



Зондовая микроскопия: методы, теория, приложения

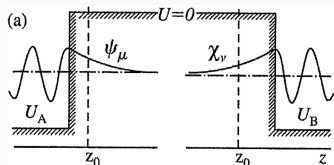
Лекция 10: Сканирующая туннельная спектроскопия

О.В. Синицына, Г.Б. Мешков, Я.В. Гиндикин

23 апреля 2018г

Московский государственный университет
Факультет наук о материалах

СТМ: теория Бардина



$$M_{\mu\nu} = \frac{\hbar^2}{2m} \int_{\Sigma} (\psi_{\mu} \nabla \chi_{\nu}^* - \chi_{\nu}^* \nabla \psi_{\mu}) \cdot d\mathbf{S}$$

Модель плоского интерфейса:

$$M_{\mu\nu} = \frac{\hbar^2 \kappa_{\mu}}{m} \psi_{\mu}(0) \chi_{\nu}(s) \mathcal{S} \cdot e^{-\kappa_{\mu} s}$$

$$I = \frac{4\pi e}{\hbar} \int_{-\infty}^{\infty} (f(E_F - eV + \epsilon) - f(E_F + \epsilon))$$

$$\times \rho_A(E_F - eV + \epsilon) \rho_B(E_F + \epsilon) |M(\epsilon)|^2 d\epsilon$$

Модель Терсоффа-Хаманна:

$$M \propto \psi(\mathbf{r}_0)$$

Дифф. проводимость:

$$G \propto |\psi(\mathbf{r}_0)|^2 \rho_S(E_F) = \rho_S(E_F, \mathbf{r}_0)$$

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \partial_z^2 + U_A \right] \psi_{\mu} = E_{\mu} \psi_{\mu}$$

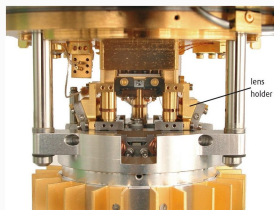
$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \partial_z^2 + U_B \right] \chi_{\nu} = E_{\nu} \chi_{\nu}$$

$$i\hbar \partial_t \Psi = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \partial_z^2 + U_A + U_B \right] \Psi$$

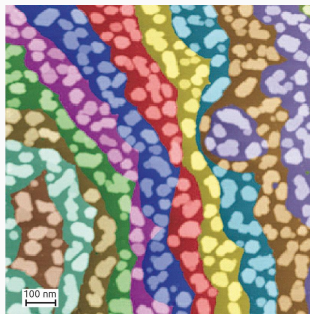
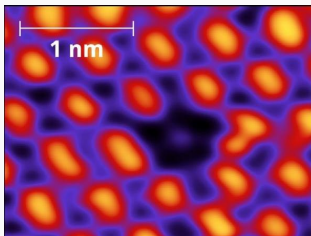
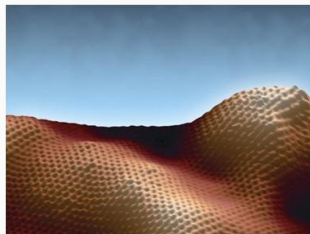
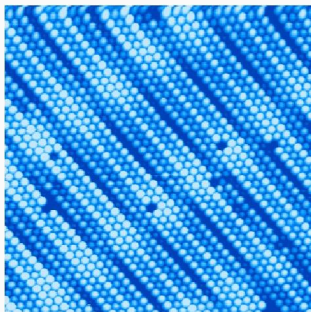
$$\Psi = \psi_{\mu} e^{-iE_{\mu} t / \hbar} + \sum_{\nu=1}^{\infty} c_{\nu}(t) \chi_{\nu} e^{-iE_{\nu} t / \hbar}$$

$$P_{\mu\nu} = \partial_t |c_{\nu}(t)|^2 = \frac{2\pi}{\hbar} |M_{\mu\nu}|^2 \delta(E_{\mu} - E_{\nu})$$

