

Зондовые методы исследования поверхности: как увидеть атомы

Алексей Путилов

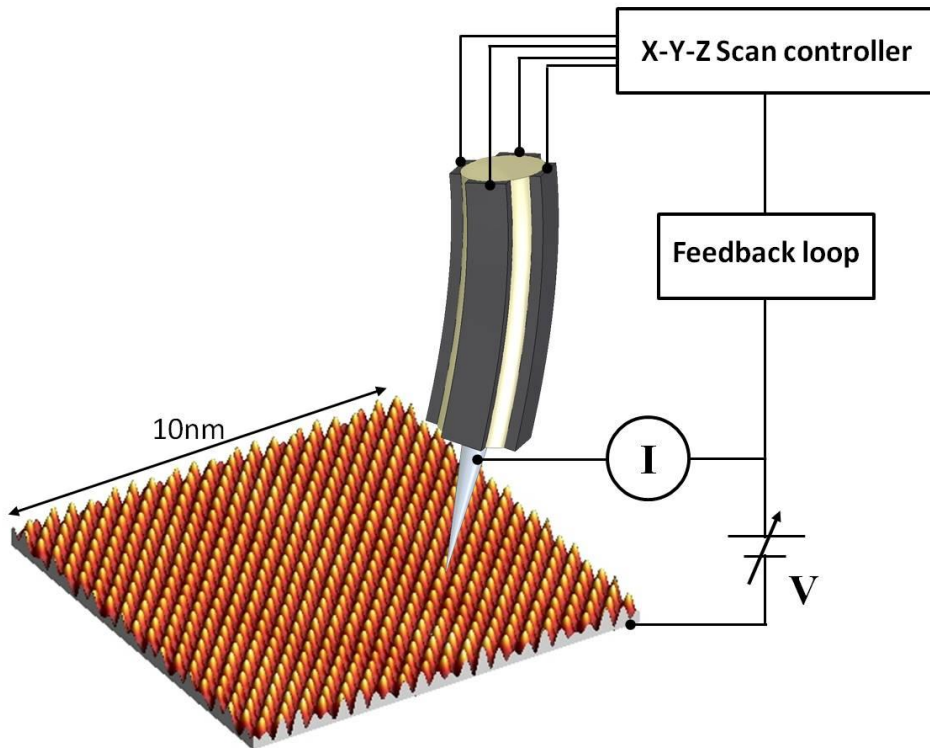
лаборатория Сверхпроводниковой наноэлектроники,
Московский физико-технический институт

лаборатория теории мезоскопических систем,
Институт физики микроструктур РАН, Н. Новгород

План

1. Сканирующие зондовые микроскопы. Виды
2. Атомно-силовая микроскопия
3. Магнитно-силовая микроскопия
4. Ближнепольная оптическая микроскопия.
5. Сканирующая туннельная микроскопия.
6. Некоторые результаты. Поверхность, реконструкции
7. Позиционирование зонда
8. Чистота поверхности, шумы.
9. Исследование плотности состояний

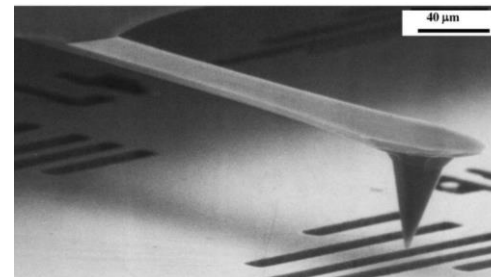
Общие принципы зондовой микроскопии



QPlus for VT STM



STM Tip



Изобретение сканирующего туннельного микроскопа

Герд Бинниг

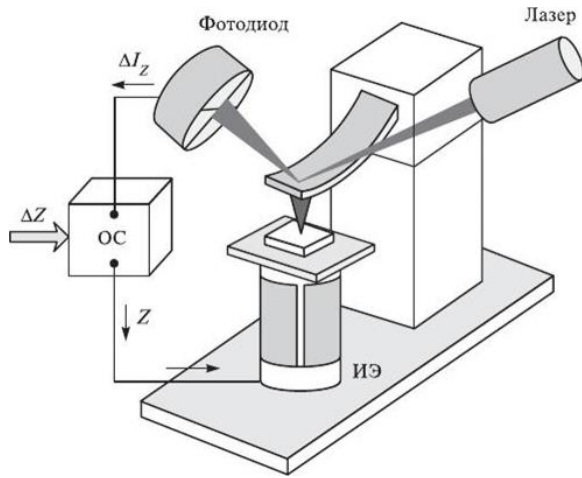
Генрих Рорер



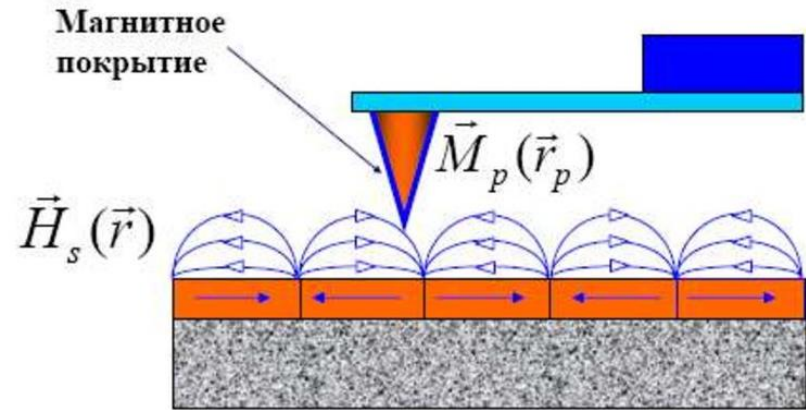
Нобелевская премия по физике (1986)
«За изобретение сканирующего
туннельного микроскопа»

