

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ В ИССЛЕДОВАНИИ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

МОДУЛЬ 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

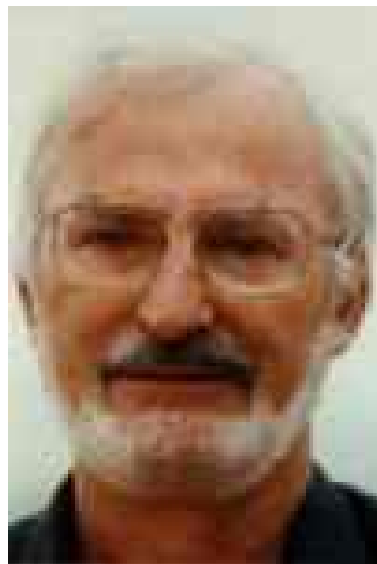
Лекция 8.

Сканирующая зондовая микроскопия. Принцип получения изображений. СТМ - измерения в режимах постоянного тока и постоянной высоты. Контактный, бесконтактный и полуконтактный режимы работы АСМ. Потенциал Леннарда-Джонса. Преимущества и недостатки сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии. Границы применения.

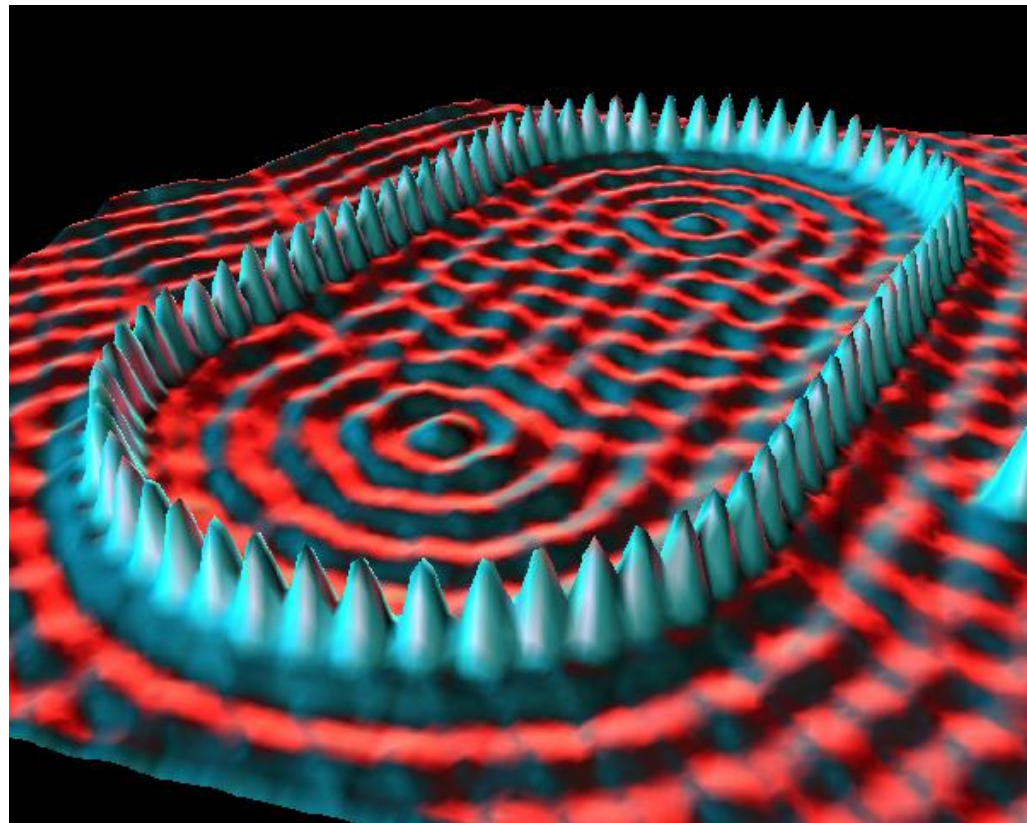
Введение



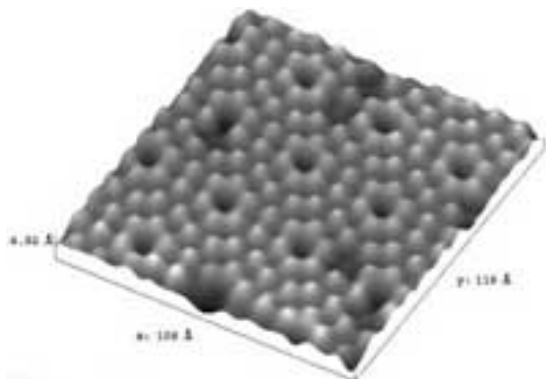
Г. Бинниг



Х. Рорер



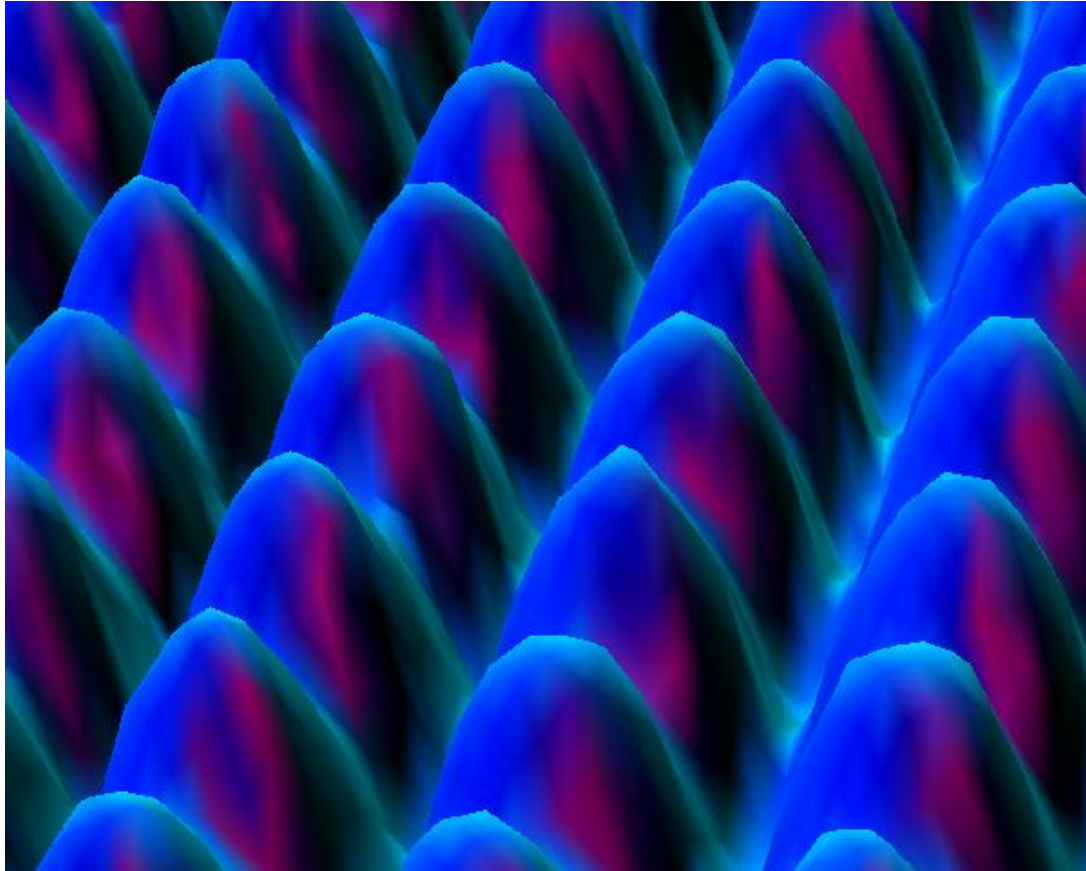
СТМ-изображение атомов железа на поверхности Cu (111)



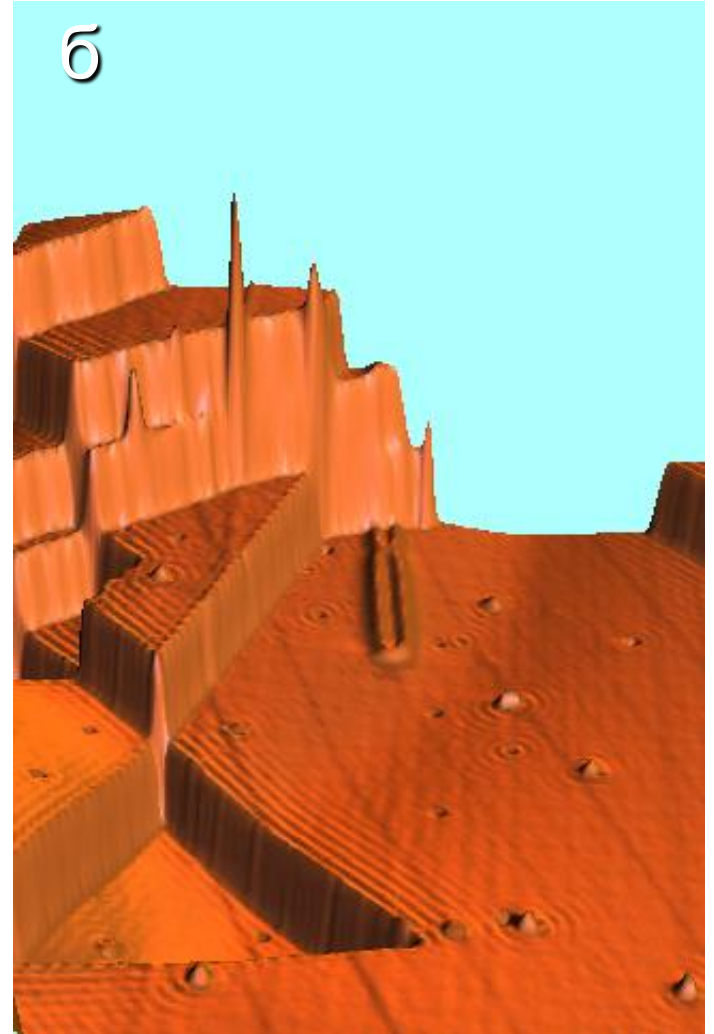
СТМ-изображение поверхности монокристалла Si