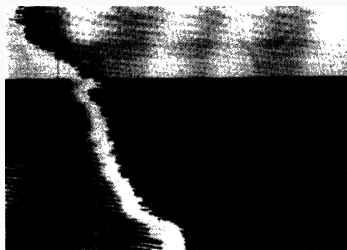
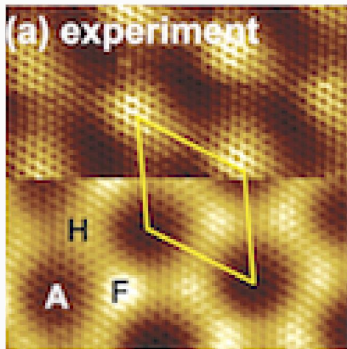
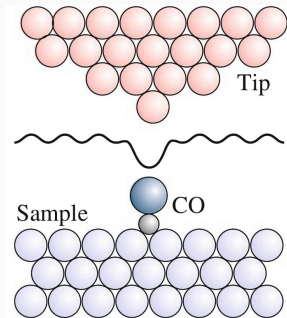
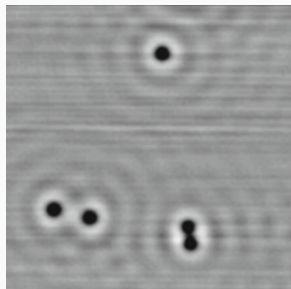
СТМ в реальной жизни: Scienta Omicron



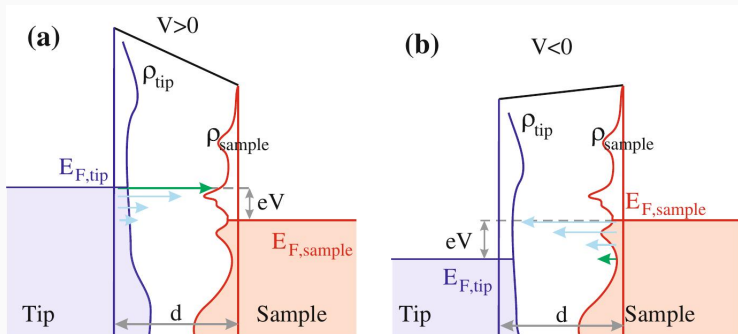
СТМ: радужные примеры



СТМ: инверсия контраста



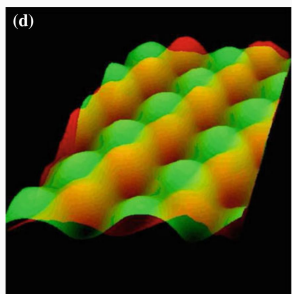
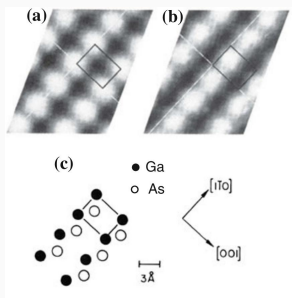
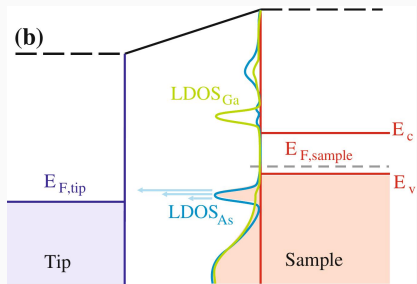
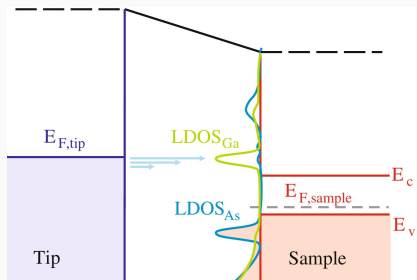
СТМ: асимметрия туннельного спектра



