

УДК 537.533.35+531.713.8

© А. А. Васильев, С. Ю. Керпелева, В. В. Котов, И. Д. Сапожников, А. О. Голубок

## ДАТЧИК ЛОКАЛЬНОГО СИЛОВОГО И ТУННЕЛЬНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В СКАНИРУЮЩЕМ ЗОНДОВОМ МИКРОСКОПЕ

Рассматривается универсальный датчик туннельного и силового взаимодействий сканирующего зондового микроскопа (СЗМ). Приводятся экспериментальные значения резонансной частоты и добротности датчика. Предлагается математическая модель датчика для полуконтактной силовой моды. Обсуждается влияние топографии и локальной жесткости на контраст СЗМ-изображения.

### ВВЕДЕНИЕ

Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) — это метод исследования свойств поверхностей материалов с помощью твердотельных зондовых сенсоров. При использовании СЗМ имеется возможность получать карты распределения целого ряда физических и физико-химических характеристик поверхности, таких как топография, электропроводность, плотность электронных состояний, получать распределение приповерхностных электростатических, магнитных, тепловых полей, адгезионных сил, сил трения, механической твердости и т. п. с высоким пространственным разрешением [1].

В основе сканирующего зондового микроскопа лежит детектирование локального взаимодействия, возникающего между твердотельным нанозондом и поверхностью исследуемого образца при их взаимном сближении до расстояния  $\sim \lambda$ , где  $\lambda$  — характерная длина затухания взаимодействия "зонд—образец". В зависимости от природы взаимодействия "зонд—образец" различают: сканирующий туннельный микроскоп (СТМ, детектируется туннельный ток), сканирующий силовой микроскоп (ССМ, детектируется силовое взаимодействие), оптический микроскоп ближнего поля (ОМБП, детектируется электромагнитное излучение в видимом диапазоне длин волн). Существуют также емкостные (детектируется локальная емкость), акустические (детектируются звуковые колебания), электрохимические (детектируются токи локальных электрохимических реакций) и другие типы СЗМ. Пространственное разрешение СЗМ определяется характерным размером наноконтакта и затуханием взаимодействия между зондом и образцом в зависимости от расстояния между ними и может достигать атомных масштабов. Если в оптическом или электронном микроскопах образец осматривается с помощью светового или элект-

тронного пучка, то в СЗМ — ощупывается и обстучивается с помощью твердотельного нанозонда.

Многообразие измерительных мод, реализуемых в СЗМ, обуславливает применение различных типов нанозондов и датчиков локального взаимодействия. Наиболее распространенными среди них являются: заостренное оптоволокно с диаметром апертуры меньшим, чем длина волны света, подключенное к фотоэлектронному умножителю (ОМБП); жестко закрепленная в держателе острая проводящая игла с преобразователем ток—напряжение, включенным в цепь протекания туннельного тока (СТМ); металлическая, диэлектрическая или полупроводниковая игла, расположенная на краю упругой микробалки (кантилевера) с оптической системой регистрации прогиба кантилевера под действием локальной силы, возникающей между нанозондом и образцом (ССМ) [2].

Один из способов измерения силового взаимодействия заключается в применении кантилевера, колеблющегося на резонансной частоте (модуляционная методика).

Использование колеблющегося кантилевера впервые было предложено Биннигом (G. Binnig) [3]. В ранних экспериментах с колеблющимся кантилевером [4] продемонстрированы влияние градиентов сил на сдвиг резонансной частоты кантилевера и возможность бесконтактной визуализации поверхности образца. Необходимо отметить также, что ранее Дюриг (U. Dürig) изучал частотный сдвиг колеблющегося кантилевера в силовом поле иглы СТМ [5]. В работе [6] была продемонстрирована также возможность зондирования материалов при резком уменьшении амплитуды колебаний кантилевера. Возможность сканирования поверхности образца не только в притягивающих, но и в отталкивающих силах была продемонстрирована в [7]. Относительно слабый сдвиг частоты колебаний под влиянием отталкивающих сил означает, что контакт зонда с поверхностью образца

в процессе колебаний не является постоянным. Только в течение короткой части периода колебаний зонд "ощущает" контактные отталкивающие силы. Особенно это касается колебаний с большой амплитудой (сотни нанометров). Взаимодействие нанозонда с поверхностью образца происходит в этом случае прерывисто-контактным образом. Соответствующий модуляционный метод сканирующей силовой микроскопии (прерывисто-контактный, "полуконтактный" метод) довольно часто используется на практике. Измерение силового взаимодействия при использовании модуляционного метода обычно производится оптическим или пьезоэлектрическим способом. В последнем случае нанозонд закрепляется на пьезоэлектрическом датчике силы [8].

