

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**  
**Ордена Ленина**  
**ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ**  
**им. М.В. Келдыша**

**В.А.Карташев, Т.Ф.Бурухина**

**ВЛИЯНИЕ НЕРЕЗОНАНСНЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ**  
**НА ПОЛОЖЕНИЕ ИГЛЫ ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА**

**Москва - 2004**

## Аннотация

Исследуется влияние на положение иглы туннельного микроскопа нерезонансных колебаний в плоскости рабочего стола. Необходимость такого исследования обусловлена малым зазором (около 1 нанометра) между иглой и поверхностью в процессе сканирования.

Показано, что наибольший вклад в ошибки положения иглы вносит прогиб конструкции под действием силы тяжести, который изменяется при раскачивании оси микроскопа. Этот эффект наиболее выражен в низкочастотном диапазоне колебаний. В этом диапазоне его вклад на порядок превосходит вклад поступательных колебаний, которые традиционно учитываются при расчетах влияния внешних возмущений.

Ключевые слова: сканирующий зондовый туннельный микроскоп, малые колебания, чувствительность к возмущениям

## DEPENDENCE OF TIP DISPLACEMENTS FROM NONRESONANCE OSCILLATIONS OF TUNNEL MICROSCOPE BASIS

**V.Kartashev, T.Buruhina**

Dependence of STM tip position from nonresonance oscillations of work table is under investigation. Necessity of investigation is explained by small value of tunnel gap (about 1 nm) between tip and surface.

It is achieved that dependence take place because of STM structure sags under gravity and microscope axis bounces in respond of oscillations of table. On low frequencies this effect is ten times more than translation oscillations of microscope body which traditionally taken into account in estimation of external disturbances.

Key words: scanning probe tunnel microscope, small oscillations, sensitivity to disturbance

Работа выполнена по программе 3.5 Отделения математики РАН «Математическое моделирование в химических и нанотехнологиях»

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Конструкция туннельного микроскопа	4
Глава 2. Собственные колебания иглы, вызванные деформацией звеньев	5
§ 1. Упругие свойства балки звена горизонтальной степени грубого перемещения	8
§ 2. Оценка величины возмущений, вызывающих упругие колебания конца иглы	8
Глава 3. Колебания микроскопа, вызванные воздействиями на основание	11
§ 1. Модель динамики корпуса микроскопа	15
§ 2. Оценка влияния колебаний основания на точность движения иглы	15
Выводы и рекомендации	20
Литература	20

## ВВЕДЕНИЕ

Туннельный микроскоп позволяет исследовать рельеф поверхности с разрешением, которое в десять раз меньше размера атома. Условия, в которых проводятся измерения достаточно сложные, так как рельеф поверхности измеряется с помощью туннельного тока, который возникает при зазоре (туннельный зазор) порядка 1 нанометра. Предельная малость этих величин делает необходимым тщательное исследование факторов, которые могут влиять на точность измерений.

В работе рассматривается влияние нерезонансных колебаний на точность положения иглы микроскопа относительно подложки для туннельного микроскопа, который изготовлен в НАНОЦЕНТРе [1]. Этот микроскоп позволяет проводить измерения рельефа поверхности с точностью до 0,1 нм и осаждать атомы на подложку в среде технологического газа с точностью до 1 нм.

Измерительный блок микроскопа представляет собой жесткую конструкцию, которая подвешена над основанием на пружинном подвесе. Для того, чтобы в максимальной степени снизить влияние внешних колебаний на положение иглы, пружины подвеса имеют достаточно малый коэффициент упругости.

В оценках количественной зависимости амплитуды отклонения иглы от возмущений использовались реальные размеры элементов конструкции микроскопа. Динамические параметры (положение центра масс и моменты инерции) вычислены с учетом конструкции микроскопа и размеров его узлов.

Рассматриваются колебания основания микроскопа в горизонтальной плоскости. Эти возмущения выбраны для исследования по следующим причинам.

- Они действуют в плоскости рабочего стола, на котором установлен микроскоп, и проявляются при раскачивании стола, что является наиболее вероятным возмущением.
- Для вычисления действия этих возмущений используются те же модели динамики, что и для возмущений, которые направлены по другим осям. Поэтому для них может также использоваться разработанная в работе методика вычислений.

Полученные оценки зависимости амплитуды отклонения иглы от колебаний основания позволяют сделать ряд важных выводов, которые необходимо принимать во внимание в дальнейших работах с туннельным микроскопом.

1. Маловероятны отклонения иглы, которые существенно больше, чем 1 нм, так как амплитуда колебаний, которые приводят к таким отклонениям, должна быть настолько велика, что они даже будут заметны визуально.
2. Наибольший вклад в отклонения вносят не динамическая, а статическая составляющая деформации, т.е. прогиб конструкции под действием силы тяжести, которая проявляется при наклонах оси микроскопа. Этот эффект настолько мал, что необходимость его учета возникает лишь постольку с помощью туннельного микроскопа проводятся измерения с точностью до долей атома. В обычных конструкциях он, по-видимому, не учитывается, так как его негативное действие слишком мало и должно проявляться только при изменении наклона оси конструкции машины.