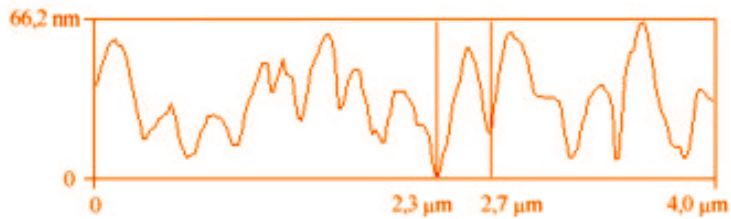
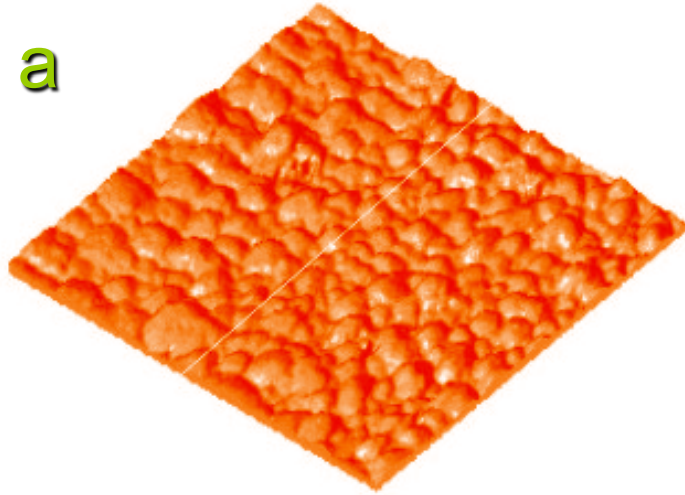
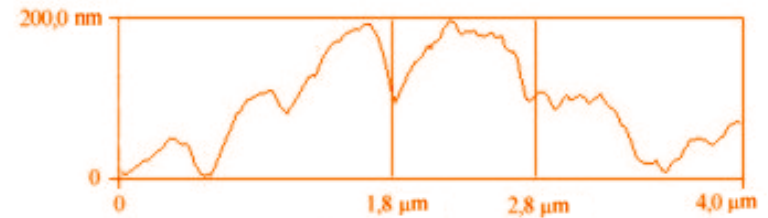
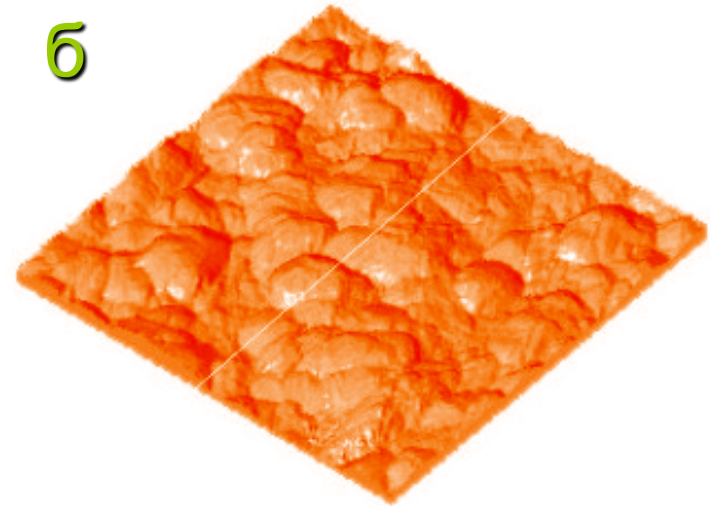
3D СТМ-изображения поверхностей $Ni(110)$ (а) и $Cu(111)$ (б)

а

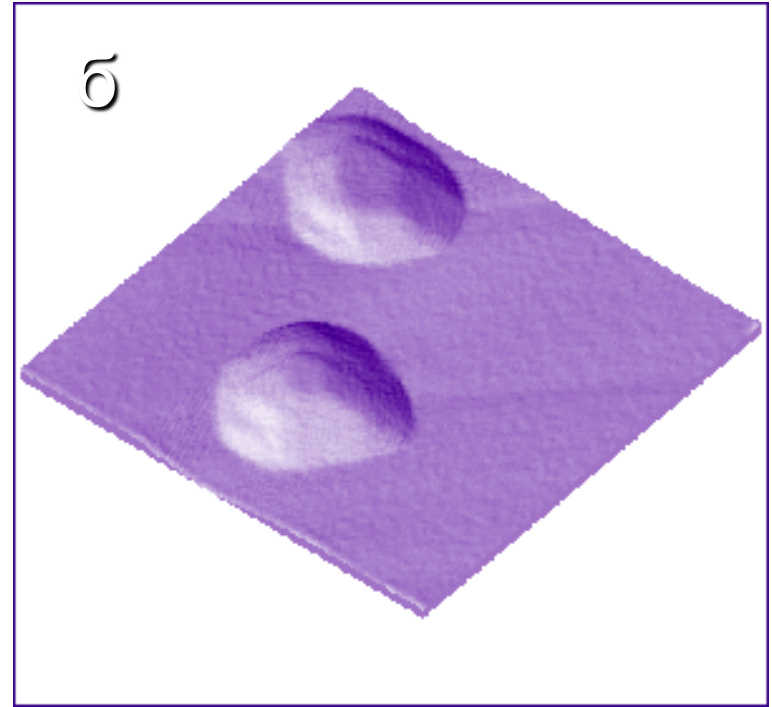
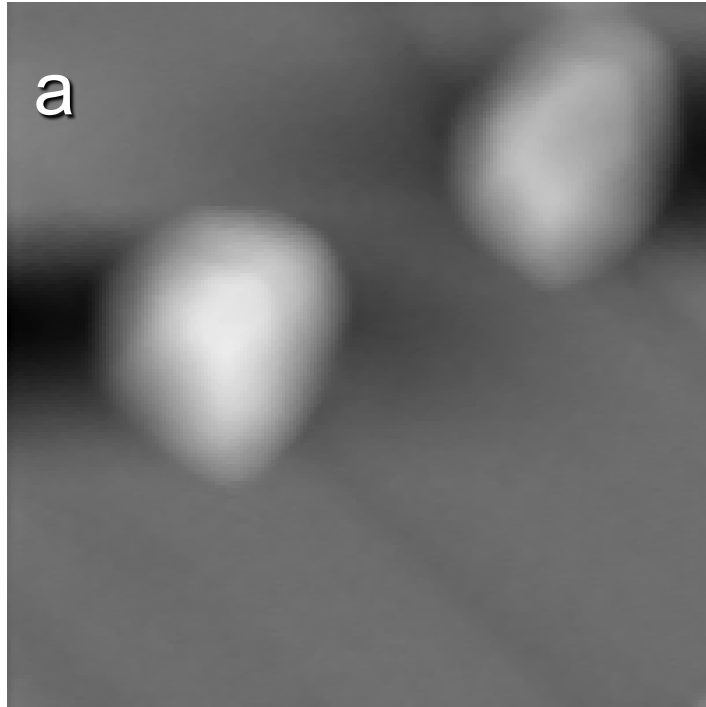


