

СКАНИРУЮЩАЯ ЗОНДОВАЯ
МИКРОСКОПИЯ И
СПЕКТРОСКОПИЯ

Vladimir L. Karbovskii

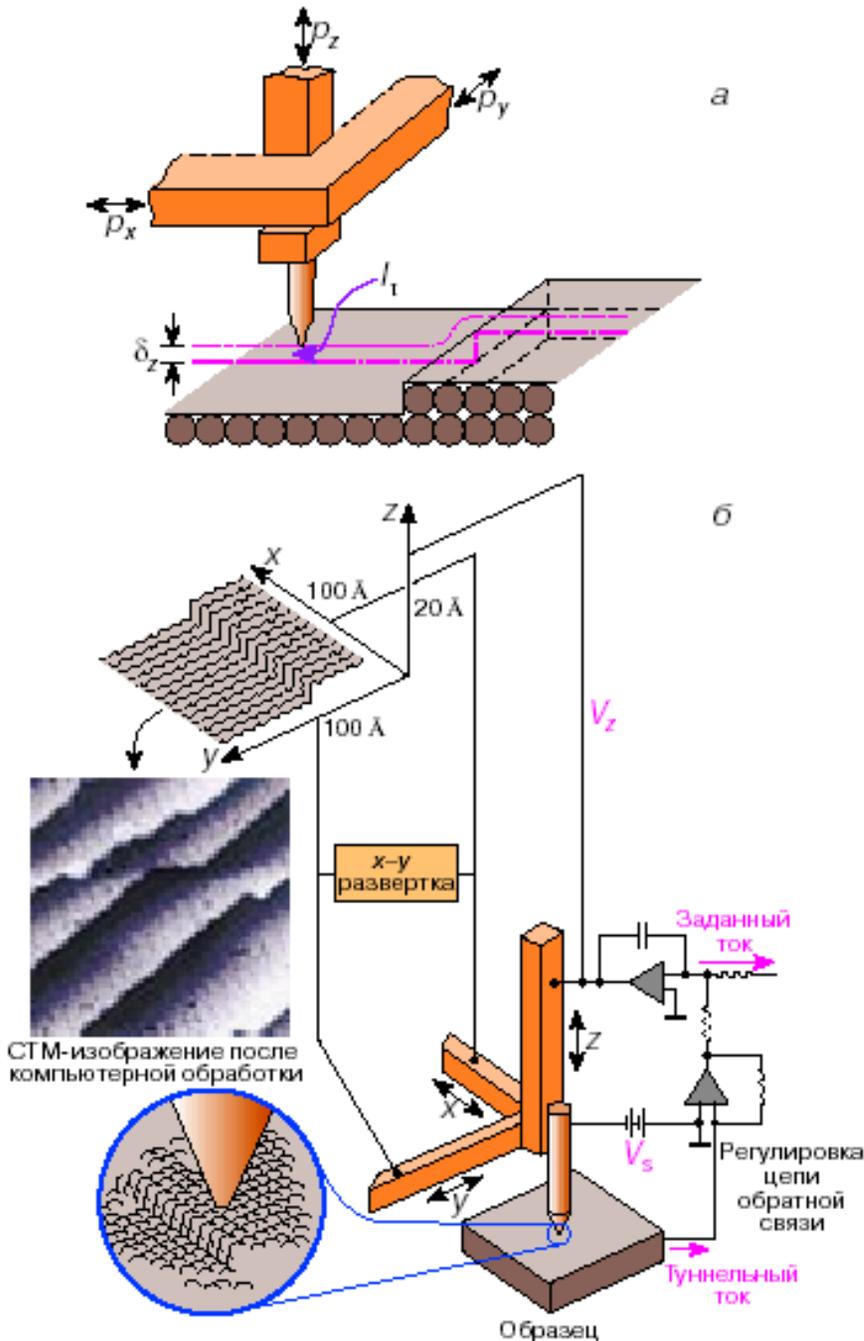
Сканирующий туннельный микроскоп

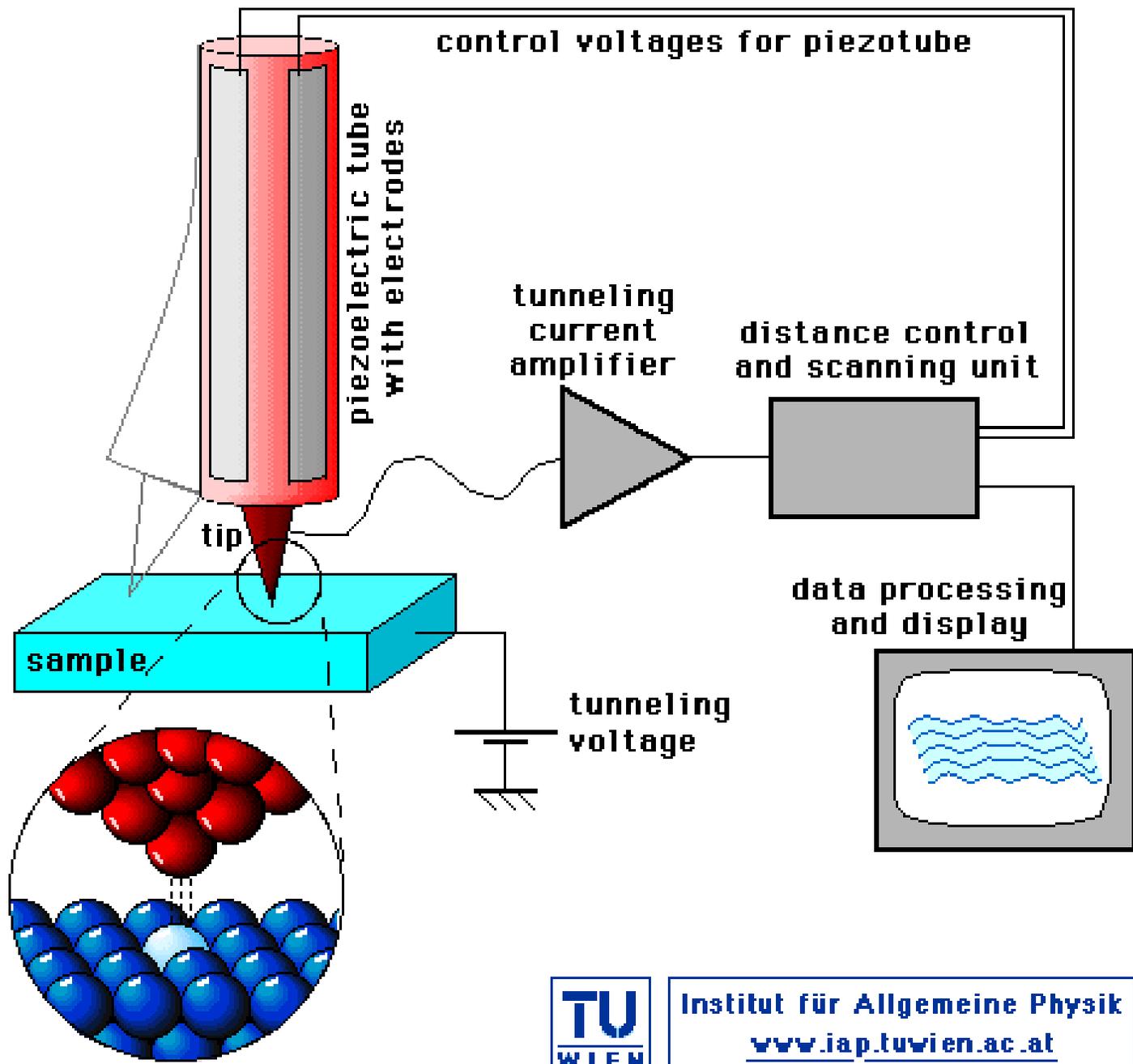
Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ) изобретен в 1982 году Г.Биннигом и Г.Рорером. За его изобретение Г.Биннигу, Г.Рореру и Э.Руской в 1986 году присуждена Нобелевская премия по физике. За разработку метода туннельной спектроскопии Л.Эсаки, А. Джайверу и П.Д. Джозефсону была присуждена Нобелевская премия по физике 1973 года.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СТМ

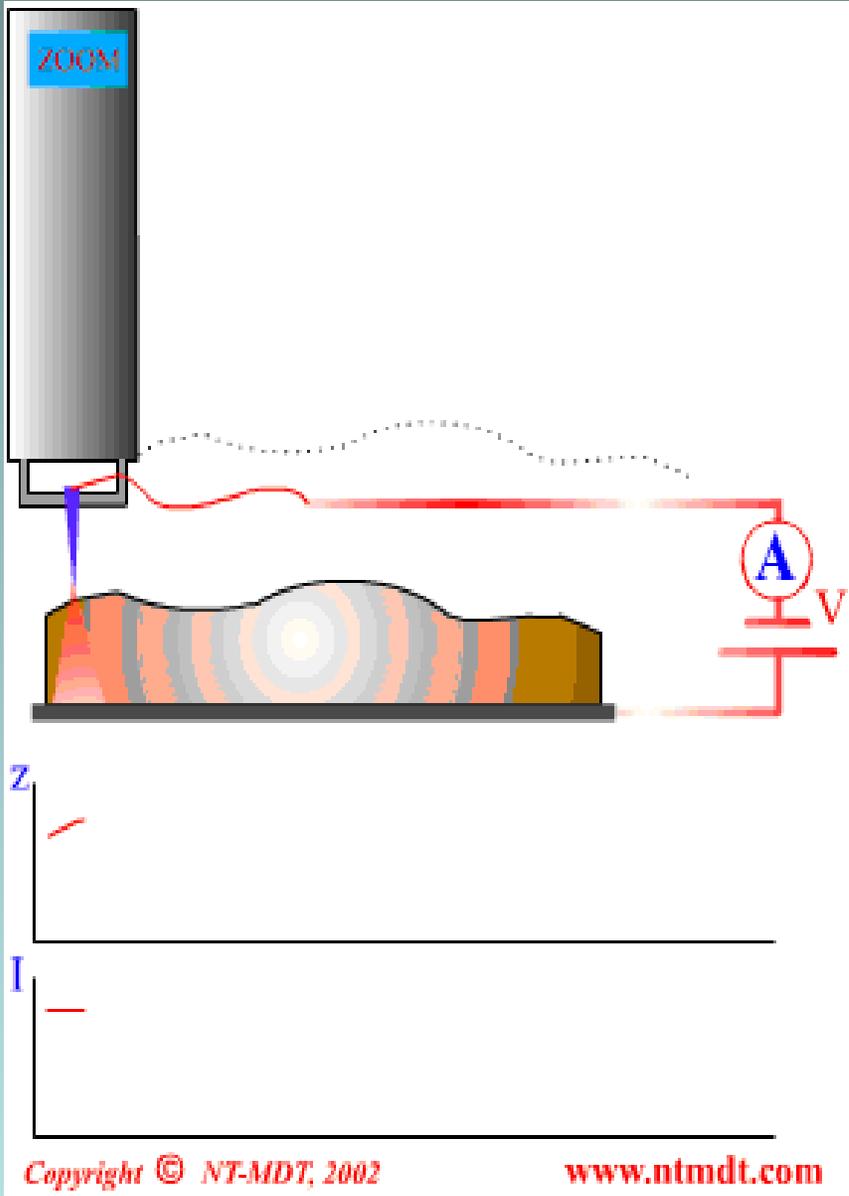
Тонкое металлическое острие, смонтированное на электро-механическом приводе (X, Y, Z - позиционере), служит зондом для исследования участков поверхности образца.

Когда такое острие подводится к 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 δz начинает протекать туннельный ток I_t порядка 10^{-9} А .





СТМ методики: **МЕТОД ПОСТОЯННОГО ТОКА**

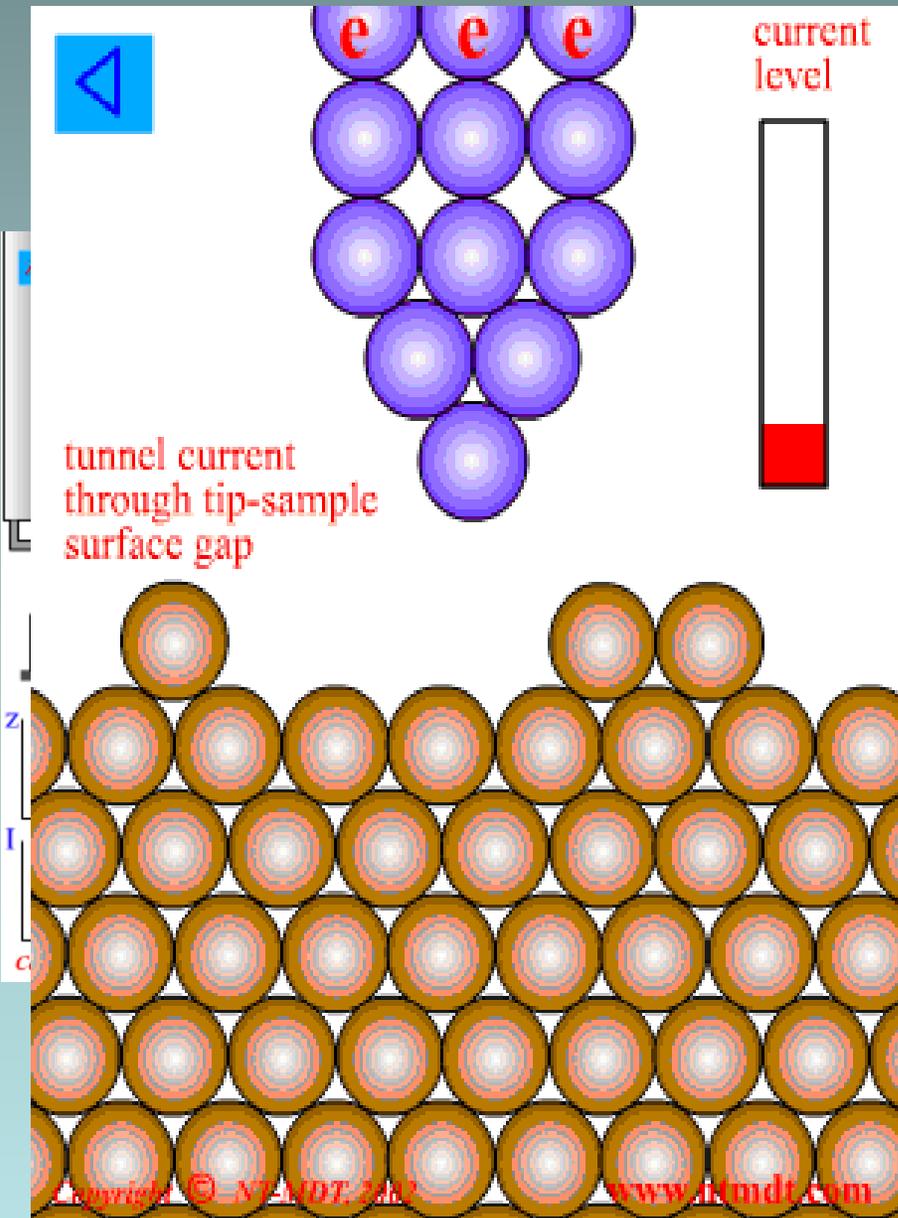


Характерные величины туннельных токов, регистрируемых в процессе измерений, являются достаточно малыми – вплоть до 0.03 нА (а со специальными измерительными СТМ головками – до 0.01 нА), что позволяет также исследовать плохо проводящие поверхности, в частности, биологические объекты.

