

УДК 537.533.35

Аппаратные и программные средства сканирующего туннельного микроскопа. Голубок А.О., Давыдов Д.Н., Нахабцев Д.В.//Научное приборостроение. Электронно-ионная оптика. Л.:Наука, 1989, с.77-84.

Описаны система стабилизации туннельного тока, управление узлом сближения острия к исследуемой поверхности образца и управление узлом микросканирования, приведены экспериментальные данные, способы обработки и построения СТМ-изображений. Лит. 7 назв., ил. - 5.

АППАРАТНЫЕ И ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА СКАНИРУЮЩЕГО ТУННЕЛЬНОГО МИКРОСКОПА

Методика сканирующей туннельной микроскопии (СТМ) находит все более широкое применение при решении различных физических, химических и биологических задач [1, 2]. Во многих лабораториях мира занимаются созданием СТМ, не дожидаясь появления серийных приборов. При этом стоит задача разработки простых и надежных аппаратных и программных средств СТМ, существенно определяющих показатели назначения прибора в целом. Ниже будут рассмотрены некоторые общие вопросы и даны примеры конкретной реализации аппаратных и программных средств СТМ, выполненных на основе аппаратуры в стандарте КАМАК и персонального компьютера IBM PC AT.

Аппаратные и программные средства СТМ обеспечивают функции управления узлом сближения острия с образцом; захвата и стабилизации туннельного тока; управления узлом микросканирования; измерения экспериментальных данных; обработки экспериментальных данных и построения СТМ-изображений.

Взаимодействие компьютера и контрольно-измерительных средств, выполненных в стандарте КАМАК, осуществлялось с помощью специально изготовленной интерфейсной платы, подсоединенной с одной стороны к общей шине IBM PC AT, а с другой к крейт-

контроллеру КК-16. Программное обеспечение реализовано на языке Турбо-Паскаль (версия 4.0), который обеспечивает организацию алгоритма управления на уровне КАМАК-команд.

Система стабилизации туннельного тока

Центральной частью аппаратных средств СТМ является система стабилизации туннельного тока (рис.1). Она должна обеспечивать стабилизацию величины зазора между острием и исследуемой поверхностью в режиме постоянного туннельного тока.

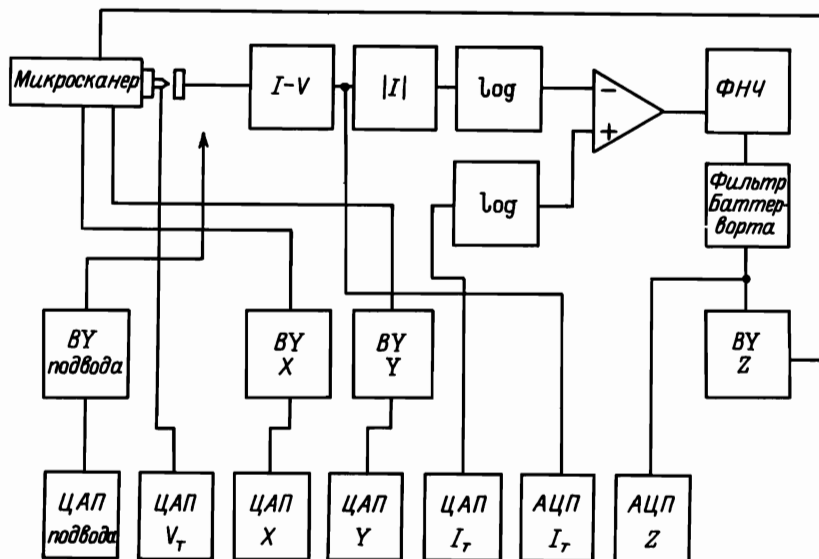


Рис.1. Структурная схема электронного обеспечения сканирующего туннельного микроскопа

Вообще говоря, возможны два варианта системы стабилизации – цифровой и аналоговый, однако в настоящее время, по-видимому, из соображений простоты и быстрого действия в большинстве известных разработок применяется аналоговый вариант.

