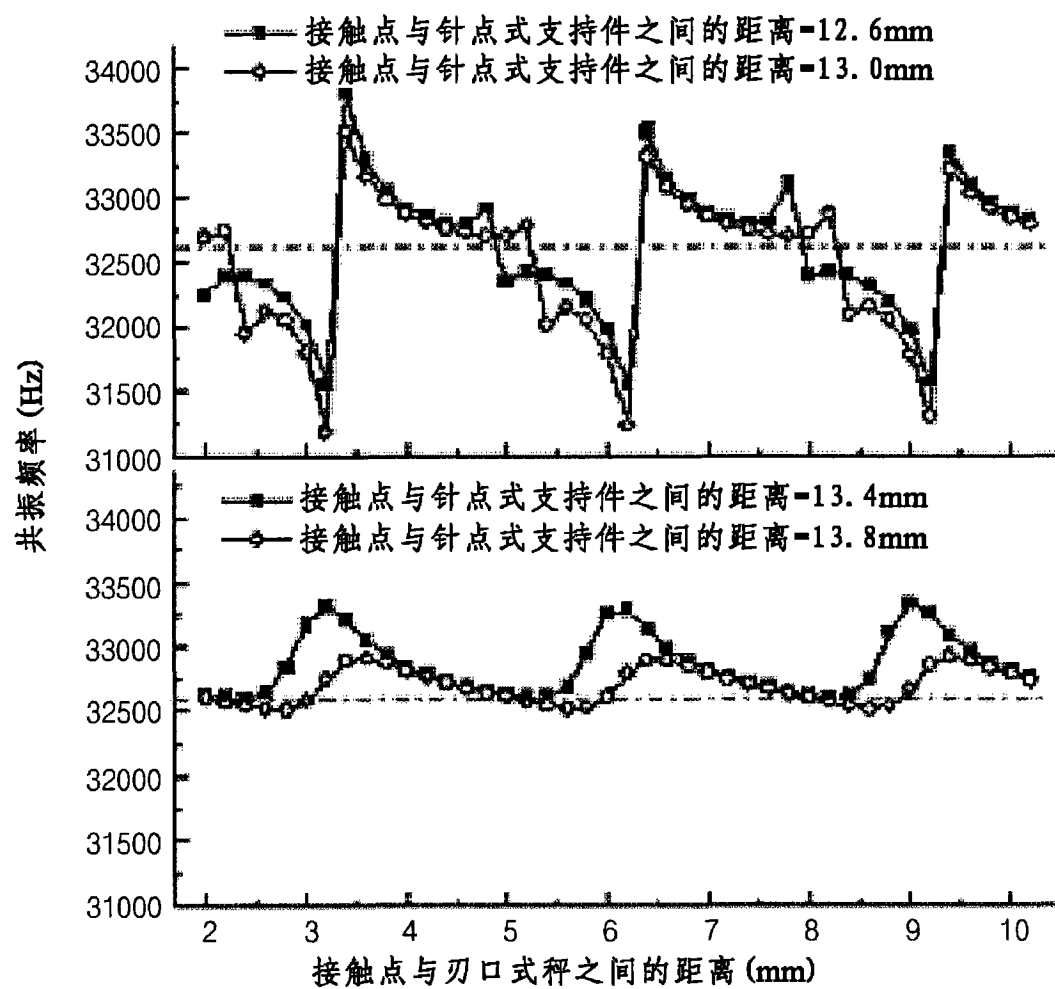


图 13B

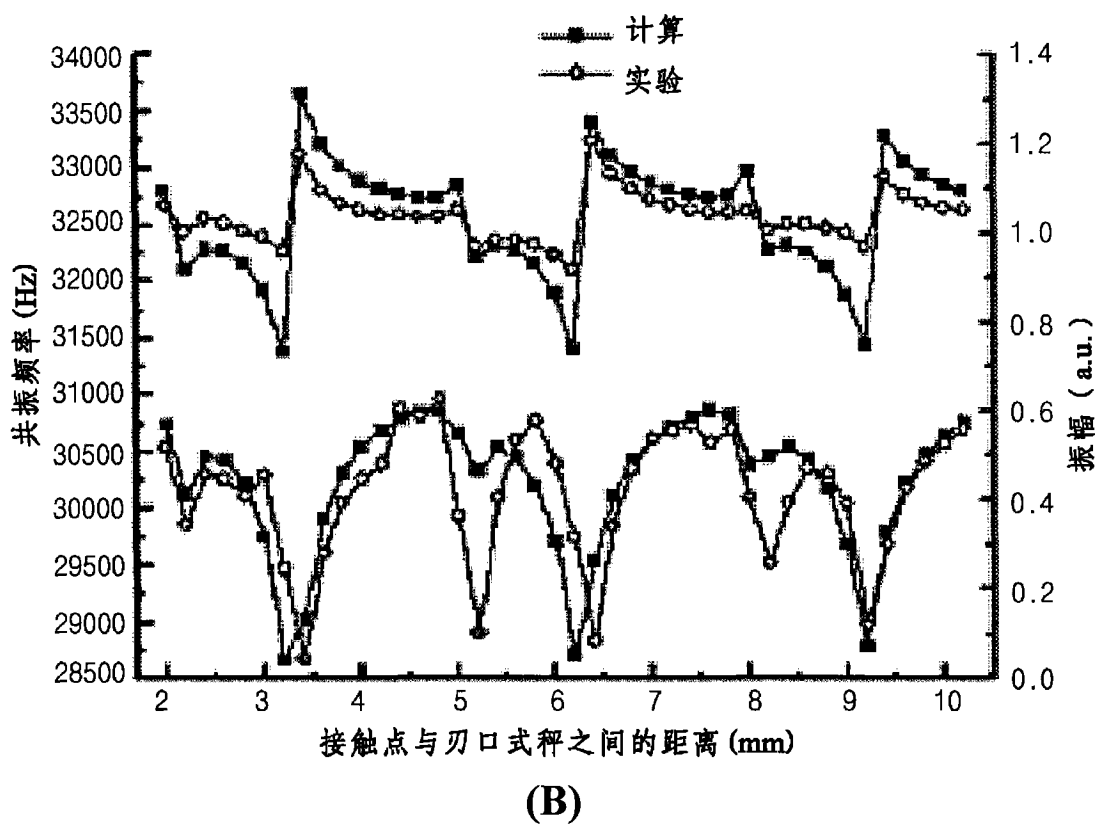
