

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Диагностика и методы
исследования
нанообъектов и наносистем

В настоящее время имеется огромное число методов диагностики и методик исследования, предназначенных для определения различных характеристик изучаемых систем. При их применении необходимо учитывать специфику объектов нанометровой геометрии и особенности протекающих в них процессов.

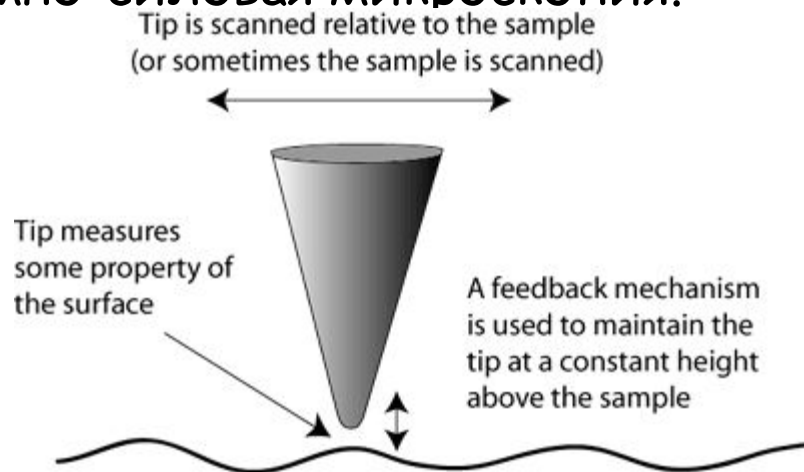
Диагностика наносистем и наноматериалов должна обеспечивать наиболее полную информацию об их основных характеристиках и о протекающих в них процессах.

- **Оптические и нелинейно-оптические методы исследования и диагностики**
- **Нанодиагностика и локальный анализ с помощью электронных и ионных пучков**
- **Сканирующая зондовая микроскопия и спектроскопия**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЗОНДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В НАНОЭЛЕКТРОНИКЕ

Сканирующая зондовая микроскопия - физический метод исследования поверхностных слоев с нанометровым разрешением, основанный на регистрации эффектов взаимодействия наноразмерного зонда с поверхностью образца. Общей чертой всех сканирующих зондовых микроскопов является способ получения информации о свойствах исследуемой поверхности. Микроскопический зонд сближается с поверхностью до установления между зондом и образцом баланса взаимодействий определенной природы, после чего осуществляется сканирование.

Разновидностями сканирующей зондовой микроскопии являются, в частности, сканирующая туннельная микроскопия и сканирующая атомно-силовая микроскопия.



Зондовые методы — профилометрия

**щуп
(датчик)**

**природа
взаимодействия
(обратная связь)**

поверхность

Сканирующая туннельная микроскопия

Зонд: металлическая заостренная игла
Взаимодействие: туннельный ток
Характерные значения: пико-, наноамперы
Характерные расстояния: единицы, десятки ангстрем
Среда: вакуум, жидкость, воздух

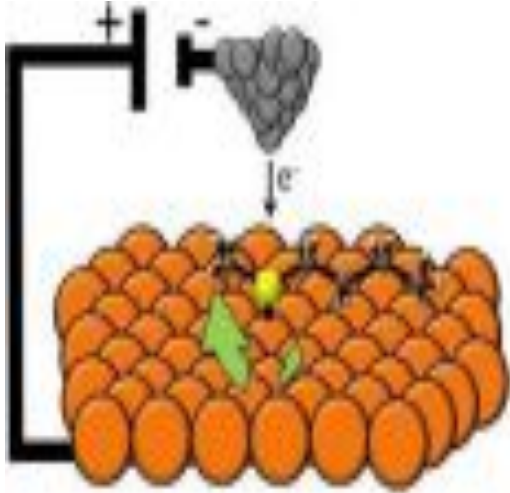
Атомно-силовая микроскопия

Зонд: гибкий кантилевер
Взаимодействие: ван-дер-ваальсовы силы притяжения и отталкивания
Характерные значения: от атто- до наноьютонов
Характерные расстояния: единицы, десятки нанометров
Среда: вакуум, жидкость, воздух

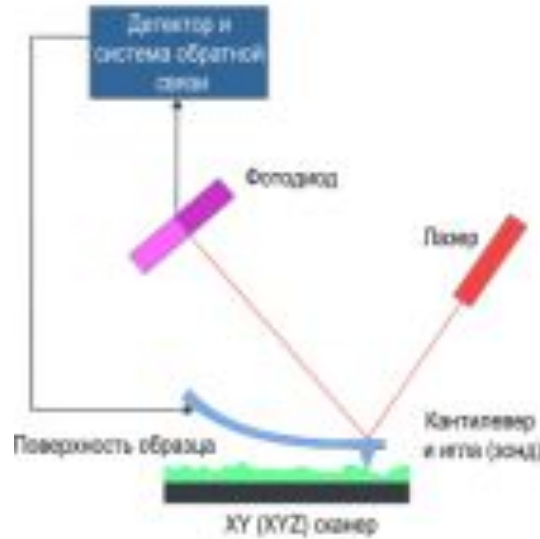
Сканирующая электрохимическая микроскопия

Зонд: микроэлектрод
Взаимодействие: электрохимический (фарадеевский) ток
Характерные значения: нано-, микроамперы
Характерные расстояния: микрометры
Среда: жидкость

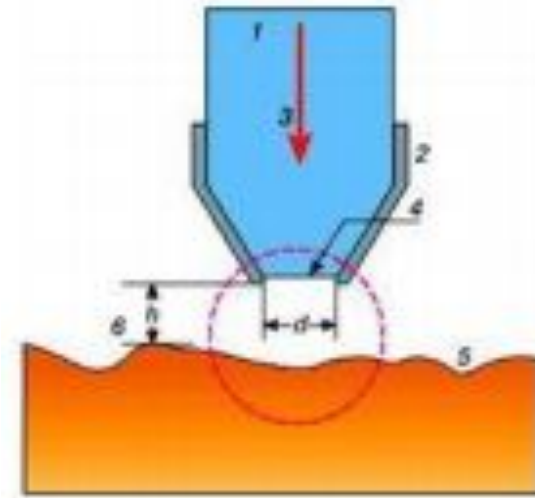
Виды и задачи сканирующей зондовой микроскопии



сканирующий
туннельный
микроскоп



сканирующий
атомно-силовой
микроскоп



сканирующий
оптический ближнеполный
микроскоп

- Получение изображений поверхности образцов
- Изучение электронных и магнитных состояний поверхности
- Изучение атомно-силовых взаимодействий на поверхности
- Атомное конструирование

История появления инструментов

- В 1981 г. Гердом Биннигом и Генрихом Рорером изобретен сканирующий туннельный микроскоп (СТМ)
- В течение последующего десятилетия были созданы атомно-силовой микроскоп, магнитно-силовой микроскоп, электросиловой микроскоп, ближнепольный оптический микроскоп и другие приборы, имеющие сходные принципы работы и называемые **сканирующими зондовыми микроскопами**
- **Атомно-силовой микроскоп (АСМ)** был изобретён в 1986 г. Гердом Биннигом, Кэлвином Куэйттом и Кристофером Гербером



The Nobel Prize in Physics 1986

"for his fundamental work in electron optics, and for the design of the first electron microscope"

"for their design of the scanning tunneling microscope"



Ernst Ruska

🕒 1/2 of the prize

Federal Republic of Germany

Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft
Berlin, Federal Republic of Germany

b. 1906
d. 1988



Gerd Binnig

🕒 1/4 of the prize

Federal Republic of Germany

IBM Zurich Research Laboratory
Röschlikon, Switzerland

b. 1947



Heinrich Rohrer

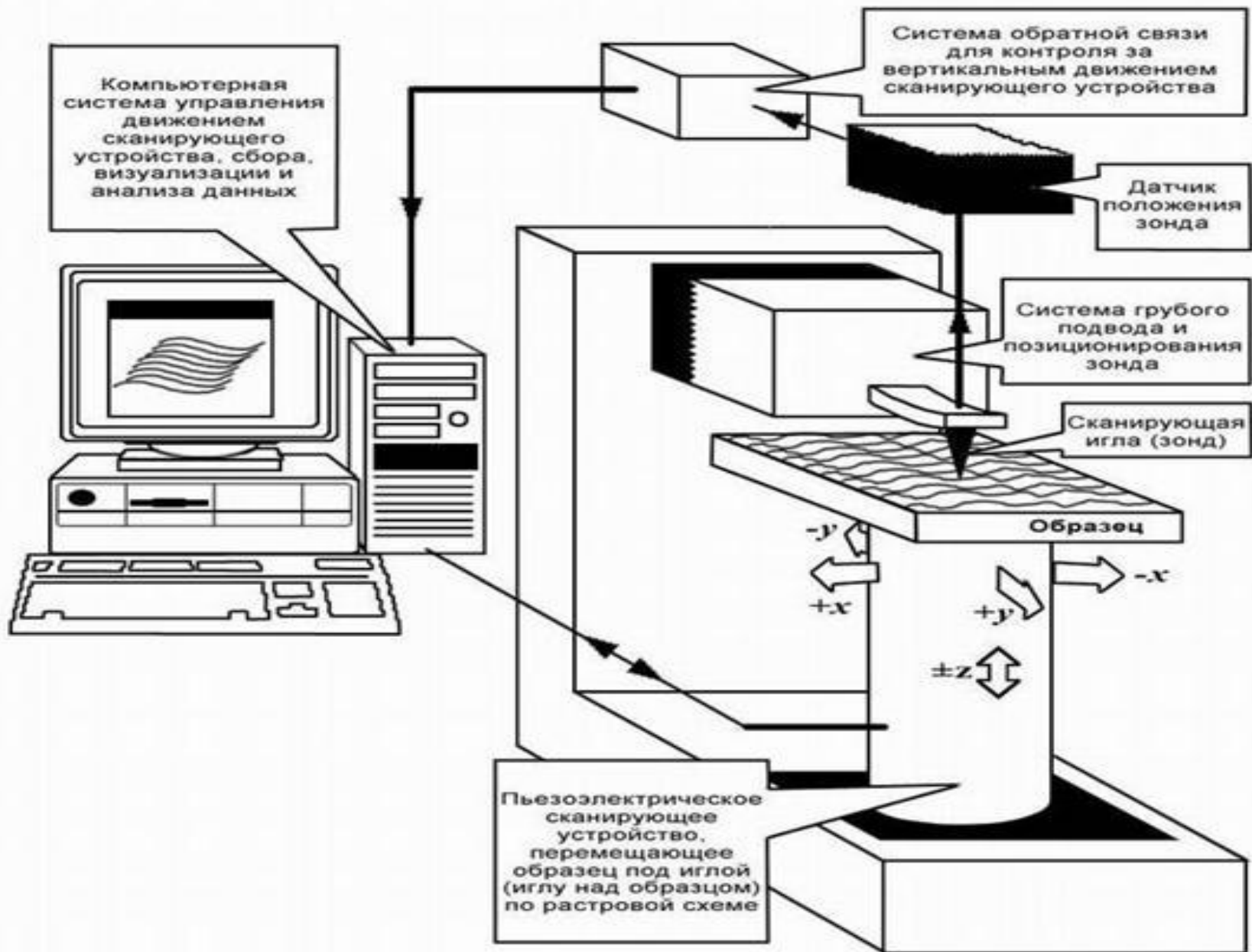
🕒 1/4 of the prize

Switzerland

IBM Zurich Research Laboratory
Röschlikon, Switzerland

b. 1933

Схема работы устройств зондовой микроскопии



Сканирующий элемент

Сканирующие элементы зондовых микроскопов изготавливаются из пьезоэлектриков – материалов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами. В различных технических приложениях широкое распространение получили преобразователи из пьезокерамических материалов. Пьезокерамика представляет собой поляризованный поликристаллический материал, получаемый методами спекания порошков из кристаллических сегнетоэлектриков. Поляризация керамики производится следующим образом. Керамику нагревают выше температуры Кюри (для большинства пьезокерамик эта температура менее 300°C), а затем медленно охлаждают в сильном (порядка 3 кВ/см) электрическом поле. После остывания пьезокерамика имеет наведенную поляризацию и приобретает способность изменять свои размеры (увеличивать или уменьшать в зависимости от взаимного направления вектора поляризации и вектора внешнего электрического поля).

Сканирующий элемент

Уравнение обратного пьезоэффекта:

$$u_{ij} = d_{ijk} E_k,$$

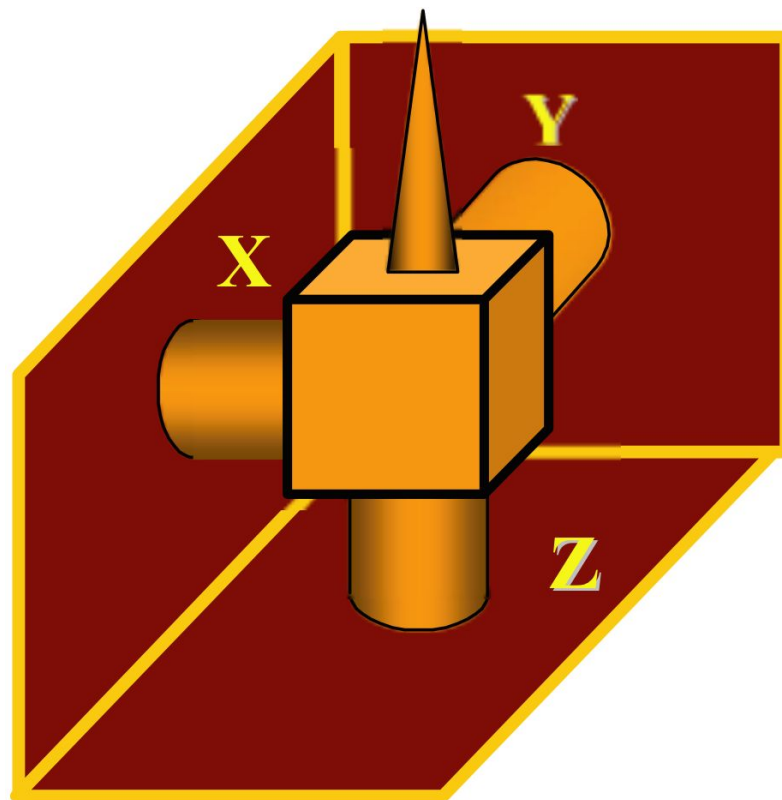
где u_{ij} - тензор деформаций, E_k - компоненты электрического поля, d_{ijk} - компоненты тензора пьезоэлектрических коэффициентов. Вид тензора пьезоэлектрических коэффициентов определяется типом симметрии кристаллов.