Среди недостатков СТМ можно упомянуть сложность интерпретации результатов измерений некоторых поверхностей, поскольку СТМ изображение определяется не только рельефом поверхности, но также и плотностью состояний, величиной и знаком напряжения смещения, величиной тока. Например, на поверхности высокоориентированного пиролиитического графита можно видеть обычно только каждый второй атом. Это связано со спецификой распределения плотности состояний.

Ссылки: Rep. Prog. Phys. 55, 1165-1240 (1992).

СТМ методики: МЕТОД ПОСТОЯННОЙ ВЫСОТЫ



При использовании Метода Постоянной Высоты (МПВ) сканер СТМ перемещает зонд только в плоскости, так что изменения тока между острием зонда и поверхностью образца отражают рельеф поверхности. Поскольку по этому методу нет необходимости отслеживать зондом расстояние до поверхности образца, скорости сканирования могут быть более высокими. МПВ может быть применен, таким образом, к образцам с очень ровной поверхностью, поскольку неоднородности поверхности выше 5-10 Å будут приводить к разрушению кончика зонда. Для исключения этого на практике все-таки используется слабая обратная связь, поддерживающая некоторое усредненное расстояние зонд-поверхность. При использовании МПВ таким образом информация о структуре поверхности получается посредством токовых измерений, так что прямое измерение вариаций высоты невозможно.

Ссылки: Rep. Prog. Phys. 55, 1165-1240 (1992).

СТМ методики: ОТОБРАЖЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА

Спектроскопические измерения Локальной Высоты Барьера (ЛВБ спектроскопия) позволяет получать информацию о пространственном распределении микроскопической работы выхода поверхности, как описывается ниже.

Туннельный ток I_T в СТМ экспоненциально затухает с расстоянием зонд-образец z как

$$I_T \sim \exp(-2kz),$$

где константа затухания k определяется выражением

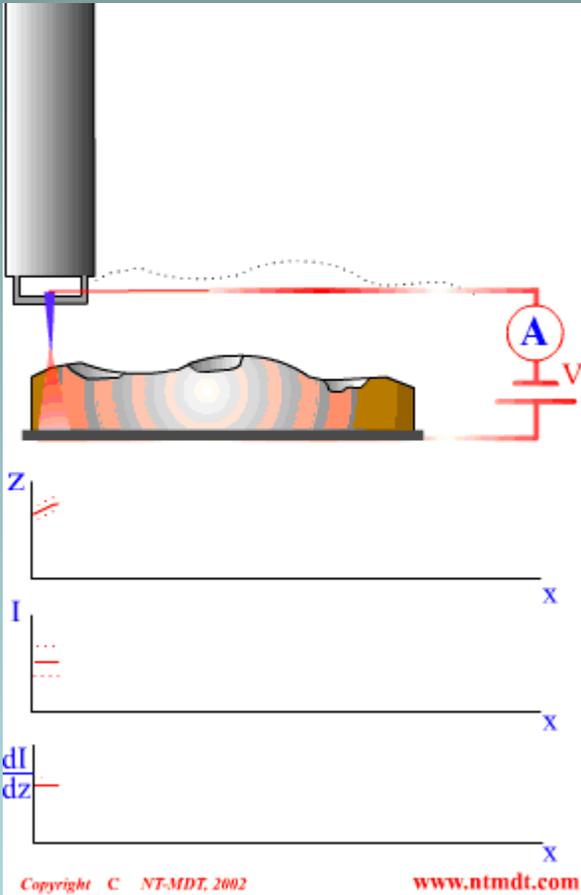
$$2k = 2(2mU/h^2)^{1/2}.$$

При отображении ЛВБ мы измеряем чувствительность туннельного тока к вариациям расстояния зонд-образец в каждом пикселе СТМ изображения. Получаемая по этому методу ЛВБ является так называемой видимой высотой барьера U , определяемой выражением

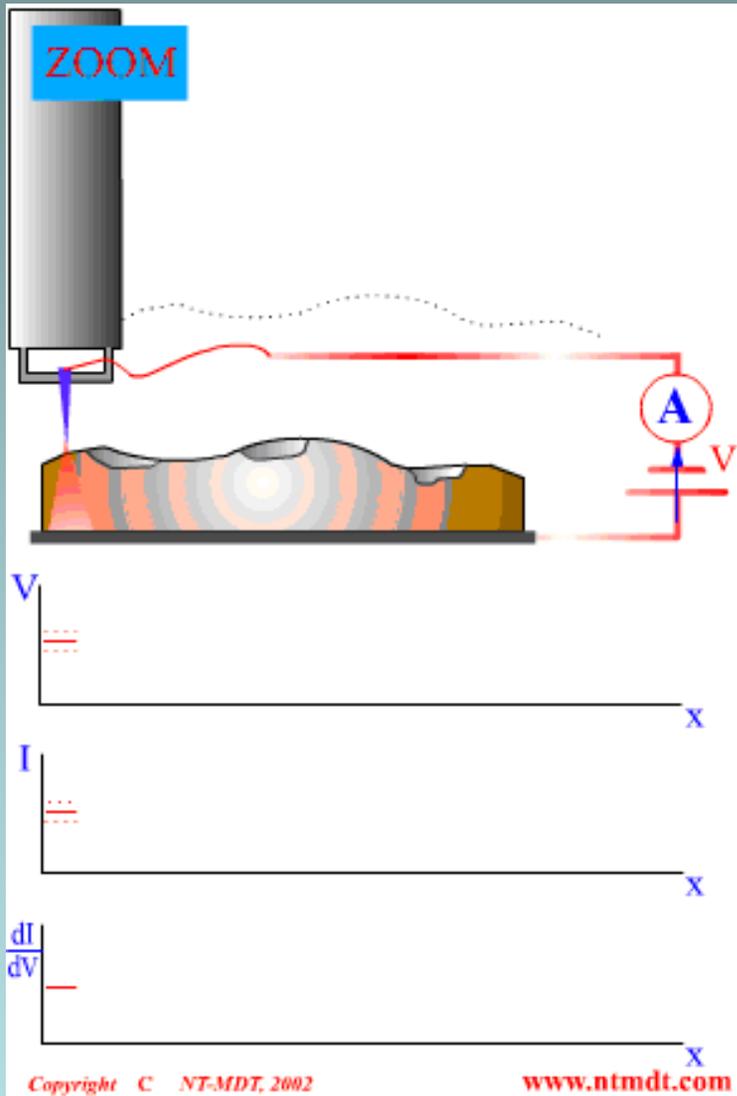
$$U = 0,95(1/I_T)^2 (dI_T/dz)^2$$

Эта величина U обычно сравнивается со средней работой выхода $U_{av} = (U_s + U_t)/2$, где U_t и U_s являются работами выхода материала зонда и образца соответственно. Во многих случаях экспериментальная величина U не равна в точности U_{av} но является меньшей величиной. Тем не менее известно, что величина U близка к локальному поверхностному потенциалу (локальной работе выхода) и является хорошей мерой его.

Отображение ЛВБ получается путем поточечного измерения логарифмических изменений туннельного тока при изменении расстояния зонд-образец, т.е. наклона кривой зависимости $\log I$ от z . При проведении измерений ЛВБ расстояние зонд-образец варьируется синусоидально, например, путем приложения дополнительного переменного напряжения к сигналу обратной связи, подаваемому на z -секцию пьезосканера. Частота модуляции выбирается много большей полосы пропускания системы обратной связи СТМ.



STM techniques: DENSITY OF STATES IMAGING



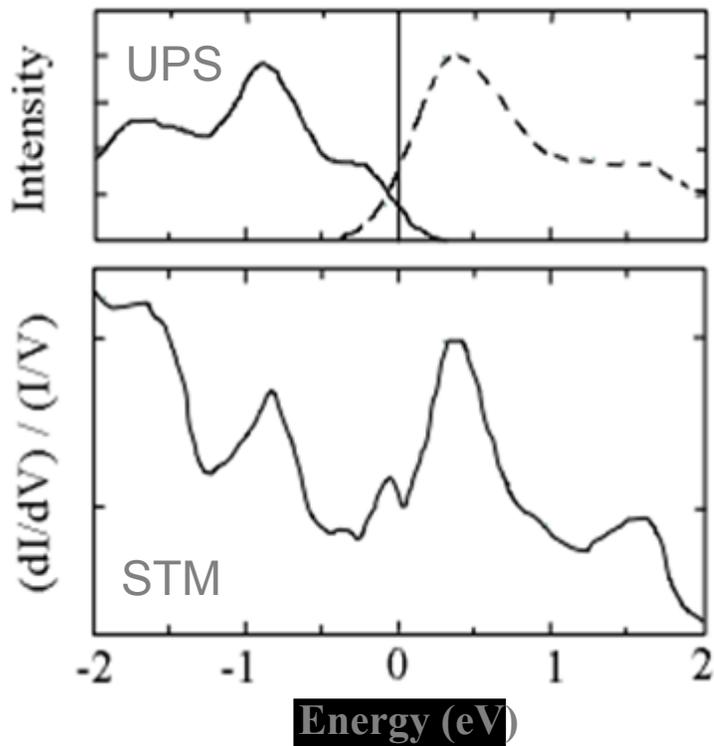
As long as measured in STM current is determined by the tunneling processes through tip-sample surface gap its value depends not only on the barrier height but on the electron density of states also.

$$I \propto \int_0^{eV} \rho_{sa}(E_F - eV + \varepsilon) d\varepsilon$$

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

Suitable modulation of tunnel current dI is measured, divided by dU and presented as LDOS image.

Scanning Tunneling Spectroscopy

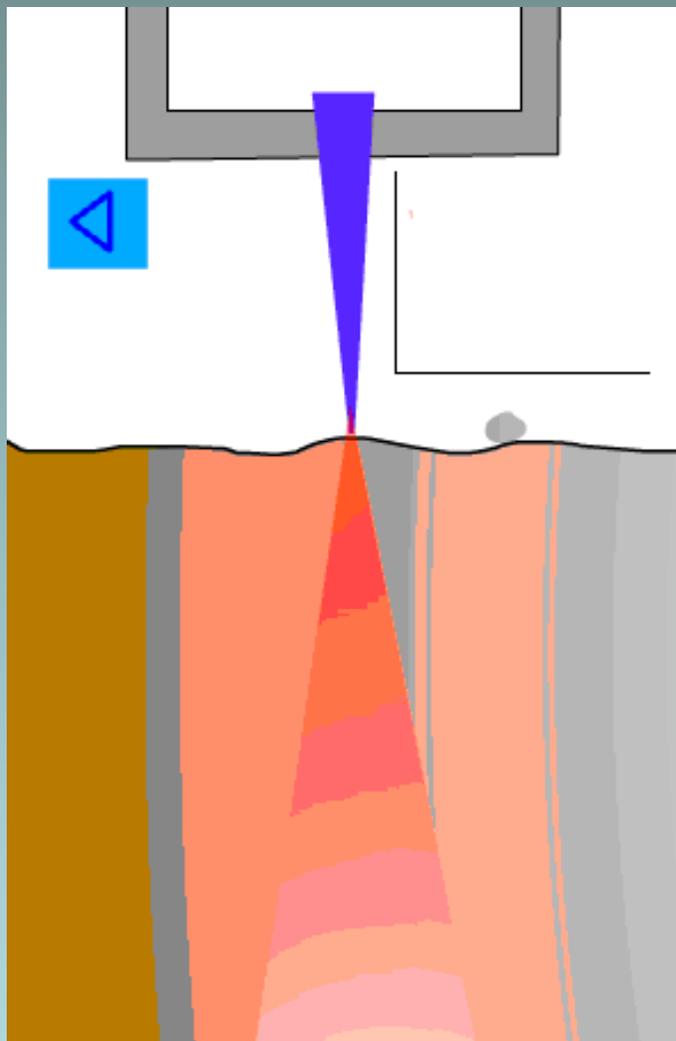


Ultraviolet photoelectron spectra (UPS).

Scanning tunneling microscopy (STM)

Comparison between UPS and STM tunnelling spectra from the Si(111)(7x7) surface. Originally published by R. Hamers, *Ann. Rev. Phys. Chem.* 40 531 (1989).

СТМ методики: $I(z)$ СПЕКТРОСКОПИЯ



$I(z)$ Спектроскопия может быть использован для получения информации о z -зависимости микроскопической работы выхода поверхности. Другое важное использование $I(z)$ Спектроскопии связано с тестированием качества СТМ зонда.

Туннельный ток I_T в СТМ экспоненциально затухает с расстоянием зонд-образец z как

$$I_T \sim \exp(-2kz),$$

где константа затухания k определяется выражением

$$2k = 2(2mU/h^2)^{1/2}$$

U есть средняя работа выхода $U_{av} = (U_s + U_t)/2$, где U_t и U_s являются работами выхода материалов зонда и образца соответственно.

В $I(z)$ Спектроскопии измеряется туннельный ток в зависимости от расстояния зонд-образец в каждой точке СТМ изображения. Для $U_{av} = 1 \text{ eV}$ $2k = 1.025 \text{ \AA}^{-1} \text{ eV}^{-1}$.

