

Метод сканувальної тунельної мікроскопії: фізичні принципи та можливості визначення фізичних характеристик наносистем

Сканувальна тунельна мікроскопія

(СТМ) – метод дослідження поверхні, який базується на взаємодії мікроскопічного зонда з поверхнею. Параметром взаємодії виступає сила тунельного струму між зондом і зразком, яка експоненційно залежить від відстані між ними.

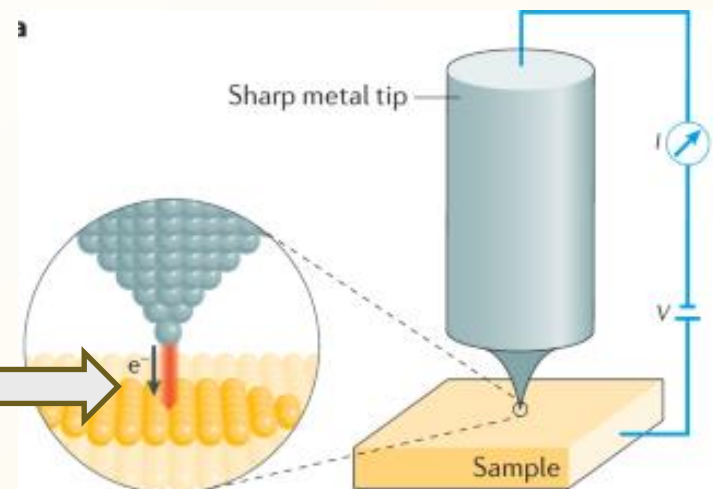


Рис.1

1. Фізичні принципи

В основі СТМ лежить тунельний ефект - проходження частинки через потенціальний бар'єр, тобто область простору, в якій повна енергія частинки менша за висоту бар'єру. Для бар'єру довільної форми коефіцієнт прозорості бар'єру (D) (імовірність подолання бар'єру) визначається виразом

$$D = \frac{|\psi_3|^2}{|\psi_1|^2} = e^{-\frac{2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m[U(x) - E]} dx} \quad (1)$$

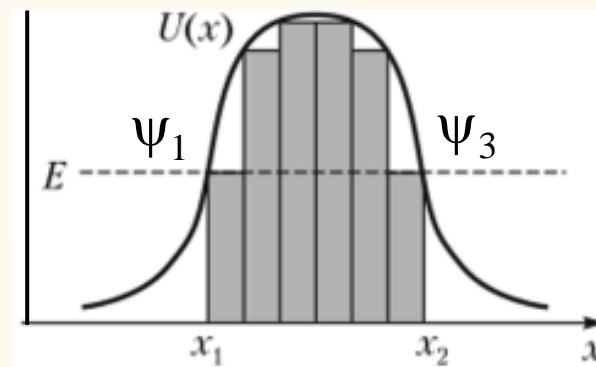


Рис.2

E – повна енергія частинки; $U(x)$ – форма потенціального бар'єру,
 m – маса частинки

Нехай два метали розділені непровідним проміжком (наприклад, вакуумом). Після приведення металів у контакт їх **рівні Фермі вирівнюються** (Рис. 3). Після розведення металів на них залишаються заряди різного знаку, а положення рівнів Фермі **не змінюються** (Рис. 4).