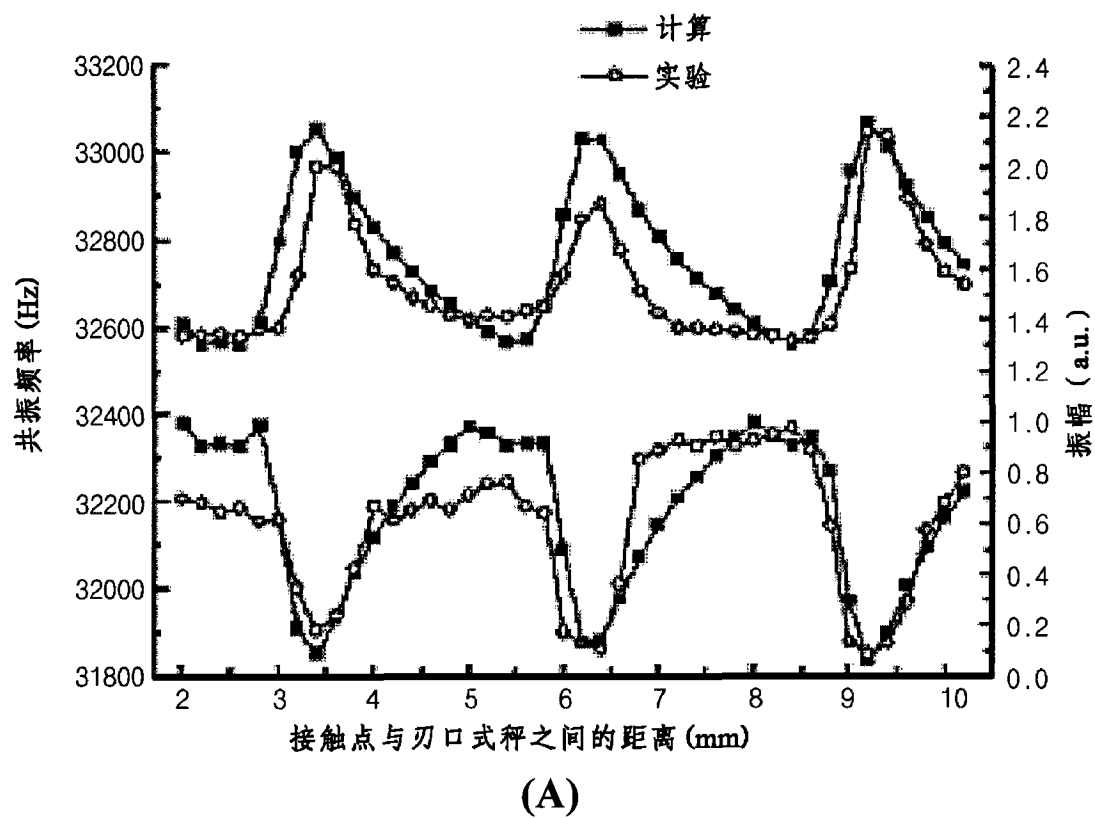