На рис. 1 приведен график зависимости силы взаимодействия  $F$  в области локального контакта от расстояния  $\Delta Z$  между зондом и образцом, где показан диапазон рабочего зазора при работе в "полуконтактном" режиме.

В процессе сканирования зонд может находиться над участками поверхности, имеющими различные физические свойства, в результате чего величина и характер взаимодействия зонд—образец будут изменяться. Кроме того, если на поверхности образца есть неровности, то при сканировании будет изменяться и расстояние  $\Delta Z$  между зондом и поверхностью, соответственно будет изменяться и величина локального взаимодействия.

Одним из основных режимов работы СЗМ является режим постоянного взаимодействия (силы или туннельного тока), реализуемый с помощью системы отрицательной обратной связи. Компаратор в процессе сканирования сравнивает текущий сигнал датчика с опорным сигналом и вырабаты-

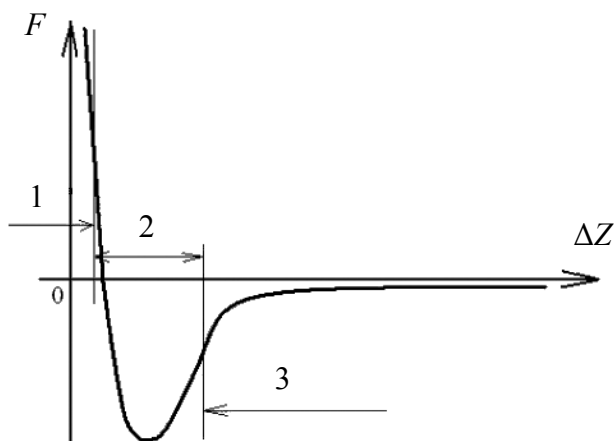


Рис. 1. Режимы работы СЗМ: 1 — контактный, 2 — полуконтактный, 3 — бесконтактный

вает корректирующий сигнал, используемый в качестве управляющего для пьезопривода, который увеличивает или уменьшает зазор между зондом и образцом в зависимости от результатов анализа выходного сигнала датчика. Информационным сигналом в режиме постоянного взаимодействия является сигнал, управляющий перемещением пьезопривода вдоль координаты  $Z$ .

Отклик системы обратной связи на возникновение сигнала рассогласования обуславливается величиной и частотной зависимостью коэффициента усиления  $K$  в разомкнутой петле обратной связи. Конкретные значения  $K$  определяются произведением передаточных функций ее отдельных звеньев. Поскольку наноконтакт является одним из звеньев цепи обратной связи, то на коэффициент усиления влияет зависимость взаимодействия между зондом и образцом от расстояния.

В целом, чем больше значение  $K$ , тем точнее цепь обратной связи реагирует на изменение рельефа и свойств поверхности и тем достовернее данные, получаемые при сканировании. Однако при превышении некоторого критического значения  $K$  система обратной связи проявляет склонность к самовозбуждению, что приводит к повышенному уровню шумов на линии скана.

Отметим, что в области локального контакта могут возникать достаточно большие механические давления, напряженности электрического поля и плотности электрических токов. Раздельное или совместное действие этих факторов может приводить к заметной локальной модификации поверхности образца и острия зонда. То есть, повышая уровень взаимодействия между зондом и образцом, можно перевести СЗМ из диагностического режима работы с нулевым или минимальным уровнем разрушения исследуемой поверхности в режим зондовой литографии, обеспечивающий создание на поверхности образца заранее заданных структур с нанометровым уровнем пространственного разрешения. Таким образом, один и тот же нанозонд может служить как для диагностики локальных свойств исследуемой поверхности, так и средством изменения микро- и наноструктуры поверхности образца.

#### КОНСТРУКЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО ДАТЧИКА

Использование кантилевера и оптического способа регистрации его колебаний связано с процедурой прецизионной юстировки оптической схемы и заменой зонда при переходе от силовых измерений к измерению туннельных токов и наоборот. В связи с этим весьма привлекательным представляется универсальный датчик туннельного и силового взаимодействий, не требующий оптической

юстировки и замены зондов при переходе от одного режима измерения к другому. Ниже представлена конструкция такого датчика, позволяющая измерять без замены зонда как туннельный ток, так и силовое взаимодействие в полуконтактном режиме за счет использования прямого пьезоэффекта, когда прогиб пьезоматериала под силовым воздействием приводит к появлению электрического напряжения.

