

УДК 537.533.35

Сканирующий туннельный микроскоп при атмосферном давлении. Голубок А.О., Давыдов Д.Н., Тимофеев В.А., Тимисев С.Я./Научное приборостроение. Электронно-ионная оптика. Л.:Наука, 1989, с.72-77.

Обсуждены основные принципы, описана конструкция и приведены параметры аналитической части сканирующего микроскопа, используемого в экспериментах при атмосферном давлении. Лит. - 17 назв., ил. - 5.

А.О.Голубок, Д.Н.Давыдов, В.А.Тимофеев, С.Я.Типисев (НТО АН СССР)

СКАНИРУЮЩИЙ ТУННЕЛЬНЫЙ МИКРОСКОП ПРИ АТМОСФЕРНОМ ДАВЛЕНИИ

В настоящее время активное развитие в аналитическом приборостроении получило новое направление – сканирующая туннельная микроскопия (СТМ). Исследования последних лет [1, 2] показали, что с помощью СТМ возможно решение широкого класса задач в области физики поверхности, физики твердого тела, электрохимии, микроэлектроники, молекулярной биологии и т.д. Естественно, что конструкция СТМ во многом определяется классом решаемых задач и зависит от того, в какой среде будут проводиться исследования: в вакууме, газе или жидкости. В частности, в экспериментах, проводимых при атмосферном давлении, отсутствуют проблемы, связанные с заменой острия и образца, а основными узлами аналитической части СТМ являются узел сближения острия с образцом, узел микросканирования и узел виброзащиты.

Защита от вибраций

В СТМ необходимо устанавливать и поддерживать расстояние между острием и образцом с точностью до $\sim 10^{-10}$ в условиях постоянно существующего сейсмического фона и зачастую вблизи источников вибраций инфразвукового и звукового диапазона. Амплитуды вибропомех в месте установки СТМ обычно имеют величину 0,1 мкм, что на много порядков превышает точность измерений. Поэтому вопросам виброзащиты СТМ и виброустойчивости его конструкции уделяется большое внимание. По существу, система виброзащиты является составной частью СТМ.

С точки зрения виброзащиты полезно рассмотреть идеализированную конструкцию СТМ, состоящую из узла туннелирования и системы виброзащиты. Для качественного анализа остановимся на простейшей механической модели СТМ (рис.1), в которой система виброзащиты и узел туннелирования аппроксимируются механическими осцилляторами с массами m_1 , m_2 , коэффициентами жесткости пружин k_1 , k_2 , резонансными частотами f_1 , f_2 и коэффициентами демпфирования α_1 , α_2 соответственно; a – амплитуда вибраций основания относительно уровня отсчета $x = 0$; x_1 , x_2 – колебания

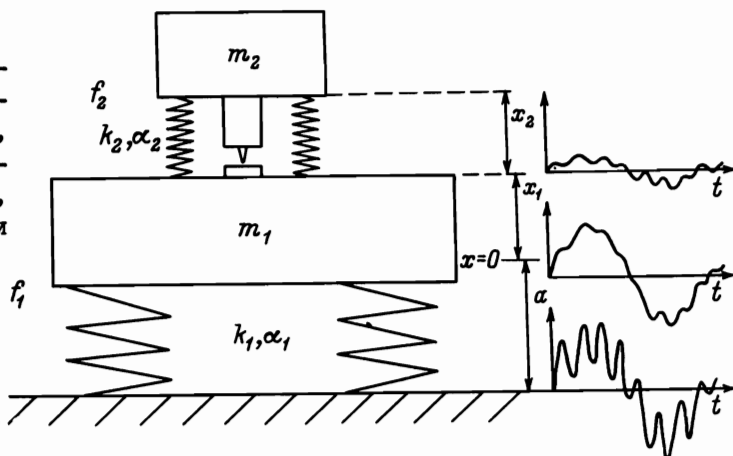


Рис.1. Механическая модель СТМ

m_1 , относительно уровня $x = 0$; x_2 — колебания острия относительно поверхности образца.

