



论文

高次谐振微悬臂的有限元设计与分析

郑志月, 许瑞, 程志海*

国家纳米科学中心, 中国科学院纳米科学卓越中心和纳米标准与检测重点实验室, 北京 100190

* E-mail: chengzh@nanoctr.cn

收稿日期: 2016-01-06; 接受日期: 2016-08-02; 网络出版日期: 2016-09-26

中国科学院“引进杰出技术人才”、“卓越青年科学家”及青年创新促进会和中国科学院科研装备研制项目资助

摘要 多频原子力显微术(MF-AFM)是近些年发展的包含一大类先进原子力显微术的新技术, 具有很高的空间分辨率, 不仅可以实现更多样品物性的表征, 还具有时间分辨的非线性力的探测能力. MF-AFM 的基本原理是对微悬臂探针的多个振动频率进行激励和探测, 而这些振动频率通常与微悬臂的高次谐波振动或本征模式有关, 因此, 实现这一新技术的关键是设计特殊的微悬臂. 传统 AFM 中应用较为广泛的颇具代表性的传统微悬臂有硅微悬臂与石英音叉微悬臂等. 传统矩形硅微悬臂的二阶弯曲本征模式与基础模式的频率比为 6.27, 而石英音叉微悬臂的二阶弯曲本征模式与基础模式的频率之比无统一值, 但均为非整数, 直接利用传统微悬臂去探测高次谐振信号是非常困难的. 基于微悬臂的共振放大效应, 本文通过改变微悬臂的质量分布, 讨论了传统硅微悬臂和石英音叉微悬臂本征模式的变化, 调谐其高阶本征模式与基础模式间频率的耦合关系. 通过理论计算和有限元分析, 设计了二阶弯曲本征模式与基础模式的频率比为整数倍关系的特殊硅微悬臂与石英高次谐振型微悬臂, 部分特殊微悬臂还涉及了一阶扭转模式与基础模式的耦合.

关键词 多频原子力显微术, 微悬臂, 高阶模式, 高次谐振, 有限元分析

1 引言

纳米技术是一门多学科交叉的前沿科学, 当今学界公认的纳米技术的定义为: 在纳米尺度上(1~100 nm)研究物质(包括原子、分子的操纵)的特性和相互作用, 以及如何利用这些特征和相互作用的具有多学科交叉性质的科学和技术. 原子力显微镜(AFM)自 1986 年发明以来, 其凭借检测对象广泛、适应环境强及超高的分辨率等优势成为纳米技术研究和加

工制造生产中最重要工具, 被广泛运用于生命科学、半导体计量、纳米制造、数据存储和材料科学等领域^[1]. 根据原子力显微镜的测量模式, AFM 分为静态测量和动态测量(振幅调制和频率调制), 其中振幅调制的动态测量模式是最为主流的测量技术. 传统的振幅调制原子力显微镜的基本原理, 是对微悬臂施加单一频率的激励, 其频率大小通常为微悬臂的一阶弯曲共振频率或附近, 检测激励频率下的微悬臂振荡振幅, 在扫描样品的过程中通过反馈系统维

引用格式: 郑志月, 许瑞, 程志海. 高次谐振微悬臂的有限元设计与分析. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 1086–1096
Zheng Z Y, Xu R, Cheng Z H. Design and analysis of higher harmonic cantilever based on finite element analysis (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 1086–1096, doi: 10.1360/N092016-00013

持微悬臂振幅的恒定实现对样品的表征. 振幅调制 AFM, 一方面由于基础本征模式的光学灵敏度与静态模式接近, 校准过程非常方便; 另一方面, 在获得高分辨的同时在扫描范围和样品方面具有灵活的适应性. 然而由于针尖与样品间的相互作用力是非线性的, 微悬臂除基频下的主振动外还包含有许多微弱的高次谐振成分, 重要的是最能深层反映样品纳米属性的信号正是这些高次谐振信号, 因此微悬臂基频外的其他频率成分的提取成为当前原子力显微技术发展的战略制高点.

近些年随着电子技术和纳米技术的快速发展, 激发了多频原子力显微术的出现, 如高次谐振成像、双模式 AFM、接触共振成像和频带激励等^[2], 极大地提高了 AFM 的空间分辨率, 在探测样品材料属性方面展现了巨大的潜能, 此外, 对于内部阻尼随本征模式减小的微悬臂, 其弛豫时间的相应减短意味着整体上更快的响应. 目前国外利用二阶、三阶, 甚至更高阶共振模式的 AFM 成像已经实现^[3]. 多频原子力显微术的基本原理是利用一个或多个频率激励微悬臂振荡, 探测其中多个或一个谐振频率, 其频率大小和悬臂自由振荡或与样品接触时的不同的本征模式有关^[2], 因此成功实现多频原子力显微术一般需要设计特殊的多频 AFM 微悬臂^[3,4]. 2004 年, 哈佛大学的 Sahin 等人^[5]通过在距离矩形微悬臂自由端的 1/3 处做一个方形孔洞, 使得基础本征模式的 16 次谐振频率与其三阶本征模式频率非常接近, 从而显著增强了 16 次谐振频率的振幅. 2007 年, Sahin 等人^[6]进一步设计了扭转谐振微悬臂, 利用非线性的针尖-表面间相互作用力激发基础激励频率的高次谐振现象, 反演了具有时间分辨的针尖与样品间相互作用力^[6~9]. 另外, 也有人利用高次谐振来探索样品物性的成像或空间分辨率的提高, 这些工作的核心都是谐振与本征模式的耦合. 因此, 本文中, 分别讨论和分析了传统矩形硅微悬臂和石英微悬臂的几何质量分布与其本征模式频率间的关系, 设计了不同类型的高次谐振型微悬臂.

2 基础原理

对于微悬臂, 首先必须明确两个重要的定义, 微悬臂的本征模式是其运动方程的独立解, 而谐振是悬臂梁振动的组成部分之一, 其频率是激励频率的

整数倍($\omega_n = n\omega$)^[4], 振幅随其谐振次数衰减. 高次谐振的产生与作用在针尖上的非线性力有关, 且在大多数情况下, 这些非线性力不能线性化. 虽然高次谐振部分很常见, 但由于在大气环境的弱成像实验条件下, 基频振荡($n=1$)的振幅比任何高次谐振的振幅高 2~3 个数量级^[10], 一般被忽略不计, 而在液体环境下高次谐振部分会得到增强, 因此需要通过设计特殊微悬臂来实现高次谐振信号的增强, 从而提高高次谐振信号探测的信噪比, 实现高分辨成像.