б



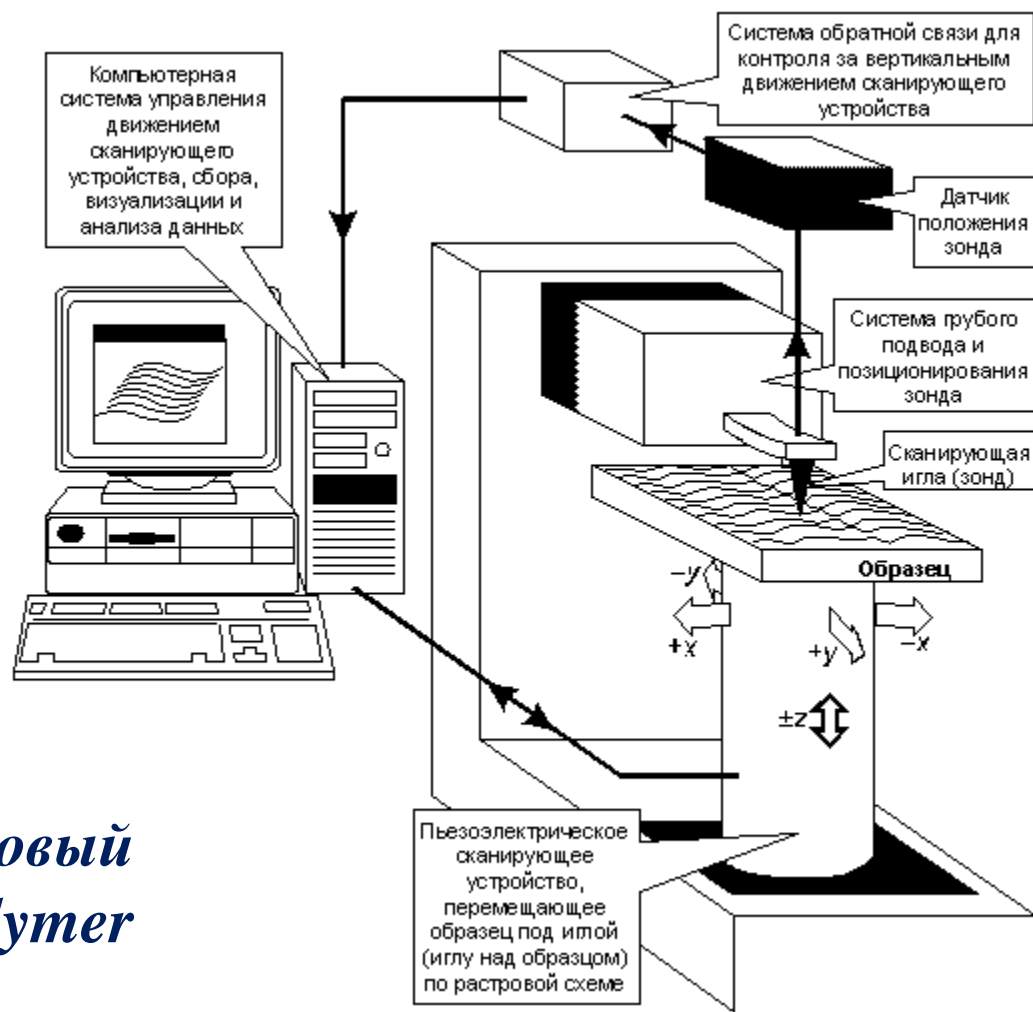
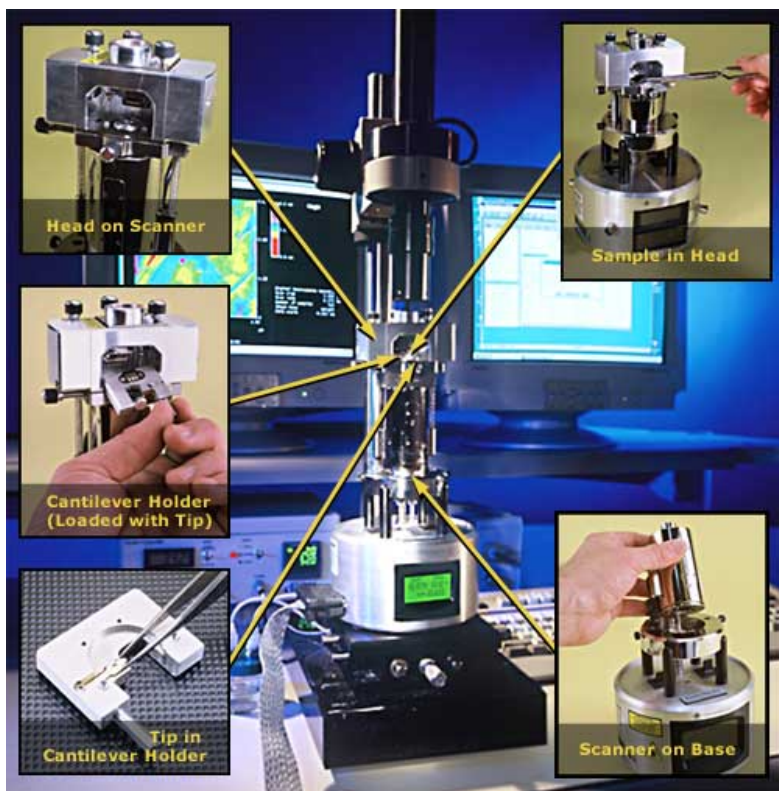
а**б**

СТМ-изображения пленок Si осажденных на подложку SiO₂/Si при температурах $T_s=180$ (а) and 200 (б) °C. Размер изображений $4,0 \times 4,0$ мкм²



2D (а) и 3D (б) АСМ-изображения nanoостровков Ge на подложке Si(211) после нанесения 6 ML. Размер изображений 1,0 · 1,0 мкм²

Общая схема сканирующего зондового микроскопа



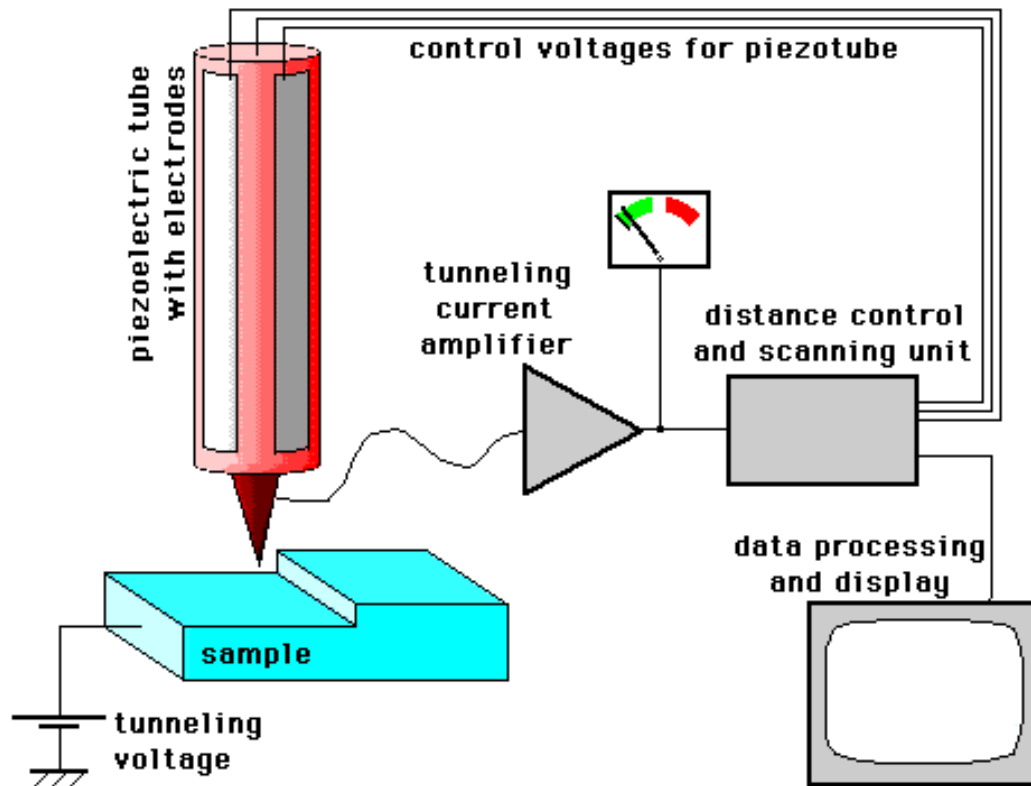
Сканирующий зондовый микроскоп Multi Mode Polymer (Digital Instruments, USA)

Основные типы сканирующих зондовых микроскопов

- *Сканирующий туннельный микроскоп (СТМ)*
- *Атомно-силовой микроскоп (АСМ)*
- *Латерально-силовой микроскоп (ЛСМ)*
- *Магнитный силовой микроскоп (МСМ)*
- *Электростатический силовой микроскоп (ЭСМ)*
- *Сканирующий термальный микроскоп (СТерМ)*
- *Ближнепольный сканирующий оптический микроскоп (БСОМ)*

Сканирующий туннельный микроскоп

Сканирующий туннельный микроскоп

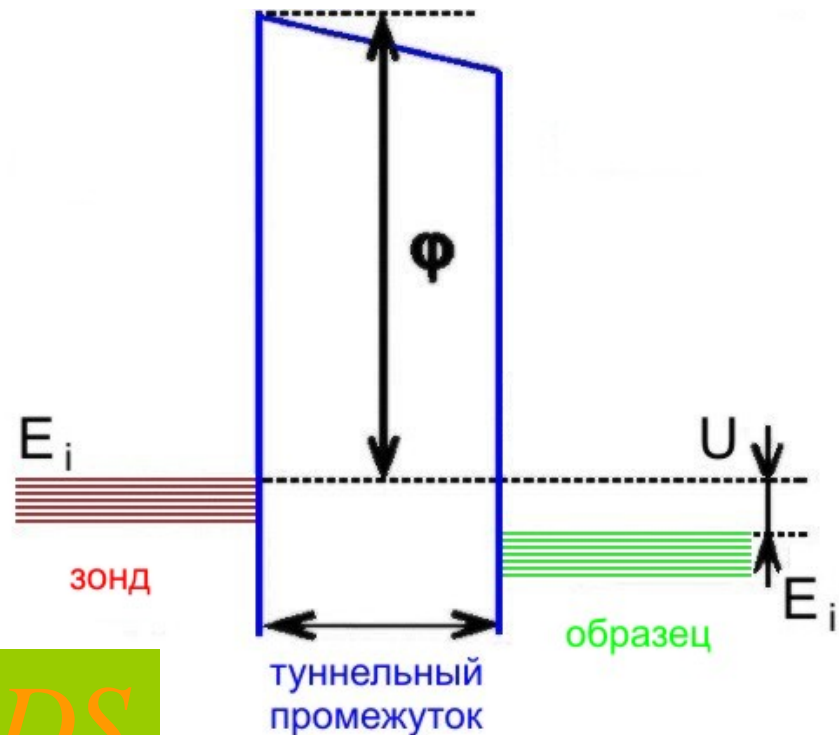
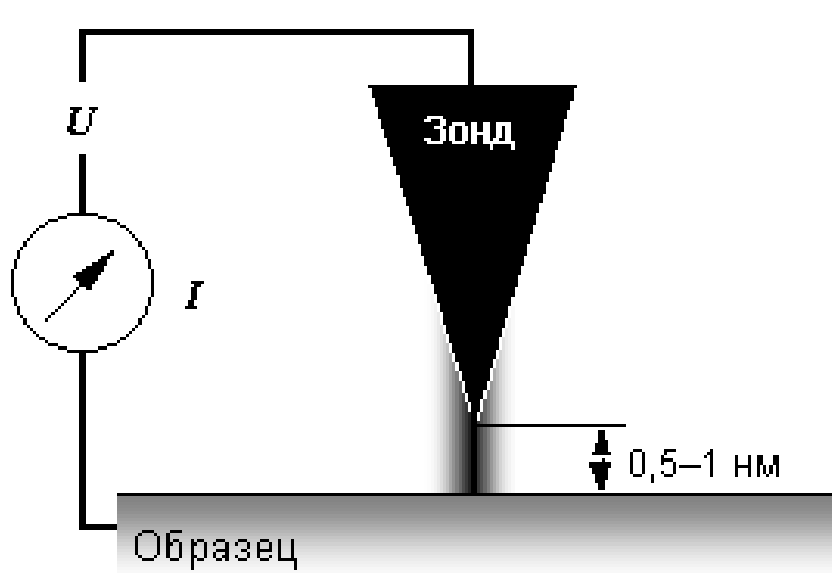


How an STM works ...

