

Темы лекции

- 1. Принцип работы сканирующего туннельного микроскопа (СТМ).*
- 2. Получение изображения поверхности в режиме постоянного туннельного тока и в режиме метода постоянной высоты.*
- 3. Модуляционная методика определения локальной работы выхода.*
- 4. Измерение вольт-амперных характеристик с помощью СТМ.*

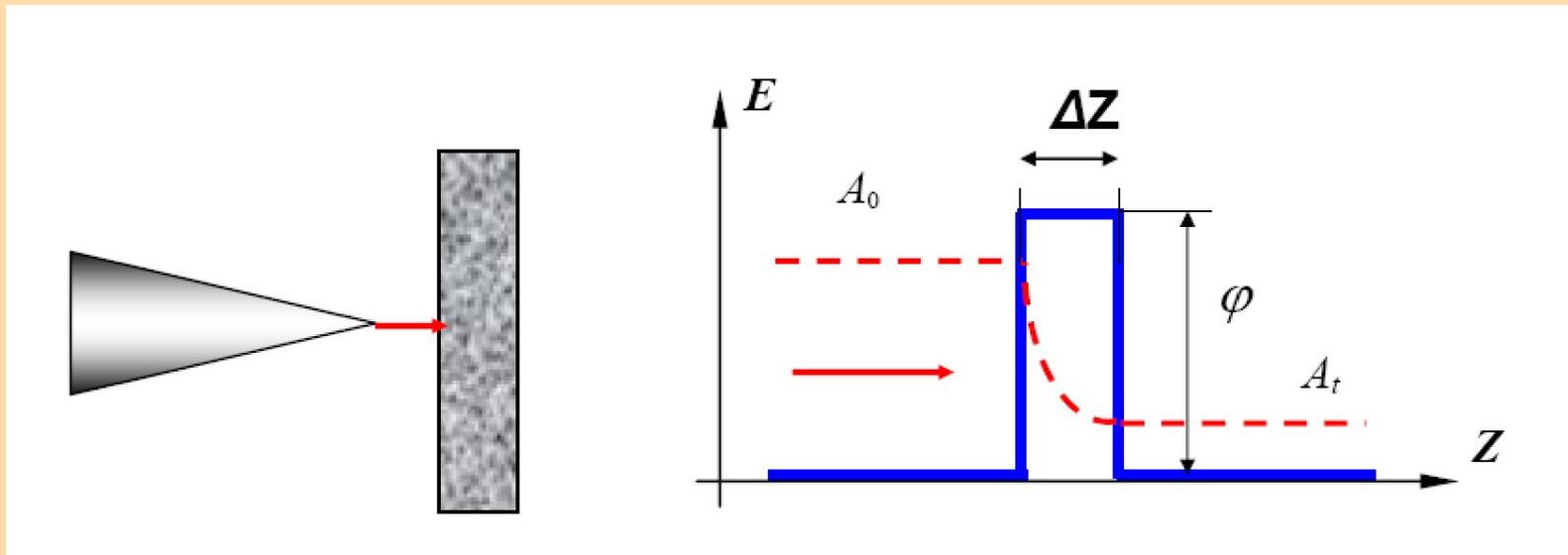
Исторически первым в семействе зондовых микроскопов появился **сканирующий туннельный микроскоп (СТМ)**.

Он был создан в 1981 году Гердом Биннигом и Генрихом Рорером в научно-исследовательской лаборатории фирмы IBM в Цюрихе.

Пятью годами позже за это изобретение им присудили Нобелевскую премию по физике. СТМ был первым инструментом, который позволил получить изображение поверхности кремния с атомным разрешением.

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

Схема туннелирования электронов через потенциальный барьер в СТМ.



В СТМ зонд подводится к поверхности образца на расстояния в несколько ангстрем. При этом образуется туннельно-прозрачный потенциальный барьер, величина которого определяется, в основном, значениями работы выхода электронов из материала зонда $e\phi_p$ и образца $e\phi_s$. При качественном рассмотрении барьер можно считать прямоугольным с эффективной высотой, равной средней работе выхода материалов:

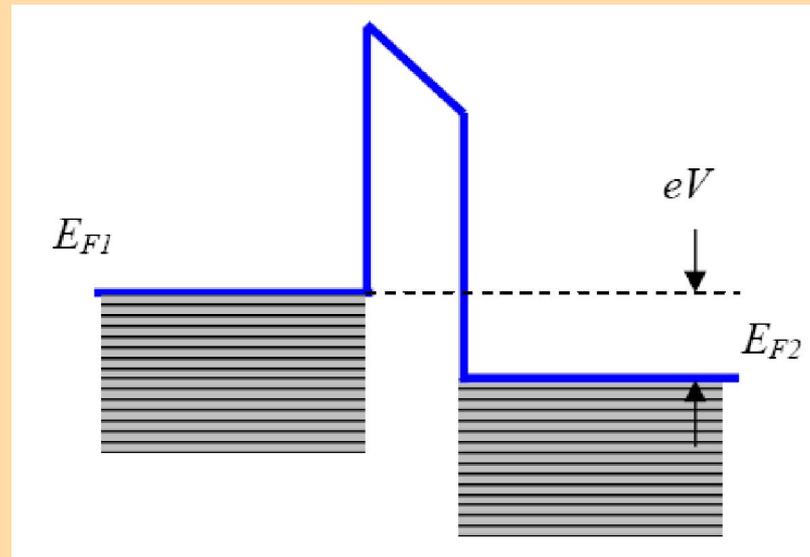
$$e\phi^* = (e\phi_p + e\phi_s)/2.$$

Как известно из квантовой механики, вероятность туннелирования электрона (коэффициент прохождения) через одномерный барьер прямоугольной формы равна

$$W = \frac{|A_t|^2}{|A_0|^2} \cong e^{-k\Delta z},$$

где A_0 – амплитуда волновой функции электрона, движущегося к барьеру; A_t – амплитуда волновой функции электрона, прошедшего сквозь барьер; k – константа затухания волновой функции в области, соответствующей потенциальному барьеру; Δz – ширина барьера.

Энергетическая диаграмма туннельного контакта двух металлов



Для туннельного контакта двух металлов константа затухания

$$k = \frac{4\pi\sqrt{2m_e e\phi^*}}{h}$$

При приложении к туннельному контакту разности потенциалов V между зондом и образцом появляется туннельный ток. В процессе туннелирования участвуют, в основном, электроны с энергией вблизи уровня Ферми E_F . **В случае контакта двух металлов выражение для плотности туннельного тока** имеет вид

$$j_t = j_0 \left[e\varphi^* \exp(-A\sqrt{e\varphi^* \Delta z}) - (e\varphi^* + eV) \exp(-A\sqrt{e\varphi^* + eV} \Delta z) \right]$$

где параметры j_0 и A определяются следующими выражениями:

$$j_0 = \frac{e}{2\pi h (\Delta z)^2}, \quad A = \frac{4\pi}{h} \sqrt{2m_e}$$

При условии малости напряжения смещения $V \ll \phi$ данное выражение существенно упрощается

$$j_t = \frac{e^2 \sqrt{2m_e e\phi^*}}{h^2} \frac{V}{\Delta z} \exp\left(-\frac{4\pi}{h} \Delta z \sqrt{2m_e e\phi^*}\right).$$

Так как экспоненциальная зависимость очень сильная, то **для оценок и качественных рассмотрений можно пользоваться упрощенной формулой**

$$j_t = j_0(V) \exp\left(-\frac{4\pi}{h} \Delta z \sqrt{2m_e e\phi^*}\right),$$

в которой величина $j_0(V)$ считается не зависящей от изменения расстояния зонд-образец.

Для типичных значений работы выхода ($e\phi \sim 4$ эВ) значение константы затухания $k = 2 \text{ \AA}^{-1}$, так что **при изменении Δz на $\sim 1 \text{ \AA}$ величина туннельного тока меняется на порядок.**

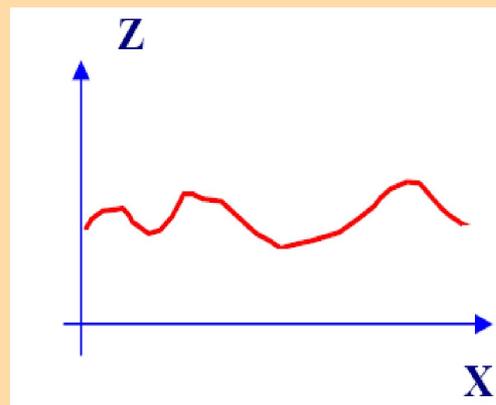
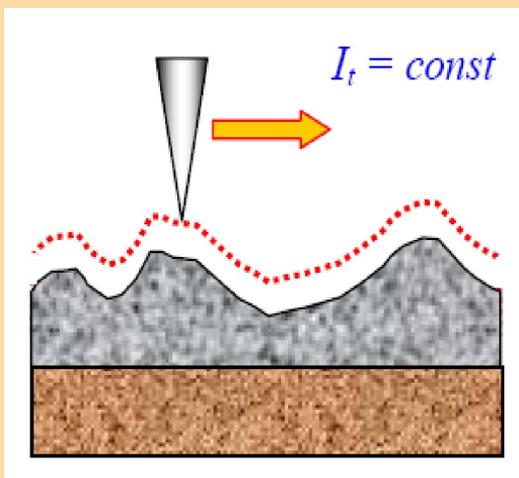
Экспоненциальная зависимость туннельного тока от расстояния позволяет осуществлять регулирование расстояния между зондом и образцом в туннельном микроскопе с высокой точностью.