Кроме основной задачи стабилизации туннельного тока следящая система должна обеспечивать разрыв петли обратной связи в любой момент времени и запоминание информации о величине зазора между острием и образцом для измерения вольт-амперных характеристик туннельного перехода при постоянном зазоре; возможность плавного выдвижения острия по направлению к образцу в режиме захвата туннельного тока.

При разработке следящей системы необходимо задать некоторые параметры, такие как величину ошибки стабилизации тока, скорость отклика системы на отклонение величины тока от заданного значения, а также необходимо определить условия, при которых система будет устойчивой. Как правило, для анализа динамических свойств и устойчивости используются частотные и фазовые характеристики разомкнутой системы [3, 4].

Быстродействие СТМ ограничивается минимальной резонансной частотой колебаний микросканера. На рис.2,а представлена зависимость чувствительности микросканера от частоты приложенного напряжения. Максимальная частота ω_0 системы стабилизации туннельного тока должна быть в несколько раз меньше резонансной частоты

ты $\omega_{рез}$. Для определения ω_0 удобно построить передаточную функцию $W(\omega)$ разомкнутой системы, включая передаточную функцию $\Delta Z(\omega)$ микросканера (см. рис. 2б). При этом необходимо стремиться к максимальному коэффициенту передачи по постоянному току и максимальному значению ω_0 в точке $W(\omega)=1$. Первое требование гарантирует стабилизацию тока с минимальной ошибкой, второе – минимальное время отработки следящей системы.

Принципиальным моментом является подавление возбуждения системы на резонансной частоте. Существуют различные схемные решения, обеспечивающие устойчивость системы на резонансной частоте. Например, можно ввести фильтр низкой частоты второго порядка, реализующий быстрый спад частотной характеристики при $\omega > \omega_0$. Кроме того, для устойчивости колебательной системы необходимо иметь запас по фазе в точке $W(\omega)=1$ порядка 45° . При этом значение ω_0 должно быть меньше резонансной частоты примерно в три раза, т.е. $\omega_0 = \omega_{рез}/3$ [4]. Спад $W(\omega)$ с частотой в области $\omega < \omega_0$ задается фильтром низких частот первого порядка или интегратором.

Для измерения малых туннельных токов $I_T = 0,1-10$ нА используется преобразователь ток-напряжение с коэффициентом преобразования 10^7 В/А. Его необходимо располагать как можно ближе к туннельному контакту, так как при измерении малых токов большое значение имеет емкость подводящих проводов, ограничивающая рабочую область частот преобразователя.

Сигнал с выхода преобразователя, усиленный в десять раз, подается на схему выделения абсолютного значения тока. Схема представляет собой усилитель, коэффициент передачи которого может быть $+1$, или -1 . Переключение производится ключом на полевом транзисторе, управляемом компаратором. Далее напряжение, пропорциональное абсолютному значению туннельного тока, поступает на логарифмический усилитель, который служит для линеаризации экспоненциальной зависимости туннельного тока от расстояния. При разработке логарифмического усилителя могут возникнуть проблемы, связанные с тепловым дрейфом выходного напряжения, приводящие к заметному дрейфу туннельного тока из-за сильной температурной зависимости параметров транзисторов, служащих для задания экспоненциальной характеристики, поэтому в некоторых случаях используют схемные решения, не содержащие логарифмический усилитель. Однако следует учитывать, что его отсутствие приведет к зависимости передаточной функции и, следовательно, ω_0 от величины туннельного тока.

