

УДК 621.235.015

Повышение добротности колебательной системы атомно-силового микроскопа

В. А. Васин, Б. Н. Васичев, С. В. Степанчиков, Н. Г. Фатьянова

Рассмотрены причины низкого фазового контраста изображения в атомно-силовом микроскопе (АСМ) при исследовании поверхности. Определены пути улучшения фазового контраста изображения в АСМ. Рассмотрены принципиально новые подходы к проектированию АСМ с миниатюрной вакуумной системой, обеспечивающей условия для улучшения фазового контраста изображения.

PACS: 07.30.Cy

Ключевые слова: фазовый контраст, добротность, атомно-силовой микроскоп, миниатюрная система вакуумной откачки, контролируемая вакуумная среда.

Введение

Атомно-силовой микроскоп был изобретен в 1986 г. Гердом Биннигом, Кэлвином Куэйттом и Кристофером Гербером [1]. Он основан на силовом взаимодействии между зондом и поверхностью. Между атомами острия и поверхности возникает сила Ван-дер-Ваальса. Зонд представляет собой упругую консоль (cantilever) с заостренным концом. По величине изгиба консоли контролируется сила взаимодействия зонда с поверхностью.

Энергия U взаимодействия двух атомов, находящихся на расстоянии r друг от друга, обычно представляется одним из вариантов аппроксимирующего потенциала Леннарда—Джонса, например, в виде "потенциала 6—12":

$$U_{LD}(r) = U_0 \left[-2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 + \left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} \right].$$

Первое слагаемое в скобках данного выражения характеризует дальнедействующее взаимодействие острия и поверхности. Это взаимное притяжение атомов, обусловленное, в основном, их дипольным взаимодействием. Второе слагаемое характеризует отталкивание атомов на малых расстояниях за счет обменных взаимодействий (их

электронных оболочек). При некотором минимальном значении энергии $-U_0$, соответствующей точке $r = r_0$, наступает равновесие. Таким образом, потенциал Леннарда—Джонса позволяет оценить силу взаимодействия зонда с поверхностью исследуемого образца.

Для формирования изображения поверхности образца, перемещающегося по осям x и y , регистрируются малые изгибы консоли зондового датчика. Для этого используются оптические методы. Регистрируется отражение света от поверхности консоли.

При сканировании образца зонд перемещается вдоль поверхности, а изменение напряжения на зонде записывается в память компьютера. Это изменение напряжения характеризует рельеф поверхности, если на поверхности нет локализованных зарядов. Локализованные заряды искажают картину, изображающую поверхность. Источниками этих локализованных зарядов могут быть зародыши дислокаций, имплантированные атомы, кластеры и т.д., находящиеся под поверхностью.

Сила взаимодействия зонда с поверхностью $F = k\Delta Z$, где k — жесткость консоли (кантилевера); ΔZ — величина, характеризующая изгиб консоли. При работе зондового датчика АСМ в колебательном режиме важны резонансные свойства кантилевера.

В данной работе рассмотрены причины низкого фазового контраста изображения в АСМ при исследовании поверхности, что в значительной степени связано с низкой добротностью колебаний кантилевера в реальных условиях измерений. Определены пути улучшения фазового контраста изображения в АСМ. В частности, рассмотрены принципиально новые подходы к проектированию АСМ с миниатюрной вакуумной системой, обеспечивающей условия для улучшения фазового контраста изображения.

Васин Владимир Анатольевич, докторант.
Васичев Борис Никитович, профессор.
Степанчиков Сергей Валентинович, доцент.
Фатьянова Наталья Георгиевна, аспирант.
Московский государственный институт электроники и математики.
Россия, 109028, Москва, Б. Трехсвятительский пер., 3.
E-mail: vasichev@yandex.ru; vacuumwa@list.ru

Статья поступила в редакцию 15 ноября 2011 г.