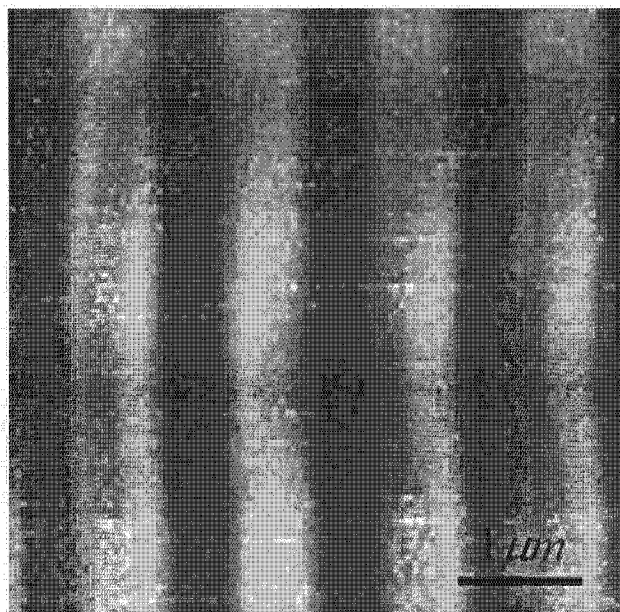
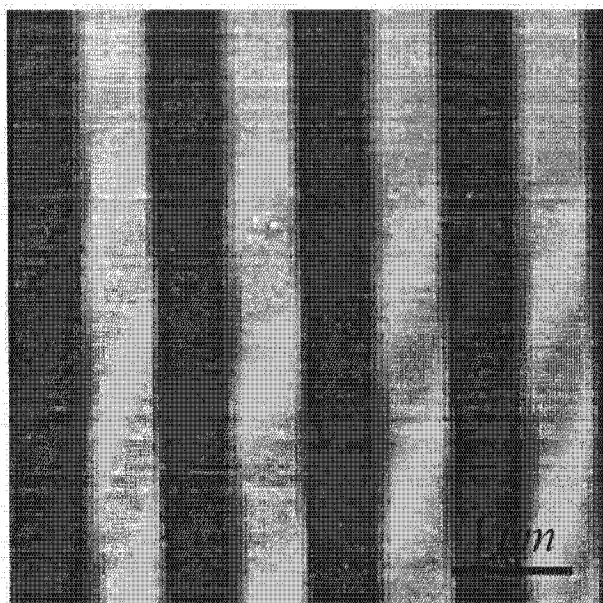