## **Глава 1. КОНСТРУКЦИЯ ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА**

Зондовый туннельный микроскоп [1] предназначен для исследования формы поверхности подложки и манипуляций с атомами, находящимися на ней. Зонд представляет собой тонкую токопроводящую иглу, радиус закругления которой не более 10 нанометров.

Микроскоп имеет 6 степеней подвижности. Пять из них приводят в движение иглу. Шестая степень подвижности используется для вертикального перемещения сканируемой подложки. Все приводы выполнены из пьезокерамики.

Для перемещения иглы в горизонтальной плоскости используются две степени грубых перемещений и две степени точного перемещения. По вертикали игла перемещается одной степенью точного перемещения.

С помощью приводов точных перемещений осуществляется сканирование участка поверхности подложки. Диапазон их перемещений 0,6 микрон с шагом 0,01 нанометров ( $0,1 \text{ \AA}$ ). Скорость перемещения 10 нм/сек ( $100 \text{ \AA}/\text{сек}$ ).

Приводы грубых перемещений иглы и привод перемещения подложки по вертикали используются для быстрого подвода иглы к исследуемому участку поверхно-

сти. Диапазон их перемещений до 10 мм с шагом 0,1 микрон. Скорость перемещения грубых приводов 1 мм/мин.

## **Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ПРИВОДЯЩИХ К КОЛЕБАНИЯМ ИГЛЫ ОТНОСИТЕЛЬНО ПОДЛОЖКИ**

Упругость звеньев манипулятора перемещений иглы является причиной отклонений в движениях иглы относительно подложки. Например, колебания корпуса микроскопа под действием возмущений вызывают вынужденные колебания иглы.

Оценка амплитуды колебаний иглы связана с исследованием вынужденных колебаний тела, закрепленном на упругой балке, основание которой совершает колебания заданной частоты. В главе даются оценки допустимой амплитуды колебаний основания, при которых отклонения иглы не превышают заданной ошибки измерения рельефа поверхности.

В процессе исследования упругих свойств звеньев манипулятора горизонтальных перемещений оказалось, что перемещения иглы под действием силы тяжести на несколько порядков превышают допустимую погрешность измерения. Этот эффект является существенным только при измерении величин с нанометровыми точностями. В отсутствие колебаний основания им можно пренебречь, так как ориентация корпуса микроскопа не меняется. Однако, даже незначительный наклон оси измерительного блока микроскопа достаточен для того, чтобы изменение направления силы тяжести привело бы к смещению иглы на значительное расстояние относительно подложки. Причиной возникновения наклона оси может стать упругий подвес.

По этой причине при оценке амплитуды отклонений в уравнениях движения рассматриваются члены, которые учитывают как поступательное, так и вращательное движение микроскопа.