图 1(a)展示了一个传统矩形硅微悬臂探针, 对针尖与样品间非线性相互作用力的描述, 需要建立振动微悬臂探针系统的运动方程. 涉及到三维连续物体在短程作用力和长程作用力下的运动, 求解其在针尖-表面间相互作用力下的运动方程相当困难, 因此将微悬臂探针近似简化为矩形悬臂梁可以大大简化上述问题求解(图 1(b)). 对于矩形微悬臂梁, 欧拉-伯努利方程描述的是其在无阻尼情形下沿长轴方向的偏转, 而描述外界作用力施加在其自由端的连续均匀微悬臂梁需要对方程进行改进, 方程中针尖被近似认为一个点, 其质量和形状对系统在介质(空气、液体或真空)中运动的影响均忽略不计^[5]. 改进方程如下:

$$EI \frac{\partial^4}{\partial x^4} \left[w(x, t) + a_1 \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} \right] + \rho W h \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} = -a_0 \frac{\partial w}{\partial t} + \delta(x-L) [F_{\text{exc}}(x, t) + F_{\text{ts}}(d)], \quad (1)$$

式中, E , ρ 和 I 分别为杨氏模量、质量密度和面积惯性矩; L , W 和 h 分别是微悬臂梁的长度、宽度和厚度;

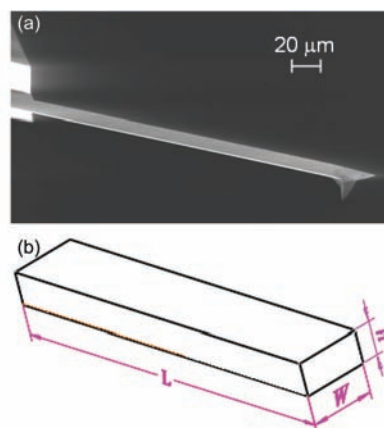


图 1 (网络版彩图)矩形微悬臂探针的扫描电子显微镜照片(a)和简化微悬臂探针的几何结构(b)

a_0, a_1 分别表示微悬臂的外部、内部耗散系数; $F_{\text{exc}}(x, t)$ 是激励力; 函数 $\delta(x-L)$ 表示针尖-表面间相互作用力仅施加在微悬臂梁端部的针尖上; $F_{\text{ts}}(d)$ 代表所有的针尖-表面间相互作用力; $w(x, t)$ 是微悬臂偏转的空间分布, x 是微悬臂沿其长轴方向的空间坐标(图 2), $d=z+z_c+w(L, t)$ 表示瞬时的针尖-表面间距离, z 是瞬时的微悬臂探针偏转, z_c 是平均针尖-表面间距。

求解改进的欧拉-伯努利方程获得悬臂的本征模式或(弯曲)共振(表 1)。矩形悬臂梁不同模式的本征频率可以通过下式进行计算^[11,12], 其传递函数如图 3 所示。

$$f_n = \frac{\lambda_n^2 h}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho}}, \quad (2)$$

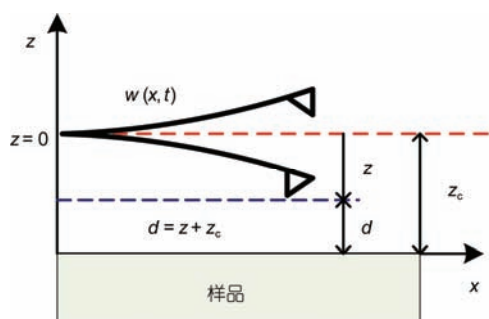


图 2 (网络版彩图)相关距离含义的示意图

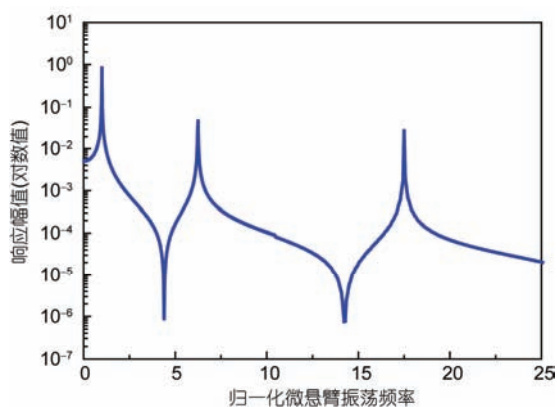


图 3 (网络版彩图)标准矩形微悬臂的传递函数图

表 1 矩形微悬臂前 3 阶本征模式的共振频率、力常数及品质因数

本征模式	频率	力常数	品质因数
n	$\omega_n = (\lambda_n / \lambda_1)^2 \omega_1$	$k_n = (\omega_n / \omega_1)^2 k_1$	$Q_n = (\omega_n / \omega_1) Q_1$
1	$\omega_1 = \omega_0$	k_1	Q_1
2	$6.27\omega_0$	$39.31k_1$	$6.27Q_1$
3	$17.55\omega_0$	$308k_1$	$17.55Q_1$

式中, E, ρ 分别为材料的杨氏模量、质量密度; L 和 h 分别是微悬臂梁的长度和厚度; λ_n 是与振荡模式有关的系数, $\lambda_1=1.88, \lambda_2=4.69, \lambda_3=7.86$ 。

由表 1 可知, 传统微悬臂的高阶弯曲振荡与一阶弯曲振荡的本征频率之比为非整数, 同时高阶本征模式的有效力常数大于基础模式, 较大的力常数可以使高阶模式的成像避免针尖被表面吸引力“陷进”表面的情况, 同时有利于使用小振幅成像, 实现更高的空间分辨率。