Трубчатые пьзоэлементы позволяют получать большие перемещения объектов при небольших управляющих напряжениях

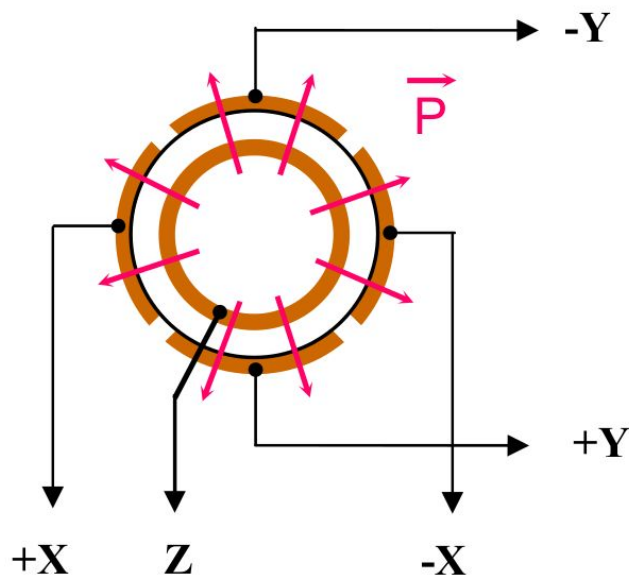
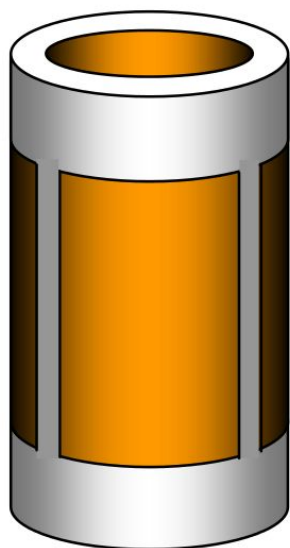


Сканирующий элемент - трипод

Соединение трех трубок в один узел позволяет организовать прецизионные перемещения зонда в трех взаимно перпендикулярных направлениях

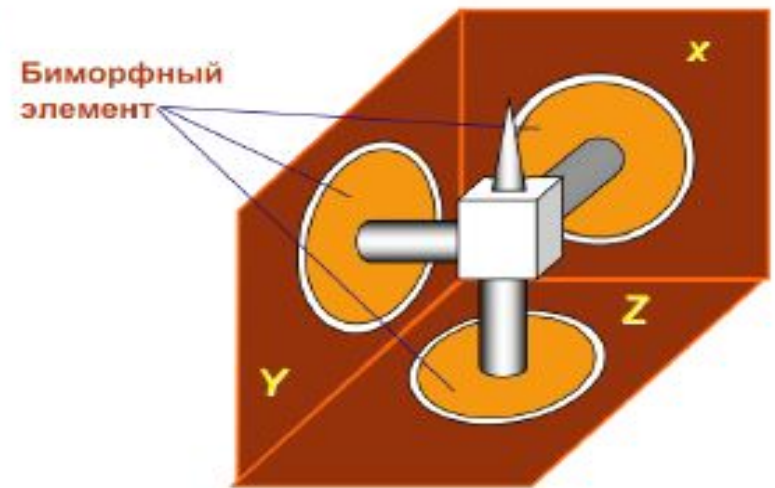
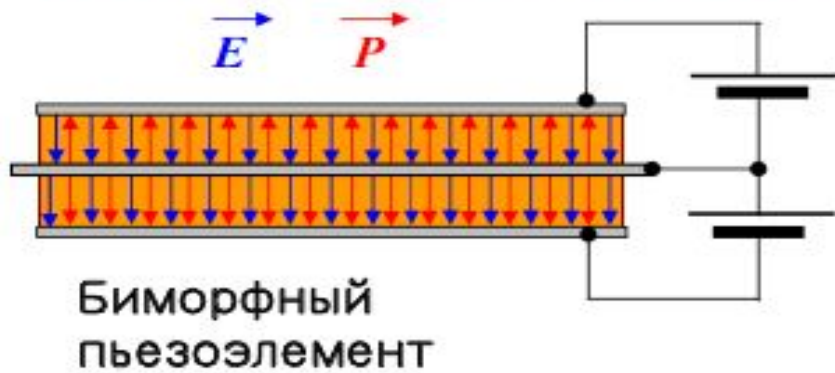


Трубчатый сканирующий элемент

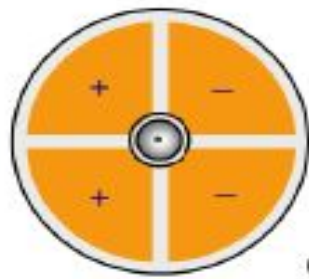


При подаче противофазных напряжений на противоположные секции внешнего электрода происходит сокращение участка трубки в том месте, где направление поля совпадает с направлением поляризации

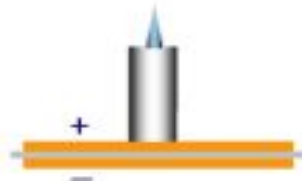
Позиционирование сканирующего элемента.



Трёхкоординатный сканер на трех биморфных пьезоэлементах



(а)



(в)



(б)

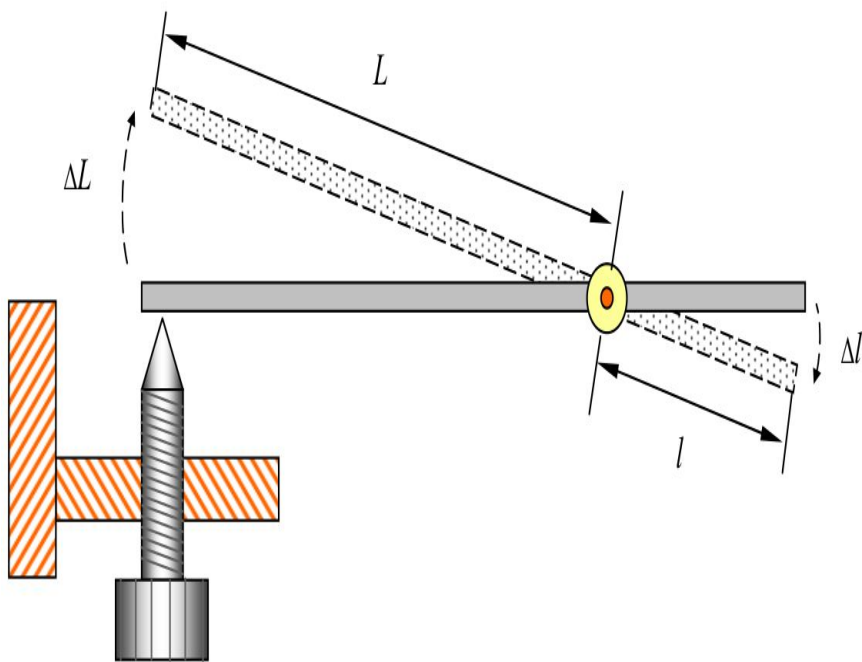


(г)

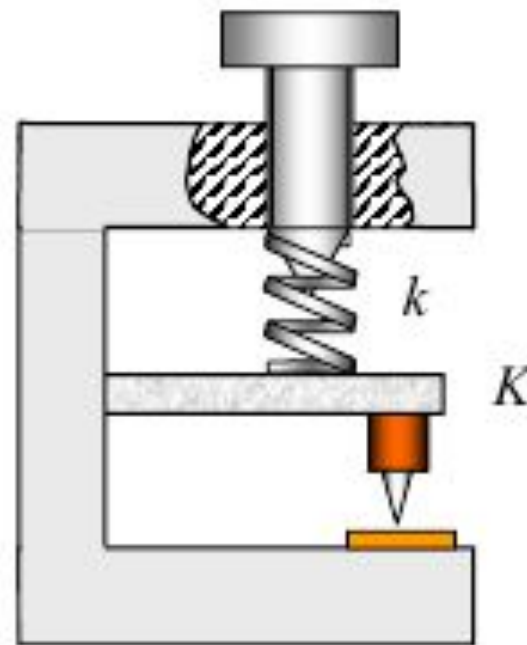
Схема работы биморфного пьезосканера

Широкое распространение получили также сканеры на основе биморфных пьезоэлементов. Биморф представляет собой две пластины пьезоэлектрика, склеенные между собой таким образом, что вектора поляризации в каждой из них направлены в противоположные стороны

Устройства для прецизионных перемещений

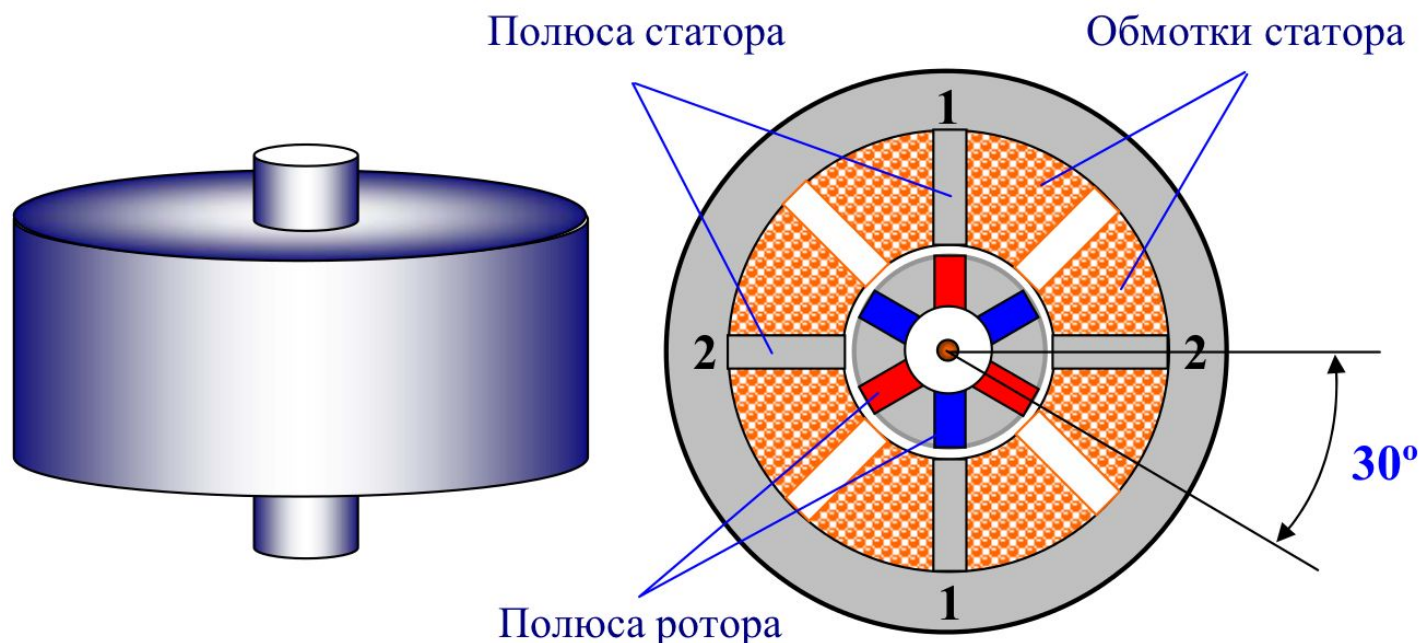


Рычажной редуктор



Пружинный редуктор перемещений

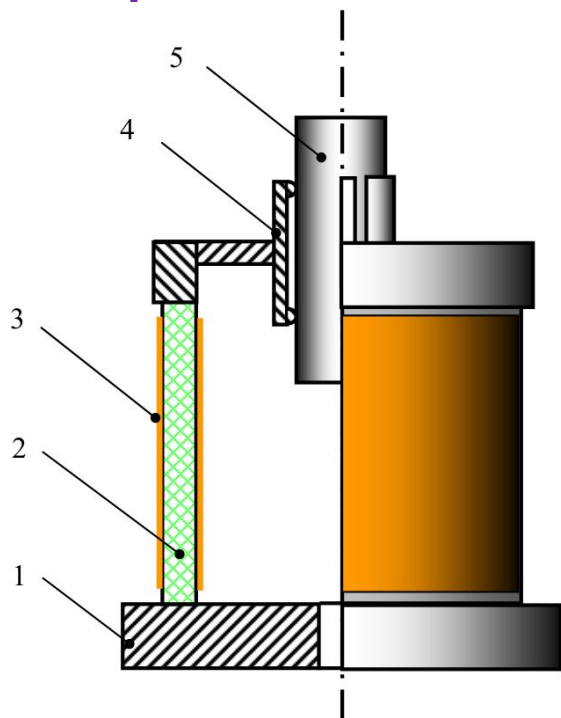
Устройства для прецизионных перемещений



Шаговый электродвигатель

Показанный на рис. двигатель имеет величину шага 30 град. При включении тока в одной из обмоток ротор стремится занять такое положение, при котором разноименные полюса ротора и статора находятся друг напротив друга. Для осуществления непрерывного вращения нужно включать обмотки попеременно.

Устройства для прецизионных перемещений

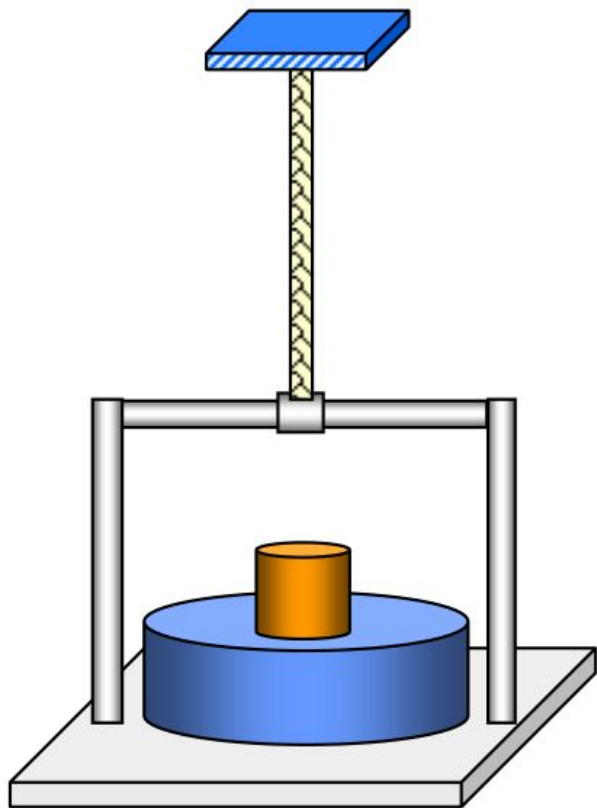


- 1 - основание;
- 2 - пьезоэлектрическая трубка;
- 3 - электроды;
- 4 - разрезная пружина;
- 5 - цилиндрический держатель объекта.

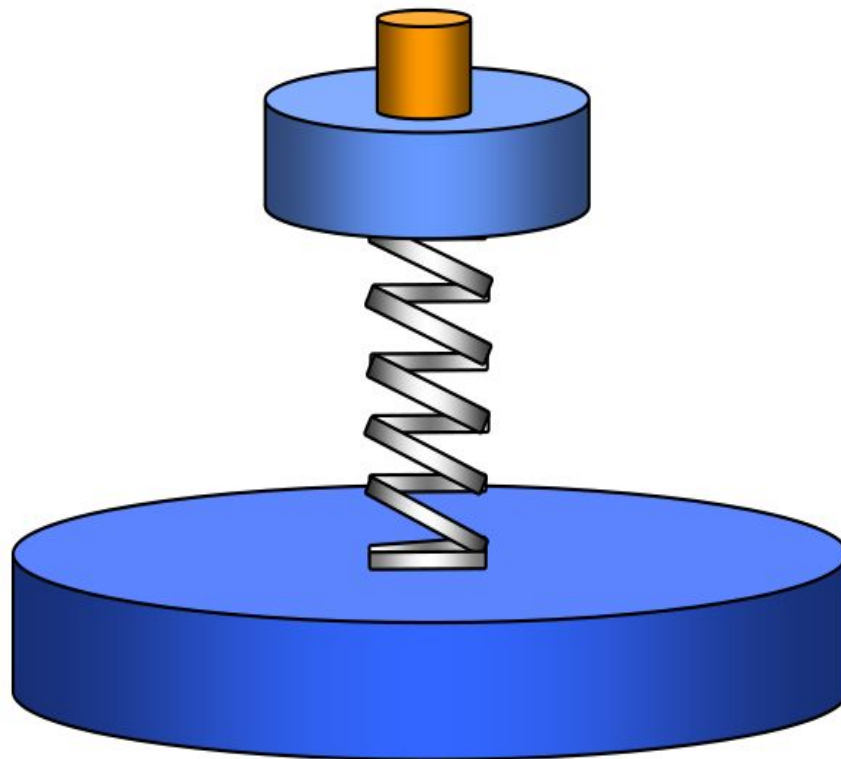
Шаговый пьезодвигатель

Для перемещения держателя объекта в направлении оси к электродам пьезотрубки прикладывается импульсное напряжение. Трубка плавно удлиняется или сжимается в зависимости от полярности напряжения, и ее конец вместе с пружиной и держателем объекта смещается на расстояние. В момент сброса напряжения трубка возвращается в исходное положение держатель объекта, в силу своей инерционности, проскальзывает относительно разрезной пружины, перемещаясь на некоторый шаг относительно исходного положения.