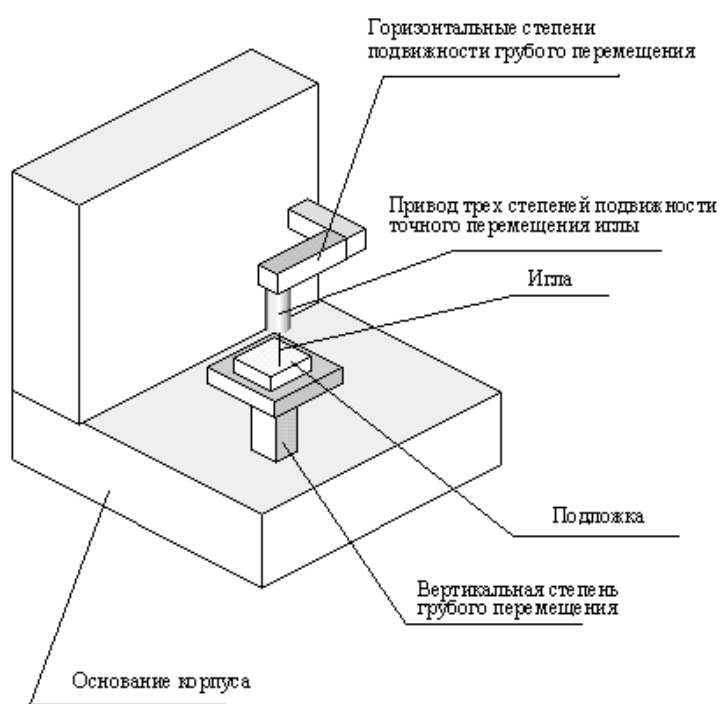


Рис. 1. Схема устройства туннельного микроскопа

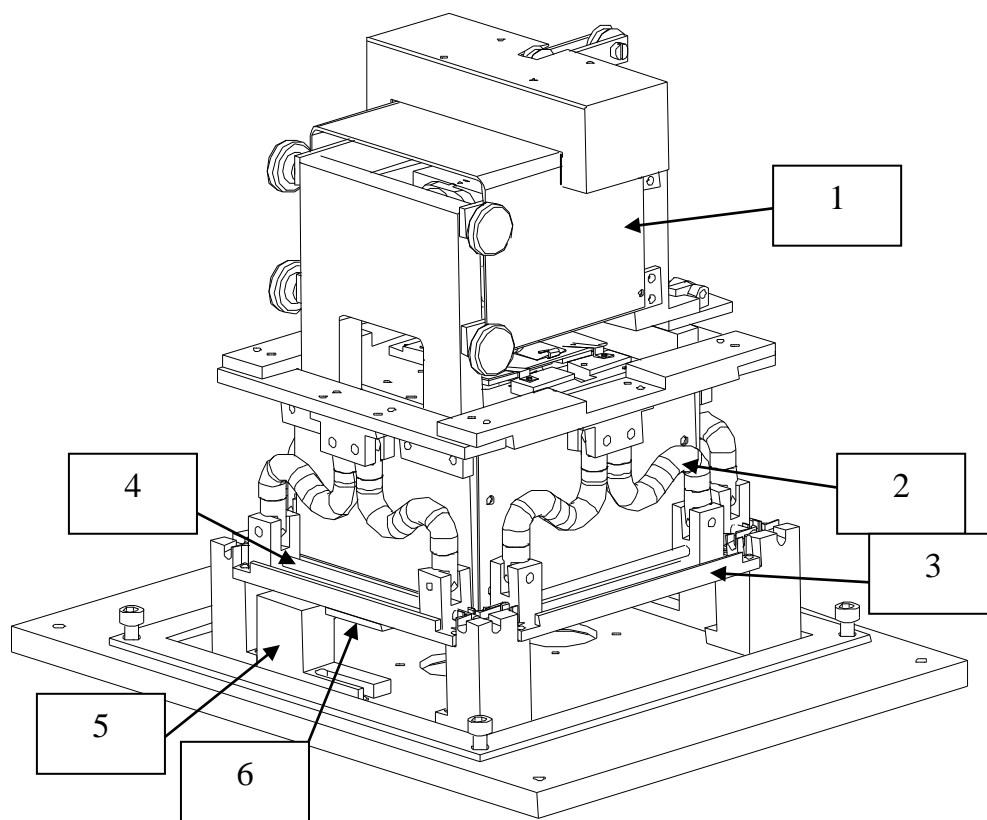


Рис.2 Измерительный блок микроскопа с пружинами подвеса  
1 – блок манипуляторов, 2 – пружины подвеса, 3 и 4 – нижняя опора пружин, 5 – упор фиксатора упругого подвеса, 6 – фиксатор подвеса.

## § 1. Упругие свойства звена манипулятора горизонтальных перемещений

Для расчетов нам потребуется знать упругие свойства звеньев горизонтальной степени грубого перемещения (см. рис 1) с учетом условий их нагружения.

Каждое из этих звеньев нагружено, как консольная балка (рис. 3). Например, на первое звено действует сила тяжести веса частей степени подвижности, которые расположены за ним. Все звенья выполнены из алюминия. Расчеты показывают, что их суммарный вес составляет около 50 Г.

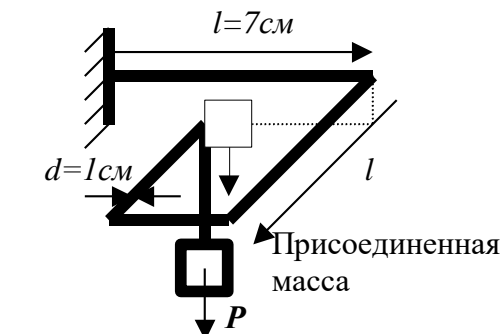


Рис. 3. Условия нагружения первого звена

Дальнейшие исследования связаны с учетом влияния упругости первого звена манипулятора грубых горизонтальных перемещений, так как податливость этого звена вносит наибольший вклад в возмущение движений иглы. Массу конструкции манипулятора, находящегося за этой степенью будем называть присоединенной массой.

Будем считать, что вся присоединенная масса сосредоточена на конце балки. Это приведет к тому, что вычисленная величина прогиба окажется примерно в два раза больше, чем реальная.

Деформация консольно нагруженной балки в каждой ее точке линейно зависит от расстояния до точки закрепления  $x$  (рис. 3):

$$\varepsilon(x) = \frac{P(l-x)}{EJ}. \quad (1)$$

Здесь

$\varepsilon(x)$  – деформация в точке с координатой  $x$  относительно основания балки,

$P$  (50 Г) - вес груза, действующего на конец балки,

$l$  (7 см) - длина балки,

$E$  ( $2/3 \cdot 10^6$  кг/см<sup>2</sup>), - модуль упругости алюминия, из которой сделаны звенья ма-

нипулятора,

$J$  - геометрический момент инерции сечения балки относительно оси, перпендикулярной силе тяжести и оси балки. Для балки квадратного сечения толщиной  $d=1$  см  $J = 1/12 d^4 = 0,08$  см<sup>4</sup>.



Подставив в формулу (1) численные значения ее констант, вычислим упругое перемещение конца балки  $r$  и ее упругость.

Для этого надо два раза проинтегрировать выражение для деформации по длине балки.

$$r = \frac{P}{EJ} \cdot \frac{l^3}{6} = \frac{50 \cdot 10^{-3}}{2/3 \cdot 10^6 \cdot 0,08} \cdot \frac{7^3}{6} [\text{см}] = 50 \cdot 10^{-6} [\text{см}] = 500 [\text{нм}].$$

Прогибом остальных звеньев мы пренебрежем. Расчеты показывают, что их величина сравнима с прогибом первого звена.