对于大多数实验条件, 微悬臂的偏转方程可近似表示为

$$z = z_0 + A \cos(\omega t - \phi), \quad (3)$$

式中, A, z_0, ϕ 分别是幅值, 悬臂的静态偏转及相对于激励的相位偏移。但由于相互作用力的非线性激发了探针运动的高次谐振现象, 因此在针尖运动的频谱范围内包含有高次谐振成分, 其振荡频率等于基础频率的整数倍($n\omega$), 则微悬臂的偏转应表示为

$$z = z_0 + \sum_{n=1}^N A_n \cos(n\omega t - \phi_n), \quad (4)$$

式中, A_n 分别是具有角频率 $n\omega$ 谐振下的幅值。式(3)和(4)均是由悬臂的点质量模型推导而得出, 不同的是, 式(3)忽略了多频特性, 而式(4)近似考虑了高次谐振。若考虑微悬臂的扩展特性, 更精确地描述悬臂探针系统的所有本征模式的贡献, 如下式:

$$z = z_0 + \sum_{j=1}^M q_j(t) = z_0 + \sum_{n=1}^N A_n \cos(n\omega t - \phi_n). \quad (5)$$

谐振的幅度是针尖样品间相互作用力对谐波的卷积。首先, 将上述偏转 z 的表达式(5)代入微悬臂的运动方程(式(1)), 将代入后得到的方程乘以 $\cos(n\omega t - \phi_n)$ 和 $\sin(n\omega t - \phi_n)$, 然后对一个振动周期进行积分。

在幅度调制 AFM 中, 高次谐振可以被表示为

$$A_n = S \frac{\omega_0}{k} \times \sqrt{\left(\int_0^T F_{\text{ts}}(d) \cos(n\omega t) dt \right)^2 + \left(\int_0^T F_{\text{ts}}(d) \sin(n\omega t) dt \right)^2}, \quad (6)$$

$$S \approx \frac{1}{\pi n^2}, n > 3. \quad (7)$$

在频率调制 AFM 中, 高次谐振可以被描述为

$$A_n = \frac{2}{\pi k} \frac{1}{1-n^2} \int_{-1}^1 F_{ts}^n(z_c + z_0 + A_w) \frac{T_n(u)}{\sqrt{1-u^2}} du, \quad (8)$$

式中, $T_n(u)$ 是 n 阶第一类切比雪夫多项式, 且 $u = \cos \omega t$, z_c 是悬臂的平均位置.

理论分析展示了高次谐振的幅值以 $1/n^2$ 的速率衰减, 当振荡幅度处于短程力范围内时, 高次谐振与高阶力梯度成比例. 偏转信号中的高次谐振的存在, 可以实现在微秒时间范围内样品的动态测量. 如果高次谐振频率靠近某个本征共振频率, 由于本征模式的存在, 频谱响应在其附近被调制, 基于共振放大效应, 高次谐振的振幅相对于其附近的高次谐振会显著增强, 表现了激励悬臂本征模式的有效驱动力. 例如, 对于均匀的矩形硅悬臂梁, 其二阶本征模式的频率 ($\omega_2 = 6.27\omega_0$) 非常靠近其基频的 6 次谐振 ($6\omega_0$). 高次谐振成像或高阶模式成像比传统原子力显微术成像颇具优势, 因此, 需要设计特殊的悬臂调谐本征模式和高次谐振, 使得高阶模式的频率与基础本征模式为整数倍关系.

3 仿真分析

悬臂梁的质量分布变化会改变其本征频率, 因此通过改变微悬臂的几何结构, 调谐其质量分布可以实现高次谐振型微悬臂探针的设计, 当然, 可将这种改变只限制在特定的弯曲本征模式, 亦可考虑扭转模式. 本文中仅对原子力显微镜传统矩形微悬臂进行了探索, 其前三阶弯曲本征模式的振荡形式如图 4 所示. 通过 ANSYS^[13,14] 有限元软件, 分析和研究了微悬臂的几何模型对悬臂前两阶弯曲共振频率及一阶扭转模式频率的影响, 实现了高次谐振型特殊

悬臂结构的设计.

3.1 高次谐振型硅悬臂探针的设计

AFM 中最常用的微悬臂当属矩形硅微悬臂, 因此从常用的矩形硅微悬臂为起始点, 改变其几何形状, 调谐质量分布, 通过有限元的模态分析和谐响应分析, 获得不同几何形状下微悬臂的本征模态和频率响应, 最后实现高次谐振微悬臂的设计.

3.1.1 单悬臂

所谓改变微悬臂的几何形状(调谐质量分布)的方式主要包括在悬臂梁上切除和增加质量两种实施方式, 如在微悬臂上开一个孔或直接在微悬臂的前端切除部分质量块, 或通过增大微悬臂的几何尺寸实现增加质量从而进行调谐等.

普通矩形硅微悬臂的前两阶本征模式分别为一阶弯曲和二阶弯曲共振模式, 其频率之比 f_2/f_1 为 6.27 倍. 根据实验室现有的某普通商业矩形硅悬臂, 首先通过在微悬臂上切除质量块来进行前两阶弯曲共振模式频率间的调谐. 基于有限元仿真分析与聚焦离子束(FIB)微纳加工技术的结合, 获得了一个开孔的高次谐振微悬臂(图 5(a)), 并通过锁相放大器(Zurich Instruments, HF2LI)进行了扫频测试, 结果如图 5(b)所示, 调谐后微悬臂探针的一阶、二阶弯曲共振频率分别约为 54.6 和 327.8 kHz, 频率之比为 6.004.

进一步, 通过增加微悬臂的质量来探索高次谐振微悬臂的设计, 硅的杨氏模量为 156.67 GPa, 文中采用的矩形微悬臂的几何模型尺寸为 $200 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ (下文相同原始模型). 基于矩形悬臂梁理论, 逐渐增大悬臂的厚度, 其本征频率 f_1, f_2 呈线性增大, 而 f_2/f_1 逐渐减小(图 6(a)和(b)). 当厚度增大至 $10 \mu\text{m}$ 时, 悬臂的弯曲本征模式与前两个理论模态不再对应, 二阶弯曲振型变为第三个理论分析模态. 由此可

