

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

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

*Рассмотрены причины низкого фазового контраста изображения в атомно-силовом микроскопе (АСМ) при исследовании поверхности. Определены пути улучшения фазового контраста изображения в микроскопе. Рассмотрены принципиально новые подходы к проектированию АСМ с миниатюрной вакуумной системой и устройствами наноперемещений зонда и образца, обеспечивающими условия для улучшения фазового контраста изображения, повышение надёжности функционирования и увеличение ресурса работы микроскопа.*

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

Атомно-силовой микроскоп (АСМ), основанный на силовом взаимодействии между зондом и поверхностью, изобретён в 1986 году Гердом Биннигом, Кэлвином Куэйтом и Кристофером Гербером [1]. Между атомами острия и поверхности возникает сила Ван-дер-Ваальса. Зонд представляет собой упругую консоль (cantilever) с заострённым концом. По величине изгиба консоли контролируется сила взаимодействия зонда с поверхностью. Энергия взаимодействия двух атомов, находящихся на расстоянии  $r$  друг от друга, обычно представляют потенциалом Леннарда-Джонса:

$$U_{LD}(r) = U_0 \exp\left[-2\left(\frac{r_0}{r}\right) + \left(\frac{r_0}{r}\right)^{10}\right].$$

Первое слагаемое в данном выражении характеризует дальнедействующее взаимодействие острия и поверхности (притяжение), обусловленное, в основном, дипольным взаимодействием атомов. Второе слагаемое характеризует отталкивание атомов на малых расстояниях. При минимальном значении энергии  $-U_0$   $r = r_0$ , наступает равновесие. Таким образом, потенциал Леннарда-Джонса позволяет оценить силу взаимодействия зонда с поверхностью исследуемого образца.

Для формирования изображения поверхности образца, перемещающегося по осям  $x, y$ , 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);  $\Delta Z$  – величина, характеризующая изгиб консоли. При работе зондового датчика АСМ в колебательном режиме важны резонансные свойства кантилевера.

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. Собственная частота изгибных колебаний кантилевера прямоугольного сечения определяется следующим выражением:

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

где  $\lambda$  – численный коэффициент, зависящий от частоты моды изгибных колебаний;  $l$  – длина консоли;  $E$  – модуль Юнга;  $J$  – момент инерции данного сечения консоли;  $\rho$  – плотность материала консоли. Частота зависит от геометрических размеров и материала консоли и 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 она 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;  $\gamma$  – 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

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

где  $m$  – масса системы;  $\omega$  – 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  $\delta = \omega_0 / 2Q$ . 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  $\omega_0$  зависит от добротности системы (среда – кантилевер). Фазово-частотная характеристика также зависит от добротности

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

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 учётом 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  $\omega_0$  – 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 с поверхностью зонда, 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 предпочитается так называемый “полуконтактный” режим работы АСМ. Если расстояние  $Z_0$  между положением равновесия колеблющегося кантилевера и поверхностью обозначить, как  $F_{PS}[Z(t)]$  – комбинированную силу, то уравнение движения кантилевера примет вид

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

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 добротности системы  $Q = \frac{\omega_0 m}{\gamma}$ .

На рис. 1 показана схема АСМ с миниатюрным вакуумным насосом. Благодаря малогабаритному вакуумному насосу, располагаемому в непосредственной близости от технологической камеры, удаётся постоянно поддерживать в рабочем объёме АСМ разреженную атмосферу. Это обеспечивает повышение добротности и улучшение фазового контраста изображения в АСМ при исследовании поверхности образцов. Типичные значения добротности кантилевера при работе в жидкости 200 и менее, 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 микроскопе.