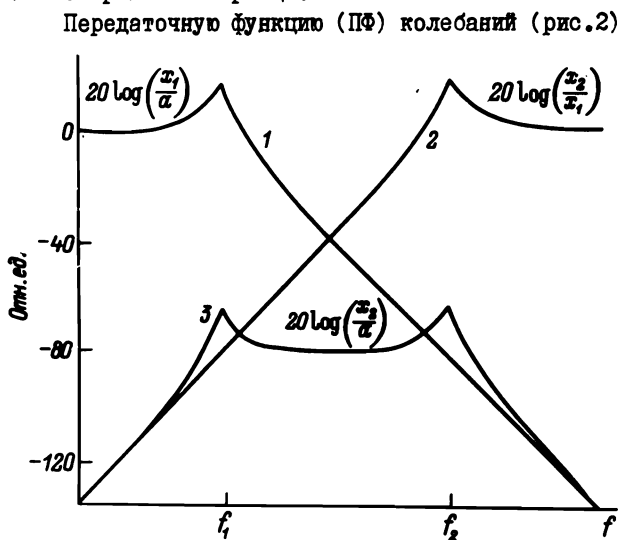


Рис.2. Передаточные характеристики механической модели СТМ

острия относительно поверхности образца (кривая 3) в рамках рассмотренной модели можно представить в виде произведения ПФ однозвенной системы виброзащиты (кривая 1) и ПФ узла туннелирования (кривая 2). Видно, что ослабления вибропомех следует добиваться путем увеличения собственной резонансной частоты f_2 узла туннелирования СТМ и уменьшения собственной резонансной частоты f_1 системы виброзащиты, т.е. путем увеличения m_1 и k_2 и уменьшения m_2 и k_1 . Кроме того, эффективного ослабления вибропомех можно достигнуть, применяя многозвенные системы виброзащиты с более крутыми

спадом ПФ, состоящими из нескольких последовательно соединенных механических осцилляторов.

В настоящее время известны различные системы виброзащиты СТМ. Среди них подвес, использующий эффект левитации постоянного магнита над сверхпроводником [3], пружинный подвес с демпфированием [4], двойной пружинный подвес [3, 4], многослойный амортизатор [3-5]. Кроме того, применяли подвесы на резиновых жгутах [4], помещали СТМ в ящик с песком, где энергия упругих волн поглощалась за счет трения между частицами песка [6].

Понятно, что при разработке прибора необходимо обеспечить минимальные габариты системы виброзащиты, а в случае высоковакуумного СТМ также и совместимость с высоковакуумной средой.

В связи с этим наиболее оптимальной представляется система виброзащиты, состоящая из многослойного амортизатора, помещенного на пружинный подвес. При этом оптимальность виброзащиты достигается за счет низкой резонансной частоты пружинной подвески и резкого спада ПФ на высоких частотах, достигаемого в многослойном амортизаторе.

Используемый в наших экспериментах амортизатор представляет собой стопку из семи массивных дисков толщиной 12 мм из нержавеющей стали, имеющих одинаковый наружный диаметр 180 мм и различные диаметры внутренних отверстий, увеличивающиеся от нижнего диска (70 мм) к верхнему (120 мм). При этом центр тяжести многослойного амортизатора смещается к нижнему диску. В качестве упругих звеньев используются прокладки из резины типа ИРП-2043. Электроподводы к узлу туннелирования выполнены из тонких проводников диаметром 50 мкм, которые пропускаются между дисками через резиновые прокладки.

Одной из основных конструкторских проблем в СТМ, работающем при атмосферном давлении, является выбор принципа сближения острия с образцом. Конструкция узла сближения должна обеспечивать подвод острия к поверхности образца до установления окончательного зазора между ними $5\text{--}10 \text{ \AA}$. Известны различные конструкции узла сближения. Среди них пьезокерамические движители с электростатическим прижимом [3, 7], инерционные пьезокерамические движители [8, 9], электромагнитные движители [10] и различные варианты механических систем с большим коэффициентом редукции перемещения [11, 12].

Наиболее простым и надежным узлом сближения острия с образцом представляется узел на основе инерционного пьезокерамического движителя (рис.3). Для исключения касания острия с поверхностью образца используется следующий алгоритм сближения. Перед каждым шагом сближения микросканер выдвигает острие к поверхности образца (диапазон перемещения $0\text{--}6000 \text{ \AA}$), при этом производится измерение туннельного тока. Если необходимое значение туннельного тока не достигается, острие отодвигается назад и делается следующий шаг сближения.