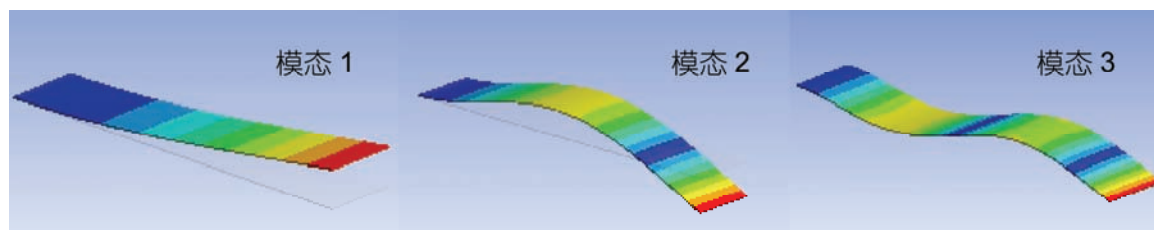


图 4 (网络版彩图)矩形微悬臂的一阶、二阶、三阶弯曲振荡模式

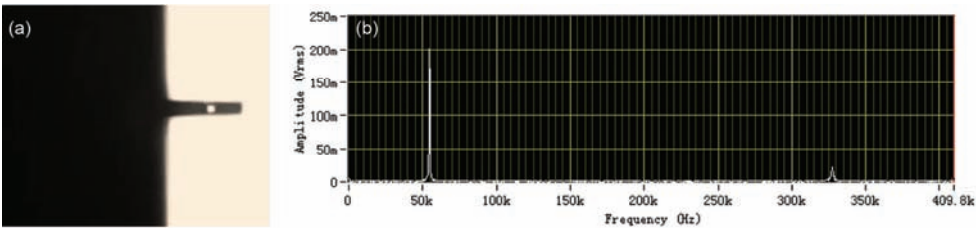


图 5 (网络版彩图)高次谐振微悬臂实物图(a)及实验结果(b)

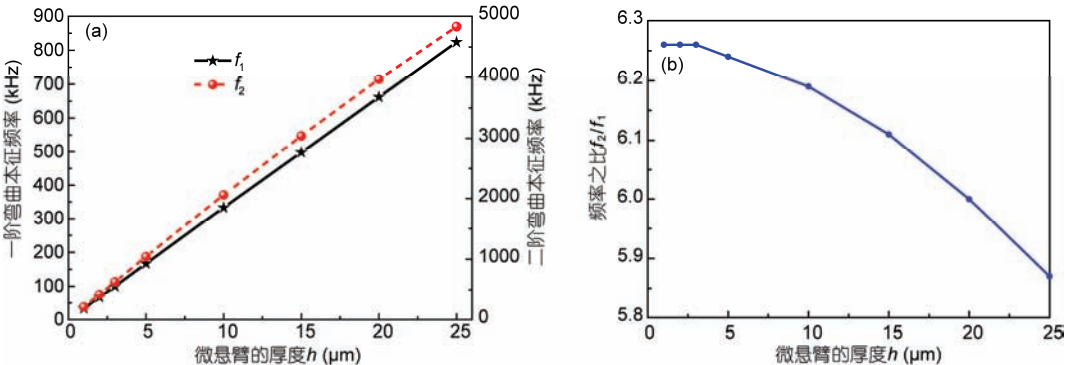


图 6 (网络版彩图)悬臂的厚度变化对弯曲振动频率的影响

以看出,当微悬臂的几何尺寸达到一定值后,除了本征频率的变化,对应的理论模态也会发生变化.继续增大悬臂厚度,当厚度约为 20 μm 时,一阶本征弯曲频率为 662.08 kHz,二阶本征弯曲频率为 3.971 MHz,二者频率之比为整数倍 6(图 6(b)).

微悬臂形状的变化会导致其传递函数也发生变化,传统矩形微悬臂和调谐后矩形微悬臂的传递函数(图 7).从图 7 中可以看出,当悬臂厚度为 20 μm 时,调谐了二阶本征模式与基础模式的频率之比为整数倍 6,但由于微悬臂调谐后的厚度比初始厚度大很多,则在同样的实验条件下其共振响应的幅值会明显的降低,同时会改变悬臂的其他技术指标,导致无法正常使用.

3.1.2 双悬臂

(1) 台阶型谐振微悬臂

基于上述原始微悬臂尺寸设计双悬臂模型,简化的几何模型如图 8 所示.保持传统微悬臂的宽度恒定,两微悬臂长度为 $l_1=l_2=100\text{ }\mu\text{m}$,自由端悬臂厚度 $h_2=1\text{ }\mu\text{m}$,改变固定端厚度 h_1 .当固定端厚度 h_1 变化时,双悬臂的厚度比 h_2/h_1 变化,讨论其对一阶弯曲和二阶弯曲本征模式的频率及频率比 f_2/f_1 的影响.

当双悬臂厚度均为 1 μm 时,等效于传统矩形悬

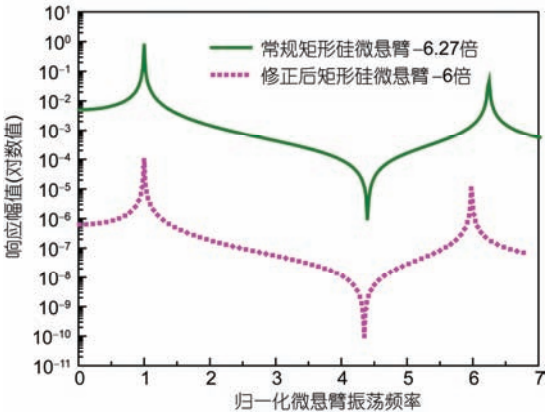


图 7 (网络版彩图)常规矩形微悬臂和高次谐振矩形硅微悬臂的传递函数

臂,悬臂的一端固定,另一端自由,其一阶弯曲振荡频率为 33.115 kHz,二阶弯曲振荡频率为 207.51 kHz,二阶与一阶之比为 6.27 倍.改变固定端悬臂的厚度 h_1 ,悬臂二阶弯曲振荡与一阶弯曲振荡的频率之比的变化(图 9(a)),其比例关系在 3~10 范围内可调,根据微悬臂的适用环境和实验条件,其结构厚度比的合理区间应在 0.25~1 范围内.当两悬臂厚度比约为 0.33 时,二阶与一阶频率之比约为 3.26,达到最小值.当厚度比为 0.59 时,基础模式的频率为 66.228 kHz,

