

# **ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НАНОАМПЕРНОГО ДИАПАЗОНА В СКАНИРУЮЩЕМ ТУННЕЛЬНОМ МИКРОСКОПЕ**

**Д. П. Михалевич**

*Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого, Беларусь*

Научный руководитель Ю. А. Козусев

Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) – первый из семейства зондовых микроскопов – был изобретен в 1981 г. швейцарскими учеными Г. Биннигом и Г. Рорером. В своих работах они показали, что это достаточно простой и весьма эффективный способ исследования поверхности с пространственным разрешением вплоть до атомарного. В настоящее время зондовая микроскопия – это бурно развивающаяся область техники и прикладных научных исследований.

Принцип работы СТМ основан на явлении туннелирования электронов через узкий потенциальный барьер в виде непроводящего вакуумного зазора между металлическим зондом и проводящим образцом во внешнем электрическом поле.

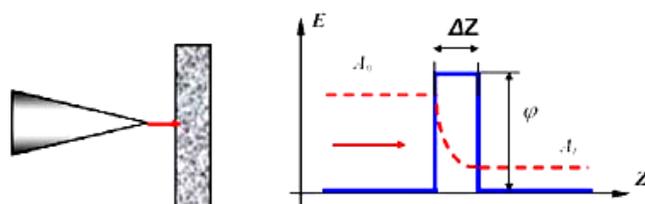


Рис. 1. Схема туннелирования электронов через потенциальный барьер в туннельном микроскопе

При подведении зонда к поверхности образца на расстояния в несколько ангстрем образуется туннельно-прозрачный потенциальный барьер, величина которого определяется, в основном, значениями работы выхода электронов из материала зонда и образца. При качественном рассмотрении барьер можно считать прямоугольным с эффективной высотой, равной средней работе выхода материалов  $\phi$ .

Экспоненциальная зависимость туннельного тока от расстояния позволяет осуществлять регулирование расстояния между зондом и образцом в туннельном микроскопе с очень высокой точностью. На этом основан принцип работы СТМ, который представляет собой электромеханическую систему с отрицательной обратной связью. Система обратной связи поддерживает величину туннельного тока между зондом и образцом на заданном уровне, выбираемом оператором. Поддержание заданной величины туннельного тока осуществляется за счет изменения размера пьезокерамики в вертикальном направлении (а следовательно, перемещения зонда микроскопа вдоль оси  $Z$ ) в соответствии с рельефом поверхности. Зондом служит тонкое металлическое острие, смонтированное на электромеханическом приводе ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – позиционере). Когда такое острие подводится к участку исследуемой поверхности на расстояние  $\leq 10 \text{ \AA}$ , то при приложении между острием и образцом небольшого (от 0,01 до 10 В) напряжения смещения  $V_s$  через вакуумный промежуток  $\Delta Z$  начинает протекать туннельный ток  $I_0$  порядка  $10^{-9}$  А. Полагая, что электронные состояния (орбитали) локализованы на каждом атомном участке, при сканировании поверхности образца в направлении  $X$  и/или  $Y$  с одновременным измерением выходного сигнала в цепи  $Z$  можно получить картину поверхностной структуры на томном уровне. Эта структура может быть отображена в двух режимах. В режиме постоянного туннельного тока (рис. 2, а) зонд перемещается вдоль поверхности, осуществляя растровое сканирование; при этом изменение напряжения на  $Z$ -электроде пьезоэлемента в цепи обратной связи (с большой точностью повторяющее рельеф поверхности образца) записывается в память компьютера в виде функции  $Z = f(x, y)$ , а затем воспроизводится средствами компьютерной графики.

При исследовании атомарно гладких поверхностей часто более эффективным оказывается получение СТМ изображения поверхности в режиме постоянной высоты  $Z = \text{const}$ . В этом случае зонд перемещается над поверхностью на расстоянии нескольких ангстрем, при этом изменения туннельного тока регистрируются в качестве СТМ изображения поверхности (рис. 2, б). Сканирование производится либо при отключенной ОС, либо со скоростями, превышающими скорость реакции ОС, так что ОС обрабатывает только плавные изменения рельефа поверхности. В данном способе реализуются очень высокие скорости сканирования и высокая частота получения СТМ изображений, что позволяет вести наблюдение за изменениями, происходящими на поверхности, практически в реальном времени.