图 14

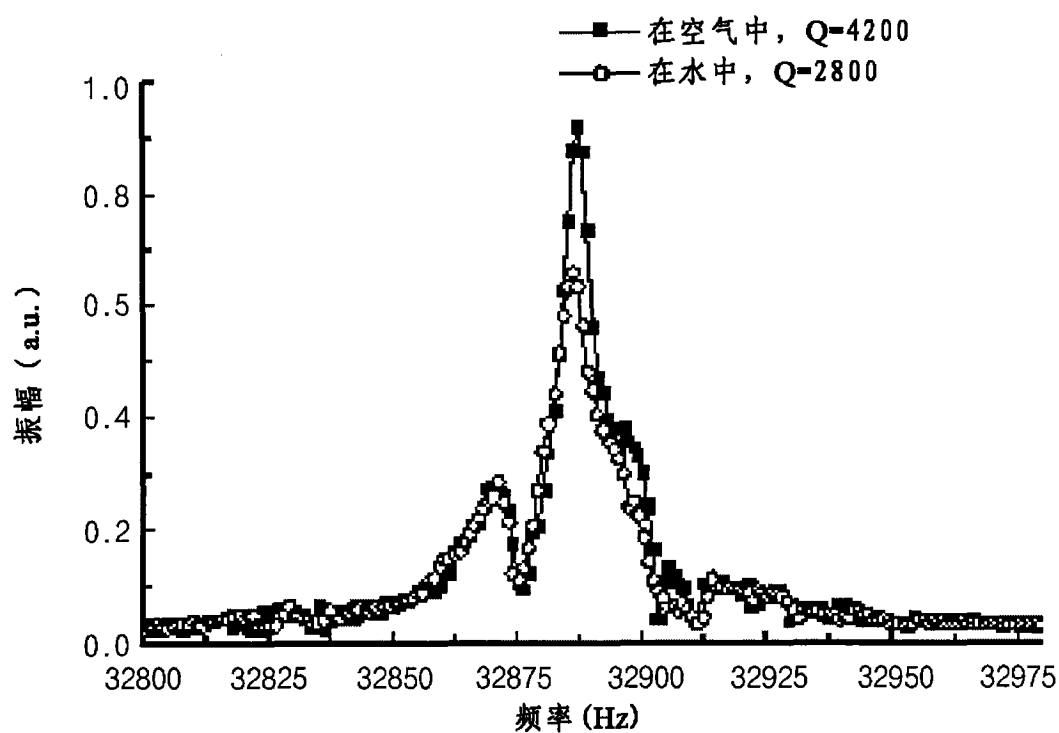
$Q = 90$ 

(A)

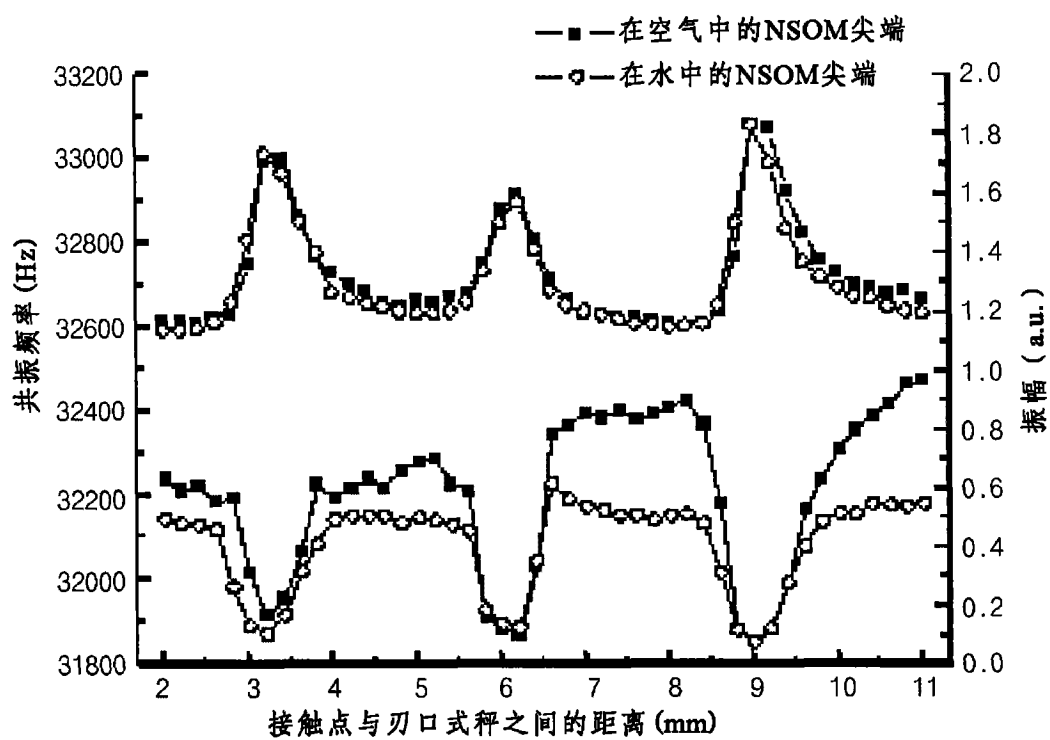
 $Q = 5600$ 

(B)