Резкая зависимость $I(z)$ помогает определить качество острия зонда. Как установлено эмпирически если туннельный ток I_T падает в два раза при $Z < 3 \text{ \AA}$, то острие рассматривается как очень хорошее, если при $Z < 10 \text{ \AA}$, то использование острия возможно для получения атомарного разрешения на ВОПГ. Если же ток спадает в два раза при $Z > 20 \text{ \AA}$, то этот зонд не может быть использован и должен быть щаменен.

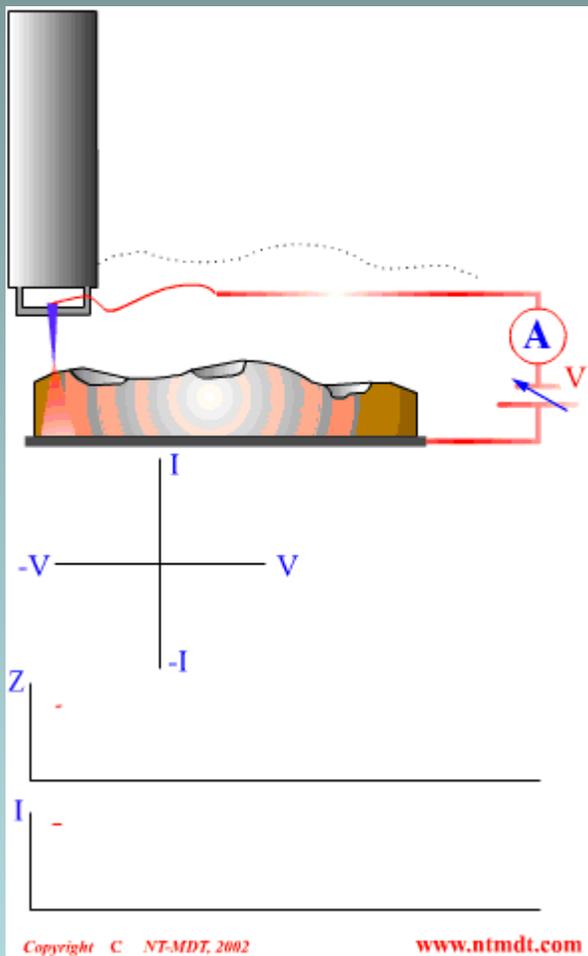
Ссылки: G. Binnig and H. Rohrer: Surf. Sci. 126 (1983) 236.
Rep. Prog. Phys. 55, 1165-1240 (1992).

СТМ методики: I(V) СПЕКТРОСКОПИЯ

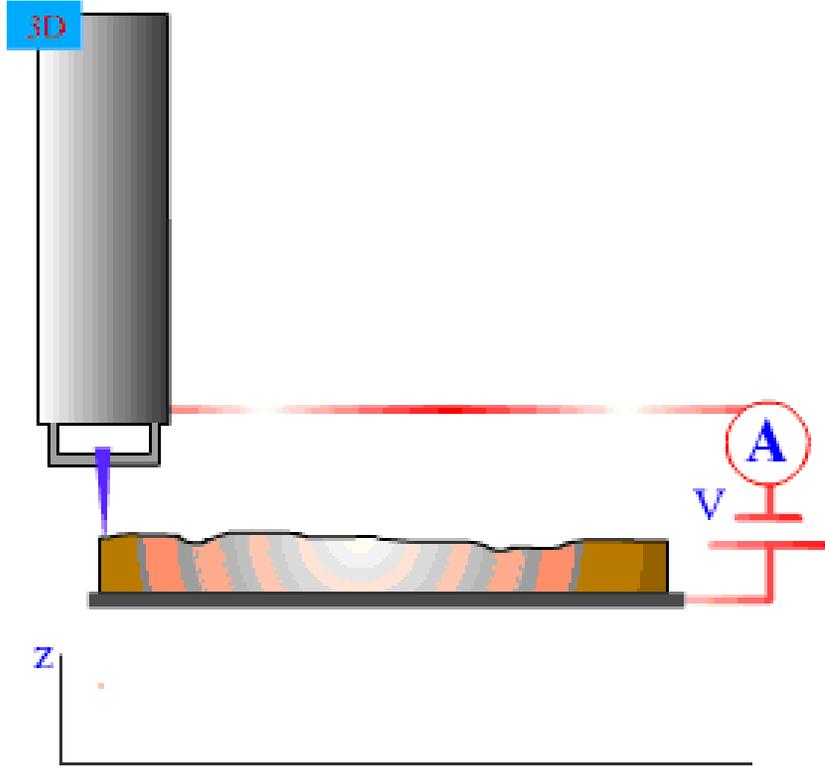
Проведение I(V) Спектроскопии (or Current Imaging Tunneling Spectroscopy, CITS) предполагает одновременное получение обычного изображения рельефа при фиксированных значениях тока I_0 и напряжения смещения V_0 . В каждой точке изображения обратная связь разрывается, и напряжение смещения проходит ряд значений V_i при этом записываются соответствующие значения тока I_i . Затем напряжение возвращается к V_0 и обратная связь включается снова. Каждая I-V кривая может быть получена за несколько миллисекунд так что дрейф положения зонда не оказывает существенного влияния. Эта процедура генерирует полное токовое изображение $I_i(x,y)$ для каждого значения напряжения V_i в дополнение к изображению рельефа $z(x,y)|V_0$.

CITS значения могут быть использованы для расчета токового разностного изображения $DIV_i, V_j(x,y)$ где V_i и V_j ограничивают частные поверхностные состояния, производя реальное пространственное отображение поверхностных состояний с атомарным разрешением. Эта методика может быть использована, например, в сверхвысоком вакууме для отображения заполненных состояний адатомов или ненасыщенных связей для реконструкций кремния.

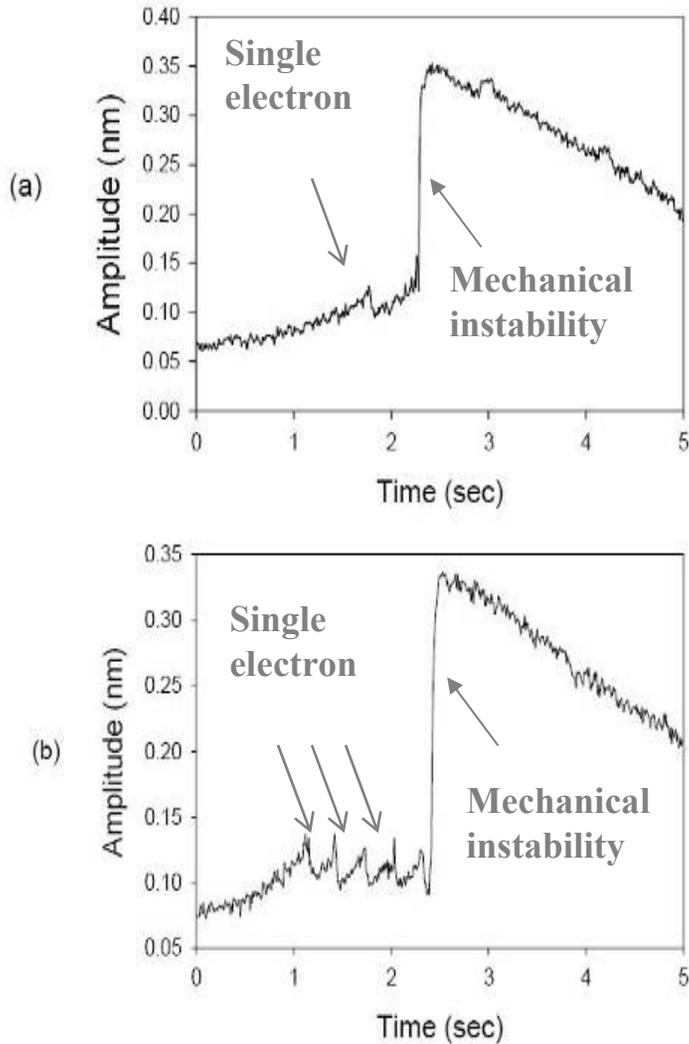
Ссылки: 1. G. Binnig and H. Rohrer: Surf. Sci. 126 (1983) 236. 2. Rep. Prog. Phys. 55, 1165-1240 (1992).



STM techniques: STM Lithography



By an STM it is possible to make some nanolithographical operations: modifying of the surface and material can be transported from the tip to the sample and back.

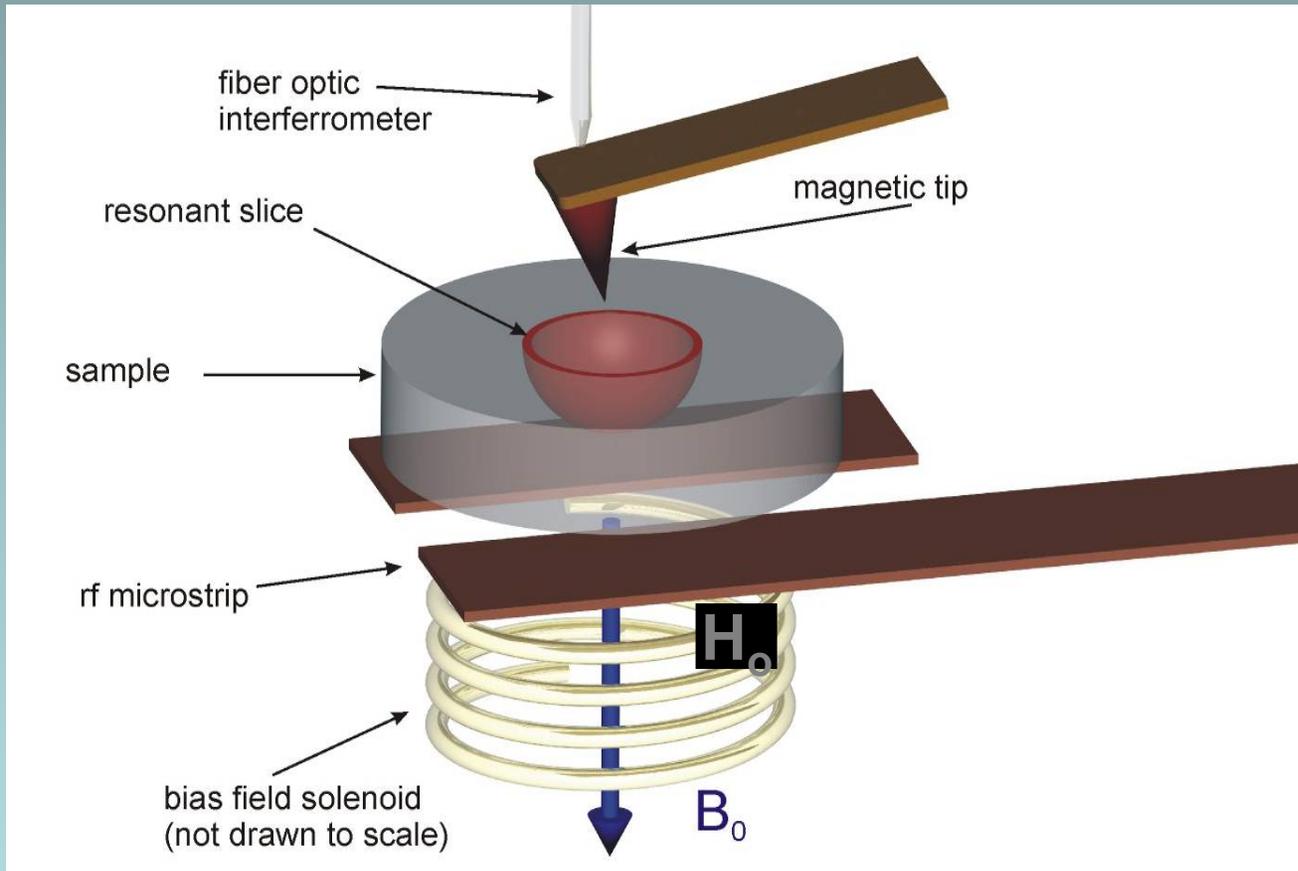


Cantilever amplitude as the tip is scanned toward a 20 nm oxide on silicon. When the tip reaches tunneling range, single electron tunneling events are observed before the tip/sample gap becomes unstable.

Single electron tunneling observed when the tip is located at 1.5-2 nm from the surface.