В разработанной системе стабилизации туннельного тока применены два логарифмических усилителя, изготовленные с использованием одной сборки из четырех согласованных транзисторов. Один из усилителей включен в цепь измерения тока, а другой в цепь его задания (см. рис. 1). Так как транзисторы имеют близкие

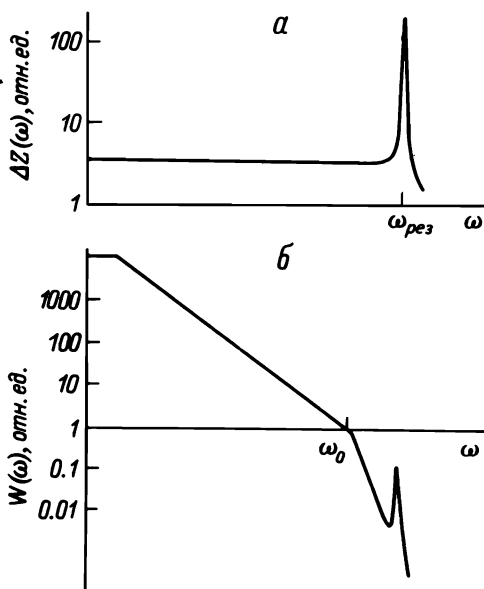


Рис. 2. Частотные характеристики: а – микросканера, б – системы стабилизации туннельного тока с разомкнутой петлей обратной связи

параметры, то и логарифмические усилители близки по параметрам и, следовательно, имеют примерно одинаковый тепловой дрейф. Поскольку выходное напряжение одного логарифмического усилителя подается на инвертирующий, а другого на неинвертирующий входы дифференциального усилителя, то тепловой дрейф компенсируется.

Разница измеряемого и опорного сигналов подается на усилитель с регулируемым коэффициентом усиления $k = 1,0-10$. Он служит для оптимизации передаточной функции следящей системы, т.е. для выбора оптимальных динамических параметров.

После усилителя с переменным коэффициентом усиления устанавливается фильтр низкой частоты первого порядка. О его основной функции было сказано выше. В нашем случае он выполняет еще две дополнительные функции: используется как устройство выборки-хранения и как устройство для отвода острия от образца (рис.3).

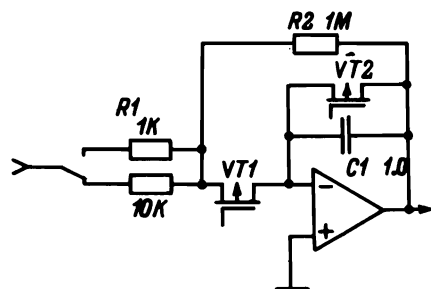


Рис.3. Схема фильтра низкой частоты

В схему фильтра включены два ключа на полевых транзисторах $VT1$ и $VT2$. В том случае, когда $VT1$ замкнут, а $VT2$ разомкнут, схема работает как обыкновенный фильтр низких частот с коэффициентом передачи $K = R2 / (R1 \cdot \sqrt{1 + (\omega \cdot C1 \cdot R2)^2})$, который можно менять десять раз, переключая $R1$ (1 кОм и 10 кОм), что также необходимо для оптимизации параметров системы стабилизации тока. Если разомкнуть $VT1$, то схема запомнит значение напряжения, которое было на ее входе в момент размыкания ключа, т.е. величина зазора между острием и поверхностью образца

будет зафиксирована. Фиксация зазора позволяет снимать вольт-амперные характеристики туннельного контакта, необходимые для спектроскопических исследований.

Для того, чтобы отвести острие от образца, необходимо замкнуть $VT2$. Коэффициент передачи по постоянному току меняется от $R2/R1 = 10^2 - 10^3$ до $R_{VT2}/R1 = 10^2 - 10^{-1}$, т.е. сигнал на выходе схемы падает практически до нуля. При размыкании ключа выходное напряжение будет нарастать по закону, близкому к линейному, со скоростью, зависящей от напряжения на входе, и обратно пропорциональной произведению $R1 \cdot C$.

С выхода фильтра низкой частоты первого порядка напряжение поступает на фильтр Баттерворта второго порядка, который дает возможность ступенчато менять частоту среза в пределах 0,5-2,0 кГц, и на вход высоковольтного усилителя с коэффициентом передачи, равным 20. Максимальное выходное напряжение 200 В. При чувствительности пьезоэлемента 31 А/В диапазон перемещения острия в направлении, перпендикулярном поверхности образца, оказывается равным 6200 А.