Виды зондовых микроскопов

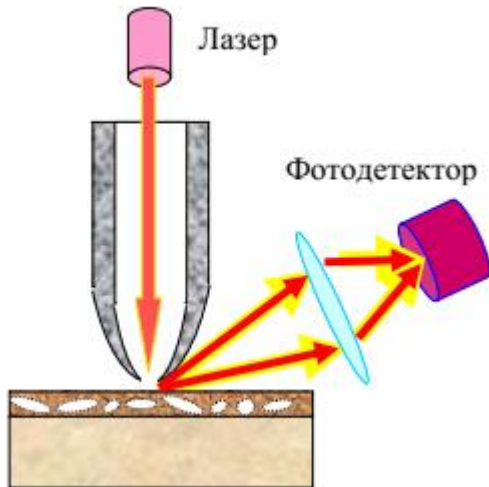
Атомно-силовой микроскоп



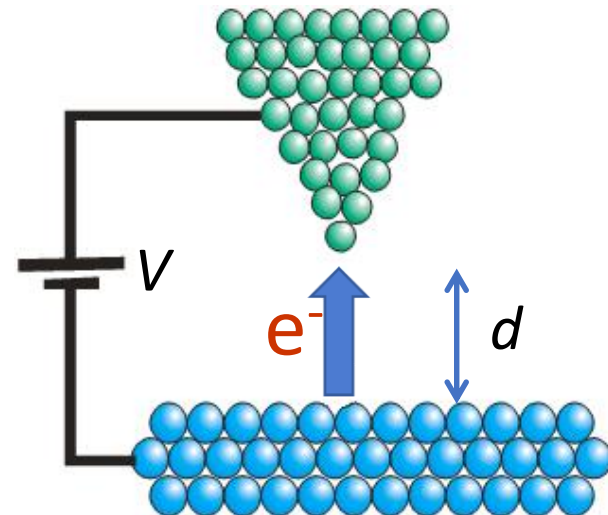
Магнитно-силовой микроскоп



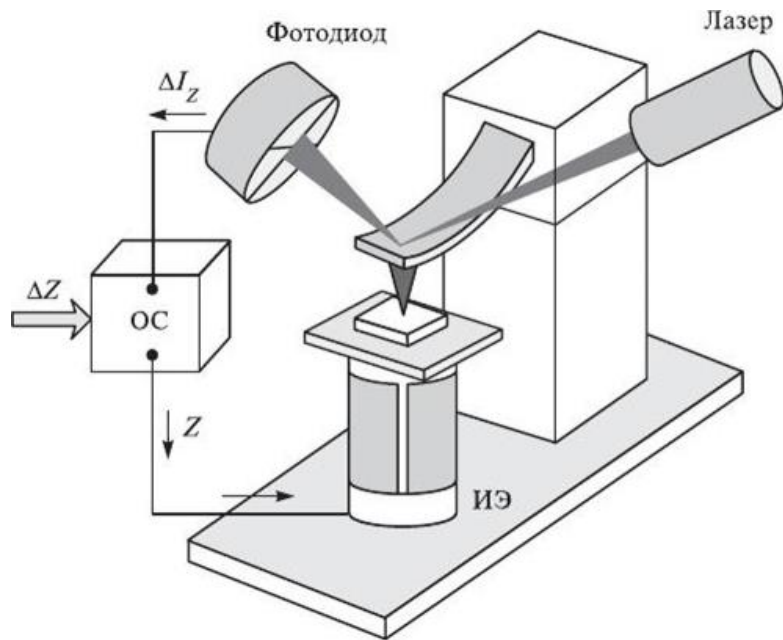
Ближнепольный оптический микроскоп



Сканирующий туннельный микроскоп

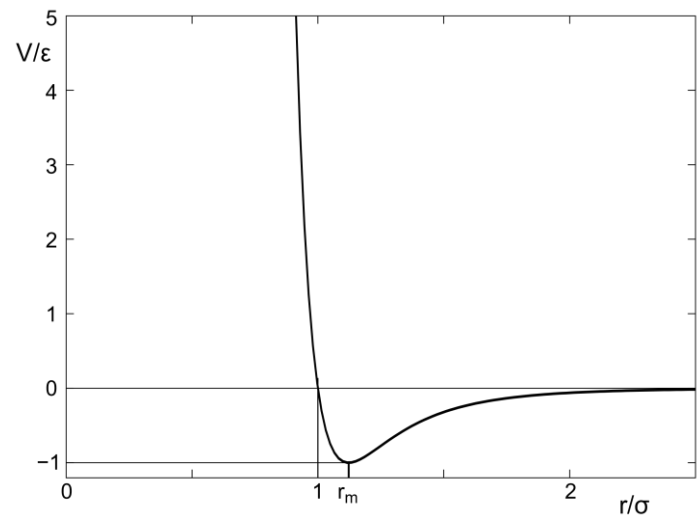


Атомно-силовой микроскоп



Потенциал Леннард - Джонса

$$U = \frac{a}{r^{12}} - \frac{b}{r^6}$$



Атомно-силовой микроскоп

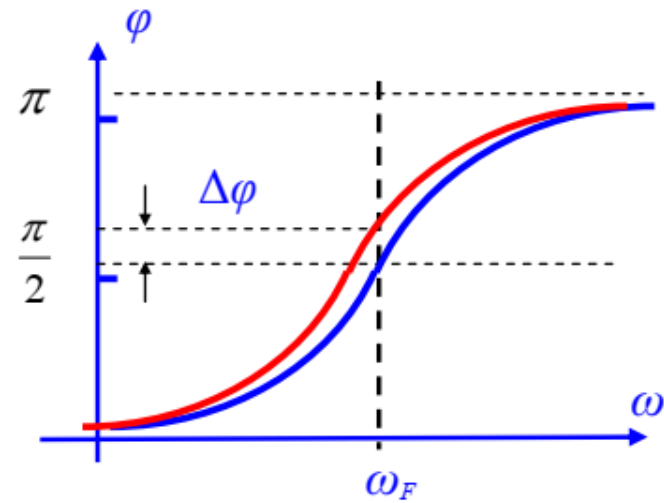
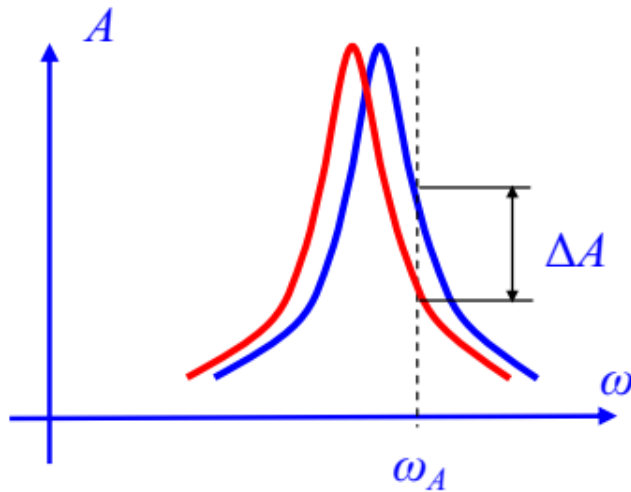
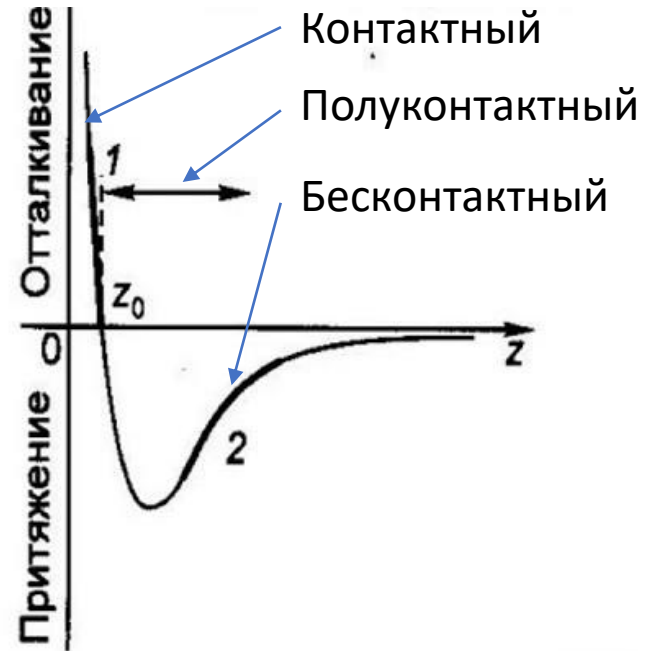
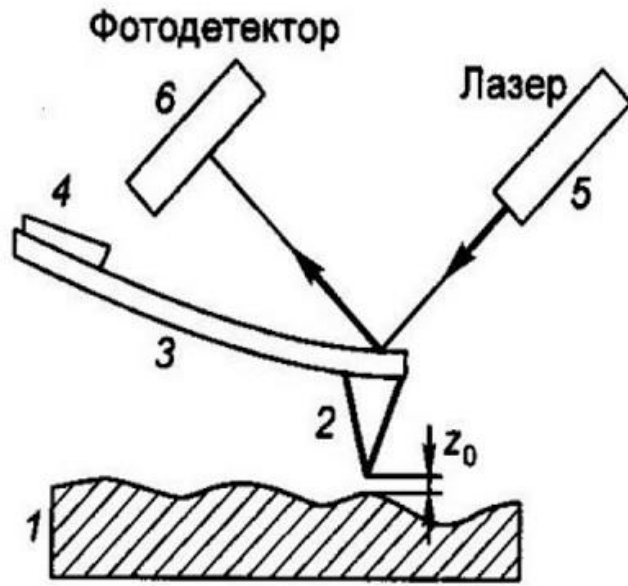
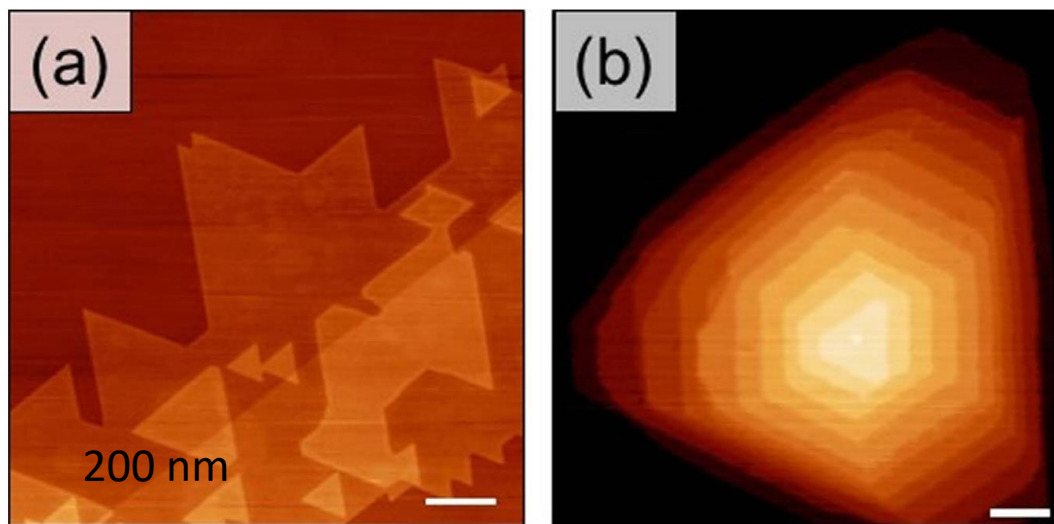
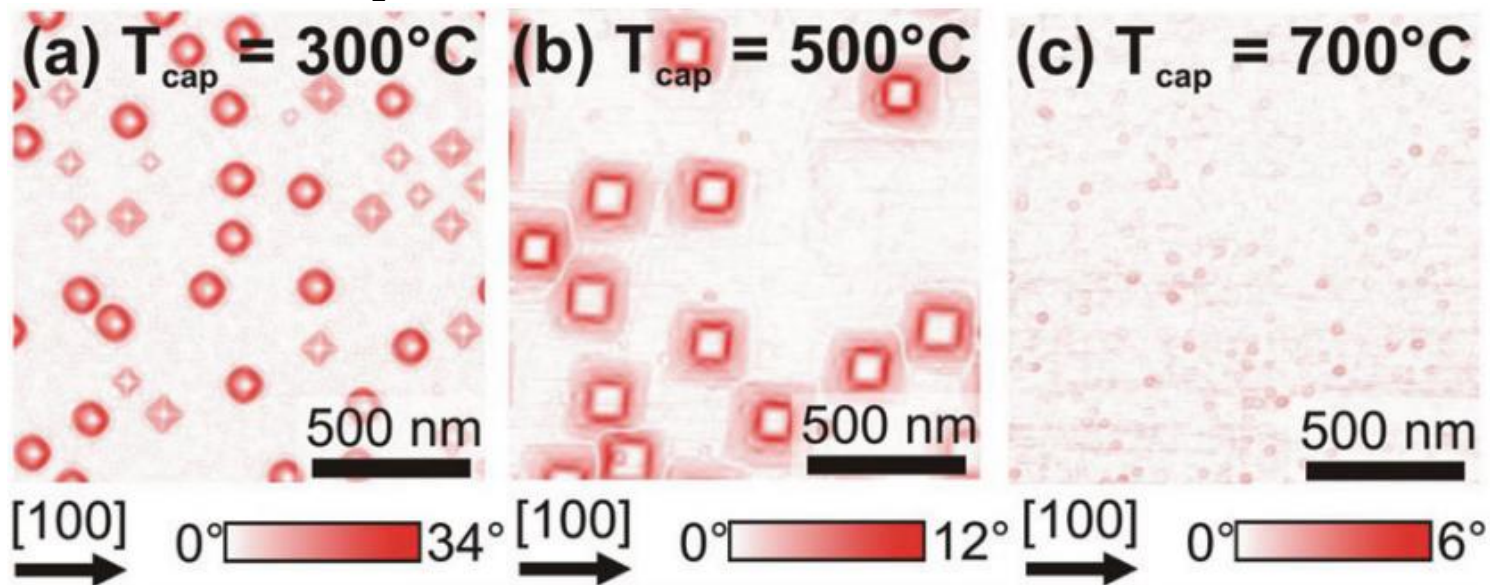