Magnetic Resonance Force Microscopy (MRFM)

is a novel scanning instrument for probing microscopic structures in a non-invasive manner



The magnetostatic field at sample is the superposition of the homogeneous external field, H_0 , and the inhomogeneous dipolar field produced by the magnetic tip, H_{tip} .

$$H_{\text{Tot}} = H_0 + H_{\text{tip}}(r)$$

SCANNING PROBE MICROSCOPY TECHNIQUES

STM

- Constant Current mode
- Constant Height mode
- Barrier Height imaging
- Density of States imaging
- $I(z)$ Spectroscopy
- $I(V)$ Spectroscopy

Lithographies

- AFM Oxidation Lithography
- STM Lithography
- AFM Lithography –
Dynamic Plowing

AFM

•dc Contact techniques

- Constant Height mode
- Constant Force mode
- Contact Error mode
- Lateral Force Imaging
- Spreading Resistance Imaging

•ac Contact techniques

- Force Modulation mode
- Contact EFM
- AFAM
- AFAM Resonance Spectroscopy
- Piezoresponse Force Microscopy

•Semicontact techniques

- Semicontact mode
- Phase Imaging mode
- Semicontact Error mode

•Non-Contact techniques

- Non-Contact mode
- Frequency Modulation mode

•Many-pass techniques

- EFM
- Scanning Capacitance
Microscopy
- Kelvin Probe Microscopy
- DC MFM
- AC MFM
- Dissipation Force Microscopy

Spectroscopies

- Force-distance curves
- Adhesion Force imaging
- Amplitude-distance curves
- Phase-distance curves
- Frequency-distance curves
- Full-resonance Spectroscopy

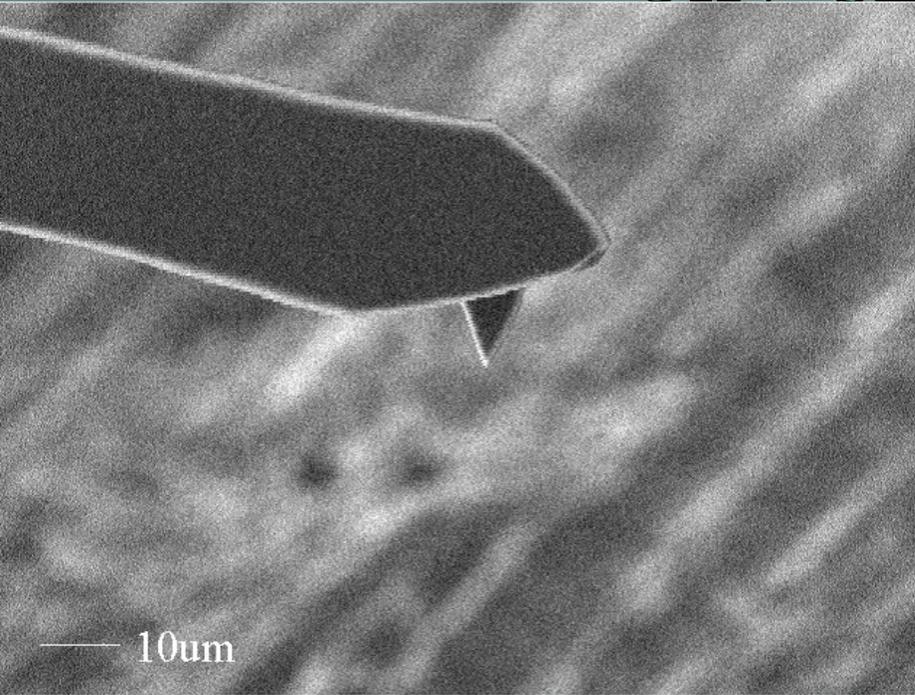
SNOM

- Shear Force Microscopy
- Transmission mode
- Reflection mode
- Luminescence mode
- SNOM Lithography

Confocal Microscopy techniques

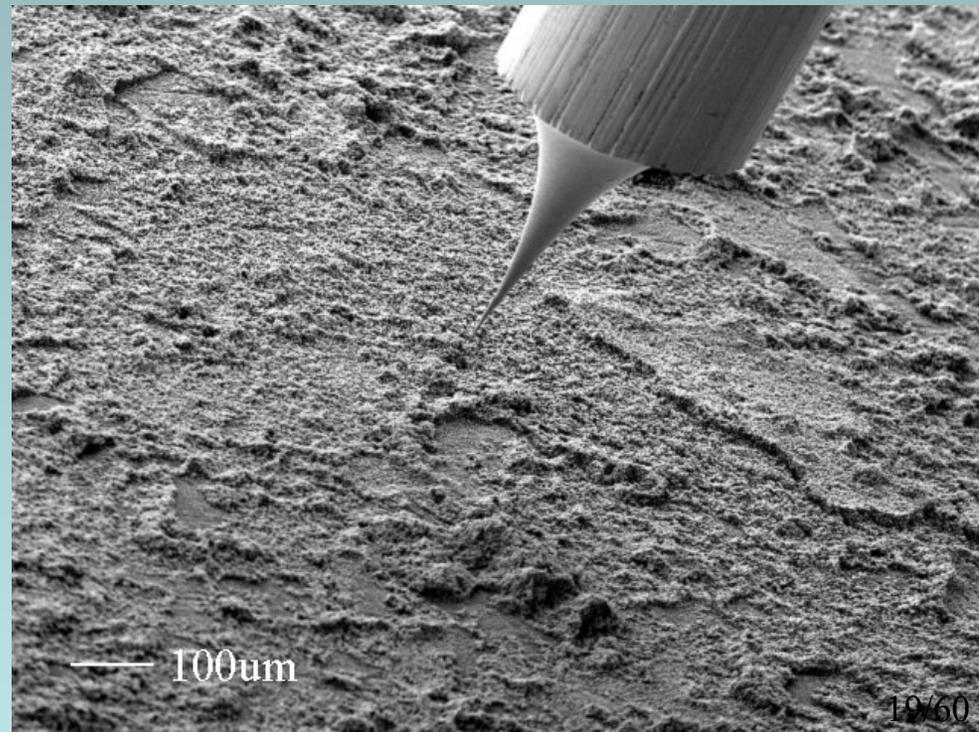
- Laser mode
- Image mode
- Spectral mode
- Confocal Volume Lithography

UHV SEM Images



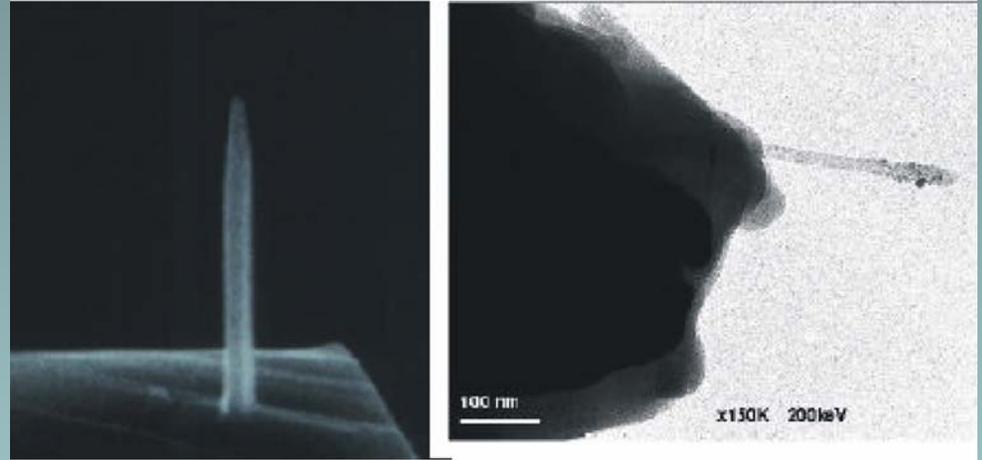
AFM Cantilever and Sample

STM(W) tip

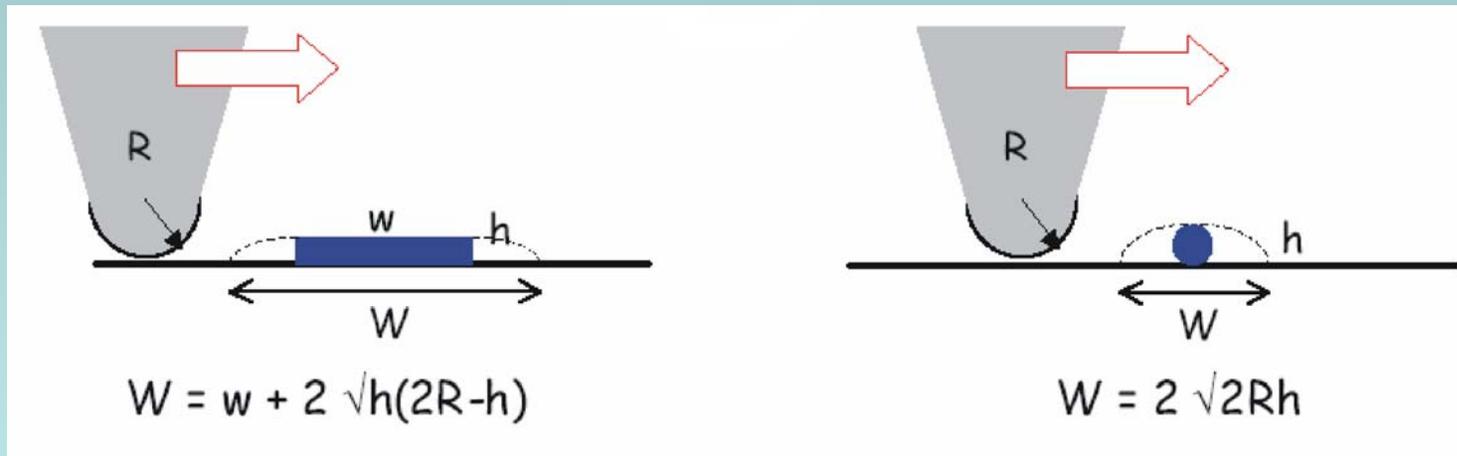


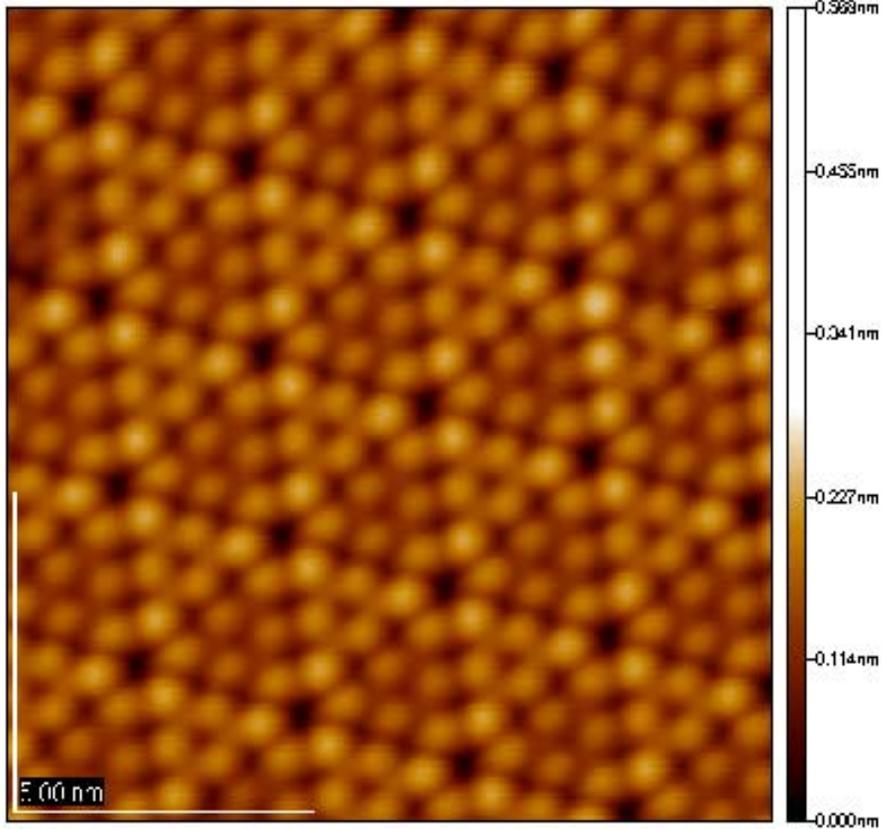
ТРЕБОВАНИЯ К ОСТРИЮ В СТМ

- Иметь наименьший изгиб у верха острия
Коммерческое острие:
10 - 20 нм
Нанотрубки:
несколько нм
- Должно быть устойчивым к излому при контакте с поверхностью



Когда высота маленькая (используется острие со сферическим концом)

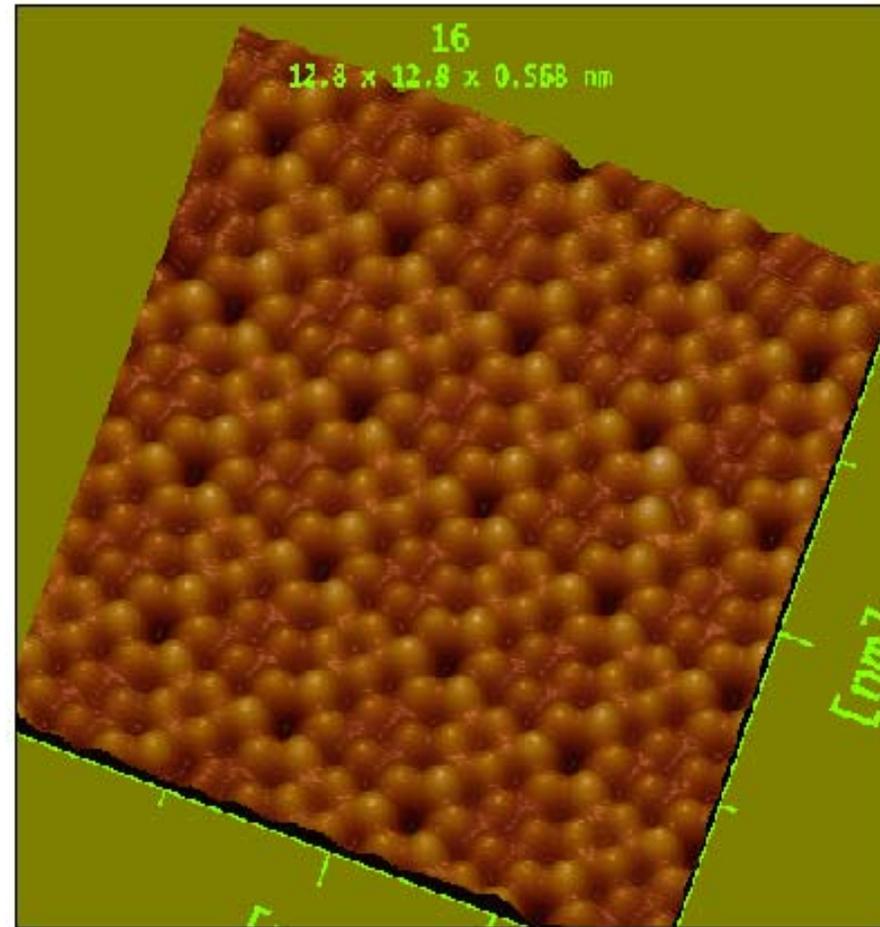




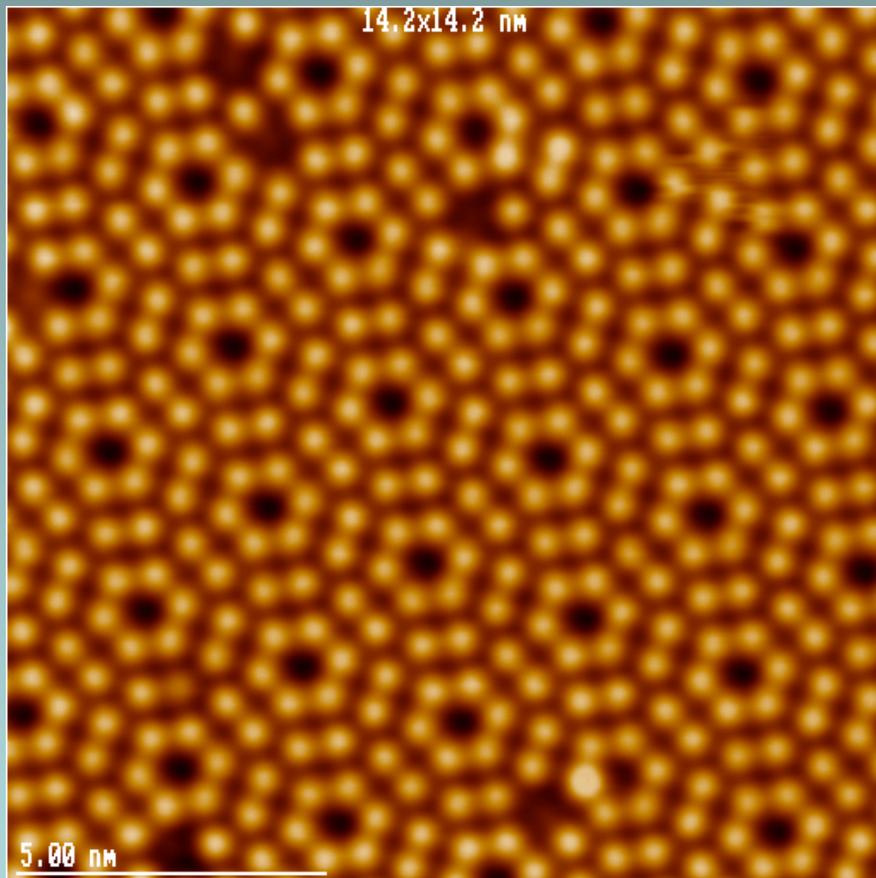
Title: 16
 1024x1024: STM data : Topography Image
 Created on 2005-02-17 at 18:06:25
 Filename : D:\Documents\andrew\work\img 18-07-51.tif
 Image size : 12.8 x 12.8 nm.
 Image height : 0.568 nm
 Tunnel Current : 0.200 nA.
 Bias Voltage : -2.0000.000 V.
 No. of pixels (1024,1024).