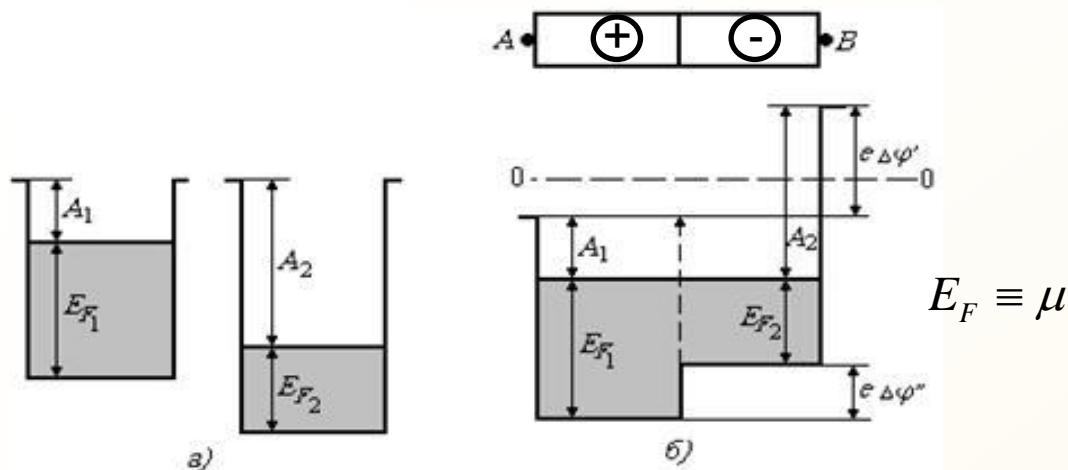


Рис. 3

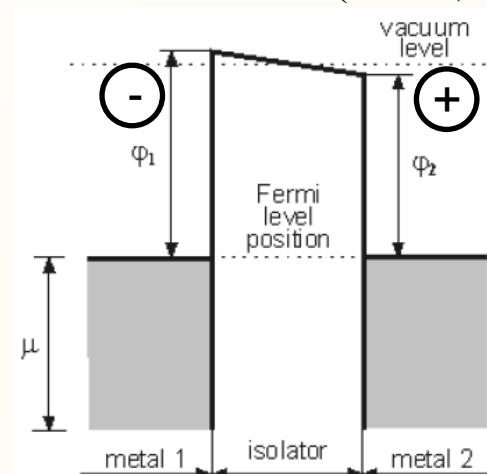


Рис. 4

Як видно з Рис. 4, між електронами у металі 1 та металі 2 існує **потенціальний бар'єр** ($\phi_1 - \phi_2$).

Для створення тунельного струму через такий бар'єр необхідно, щоб для переходів електронів, які локалізовані в металі 1 біля рівня Фермі, у металі 2 існували вільні стани, на які цим електронам енергетично вигідно переходити. Для цього до металу 2 **прикладають невелику додатну напругу (+V)**, завдяки якій рівень Фермі в металі 2 понижується відносно металу 1 (Рис.5). Це призводить до створення **тунельного струму переважно з металу 1 в метал 2** на вільні стани в зоні провідності металу 2 (**червоні штрихові лінії**)

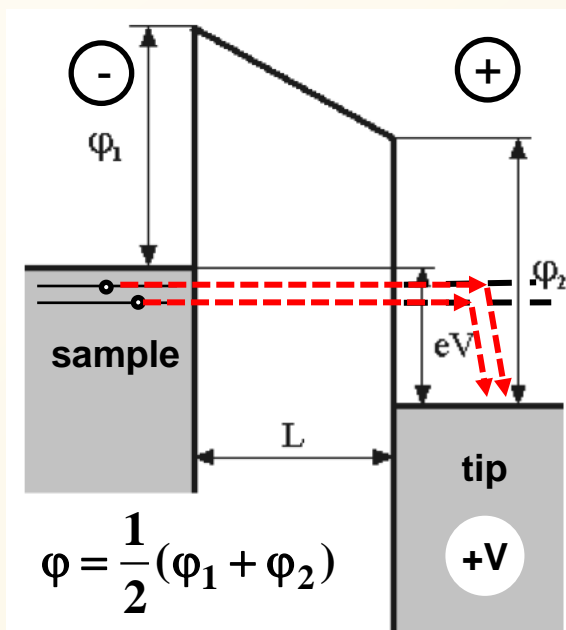


Рис. 5

Розрахунок показує, що за такої умови між металом 1 та металом 2 виникає **тунельний струм густиною (формула Сіммонса):**

$$J = \frac{b}{L^2} \left[\phi e^{-A\sqrt{\phi}L} - (\phi + eV) e^{-A\sqrt{\phi+eV}L} \right] \quad (2)$$

Де L – відстань між металами, $b = \frac{e}{2\pi h}$ $A = \frac{4\pi\sqrt{2m}}{h}$

За умови малих прикладених напруг $\phi \gg eV$ (це, як правило, $V = 0,1 - 1,0$ В) формула (2) набуває **спрощеного вигляду:**

$$J = C \frac{\sqrt{\phi V}}{L} e^{-A\sqrt{\phi}L} \quad (3)$$

Вираз (3) визначає густину тунельного струму через непровідний проміжок між двома провідниками. Важливо, що **густина тунельного струму експоненційно залежить від відстані між провідниками (!).**

Цей факт відкриває можливість з високою точністю реєструвати зміну відстані між провідниками за змінами густини тунельного струму.