Перемещение образца 1, закрепленного на держателе 2, осуществляется с помощью пластины 3 толщиной

$S = 4 \text{ мм}$, изготовленной из пьезокерамики ЦТС-19. Пластина опирается тремя полусферическими сапфировыми опорами 4 на основание 5, на котором также закреплен узел микросканирования 6.

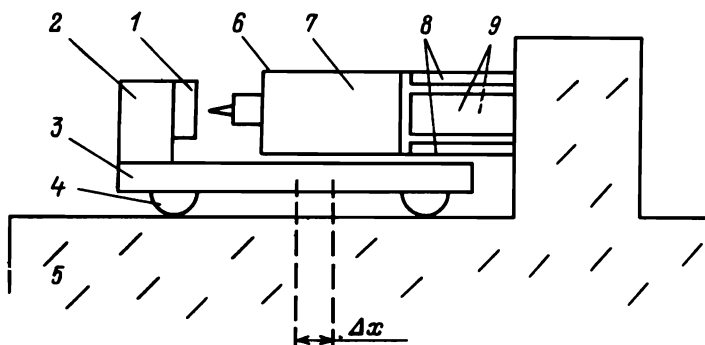


Рис.3. Узел туннелирования

К пластине прикладываются несимметричные треугольные импульсы напряжения с амплитудой до 500 В с коротким передним фронтом длительностью 20 мкс и затянутым задним фронтом. Частота следования импульсов может достигать 400 Гц. На широкие поверхности пластины наносятся проводящие электроды таким образом, чтобы в результате обратного пьезоэффекта происходило перемещение центра масс пластины Δx . Управляющие импульсы напряжения подбираются таким образом, чтобы возникающая при резком ускорении центра масс пластины инерционная сила была больше силы трения покоя между сапфировыми опорами и кварцевым основанием, а сила, возникающая при обратном перемещении центра масс пластины, была меньше силы трения. При этом происходит скачкообразное перемещение пластины вдоль кварцевого основания. Изменение полярности или формы управляющего импульса приводит к изменению направления движения, а изменение амплитуды импульса к пропорциональному изменению величины шага сближения. Минимальная величина амплитуды управляющего импульса, при котором осуществляется режим стабильного перемещения, определяется, по-видимому, состоянием трущихся поверхностей. В нашем случае это напряжение имело величину 80 В. На рис.4 приведена гистограмма распределения величины единичного шага, соответствующего этому режиму, измеренная с использованием туннельного

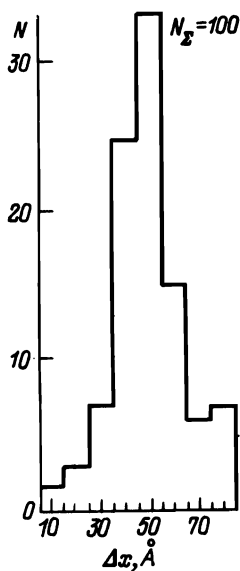


Рис.4. Гистограмма распределения величины шага узла сближения

микроскопа. N_z – общее количество шагов. Видно, что средняя длина минимального единичного шага описанного выше инерционного пьезодвижителя имеет величину 50 Å.

Исследуемый образец вставлялся в держатель, закрепленный на краю пластины (см. рис.3). Поскольку диапазон перемещения острия в направлении, перпендикулярном к поверхности образца, имел величину 6000 Å, понятно, что описанный выше движитель обеспечивал сближение острия с образцом и гарантировал отсутствие касания острием исследуемой поверхности при захвате туннельного тока.