Виброизолирующие системы

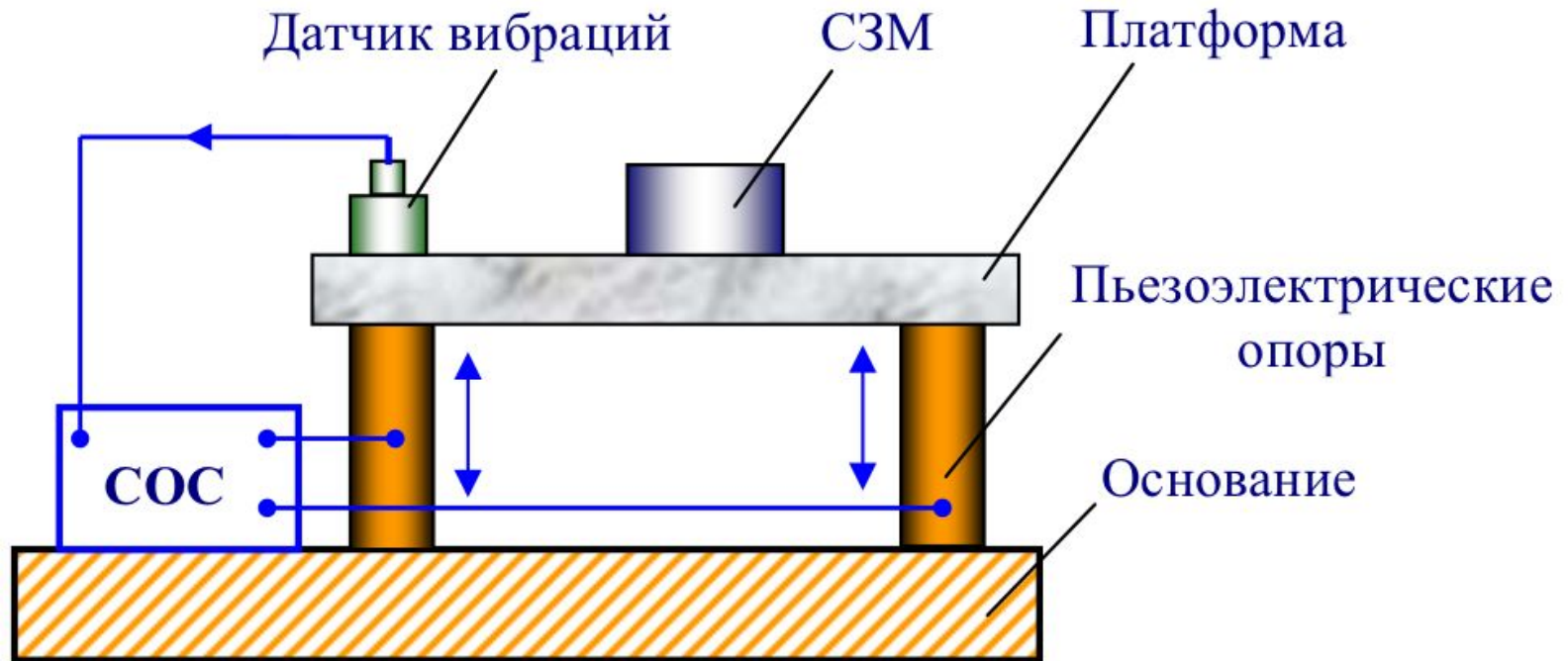


Пассивные



Амплитуда вынужденных колебаний механической системы быстро падает при увеличении разницы между частотой возбуждающей силы и собственной резонансной частотой системы. Поэтому внешние воздействия с частотами $\omega \gg \omega_0$ практически не оказывают заметного влияния на колебательную систему.

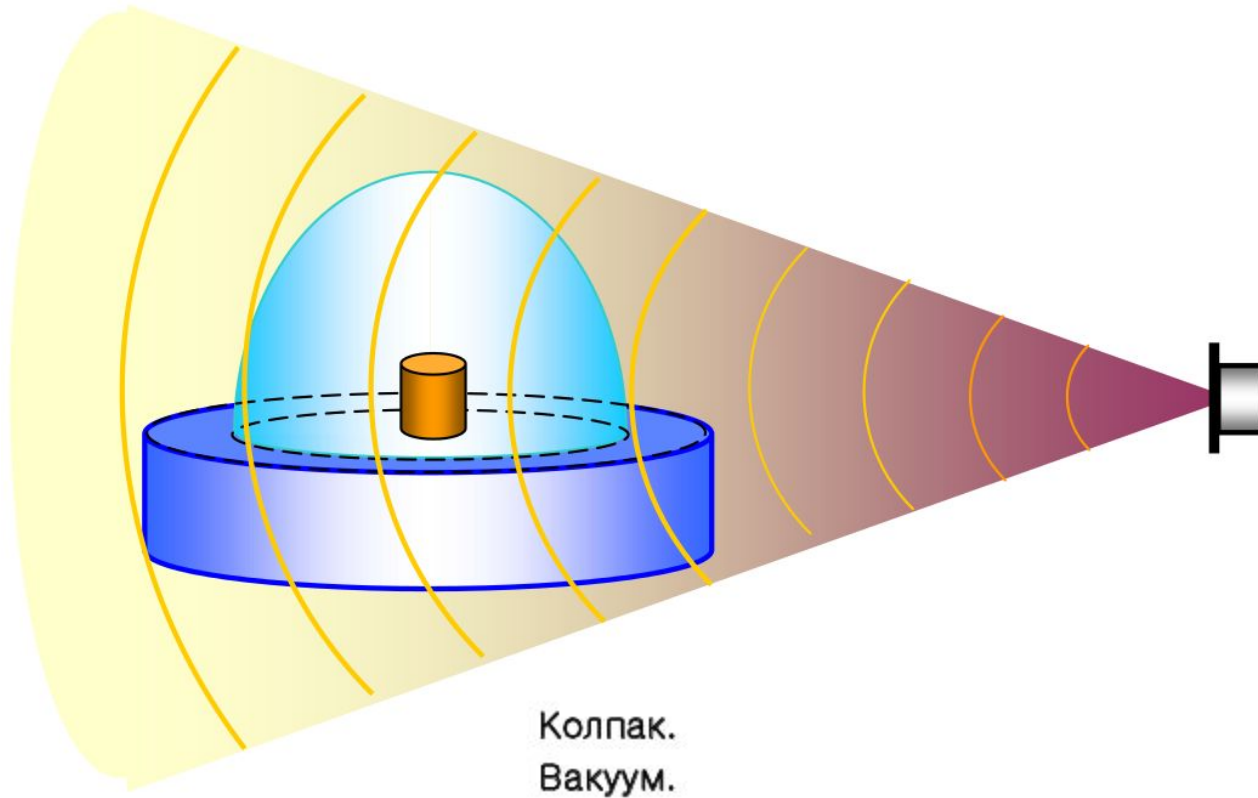
Виброизолирующие системы



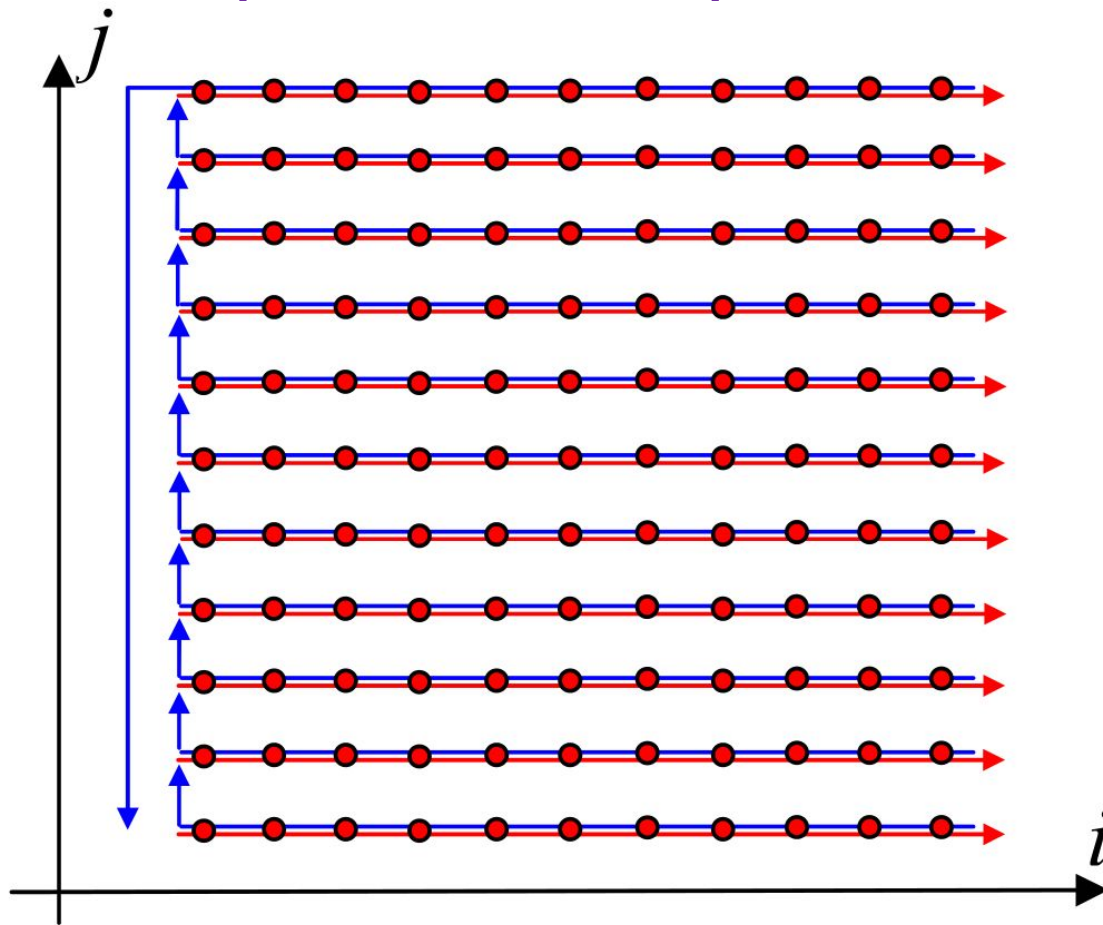
Активные

Устройства представляют собой электромеханические системы с отрицательной обратной связью, которая обеспечивает стабильное положение виброизолирующей платформы в пространстве.

Защита от акустических шумов

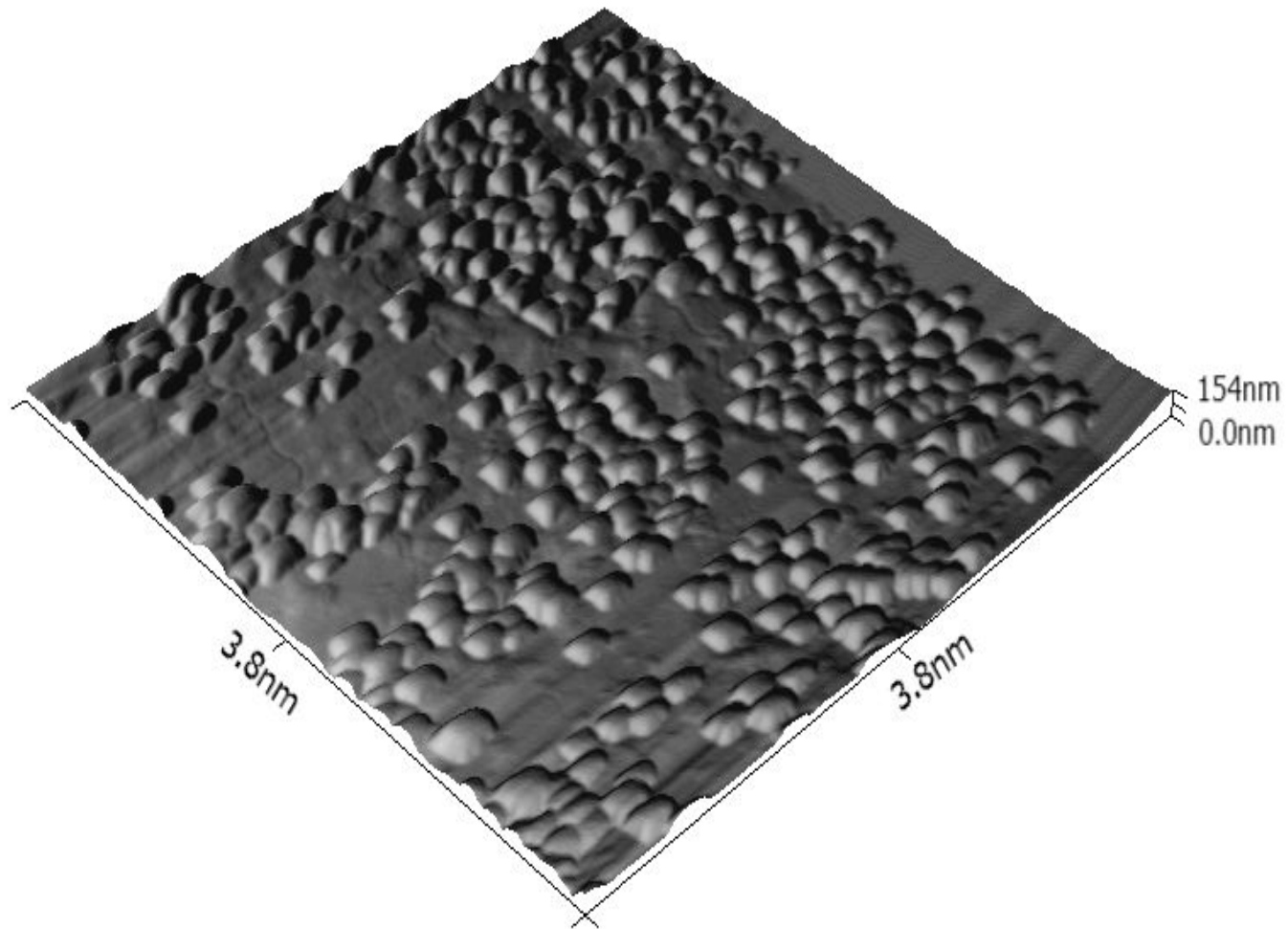


Процесс сканирования



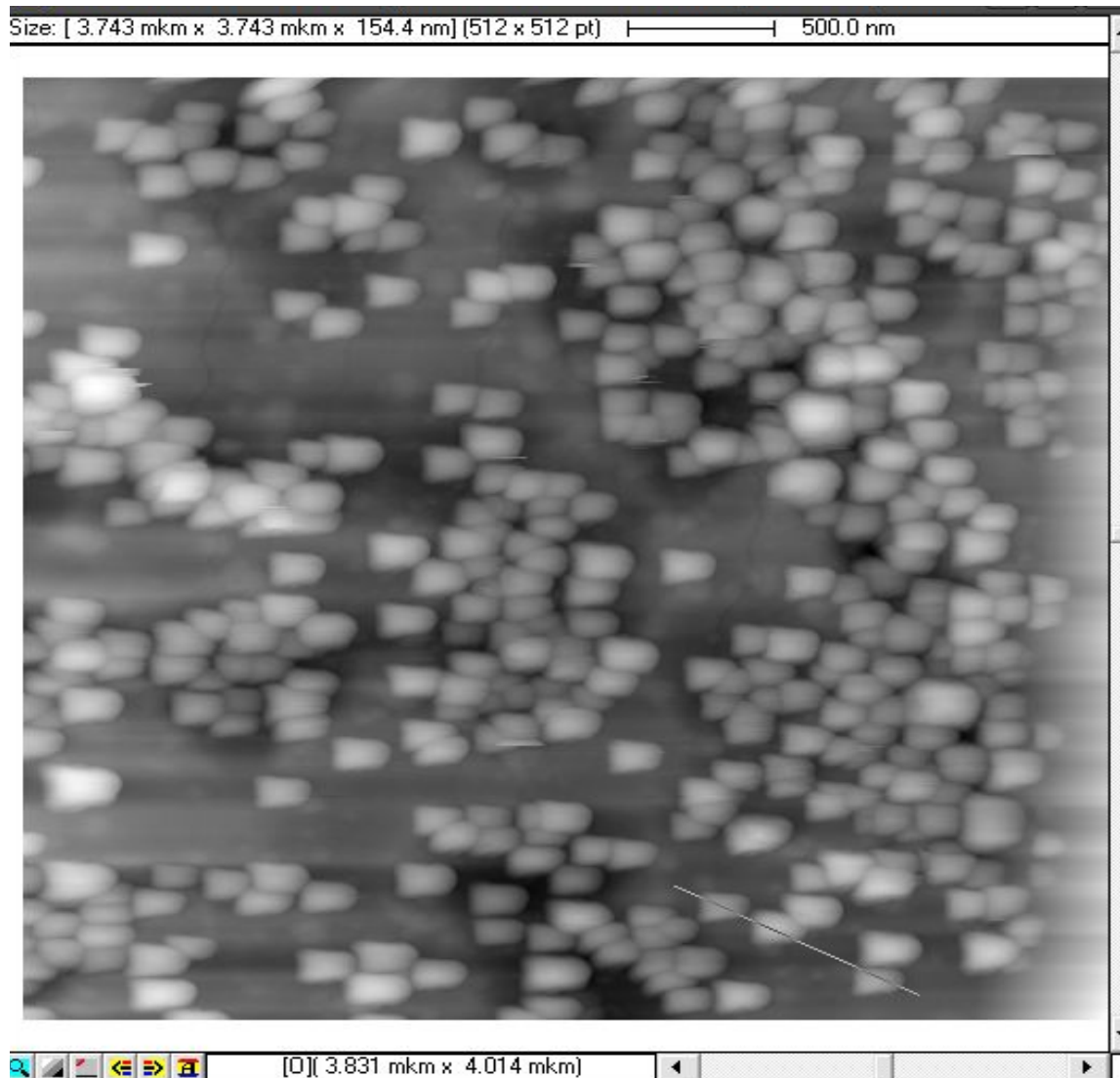
Схематическое изображение процесса сканирования. Направление прямого хода сканера обозначено стрелками красного цвета, Обратный ход сканера обозначен стрелками синего цвета. Регистрация информации производится в точках на прямом проходе