Металевий електрод, на який подається невелика зміщуюча напруга ($+V$) називають **зондом**. Він закінчується **вістрям (tip)** діаметром декілька нанометрів (в кращих вістрях – декілька ангстремів). Електрони зі зразка тунелюють до зонда (чи навпаки, залежно від полярності напруги V) і **сила тунельного струму визначається відстанню між зразком і вістрям.**

2. Принципова схема СТМ

4

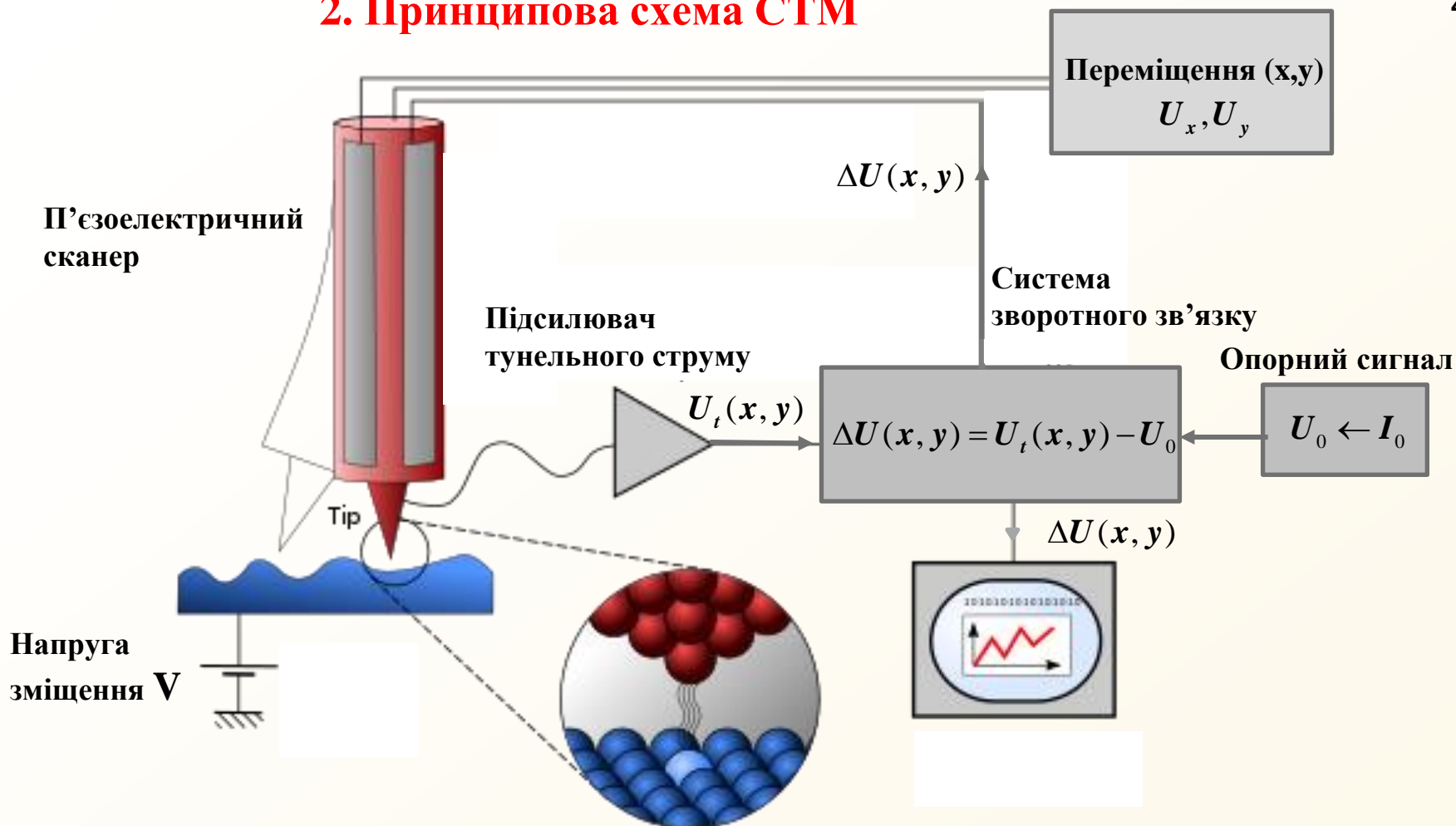


Рис. 6

П'єзоелектричний сканер (трипод) — елемент, який за рахунок зворотного п'єзоелектричного ефекту забезпечує переміщення вістря в трьох взаємно перпендикулярних напрямках (x, y, z) . На нього подається керуюча напруга, завдяки якій відбуваються деформації кераміки, які спричиняють переміщення зонда в площині (x, y) та переміщення зонда по вертикалі (z) .

Тунельний мікроскоп може працювати **у двох режимах**: сталого тунельного струму та⁵ сталої висоти.

Режим сталого тунельного струму.

Сила тунельного струму між зразком та вістрям, як правило, складає **1 - 10 наноампер**, а відстань зонд-поверхня складає **0,3 – 1,0 нм**.

Сила струму вимірюється у кожній точці поверхні (x,y) і після підсилення підсилювачем тунельного струму формується сигнал напруги $U_t(x, y)$ (рис. 6).

У системі зворотного зв'язку він порівнюється з опорним сигналом U_0 . Величина останнього підбирається такою, щоб він відповідав середині діапазону зміни струму на вольт-амперній характеристиці зонду. Утворений сигнал різниці $\Delta U(x, y) = U_t(x, y) - U_0$ записується у робочий файл сканування та подається на електрод, який спричиняє переміщення зонда по вертикалі так, щоб $\Delta U(x, y) \rightarrow 0$.

В момент $\Delta U(x, y) = 0$

сила тунельного струму в даній точці поверхні $I_t(x, y) = I_0$, а координата зонда $Z(x, y) \sim \Delta U(x, y)$. В іншій точці поверхні висота зонда над поверхнею вже інша, формується новий сигнал різниці, але за рахунок системи зворотного зв'язку відстань між зондом та поверхнею (яка визначається струмом I_0), відпрацьовується так, щоб повернутися до попереднього значення (рис.7).

Результатом є множина експериментальних точок $\{\Delta U(x, y)\}_{I_0=const}$.

Режим сталої висоти.

У цьому режимі система зворотного зв'язку **відключена**.

Зонд рухається вздовж горизонтальної прямої над поверхнею зразка і в кожній точці поверхні сила тунельного струму різна, відповідно з відстанню від зонда до поверхні (рис.8).

Отже, зонд не рухається по вертикалі і тому в експерименті формується множина $\{\Delta U(x, y)\}_{Z=const}$