图 15



(A)



(B)

图 16

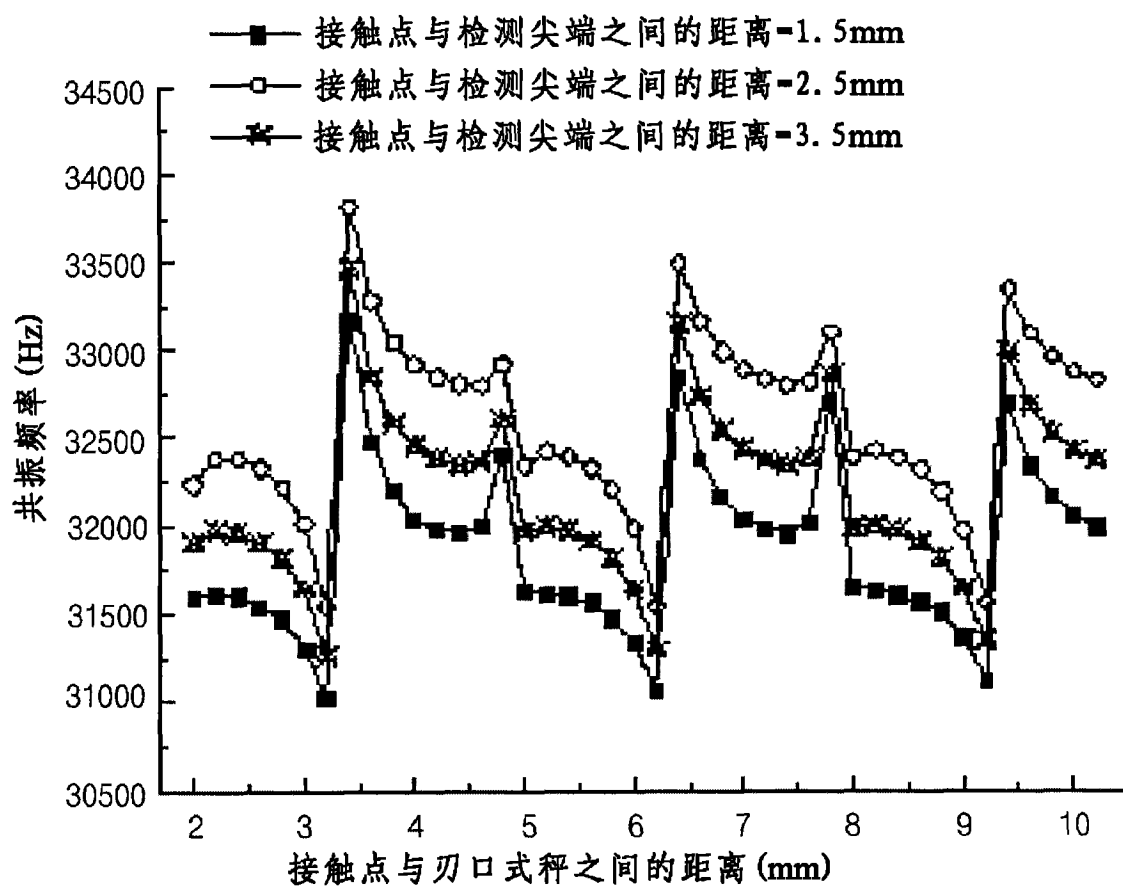
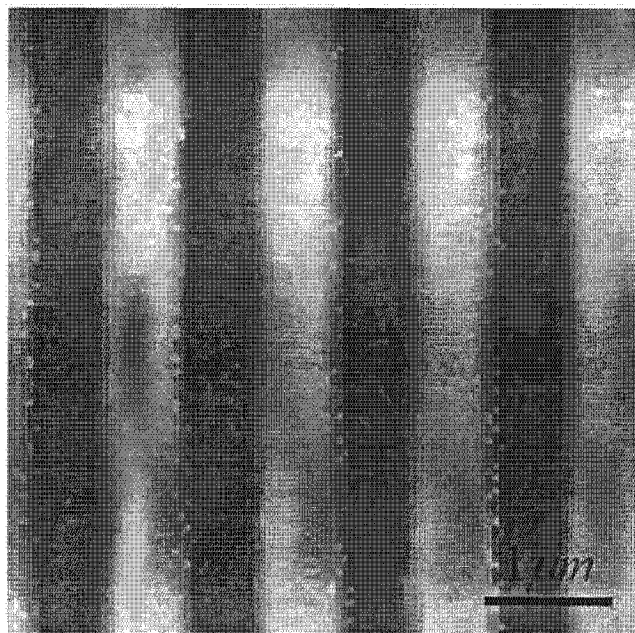