Визуализация



Трехмерная

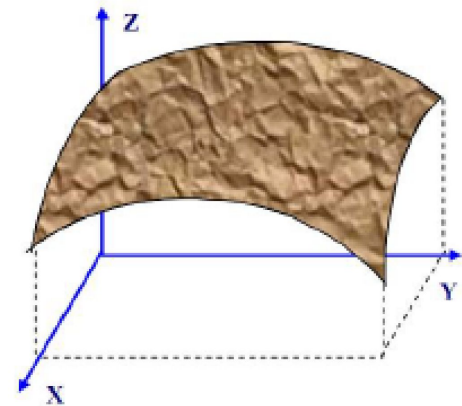
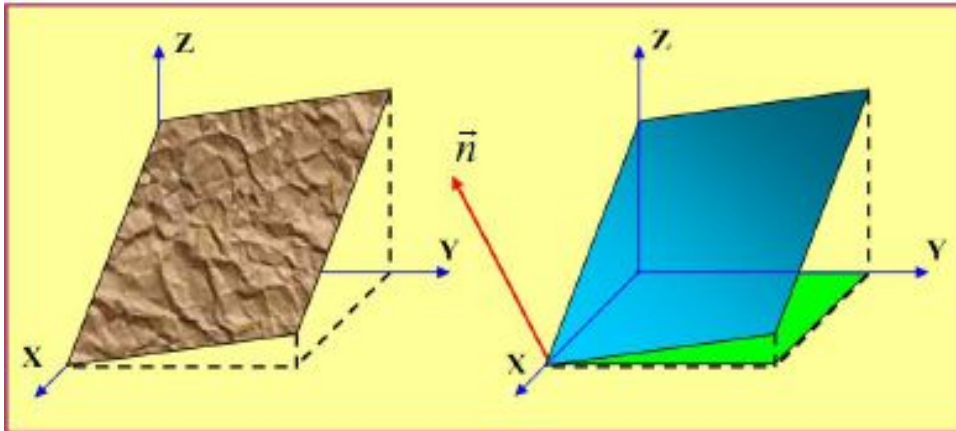
Визуализация



Двумерная

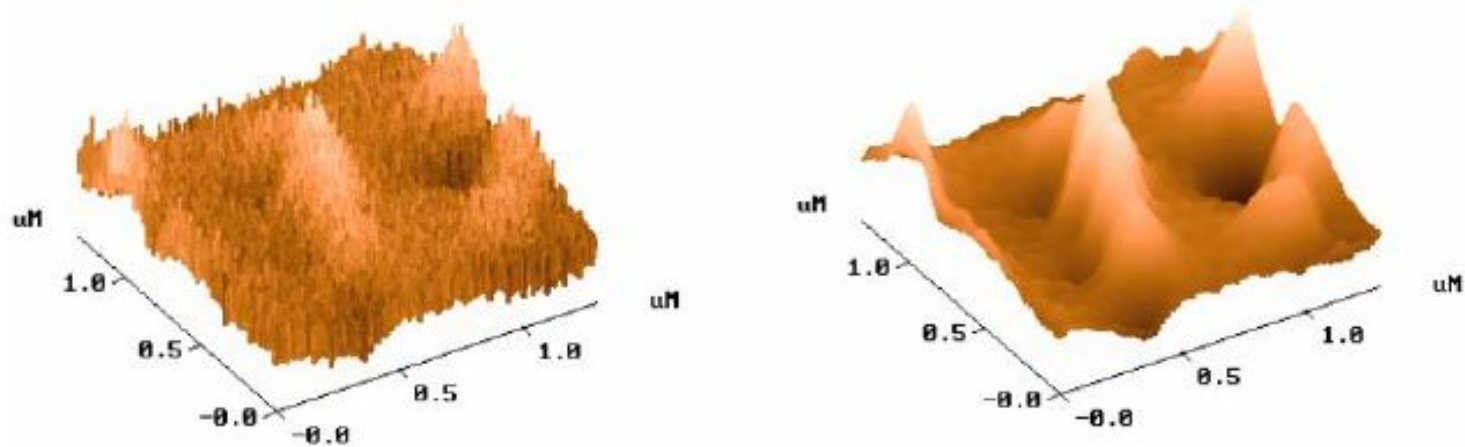
Устранение побочной информации

- Вычитание постоянной составляющей
- Вычитание постоянного наклона
- Устранение искажений, связанных с неидеальностью сканера
- Устранение результатов нелинейности и неортогональности перемещений сканера в горизонтальной плоскости



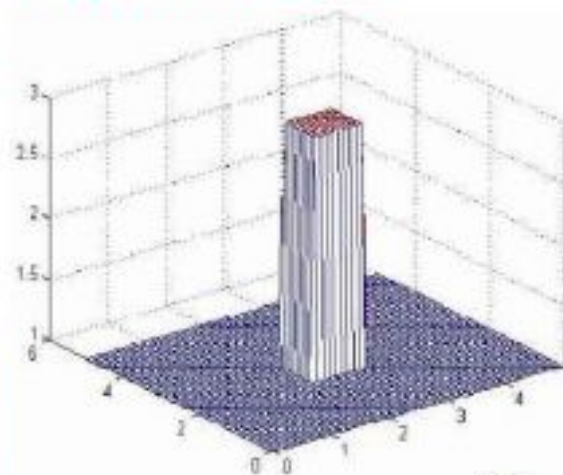
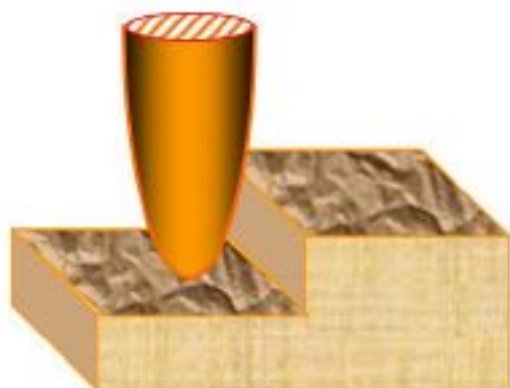
Фильтрация изображений

- Медианная фильтрация
- Усреднение по строкам
- Фурье - фильтрация изображений: свертка с фильтрами верхних и нижних пространственных частот, свертка с полосовыми фильтрами, обращение свертки, вычисление автокорреляционных функций

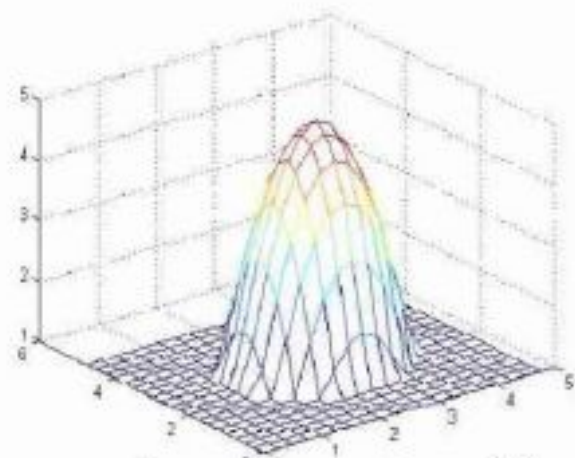


Изображение до (слева) и после (справа) фильтрации

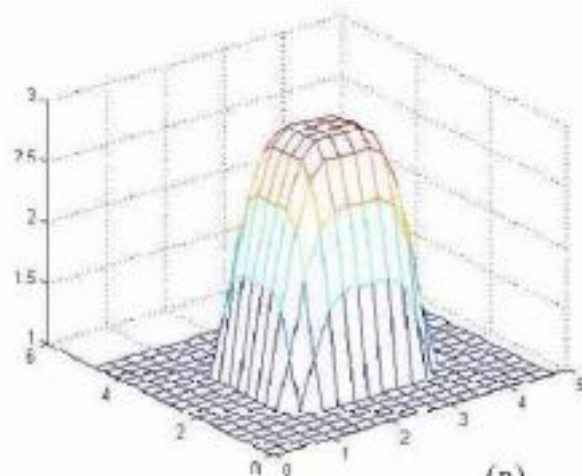
Восстановление истинного изображения.



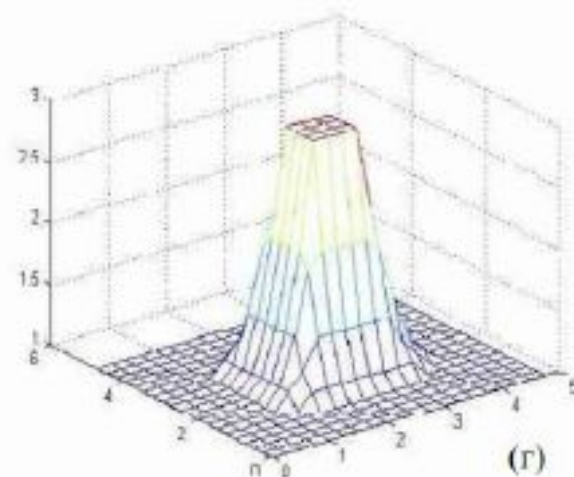
(а)



(б)



(в)

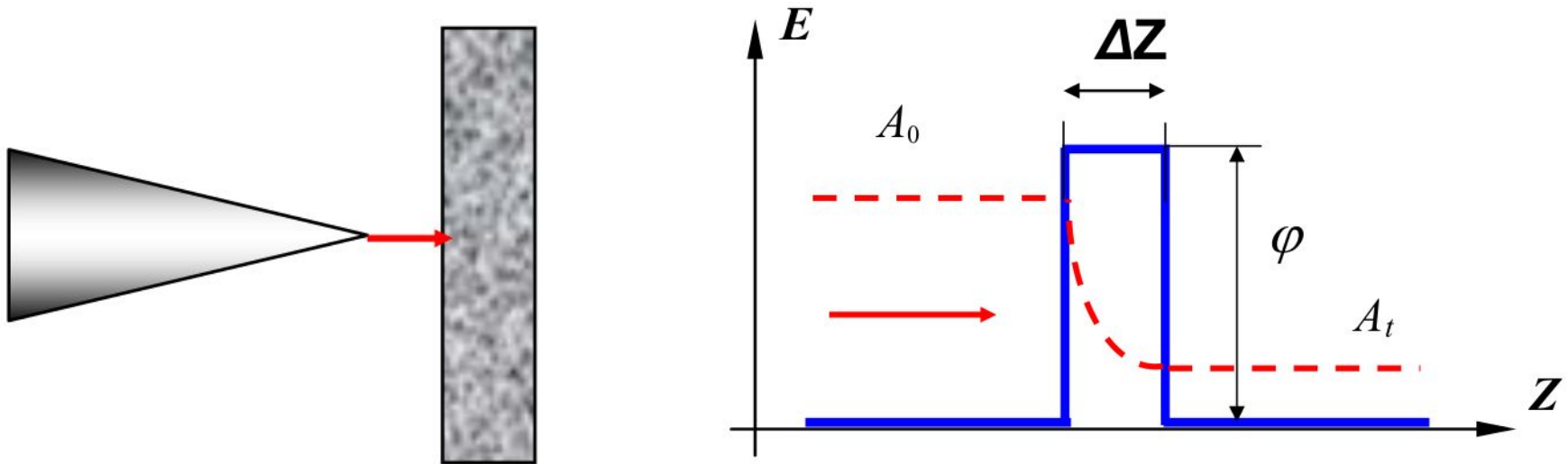


(г)