Так как **СТМ** представляет собой электромеханическую систему с отрицательной обратной связью, то с ее помощью можно поддерживать величину туннельного тока между зондом и образцом на заданном уровне I_0 , выбираемом оператором.

В каждой точке растра происходит перемещение зонда на величину Δz таким образом, чтобы величина I_t оказалась равной I_0 .

Метод постоянного туннельного тока

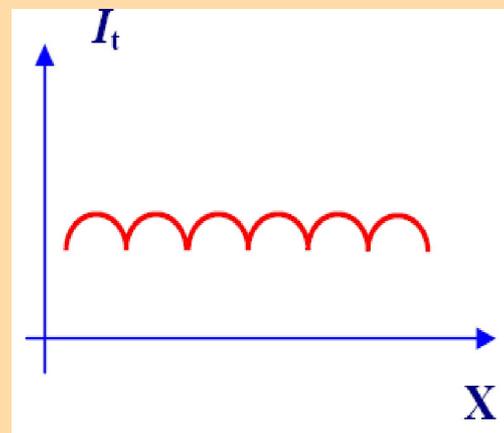
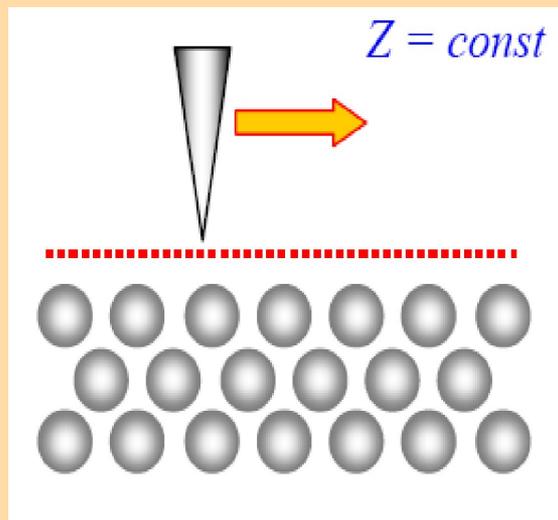
- зонд перемещается вдоль поверхности, осуществляя сканирование по растру;
- изменение напряжения на Z -электроде пьезоэлемента в цепи ОС (с большой точностью повторяющее рельеф поверхности образца) записывается в память компьютера в виде функции $z = f(x, y)$, а затем воспроизводится средствами компьютерной графики.



Метод постоянной высоты ($Z = \text{const}$)

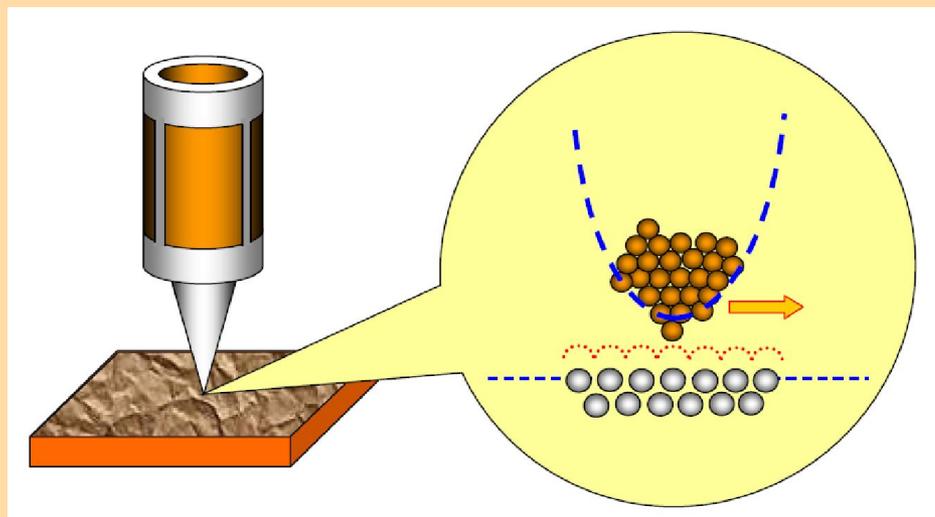
Более эффективный **при исследовании атомарно гладких поверхностей.**

Зонд перемещается над поверхностью на расстоянии нескольких ангстрем, при этом изменения туннельного тока регистрируются в качестве СТМ изображения поверхности.