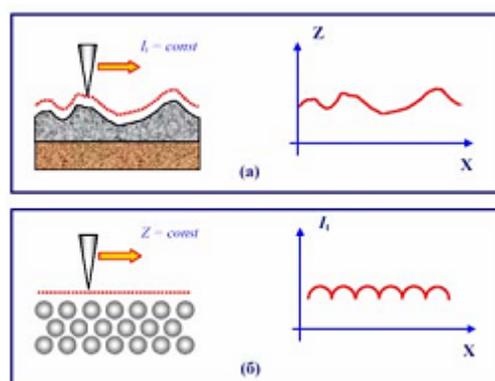


Рис. 2. Формирование СТМ изображений поверхности по методу постоянного туннельного тока (а) и постоянного среднего расстояния (б)

Схема системы управления СТМ представлена на рис. 3. Напряжение на туннельном промежутке задается оператором с помощью ЦАП-У, а поддерживаемый системой обратной связи ток – с помощью ЦАП-І. Двухканальные цифро-аналоговые преобразователи ЦАП-Х и ЦАП-У служат для формирования строчных и кадровых разверток. Петля обратной связи состоит из предварительного усилителя ПУ, конструктивно расположенного в измерительной головке СТМ, разностного усилителя РУ, фильтра низких частот ФНЧ, усилителей У4 и У5, пьезопреобразователя, регулирующего величину туннельного промежутка.

В начальном состоянии ток в петле обратной связи отсутствует, и сканер максимально вытянут в направлении к образцу. При появлении туннельного тока обратная связь отодвигает сканер, и система переходит в режим точной установки образца. В этом режиме происходит совместное движение образца и отодвигание (системой ОС) зонда до тех пор, пока сканер не встанет в середину своего динамического диапазона. При этом в петле обратной связи поддерживается постоянным выбранное оператором значение туннельного тока. Сканирование образца осуществляется при подаче напряжений пилообразной формы на внешние электроды трубчатого сканера с помощью двухканальных ЦАП-Х и ЦАП-У и двухканальных высоковольтных усилителей У1 и У2. При сканировании система обратной связи поддерживает постоянным туннельный ток. Это происходит следующим образом. Реальное мгновенное значение туннельного тока  $I_t$  сравнивается на разностном усилителе со значением  $I_0$ , заданным оператором. Разностный сигнал ( $I_t - I_0$ ) усиливается (усилителями У4 и У5) и подается на внутренний Z-электрод сканера. Таким образом, при сканировании напряжение на Z-электроде сканера оказывается пропорциональным рельефу поверхности. Сигнал с выхода усилителя У4 записывается с помощью АЦП как информация о рельефе поверхности.

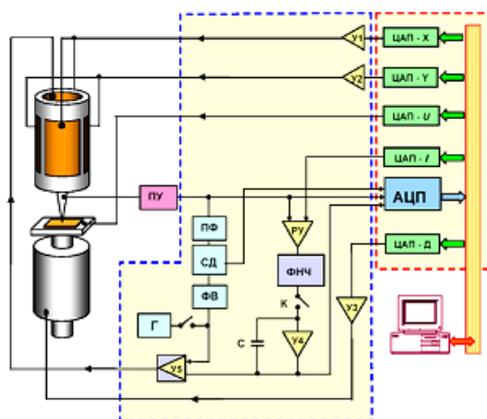


Рис. 3. Схема системы управления сканирующего туннельного микроскопа

Предварительный усилитель выполнен на прецизионном операционном усилителе ОРА128 с основными параметрами, представленными в таблице.

Параметры ОУ при $U_{пит} = \pm 15 \text{ В}$ и $R_{н} \geq 2 \text{ кОм}$	ОРА128КМ			Единицы измерения
	мин.	тип.	макс.	
Напряжение питания	$\pm 5$	$\pm 15$	$\pm 18$	В
Входной ток смещения		$\pm 75$	$\pm 150$	фА
Разность входных токов		30		фА
Напряжение смещения нуля		$\pm 140$	$\pm 500$	мкВ
Тепловой дрейф			$\pm 10$	мкВ/°С
Скорость нарастания выходного сигнала		3		В/мкс
Входное сопротивление		$10^{13}$		Ом
Коэффициент усиления сигнала	110	128		дБ
Коэффициент ослабления синфазного сигнала	90	118		дБ
Выходное напряжение	$\pm 10$	$\pm 13$		В
Выходной ток	$\pm 5$	$\pm 10$		мА
Выходное сопротивление		100		Ом

Схемная реализация ПУ представлена на рис. 4.

#### Литература

92. G. Binnig, H. Rohrer. Scanning tunneling microscopy IBM Journal of Research and Development 30,4 (1986).
93. A. Bonnell and B. D. Huey. Basic principles of scanning probe microscopy from Scanning probe microscopy and spectroscopy: Theory, techniques, and applications 2nd edition Ed. By D. A. Bonnell Wiley-VCH, Inc. New York (2001).