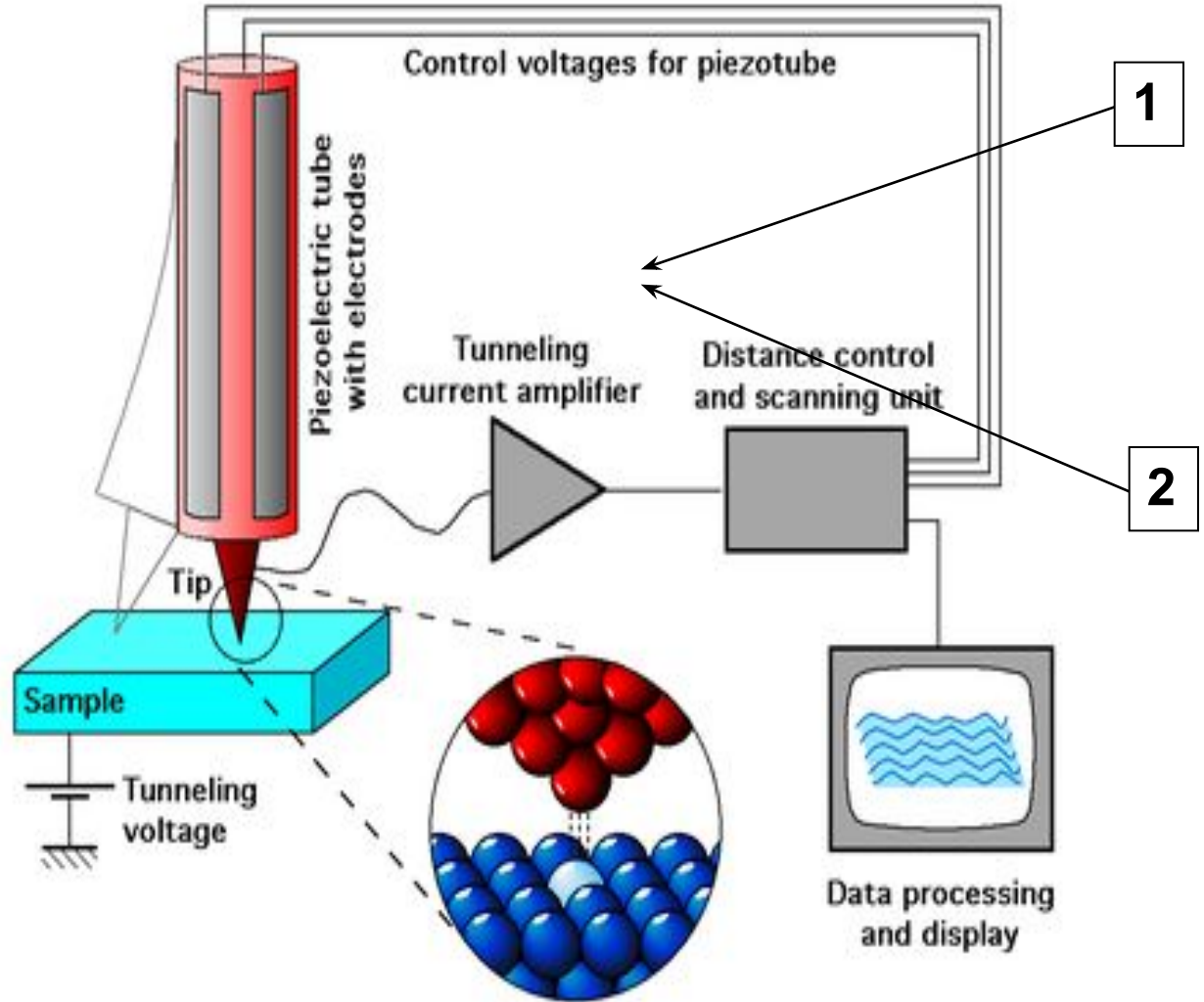
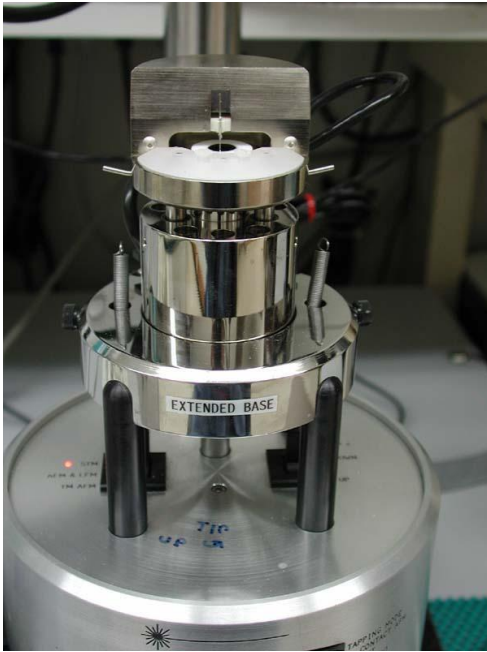
(а) – реальная поверхность

(г) – восстановленное изображение поверхности

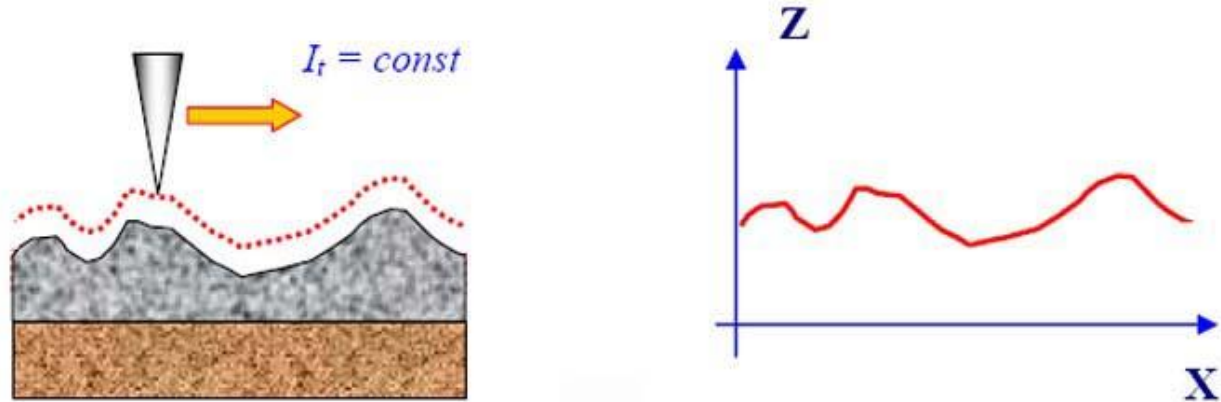
Сканирующая туннельная микроскопия



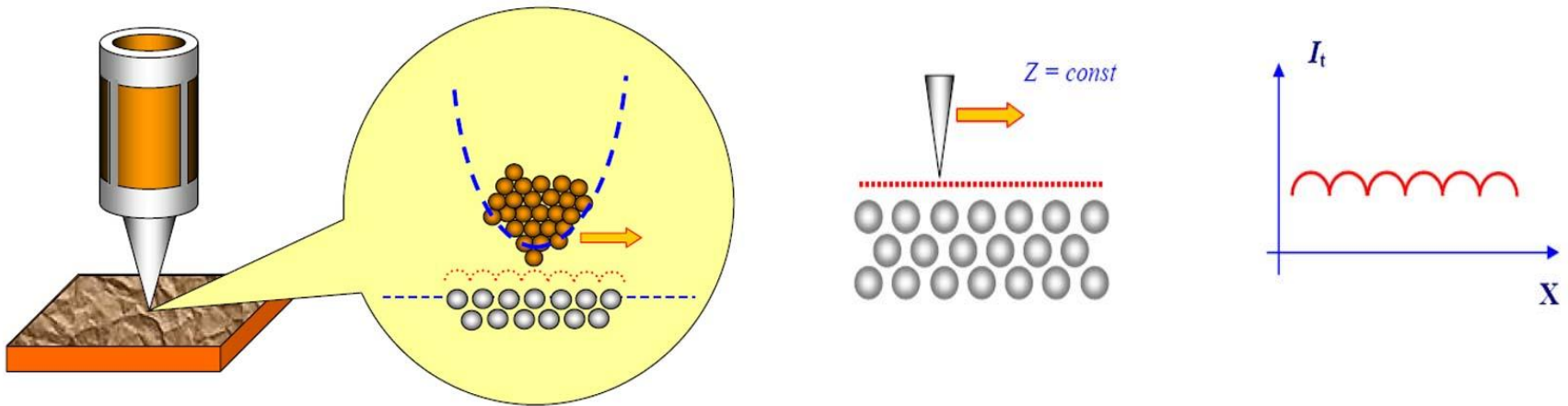
Принцип работы сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) основан на явлении туннелирования электронов через узкий потенциальный барьер между металлическим зондом и проводящим образцом во внешнем электрическом поле. В СТМ зонд подводится к поверхности образца на расстояния в несколько ангстрем. При этом образуется туннельно-прозрачный потенциальный барьер, величина которого определяется, в основном, значениями работы выхода электронов из материала зонда φ_p и образца φ_s .

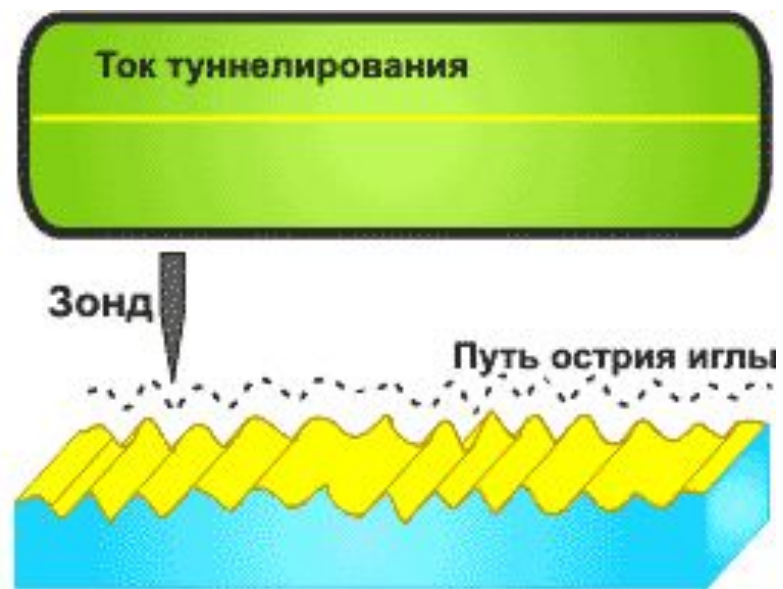
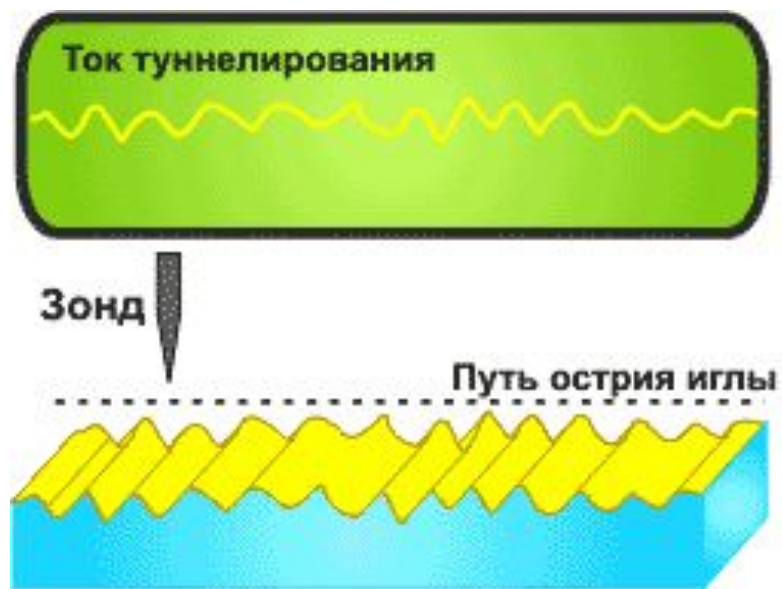


1. Режим постоянного туннельного тока

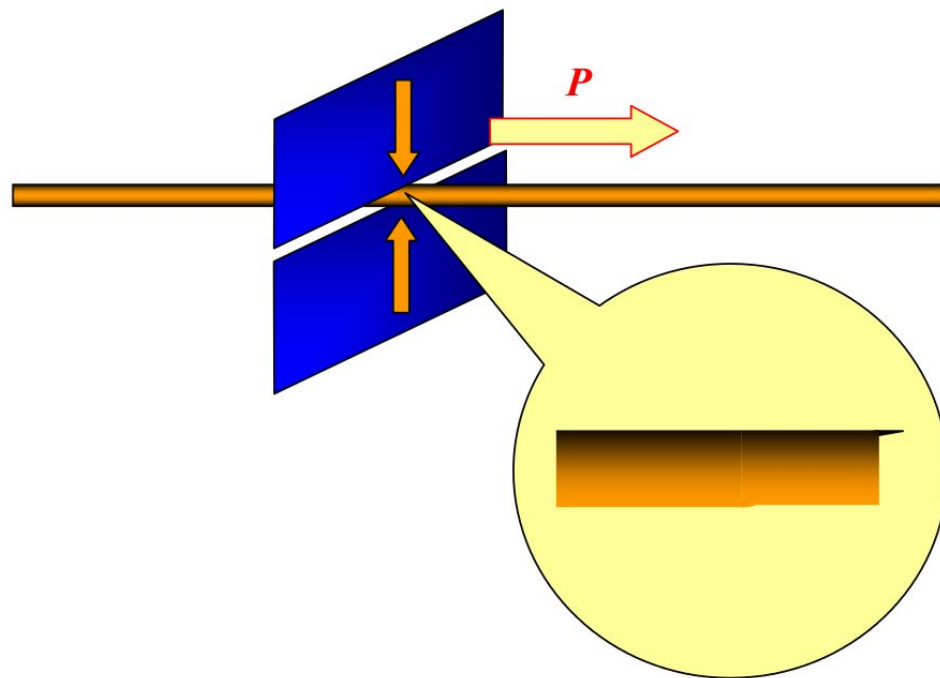
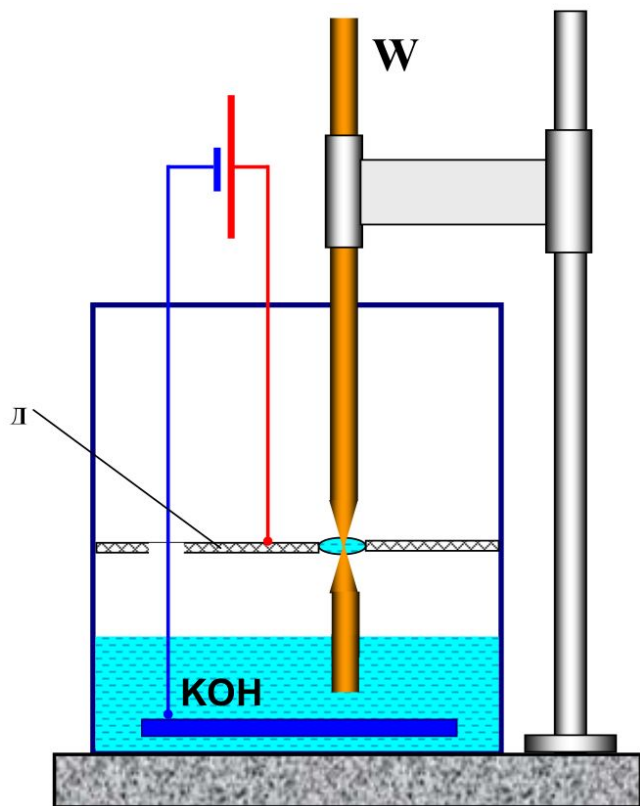


2. Режим постоянной высоты





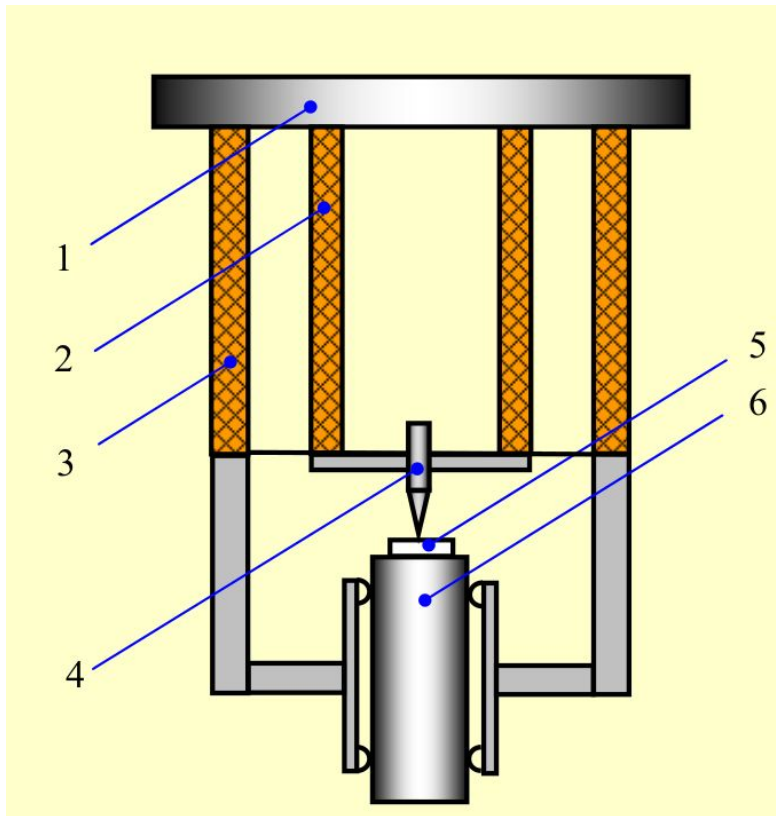
Зонды для туннельных микроскопов





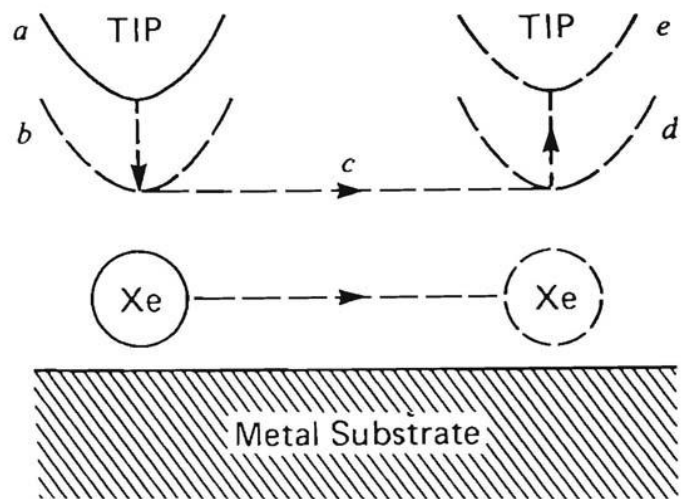
Процесс рассекания - растяга при обрезании иглы