© Васин В. А., Васичев Б. Н., Степанчиков С. В., Фатьянова Н. Г., 2012

Влияние добротности системы кантилевер—среда на качество изображений

Условно методы формирования изображений рельефа поверхности и получение информации о свойстве поверхности в АСМ можно разделить на две группы: контактный квазистатический метод и бесконтактный колебательный метод. Бесконтактный колебательный метод основан на регистрации параметров взаимодействия колеблющегося кантилевера с поверхностью. Кантилевер совершает вынужденные колебания с малой амплитудой порядка 1 нм. Угловая частота собственных изгибных колебаний кантилевера прямоугольного сечения определяется следующим выражением:

$$\omega = \frac{\lambda}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho S}},$$

где λ — численный коэффициент, зависящий от частоты моды изгибных колебаний;
 l — длина консоли;
 E — модуль Юнга;
 J — момент инерции данного сечения консоли;
 ρ — плотность материала консоли.

Частота зависит от геометрических размеров и материала консоли и обычно лежит в диапазоне 10—100 кГц.

При сближении зонда с поверхностью на него действует сила со стороны образца F_{PS} . Если зонд находится на расстоянии Z_0 от поверхности, то для колебаний с малыми амплитудами указанная сила равна:

$$F_{PS} = F_{PS0} + \frac{\partial F}{\partial Z}(Z_0) \cdot Z(t).$$

Это приводит к тому, что в правой части уравнения, описывающего колебания такой системы, появляются дополнительные слагаемые:

$$m\ddot{Z} = -k(Z - u) - \gamma\dot{Z} + F_0 + F_{PS0} + F'_Z Z,$$

где k — жесткость системы;
 γ — сила вязкого трения среды;
 F_0 — сила тяжести кантилевера;
 u — смещение основания при изгибе кантилевера;
 F'_Z — производная от F_{PS} по Z .

Вводя новые переменные $Z = Z + (F_0 + F_{PS0})/k$, получаем уравнение:

$$m\ddot{Z} + \gamma\dot{Z} + (k - F'_Z) \cdot Z = ku_0 \cos(\omega t).$$

После стандартных преобразований уравнение приобретает следующий вид

$$\ddot{Z} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{Z} + (\omega_0^2 - \frac{F'_Z}{m})m = \omega_0^2 u_0 \cos(\omega t),$$

где m — масса системы; ω — частота колебаний кантилевера.

Во втором члене этого уравнения фигурирует добротность Q системы (среда—кантилевер). Эта величина является важной для любой колебательной системы, так как затухание колебаний определяется его декрементом $d = \psi_0 / 2Q$. Добротность кантилевера зависит от той среды, в которой он работает. Амплитудно-частотная характеристика кантилевера имеет вид:

$$A(\omega) = \frac{u_0 \omega_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2 - \frac{F'_Z}{m})^2 + \frac{\omega_0^2 \omega^2}{Q^2}}}.$$

Из этого следует, что амплитуда колебаний зонда на частоте ψ_0 зависит от добротности системы (среда—кантилевер). Фазово-частотная характеристика также зависит от добротности

$$\varphi(\omega) = \arctg \left[\frac{\omega_0 \omega}{Q \left(\omega_0^2 - \omega^2 - \frac{F'_Z}{m} \right)} \right].$$

Наличие градиента силы взаимодействия зонда с поверхностью образца F'_Z также приводит к сдвигу как амплитудно-частотной характеристики, так и фазово-частотной характеристики.

Резонансная частота кантилевера с учетом градиента дополнительной силы и добротности может быть представлена в виде

$$\omega_{rf}^2 = \omega_0^2 \left(1 - \frac{1}{2Q^2} - \frac{F'_Z}{k} \right) = \omega_{rf}^2 - \frac{E'_Z}{m}.$$

Отсюда дополнительный сдвиг амплитудно-частотной характеристики будет равен

$$\Delta\omega = \omega_{rd} - \omega_{rf} = \omega_{rd} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{F'_Z}{m\omega_{rd}^2}} \right).$$

Точка перегиба фазово-частотной характеристики имеет частоту

$$\omega^* = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{F'_Z}{k}},$$

где ψ_0 — частота, на которой кантилевер совершает колебания вдали от поверхности образца.