SPM PARAMETERS :
 Clock speed : 33.33 us.
 Image Angle : 0deg
 Feedback Filter : 0.50 Hz.
 Preamp gain : 1.00 V/nA.
 Loop gain : 8
 Image Offset : -5.48 x 116 nm.

OSC PARAMETERS :
 OSC Frequency : 10.000 [kHz]
 Output Amp. : 0.010 [V]
 Phase Shifter : 0.000 [deg]
 Phase Polarity : Normal

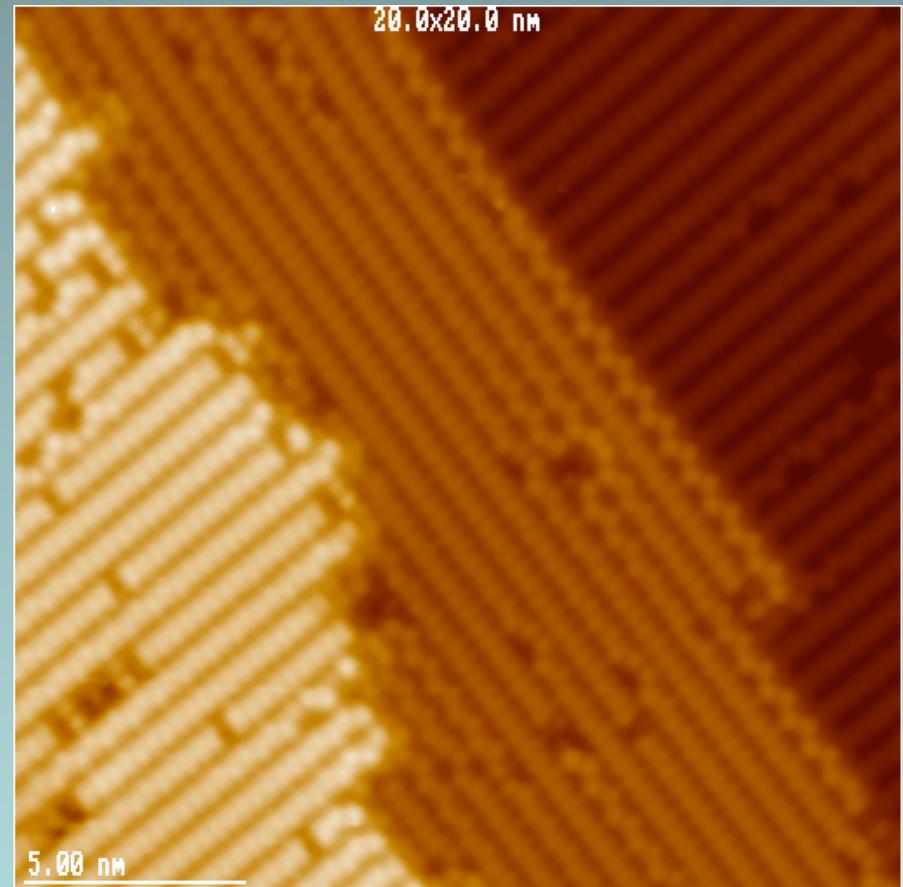


Semiconductor surfaces



STM image of Si (111) 7x7 structure

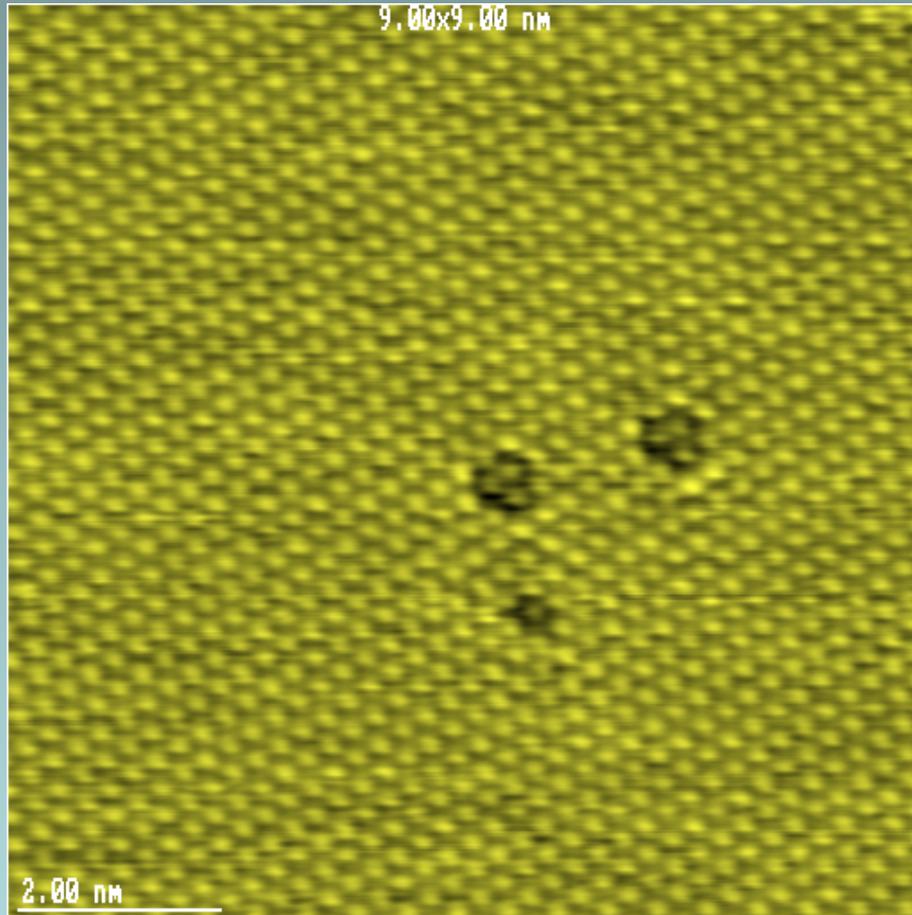
Scan size: 14nm x 14nm



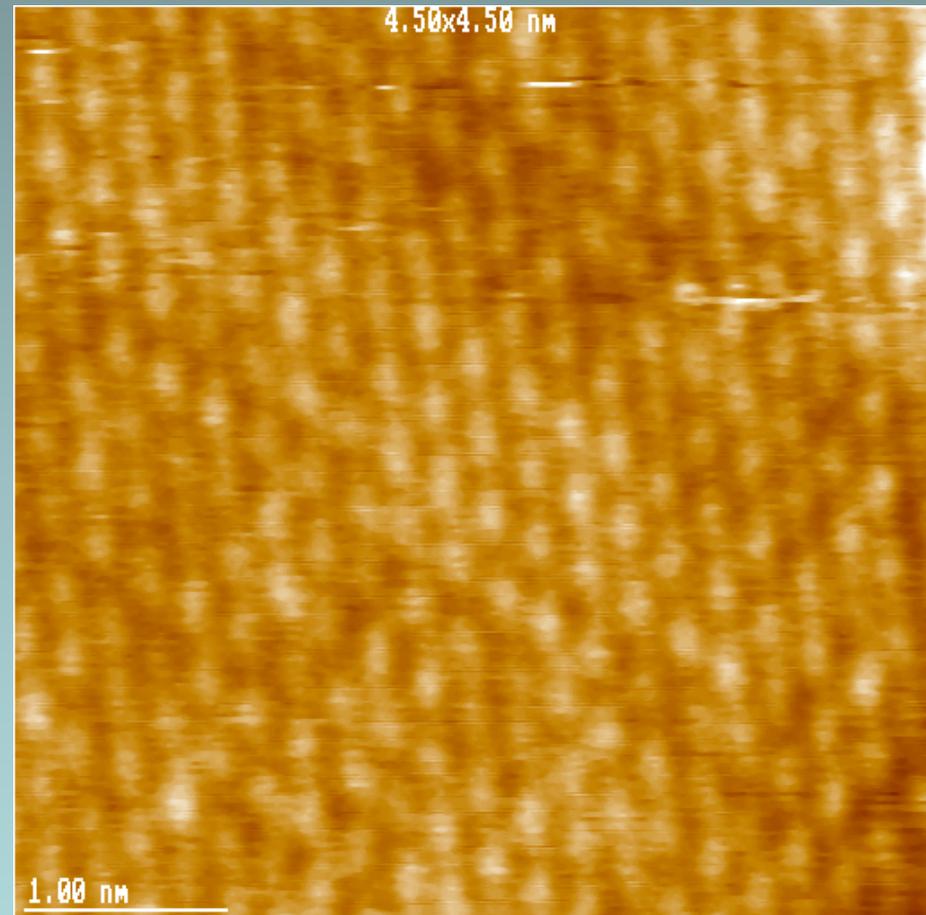
STM image of Si (100) 2x1 structure

Scan size: 20nm x 20nm

Surfaces of Metals

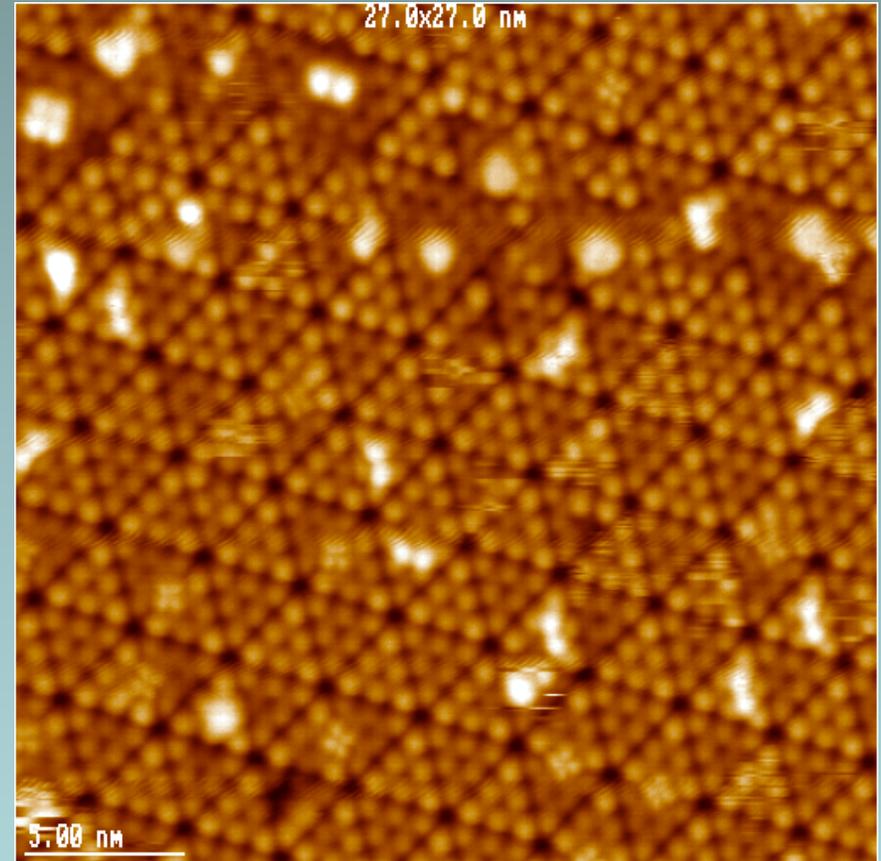
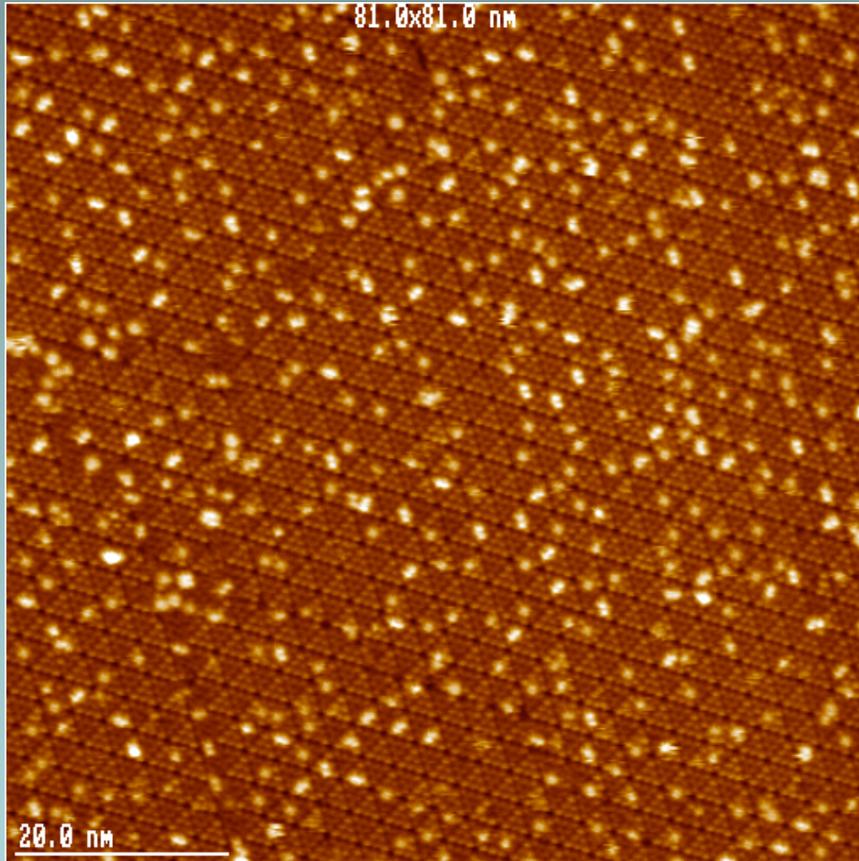