© Michael Schmid
Institut f. Allgemeine Physik
TU Wien 1997-2002

Общая схема работы сканирующего туннельного микроскопа

Сканирующий туннельный микроскоп



Туннельный ток:

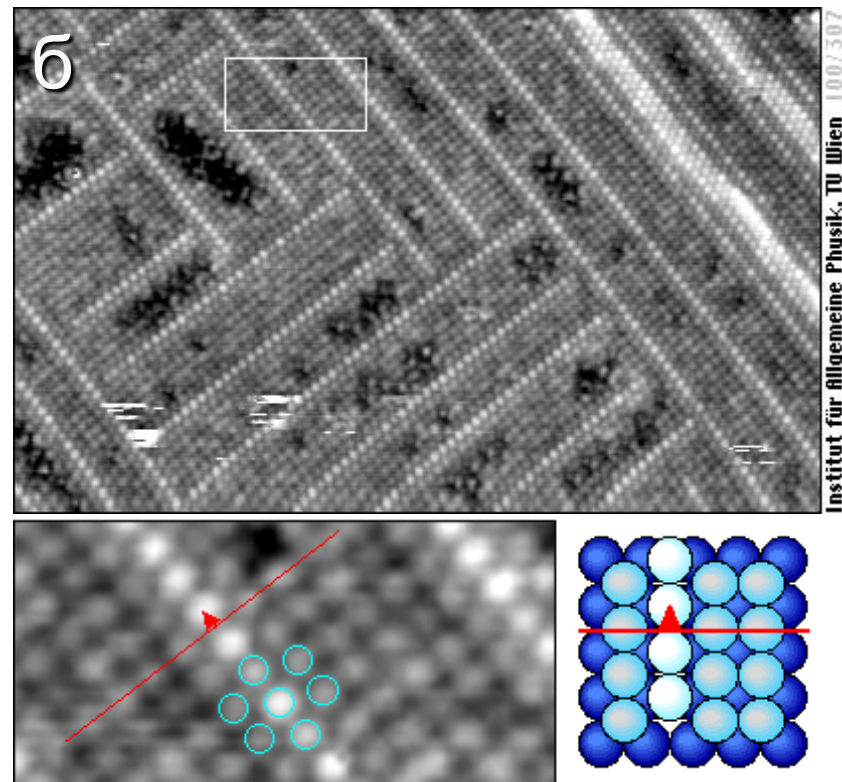
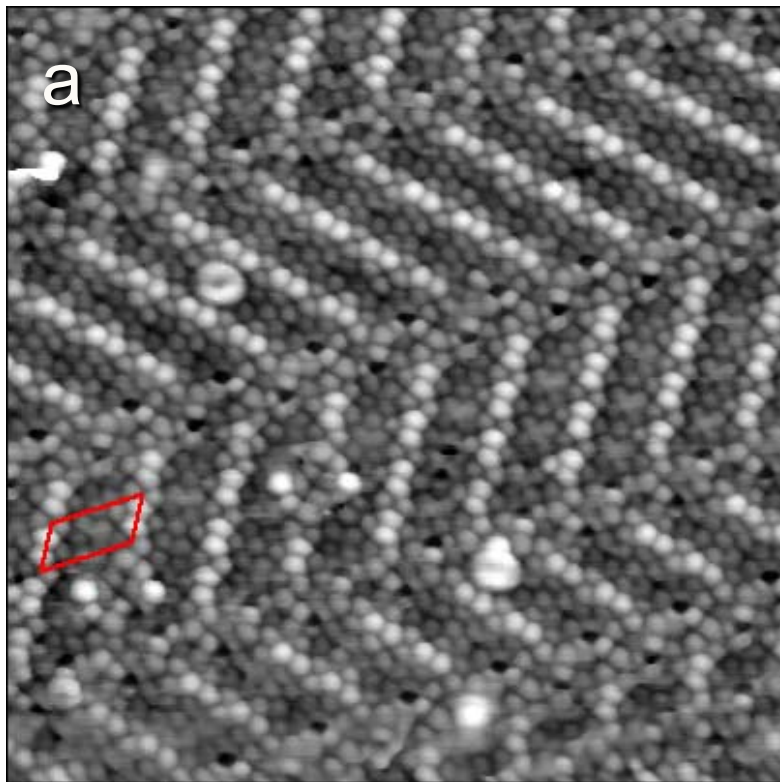
$$I_t \approx envDS$$

Вероятность туннелирования:

$$D \approx e^{-2k_0z}$$

$$k_0 = \sqrt{\frac{2m\Phi}{\hbar^2}}$$

Сканирующий туннельный микроскоп



**СТМ-изображения поверхности пленок:
(а) - Cr (110); (б) - PtNi (100)**

Сканирующий туннельный микроскоп

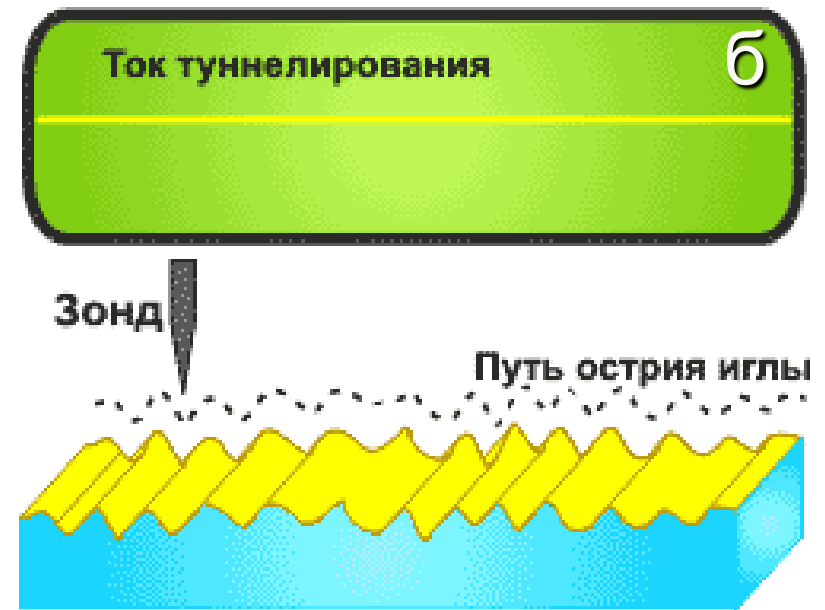
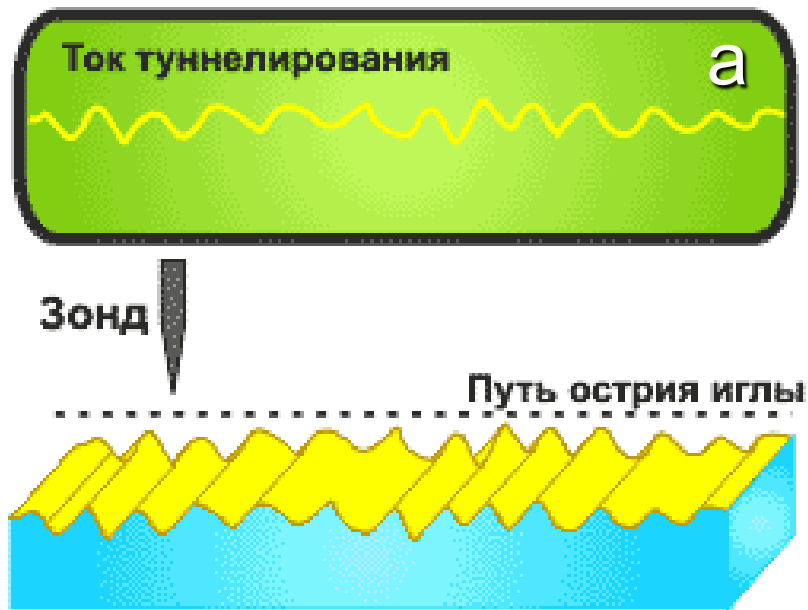


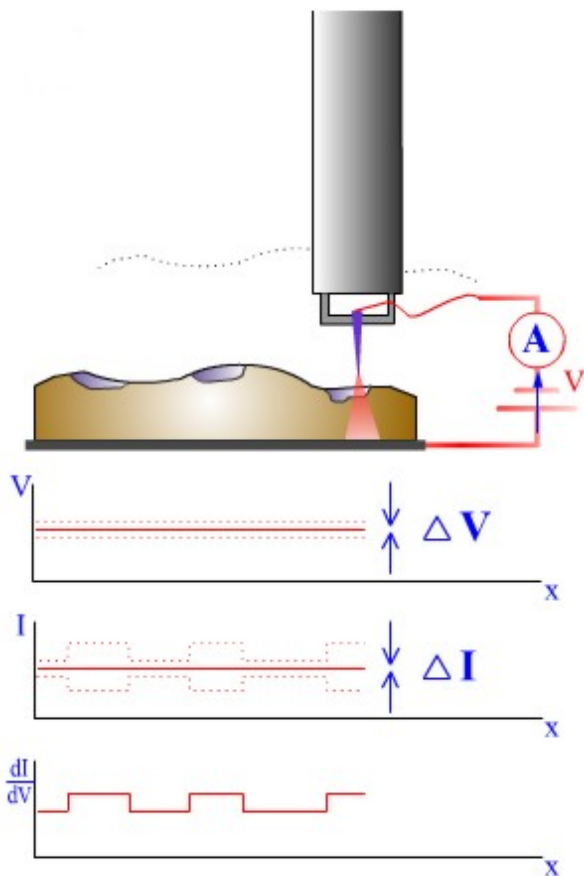
Схема работы СТМ:

а – в режиме постоянной высоты;

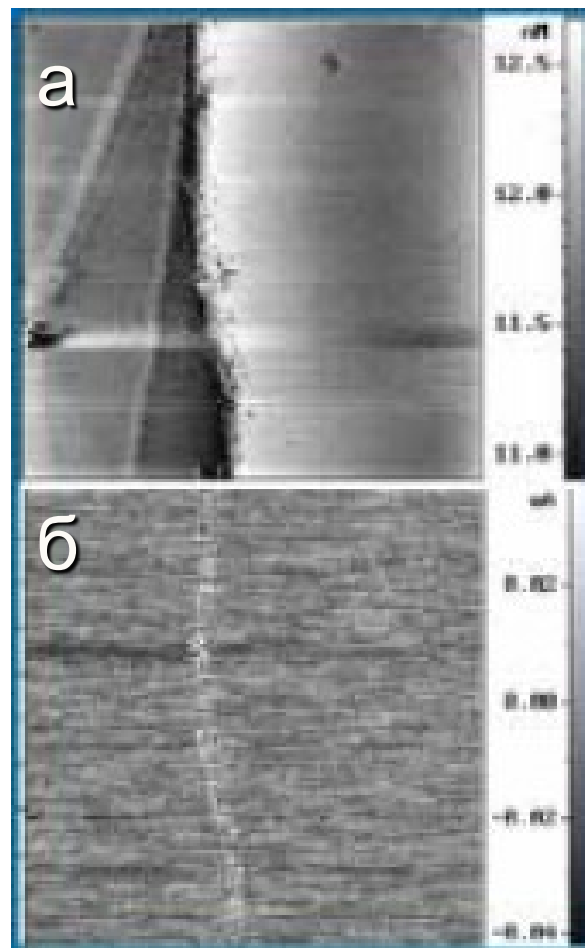
б – в режиме постоянного тока

Сканирующий туннельный микроскоп

Слева - работа СТМ в режиме СТС

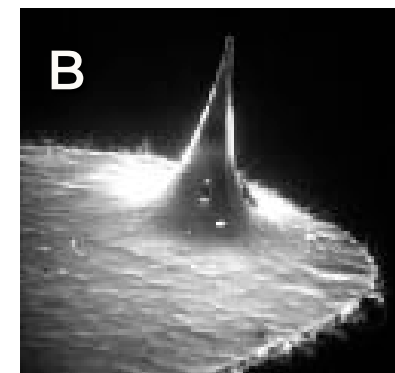
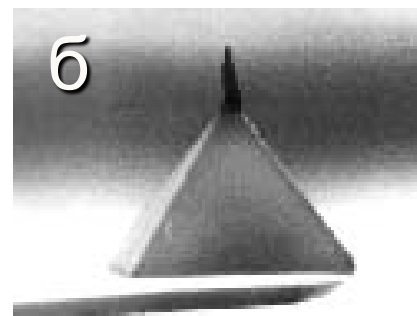
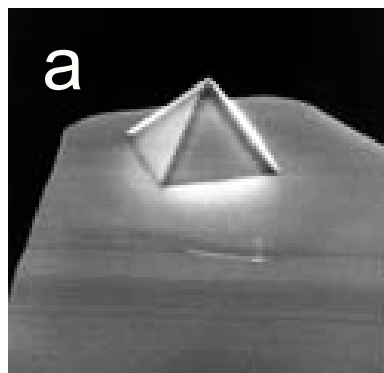
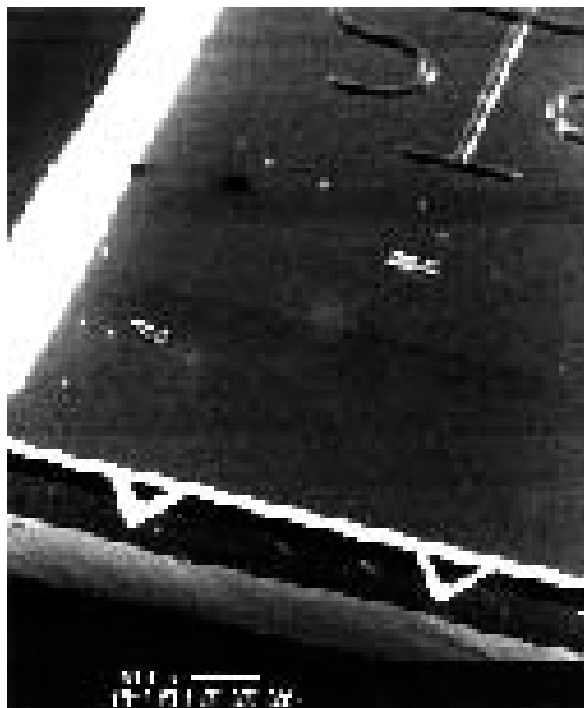


Справа - (а) СТМ-изображение поверхности графита (ВОПГ); (б) Одновременно полученное изображение распределения локальной плотности состояний (ЛПС)



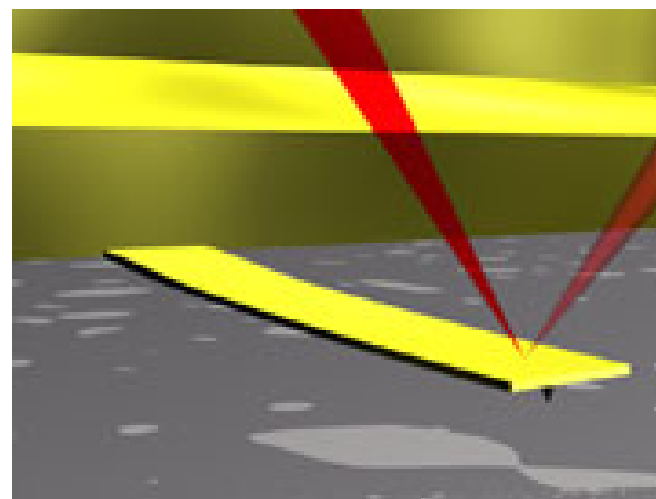
Атомно-силовой микроскоп

Атомно-силовой микроскоп



Различные типы игл АСМ: (а) “normal tip”, (б) “supertip”, (в) “ultralever”

Кантилевер V-образной формы длиной 100 мкм (Park Scientific Instruments, USA)