Теперь учтем деформацию кручения упругой балки. Деформация кручения  $\varepsilon_{\text{кр}}$  консольно нагруженной балки пропорциональна моменту кручения, возникающим под действием силы тяжести. Этот момент создается весом звеньев, которые находятся за первым звеном. Плечо момента равно половине длины балки. С учетом этого

$$\varepsilon_{\text{кр}} = \frac{P \frac{l}{2}}{\frac{1}{3} EJ}.$$

Здесь

$P$  (50 Г) - вес груза, действующего на балку,

$l$  (7 см) - длина балки второй степени подвижности,

$E$  - модуль упругости алюминия,

$J_{\text{кр}}$  - геометрический момент инерции осевого сечения балки, перпендикулярной силе тяжести и оси балки. Для балки квадратного сечения толщиной 1 см

$$J \sim 0,1 d^4 = 0,1 \text{ см}^4.$$

Подставив в формулу (1) численные значения ее констант, вычислим упругое перемещение конца балки  $r_{\text{кр}}$ , вызванное деформацией кручения и упругость кручения. Оно получается двукратным интегрированием деформации от упругого кручения по длине балки  $l$ :

$$r_{\text{кр}} = \frac{P \frac{l}{2}}{\frac{1}{3} EJ} \cdot \frac{l^2}{2} = \frac{50 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{7}{2}}{\frac{1}{3} \cdot \frac{2}{3} \cdot 10^6 \cdot 0,1} \cdot \frac{7^2}{2} = 40 \cdot 10^{-6} [\text{см}] = 400 [\text{нм}].$$

Следует заметить, что реальное перемещение будет больше вычисленного, так как кручение испытывают все звенья, которые расположены за первым звеном. Оцен-

ки показывают, что их вклад в общее перемещение соизмерим с вкладом первого звена.

Таким образом, прогиб конструкции манипуляторов под действием силы тяжести составит не менее  $500 \text{ нм} + 400 \text{ нм} \approx 1000 \text{ нм} = 1 \text{ мкм}$ .

Упругость конструкции манипуляторов  $k$  равна отношению веса груза к упругому перемещению, которое складывается из прогиба балки и ее кручения:

$$k = \frac{P}{r + r_{кр}} = \frac{50}{500 + 400} [\text{Г/нм}] \approx 0,05 \text{ Г/нм}.$$

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Прогиб конструкции манипулятора грубых горизонтальных перемещений под действием силы тяжести составляет около 1 микрона. Это почти на 5 порядков превосходит величину, с которой проводятся измерения формы поверхности.
2. Конструкция манипулятора имеет большую податливость. Например, 1 Г дополнительного веса вызывает смещение на 20 нм ( $200\text{А}^\circ$ ), т.е. в 2000 раз большее, чем точность, с которой измеряется рельеф поверхности.
3. Обнаруженные отклонения от ненагруженного положения манипулятора имеют статический характер. Поэтому они не сказываются на работе микроскопа до тех пор, пока на него не действуют толчки и колебания, вызванные внешним воздействием.

Наклон оси приводит к изменению деформации в конструкции микроскопа. Как показали расчеты, тензор деформации манипулятора упругих перемещений близок к сфере. Поэтому при наклоне оси возникает горизонтальная составляющая смещения иглы, которая пропорциональна углу наклона и величине прогиба вдоль вертикали (рис. 4). Для того, чтобы оценить амплитуду отклонений оси необходимо рассмотреть зависимость колебаний манипулятора грубых перемещений и измерительного блока от колебаний основания микроскопа.

Например, отклонение оси на  $1/1000$  рад (приблизительно 5 угловых минут) вызывает смещение иглы относительно подложки на 1 нанометр. Даже для измерений с точностью до 0,1 нанометра (около 1 атома) эта величина является неприемлемо большой.

Рассматриваемый эффект интересен тем, что малые силы и малые величины возмущений приводят к значительным отклонениям в положении иглы. В обычных конструкциях прогибы под действием статических нагрузок не являются существенными для их работы.

## **§ 2. Оценка величины отклонений иглы при действии периодических возмущений на основание измерительного блока**

При колебании основания измерительного блока игла туннельного микроскопа совершает колебания относительно подложки в силу упругости балочной конструкции, на конце которой она расположена.

Поэтому задача оценки величины колебаний иглы сводится к рассмотрению вынужденных колебаний конца балочной конструкции относительно ее основания при раскачивании основания. По каждой из осей эти колебания даются уравнением

$$m(x + A \sin ft)'' = -kx.$$

В этом уравнении

$x$  – отклонение приведенной массы от положения равновесия относительно подложки,

$m$  – присоединенная масса балочной конструкции манипулятора горизонтальных перемещений,

$k$  – коэффициент упругости балочной конструкции,

$A$  – амплитуда периодических колебаний основания,

$f$  – круговая частота колебаний,

$t$  – время.

Перепишем уравнение в виде

$$m x'' = -k x + Amf^2 \sin ft$$

Решение этого уравнения является суммой общего решения однородного уравнения и частного решения исходного.