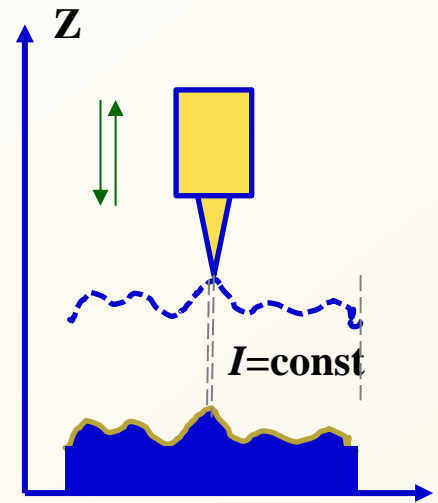


Рис. 7

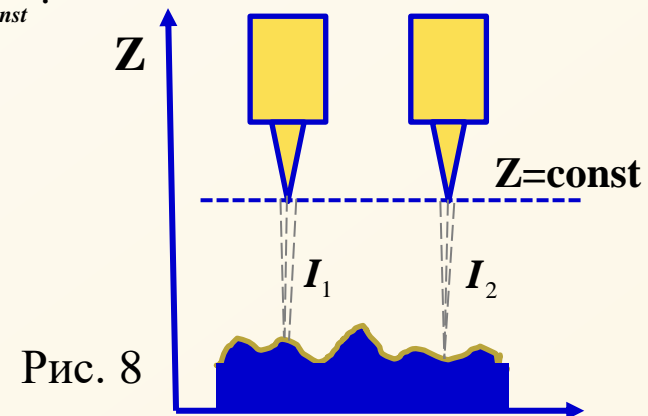


Рис. 8

3. 1. Дослідження рельєфу поверхні

Роздільна здатність при скануванні поверхні методом СТМ складає

$$\Delta Z = (0,01 - 0,05) \text{ нм}; \Delta X, \Delta Y = (0,1 - 1,0) \text{ нм},$$

Тобто фактично дозволяє фіксувати окремі атоми (наприклад, атомні радіуси

$$R_a(\text{Si}) \approx 0,11 \text{ нм}; R_a(\text{Cu}) \approx 0,14 \text{ нм}$$

Сканування відбувається **покроково** вздовж **окремих рядків**, кожен з яких проходить тільки в одному напрямку (щоб мінімізувати спотворення, викликані недосконалістю п'єзокераміки) (Рис. 9). При цьому можна сформувати як 2D, так і 3D зображення рельєфу (Рис. 10, 11).