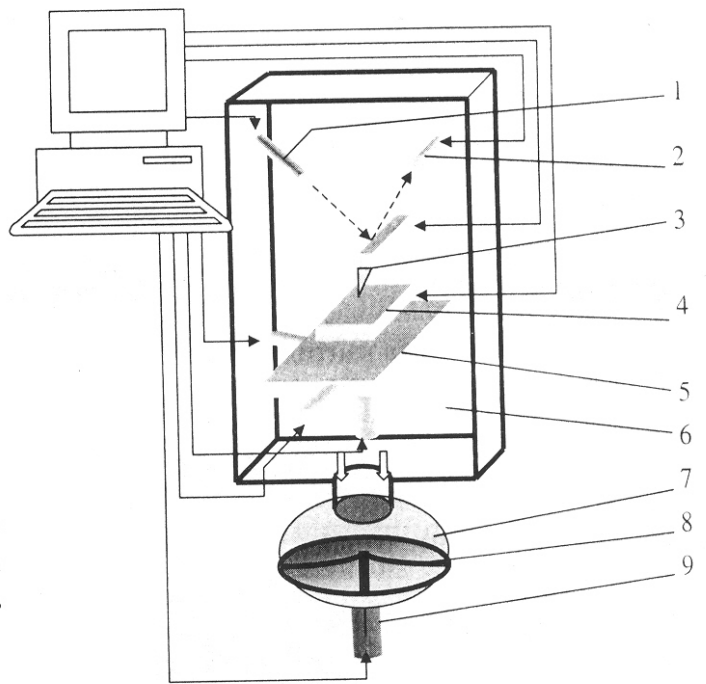


Рис.1. Схема АСМ: 1 – лазер; 2- фотоприемник; 3 – кантилевер; 4 – образец; 5 – столик образцов; 6 – вакуумный объём; 7 – малогабаритный насос; 8 – подвижная диафрагма; 9 – привод вакуумного насоса

Мембранный двухступенчатый вакуумный насос с металлической мембраной с прощелкиванием [2] представлен на рис. 2. Насос создан в трёх вариантах: с принудительно открываемым впускным клапаном, с принудительно открываемыми впускным и промежуточными клапанами и с принудительно открываемыми впускным, промежуточным и выпускными клапанами (см. рис. 2). Данные конструкции рассчитаны на скорость колебания мембраны 10÷50 Гц. Быстродействие такого типа насосов определяется частотой колебания мембраны и величиной паразитных объёмов, которая у предложенных конструкций минимальна.

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. Создание профиля мембраны 1 и впускной части корпуса 2 производится их совместной штамповкой, что обеспечивает довольно точное прилегание мембраны к корпусу [3].

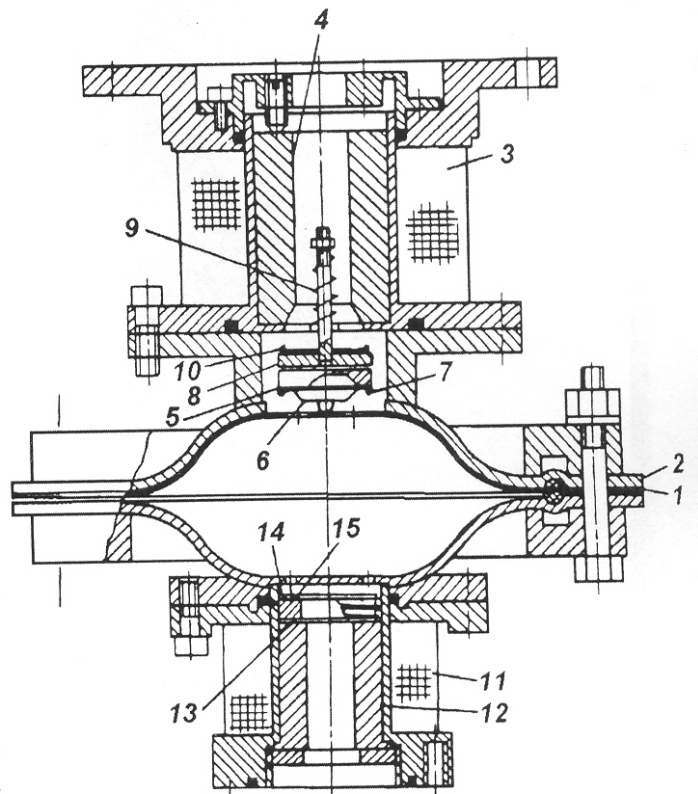


Рис. 2. Двухступенчатый насос с металлической мембраной. Вариант с принудительным открытием впускного выпускного и промежуточного клапанов (рабочая часть мембраны 1 и корпуса насоса 2 и 3 показана в сжатом в два раза по радиальному к мембране направлению)