Сканирование производится либо при отключенной ОС, либо со скоростями, превышающими скорость реакции ОС, так что ОС обрабатывает только плавные изменения рельефа поверхности.

Высокое разрешение СТМ по оси Z (доли ангстрема) определяется экспоненциальной зависимостью туннельного тока от расстояния до поверхности. **Подобное разрешение определяется**, в основном, не макроскопическим радиусом кривизны кончика острия зонда, а его **атомарной структурой**. При правильной подготовке зонда на его кончике с большой вероятностью находится либо одиночный выступающий атом, либо небольшой кластер атомов с размерами много меньше, чем характерный радиус кривизны острия

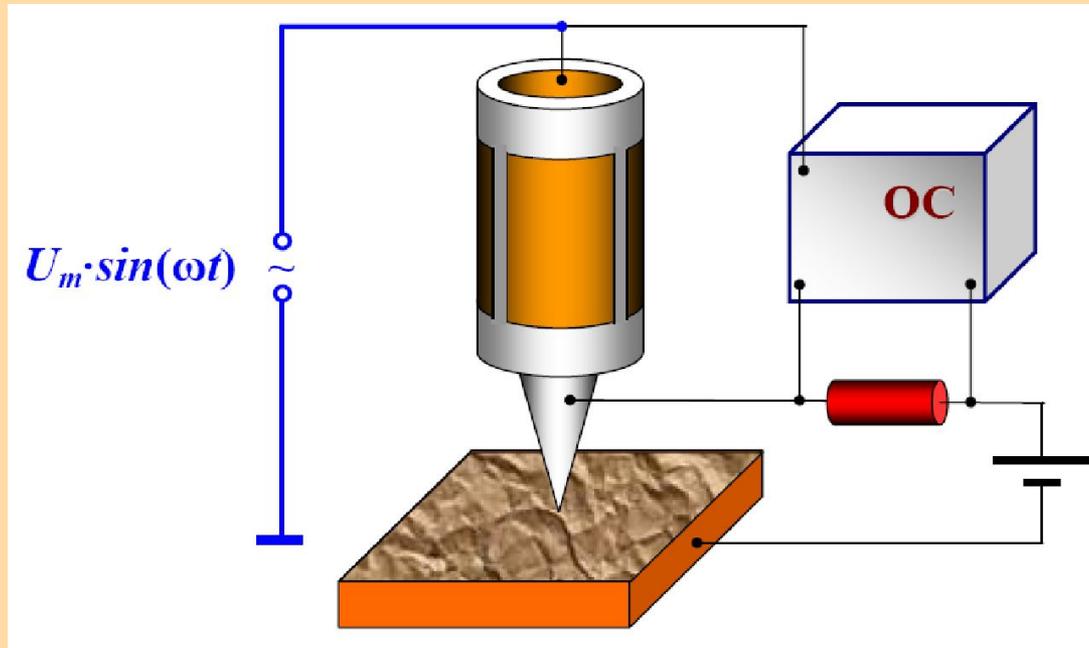


Для неоднородных образцов туннельный ток является не только функцией расстояния от зонда до образца, но также зависит от значения локальной работы выхода электронов в данном месте поверхности.

Метод модуляции расстояния зонд-образец Δz применяется для получения информации о распределении работы выхода по поверхности образца в пределах раstra.

В данном методе в процессе сканирования к управляющему напряжению на Z -электроре сканера добавляется переменное напряжение с внешнего генератора на частоте ω . Тогда напряжение на Z -электроре сканера можно представить в виде $U = U_0(t) + U_m \sin \omega t$. Это приводит к тому, что расстояние зонд-образец оказывается промодулированным на частоте ω , т.е. $\Delta z(t) = \Delta z_0(t) + \Delta z_m \sin \omega t$; Δz_m и U_m связаны между собой через **коэффициент электромеханической связи пьезосканера** $K = \Delta z_m / U_m$.