Датчик представляет собой пьезокерамическую трубку длиной  $l = 5-10$  мм, диаметром  $d = 1.0-1.5$  мм и с толщиной стенки  $h = 0.20-0.30$  мм, жестко закрепленную с одного конца. На внутреннюю поверхность трубки нанесен проводящий электрод. На внешнюю поверхность трубки нанесены два электрически изолированных полуконтактных электрода. К свободному концу трубки прикреплена вольфрамовая проволока диаметром 100 мкм (рис. 2).

Свободный конец проволоки, использующийся в качестве нанозонда, заточен электрохимически, радиус закругления имеет величину  $r_0 = 0.2-0.05$  мкм. В силу конструктивных особенностей вольфрамовая проволока имеет электрический контакт с внутренним электродом трубки, соединенным с заземленным корпусом прибора. При измерении туннельного тока пьезотрубка играет роль жесткой пассивной балки, при этом

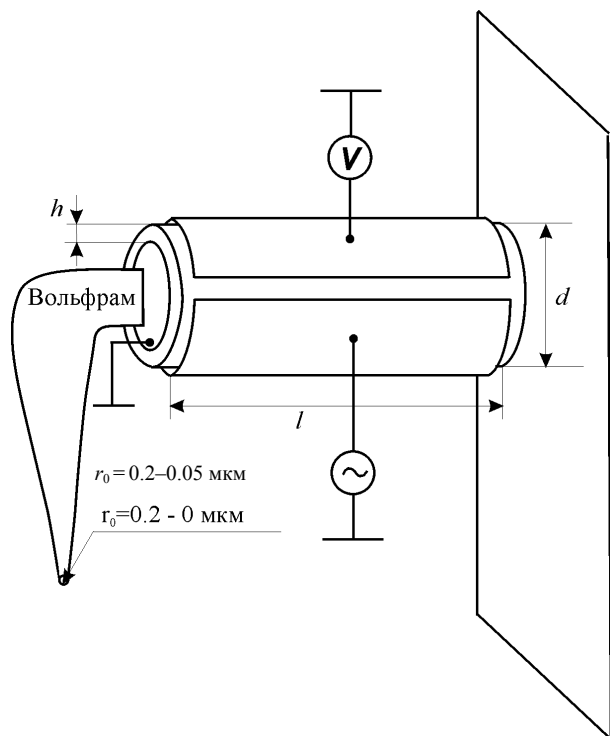


Рис. 2. Конструкция универсального датчика

кой пассивной балки, при этом электрическое смещение прикладывается к образцу относительно заземленного зонда. Силовые измерения проводятся по модуляционной методике, когда зонд постукивает по поверхности, находясь как в области притяжения, так и в области отталкивания.

### Измерение туннельного тока

Для регистрации туннельного тока необходимо приложить разность потенциалов между проводящим образцом и проводящим зондом (рис. 3). Датчиком туннельного тока является преобразователь ток—напряжение, включенный в цепь протекания тока между зондом и образцом. Возможны два варианта включения: с заземленным зондом, когда напряжение смещения подается на образец относительно заземленного зонда, или с заземленным образцом, когда напряжение смещения прикладывается к зонду относительно образца. Особенностью конструкции универсального датчика является подача потенциала на образец, зонд при этом заземлен.

Преобразователь "ток—напряжение", изображенный на рис. 3, вырабатывает электрическое напряжение  $U_T$ , обуславливающее протекание туннельного тока  $I_T$ , и выдает напряжение  $U$ , пропорциональное этому току в электронный блок.

Операционный усилитель  $У1$  является собственно преобразователем "ток—напряжение". В процессе работы преобразователя потенциал в точке 1 поддерживается равным потенциалу в точке 2, а напряжение в точке 3 находится с туннельным током в измерительной цепи в следующей линейной зависимости  $U_3 = R_1 I_T + U_2$ .