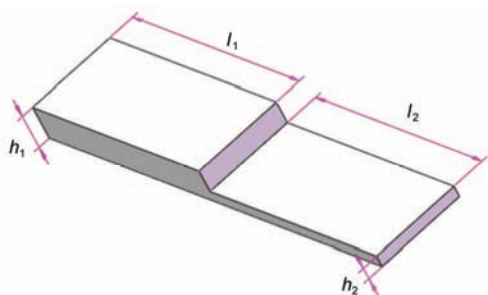


图 8 (网络版彩图) 高次谐振型双悬臂设计示意图

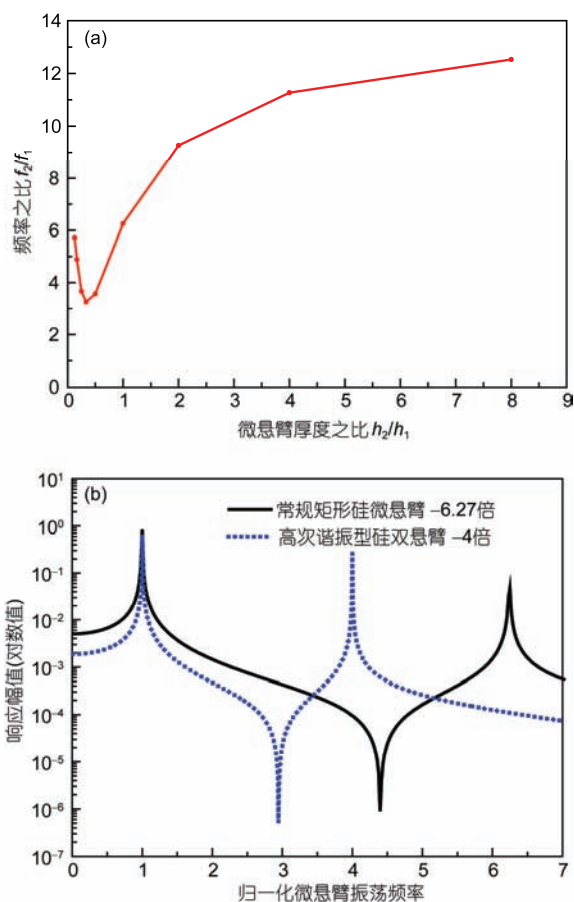


图 9 (网络版彩图) 双悬臂的厚度与本征模式频率间的关系 (a) 及其调谐后的传递函数 (b)

二阶弯曲振荡的频率为 265.77 kHz，频率比为整数倍 4，其传递函数如图 9(b) 所示。

(2) 锤头型谐振微悬臂

传统 AFM 微悬臂由于扫描速率和噪音的限制，无法获得随时间变化的针尖样品间相互作用力，而扭转振动模式的通常具有较高的共振频率和探测灵

敏度，如果通过一定的方式使得针尖与样品间作用力激发微悬臂的扭转振荡，最直接的方式就是将针尖放置在微悬臂的一侧，进一步将扭转共振模式的频率调谐为微悬臂一阶弯曲振动模式的高次整数倍，就可以很好地实现非线性力的高次力梯度探测，以及定量获得随时间变化的针尖-样品间相互作用力。2007 年，哈佛大学的 Sahin 等人^[6]及其合作者通过设计扭转谐振微悬臂，实现了具有亚微秒时间分辨率的针尖与样品间相互作用力的测量。

为实现较高的共振频率和探测灵敏度的 AFM 成像，设计了锤头型微悬臂，将传统的矩形微悬臂设计为“T”型(图 10)，同时调谐微悬臂的二阶弯曲振荡和一阶扭转模式与基础模式间的耦合。如果将针尖放置于微悬臂的中间位置，可以通过已调谐的高阶弯曲模式来实现高次谐振成像。如果将针尖偏离微悬臂的中轴线放置，由于针尖与样品间的相互作用力，在微悬臂弯曲振荡的同时还会激发微悬臂的扭转振荡，因此不仅可以利用调谐的高阶弯曲模式实现高次谐振成像，还可以结合扭转谐振来实现更多性质的探测。扭转谐振 AFM 可以探测更高分辨率的力学性质，特别是界面杨氏模量的实空间分辨能力，已被用于探测和统计杂化 DNA 分子的数目，是测量基因材料的有效探测工具，其灵敏度可以到达摩尔量级，比现有方法高几个数量级。

为进一步研究锤头型微悬臂的几何模型与其基础共振模式、二阶弯曲共振、扭转共振频率间的关系，根据常用微悬臂，设置初始微悬臂的厚度为 3 μm ，总长度 300 μm ，固定端的宽度为 30 μm ，自由端的悬臂宽为 50 μm ，调节两悬臂长度比和自由悬臂的宽度，分别讨论微悬臂本征模式频率的变化，分析其一阶扭转模式和二阶弯曲模式的与基础本征模式频率之

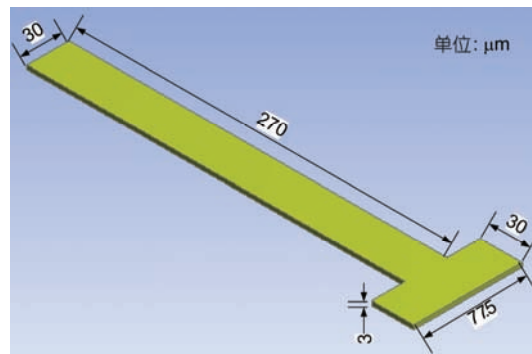


图 10 (网络版彩图) 锤头型微悬臂的几何模型

比. 经过 ANSYS 分析, 得出自由端的悬臂长为悬臂总长的 1/10 时为最佳, 当自由端悬臂的宽度为 77.5 μm (图 10), 微悬臂的基础本征频率为 35.619 kHz, 二阶弯曲本征频率为 248.960 kHz, 一阶扭转模式的本征频率为 391.850 kHz, 后两者与基频之比分别为 6.99 和 11, 如图 11 中曲线上短箭头所示, 同时实现了扭转模式和弯曲模式的调谐。