Решение однородного уравнения имеет вид

$$x_{\text{одн}} = C \sin \omega t + D \cos \omega t,$$

где

$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  - собственная круговая частота приведенной массы,

$C$  и  $D$  – константы, которые задаются начальными условиями.

Будем предполагать, что частоты колебаний основания и собственной частоты колебаний приведенной массы неравны. В этом случае частное решение запишется в виде

$$x_{\text{одн}} = U \sin ft + V \cos ft.$$

Константы  $U$  и  $V$  должны быть выбраны такими, чтобы это соотношение удовлетворяло исходному уравнению.

После подстановки в исходное уравнение получим  $U = \frac{Amf^2}{k - mf^2}$ ,  $V = 0$ .

При нулевых начальных условиях  $C = \frac{-Amf^3}{(k - mf^2)\omega}$ ,  $D = 0$ .

Колебания иглы относительно основания совпадают с колебаниями приведенной массы, на конце которой она расположена. Они даются выражением

$$\frac{-Amf^3}{(k - mf^2)\omega} \sin \omega t + \frac{Amf^2}{k - mf^2} \sin ft.$$

Ввиду сделанного предположения о несоизмеримости частот колебаний основания и собственной частоты колебаний приведенной массы амплитуда колебаний иглы будет равна сумме амплитуд колебаний, т.е.

$$\frac{Amf^2}{|k - mf^2|} \left(1 + \frac{f}{\omega}\right).$$

Принимая во внимание, что  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ , приведем это выражение к виду

$$\frac{Af^2}{|\omega^2 - f^2|} \left(1 + \frac{f}{\omega}\right).$$

Значение этого выражения равно  $\frac{Af^2}{\omega|\omega-f|}$ . Тем не менее, для дальнейшего

оказывается полезным анализ вклада общего решения однородного уравнения и частного решения в формулу амплитуды колебаний, которая дается предыдущим выражением.

Непосредственно из нее следует, что при малых частотах колебаний ( $f \ll \omega$ ) вкладом общего решения можно пренебречь. При больших частотах ( $f \gg \omega$ ) незначительным оказывается вклад частного решения, причем амплитуда колебаний больше частного решения в  $f/\omega$  раз ( $f/\omega \gg 1$ ).

После подстановки фактических значений собственной частоты  $\omega$  амплитуда колебаний получится равной

$$\frac{An_f^2}{n_\omega |n_\omega - n_f|} = \frac{n_f^2 A}{500 |500 - n_f|} = \frac{2 \cdot 10^{-3} n_f^2 A}{|500 - n_f|}.$$

Здесь

$$n_\omega = \frac{\omega}{2\pi} = 500 \text{ [Гц]} - \text{собственная частота колебаний приведенной массы, вычисленная с учетом значения массы корпуса и упругости подвеса.}$$

$$n_f = \frac{f}{2\pi} \text{ [Гц]} - \text{частота колебания основания.}$$

Из полученной формулы следует, что амплитуда колебания иглы зависит также

от  
то-  
ле-

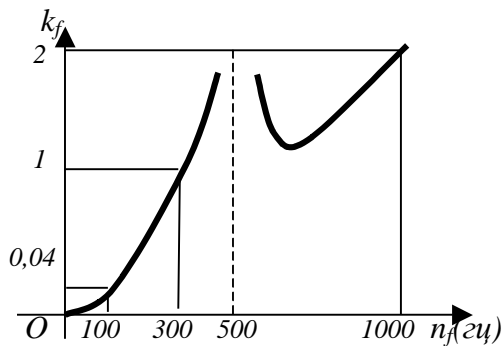


Рис. 4

амплитуды колебаний блока

ров. На рис. 4 эта зависимость представ-

на графически:  $k_f = \frac{2 \cdot 10^{-3} n_f^2}{|500 - n_f|}$ .

Из рисунка следует, что балочная конструкция манипулятора достаточно хорошо гасит только низкочастотные

колебания (до 100 гц). В этом диапазоне частот зависимость между амплитудой колебания основания и колебаниями иглы меньше 0,04. В остальном диапазоне частот колебания основания манипулятора практически без изменений передаются игле.

Полученные данные удобно представить в виде таблицы. В первом столбце таблицы задаются величина колебаний иглы. Во втором и третьем столбцах показано, с какой амплитудой должно колебаться основание блока манипуляторов, для того, чтобы возникли заданные колебания иглы.

Таблица 1

Амплитуда вынужденных колебаний иглы	Амплитуда колебаний измерительного блока с частотой меньше 5 Гц	Амплитуда колебаний измерительного блока с частотой около 100 Гц	Амплитуда колебаний измерит. блока с частотой больше собственной частоты колебаний $\omega$
$0,1 \text{ \AA} = 0,01 \text{ нм}$	$>0,1 \text{ мкм}$	$>0,02 \text{ мкм}$	$0,01 \text{ нм}$
$1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ нм}$	$>10 \text{ мкм}$	$>0,2 \text{ мкм}$	$0,1 \text{ нм}$
$1 \text{ нм}$	$>100 \text{ мкм} = 0,1 \text{ мм}$	$>2 \text{ мкм}$	$1 \text{ нм}$

Первая строка таблицы соответствует точности, которой необходимо достичь для того, чтобы получить изображение атома.