STM image of Al (111) surface
Scan size: 9nm × 9nm



STM image of Pt(111) surface
Scan size: 4.5nm × 4.5nm

Deposition

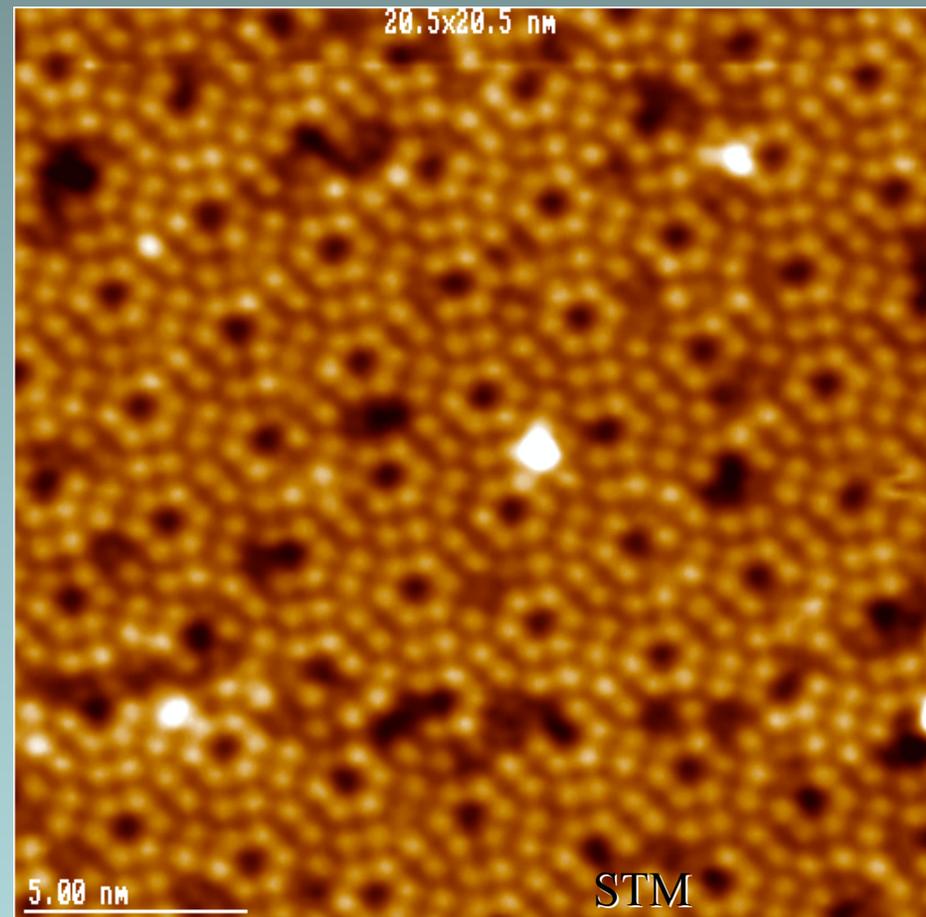
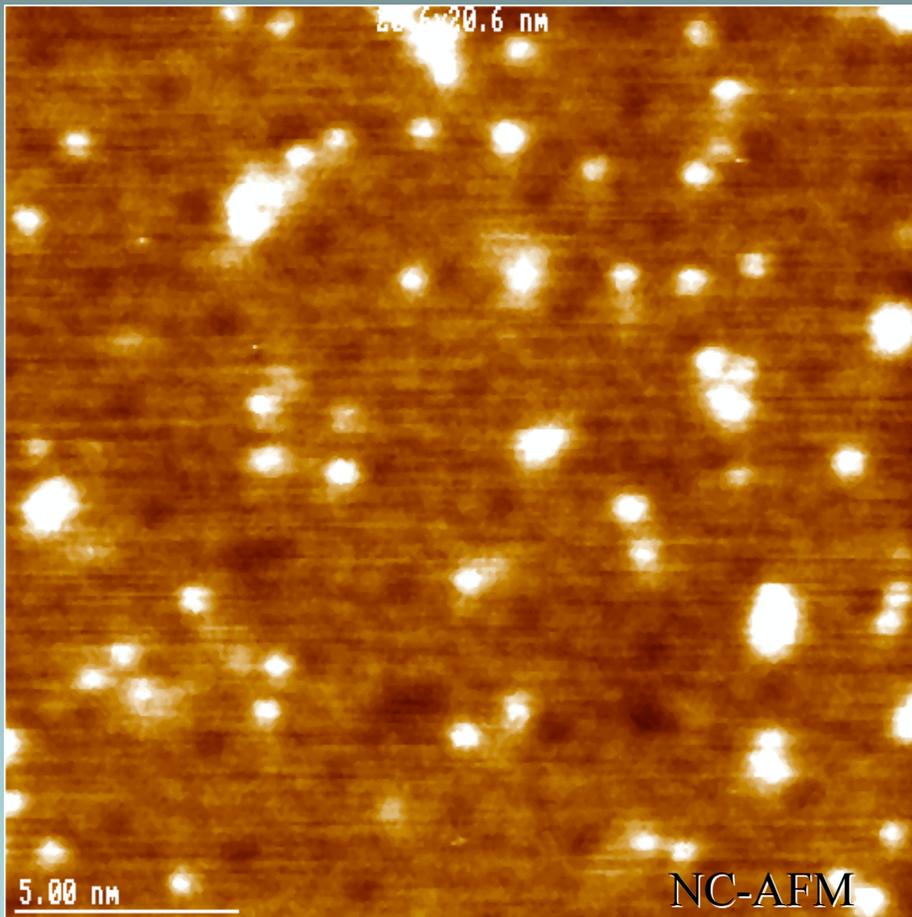


STM images of initial Si adsorption on Si(111)7x7 surface at RT

Scan size: 0.9nm x 0.9nm

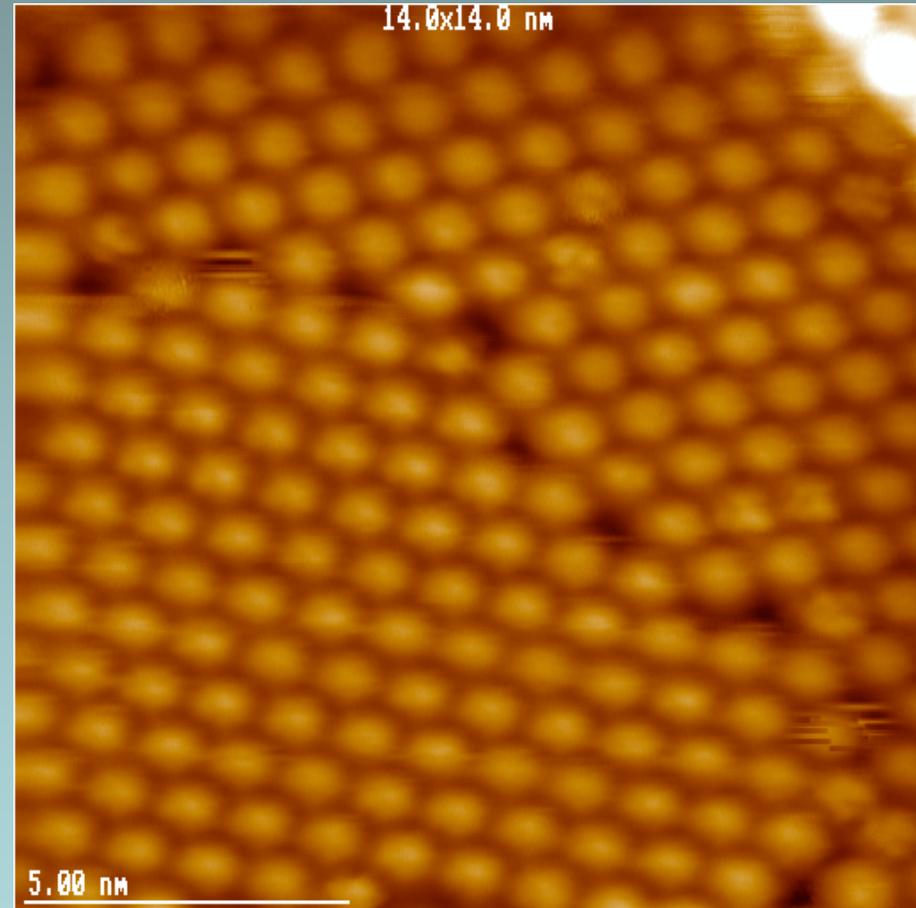
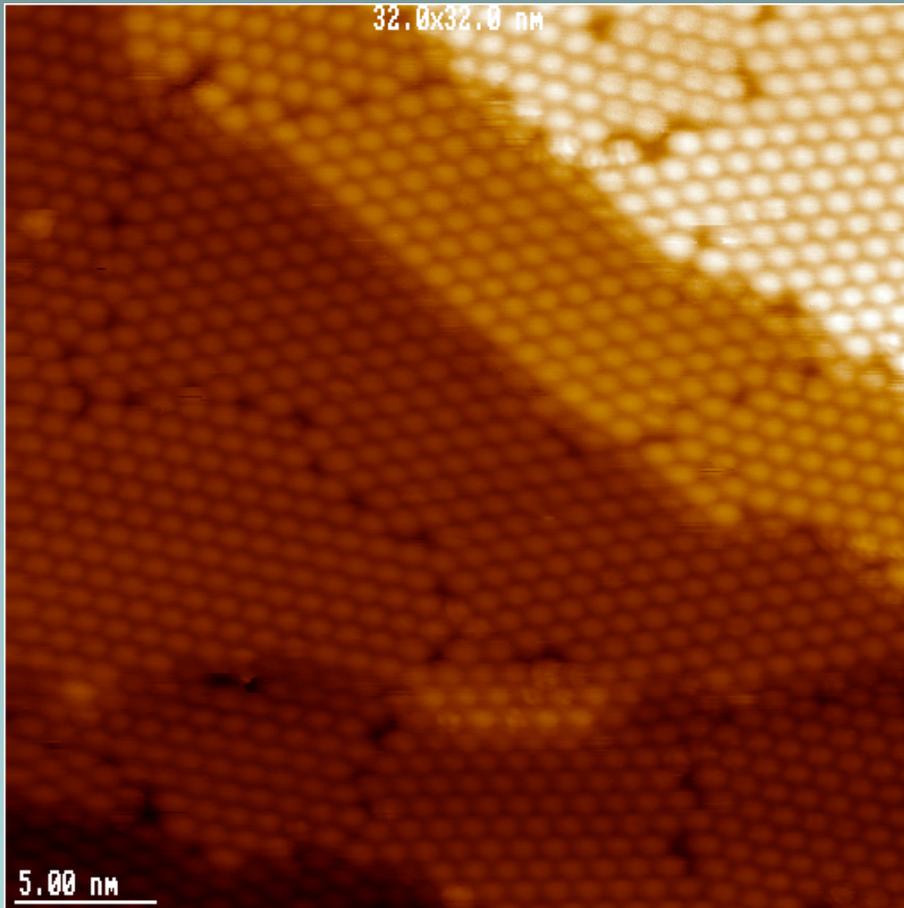
Scan size: 16nm x 16nm

Gas Deposition



Same region NC-AFM/STM observation of Oxygen adsorption
on Si(111)7x7 surface
Scan size: 20nm x 20nm Exposure: 1×10^{-6} Pa for 2min.

Evaporating



STM images of C₆₀ molecules on Au(111) surface

Scan size: 32nm × 32nm

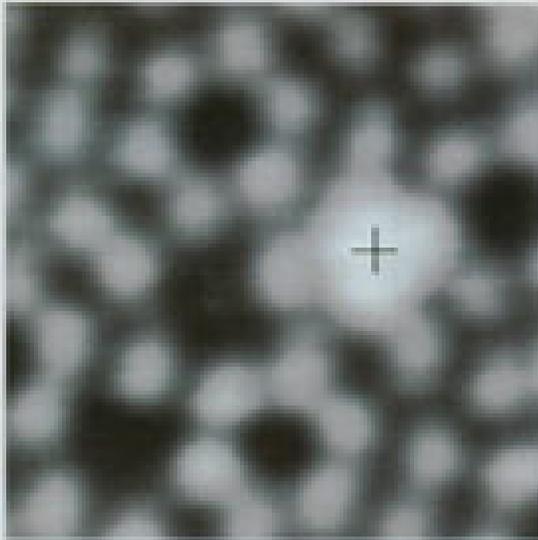
Scan size: 14nm × 14nm

Nano-fabrication on Si surface

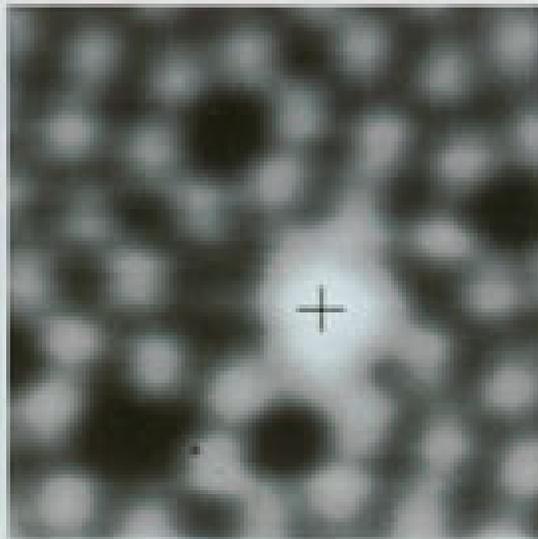
Lithography at room temperature

Displacement of the extra Si atom on the Si(111) 7×7 surface using a W tip. The extra Si atom in (a) has been displaced to another but equivalent position (b).