图 12 描述了扭转振荡和二阶弯曲振荡与基频均成整数倍关系(分别为 11 和 7)的几何模型在 1 nN 作用下的频率响应和传递函数。

3.2 高次谐振型石英悬臂探针的设计

石英音叉作为一种自激励自检测的力传感器, 已被广泛用于各种扫描探针显微镜(SPM). 与传统硅悬臂相比, 石英音叉作为扫描探针显微镜的力传感

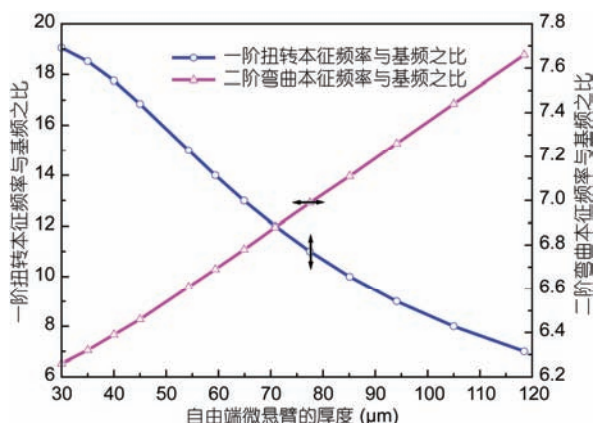


图 11 (网络版彩图)一阶扭转模式频率和二阶弯曲模式频率与基频间的比随悬臂自由端宽度的变化

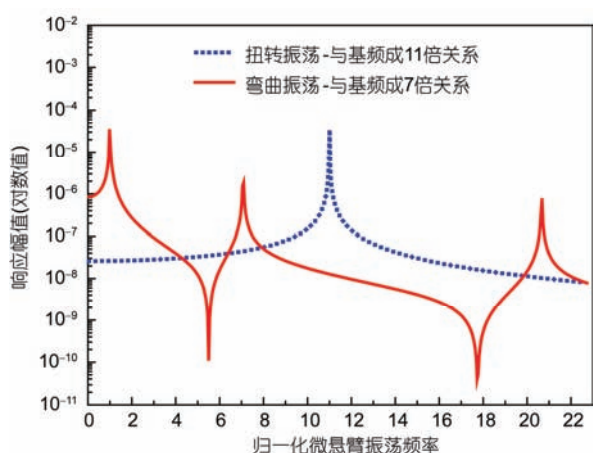


图 12 (网络版彩图)扭转谐振微悬臂的传递函数

器具有许多不可比拟的优势: (1) 石英音叉的弹性常数 k 值很大, 可以将针尖与样品间的距离很稳定的控制在 10 nm 以内, 抗干扰能力非常好; (2) 石英音叉的品质因数 Q 非常高, 工作时的功耗非常低; (3) 石英音叉的频率稳定性很好, 在大气环境下, 当探针所处的温度变化 10℃时, 微悬臂的振动频率会产生 35 Hz 的变化, 而石英音叉的频率变化仅为微悬臂变化的百分之一^[15]; (4) 物美价廉, 经济实用, 并且粘接探针时操作性很强. 因此, 利用石英音叉作为微悬臂在原子力显微术中具有广泛的应用。

3.2.1 音叉型石英悬臂

早期的石英音叉探针系统^[16~18]都是采用音叉基部固定, 两臂悬空的方法, 振动时音叉两臂为对称的反向振动状态, 相互补偿, 而且音叉是由石英一体化制成的, 因此这样的石英音叉探针系统均具有很高的品质因数, 从而具有很高的探测灵敏度。

文中选用 Abracon 公司的 AB38T 型石英晶振, 去其外壳得实验所用音叉(图 13(a)). 采用光学显微镜对其进行精确的测量, 相对于传统硅悬臂, 石英音叉的宽度和厚度正好与硅悬臂相反, 为避免几何参数混淆, 文中统一采用悬臂视角来定义石英音叉的宽度和厚度(图 13(b)). 设计高次谐振型石英音叉悬臂探针时, 首先需要对原始石英音叉进行有限元分析, 清楚其高阶振荡模式与基频模式间的关系. 由于石英晶体为一种各向异性材料, 这意味着在某方向上的旋转变化的变化, 因此掌握石英晶片的切型是设计石英微悬臂的理论基础. 熟悉的晶片切型有 AT, SC 和 ST 等, 对于作为力传感器的石英音叉采用的是 AT 切型的 $X+5^\circ$ ^[16]. 石英的杨

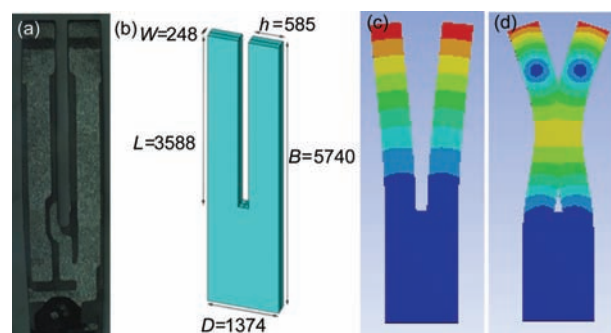


图 13 (网络版彩图)石英音叉的实物图、几何尺寸及前两阶弯曲模态分析(单位: μm)

氏模量为 72 GPa, 经过 ANSYS 有限元分析, 得出原始石英音叉的一阶反相振动频率为 32.764 kHz, 二阶反相振动频率为 192.520 kHz, 二者之比为 5.88, 振荡形式如图 13(c)和(d)所示。

在扫描探针显微镜中, 多数情况下石英音叉仅是作为感知和放大探测信号的微悬臂, 真正实现探测功能的是粘接其上的探针, 因此需要进一步对前端附有探针的石英音叉进行模态分析。

在其中一个音叉臂的前端粘接探针(图 14)由于探针质量的附加导致石英音叉的对称性被破坏, 其共振频率和品质因数均会下降。通常采用的探针直径、探针材料是比较固定的, 因此探针的长度是决定探针质量的一个关键因素。探针越短, 石英音叉探针系统的品质因数和共振频率下降的越小。当粘接直径为 0.15 mm, 长 0.5 mm 的钨探针时, 整个音叉型石英探针系统的一阶、二阶反相振动频率分别为 31.132 和 166.290 kHz, 二者之比为 5.34; 当粘接直径为 0.15 mm, 长 0.3 mm 的钨探针时, 整个音叉型石英探针系统的一阶、二阶反相振动频率分别为 31.549 和 185.130 kHz, 二者之比为 5.87。

当在石英音叉的双臂前端对称性的附加探针时, 其对称性恢复, 但是附加质量增大, 其共振频率的下降幅度会比单探针系统大, 而品质因数相对于单探针系统有所改善。当在石英音叉双臂前端对称性的粘接 0.15 mm 直径, 0.3 mm 长的钨探针时, 整个音叉型石英探针系统的一阶、二阶反相振动频率分别为 29.639 和 178.530 kHz, 二者之比为 6.02。