Рис. 90. Изменение амплитуды и фазы колебаний при изменении градиента силы

Атомно-силовой микроскоп. Некоторые результаты

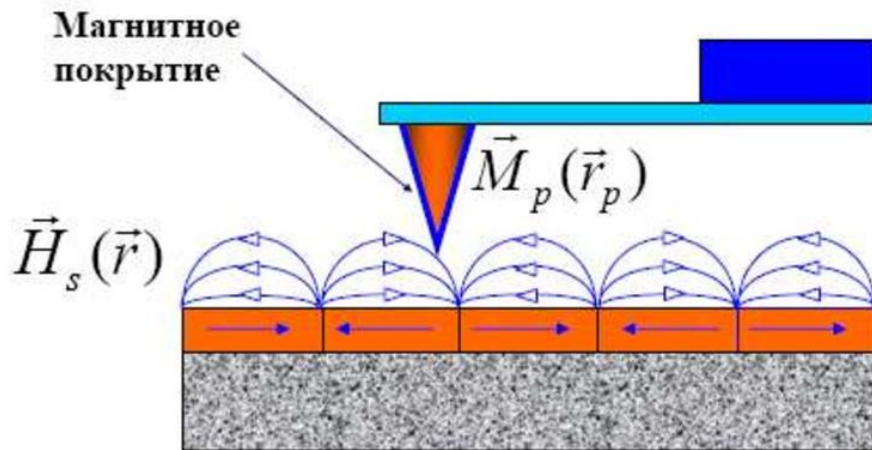


MoS₂ on HOPG



Ge островки на подложке Si

Магнитно-силовой микроскоп



$$W = -(\vec{M} \vec{B})$$

$$\vec{F} = \nabla (\vec{M} \vec{B})$$

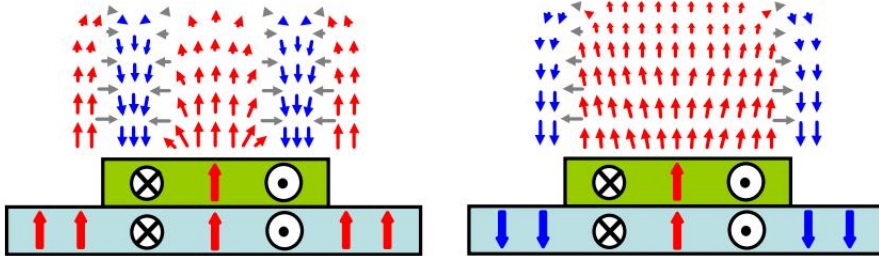
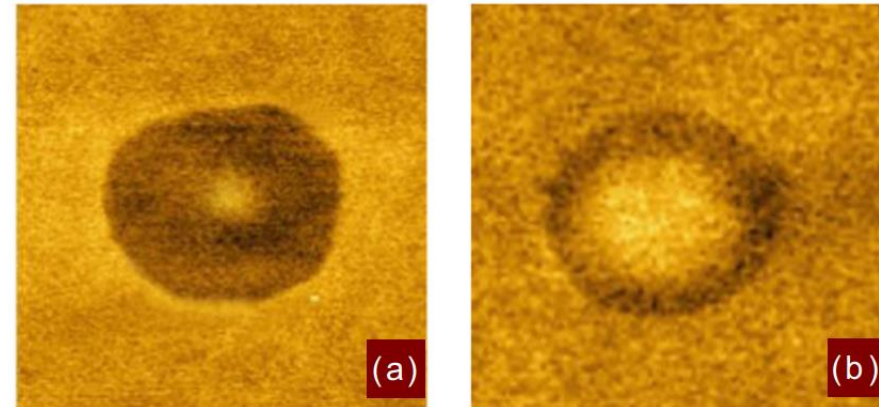
$$F_z = \left(\vec{M} \frac{\partial \vec{B}}{\partial z} \right)$$

Особенности:

- Двухпроходная методика
- Чувствителен ко второй производной магнитного поля

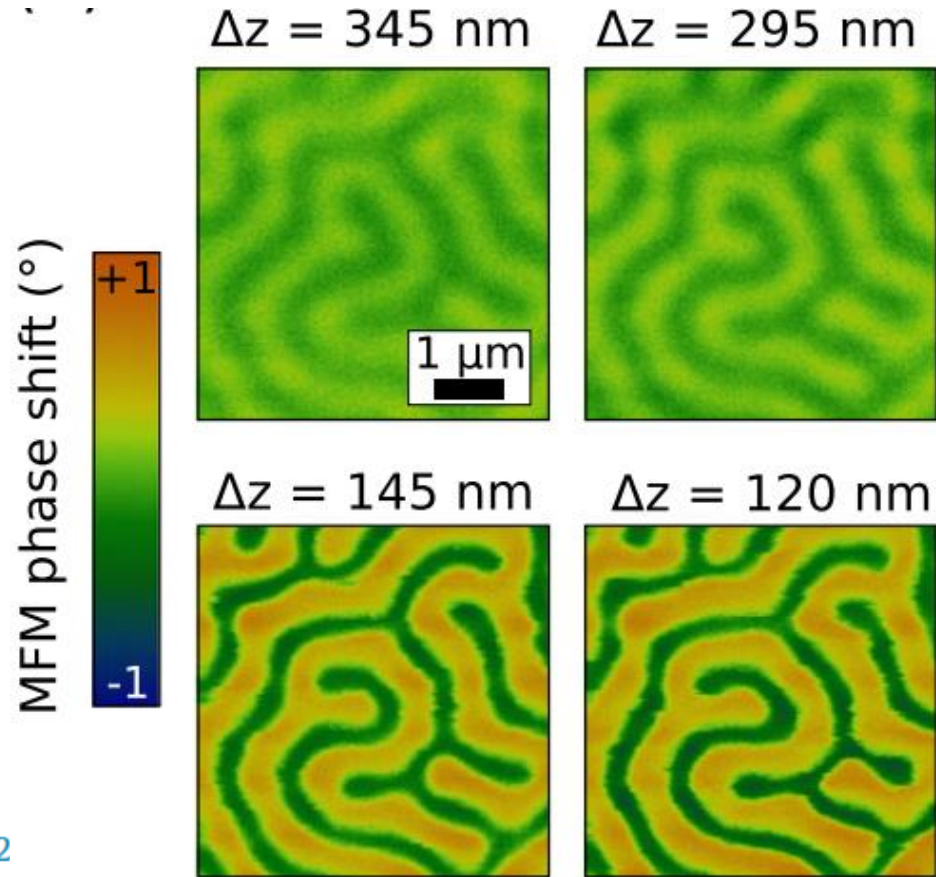
$$\Delta \omega \sim \frac{\partial F_z}{\partial z} = \left(\vec{M} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial z^2} \right)$$

Магнитно-силовой микроскоп. Некоторые результаты



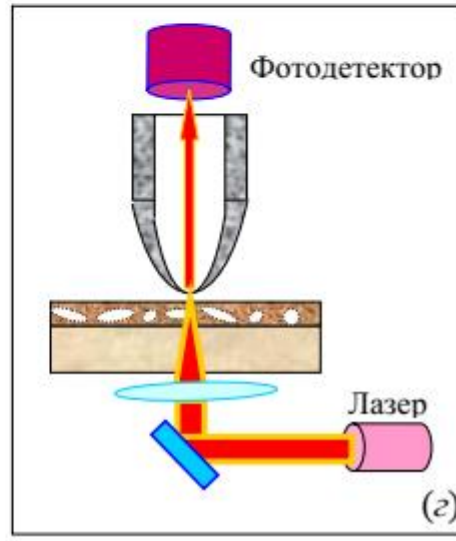
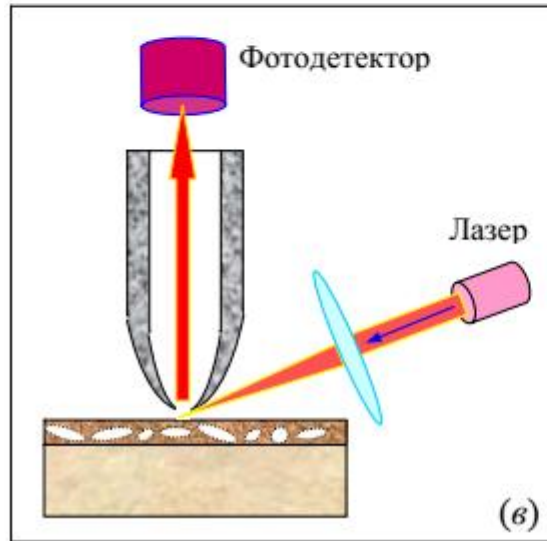
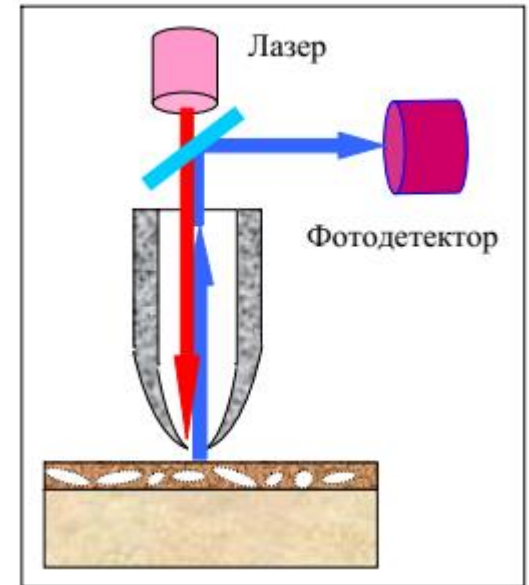
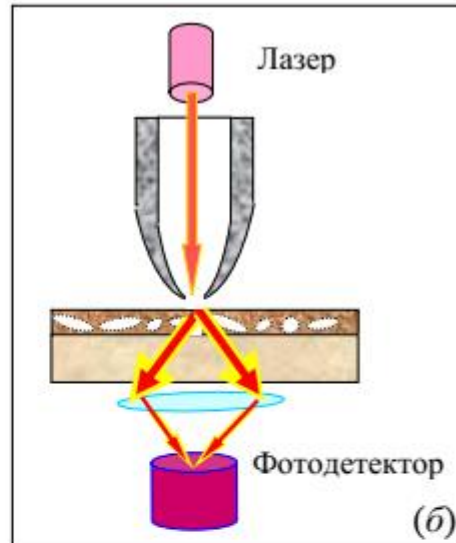
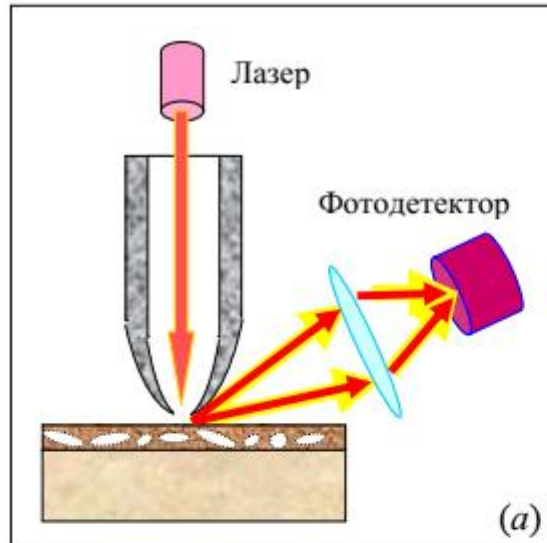
Co nanodisk on Co/Pt multilayer