Микросканирование острием над исследуемой поверхностью

Для получения СТМ-изображения необходимо обеспечить сканирование острием над исследуемой поверхностью. Перемещение острия по трем координатам осуществляется с помощью пьезокерамического микросканера. Известны различные варианты конструкций микросканеров, среди которых треугольник [3, 13], рамочная конструкция [14], трубочка [15], стержень крестообразного сечения [16], а также различные варианты микросканеров на основе биморфных пластин [17]. Конструкция микросканера должна обеспечивать максимальную площадь сканирования при минимальном тепловом дрейфе и максимальной резонансной частоте. Отметим, что большую площадь сканирования легко получить с помощью биморфных пластин, однако максимальные резонансные частоты достигаются в жестких конструкциях на основе трубочки [15] или стержня крестообразного сечения [16].

Следует подчеркнуть важность проблемы теплового дрейфа. Действительно, оценим изменение длины Δl микросканера при изменении температуры. При базовой длине, равной 1 см, и изменении температуры $\Delta T = 0,1$ К и коэффициента теплового расширения пьезокерамики $\alpha = 10^{-5}$ получим $\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \Delta T = 100$ Å. Поскольку зазор между острием и поверхностью необходимо стабилизировать с точностью 0,1 Å, становится понятной важность проблемы температурных дрейфов. Уменьшение тепловых дрейфов обеспечивают за счет термокомпенсации и симметризации конструкции при максимально возможной термостабилизации узла туннелирования.

В настоящее время наиболее оптимальными представляются конструкции на основе стержня крестообразного сечения или трубочки. В этих конструкциях острие закрепляется вдоль оси симметрии и обеспечивается довольно большая площадь сканирования при высокой резонансной частоте.

На рис.3 показана конструкция используемого микросканера. С помощью электродов 8, 9 осуществляется изгиб трубочки и перемещение острия вдоль направления x и y . С помощью электрода 7 осуществляется перемещение острия вдоль направления z . Чувствительность микросканера по осям x и y имеет величину 190 Å/В, а по оси z – 30 Å/В. Таким образом, при управляющем напряжении 230 В достигается площадь сканирования 4,3х4,3 мкм.

Тепловой дрейф в описанном СТМ без применения особых мер по стабилизации температуры имеет величину 0,1 Å/с.

С помощью описанной конструкции получены СТМ-изображения поверхности пиролитического графита с атомным разрешением при атмосферном давлении (рис.5, а) и хорошо воспроизводимые СТМ-изображения поверхности пленки золота на Si -подложке (рис.5, б).