Подстроечное сопротивление  $R_2$  используется

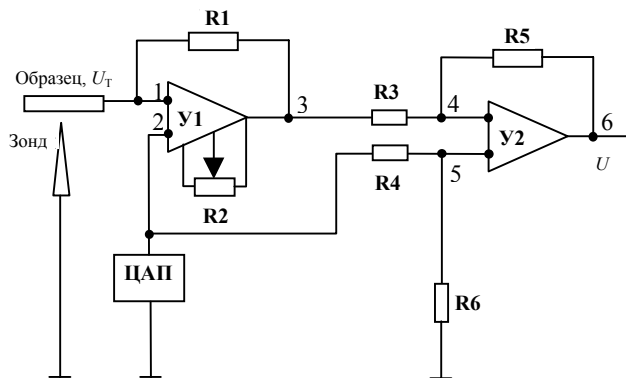


Рис. 3. Электрическая схема преобразователя "ток—напряжение"

для установки нулевого сигнала на выходе усилителя У1 или установки необходимого смещения в точке 3 относительно потенциала земли. Напряжение с выхода усилителя У1 подается на вход дифференциального усилителя У2. Напряжение на выходе У2 определяется разностью входных напряжений

$$U_6 = (U_4 - U_5). \quad (1)$$

Поскольку  $U_1 = U_2 = U_T = U_5$ , а с другой стороны,  $U_4 = U_3$ , то из (1) получаем:

$$U_6 = (U_3 - U_T)K_2,$$

где  $U_3 = R_1 I_T + U_T$ . Отсюда искомый туннельный ток определяется выражением

$$I_T = \frac{U_6}{R_1}.$$

Таким образом, измеряя  $U = U_6$  на выходе преобразователя "ток—напряжение" и зная величину  $R_1$ , можно определить величину туннельного тока  $I_T$ , протекающего в цепи между зондом и образцом. В идеальном случае в отсутствие туннельного тока (большой зазор между зондом и образцом) потенциал в точке 3 равен напряжению смещения на образце относительно заземленного зонда. Это напряжение смещения задает ЦАП, управляемый компьютером. Однако в реальном случае в измерительной цепи возможны токи утечки, соизмеримые с туннельным током ( $10^{-10}$ – $10^{-11}$  А). Это приводит к тому, что даже в отсутствие туннельного тока потенциал в точке 3 будет отличаться от напряжения, выставяемого ЦАП, на величину  $R_1 I'$  (где  $I'$  — токи утечки), а на выходе измерительной схемы в точке 2 появится напряжение, пропорциональное токам утечки. Для устранения влияния токов утечки на измерение туннельного тока используется подстроечное сопротивление  $R_2$ , с помощью которого потенциал в точке 3 смещается таким образом, чтобы при большом зазоре

между зондом и образцом потенциал в точке 3 был бы равен потенциалу в точке 2, а напряжение на выходе  $U_6$  было бы нулевым.

Принципиальные ограничения на минимальную величину измеряемого тока накладывают "дробовые" флуктуации

$$I^2 = 2eI\Delta f,$$

связанные с дискретностью заряда электрона, и "найквистовские" флуктуации

$$I^2 = \frac{4kT\Delta f}{R_1},$$

обусловленные тепловыми шумами ( $e$  — заряд электрона,  $T$  — температура,  $k$  — постоянная Больцмана,  $\Delta f$  — полоса частот измеряемого тока). Однако на практике уровень шумов в токе в основном обусловлен случайными изменениями зазора между зондом и образцом, вызванными механическими и акустическими шумами.

### Измерение силового взаимодействия

При измерении силового взаимодействия в полуконтактной моде одна половина пьезотрубки используется как пьезовибратор. Для этого к одному из внешних электродов прикладывается напряжение от генератора напряжения, приводящее к изгибу трубочки и, следовательно, к периодическим изменениям зазора между зондом и образцом.

При больших зазорах между зондом и образцом, зонд осциллирует с амплитудой  $A$  (рис. 4, а), имеющей максимальную величину на резонансной частоте. Амплитуда колебаний определяется величиной раскачивающего напряжения генератора и добротностью колебательной системы. Изменения амплитуды колебаний детектируются путем измерения напряжения, возникающего вследствие изгиба пьезотрубки (прямой пьезоэффект) между вторым внешним электродом и заземленным внутренним электродом.