Конструкция сканирующих туннельных микроскопов



Измерительная головка СТМ с компенсацией термодрейфа:

- 1 - основание;
- 2 - трубчатый пьезосканер;
- 3 - компенсирующая пьезотрубка;
- 4 - металлический зонд;
- 5 - образец;
- 6 - цилиндрический держатель образца



Перемещение отдельных атомов ксенона вдоль поверхности с помощью иглы СТМ

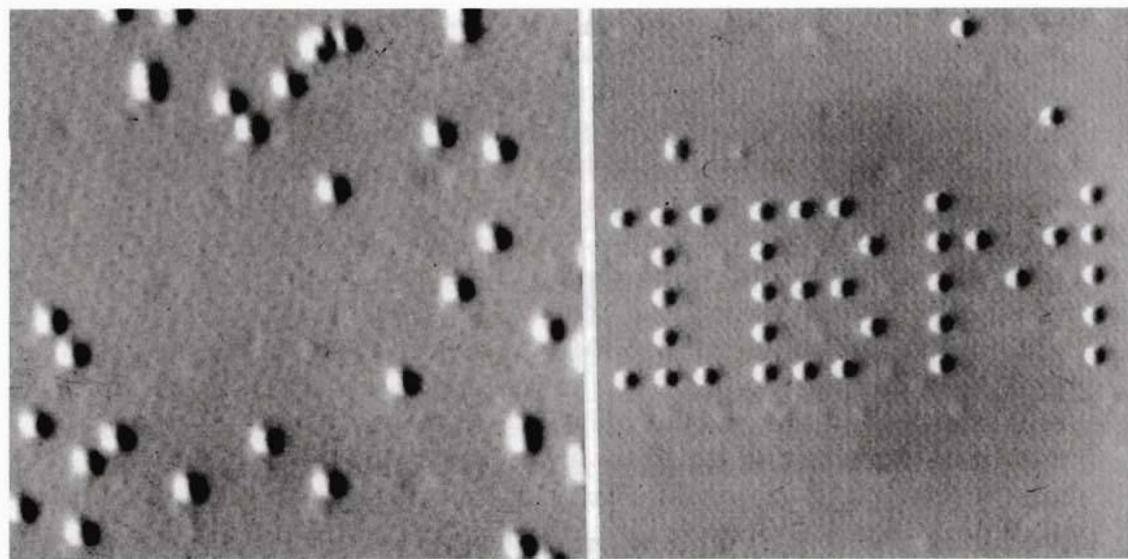
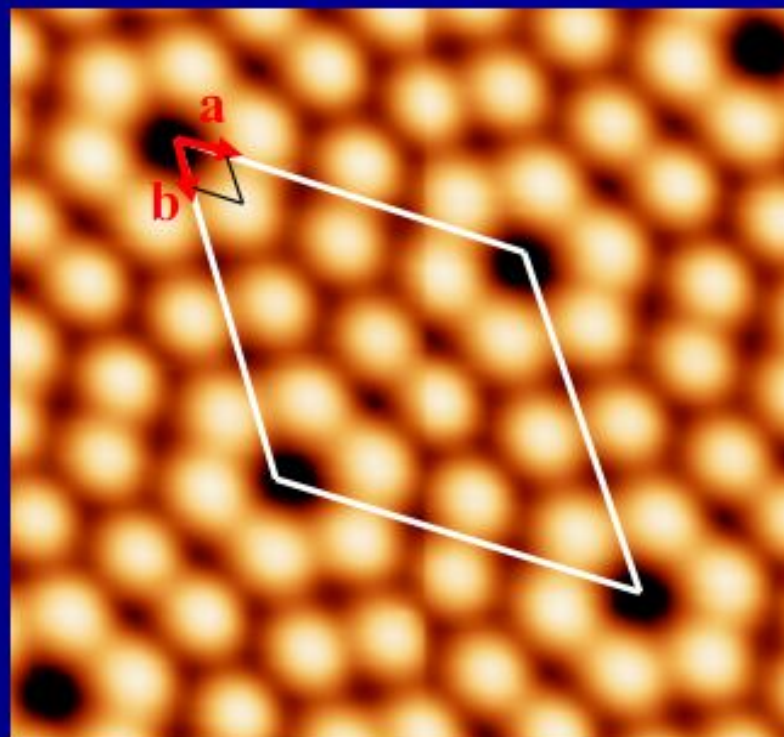
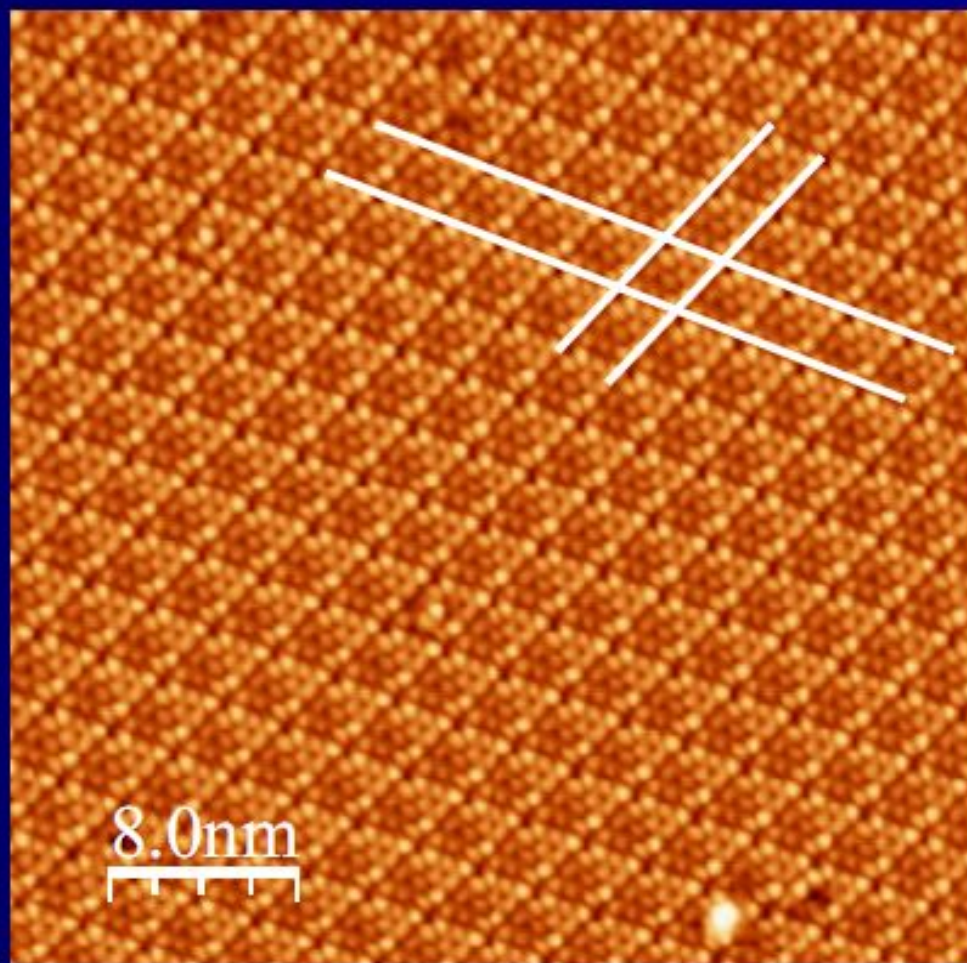


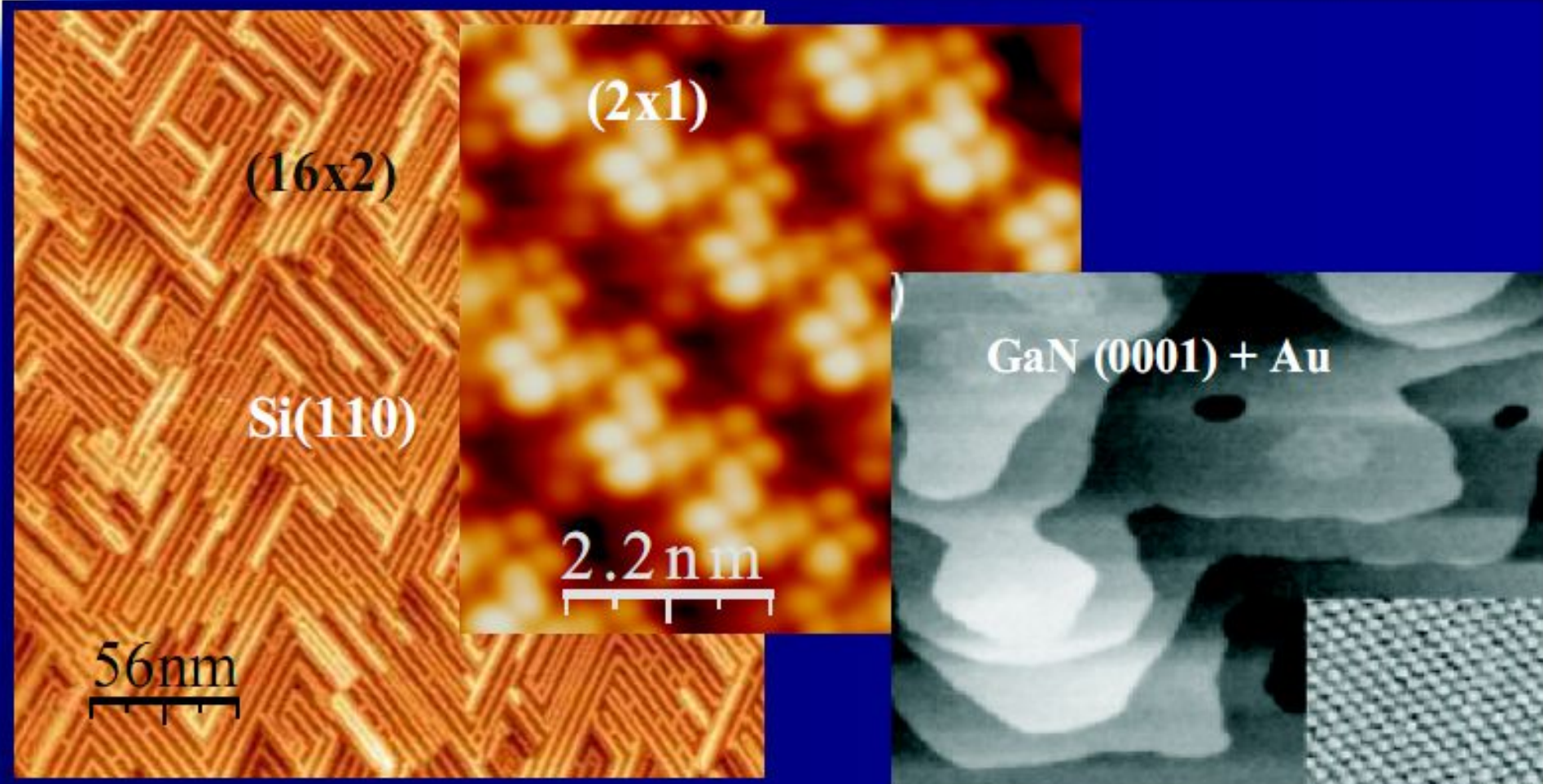
Fig. 8.2. Two pictures from a sequence of STM images taken during the construction of a patterned array of xenon atoms on a nickel (110) surface. Gray scale is assigned according to the slope of the surface. **(a)** The surface after xenon dosing, showing randomly arranged xenon atoms. **(b)** Final pattern after the atoms had been ordered into letters, 5 nm in size from top to bottom. From [8.15]

Структура поверхности Si (111) 7x7



СТМ/СТС диагностика поверхностных атомных структур

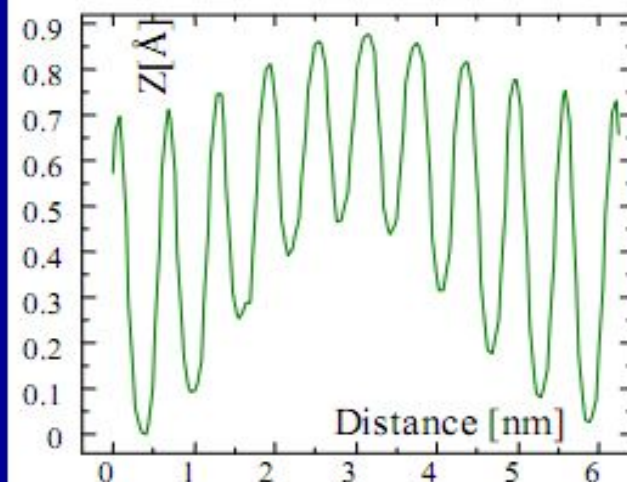
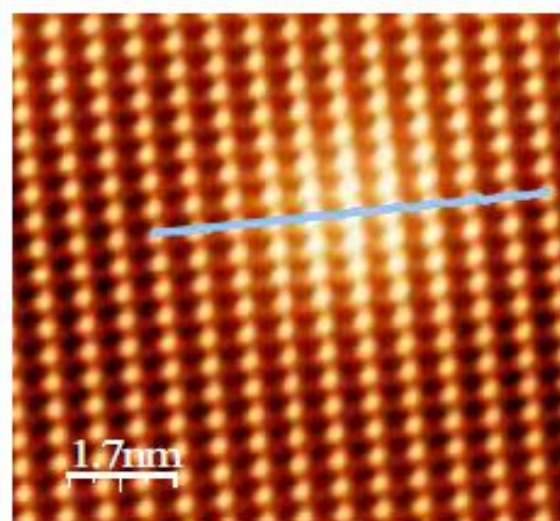
(Структура доменов и доменных границ на реконструированной поверхности Si(110))



СТМ/СТС диагностика поверхностных атомных структур

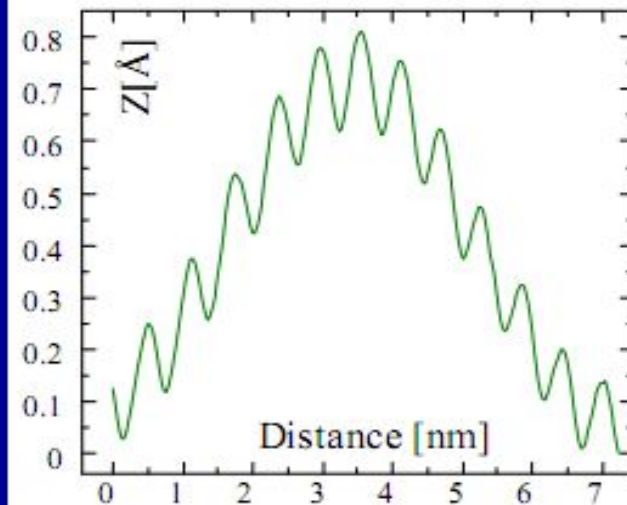
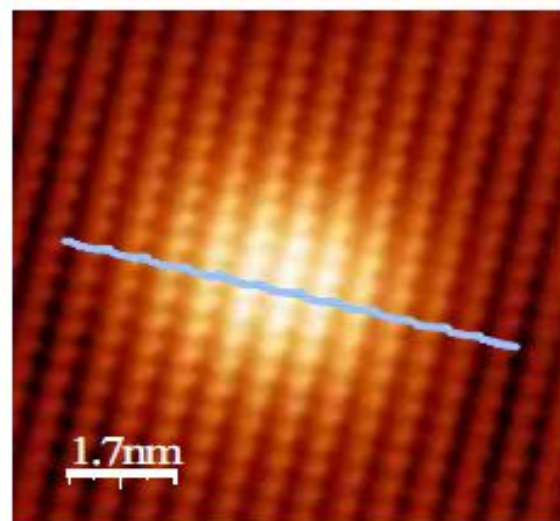
СТМ изображение
примесного атома
S на поверхности
InAs