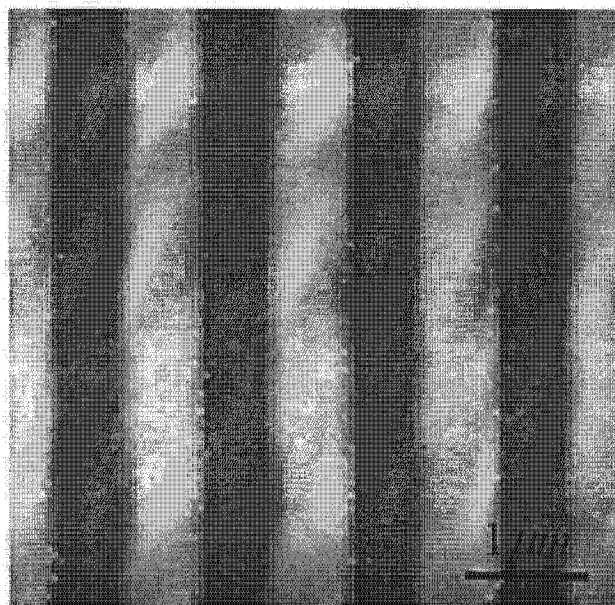
图 17

在空气中



(A)

在水中



(B)

图 18

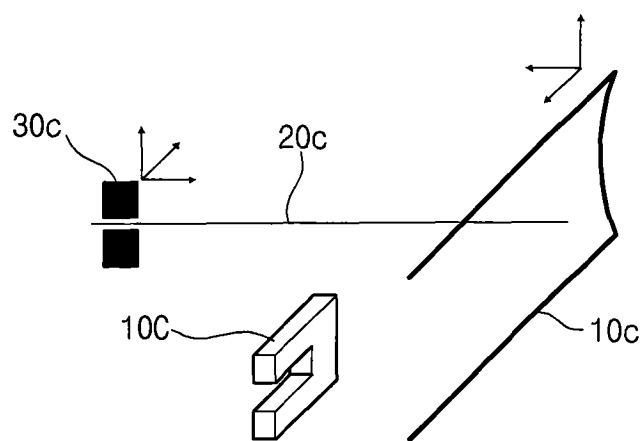


图 19

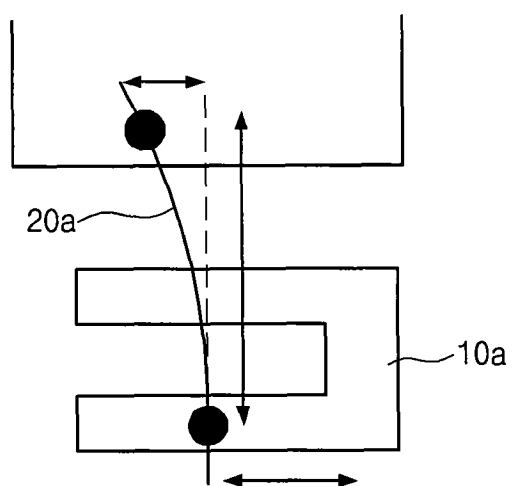


图 20