Вторая строка соответствует точности работы туннельного микроскопа ЛУЧ-2.

Третья строка соответствует точности, с которой предполагается осуществлять технологические операции по осаждению атомов на поверхность.

Полученные значения амплитуды колебаний относятся к основанию манипулятора грубых перемещений. Для того, чтобы оценить зависимость возмущений движения иглы от колебаний опоры, данные второго и третьего столбцов следует пересчитать с учетом упругости подвеса микроскопа. Эти расчеты приведены в главе 4. Тем не менее, представленные данные позволяют сделать вывод о том, что наибольшую опасность представляют высокие частоты колебаний. Кроме того, если вынужденные колебания далеки от резонанса, то они не приводят к отклонению иглы более, чем на  $1 \text{ нм}$ .

### Глава 3. КОЛЕБАНИЯ МИКРОСКОПА, ВЫЗВАЕМЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ НА ЕГО ОСНОВАНИЕ

Измерительный блок микроскопа находится на упругом основании. Пружины подвески снижают действие колебаний на измерительную часть микроскопа. В настоящей главе дается оценка амплитуды колебаний в зависимости от частоты.

Оказалось, что пружинный подвес достаточно хорошо снижает влияние возмущений, приводящих к отклонениям в плоскости стола. Однако, колебания с частотой 1 – 5 Гц приводят к существенным отклонениям оси измерительного блока микроскопа от вертикали. В результате этого изменяются деформации блока манипуляторов, что приводит к смещениям иглы. Оценки показывают, что эти смещения на порядок больше, чем при поступательных колебаниях микроскопа.

#### § 1. Модель динамики микроскопа

Измерительный блок имеет форму прямоугольного параллелепипеда. Он опирается на пружины, которые закреплены в средней части параллелепипеда (рис. 5).

Пружины имеют большой ход для того, чтобы гасить ударные и колебательные нагрузки идущие со стороны основания. Упругость каждой пружины 25 Н/м. Жесткость всех пружин одинакова.

Подвеска позволяет измерительному блоку совершать продольные и вращательные перемещения небольшой амплитуды.

Основание измерительного блока имеет длину примерно 10 см. Центр тяжести блока расположен ниже плоскости опоры пружин примерно на 5 см. В расчетах предполагается, что он проектируется в центр основания.

Свяжем с кожухом микроскопа подвижную систему координат  $O_MXYZ$  (рис.4), центр которой поместим в центр плоскости сечения подвеса. Оси направим вдоль сторон основания. Система координат  $O_MXYZ$  при толчках движется вместе с корпусом.

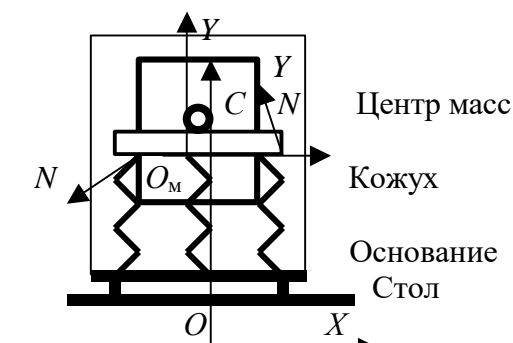


Рис. 5. Схема подвеса микроскопа

Абсолютную систему координат  $OXYZ$  свяжем со столом, на котором стоит кожух (рис. 5).

Рассмотрим влияние возмущений, действующих вдоль оси  $OX$ .

В случае малых перемещений координата  $X_M$  положения центра масс микроскопа может быть найдена из формулы

$$X_M = -\varphi h_c + x_c + u(t).$$

Здесь  $\varphi$  - угол поворота корпуса относительно оси  $OY$ ,  $h_c$  -  $Z$  координата центра масс микроскопа в осях  $O_MXYZ$ ,  $x_c$  и  $z_c$  - координаты центра масс в осях  $O_MXYZ$ ,  $u(t)$  - смещение точки  $O_M$  в осях  $OXYZ$ , которое вызвано действием возмущения.

Таким образом, уравнения движения микроскопа вдоль оси  $OX$  имеют вид:

$$m(-\varphi h_c + x_c + u(t))'' = N_x,$$

$$J \ddot{\varphi} = M_y,$$

$$M_y = M_P + M_{N_x} + M_{N_z},$$

$$M_P = -x_c P, M_{N_x} = h_c N_x, M_{N_z} = l N_z,$$

$$N_x = -k x_c, N_z = -k l \varphi.$$

Здесь  $J$  - момент инерции измерительного блока относительно оси  $OY$ ,  $N_x$  - сила натяжения пружин, которая пропорциональна смещению блока по оси  $OX$ ,  $k$  - коэффициент упругости четырех пружин (100 Н/м),  $M_y$  - суммарный момент относительно центра масс: веса блока ( $M_P$ ), сил горизонтального натяжения пружин ( $M_{N_x}$ ), момент, создаваемый вертикальным натяжением пружин ( $M_{N_z}$ ),  $N_x$  и  $N_z$  - компоненты силы действия пружин на измерительный блок (для правой пружины на рис. 4). Подставив выражения для сил и моментов, получим