Насос работает следующим образом:

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

На обмотку привода 3 впускного клапана подаётся напряжение определённой полярности. По обмотке протекает ток и создаётся электромагнитное поле, концентрируемое якорем 4 впускного клапана. Под его действием якорь 5 промежуточного клапана давит на мембрану 6 промежуточного клапана и промежуточный клапан закрывается, 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 подаётся более высокое напряжение той же полярности. Под действием якоря 8 впускного клапана, данный клапан открывается, также 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 подаётся напряжение определённой полярности. По обмотке протекает ток и создаётся 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 подаётся напряжение обратной полярности. Электромагнитное поле воздействует на якорь 5 промежуточного клапана. Под его действием якорь 5 промежуточного клапана давит на мембрану 6 промежуточного клапана и промежуточный 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  $100 \div 200$  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].

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

– 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, или

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

– при пластическом контакте.

Здесь  $HV$  – микротвердость менее твердого материала рассматриваемой пары.

На рис. 3 показаны зависимости среднего размера  $d$  образующихся микрочастиц от удельного давления в контакте  $p_k$ , при скорости скольжения во фрикционном контакте  $v_c = 157$  мм/с, для пар некоторых пар материалов.

Одной из важных технических проблем в зондовой микроскопии является необходимость прецизионного перемещения зонда и образца.

Для решения этой проблемы применяются различные типы приводов и устройств перемещения, осуществляющих перемещение объектов с высокой точностью.

Электромеханические приводы применяются в основном для грубой подводки зонда к подложке. Для точного позиционирования нанотехнологического оборудования используются сканирующие элементы, выполненные на основе пьезоэлектриков.

Перспективным с этой точки зрения является применение магнестрикционных материалов для создания прецизионных систем перемещения, позволяющих повысить точность позиционирования в десятки раз по сравнению с пьезоэлектрическими приводами [6].

Магнестрикция (от лат. натяжение, сжатие) – изменение формы и размеров тела при его намагничивании. Это явление свойственно как сильномагнитным (ферромагнитным), так и парамагнитным и диамагнитным веществам. Магнестрикция – результат проявления взаимодействий в

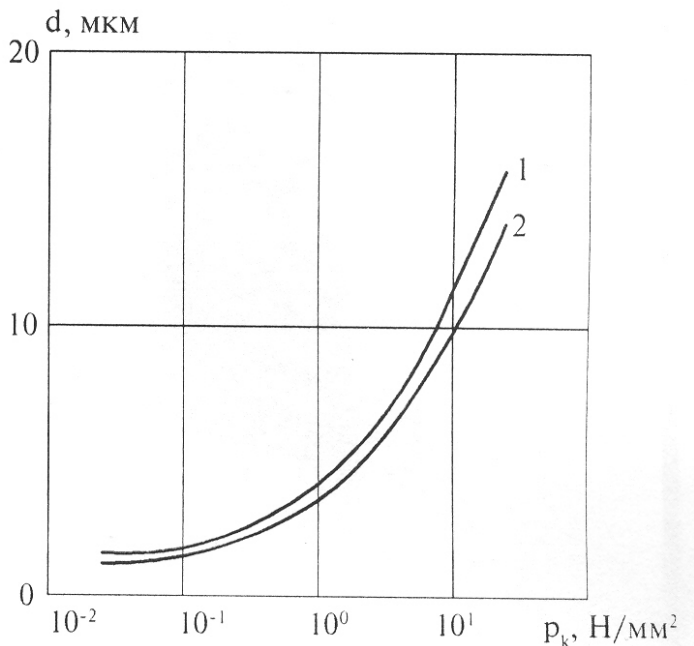


Рис. 3. Зависимость среднего размера  $d$  образующихся микрочастиц от удельного давления в контакте  $p_k$  для пар материалов:  
1 – сталь 40Х13 – сталь 40Х13;  
2 – сталь 45 – сталь 45