У п р а в л е н и е у з л о м с б л и ж е н и я о с т р и я с о б р а з ц о м

Узел сближения (система грубого подвода) должен обеспечивать подвод острия к поверхности образца до установления первоначального зазора между ними порядка 3000 А, исключить их касание и обеспечить получение заданного значения туннельного тока при выдвигании острия к исследуемой поверхности.

В качестве узла сближения используется инерционный пьезоэлектрический движитель [5]. Для управления движителем необходимо сформировать пилообразные импульсы с коротким передним фронтом (длительность 20 мкс) и затянутым задним (длительность 10–100 мс) с амплитудой 100–500 В. Пилообразные импульсы формируются с помощью цифроаналогового преобразователя (ЦАП). Компьютер, управляющий процессом сближения, позволяет установить четыре значения амплитуды импульсов на выходе высоковольтного усилителя: 100, 150, 300, 500 В. Для исключения касания острия с поверхностью образца используется следующий алгоритм: перед каждым шагом, т.е. поступлением очередного импульса (см. рис. 4а) на пьезосканер появляется линейно нарастающее напряжение (от 0 до 200 В), что соответствует плавному выдвижению острия по направлению к образцу (промежуток $t_1 - t_2$) (рис. 4, б). После того, как микросканер полностью выдвинут на величину 6200 А, производится измерение туннельного тока (промежуток $t_2 - t_3$). Если в промежутке $t_1 - t_2$ достигается заданное значение туннельного тока, то выдвижение острия вперед прекращается, и система переходит в режим стабилизации тока. Если же необходимое значение тока не достигается, то напряжение на микросканере сбрасывается до нуля, т.е. острие отодвигается назад, и осуществляется следующий шаг. В случае достижения порогового значения туннельного тока цикл подвода прекращается.

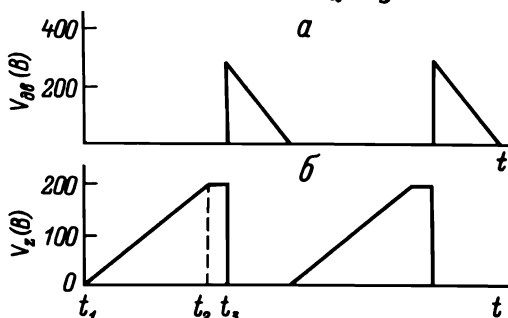


Рис. 4. Эпюры напряжений: а – на движителе грубого подвода, б – на микросканере в процессе сближения острия с образцом

Таким образом, сближение острия с образцом заканчивается захватом заданного значения туннельного тока.

Управление узлом микросканирования и снятие экспериментальных данных

Узел микросканирования должен обеспечивать перемещение острия по трем взаимноперпендикулярным осям. В качестве узла микросканирования используется пьезо-керамическая трубка с электродами в виде четырех сегментов [6]. Перемещение острия осуществляется в результате изгиба и растяжения трубочки под действием напряжения, прикладываемого к соответствующим электродам. Управление микросканером по оси z , перпендикулярной к поверхности образца, осуществляется при помощи системы стабилизации тока, а по координатам x, y в плоскости образца – с помощью компьютера. Остановимся на алгоритме управления узлом микросканирования. Пользователь задает количество шагов по x -направлению сканирования, величину шага, время задержки после каждого шага перед измерением, количество строк в y -направлении, расстояние между ними и время обратного хода. Используя эти параметры, компьютер управляет перемещением острия по заданному растру. В x -регистр преобразователя ЦАП сканирования (см. рис. 1) записывается величина шага по координате x , пересчитанная в дискреты ЦАП. В y -регистр записывается ноль. С выходом ЦАП сигналы поступают на высоковольтные усилители, которые формируют соответствующие напряжения на электродах пьезокерамической трубки. В результате происхо-