$$m(-\varphi h_c + x_c + u(t))'' = -k x_c,$$

$$J \ddot{\varphi} = -(k h_c + P)x_c - k l^2 \varphi.$$

## § 2. Оценка отклонений в положении иглы при колебаниях основания

Рассмотрим отклонения в движении иглы, вызванные колебательными воздействиями на основание. Для этого положим в уравнениях динамики  $u(t) = A \sin ft$  и перепишем их в виде:

$$m(-\varphi h_c + x_c)'' + kx_c = Am f^2 \sin ft,$$

$$J \ddot{\varphi} + (k h_c + P)x_c + k l^2 \varphi = 0.$$



Решение этого уравнения можно представить в виде суммы общего решения однородного уравнения и частного решения исходного. Также как и в предыдущем параграфе, можно показать, что для частот много меньших, чем собственные частоты колебаний вкладом общего решения однородного уравнения можно пренебречь. Для частот, которые много больше собственных частот колебаний корпуса, амплитуда колебаний больше амплитуды колебаний частного решения в  $f/k$  раз, где  $f$  – частота колебаний, величина  $k$  – соизмерима с величинами собственных частот. Следовательно, для низких частот достаточно точную оценку амплитуды колебаний можно получить, если найти частное решение. Амплитуда колебаний для высоких частот будет в несколько раз больше амплитуды колебаний частного решения.

Частное решение является линейной комбинации синусов и косинусов:

$$x_c = C_x \sin ft + D_x \cos ft,$$

$$\varphi = C_\varphi \sin ft + D_\varphi \cos ft.$$

Подставив эти выражения в уравнения, получим систему уравнений для коэффициентов  $C_x$ ,  $D_x$ ,  $C_\varphi$  и  $D_\varphi$ :

$$\begin{pmatrix} -mf^2 + k & mhcf^2 & 0 & 0 \\ khc + P & -Jf^2 + kl^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -mf^2 + k & mhcf^2 \\ 0 & 0 & khc + P & -Jf^2 + kl^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_x \\ C_\varphi \\ D_x \\ D_\varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Amf^2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Из двух последних строк следует, что в решениях отсутствуют косинусы, так как для  $D_x$  и  $D_\varphi$  получаются только нулевые решения.

Из первых двух строк последовательно находим:

$$C_x = \frac{Jf^2 - kl^2}{kh_c + P} C_\varphi;$$

$$C_\varphi = -\frac{Amf^2(kh_c + P)}{(mf^2 - k)(Jf^2 - kl^2) + mh_c f^2(kh_c + P)};$$

$$C_x = -\frac{Amf^2(Jf^2 - kl^2)}{(mf^2 - k)(Jf^2 - kl^2) + mh_c f^2(kh_c + P)}.$$

Рассмотрим теперь вклад общего решения уравнения в амплитуду колебаний.

Числовые значения констант равны:

$$m = 1 \text{ кг}, J = 5 \cdot 10^{-3} \text{ кг м}^2, k = 100 \text{ Н/м},$$

$$h_c = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}, l = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}, f = 2\pi n \text{ (} n \text{ – частота в Гц)}.$$

В итоге

$$C_\varphi = -\frac{A500n^2}{(36n^2 - 100)(36 \cdot 10^{-3}n^2 - 25 \cdot 10^{-2}) + 27n^2};$$

$$C_x = -\frac{A36n^2(1 \cdot 10^{-3}36n^2 - 25 \cdot 10^{-2})}{(36n^2 - 100)(36 \cdot 10^{-3}n^2 - 25 \cdot 10^{-2}) + 27n^2}.$$

На рис. 6 и 7 изображены зависимости полученных коэффициентов от частоты.

Как было сказано выше, амплитуда колебаний частного решения дает представление об амплитуде колебаний всего решения только для низких частот. Для высоких частот амплитуда полных колебаний в несколько раз

выше, причем растет пропорционально частоте. График амплитуды колебаний оси

при этом практически не изменится, так как

на больших частотах коэффициент  $C_\varphi$  пропорционален  $n^2$ . Амплитуда колебаний начала координат, которая дается коэффициентом  $C_x$ , будет возрастать линейно с ростом частоты возмущений.

Скорректированный график (график

амплитуды поступательных колебаний) изображен на рисунке 8.

Из рисунков можно сделать следующие выводы.

- Упругий подвес микроскопа эффективно снижает действие возмущений в горизонтальной плоскости, только если их частота не превышает нескольких десятков

герц. Чувствительность к горизонтальным возмущениям для высоких частот возрастает с ростом частоты.