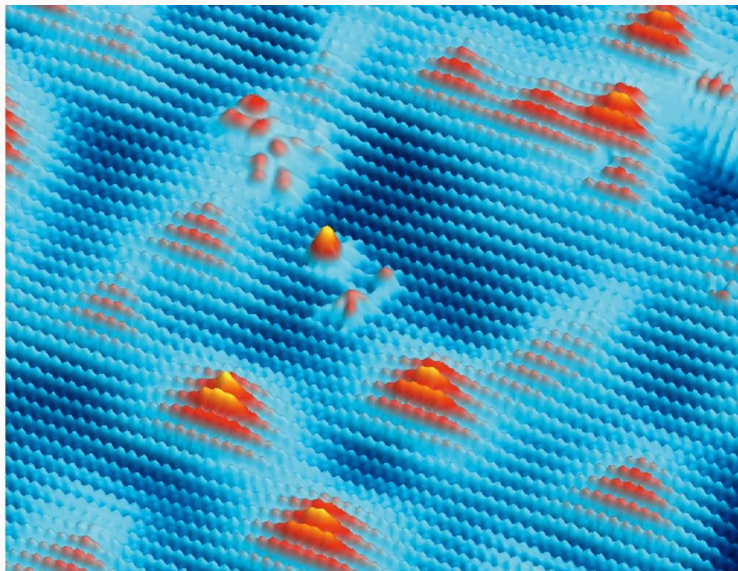
$$I = \frac{4\pi e}{\hbar} \int_{-\frac{1}{2}eV}^{\frac{1}{2}eV} \rho_S(E_F + \frac{1}{2}eV + \epsilon) \rho_T(E_F - \frac{1}{2}eV + \epsilon) |M(\epsilon)|^2 d\epsilon$$

$$M(\epsilon) = M(0) \exp\left(\frac{\kappa_0 \epsilon S}{2\bar{\phi}}\right); \quad \kappa_0 = \frac{\sqrt{2m\bar{\phi}}}{\hbar}$$

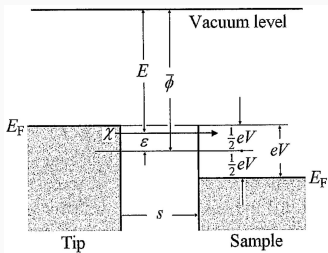
СТМ: зависимость от напряжения



СТМ: GaAs (110), легированный Zn



Сканирующая туннельная спектроскопия

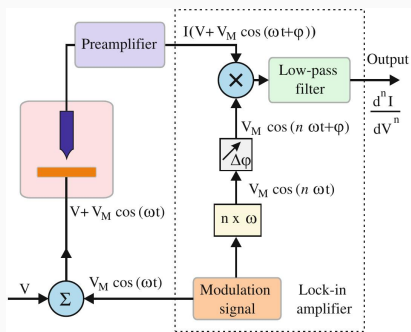
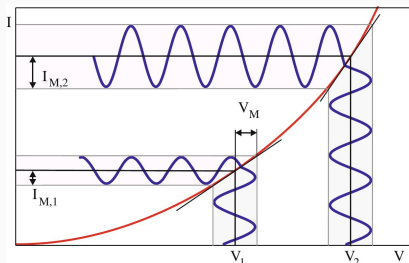


$$M(\epsilon) = M(0) \exp\left(\frac{\kappa_0 \epsilon s}{2\phi}\right)$$

$$I = \frac{4\pi e}{\hbar} \int_{-\frac{1}{2}eV}^{\frac{1}{2}eV} \rho_S(E_F + \frac{1}{2}eV + \epsilon) \rho_T(E_F - \frac{1}{2}eV + \epsilon) \times |M(0)|^2 \exp\left(\frac{\kappa_0 \epsilon s}{\phi}\right) d\epsilon$$

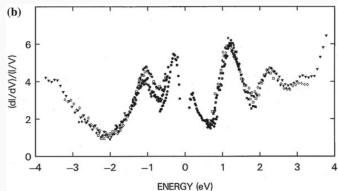
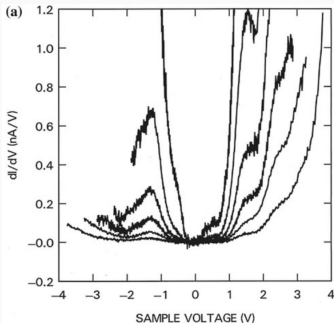
$$G = \frac{dI}{dV} \propto \frac{4\pi e^2}{\hbar} \rho_S(E_F + eV) \rho_T(E_F)$$