Атомно-силовой микроскоп

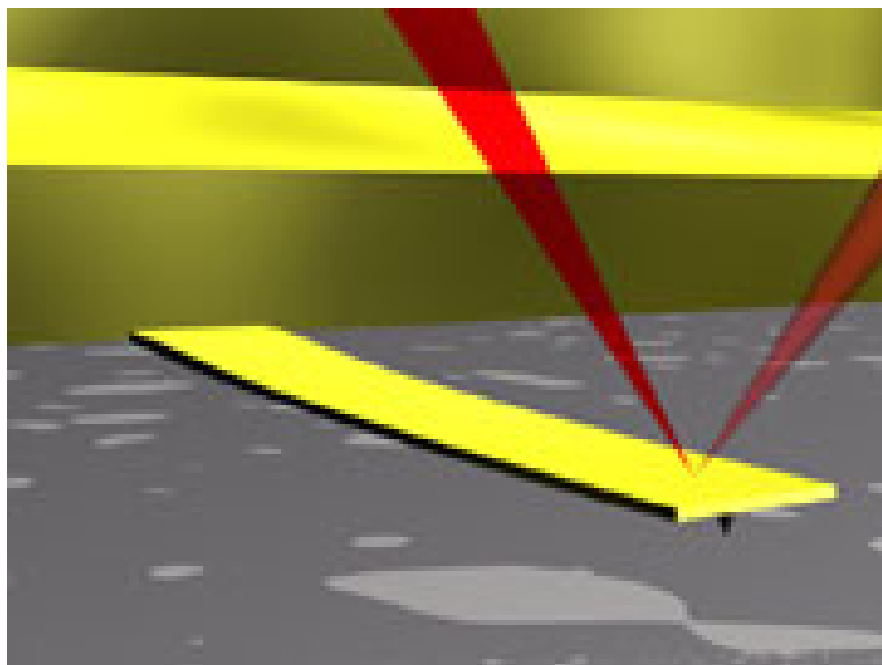
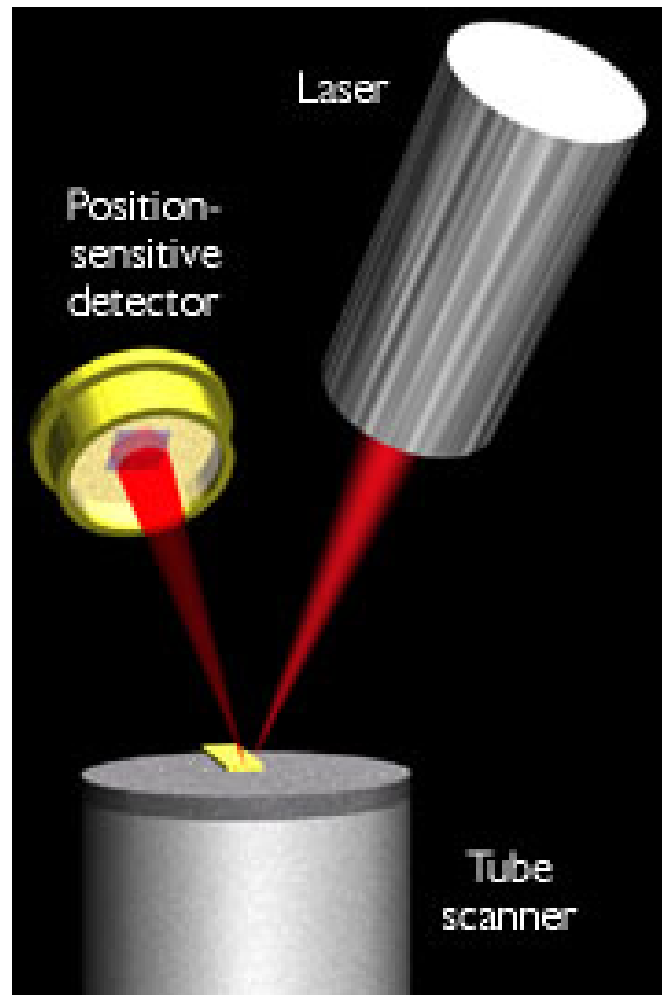
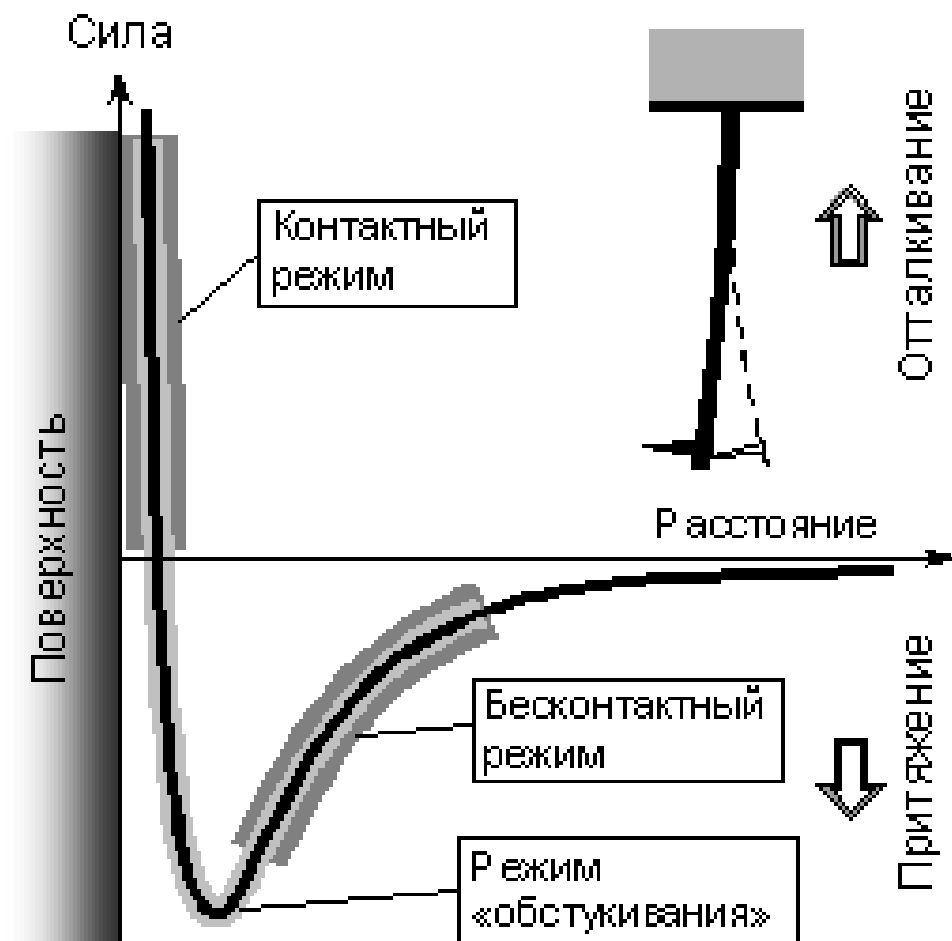


Схема работы атомно-силового микроскопа



Атомно-силовой микроскоп



Зависимость силы межатомного взаимодействия от расстояния между острием АСМ и образцом

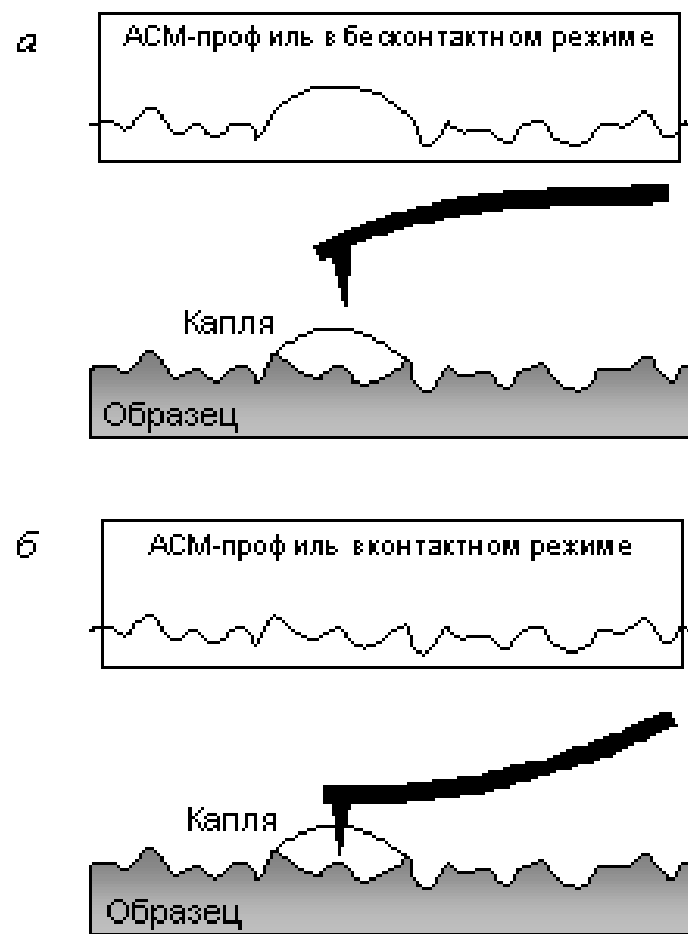


Схема работы АСМ: а – в бесконтактном режиме; б – в контактном режиме

Атомно-силовой микроскоп

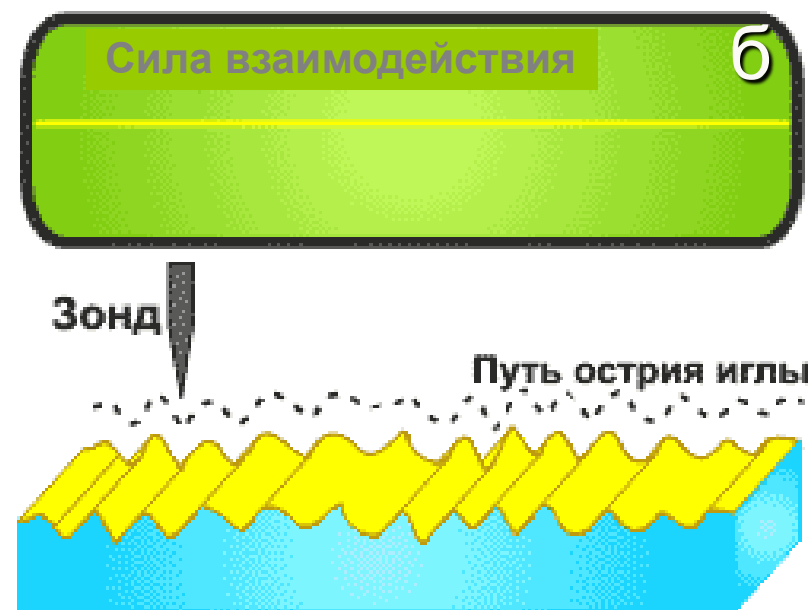
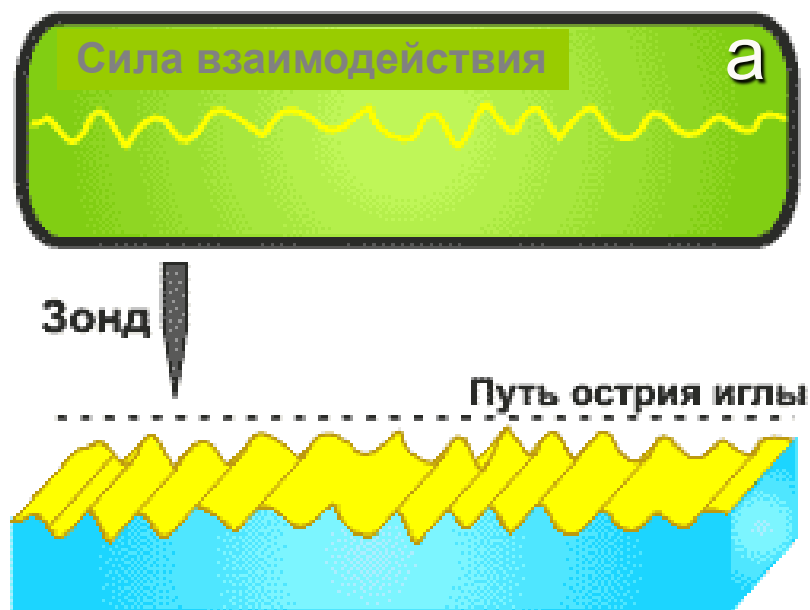


Схема работы АСМ (статический режим):

а – в режиме постоянной высоты;

б – в режиме постоянной силы

Атомно-силовой микроскоп

Режимы работы АСМ:

Контактный:

- статический/режим “обстукивания”;
- воздушный/жидкостный.

Бесконтактный:

- статический/динамический;
- постоянной высоты/
постоянной силы.