Journal of Magnetism and Magnetic Materials 393 (2015) 452



Ta/ CoFeB/MgO multilayer

Ближнепольный оптический микроскоп



$$P_{tr} \sim P_{inc} \left(\frac{d}{\lambda} \right)^4$$

Ближнепольный оптический микроскоп. Некоторые результаты

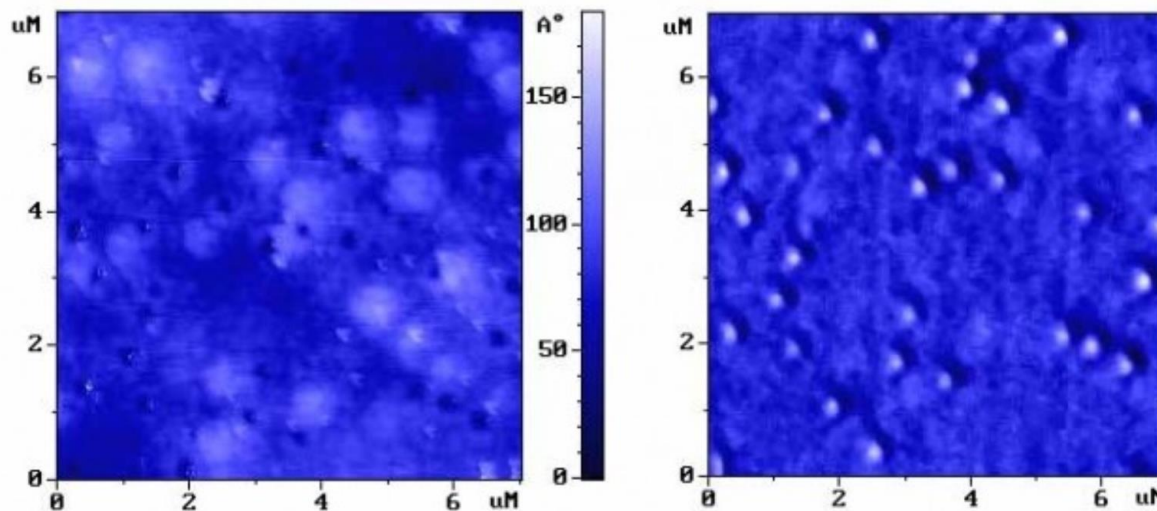
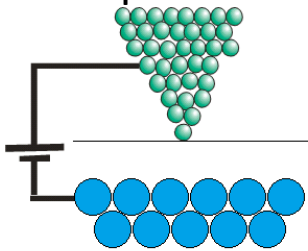


Рис. 102. “Shear force” АСМ изображение рельефа поверхности (слева) и ближнепольное оптическое изображение (справа) образца с квантовыми точками InAs [12]

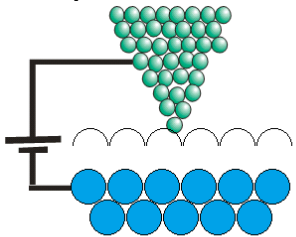
Принцип действия сканирующей туннельной микроскопии и спектроскопии

Топографическое изображение:

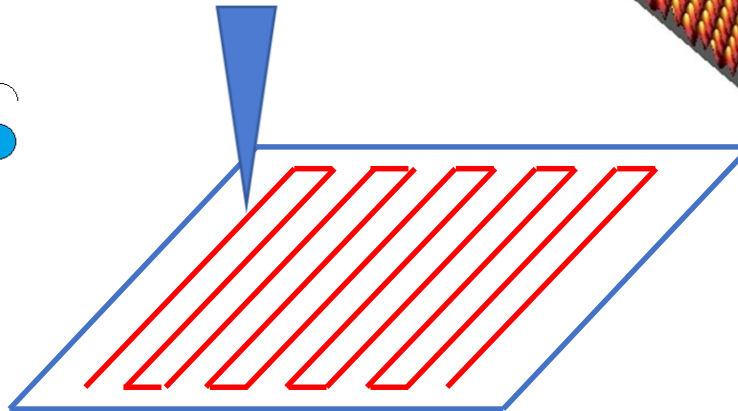
- 1) Режим постоянной высоты
(без обратной связи)



- 2) Режим постоянного туннельного тока
(с обратной связью)

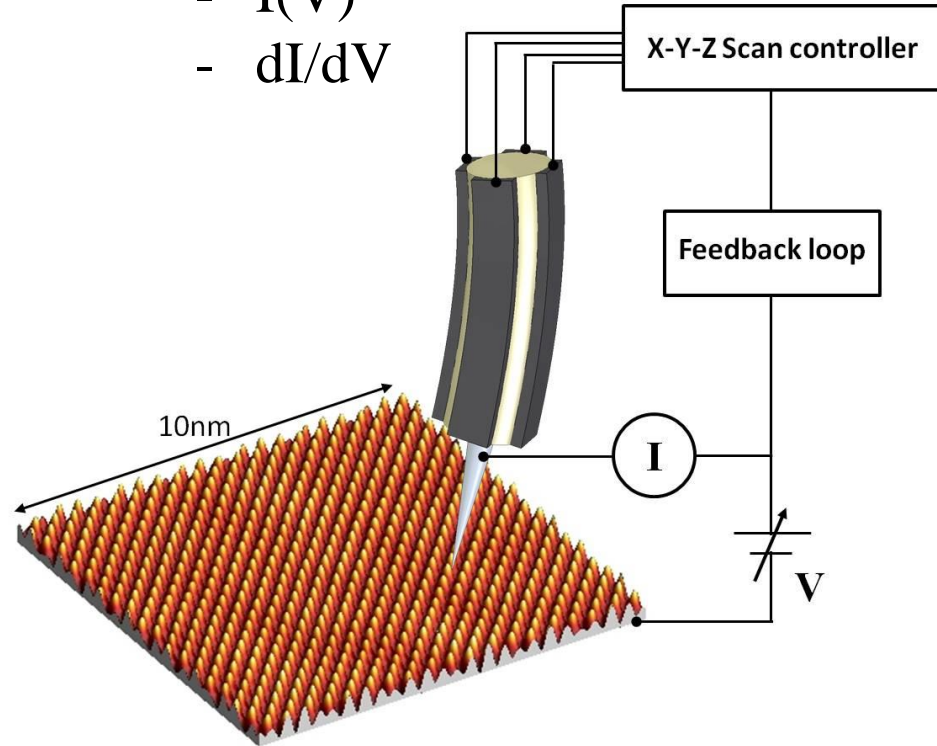


$$I \propto \exp(-\kappa d)$$



Туннельная спектроскопия:

- $I(V)$
- dI/dV

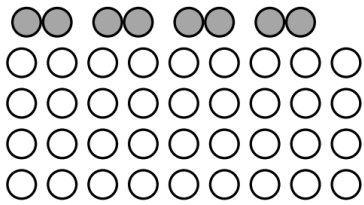


Сканирующий туннельный микроскоп



Реконструкция. Атомарное разрешение

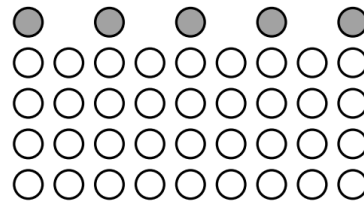
консервативная



а

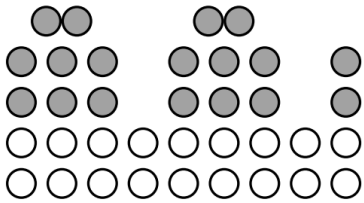
неконсервативная

только
верхний слой



б

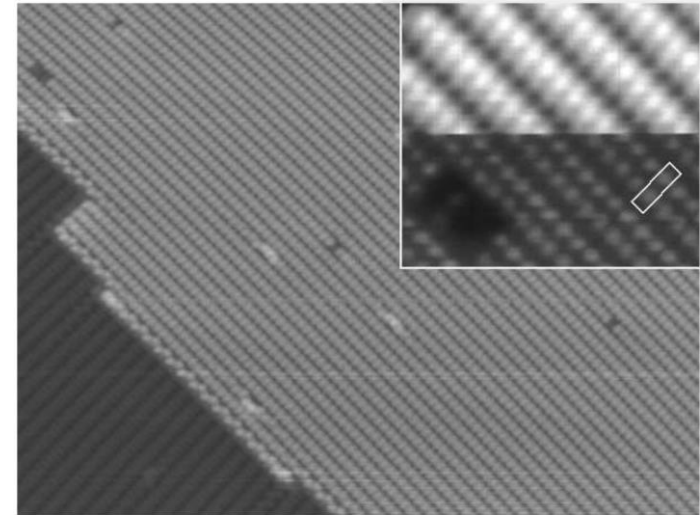
несколько
слоев



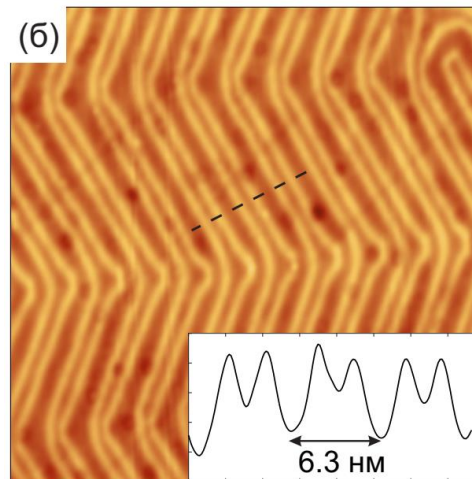
в

г

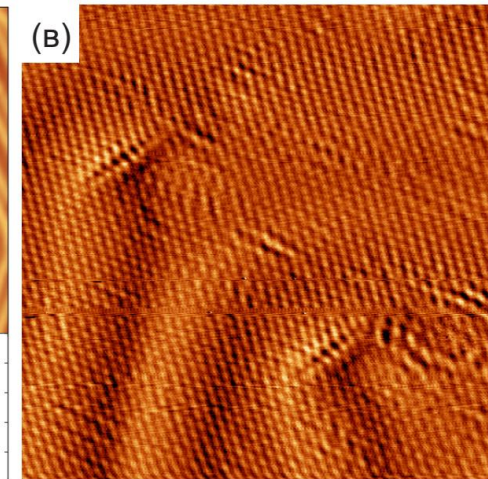
Si(111)2x1



Au(111) $22 \times \sqrt{3}$

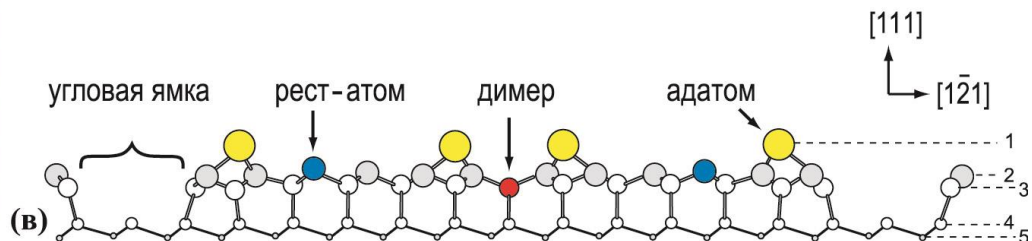
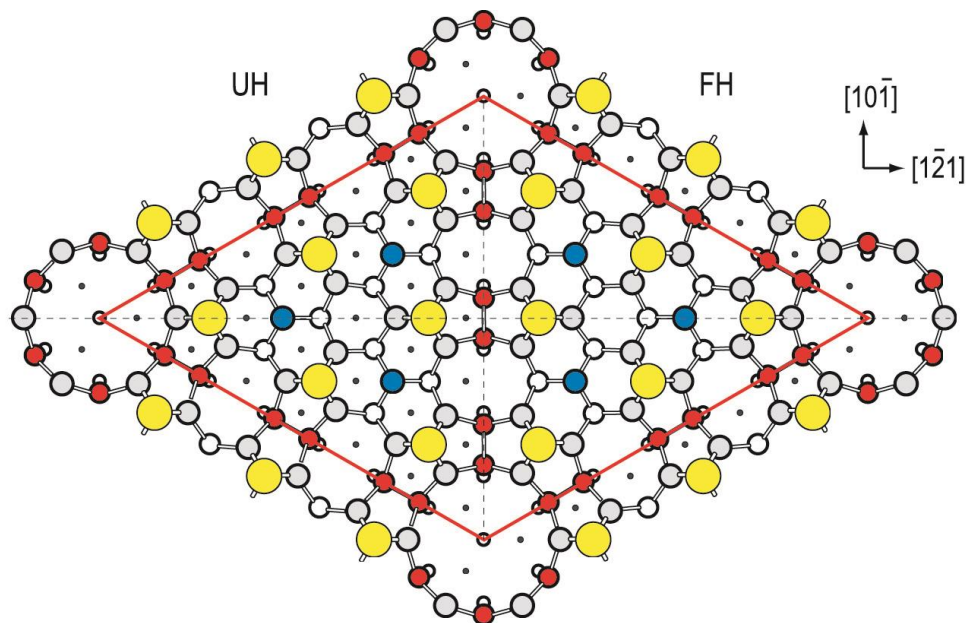
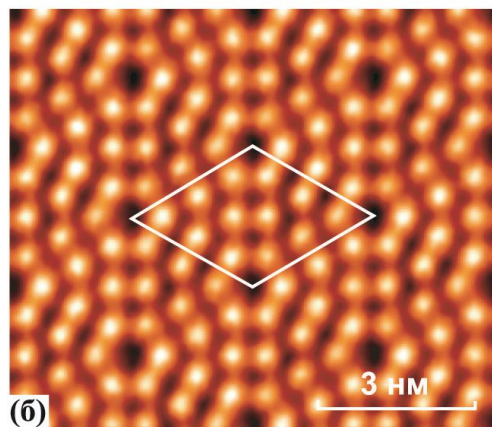
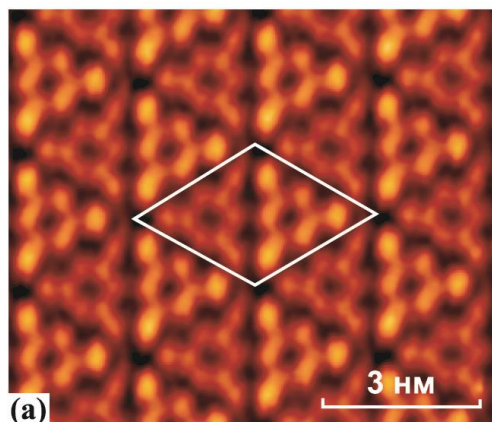


70×70 нм²



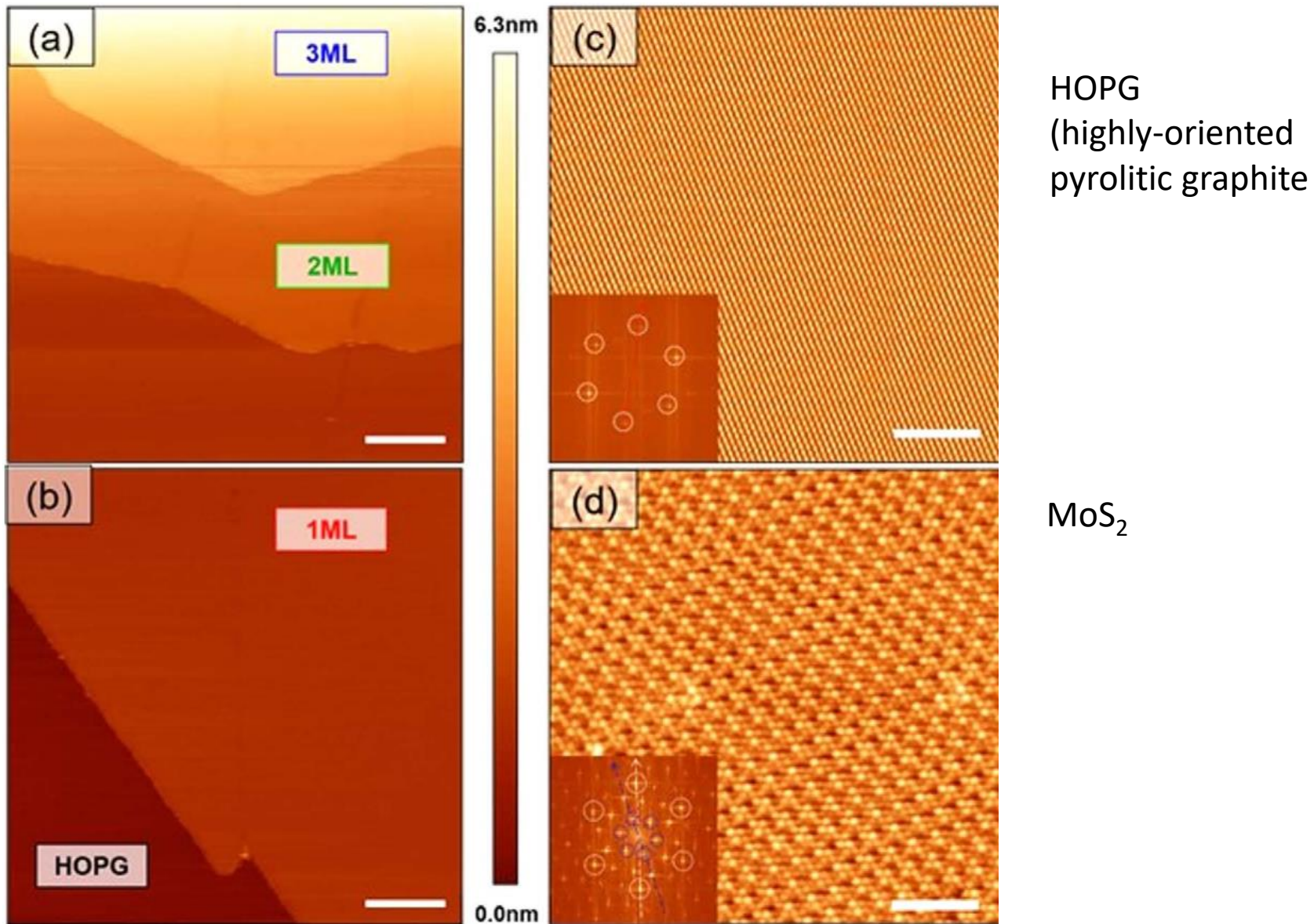
10×10 нм²

Реконструкция. Топография поверхности Si(111)7x7



Takayanagi K., Tanishiro Y., Takahashi S., Takahashi M. Structure analysis of Si(111)–7 × 7 reconstructed surface by transmission electron diffraction // *Surface Science*. 1985. V. 164. P. 367–392.

Атомарные поверхности HOPG, MoS₂



Сканирующая туннельная микроскопия. Манипуляции с отдельными атомами

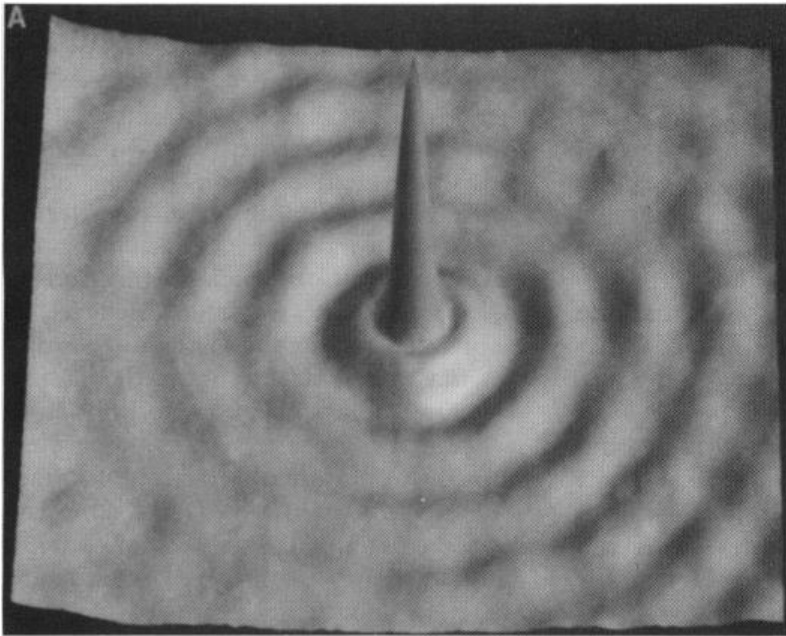


Fig. 1. (A) Constant current $130 \text{ \AA} \times 130 \text{ \AA}$ image of an Fe adatom on the Cu(111) surface ($V = 0.02$ volt, $I = 1.0$ nA). The apparent height of the adatom is $\sim 0.9 \text{ \AA}$. The concentric rings surrounding the Fe adatom are standing waves due to the scattering of surface state electrons with