Дополнительный сдвиг амплитудно-частотной характеристики равен

$$\Delta\omega = \omega_0 - \omega^* = \omega_0 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{F'_Z}{k}} \right).$$

При сближении зонда с поверхностью фаза его колебаний (при $F'_Z < k$) становится равной

$$\varphi(\omega_0) = \arctg \left[\frac{k}{QF'_Z} \right] \approx \frac{\pi}{2} - \frac{QF'_Z}{k},$$

а дополнительный сдвиг фазы равен

$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} - \varphi(\omega_0) \cong \frac{QF'_Z}{k}.$$

На практике чаще используется так называемый “полуконтактный” режим работы АСМ. Если через Z_0 обозначить расстояние между положением равновесия колеблющегося кантилевера и поверхностью, а через $F_{PS}[Z(t)]$ — комбинированную силу, то уравнение движения кантилевера примет вид

$$\begin{aligned} \ddot{Z} + \frac{\omega_0}{Q} \dot{Z} + \omega_0^2 [Z(t) - Z_0 - u_0 \cos(\omega t)] &= \\ &= \frac{\omega_0^2}{k} F_{PS}[Z(t)], \end{aligned}$$

где координата Z отсчитывается от поверхности. Из этого следует, что $Z_0 < Qu_0$.

В “полуконтактном” режиме сдвиг колебаний кантилевера также зависит от взаимодействия зонда с поверхностью образца и от добротности системы $Q = \frac{\omega_0 m}{\gamma}$.

На рис. 1 представлена схема АСМ с миниатюрным вакуумным насосом. Благодаря малогабаритному вакуумному насосу, располагаемому в непосредственной близости от технологической камеры, удается постоянно поддерживать в рабочем объеме АСМ разреженную атмосферу. Это обеспечивает повышение добротности и улучшение фазового контраста изображения в АСМ при исследовании поверхности образцов. Типичные значения добротности кантилевера 200 и менее при работе в жидкости, в газовой среде 300—500, в вакууме — 600 и более. Из этого следует, что при обеспечении вакуумной среды около кантилевера повышается добротность колебательной системы кантилевера и улучшается фазовый контраст изображения в АСМ.

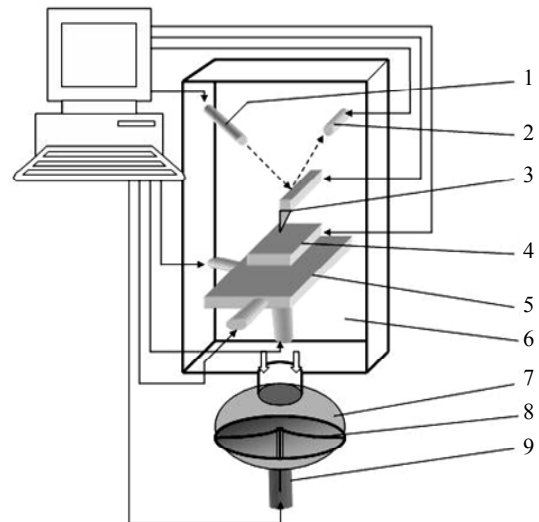


Рис. 1. Схема АСМ:

- 1 — лазер; 2 — фотоприемник; 3 — кантилевер; 4 — образец;
5 — столик образцов; 6 — вакуумный объем;
7 — малогабаритный насос; 8 — подвижная диафрагма;
9 — привод вакуумного насоса

Миниатюрные вакуумные откачные системы

Разработанный мембранный двухступенчатый вакуумный насос [2] с металлической мембраной с прощелкиванием представлен на рис. 2. Насос создан в трех вариантах, а именно: с принудительно открываемым впускным клапаном; с принудительно открываемыми впускным и промежуточными клапанами и с принудительно открываемыми впускным, промежуточным и выпускным клапанами. Данные конструкции рассчитаны на скорость колебания мембраны 10—50 Гц. Быстродействие такого типа насосов определяется частотой колебания мембраны и величиной паразитных объемов, которая у предложенных конструкций минимальна.