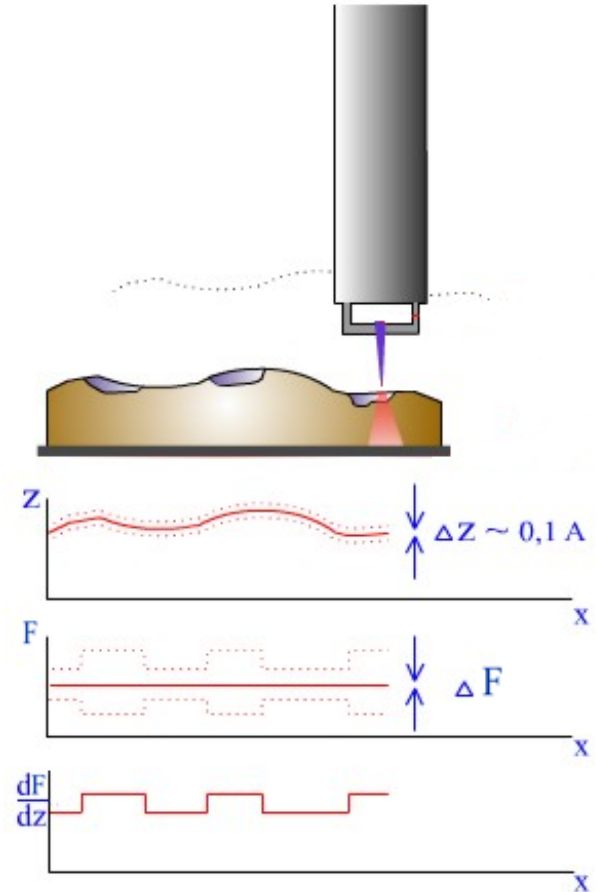
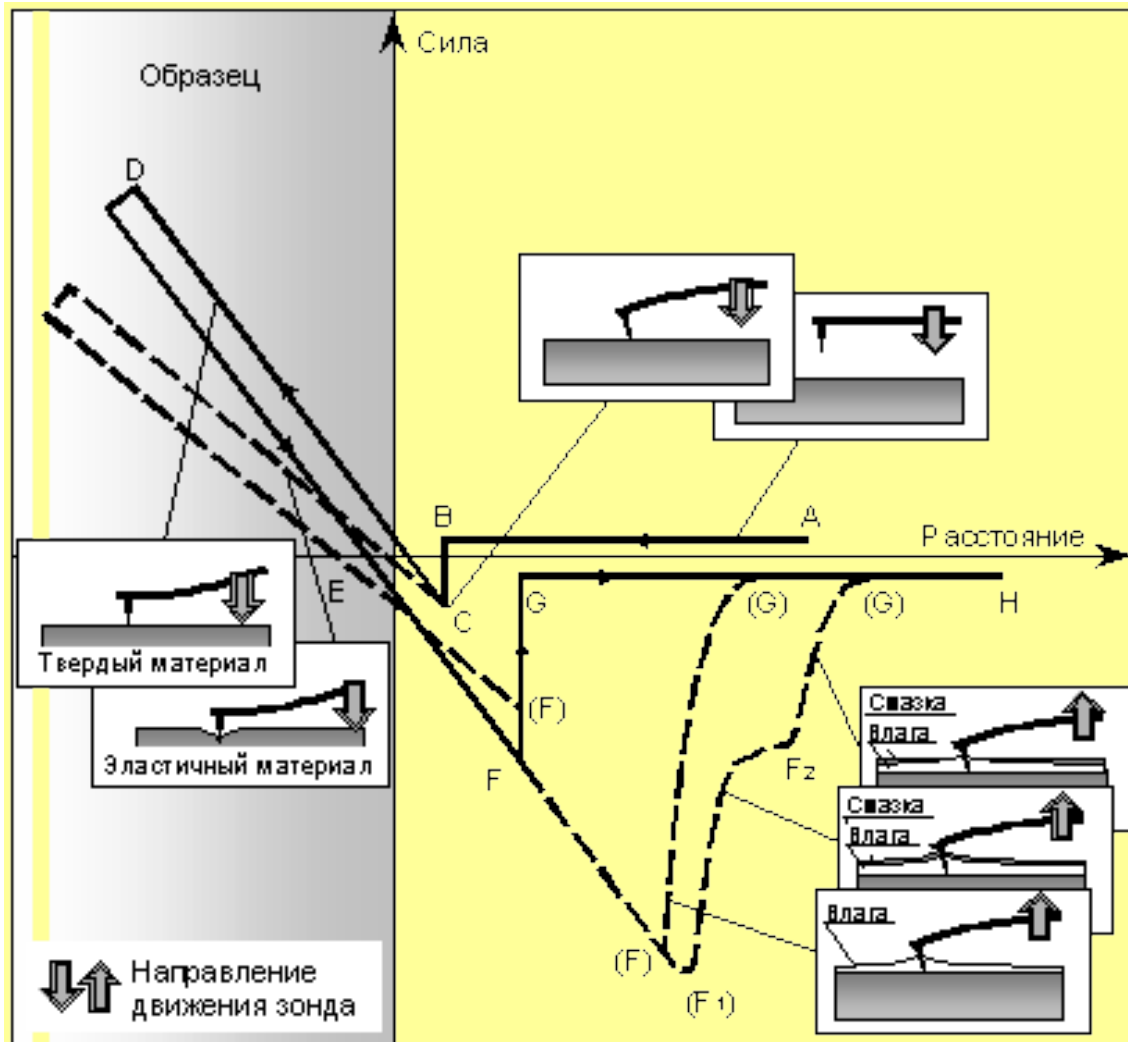


Схема работы АСМ в динамическом режиме

Режим работы атомно-силового микроскопа

		Статический	Динамический
Контактный	+	Высокое латеральное разрешение. Возможность определять деформацию в системе острие – поверхность.	Возможность определять площадь контакта или модуль упругости. Высокое силовое разрешение ($\sim 1 \times 10^{-12}$ Н). Незначительный темпе
	-	Возможно повреждение поверхности. Низкое силовое разрешение ($\sim 1 \times 10^{-9}$ Н). Подверженность температурному дрейфу.	Возможно повреждение поверхности. Модуляция нарушает адгезионное взаимодействие между острием и поверхностью.
Бесконтактный	+	Работа без повреждения поверхности.	Работа без повреждения поверхности. Высокое силовое разрешение. Незначительный температурный дрейф.
	-	Низкое силовое и пространственное разрешение. Подверженность температур	Низкое пространственное разрешение (~ 10 нм).

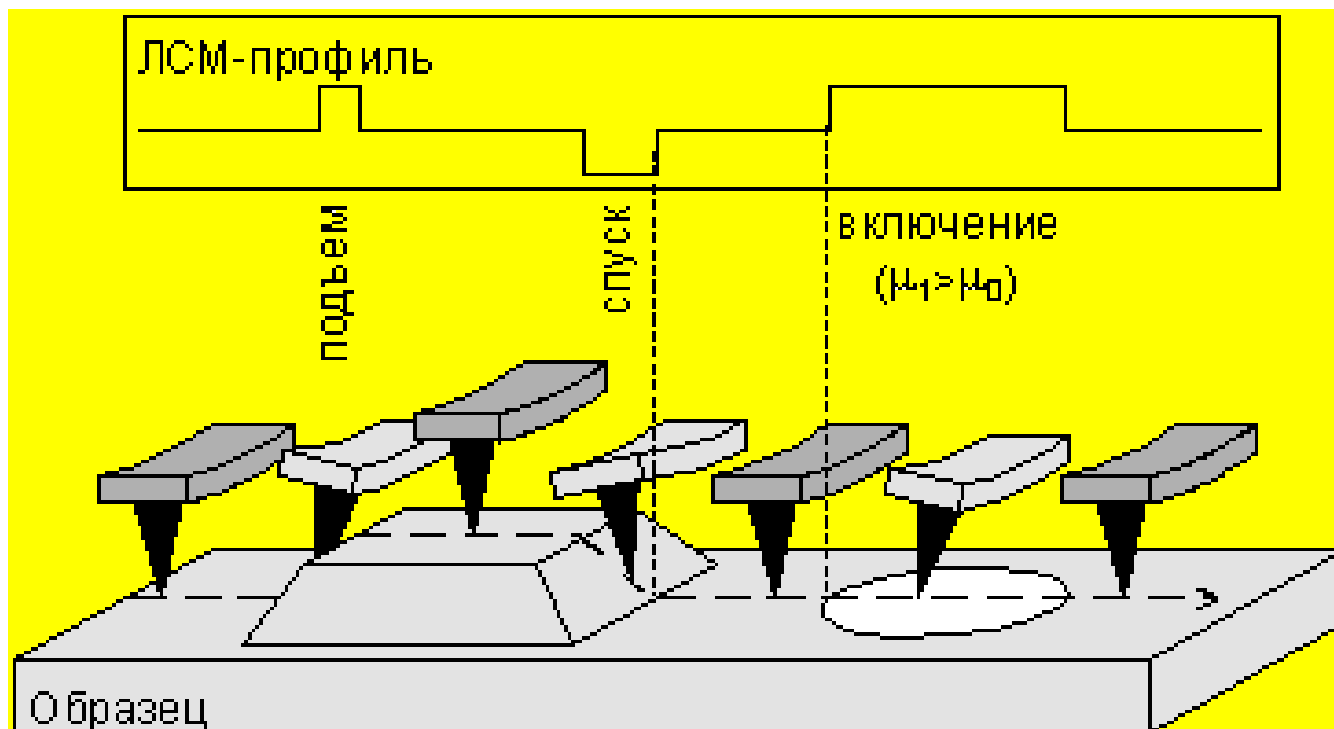
Атомно-силовой микроскоп



Номограмма кривых подвода/отвода. Сплошной линией схематически показана кривая, получаемая в вакууме. Пунктирными линиями отмечены вариации кривой подвода/отвода, обусловленные упругими свойствами образца и наличием на поверхности слоя адсорбированной влаги и загрязнений