дит перемещение острья в направлении x на один шаг. В течение заданного времени задержки происходит отработка системы стабилизации туннельного тока, после чего запускается АЦП, измеряющий величину отработки движителя по оси z . Компьютер, считав данные из АЦП в оперативную память, увеличивает содержимое x -регистра предустановки ЦАП на величину шага, продолжая цикл, пока в счетчике шагов не установится число, равное заданному. После этого осуществляется перемещение острья в начало данной линии сканирования путем записи в x -регистр кода, уменьшенного на величину шага N -раз, где N — число шагов. Время на каждый шаг в режиме обратного хода выбирается равным 0,5–10,0 мс. Время обратного хода определяется площадью сканирования. Длительность шага при обратном ходе выбирается такой, чтобы избежать касания острием поверхности. Далее происходит занесение кода, увеличенного на величину шага по координате y , в y -регистр предустановки и цикл повторяется, пока в счетчике строк не окажется число, равное заданному. В нашем СТМ предусмотрено пять диапазонов сканирования со следующими максимальными площадями раstra: $30 \times 30 \text{ \AA}^2$, $300 \times 300 \text{ \AA}^2$, $1000 \times 1000 \text{ \AA}^2$, $3000 \times 3000 \text{ \AA}^2$, 4,3х4,3 мкм.

Процедура управления узлом микросканирования и снятия экспериментальных данных заканчивается размещением информационного массива в оперативной памяти компьютера. На следующем этапе массив данных может быть подвергнут процедурам обработки, визуализации на дисплее и принтере, и записи на внешний носитель памяти.

Обработка и построение СТМ-изображений

Характерной особенностью СТМ является отображение экспериментальной информации в трехмерном пространстве, где две размерности соответствуют координатам раstra сканирования, а третья координата соответствует физической величине, характеризующей данный объект (топография, локальная работа выхода, распределение потенциала). Одна из основных задач, возникающая при работе с СТМ, заключается в получении максимально наглядной информации. Наглядность СТМ-изображения во многом определяется как способом отображения, так и способом обработки трехмерного массива данных. В программном обеспечении предусмотрена фильтрация экспериментального массива данных. Для быстрой фильтрации используется метод пространственной свертки с помощью матрицы 3×3 с целыми фильтрующими коэффициентами [7]. В результате проведенного численного моделирования были подобраны оптимальные коэффициенты для высокочастотной фильтрации исходного массива данных, полученного в экспериментах с характерными для данного СТМ параметрами. Также используется сглаживание СТМ-изображения кубическими сплайнами и одномерная Фурье-фильтрация. В программе обработки реализован алгоритм вычитания фоновой плоскости [7], являющийся важным моментом при построении СТМ-изображения.

В программе обработки реализованы алгоритмы отображения информации как в аксонометрии, так и в картографическом виде, где амплитуда третьего измерения задается цветом. Второй алгоритм более удобен, если необходимо оценить пространственные размеры характерных особенностей поверхности.

При аксонометрическом отображении критичными являются две характеристики — угол зрения, под которым находится наблюдатель и наличие или отсутствие невидимых линий. Расчет новых координат после задания углов вращения осей вычисляется для каждой точки изображения:

$$x' = x + y \cdot \sin(\hat{Y}) \cdot \cos(\hat{X}),$$

$$y = y [\cos(\hat{Y}) - \sin(\hat{Y}) \cdot \sin(\hat{X})] - x \cdot \sin(\hat{X}).$$

Во многих случаях необходимо удаление скрытых линий. Алгоритм удаления скрытых линий основан на сравнении y -координаты текущей точки с y -координатой базовой точки, имеющей ту же координату по оси x . Если y -координата текущей точки превышает y -координату базовой точки, то данная точка отображается на дисплее, а y -координате базовой точки присваивается текущее значение. В противном случае текущая точка не отображается, а y -координата базовой точки остается неизменной.

В каждом конкретном случае пользователь выбирает способ отображения, наиболее полно реализующий наглядность СТМ-изображения (рис.5).