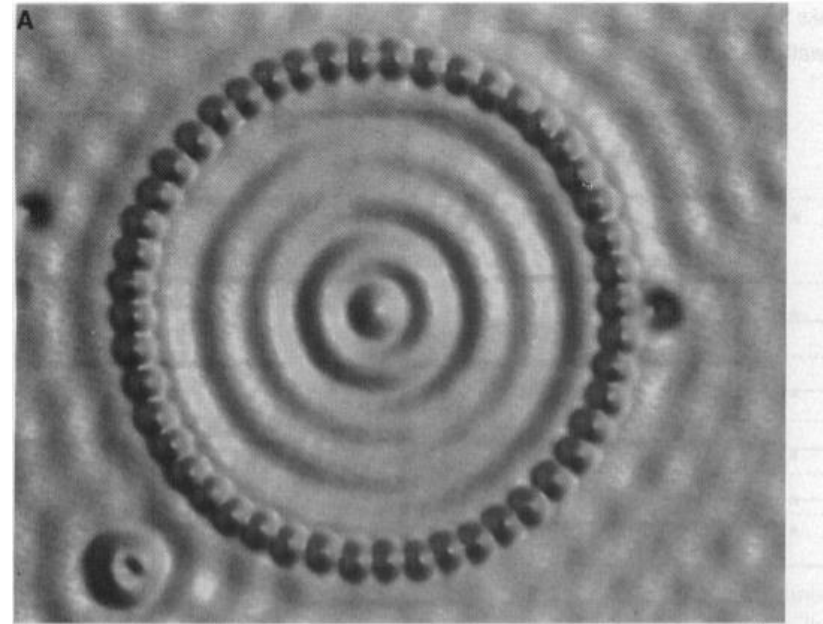
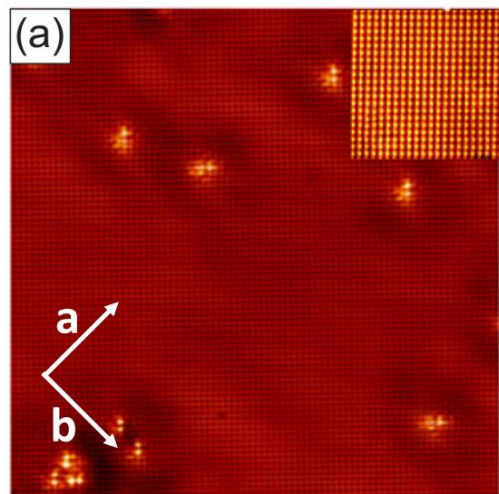


Fig. 2. Spatial image of the eigenstates of a quantum corral. **(A)** 48-atom Fe ring constructed on the Cu(111) surface ($V = 0.01$ volt, $I = 1.0$ nA). Average diameter of ring (atom center to atom center) is 142.6 \AA . The ring encloses a

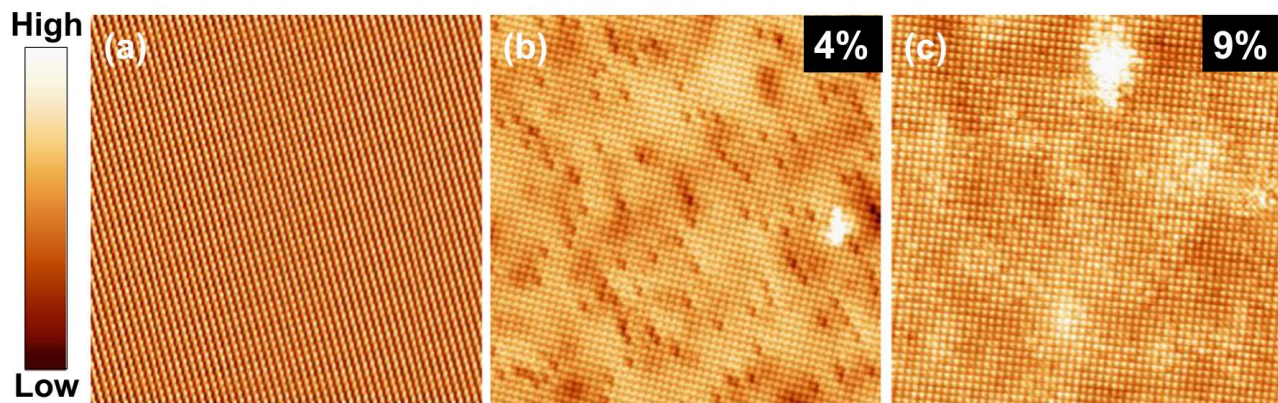
Confinement of Electrons to Quantum Corrals on a Metal Surface

M. F. Crommie, C. P. Lutz, D. M. Eigler

Сканирующая туннельная микроскопия. Исследование дефектов

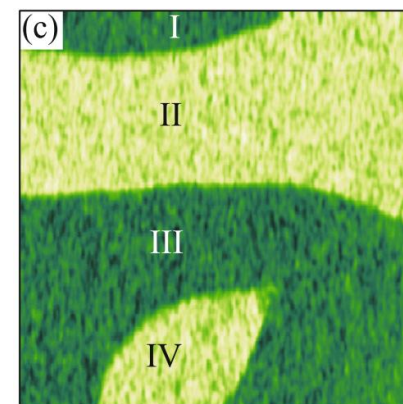
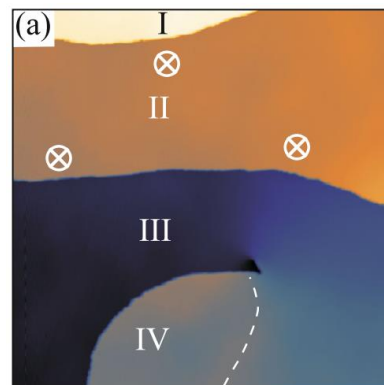
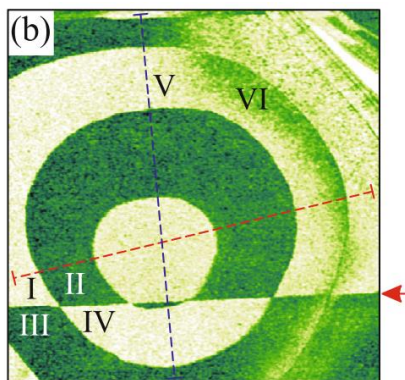
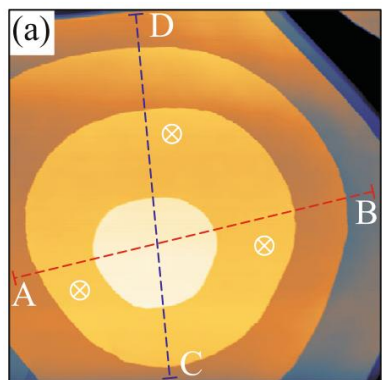


FeSe



J Supercond Nov Magn (2017) 30:763–768

$\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$



Pb островки на подложке Si(111)

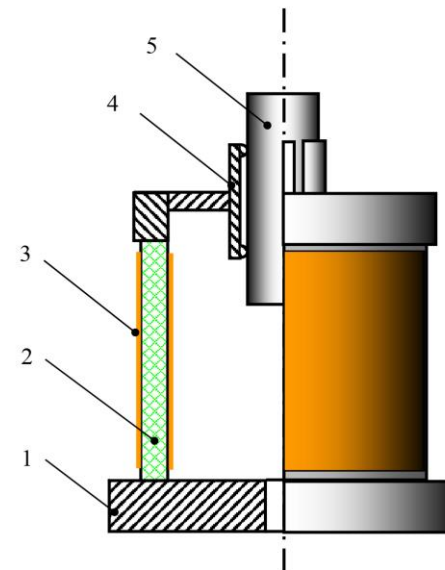
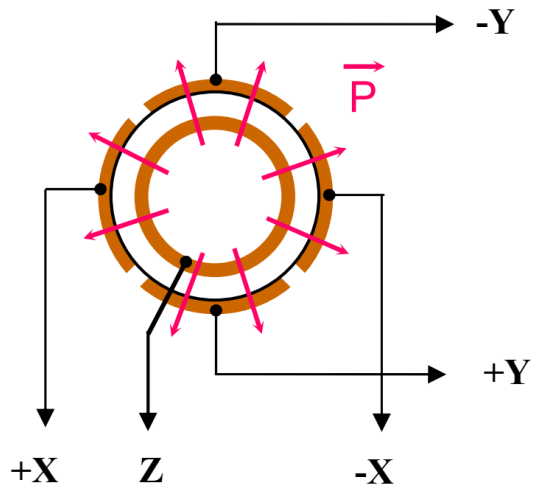
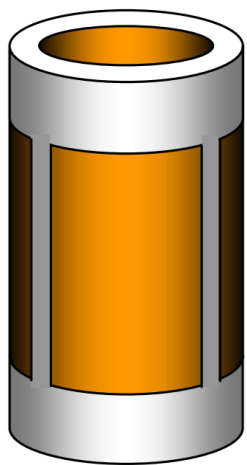
JETP LETTERS

Vol. 109

No. 11

2019

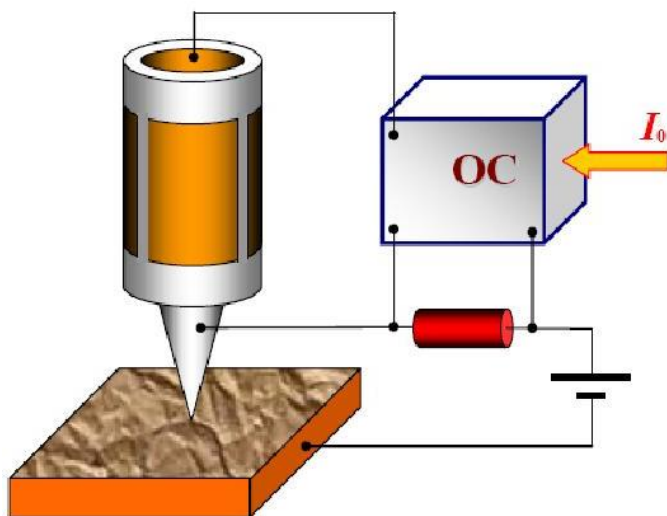
Особенности позиционирования зонда



На рисунке обозначены:

- 1 – основание;
- 2 – пьезоэлектрическая трубка;
- 3 – электроды;
- 4 – разрезная пружина;
- 5 – цилиндрический держатель объекта.