СТС: реализация



$$\begin{aligned}
 I &= f(V + V_M \cos(\omega t)) \\
 &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{V_M^k}{k!} \frac{d^k f(V)}{dV^k} \cos^k(\omega t) \\
 &\approx f(V) + \\
 &+ V_M \cos(\omega t) \frac{df(V)}{dV} \\
 &+ \frac{1}{4} V_M^2 \cos(2\omega t) \frac{d^2 f(V)}{dV^2} \\
 &+ \frac{1}{24} V_M^3 \cos(3\omega t) \frac{d^3 f(V)}{dV^3} \\
 &+ \dots
 \end{aligned}$$

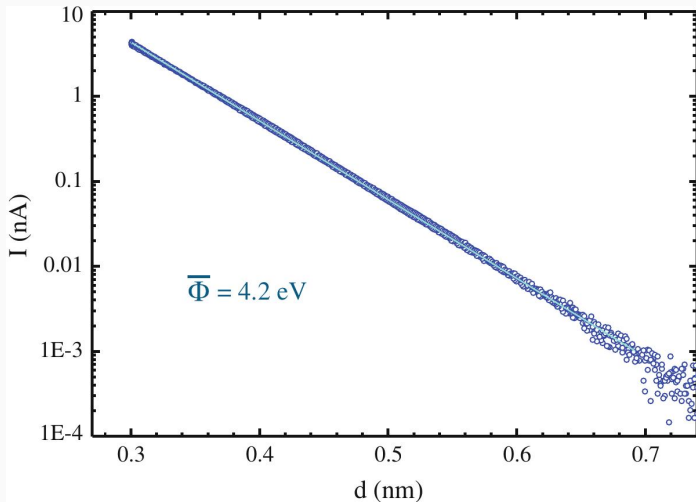
СТС: нормализация проводимости



Избавляемся от вклада фонового тока

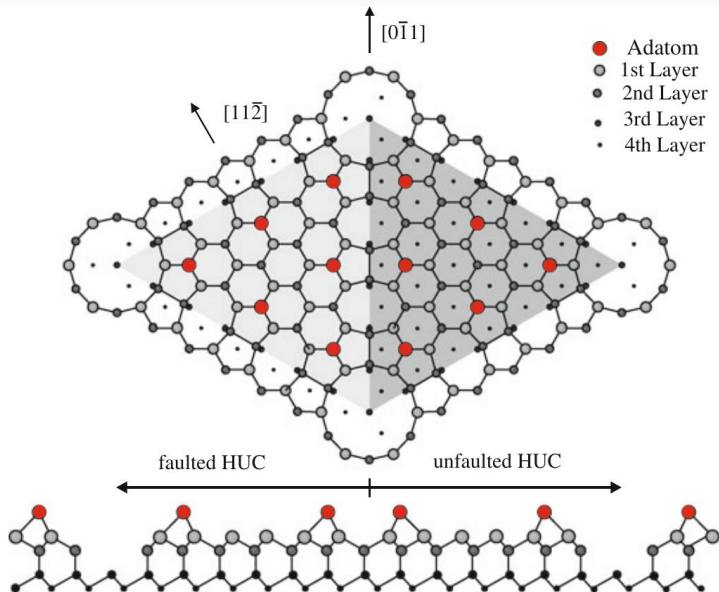
$$\begin{aligned}\frac{dI/dV}{I/V} &\approx \frac{\rho_S(E_F + eV)|M(eV)|^2}{\frac{1}{eV} \int_0^{eV} \rho_S(E_F + \epsilon)|M(\epsilon)|^2 d\epsilon} \\ &= \frac{\rho_S(E_F + eV)}{\frac{1}{eV} \int_0^{eV} \rho_S(E_F + \epsilon) \left| \frac{M(\epsilon)}{M(eV)} \right|^2 d\epsilon}\end{aligned}$$