(a)

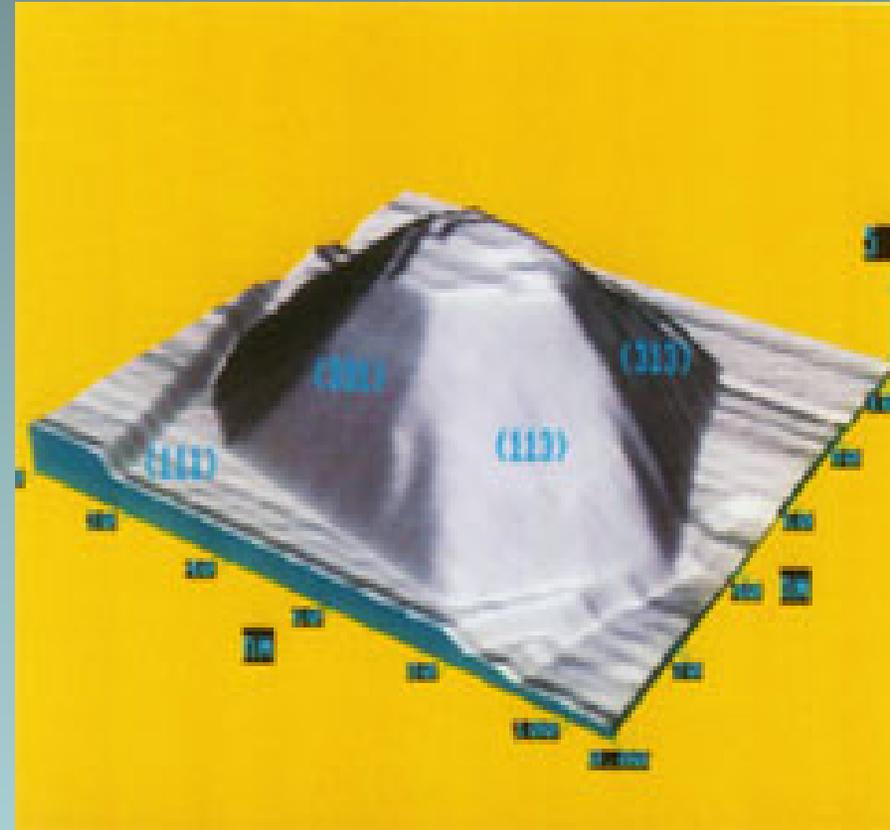
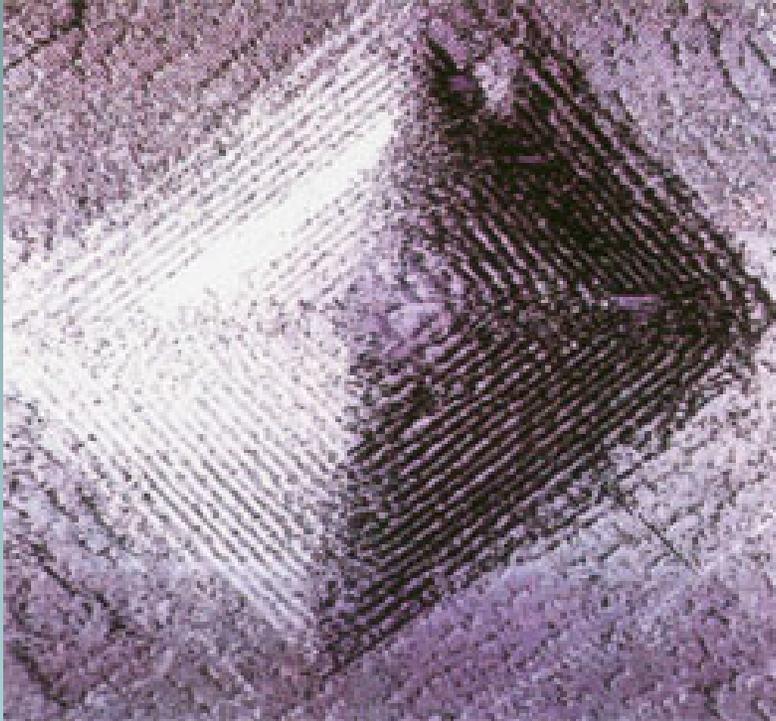


(b)

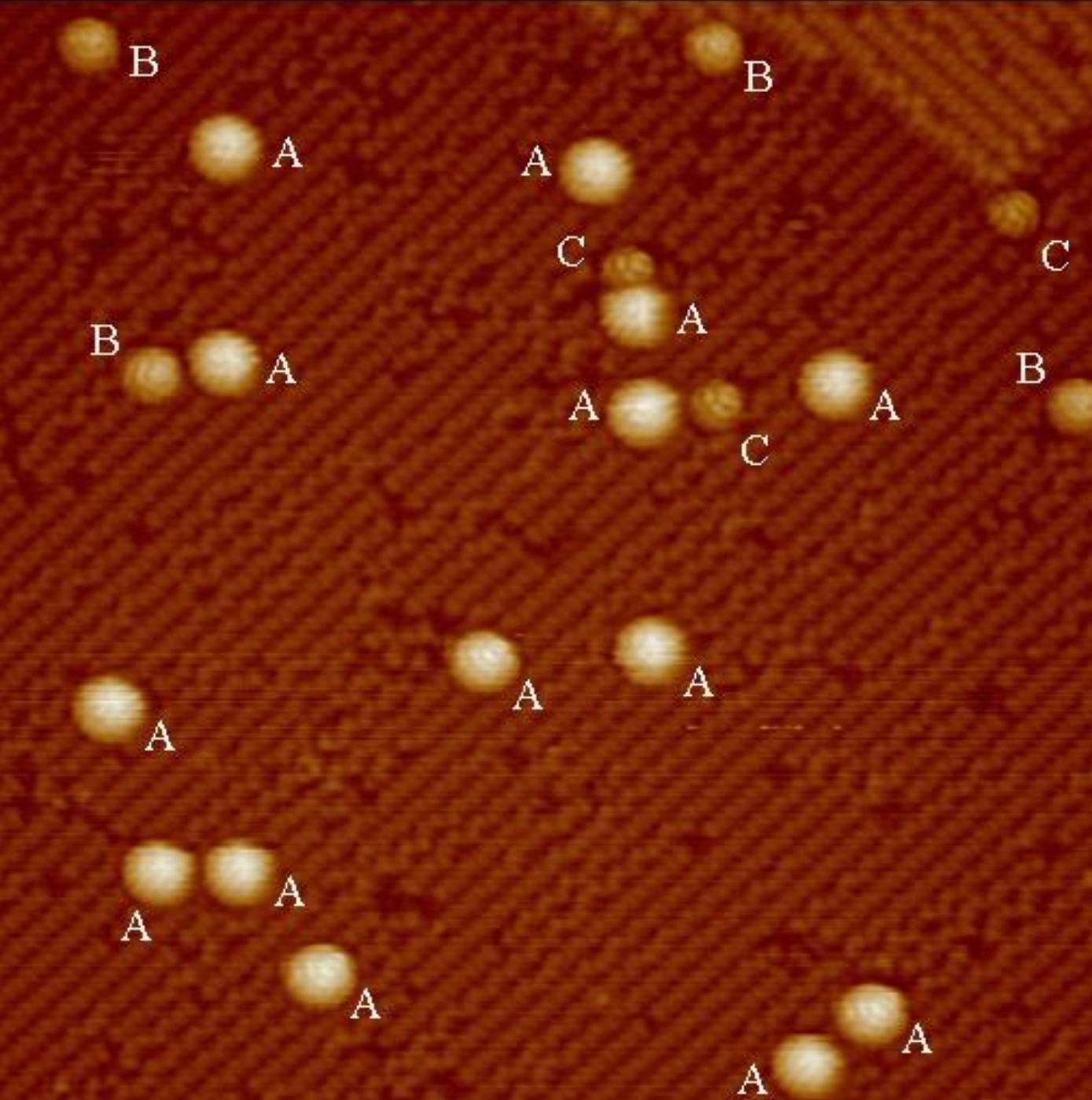


Nano-fabrication on Si surface

Forming of pyramid at high temperature

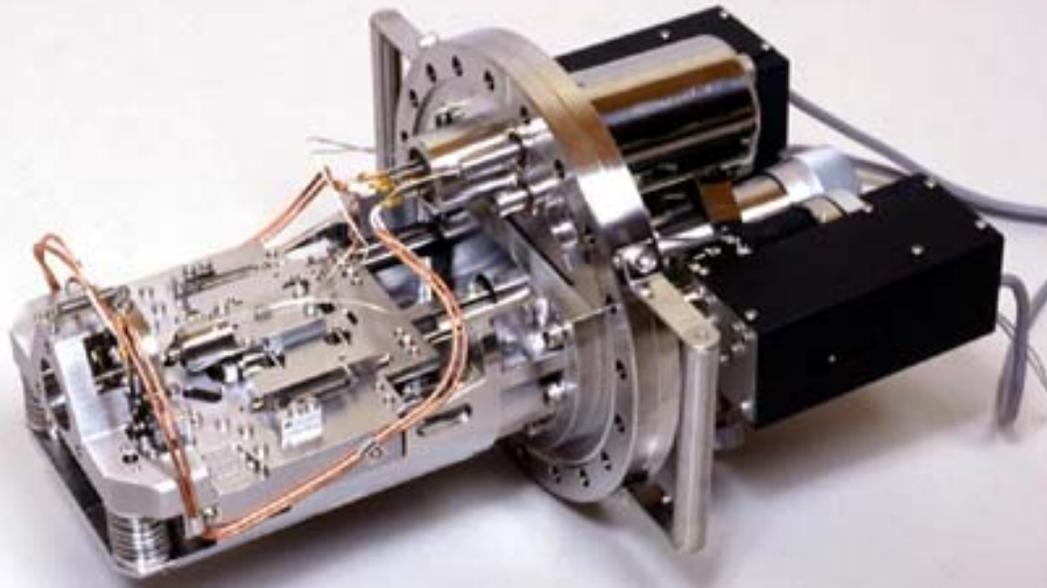


- A quadrangular pyramid on the Si(100) surface at 600°C. The pyramid is 92nm×80nm at the bottom and 4.9nm in height.
- Pyramid formed on high-temperature Si(111) surface (600°C).



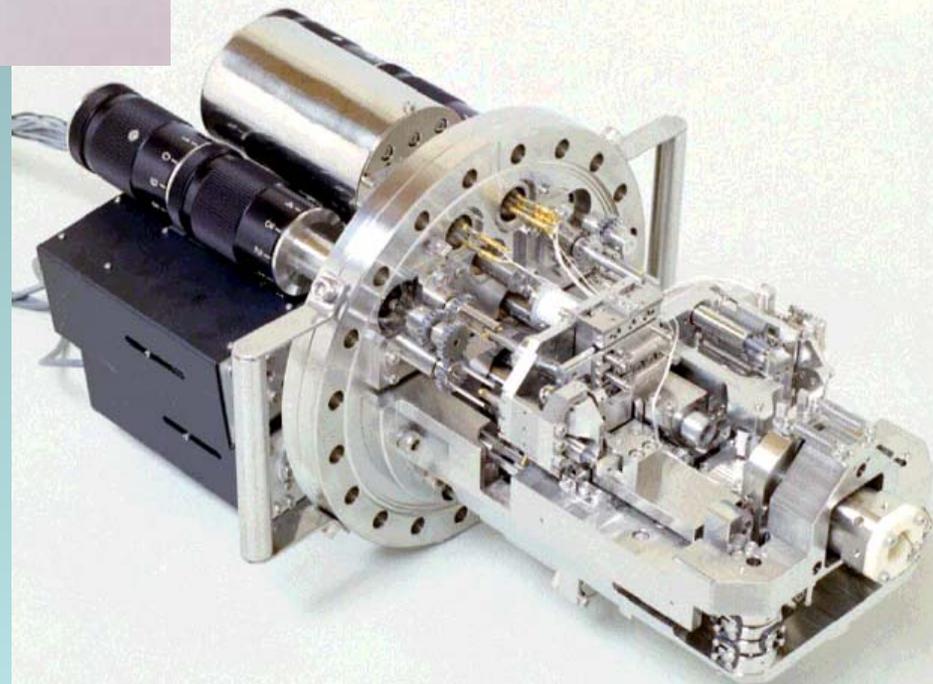
**Ultra-High Vacuum
Scanning Tunneling
Microscopy:
Individual C60
Molecules on Si(100)**