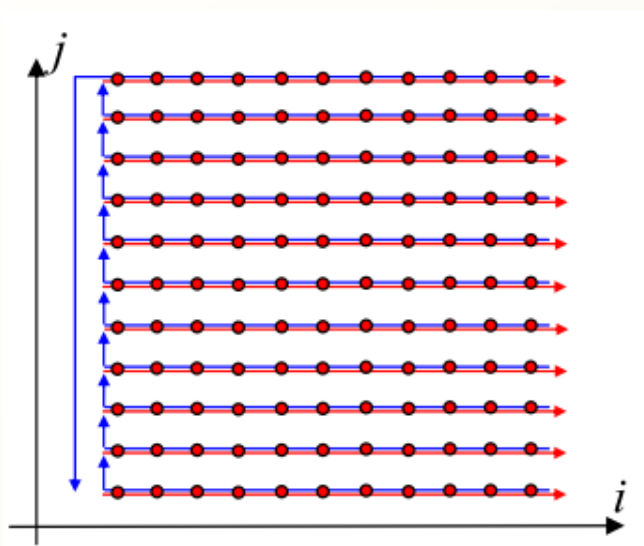


Рис. 9

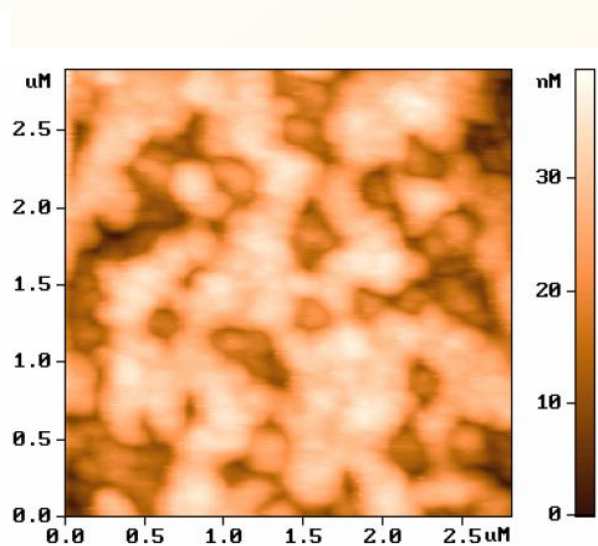


Рис. 10

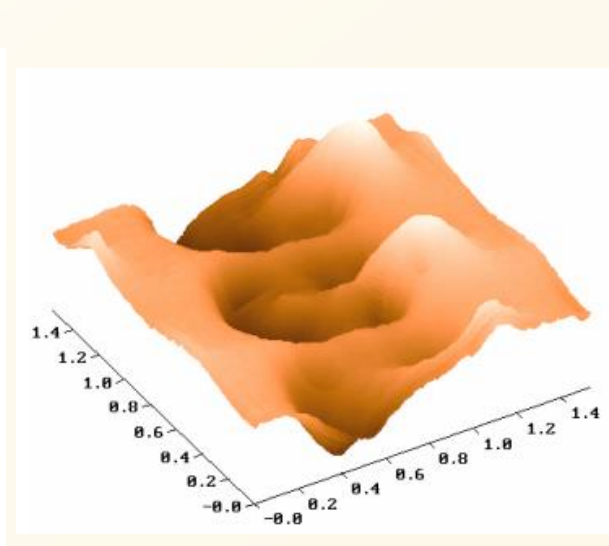


Рис. 11

Деякі приклади дослідження поверхні

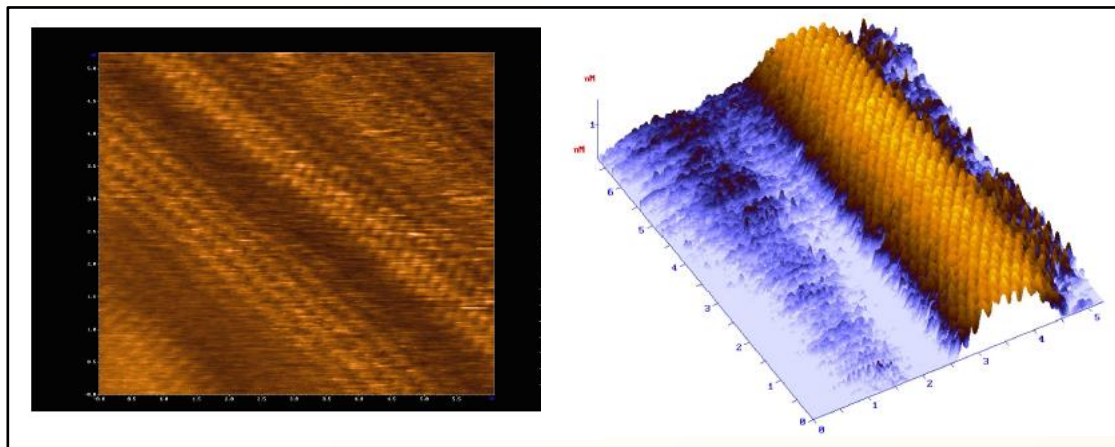