$U = -1,1\text{В}; I = 30\text{пА}$

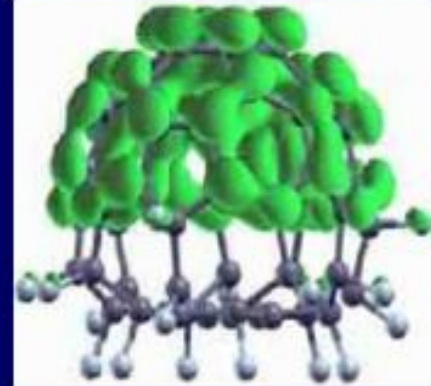


СТМ изображение
примесного атома
Mn на
поверхности InAs

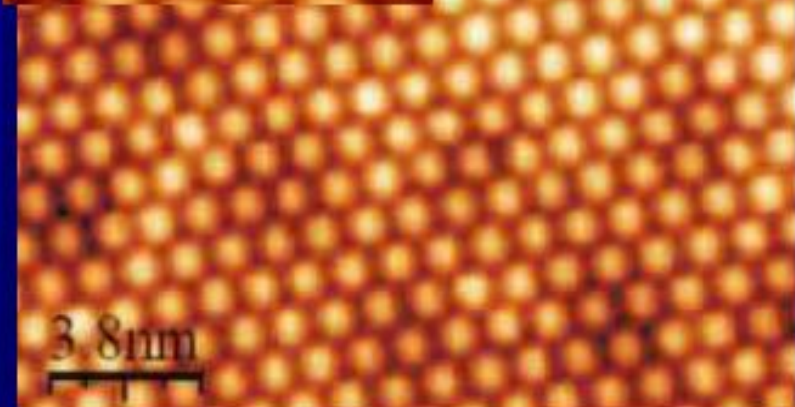
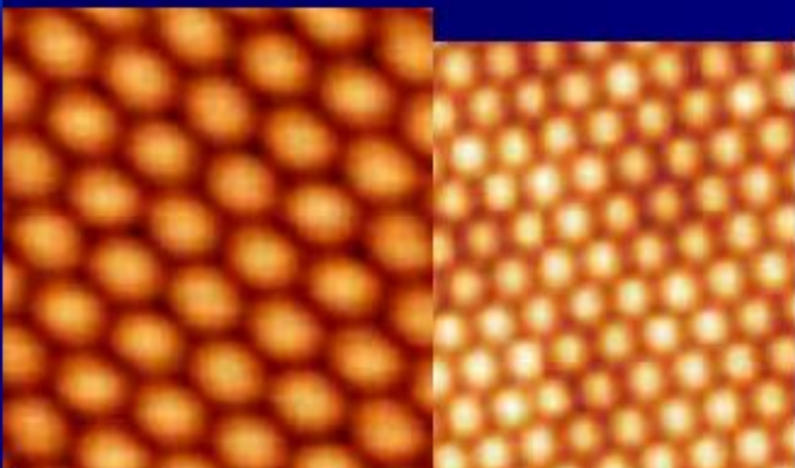
$U = +0,8\text{В}; I = 30\text{пА}$



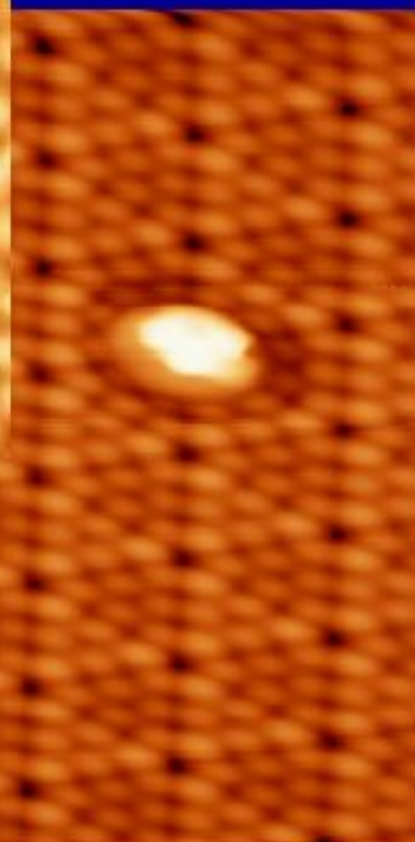
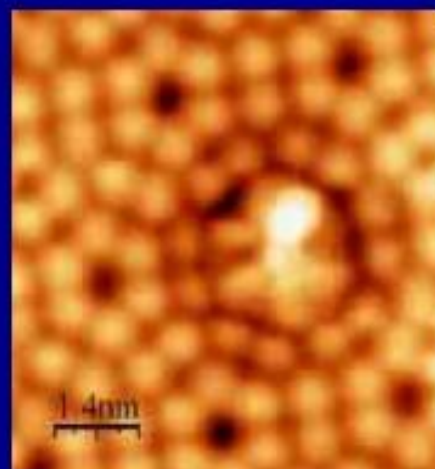
СТМ изображение углеродных молекул на поверхности Si(111)-7x7



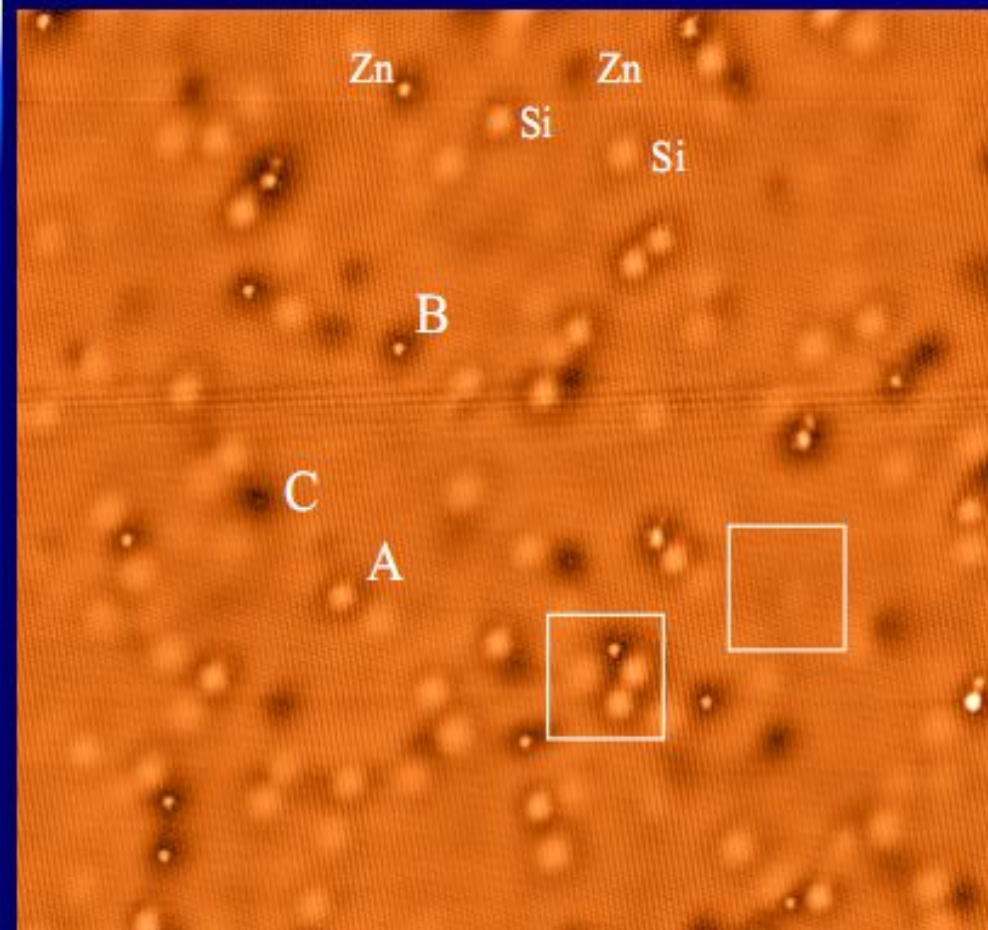
C₆₀ на Si(111)-7x7



C₆₀F_x



Диагностика атомных примесей на поверхности полупроводника (GaAs + Si-Zn)



Si - donor, $N_D = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Zn - acceptor, $N_A = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

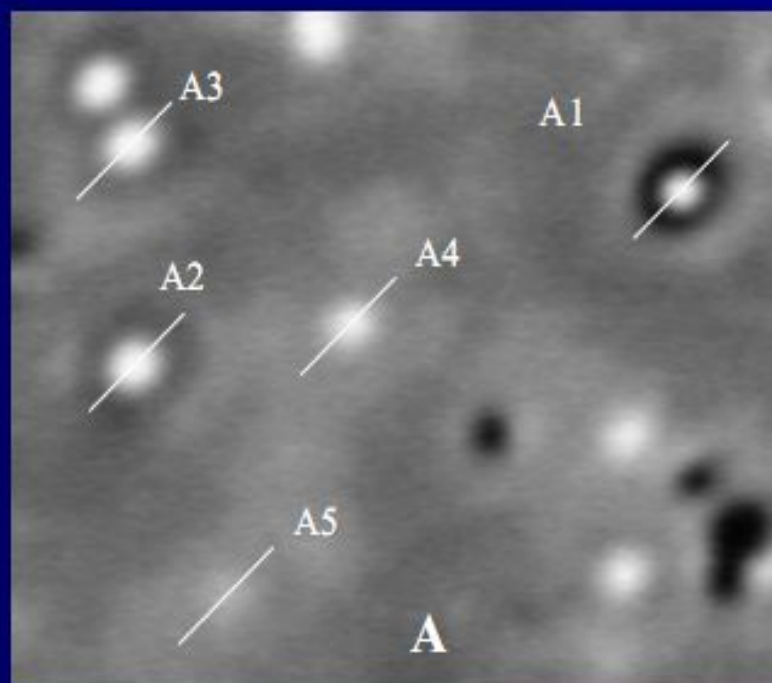
Распределение допирующих атомов Si и Zn вдоль поверхности и по глубине залегания.

СТМ изображение получено при 4.2K на поверхности (110). Наблюдаются три типа «дефектов» А, В и С. Контраст соответствует вертикальному размеру 0.5 nm.

$U_{\text{tip}} > 0$; 80 x 80 nm;

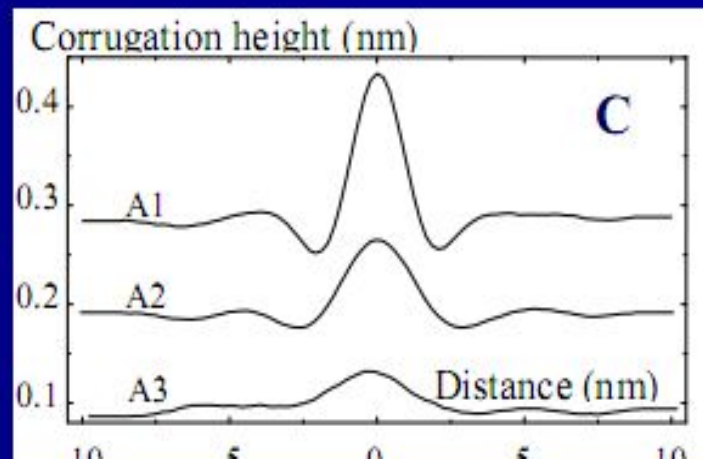
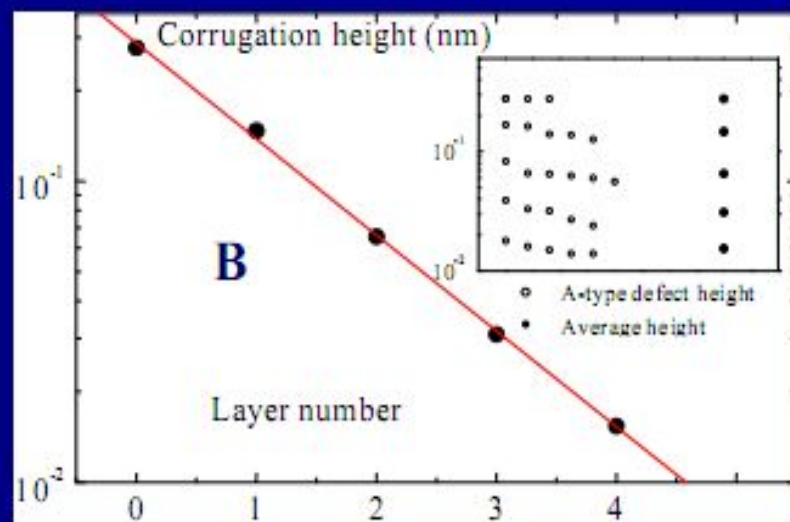
СТМ\СТС диагностика атомных примесных состояний

Зависимость изображения атомов примеси на поверхности полупроводника (GaAs + Te) от глубины залегания (нанотомография)

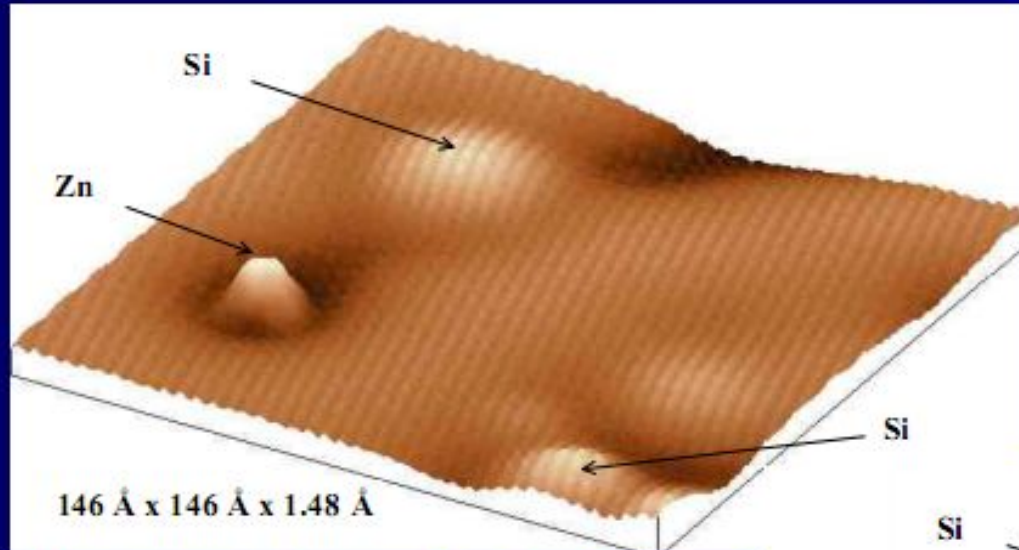


$V_{TIP} = + 1.5 \text{ V}; \quad 40 \times 40 \text{ nm}$

СТМ изображение атомов примеси на поверхности

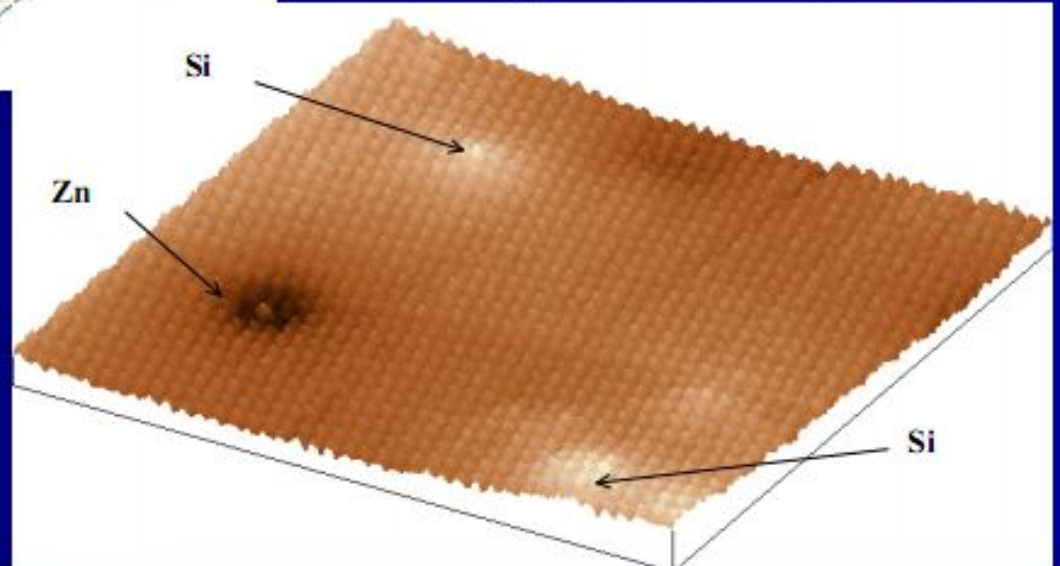


Зависимость СТМ изображения примесей от V_t (GaAs/Si-Zn)