магнитных тел. Она неизменно привлекает внимание не только физиков, но также и инженеров с точки зрения конструирования новых приборов, систем и приводов специального назначения.

Магнитострикция оценивается безразмерной величиной — относительным изменением размеров магнетика  $\lambda = \frac{dl}{l}$ . Здесь  $dl$  — удлинение (или укорочение) при включении магнитного поля  $H$ , а  $l$  — длина образца. В экспериментах обычно измеряется  $\lambda_{\parallel}$  — продольная магнитострикция, когда напряженность поля  $H$  совпадает с направлением измерения, и  $\lambda_{\perp}$  — поперечная магнитострикция, когда указанные направления взаимно перпендикулярны. Величины  $\lambda_{\parallel}$  и  $\lambda_{\perp}$  малы (даже для ферромагнетиков) и для их измерения применяются специальные методы и установки.

С целью обеспечения возможности использования магнитного поля для оперативного управления величиной перемещения подложкодержателя при выполнении различных операций в нанотехнологическом оборудовании разработан привод, показанный на рис. 4.

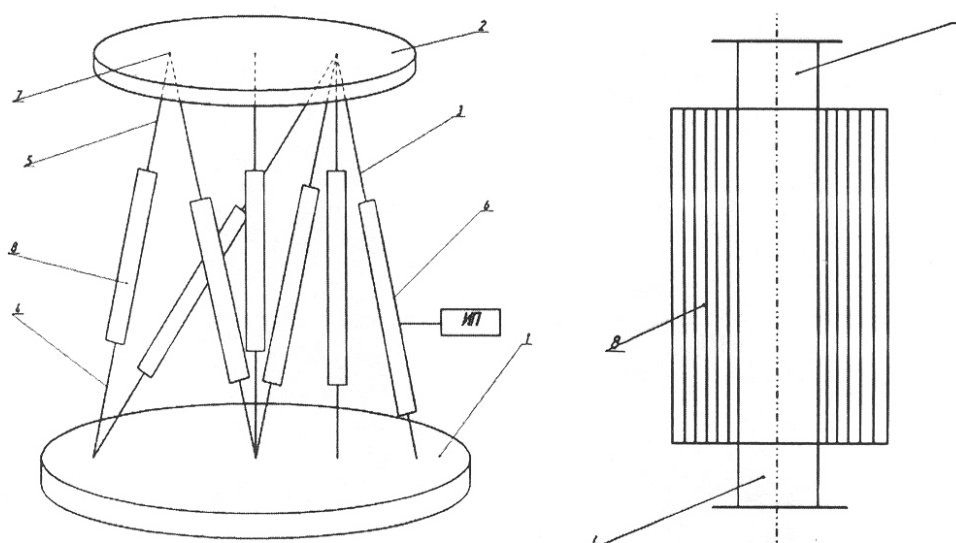


Рис. 4. Привод перемещения для нанотехнологического оборудования

Привод для нанотехнологии содержит основание 1, выходное звено 2, шесть стержней 3, шарнирно связанных одним концом 4 с основанием, а другим 5 — с выходным звеном, узлы перемещения 6 выходного звена, кинематически связанные с соответствующими стержнями 3. Шарнирные связи 7 выполнены упругими, а стержни 3 — из магнитострикционного материала, причем стержни 3 установлены в катушку индуктивности 8, связанную с источником питания.

При подаче напряжения на катушку индуктивности 8 происходит перемещение узлов 6, а вместе с ним и выходного звена 2.