Частота модуляции ω выбирается выше частоты полосы пропускания петли обратной связи, чтобы система обратной связи не могла обрабатывать данные колебания зонда. Амплитуда переменного напряжения U_m выбирается достаточно малой, чтобы возмущения туннельного промежутка также были малыми.



Колебания расстояния зонд-образец приводят к тому, что появляется переменная составляющая тока на частоте ω и выражение для туннельного тока принимает вид

$$I_t = I_0(V) \exp \left[-\frac{2}{\hbar} \sqrt{2m_e e \varphi^*} (\Delta z_0 + \Delta z_m \sin \omega t) \right]$$

Так как $\Delta z_m \ll \Delta z_0$, то экспоненту можно разложить по порядку малости $\Delta z_m / \Delta z_0$, поэтому выражение для туннельного тока как функция времени может быть представлено в виде

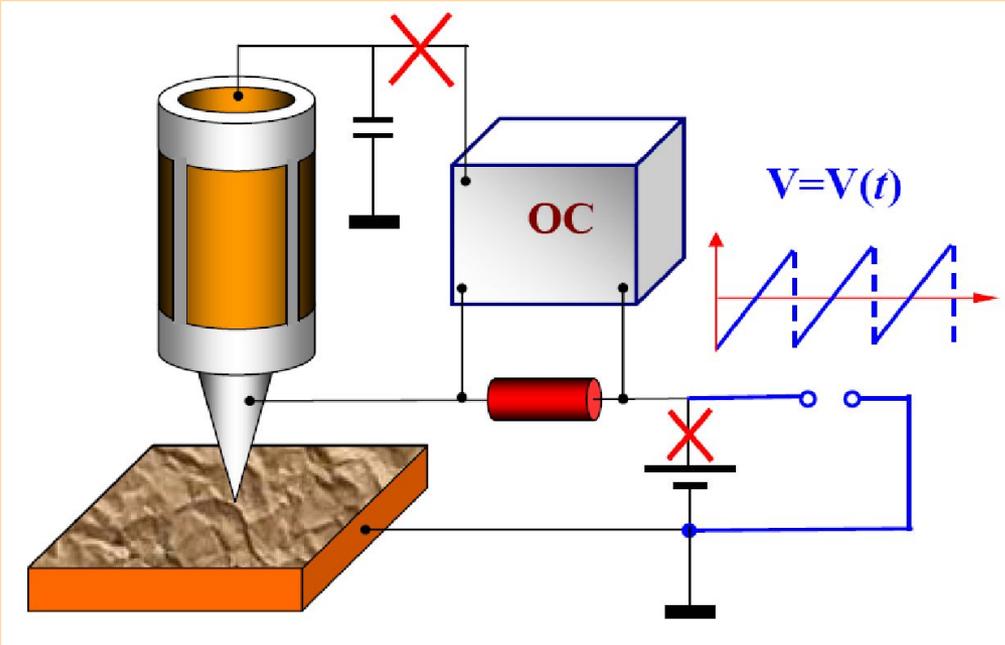
$$I_t \cong I_0(V) e^{-\frac{2\Delta z_0}{\hbar} \sqrt{2m_e e \varphi^*}} \left[1 - \frac{2}{\hbar} \frac{\Delta z_m}{\Delta z_0} \sqrt{2m_e e \varphi^*} \sin \omega t \right]$$

Если использовать **синхронный детектор** и проводить измерения I_t на частоте ω , то в каждой точке раstra (x, y) измеряемая амплитуда частотной модуляции туннельного тока может быть представлена в виде

$$I_{\omega} \cong I_0 \frac{2KU_m \sqrt{2m_e}}{\hbar} \sqrt{e\varphi^*(x, y)}$$

Таким образом можно построить одновременно с рельефом $z = f(x, y)$ распределение величины локальной работы выхода $e\varphi(x, y)$ на исследуемом участке поверхности.

С помощью СТМ можно снимать вольт-амперные характеристики (ВАХ) туннельного контакта в различных точках поверхности.



На СТМ изображении выбирается область, для измерения ВАХ. Зонд СТМ выводится сканером в нужную точку поверхности. Для получения ВАХ контакта **ОС** на короткое время разрывается, и к туннельному промежутку прикладывается линейно нарастающее напряжение.

При этом синхронно с изменением напряжения регистрируется ток, протекающий через туннельный контакт.

Во время снятия ВАХ на время разрыва обратной связи на электрод сканера подается потенциал, равный потенциалу непосредственно перед разрывом.