Таким образом, описанные выше программные и аппаратные средства СТМ позволяют получать и обрабатывать СТМ-изображения в широком диапазоне размеров растра от $30 \times 30 \text{ \AA}^2$ до $4,3 \times 4,3 \text{ мкм}^2$ при величине туннельного тока от 0,1 до 50 нА и величине туннельного напряжения от 0 до 15В.

ЛИТЕРАТУРА

1. Proc. of the First Int. Conf. on Scanning Tunneling Microscopy, Surface Sci. 1987. 181. N 1, 2.

2. Proc. of the First Int. Conf. on Scanning Tunneling Microscopy//J. of Vac. Sci. Tech. 1988. N 2, A6.

3. Васильев Д.В., Чуич В.Г. Системы автоматического регулирования. М.: Высш. школа, 1967.- С.137.

4. Pohl D.W.// IBM J. of Reseach of Develop. 1986. 30, N 4. P.417-427.

5. Niderman Ph., Etch R., Descouts P.//Rev.Sci. Inst. 1988.59, N 2. P. 368-369.

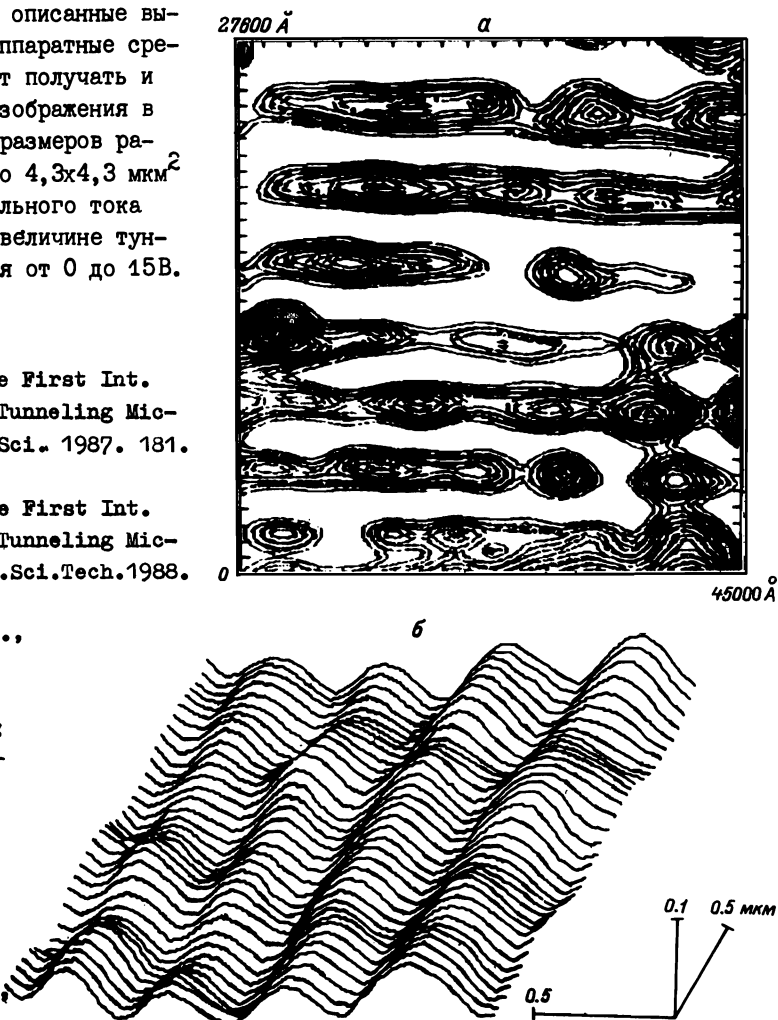


Рис.5. Пример СТМ изображений дифракционной решетки: а - вид сверху, б - вид сбоку

6. Пат. 408 7715. США.

7. Schroer P.H., Becker J. IBM J. of Res. and Dev. 1986. 30, N 5. P. 543-551.