Применение привода позволяет повысить точность перемещения подложки при использовании магнитного поля вместо электрического.

На рис. 5 представлено устройство перемещения с прецизионным приводом, предназначенное для реализации нанотехнологических процессов.

Устройство перемещения содержит прецизионный привод 2, связанный с неподвижным основанием 1 и

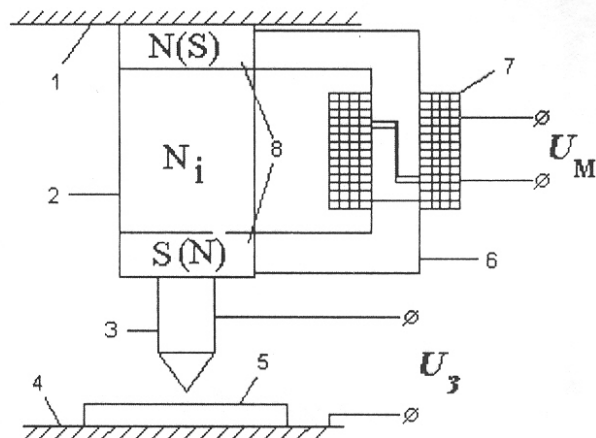


Рис. 5. Устройство перемещения с прецизионным приводом

зондом 3, подложку 5, установленную на подложкодержателе 4. Привод выполнен в виде цилиндра из магнестрикционного материала, торцы которого связаны с полюсами электромагнита 8, жестко связанными с его сердечником 6. Сердечник выполнен составным с возможностью осевого перемещения его частей друг относительно друга внутри катушки индуктивности 7. Один полюс электромагнита жестко связан с неподвижным основанием, а другой с зондом.

Работа устройства осуществляется аналогично работе привода, показанного на рис. 4.

Ещё одна разработка – устройство наноперемещений зонда представлена на рис. 6.

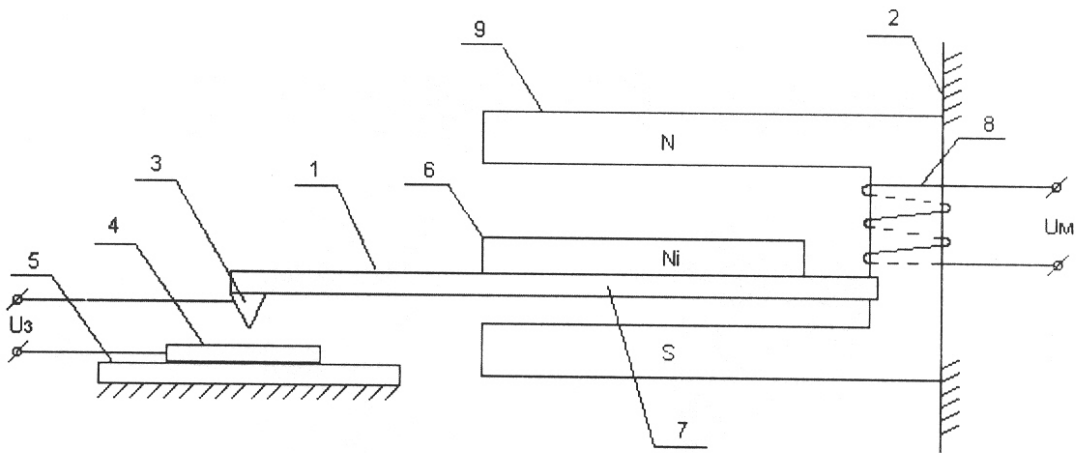


Рис. 6. Устройство наноперемещений зонда

Устройство наноперемещений зонда содержит привод 1, связанный с неподвижным основанием 2 и зондом 3, подложку 4, установленную на подложкодержателе 5. Привод 1 выполнен в виде магнестрикционного биморфа – жестко связанных между собой двух пластин. Одна из пластин выполнена из магнестрикционного материала 6, а другая – из немагнитного диэлектрического материала 7, на консольной части которой закреплен зонд 3. Другая часть немагнитной диэлектрической пластины 7 жестко связана с сердечником электромагнита 8. Между полюсами 9 сердечника электромагнита 8 расположен магнестрикционный биморф.