**Рис. 4.** Принцип регистрации силового взаимодействия: а — вдали от поверхности амплитуда  $A$  колебаний зонда имеет максимальную величину, что приводит к максимальному напряжению  $U$  на датчике; б — при постукивании зонда по поверхности образца амплитуда колебаний уменьшается ( $A_1$ ), что приводит к уменьшению напряжения  $U$  на датчике

Оценить величину резонансной частоты колебаний пьезотрубки можно на основе выражения для частоты основного тона поперечных колебаний трубчатой балки в горизонтальной плоскости, жестко закрепленной относительно поперечных и угловых колебаний с одного конца и свободной от закрепления на другом конце [7]:

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \frac{(1.875)^2}{l^2} \sqrt{\frac{EI^2}{m}}, \quad (2)$$

где  $I(R)$  — погонный момент инерции балки относительно поперечной оси ( $R$  — радиус трубочки),  $l$  — ее длина,  $m$  — погонная масса,  $E$  — модуль Юнга. При  $l \gg h$   $I^2 \approx 2R^2(2R-h)^2$  ( $h$  — толщина стенки) [9]. Подставляя  $E = c^2 \rho$ , где  $c$  — скорость звука в пьезокерамическом материале балки,  $\rho$  — плотность,  $m = \pi \rho (2R-h)h$ , получим

$$\omega \approx 0.045 \frac{cd}{l^2} \sqrt{\frac{d-h}{h}}, \quad (3)$$

где  $d$  — диаметр трубочки. При  $c = 3.3 \cdot 10^3$  м/с и характерных значениях  $d = 1.2$  мм,  $h = 0.25$  мм получим из формулы (3) зависимость  $\omega(l)$ .

На рис. 5 представлены теоретическая и экспериментальная зависимости резонансной частоты

датчика от длины пьезотрубки. На рис. 6 — типичная экспериментальная резонансная кривая датчика с пьезотрубкой длиной 6.5 мм. Добротность, измеренная для 20 датчиков, лежала в диапазоне 15–20, а резонансная частота — в диапазоне 8–10 кГц, что согласуется с расчетными данными.

При приближении к поверхности образца зонд начинает взаимодействовать с образцом в процессе колебаний (рис. 4, б), что приводит к изменению резонансной частоты и фазовому сдвигу в колебательной системе. Поскольку частота напряжения, подаваемого на вибратор остается прежней, это приводит к уменьшению амплитуды колебаний (на рис. 4, б —  $A1$ ) и, следовательно, к уменьшению напряжения  $U$ , снимаемого с датчика. Таким образом, амплитуда, частота и фаза колебаний зонда в полуконтактной моде несут информацию о взаимодействии с поверхностью.

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Для качественного понимания работы ССМ в полуконтактной моде будем считать, что поведение зонда описывается уравнением одномерного осциллятора и что основной вклад в колебания зонда вносит отталкивающая сила. Тогда, разлагая силу взаимодействия между зондом и образцом

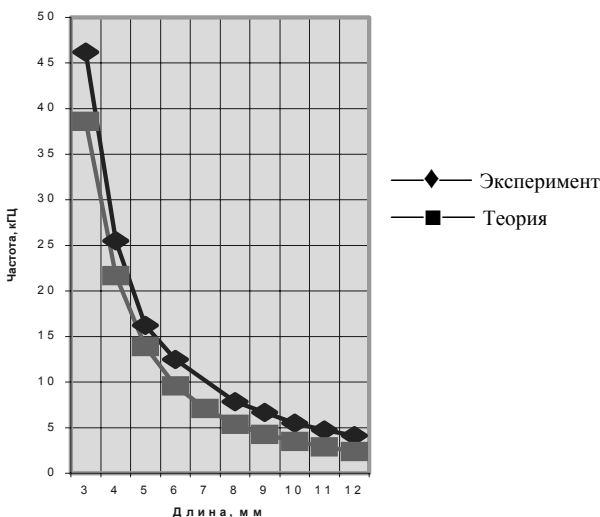


Рис. 5. Зависимость механической резонансной частоты датчика силового взаимодействия от длины пьезотрубки