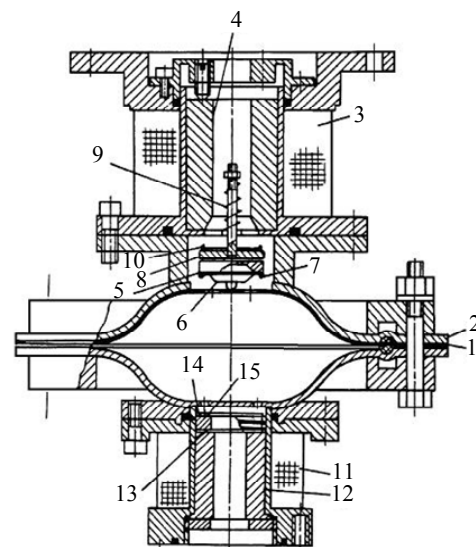


Рис. 2. Двухступенчатый насос с металлической мембраной. Вариант с принудительным открытием впускного, выпускного и промежуточного клапанов

В данной конструкции это достигается единым циклом изготовления корпуса и мембраны, что значительно упрощает и удешевляет изготовление насоса и одновременно значительно улучшает его характеристики. Так, профили мембраны 1 и впускной части корпуса 2 соответствующим образом рассчитываются. Мембрана шлифуется для создания неоднородной толщины по радиусу. Согласование профиля мембраны 1 и впускной части корпуса 2 производится их совместной штамповкой, что обеспечивает довольно точное прилегание мембраны к корпусу [3].

Насос работает следующим образом:

Впускной клапан закрыт, промежуточный клапан открыт, выпускной клапан закрыт. Мембрана находится в верхнем положении.

На обмотку привода 3 впускного клапана подается напряжение определенной полярности. По обмотке протекает ток, и создается электромагнитное поле, концентрируемое якорем 4 впускного клапана. Под его действием якорь 5 промежуточного клапана давит на мембрану 6 промежуточного клапана, и промежуточный клапан закрывается, причем за его герметизацию отвечает уплотнитель 7.

Впускной клапан закрыт, промежуточный клапан закрыт, выпускной клапан закрыт. Мембрана находится в верхнем положении.

На обмотку привода 3 впускного клапана подается более высокое напряжение той же полярности. Впускной клапан под действием якоря 8 открывается, передавая усилие на якорь 5 промежуточного клапана. Мембрана насоса 1 прощелкивает, занимая нижнее положение.

Впускной клапан открыт, промежуточный клапан закрыт, выпускной клапан закрыт. Мембрана находится в нижнем положении.

Откачиваемый газ поступает в первую ступень насоса. Подача напряжения на обмотку привода 3 впускного клапана прекращается, и впускной клапан закрывается под действием пружины 9. Герметизация седла клапана производится уплотнением 10.

Впускной клапан закрыт, промежуточный клапан закрыт, выпускной клапан закрыт. Мембрана находится в нижнем положении.

На обмотку привода 11 выпускного клапана подается напряжение определенной полярности. По обмотке протекает ток, и создается электромагнитное поле, концентрируемое якорем 12 выпускного клапана. Под действием якоря 13 выпускного клапана данный клапан открывается.

Впускной клапан закрыт, промежуточный клапан закрыт, выпускной клапан открыт. Мембрана находится в нижнем положении.

Откачиваемый газ покидает вторую ступень насоса. Подача напряжения на обмотку привода 11 выпускного клапана прекращается, и выпускной клапан закрывается под действием пружины 14. Герметизация отверстий выпускной ступени производится уплотнениями 15.

Впускной клапан закрыт, промежуточный клапан закрыт, выпускной клапан закрыт. Мембрана находится в нижнем положении.

На обмотку привода 11 выпускного клапана подается напряжение обратной полярности. Электромагнитное поле воздействует на якорь 5 промежуточного клапана, якорь 5 давит на мембрану 6 клапана, и клапан открывается.

Впускной клапан закрыт, промежуточный клапан открыт, выпускной клапан закрыт. Мембрана находится в нижнем положении.

При усилении напряжения усиливается и действие на якорь 5, мембрана 1 насоса прощелкивает, занимая верхнее положение. Откачиваемый газ переходит из первой во вторую ступень насоса.

Впускной клапан закрыт, промежуточный клапан открыт, выпускной клапан закрыт. Мембрана находится в верхнем положении. Цикл работы насоса завершен.