В работах [7–9] представлены разработанные авторами охраноспособные технические решения приводов и устройств перемещения для нанотехнологического оборудования, защищённые патентами Российской Федерации.

Для приводов перемещения нанотехнологического оборудования особый интерес представляют сплавы, в которых гигантская магнестрикция реализуется в области комнатных температур. Особенно большие перспективы практического использования имеют так называемые интерметаллические соединения редкоземельных элементов с металлами группы железа.

Редкоземельный сплав Terfenol-D ( $Tb_{0,27}Dy_{0,73}Fe_{1,95}$ ) дал возможность приступить к практическому использованию эффекта «гигантской магнестрикции» для силового позиционирования, ведь в этом случае в магнитных полях  $\sim 0,5$  Т относительное удлинение достигает  $10^{-3}$ , а возникающее усилие достигает  $100$  Н/мм<sup>2</sup> сечения стриктора. Таким образом, стриктор длиной 1 см и такого же диаметра может обеспечить силовое позиционирование в пределах 10 мкм с усилием до  $10^3$  Н. Этот сплав также обладает пониженной магнитной анизотропией с сохранением высокой магнестрикции, что позволяет управлять гигантской магнестрикцией с помощью малого поля.



Результаты, полученные при тестировании существующих магнитострикционных приводов, свидетельствуют о повышении точности позиционирования в десятки раз по сравнению с пьезоэлектрическими приводами.

## Заключение

Анализ причин низкого фазового контраста изображения при исследовании поверхности в атомно-силовом микроскопе позволил наметить пути его дальнейшего улучшения. Использование разработанного двухступенчатого вакуумного насоса с металлической мембраной с прощёлкиванием в миниатюрной откачной системе с экологически чистой контролируемой вакуумной средой и новых конструкций устройств наноперемещений зонда и образца обеспечивает повышение добротности колебательной системы кантилевера, улучшение фазового контраста изображения и повышение разрешающей способности в атомно-силовом микроскопе. Это, в целом, обеспечивает повышение надежности функционирования и увеличение ресурса атомно-силового микроскопа.

## Литература

1. Bining G., Quate C.F., Gerber Ch. Atomic force microscope. // Phys. Rev. Lett., 1986. v.56, №9. P. 930 – 933.
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. 31-35.
6. Васин В.А., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Нанотехнологические процессы и оборудование электронной техники. – М.: МИЭМ, 2009. – 264 с.
7. Патент РФ на полезную модель № 48109. Нанотехнологический привод / Железов П.Е., Ивашов Е.Н., Коломейцев Н.П. и др. / 10.09.2005г.
8. Патент РФ на полезную модель № 86367. Нанотехнологическое устройство перемещения / Ивашов Е.Н., Лучников А.П., Семенов М.Е., Степанчиков С.В. / 27.08.2009г.
9. Патент РФ на полезную модель № 86368. Устройство перемещения / Ивашов Е.Н., Лучников А.П., Семенов М.Е., Степанчиков С.В. / 27.08.2009г.

**Fatjanova N.G., Vasin V.A., Vasichev B.N., Ivashov E.N., Stepanchikov S.V.**

## ENSURING THE RELIABILITY OF AN ATOMIC FORCE MICROSCOPE

*The reasons for the low-phase-contrast images with an atomic force microscope in the study of the surface. Identify ways to improve the phase contrast images in the microscope. Considered fundamentally new approaches to designing an atomic force microscope with a miniature vacuum system and devices nanodisplacement probe and the sample, providing conditions for the improvement of the phase contrast image, increase the reliability of functioning and increase the service life of the microscope.*

**Keywords:** phase contrast, the Q factor, the atomic force microscope, a miniature vacuum pumping system, controlled vacuum medium, device nanodisplacement.