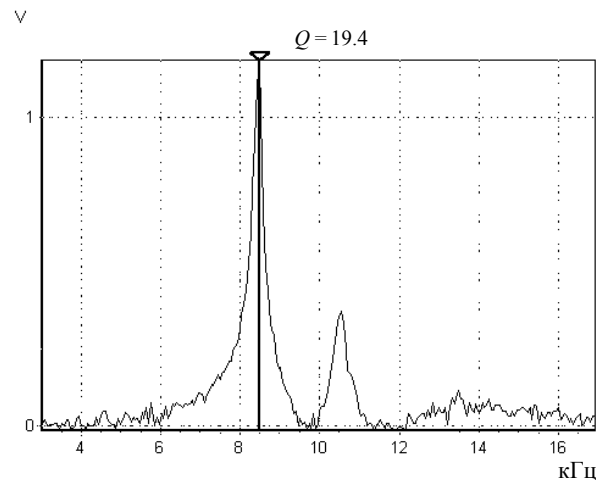


Рис. 6. Типичная резонансная кривая датчика силового взаимодействия

в ряд около точки  $z_0$ , расположенной вблизи поверхности образца, и пренебрегая членами второго порядка малости, получим уравнение одномерного осциллятора в поле силы, зависящей от расстояния:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + kz = F(z_0) + \frac{dF}{dz}(z_0) \cdot z.$$

Это уравнение эквивалентно уравнению осциллятора в поле постоянной силы с эффективной жесткостью  $k_{\text{ef}} = k - \frac{dF}{dz}(z_0)$  и резонансной частотой  $\omega_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{k_{\text{ef}}}{m}}$ .

Таким образом, влияние силы сводится к уменьшению резонансной частоты колебаний, причем частотный сдвиг тем сильнее, чем резче градиент силы. Поскольку вибратор раскачивает зонд на частоте, соответствующей резонансу при нулевом взаимодействии, то в области действия зависящей от расстояния силы амплитуда колебаний зонда должна уменьшиться. При этом чувствительность датчика будет тем выше, чем больше его добротность.

Конечно, для адекватного описания полуконтактной моды необходимо учесть вынужденные колебания, осуществляемые вибратором, силу вязкого трения, а также невозможность разложить действующую между зондом и образцом силу по малому параметру  $z$ , что приводит к нелинейному уравнению колебаний. В рамках простой одномерной модели консольно закрепленная с одного конца трубка с зондом, прикрепленным к друго-

му, осциллирующему концу, моделируется пружиной с подвешенным грузом [10] (рис. 7). На одном конце пружины закреплен шарик радиусом  $R$  и эффективной массой  $m$ , где  $R$  — радиус зонда,  $m$  — эффективная масса колебательной системы,  $z_1$  — расстояние от поверхности образца до вершины зонда,  $z_0$  — расстояние от поверхности образца, на котором сила взаимодействия между образцом и зондом равняется нулю. На этом расстоянии характер силы меняется от притяжения к отталкиванию. Точка подвеса пружины колеблется по закону  $A \sin(\omega t)$ .

Когда амплитуда колебаний равна или больше, чем промежуток между острием и поверхностью, возникает достаточно сложный случай нелинейной системы с внешним возбуждением, требующий численного решения. Для области взаимодействия с преобладанием притягивающей силы выберем модель Леннарда—Джонса  $V(z) = 4\epsilon \left( \left( \frac{\sigma}{z} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{z} \right)^6 \right)$ , в которой суммируются силы Ван-дер-Ваальса между молекулами, принадлежащими к сфере и плоскости образца:

$$F(z) = f_0 R \left[ -(\sigma/z)^2 + (1/30)(\sigma/z)^8 \right], \quad (4)$$

где  $f_0 = (2/3)\pi^2 \epsilon \rho_1 \rho_2 \sigma^4$ . Здесь  $\epsilon$  — глубина потенциальной ямы  $\epsilon = V(2^{1/6} \sigma)$  для потенциала Леннарда—Джонса;  $\sigma$  — точка пересечения графика с осью абсцисс  $V(\sigma) = 0$ ;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — плотности сферы (зонда) и поверхности образца соответственно. Для взаимодействия в области  $z < z_0$ , где преобладают силы отталкивания, выберем модель Герца [11], которая описывает деформацию двух контактирующих упругих сфер с радиусами  $R_1$  и  $R_2$ .

Согласно рассматриваемой модели [11], радиус  $a$  контакта двух сфер рассчитывается по формуле

$$a^3 = (3/4)\pi(K_1 + K_2)R_1 R_2 / (R_1 + R_2) F(z), \quad (5)$$

где  $K_i = (1 - \gamma_i^2)\pi E_i$ ,  $i = 1, 2$ ;  $E_i$  — модуль Юнга;  $\gamma_i$  — коэффициент Пуассона;  $F(z)$  — приложенная сила.