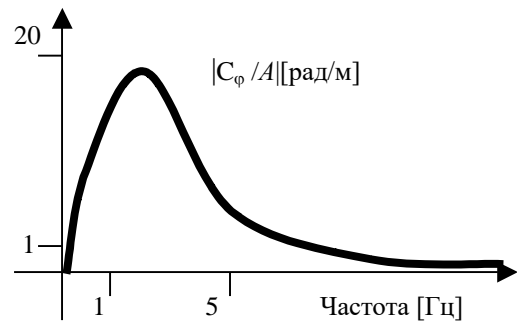


Рис. 6

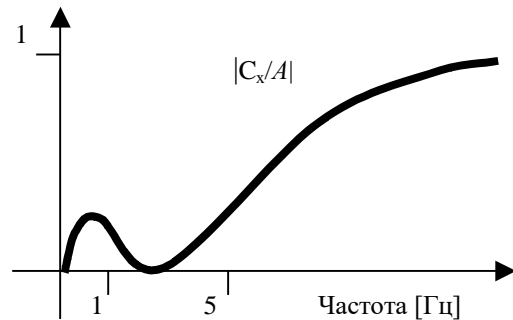


Рис. 7

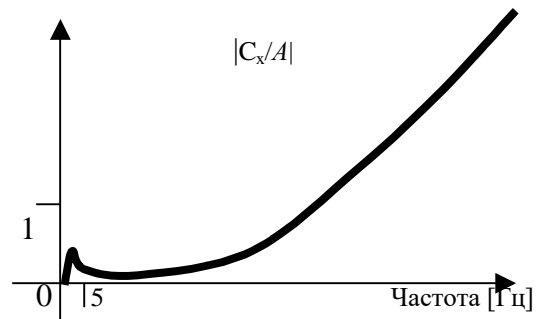


Рис. 8

- Подвес препятствует раскачиванию измерительного блока во всем диапазоне частот, за исключением возмущений с частотой от 0,5 Гц до 10 Гц. В указанном диапазоне частот возмущения приводят к наклонам вертикальной оси.

Амплитуда наклона достаточно мала. Например, колебания основания в 10 микрон способны привести к наклону оси примерно  $1 \cdot 10^{-4}$  рад или 0,3 угловых минуты. Тем не менее, наклон оси приведет к смещению зонда (ввиду изменения деформации конструкции манипулятора грубых перемещений) на 0,1 нанометра, т.е. на величину, которая соизмерима с точностью работы прибора. В таблице 2 приведены численные значения результатов расчета влияния этого фактора на смещение зонда для разных значений амплитуд и частот колебания основания.

Таблица 2

Амплитуда вынужденных колебаний иглы	Амплитуда возмущений с частотой меньше 5 Гц	Амплитуда возмущений с частотой больше собственной частоты колебаний
0,01 нм = 0,1 A°	0,5 мкм	0,001 нм
0,1 нм = 1 A°	5 мкм	0,01 нм
1 нм	50 мкм = 0,05 мм	0,1 нм

В таблице 3 приводятся численные значения результатов расчета величин возмущений для поступательных колебаний.

Таблица 3

Амплитуда вынужденных колебаний измерительного блока	Амплитуда колебаний основания с частотой меньше 5 Гц	Амплитуда колебаний основания с частотой больше собственной частоты колебаний подвеса
0,1 мкм	5 мкм	0,02 мкм
1 мкм	50 мкм = 0,05 мм	0,2 мкм
10 мкм	500 мкм = 0,5 мм	2 мкм

Для того, чтобы рассчитать вклад поступательных колебаний, необходимо объединить таблицы 1 и 3. Результат представлен в таблице 4.

Таблица 4

Амплитуда вынужденных колебаний иглы	Амплитуда возмущений с частотой меньше 5 Гц	Амплитуда возмущений с частотой больше собственной частоты колебаний
0,01 нм = 0,1 А°	5 мкм	0,002 нм
0,1 нм = 1 А°	50 мкм = 0,05 мм	0,02 нм
1 нм	500 мкм = 0,5 мм	0,2 нм

Сравнивая таблицы 2 и 3, находим, что:

- для всех частот вклад деформаций конструкции в колебания иглы больше вклада поступательных колебаний, причем для частот до 5 Гц – на порядок;
- высокочастотные колебания основания практически не гасятся конструкцией микроскопа;
- отклонение иглы более, чем на несколько нанометров маловероятно, та как это возможно только при амплитуде колебаний порядка 0,1 мм.

## ВЫВОДЫ

Результаты исследования влияния возмущений на точность движения иглы туннельного микроскопа позволяет сделать следующие выводы.

1. Туннельный микроскоп рассмотренной конструкции имеет достаточно высокую чувствительность к периодическим возмущениям основания с частотой от 0,5 Гц до 5 Гц. Эти возмущения приводят к раскачиванию оси микроскопа, и, к смещению иглы вследствие изменения деформации, вызванных изменением вектора силы тяжести относительно манипулятора грубых перемещений.
2. Для того, чтобы вызвать отклонение иглы существенно больше 1 нанометра основание манипулятора должно совершать колебания в горизонтальной плоскости с амплитудой порядка 0,1 мм.

Микроскоп обладает высокой чувствительностью к высокочастотным колебаниям, которые практически не гасятся его конструкцией. Этот вывод существенен тем, что требуется обеспечить движение иглы с нанометровой точностью.

## Л и т е р а т у р а

1. V.Kartashev, A.Kotenkov, V.Kuzkin, M.Stepanov, *Problems of tunnel microscope controlling*. Rep. on Int. Workshop on Micro Robot, Micro Machines and Micro Systems. IARP-2003. Proceed. p.p. 331-332. Moscow, Russia, April 2003.