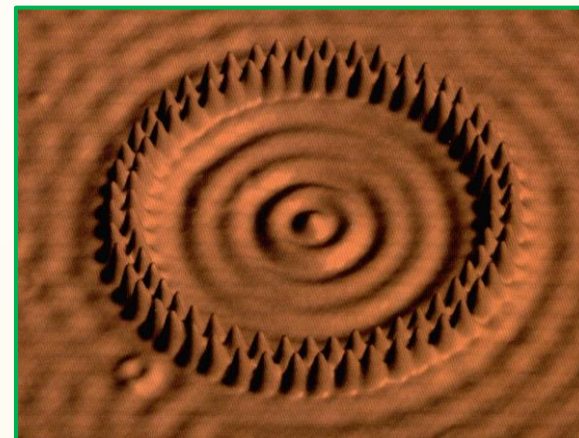


Рис. 12. Вуглецеві нанотрубки



Кільце з атомів Fe на поверхні Cu

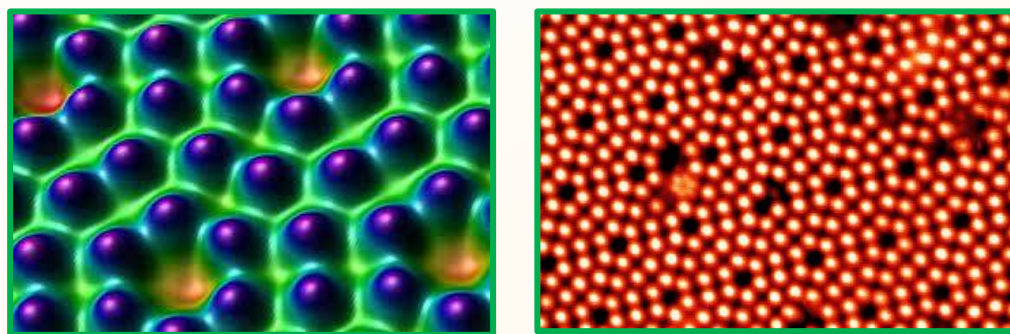
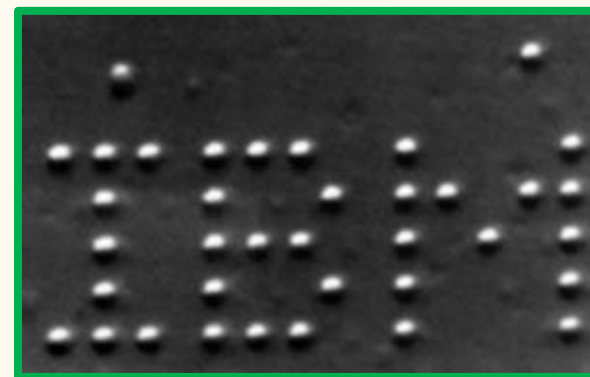