Положим  $R_1 \ll R_2$ , т. е. рассмотрим упругий контакт сферы с радиусом  $R = R_1$  и модулем Юнга  $E_1$  и плоской поверхности с модулем Юнга  $E_2$ . При вдавлении сферы в плоскую поверхность на небольшую глубину по сравнению с радиусом сферы ( $|z - z_0| \ll R$ ) для радиуса контактного пятна имеем:

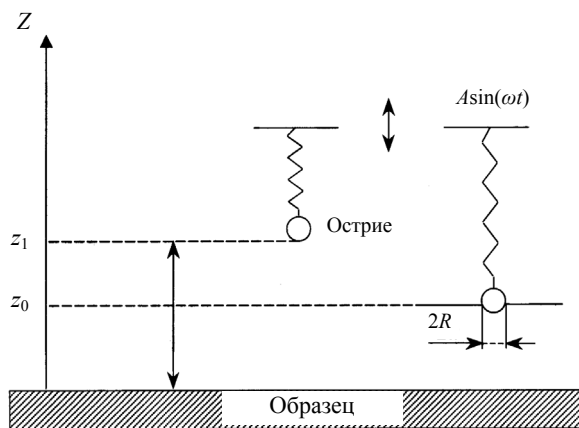


Рис. 7. Одномерная модель пьезорезонансного датчика

$$a = (2R|z - z_0|)^{1/2}.$$

Подставляя это значение в выражение (5) и учитывая, что  $R_1 \ll R_2$ , получим выражение для силы отталкивания

$$F(z) = g_0(z - z_0)^{3/2}, \quad (6)$$

где 
$$g_0 = \frac{8 \cdot 2^{1/2} \cdot R^{1/2}}{3\pi(K_1 + K_2)}.$$

Теперь, зная зависимость силы от расстояния, можно записать уравнение движения управляемой нелинейной осциллирующей системы:

$$m \left( \frac{d^2 z}{dt^2} \right) + m \left( \frac{\omega}{Q} \right) \frac{dz}{dt} + K[z(t) - z_1 - A \sin(\omega t)] - F(z(t)) = 0. \quad (7)$$

Здесь  $Q$  — добротность колебательной системы,  $m$  — эффективная масса,  $k$  — жесткость ( $k = m\omega_0^2$ ), а сила взаимодействия острия и поверхности определяется выражением:

$$F(z(t)) = f_0 R [-(\sigma/z)^2 + (1/30)(\sigma/z)^8] \quad \text{при } z > z_0,$$

$$F(z(t)) = g_0(z(t) - z_0)^{3/2} \quad \text{при } z < z_0.$$

Путем численного решения уравнения (7) можно проанализировать поведение управляемой нелинейной осциллирующей системы в зависимости от параметров, таких как жесткости зонда и поверхности, расстояние от зонда до поверхности, а также добротность колебательной системы.

Для удобства численного решения дифференциальное уравнение второго порядка (7) преобразуем в систему дифференциальных уравнений первого порядка для амплитуды  $z(t)$  и скорости колебаний  $v(t)$ :

$$\begin{cases} \frac{dz(t)}{dt} = v(t), \\ \frac{dv(t)}{dt} = -(\omega/Q)v(t) - \\ - (k/m)[z(t) - z_1 - A \sin(\omega t)] + F[z(t)]/m; \end{cases} \quad (8)$$

в качестве начальных условий выберем:  $z(0) = z_0$  и  $v(0) = 0$ . Выбор таких начальных условий означает, что в начальный момент времени  $t = 0$  зонд находится в точке  $z_0$ , где сила взаимодействия между зондом и образцом равна нулю, и зонд имеет нулевую скорость перемещения. С течением времени зонд будет осциллировать с нарастающей амплитудой до тех пор, пока его максимальная

амплитуда либо достигнет значения  $A$ , либо под действием сил острие—образец достигнет некоторого значения, соответствующего установившемуся режиму колебаний. Любые другие разумные начальные условия должны дать те же самые результаты, как только система перейдет в установившийся режим.