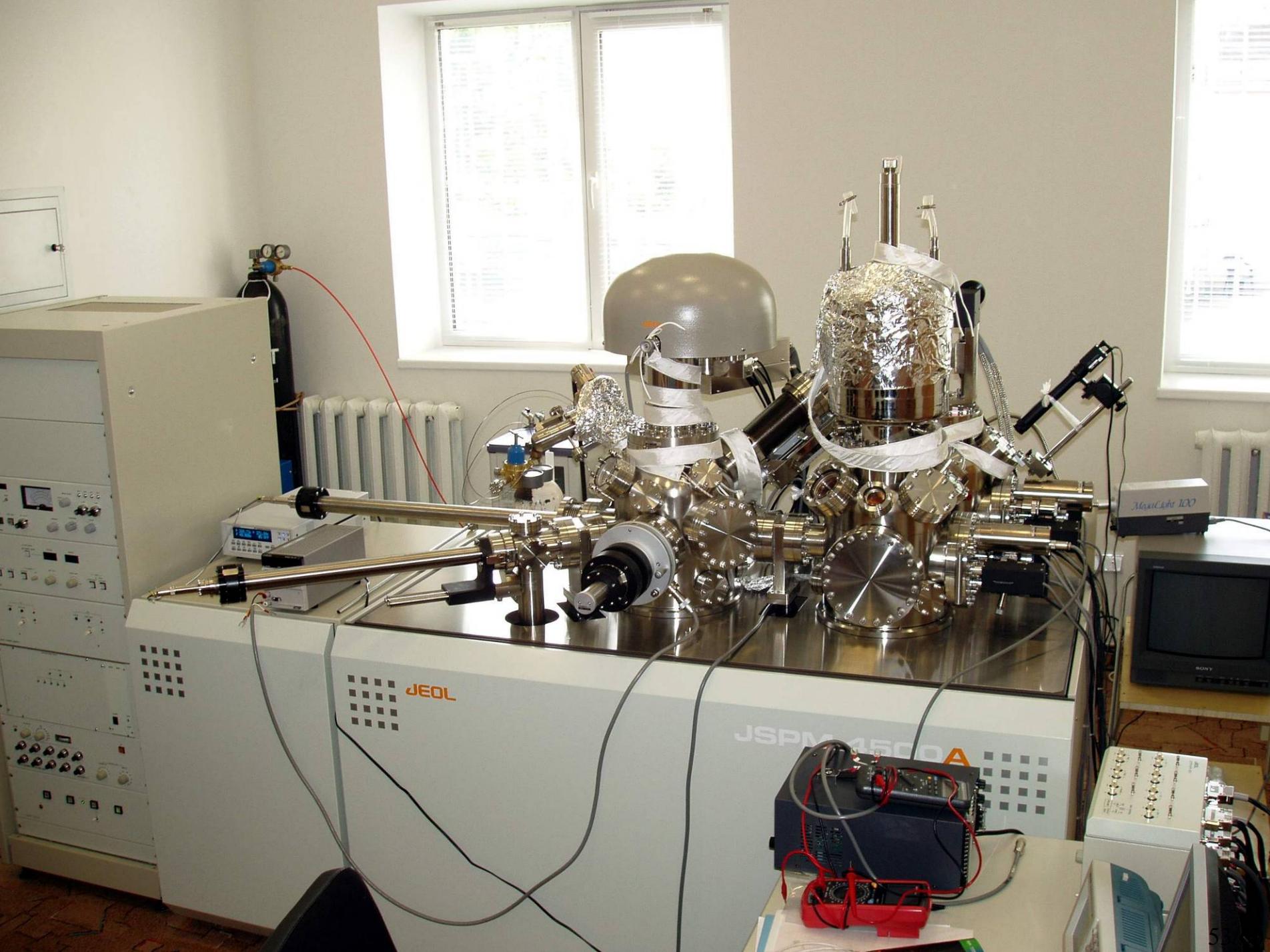
30 nm x 30 nm surface
of Si(100)-2x1 imaged
with the UHV-STM

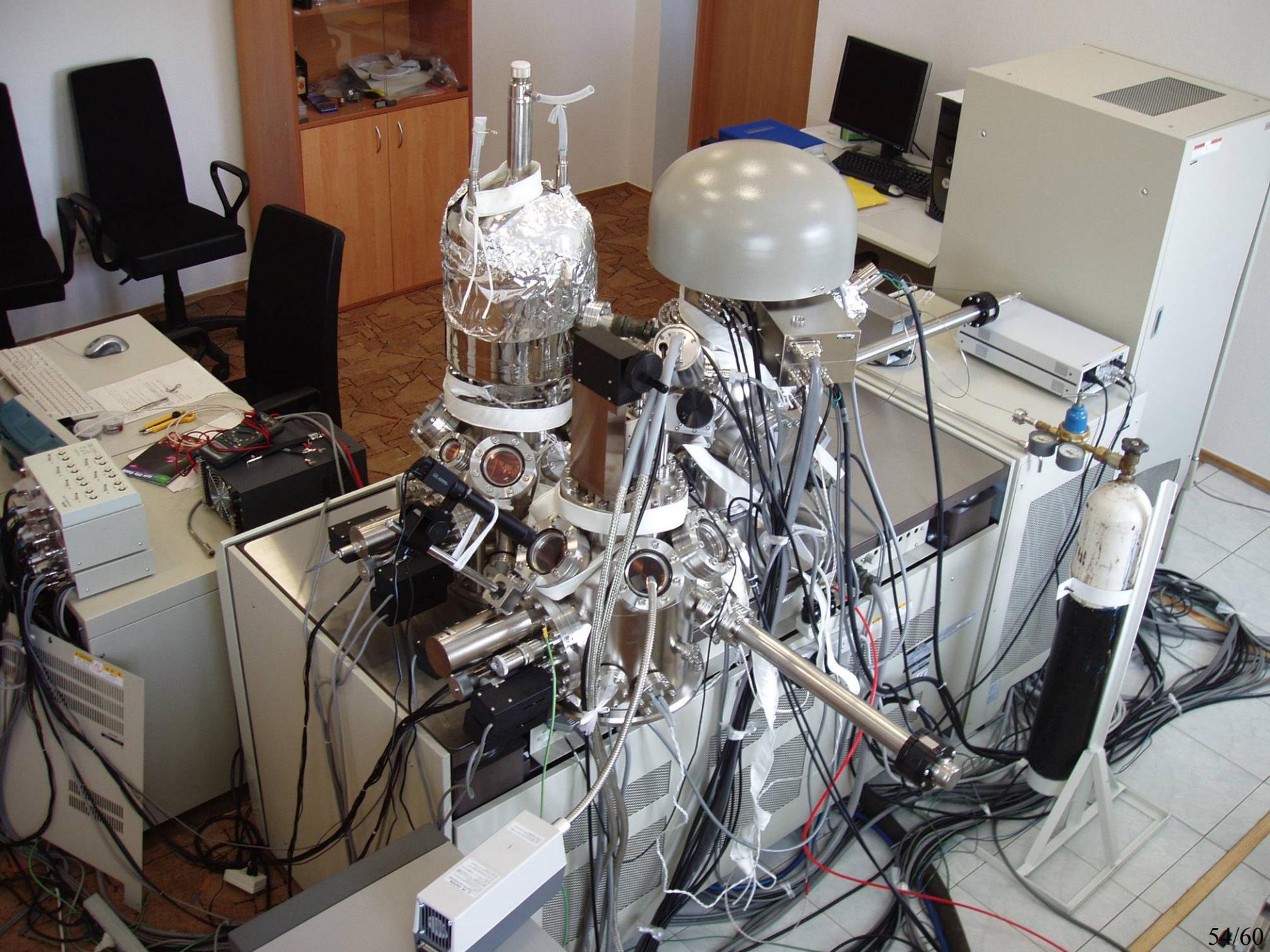


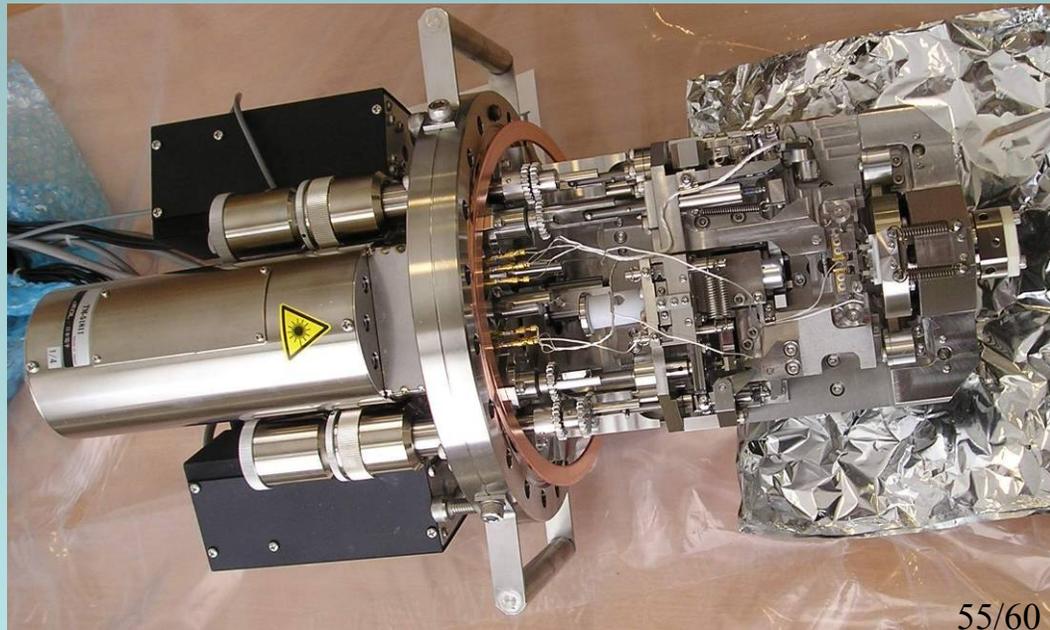
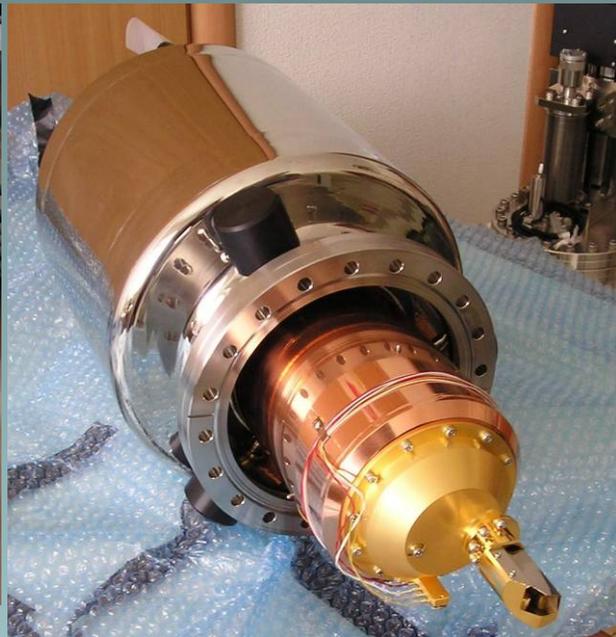
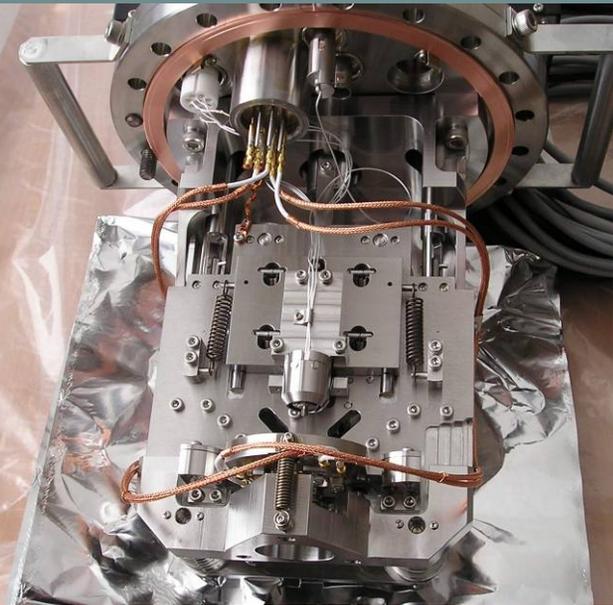
STM stage

UHV-AFM Stage



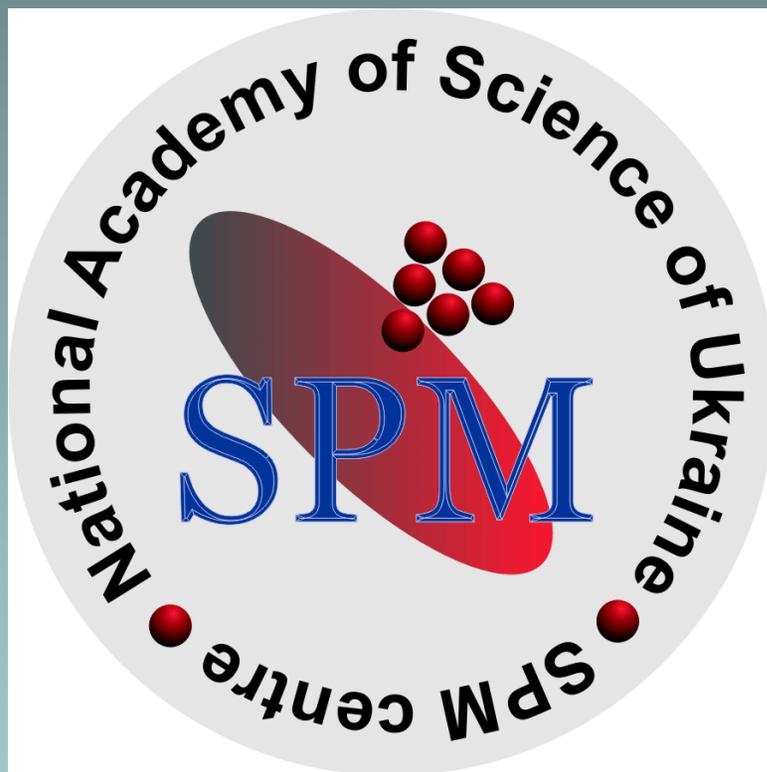






INSTALLATION LIST FOR JSPM SERIES

No	Customer	Instrument	Country
1	University of Tennessee (OLNR)	JSTM-4500VT	USA
2	Cornell University	JAFM-4500XT	USA
3	Cornell University	JSTM-4500XT	USA
4	Edward Air Force	JSTM-4600	USA
5	IBM T.J.Watson	JSPM-4500A	USA
6	IBM T.J.Watson	JSPM-4500A	USA
7	University of Maine	JSPM-4500A	USA
8	University of Maryland	JSPM-4500A	USA
9	Pennsylvania State University	JSPM-4500A	USA
10	Oxford University	JSTM-4500XT	UK
11	Oxford University	JSPM-4500S	UK
12	Lund University	JSTM-4500XT	Sweden
13	Forschungszentrum Jülich	JSPM-4610A	Germany
14	University of Hannover	JSPM-4500SX	Germany
15	Ruhr-University of Bochum	JSPM-4500S	Germany
16	ACADEMIA SINICA	JSTM-4500VT	Taiwan
17	National Chung Hsing University	JSPM-4500A	Taiwan
18	University of Melbourne	JAFM-4500XT	Australia
19	McGill University	JSPM-4500A	Canada
20	Technical center of NAS	JSPM-4500A/S	UKRAINE



www.spm.kiev.u

a