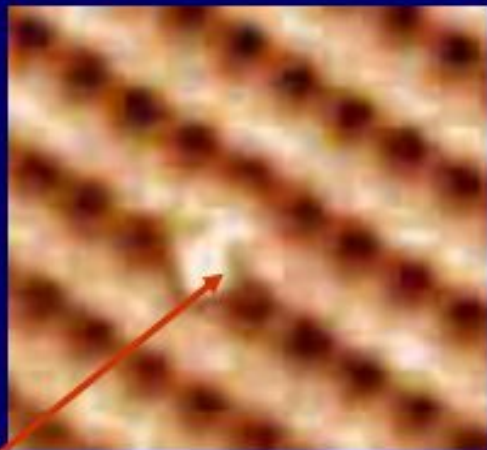
$U_{tlp} < 0; 14.6 \times 14.6 \text{ nm}^2$

$U_{tlp} > 0; 14.6 \times 14.6 \text{ nm}^2$



СТМ диагностика гибридных орбиталей примесных атомов на поверхности

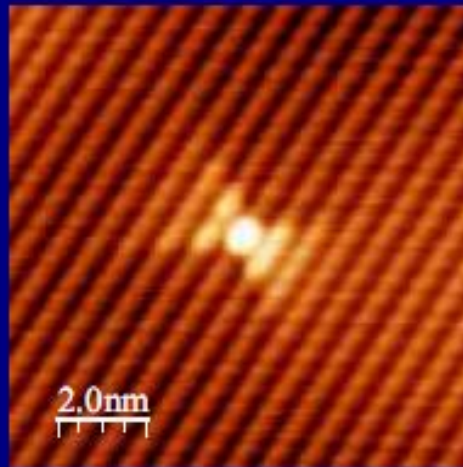
$V_{tip} = + 1.05V$



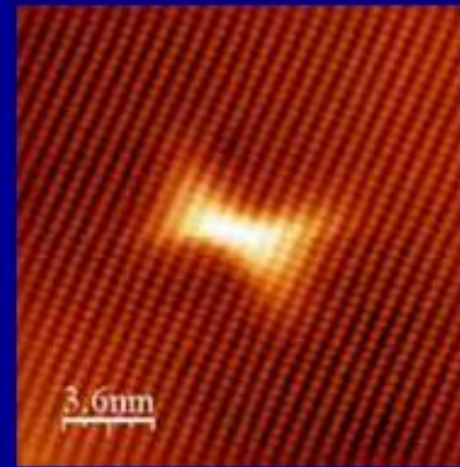
Атом Cr замещает атом As на поверхности InAs(110). Вытянутая форма орбитали оборванной связи Cr с размером $0.5 - 0.6 \text{ nm}$ указывает на присутствие d-электронного состояния.

СТМ изображения орбиталей примесных атомов на поверхности InAs (110)

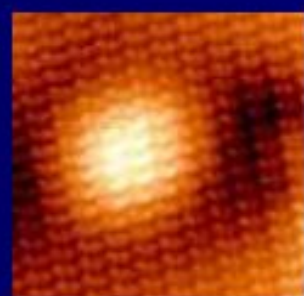
Sn



Mn

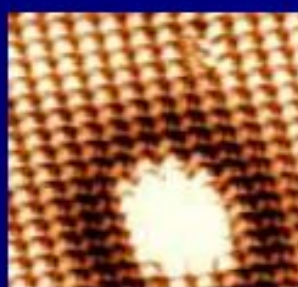


СТМ/СТС идентификация единичных атомов примеси в полупроводнике: GaAs

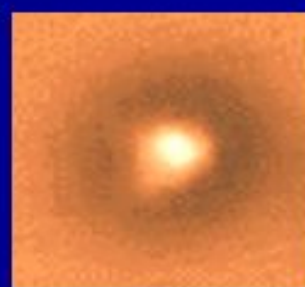


Si

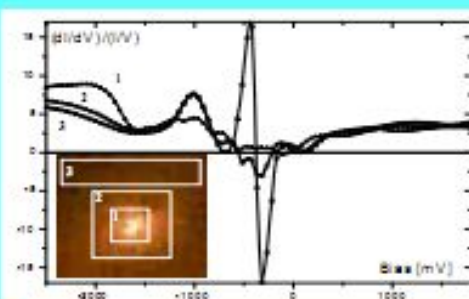
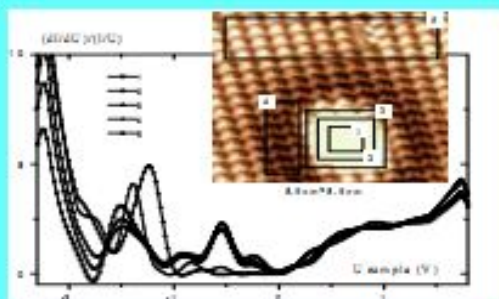
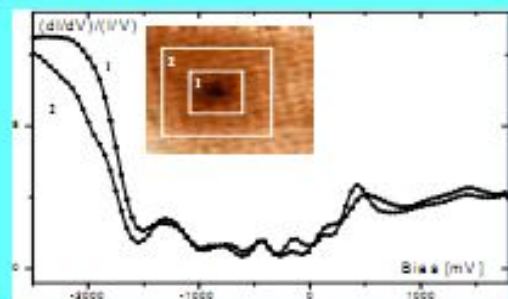
6 nm



Te



Zn

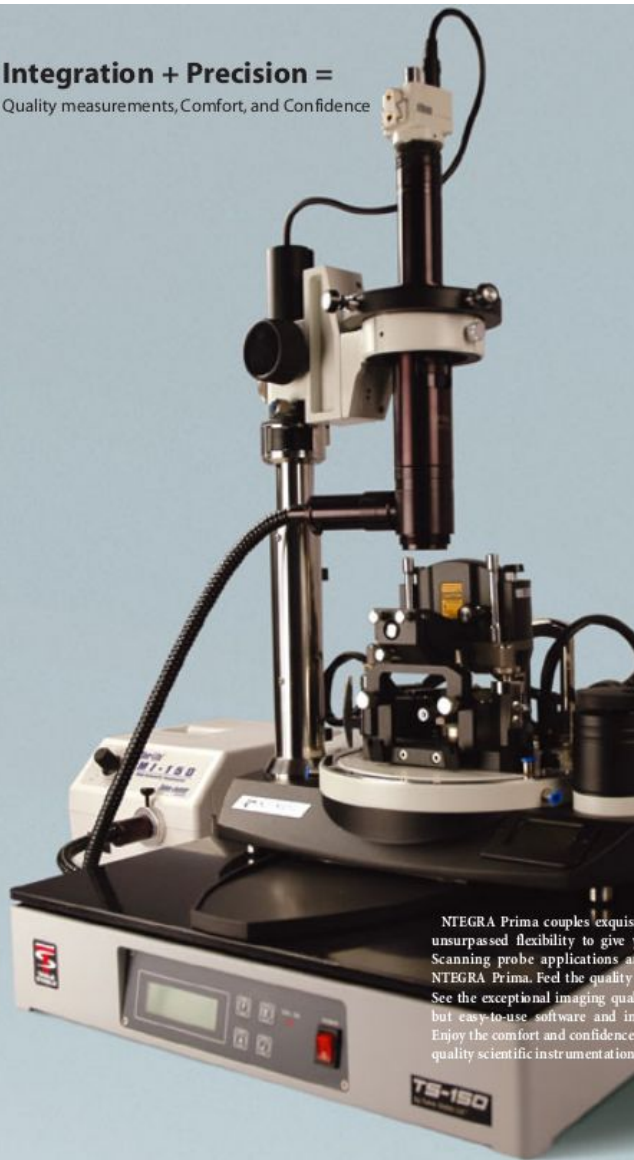


Каждый атом примеси имеет свой (свойственный только этому атому) спектр туннельной проводимости на поверхности полупроводника.

Аппаратная реализация

Integration + Precision =

Quality measurements, Comfort, and Confidence



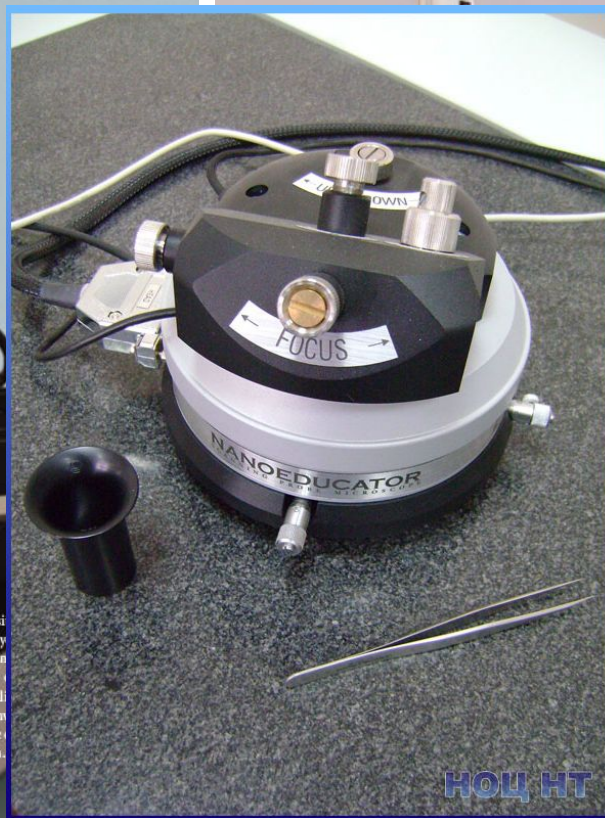
NTEGRA Prima couples unsurpassed flexibility to give you scanning probe applications an NTEGRA Prima. Feed the quality. See the exceptional imaging quality but easy-to-use software and enjoy the comfort and confidence quality scientific instrumentation.

Chemistry + Structure = New Insights

What mysteries of nature will you uncover?



Award Winner
2006



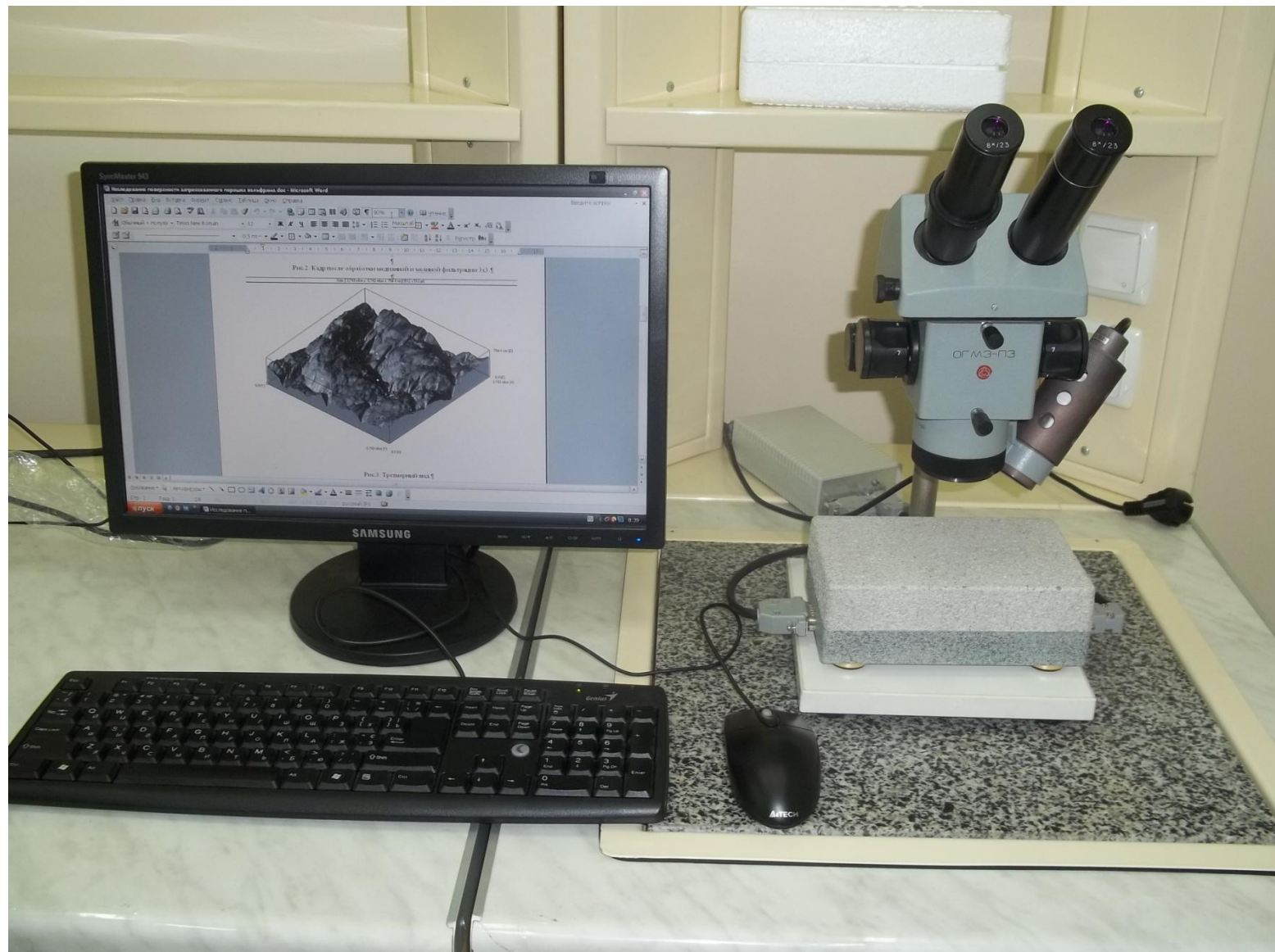
НОЦ НТ



A swirl of light, a swoosh of color, the fine point of an SPM scan. NTMDT designers anticipate "what's next" in your analytical thinking, giving you the power of chemistry to your SPM analyses. Correlate molecular structure and physical parameters. Detect changes and responses with a new vision. NTEGRA Spectra. Unlocking the mysteries of chemistry, structure, and function.



Мультимикроскоп СМС - 2000 в НИЛ ПФИНТЭ





Вышло так, что высокие параметры микроскопа было достигнуто только при высочайшем качестве применяемых компонентов и материалов, а также только при предельной просчитанности, лаконичности и простоте его конструкции. Микроскоп состоит всего из 15 деталей. Это дало новое качество микроскопа, которого нет ни у одного микроскопа в мире - его, как в конструкторе ЛЕГО, может собрать любой студент и школьник, и тут же получить на нем кадры