Рис. 15. Шаговый пьезодвигатель

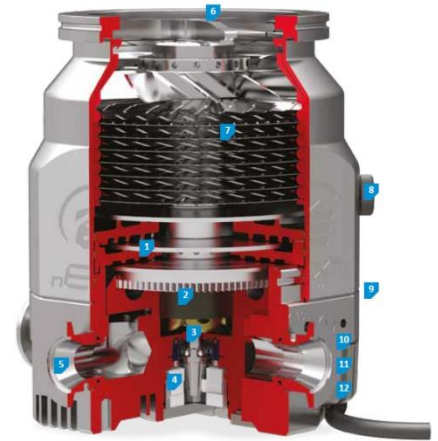


Условия вакуума

форвакуумный насос



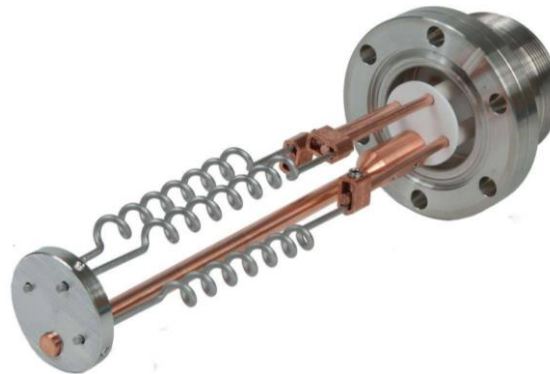
Турбо-молекулярный насос



Ионно-геттерный насос



Титановый сублимационный насос



Вакуумметр

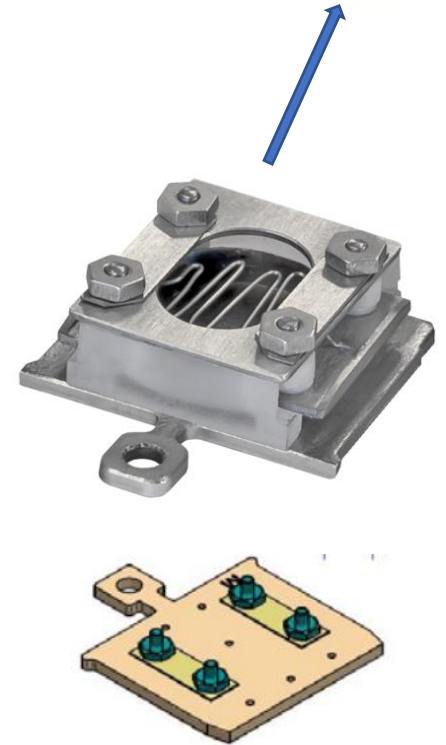
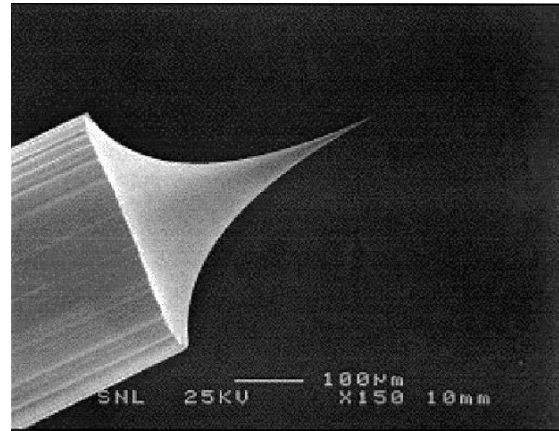


Особенности зондовой микроскопии

- Создание in-situ
- Очистка нагревом
- Скол
- Облучение ионами аргона



Подготовка зондов



Виброзащита

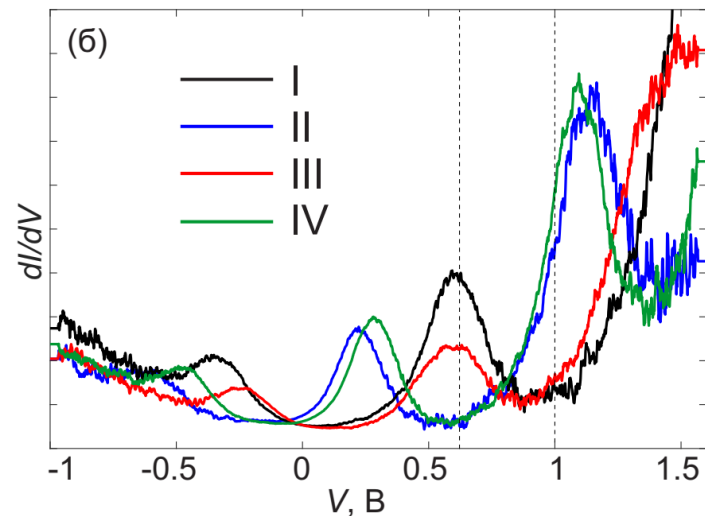
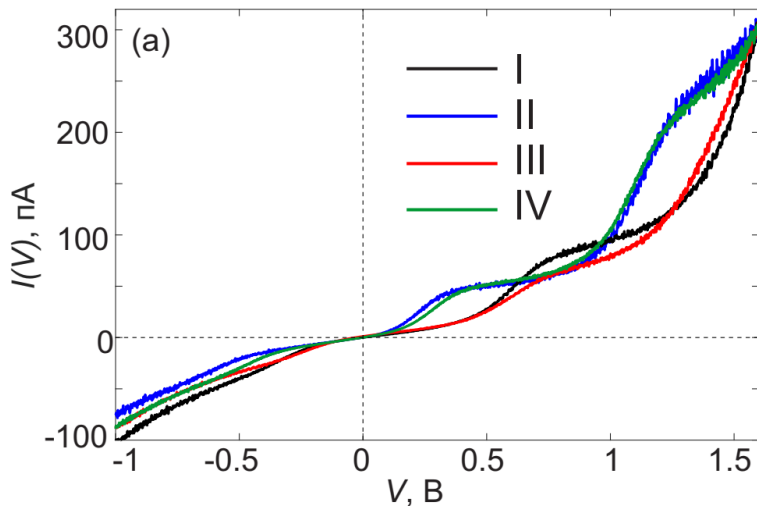
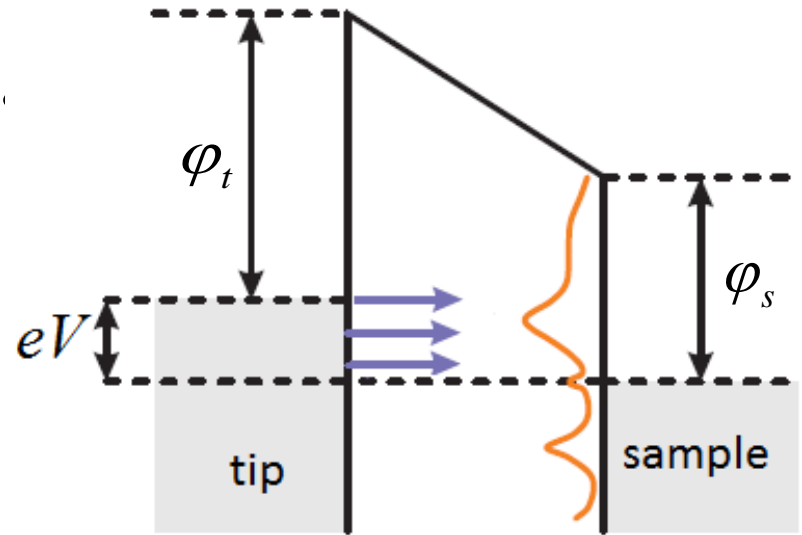


Сканирующая туннельная спектроскопия

$$I \propto \int_0^{eV} \rho_s(\varepsilon - eV) \rho_t(\varepsilon) t(\varepsilon, eV) d\varepsilon$$

$$I \propto t \rho_t(0) \int_0^{eV} \rho_s(\varepsilon - eV) d\varepsilon$$

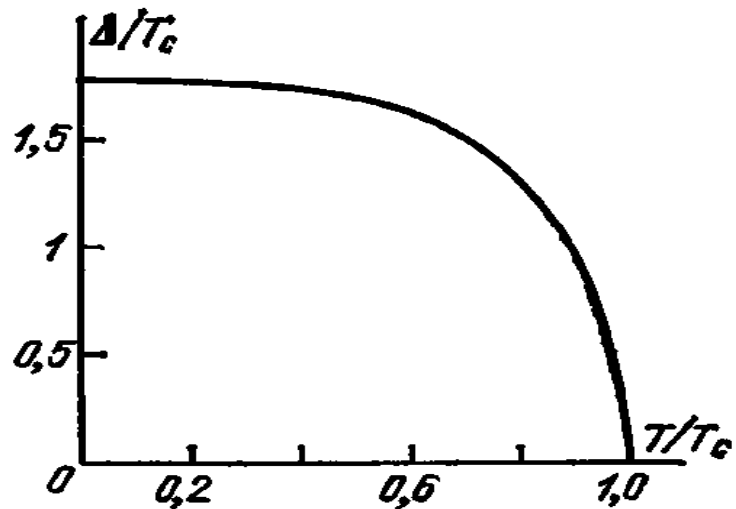
$$\frac{dI}{dV} \propto \rho_s(eV)$$



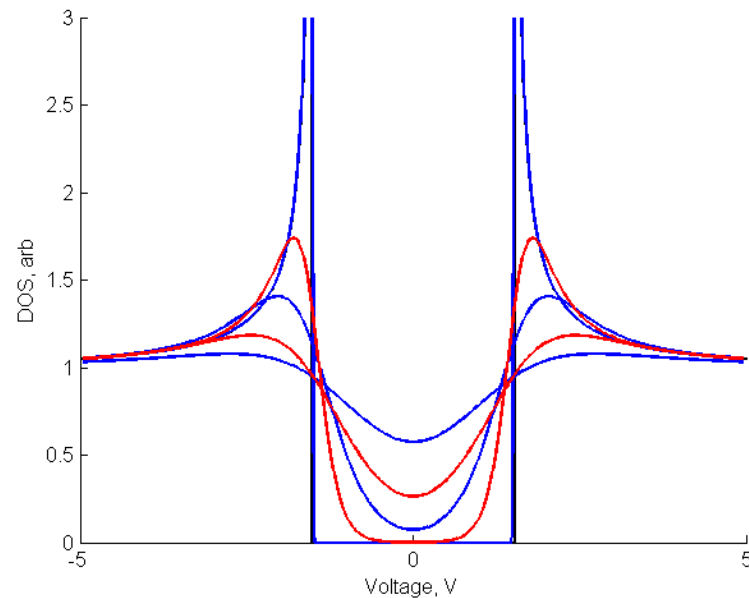
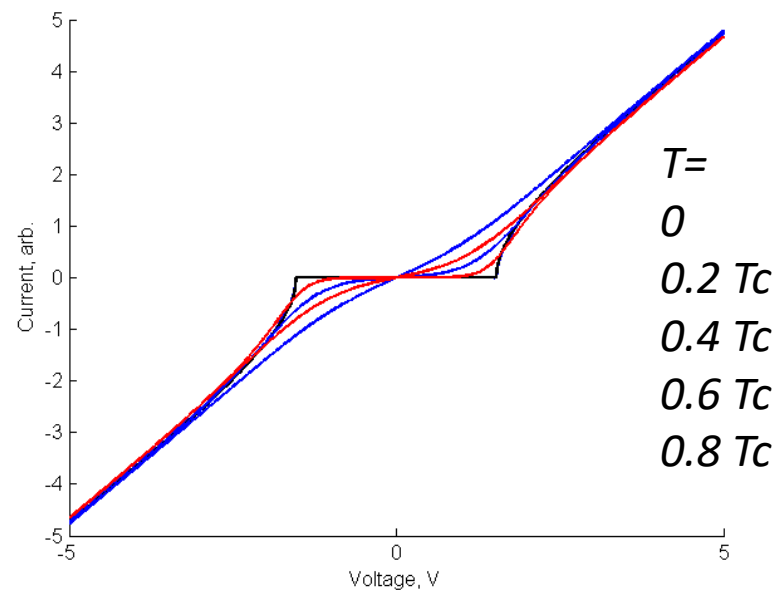
Спектроскопия сверхпроводящего состояния

$$I \propto \int_0^{eV} \rho_s(\varepsilon) \rho_t(\varepsilon - eV) t(\varepsilon, eV) d\varepsilon$$