СТС: определение высоты туннельного барьера

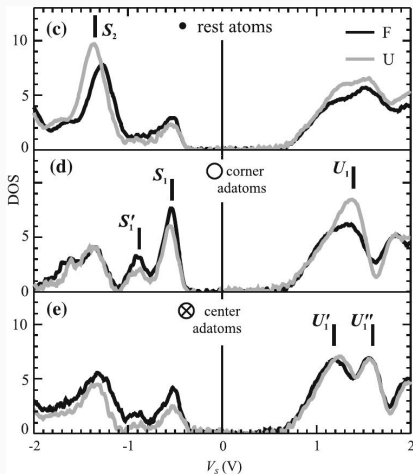
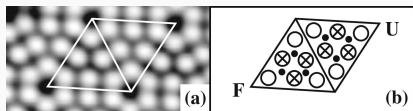


$$M(\bar{\Phi}, d) \propto \exp\left(-d\sqrt{\frac{2m\bar{\Phi}}{\hbar^2}}\right), \quad eV \ll \bar{\Phi}$$

СТС: реконструкция Si(111)-(7x7)



СТС: реконструкция Si(111)-(7x7)

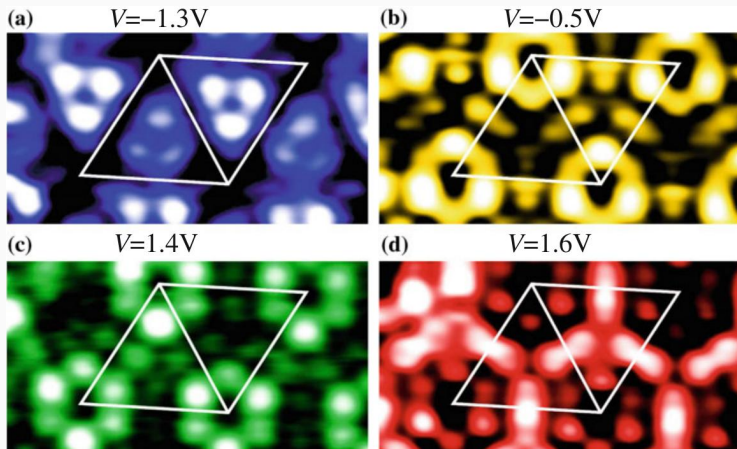


(a) СТМ-топография элементарной ячейки Si(111)-(7x7), $V = +2$ V, $I = 0.1$ nA.

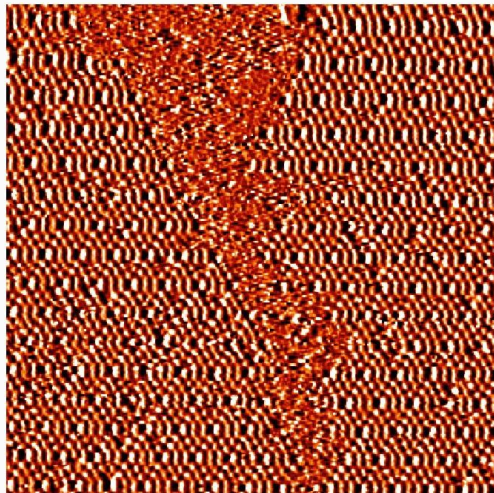
(c-e) СТС-спектры поверхности Si(111)-(7x7), снятые над адатомами и приповерхностными атомами, $T = 7$ K.

СТС: реконструкция Si(111)-(7x7)

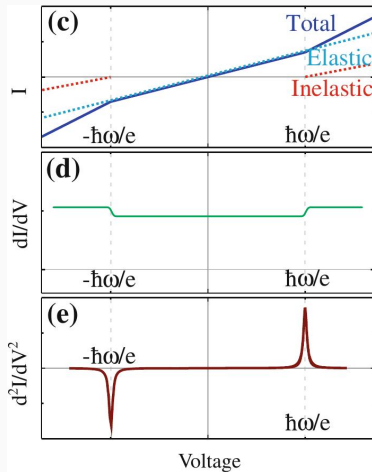
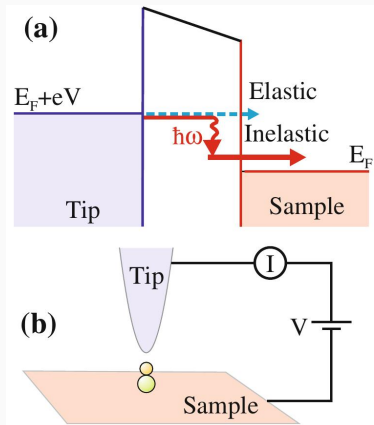
Карта нормализванной дифференциальной проводимости