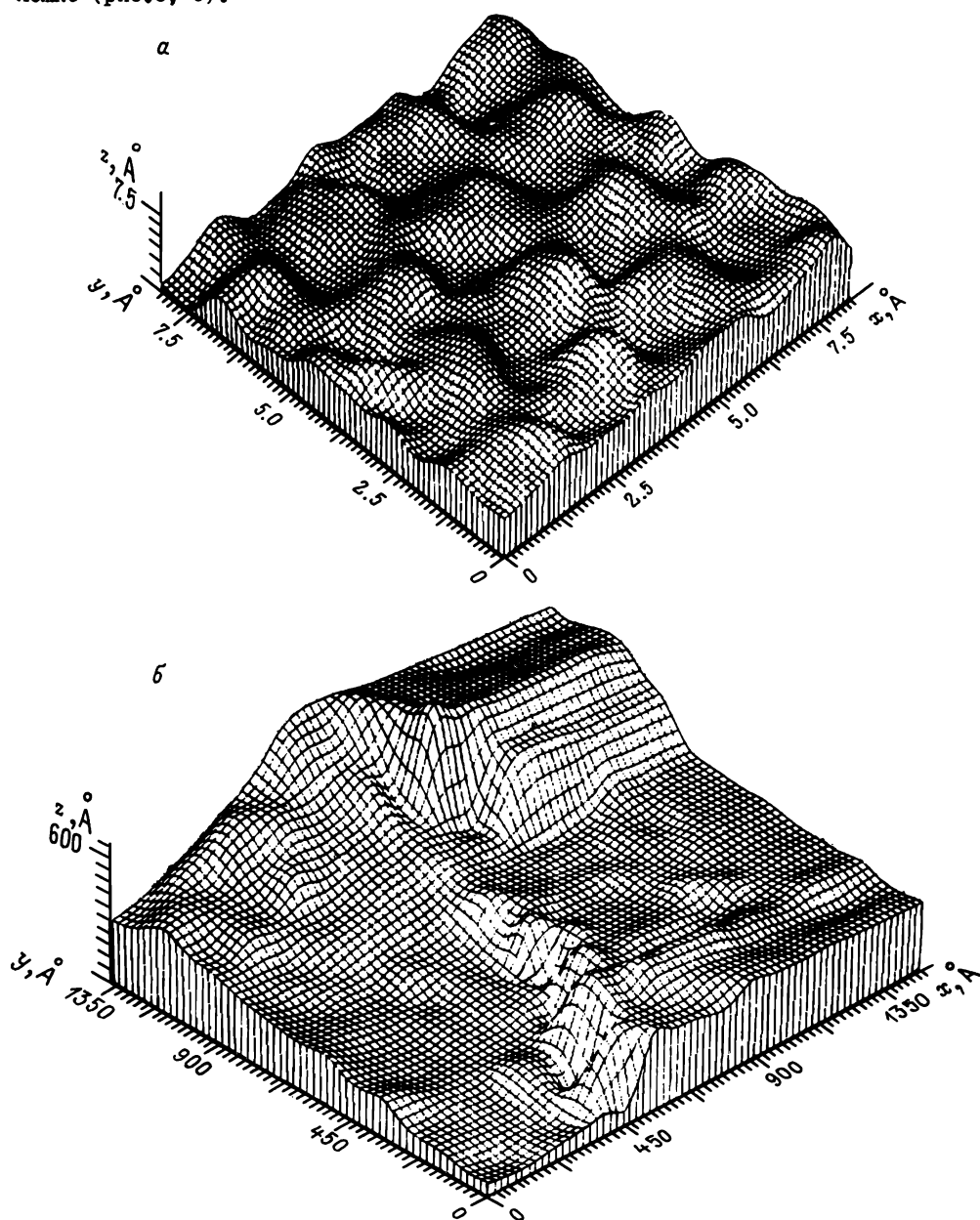


Рис.5. Примеры СТМ-изображений: а - поверхность графита; б - поверхность пленки золота на Si -подложке

Авторы благодарят Г.А.Карякина за помощь в изготовлении узла туннелирования и Д.В.Нахабцева за разработку программного обеспечения для СТМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proceedings of the First International Conference on Scannens Tunnelins Microscopy Surface Sci. 1987. V. 181, N 1/2.
2. Proceedings of the Second International Conference on Scanning Tunneling Microscopy//J.Vac.Sci.Technol. 1988. V. A6, N 2.
3. Binnig G., Rohrer H.//Rev. Modern Phys. 1987. V.59, N 3. P. 615.
4. Okana M., Kajimuka K., Wakigama S., Sakaj F.//J.Vac.Sci.Technol.1987.V.A5.
5. Cox M.P., Griffin P.R.//J.Vac.Sci.Technol.1988.V.6, N 2. P. 376.
6. Блэкфорд, Дан, Джерико//Приборы для научных исследований. 1987. № 8.- С.1243-1248.
7. Пат.4422002 США.
8. Поль//Приборы для научных исследований. 1987. № 1.-С.57.
9. Нидерман, Эмп, Дескотс//Приборы для научных исследований. 1988. № 2.- С.453.
10. Corb B., Ringger M., Guntherodt H.//J.Appl.Phys. 1985. V.58, N 11.P.3947.
11. Парк С., Куэт С.Ф.//Приборы для научных исследований. 1987. № 11.-С.27.
12. Neil J., Werser J., Hillman K.etc.//J.Vac.Sci.Technol.1988.V.6,N 2.P.401.
13. Васильев С.И., Леонов В.Б., Панов В.И.//Письма в ЖТФ. 1987. Т.13, В.15- С.937-941.
14. Berghaus Th., Neddermeger H.,Tosh S.//IBM J.Res.Devel.1986.V.30,N 5.P.520.
15. Пат.4087745 США.
16. Адамчук В.К., Ермаков А.В., Любинецкий И.В.//Письма в ЖТФ. 1988. Т.14, В.8.-С.692.
17. Muralt P., Pohl P.W., Denk W.//IBM J.Res.Devel. 1986. V.30, N 5. P. 443-450.