3.2.2 qPlus 型石英悬臂

当石英音叉探针工作于上述双臂自由的方式时具有很高的品质因数, 但同时也存在一个很大困扰, 即由于探针的附加质量使其音叉的对称性被打破, 导致成像信号无法用理论去解释, 因此, 1998 年 Giessibl 提出了 qPlus 技术^[19]。所谓的 qPlus 技术, 将石英音叉的一个整臂固定在蓝宝石基座上, 而另一

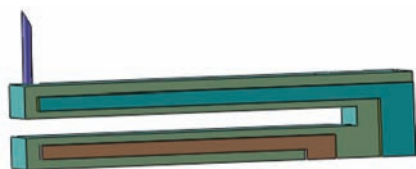


图 14 (网络版彩图)石英音叉探针系统示意图

臂悬空, 相当于传统原子力显微镜探针系统的微悬臂, 然后将腐蚀的探针垂直地粘接在悬空的音叉臂前端(图 15)。因此对于 qPlus 石英微悬臂的调谐设计, 需要通过改变悬空音叉臂的几何形状来实现。

为与硅悬臂的讨论形成对比, 保持石英音叉悬臂的长度和宽度一定, 改变石英音叉自由臂的厚度(图 16(a))。当减小悬臂厚度时, 频率比会逐渐增大, 与硅微悬臂的变化趋势相同, 当增大悬臂厚度时, 频率比会减小或失去意义, 在一定范围内的关系曲线如图 16(b)所示。当悬臂厚度为 0.385 mm 时, 一阶弯曲振荡频率为 24.709 kHz, 二阶弯曲振荡频率为 148.29 kHz, 实现了二阶弯曲振荡频率与一阶弯曲振荡频率之比为整数 6, 对应的传递函数如图 16(d)中圆形连接线所示。而初始 qPlus 石英微悬臂的基础模式频率为 36.68 kHz, 二阶弯曲振荡模式频率为 209.96 kHz, 二阶弯曲共振频率与基频之比为 5.75, 频谱响应曲线如图 16(d)中星形线所示。但从加工技术和常用石英音叉技术的角度考虑, 采用在自由音叉臂上切除部分材料的方法来实现调谐高次谐振和本征频率的关系更为便利。因此进一步研究了在自由悬臂前端切除一个矩形质量的方法来设计特殊的微悬臂(图 16(c))。

切除质量的大小是实现特殊微悬臂的调谐和使用方便的关键技术。切除的长度越长, 微悬臂的振荡模式越接近于初始的 qPlus 石英微悬臂的特征。如果切除厚度太大, 对石英音叉粘接探针带来很大的困难, 切除厚度太小, 难以实现整数倍的频率比, 而且切除厚度不当, 在二阶弯曲振荡中会有扭转振荡耦合。最终获得当切除长度和厚度为 1 mm×0.18 mm 时, qPlus 石英微悬臂的二阶弯曲振荡与一阶弯曲振荡频率分别为 208.51 和 41.465 kHz, 频率比为整数倍 5, 其传递函数如图 16(d)中三角符号线所示。

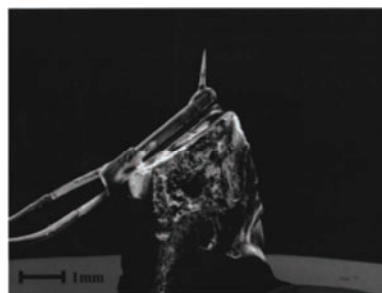


图 15 qPlus 传感器的 SEM 照片

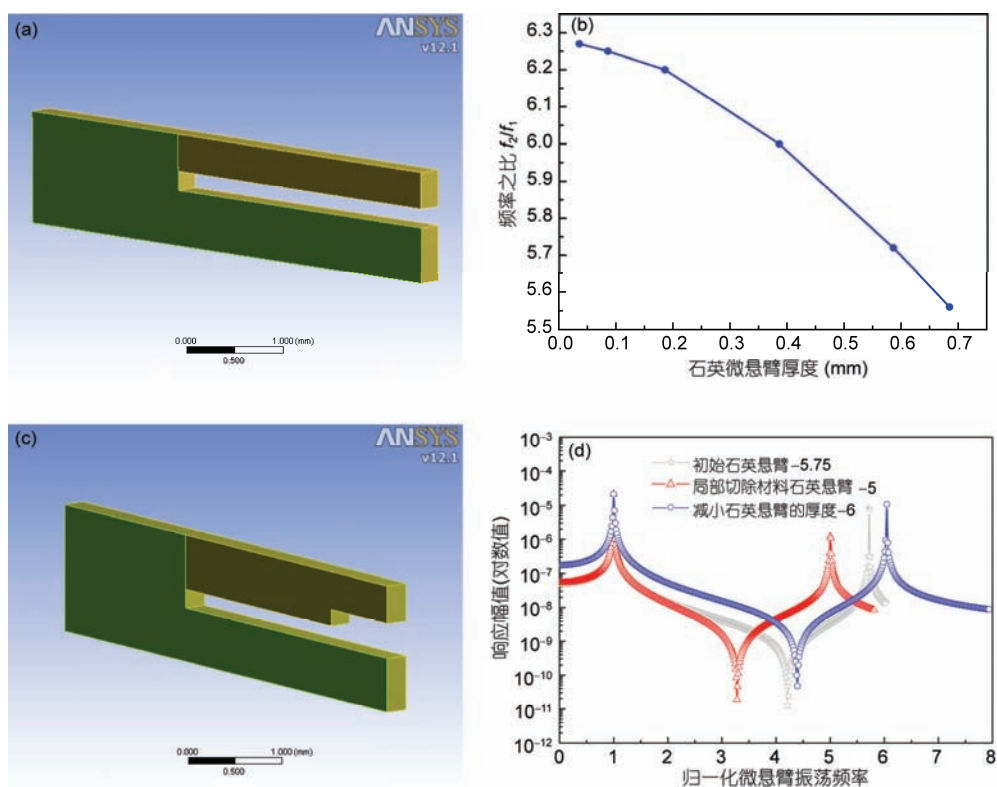


图 16 (网络版彩图)高次谐振石英微悬臂模型图以及参数比较

(a) 调谐厚度的高次谐振石英微悬臂模型图; (b) 自由音叉臂的厚度变化对弯曲振动频率的影响; (c) 切除质量块的高次谐振石英微悬臂模型图; (d) 原始石英音叉及不同方式调谐后的传递函数的对比

通过切除质量块的方式对 qPlus 石英悬臂调谐后, 继而讨论了粘接针尖对微悬臂的影响. 在此使用直径 0.15 mm 的钨探针, 当设置针尖长度为 0.3 mm 时, 一阶、二阶弯曲本征频率分别为 36.488 和 184.87 kHz, 二者频率之比为 5.07, 约为整数倍 5. 与调谐后无探针的 qPlus 石英悬臂相比, 粘接针尖后共振频率有所下降, 但频率之比基本一致, 因此一定范围内, 探针质量对特殊微悬臂频率比的影响可以忽略.