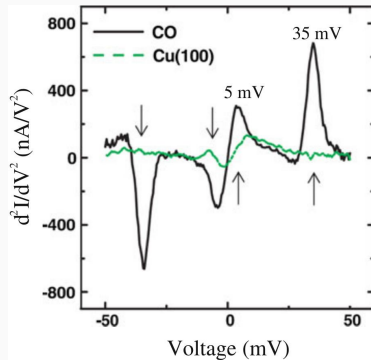
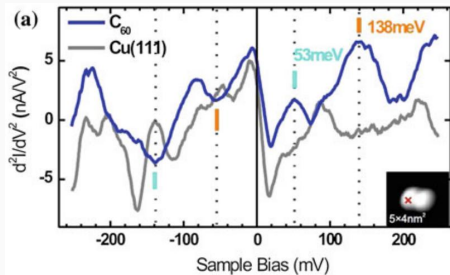
СТМ: переход $7\times 7 \rightarrow 1\times 1$ на поверхности Si(111)



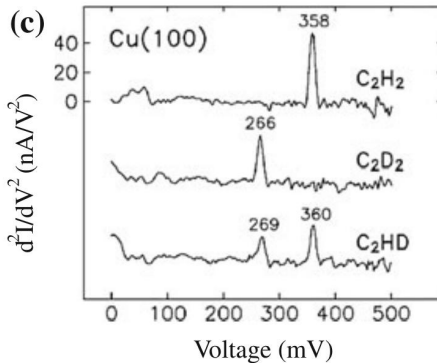
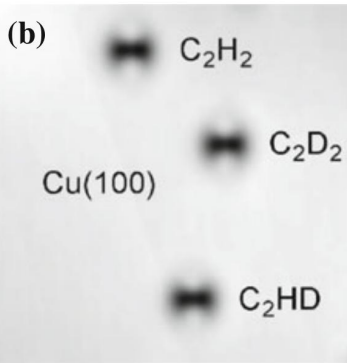
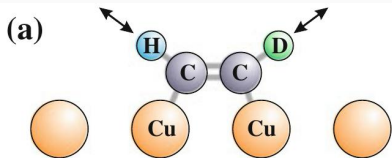
СТС: колебательная спектроскопия