Рис. 13. Атоми Si на поверхні (111)



атоми Xe на поверхні Ni

Рис. 14. Керування положенням атомів на поверхнях

3.2. Визначення локальної густини електронних станів

У кожній точці поверхні зразка можна отримати **вольт-амперну характеристику (ВАХ)** – залежність тунельного струму від напруги V . Блок-схема експериментальної установки наведена на рис. 15. Типовий вигляд ВАХ для зразка **Pt** наведено на рис. 16. Важливо, що сила тунельного струму визначається **функцією густини електронних станів зразка $\rho_s(E)$** :

$$I(V) = B \int_0^{eV} \rho_s(E) dE \quad (4)$$

Диференціюванням (4) отримуємо:

$$\rho_s(eV) \sim \frac{\partial I}{\partial V} \quad (5)$$

Отже, залежність $\rho_s(E)$ в кожній точці поверхні зразка можна отримати диференціюванням ВАХ. На вкладці рис. 16 представлена така залежність для металу **Pt**. На рис. 17 наведено вигляд функції $\rho_s(E)$ для напівпровідника **GaAs** (враховано, що $E = eV \rightarrow dE \sim dV$).

Рис. 17

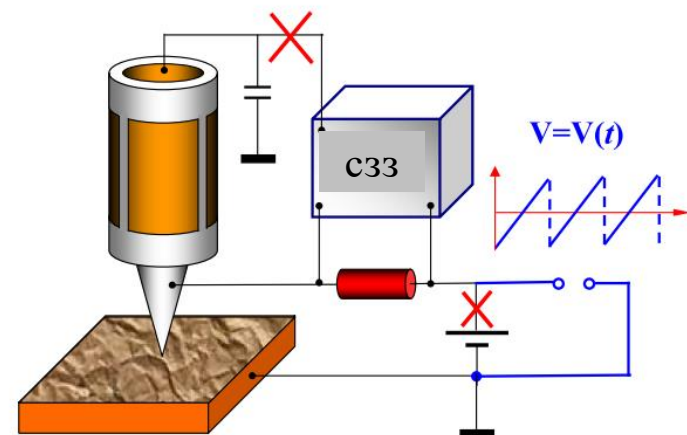


Рис. 15

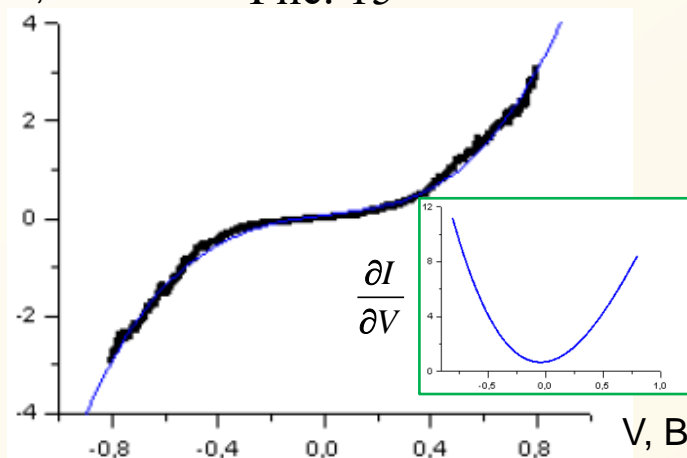


Рис. 16