Численные расчеты по методу Рунге—Кутты 4-го порядка [12, 13] показывают, что мягкий образец испытывает меньшую силу воздействия, действующую в течение большего промежутка времени, а жесткий образец испытывает большую силу, работающую более короткое время, и с ростом жесткости поверхности увеличивается крутизна участка кривой зависимости силы от расстояния, отвечающего за отталкивание. При увеличении жесткости зонда практически пропорционально возрастает амплитуда силы взаимодействия. Частота колебаний зонда при взаимодействии с поверхностью несколько сдвигается в сторону уменьшения по сравнению с резонансной частотой. Значительное изменение жесткости поверхности приводит к незначительному изменению амплитуды колебаний зонда. Следовательно, изменение амплитуды колебаний зонда отражает скорее изменение топографии поверхности образца, чем изменение его локальной жесткости. Расчеты показывают, что значительно более чувствительной к локальной жесткости поверхности образца оказывается фаза колебаний зонда.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, предложенная конструкция СЗМ-датчика локальных взаимодействий обеспечивает переход от режима измерения туннельных токов к режиму силовых измерений в полуконтактной моде без замены зонда и дополнительной юстировки. Возможно также одновременное проведение токовых и силовых измерений.

Работа в СТМ-режиме позволяет получать информацию о топографии поверхности, локальной работе выхода, плотности электронных состояний, а также работать в режиме токовой нанолитографии.

Механическая резонансная частота датчика имеет величину около 10 кГц при добротности в диапазоне 15–20, что позволяет проводить визуализацию топографии поверхности и пространственного распределения локальной жесткости в полуконтактном силовом режиме, работать в режиме динамической силовой нанолитографии. Причем информация о топографии поверхности в основном проявляется через амплитуду переменного электрического напряжения на датчике, в то время как локальная жесткость образца в большей степени влияет на фазовый сдвиг между

подаваемым на вибратор и снимаемым с датчика электрическими напряжениями. В отличие от датчика силового взаимодействия на основе кантилевера и оптической схемы регистрации его отклонения, данная конструкция может работать также при погружении зонда в слой жидкости, не требуя применения специальной жидкостной ячейки.

Датчик данной конструкции апробирован в СЗМ "NanoEducator", выпускаемом ЗАО "Нанотехнология-МДТ".

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быков В.А. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2000. № 1. С. 21–23.
2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004. 144 с.
3. Binning G., Quate C.F. and Gerber C. Atomic force microscopy // Phys. Rev. Lett. 1986. 56930.
4. Chen C.J. Introduction to Scanning Tunneling microscopy. NY.: Oxford Univ. Press, 1993. 220 p.
5. Dürig U., Pohl D.W. and Rohrer F. Near field optical scanning microscopy // J. Appl. Phys. 1986. V. 59, N 10. P. 3318–3327.
6. Martin Y., Williams C.C. and Wickramasinghe H.G. // J. Appl. Phys. 1987. 614723.
7. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, часть 7. М.: Мир, 1966. 292 с.
8. Голубок А.О., Сапожников И.Д., Соловьев А.М., Типисев С.Я. Комбинированные методы сканирующей туннельной и силовой микроскопии // Микроэлектроника. 1997. Т. 26, вып. 4. С. 291–296.
9. Горшков А.Г., Трошин В.Н., Шалашилин В.И. Сопротивление материалов. М.: Физматлит, 2002. 544 с.
10. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2002. 312 с.
11. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 246 с.
12. Вержбицкий В.М. Основы численных методов. М.: Высшая школа, 2002. 847 с.
13. Федоренко Р.П. Введение в вычислительную физику. М.: Изд-во МФТИ, 1994. 558 с.

*Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург (Васильев А.А., Сапожников И.Д., Голубок А.О.)*

*Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (Керпелева С.Ю., Голубок А.О.)*

*ЗАО "Нанотехнология-МДТ", Зеленоград (Котов В.В.)*

Материал поступил в редакцию 14.01.2005.

## LOCAL FORCE AND TUNNELING INTERACTION SENSOR FOR A SCANNING PROBE MICROSCOPE

A. A. Vasiliev, S. Yu. Kerpeleva<sup>1</sup>, V. V. Kotov<sup>2</sup>, I. D. Sapozhnikov, A. O. Golubok

*Institute for Analytical Instrumentation RAS, Saint-Petersburg*

<sup>1</sup>*Saint-Petersburg State University of Information Technology, Mechanics and Optics*

<sup>2</sup>*NANOTEKHNLOGIA-MDT Close Joint-Stock Company, Zelenograd*

The paper presents a multipurpose sensor of tunneling and force interactions in a scanning probe microscope (SPM). A mathematical model of the sensor for the semicontact force mode is offered. The influence of the topography and local rigidity on the SPM image contrast is discussed.