4 结论

不断提高空间分辨率、数据采集速度以及实现材料性质的成像, 一直以来就是原子力显微术的发展

目标. 近些年, 随着原子力显微术的发展, 多频原子力显微术的出现使实现这些目标成为了可能, 它灵活多样的探测手段在探测样品材料属性方面表现出巨大的优势. 为便于多频原子力显微技术的实现, 一般需要设计特殊微悬臂. 在本文中, 以传统的应用比较广泛的矩形硅微悬臂和石英微悬臂为研究主体, 利用有限元 ANSYS 分析, 通过改变悬臂的几何质量分布研究了其对悬臂本征模式频率的影响, 调谐其二阶弯曲振荡频率和/或一阶扭转振荡频率与基础模式的振荡频率之间的关系, 设计了若干种高次谐振微悬臂, 并结合 FIB 微纳加工技术制作了其中一种特殊微悬臂, 为研究多频原子力显微技术提供了重要的技术前提和实验基础.

参考文献

- 1 Bhushan B. Handbook of Nanotechnology. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010
- 2 Garcia R, Herruzo E T. The emergence of multifrequency atomic force microscopy. Nat Nanotechnol, 2012, 38: 217-226

- 3 Girard P, Ramonda M, Arinero R. Dynamic atomic force microscopy operation based on high flexure modes of the cantilever. *Rev Sci Instrum*, 2006, 77: 096105
- 4 Garcia R. *Amplitude Modulation Atomic Force Microscopy*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010
- 5 Sahin O, Yaralioglu G, Grow R, et al. High resolution imaging of elastic properties using harmonic cantilevers. *Sensor Actuat A*, 2004, 114: 183–190
- 6 Sahin O, Magonov S, Su C M, et al. An atomic force microscope tip designed to measure time-varying nanomechanical forces. *Nat Nanotechnol*, 2007, 2: 507–514
- 7 Kimura K, Kobayashi K, Matsushige K. Improving sensitivity in electrostatic force detection utilizing cantilever with tailored resonance modes. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 053113
- 8 Sadewasser S, Villanueva G, Plaza J A. Modified atomic force microscopy cantilever design to facilitate access of higher modes of oscillation. *Rev Sci Instrum*, 2006, 77: 073703
- 9 Stark M, Stark R W, Heckl W H, et al. Inverting dynamic force microscopy: From signals to time resolved interaction forces. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2002, 99: 8473–8478
- 10 Rodriguez T R, Garcia R. Tip motion in amplitude modulation (tapping mode) atomic force microscopy: Comparison between continuous and point mass models. *Appl Phys Lett*, 2002, 80: 1646–1648
- 11 Tetard L, Passian A, Thundat T, et al. New modes for subsurface atomic force microscopy through nanomechanical coupling. *Nat Nanotechnol*, 2010, 5: 105–109
- 12 Sebastian A, Shamsudhin N, Rothuizen H, et al. Design and fabrication of micro-antilevers for multi-frequency atomic force microscopy. *IBM Res*, 2012, 3832: 1–7
- 13 Song Y X, Bhushan B. Simulation of dynamic modes of atomic force microscopy using a 3D finite element model. *Ultramicroscopy*, 2006, 106: 847–873
- 14 Oria R, Otero J, González L, et al. Finite element analysis of electrically excited quartz tuning fork devices. *Sensors*, 2013, 13: 7156–7169
- 15 Momosaki E. A brief review of progress in quartz tuning fork resonators. In: *Proceedings of the 1997 IEEE International Frequency Control Symposium*, Orlando, 1997. 552–565
- 16 Karrai K. Piezoelectric tip-sample distance control for near field optical microscopes. *Appl Phys Lett*, 1995, 66: 1842–1844
- 17 Tortonese M, Barrett R C, Quate C. Atomic resolution with an atomic force microscope using piezoresistive detection. *Appl Phys Lett*, 1993, 62: 834–836
- 18 Tsai D P, Lu Y Y. Tapping-mode tuning fork force sensing for near-field scanning optical microscope. *Appl Phys Lett*. 1998, 73: 2724–2726
- 19 Giessbl F J. “qPlus sensor”. German Patent. 19633546A1, 1998

Design and analysis of higher harmonic cantilever based on finite element analysis

ZHENG ZhiYue, XU Rui & CHENG ZhiHai

Center for Excellence in Nanoscience, Key Laboratory of Standardization and Measurement for Nanotechnology, National Center for Nanoscience and Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Recently, the developing multi-frequency atomic force microscopy, not only can characterize more physical properties of samples with a remarkable spatial resolution, but also detect non-linear force with time-resolved. Its basic principle is that multiple vibrating frequencies of micro cantilever probe is motivated and detected, which is closely related to higher harmonics or eigenmodes of micro cantilever. In order to realize this new technology, it is very important and necessary to design special micro cantilever. Generally, silicon cantilever and quartz cantilever are widely used in traditional AFM. For rectangular silicon cantilever, the ratio of the second order eigenmode and basic frequency is 6.27, and for quartz tuning micro-cantilever, it also isn't an integral value, so it is almost impossible to study the MF-AFM using the conventional cantilevers directly. Based on the resonant amplification effect, in this article, we discussed the corresponding eigenvibration of traditional rectangular silicon micro-cantilever and quartz tuning micro-cantilever by the method of changing the mass distribution of micro cantilever, namely changing its geometric size and shape. Finally we designed some special cantilevers, which the ratio of second mode frequency and basic frequency are all integer times by theoretical calculation and Finite Element Analysis, including some discussions between flexural resonant and basic frequency.

multi-frequency AFM, micro-cantilever, high-order mode, higher harmonics, finite element analysis

doi: 10.1360/N092016-00013