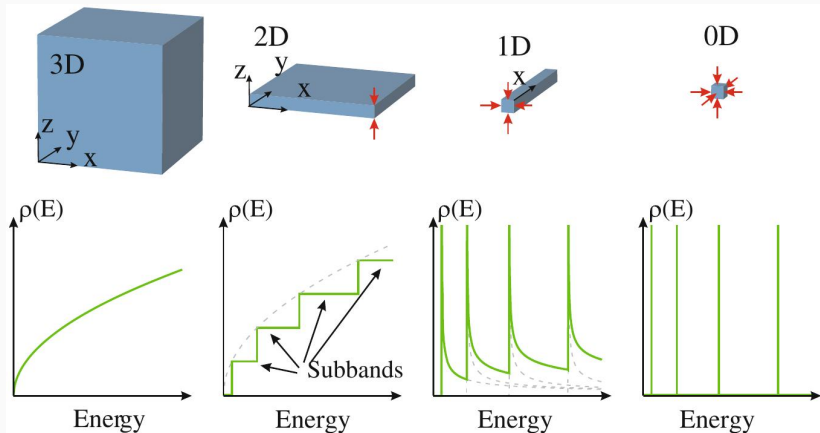
СТС: колебательная спектроскопия



СТС: колебательная спектроскопия



СТС: спектроскопия поверхностных состояний



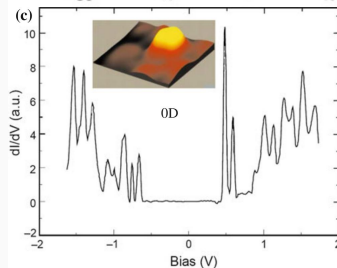
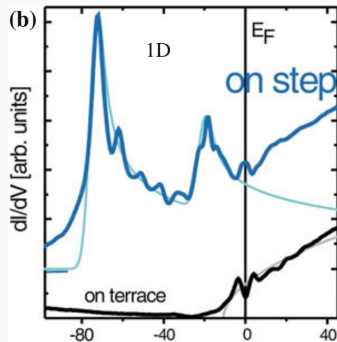
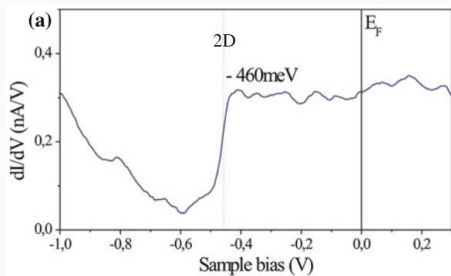
$$\rho(E) \propto \sqrt{E}$$

$$\rho(E) \propto \text{const}$$

$$\rho(E) \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$$

$$\rho(E) \propto \delta(E - E_i)$$

СТС: спектроскопия поверхностных состояний

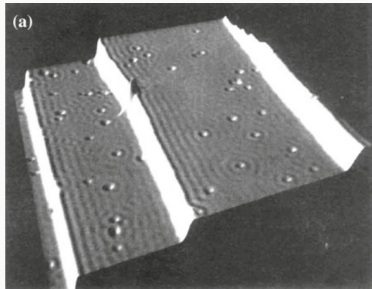


СТС поверхностных состояний: фриделевские осцилляции

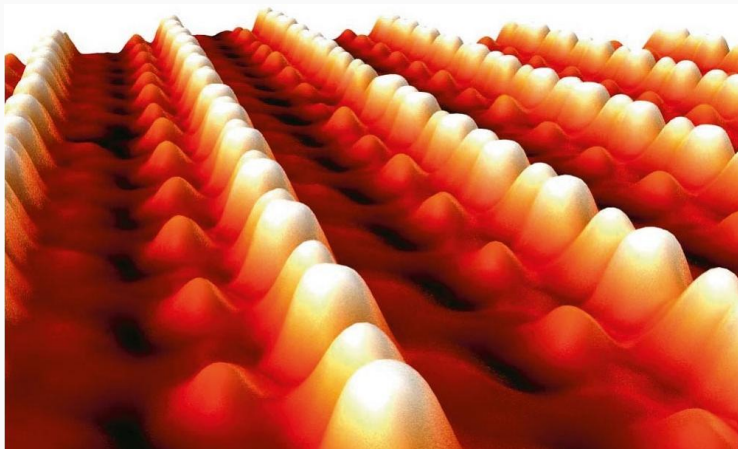
Au(111)



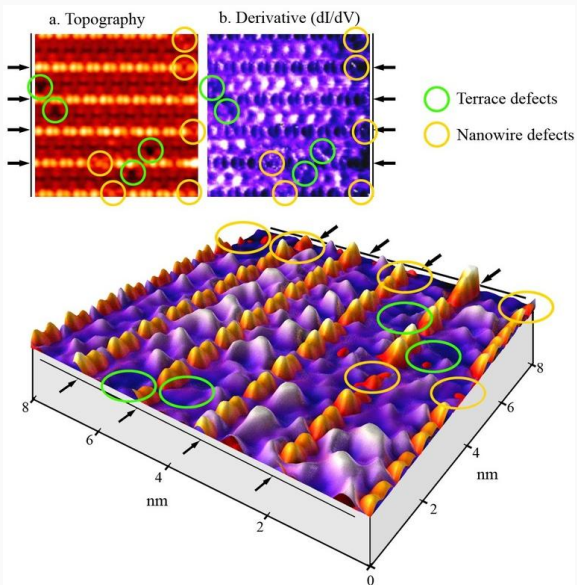
Cu(111)



СТМ: Pt квантовые провода на Ge(001)



СТС: Pt квантовые провода на Ge(001)





C. J. Chen.

Introduction to scanning tunneling microscopy.

Oxford University Press, 2008.



B. Voigtländer.

Scanning probe microscopy: Atomic force microscopy and scanning tunneling microscopy.

Springer, 2015.

Вопросы?