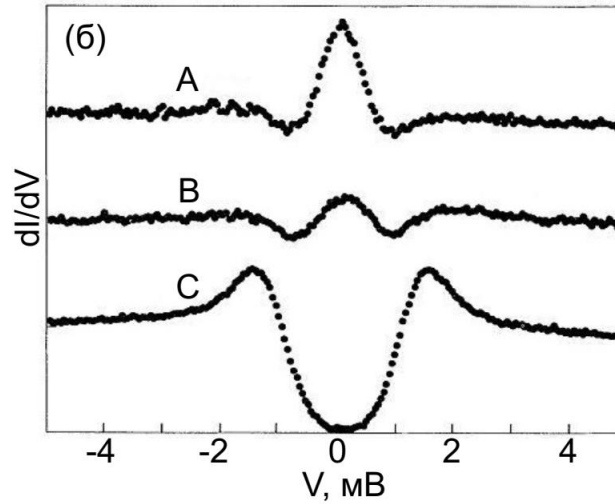
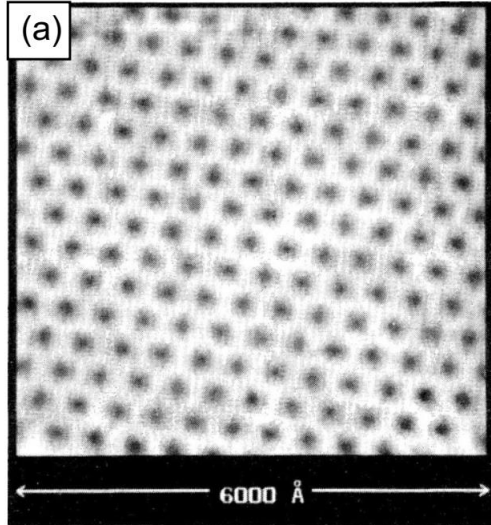
$$\rho_s = \rho_N \frac{\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon^2 - \Delta^2}}$$



Абрикосов. Основы теории металлов



Наблюдение сверхпроводящей щели в сверхпроводниках



Вихревая структура и плотность состояний в сердцевине отдельного вихря в NbSe₂

VOLUME 62, NUMBER 2

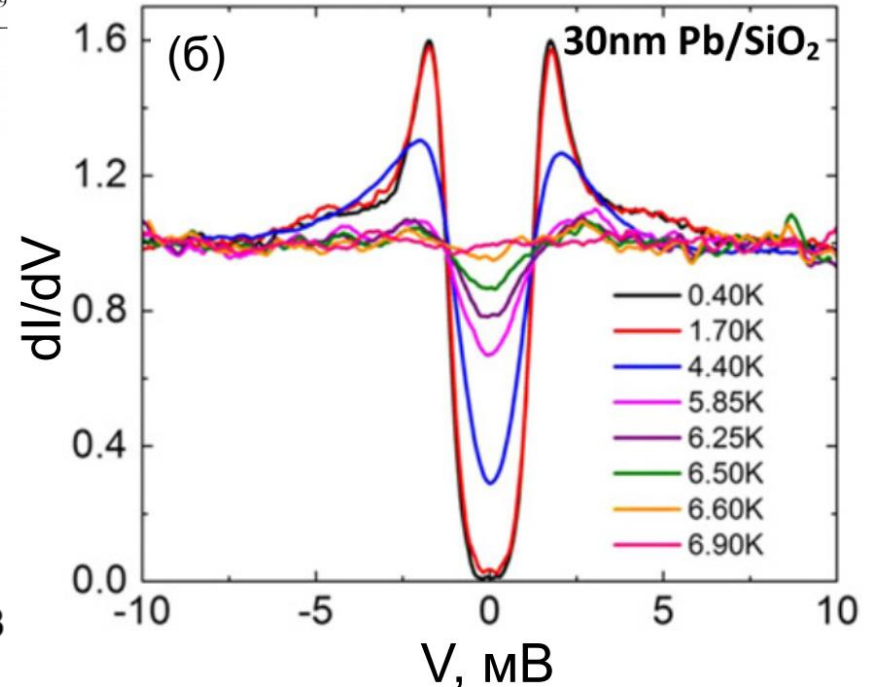
PHYSICAL REVIEW LETTERS

9 JANUARY 1989

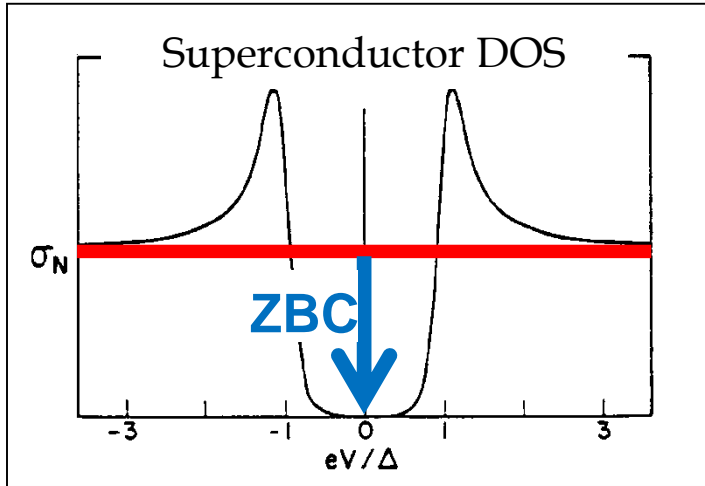
Scanning-Tunneling-Microscope Observation of the Abrikosov Flux Lattice and the Density of States near and inside a Fluxoid

H. F. Hess, R. B. Robinson, R. C. Dynes, J. M. Valles, Jr., and J. V. Waszczak

Температурная зависимость
плотности состояний в Pb
пленке



Визуализация вихревой структуры в FeSe



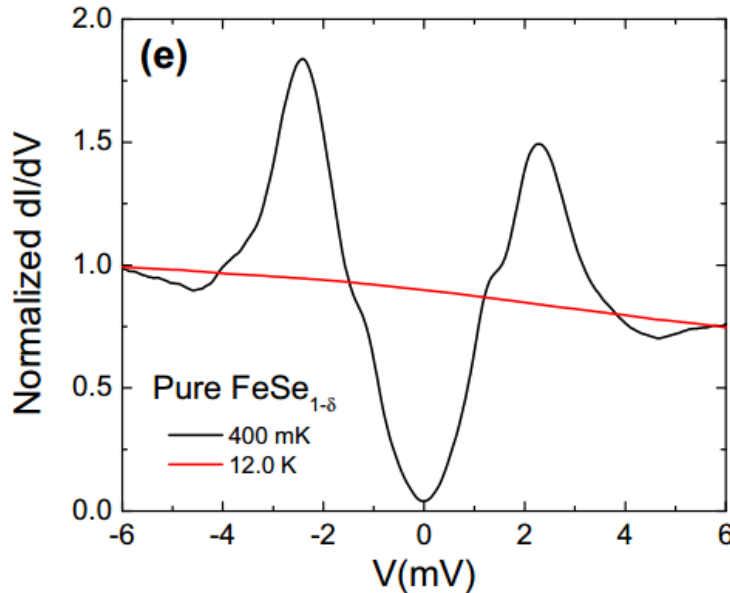
ZBC – zero bias conductance $\rho(E_F)$

$$\frac{dI}{dV} \propto \rho(E_F - eV)$$

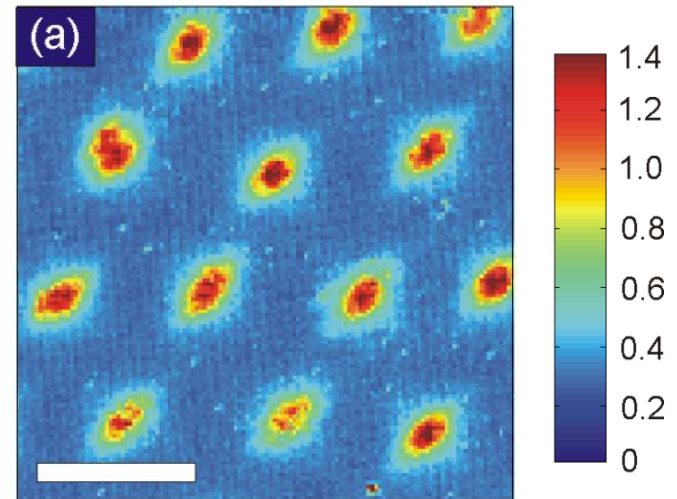
$$I \propto \exp(-2kd)$$

Расстояние между вихрями в гексагональной решетке:

$$r[nm] \approx 48 / \sqrt{H[T]}$$



$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV}(x, y, V = 0)$$



PHYSICAL REVIEW B **99**, 144514 (2019)

$H = 1T, T = 1.5 K$

$156 \times 156 \text{ nm}^2$

Спасибо за внимание!

Литература

В. Л. Миронов. Основы сканирующей зондовой микроскопии. —
Учебное пособие, 2004

Введение в физику поверхности / К. Оура, В. Г. Лифшиц, А. А. Саранин,
А. В. Зотов, К. Катаяма. — Наука, 2005