В конструкции насоса возможно увеличение частоты колебаний мембраны до 100—200 Гц, что повышает его производительность.

Также разработана конструкция вакуумного безмасляного насоса с эластичной мембраной, исключающая загрязнения смазкой [4].

Размеры загрязняющих микрочастиц износа, выделяемых в процессе работы насоса, определяются по следующим зависимостям [5].

$$d = 1,4 \sqrt[3]{4p_k R R_{\max} (2R - R_{\max}) \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)}$$

при упругом контактном взаимодействии. Здесь p_k — удельное давление в контакте; R — радиус скругления микронеровностей; R_{\max} — максимальная высота микронеровностей; E_1, E_2 — модули упругости контактирующих материалов. При пластическом контакте используется другая зависимость:

$$d = 2,8 \sqrt{\frac{p_k R_{\max} (2R - R_{\max})}{HV}}$$

Здесь HV — микротвердость менее твердого материала рассматриваемой пары.

На рис. 3 для некоторых пар материалов показаны зависимости среднего размера d образующихся микрочастиц от удельного давления в кон-

также p_k при скорости скольжения во фрикционном контакте $v_c = 157$ мм/с.

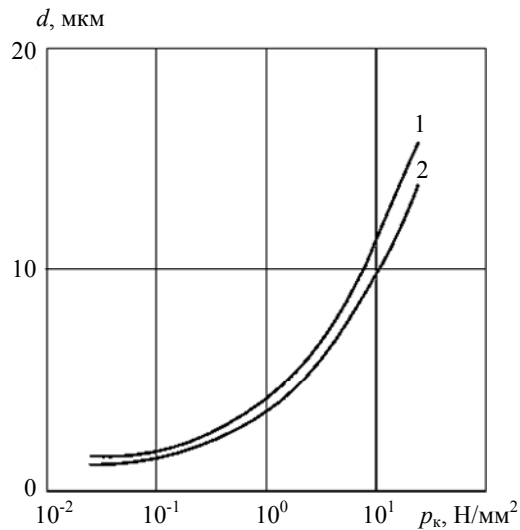


Рис. 3. Зависимость среднего размера d образующихся микрочастиц от удельного давления в контакте p_k для пар материалов:

1 — сталь 40X13 — сталь 40X13; 2 — сталь 45 — сталь 45

Заключение

Анализ причин низкого фазового контраста изображения при исследовании поверхности в АСМ позволил наметить пути его дальнейшего улучшения. Использование разработанного двухступенчатого вакуумного насоса с металлической мембраной и прощелкиванием в составе миниатюрной откачной системы, сопряженной с экологически чистой контролируемой вакуумной средой, обеспечивает повышение добротности колебательной системы кантилевера и улучшение фазового контраста изображения в АСМ.

Литература

1. Bining G., Quate C. F., Gerber Ch. // Phys. Rev. Lett. 1986. V. 56. No. 9. P. 930.
2. Васин В. А. Пат. на изобретение 2267648.
3. Васин В. А. Пат. на изобретение 2261368.
4. Александрова А. Т., Васин В. А., Кеменов В. Н. и др.: Пат. на изобретение 2251024.
5. Васин В. А., Степанчиков С. В. и др. // Приводная техника. 2010. № 4 (86). С. 31.

Improving quality factor of the vibrational system of an atomic force microscope

V. A. Vasin, B. N. Vasichev, S. V. Stepanchikov, N. G. Fatyanova
 Moscow State Institute of Electronics and Mathematics,
 3 Bolshoy Trekhsvyatitelsky al., Moscow, 109028, Russia
 E-mail: vasichev@yandex.ru

The reasons of the low-phase-contrast images with an atomic force microscope in the study of the surface are investigated. Ways have been obtained to improve the phase-contrast images with an atomic force microscope. Considered are the fundamentally new approaches to designing an atomic force microscope with a miniature vacuum system that provides conditions for the improvement of the phase contrast image.

PACS: 07.30.Cy

Keywords: phase contrast, Q factor, atomic force microscope, miniature vacuum pumping system, controlled vacuum medium.

Bibliography — 5 references.

Received November 15, 2011