Латерально-силовой микроскоп

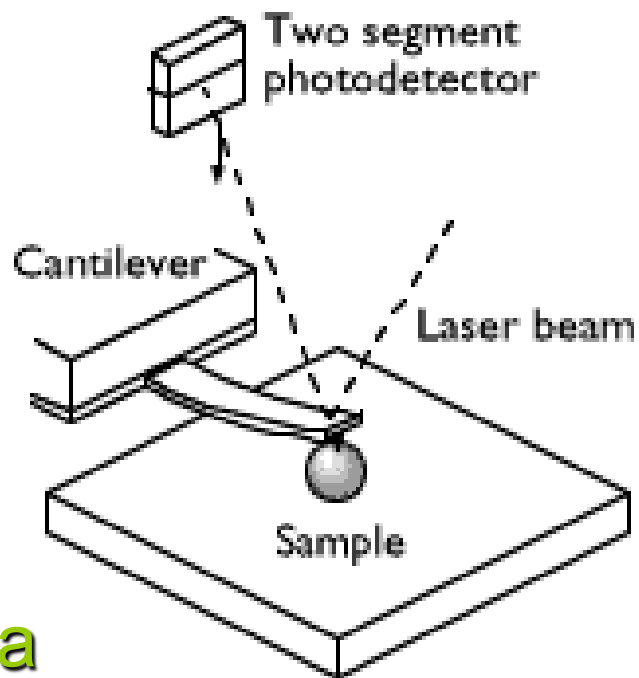
Латерально-силовой микроскоп



ЛСМ-профиль образца, отражающий прохождение сканирующей иглой участков с измененным наклоном поверхности и с отличающимся коэффициентом трения

Латерально-силовой микроскоп

Atomic force microscopy



Frictional force microscopy

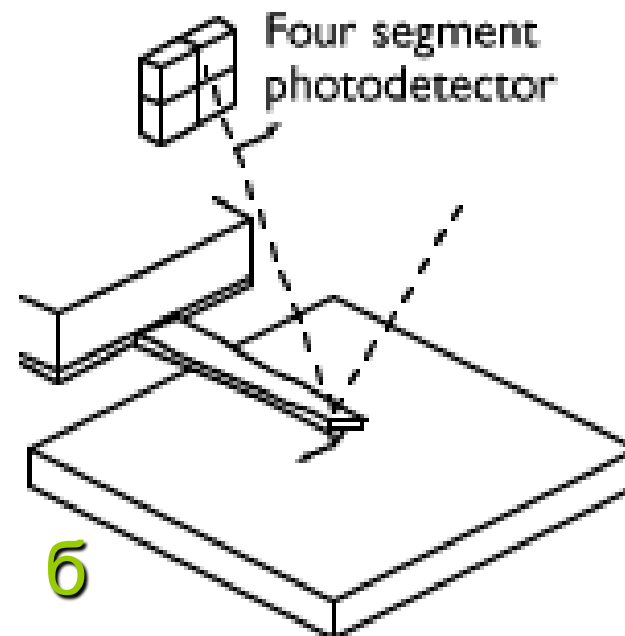
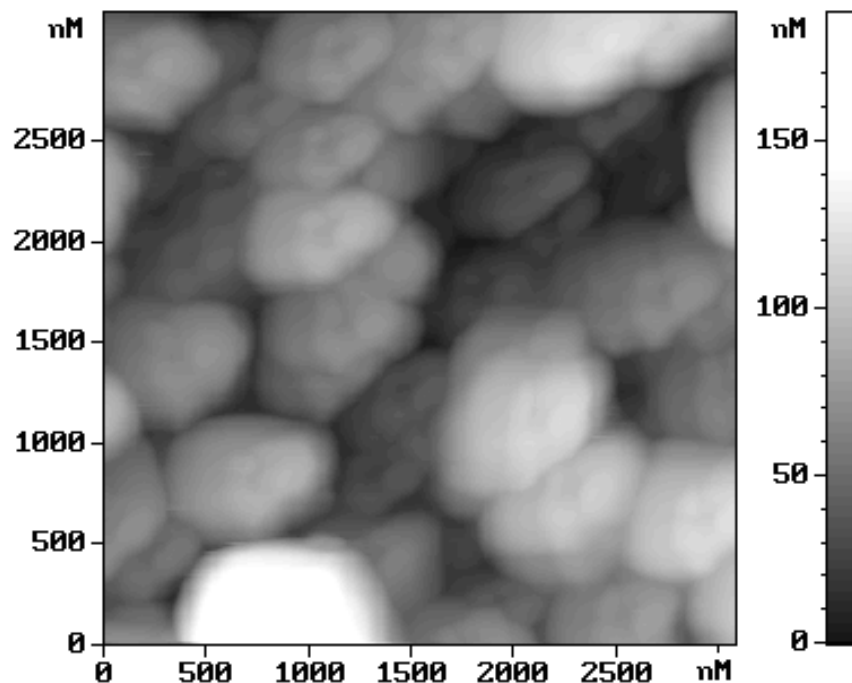


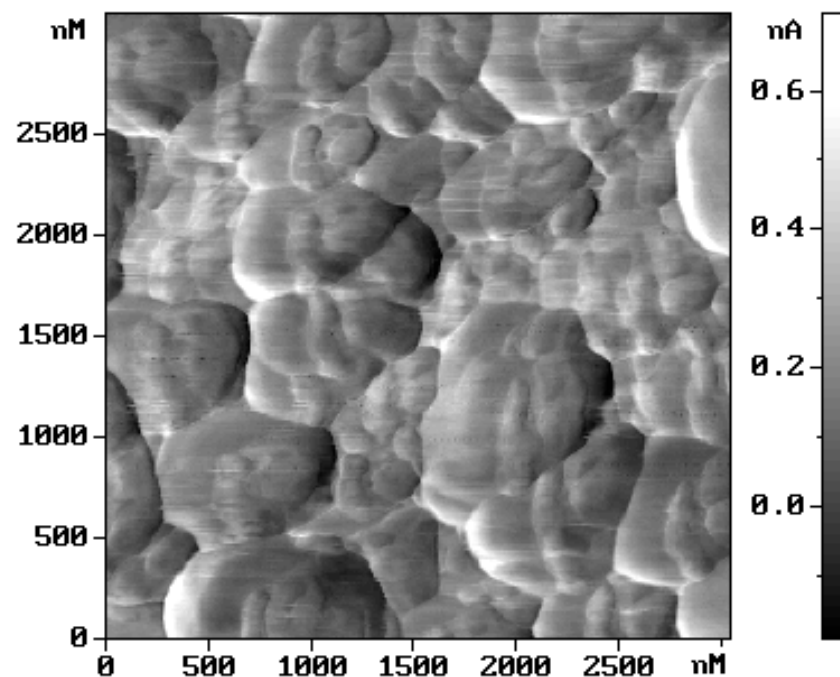
Схема работы атомно-силового (а) и латерально-силового (б) микроскопов

Латерально-силовой микроскоп

а



б



Одновременно снятые АСМ- (а) и ЛСМ- изображения (б) одного и того же участка поверхности пленки Ag, нанесенной на подложку Si

Магнитно-силовой микроскоп

Магнитно-силовой микроскоп

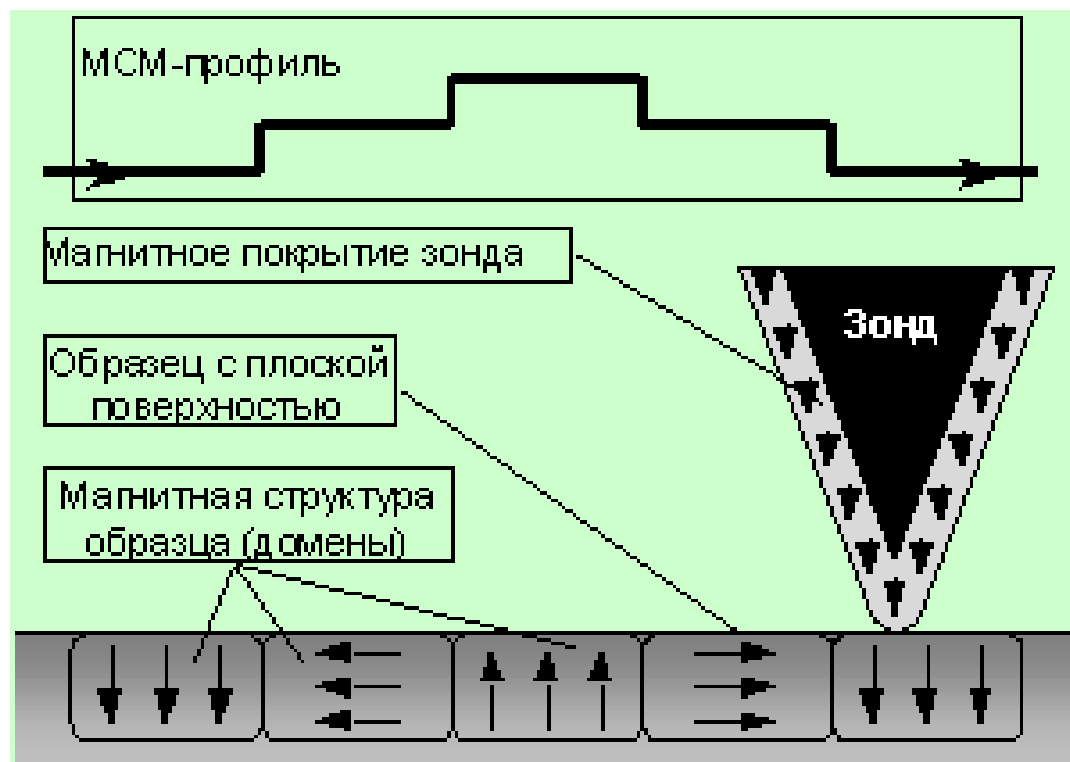
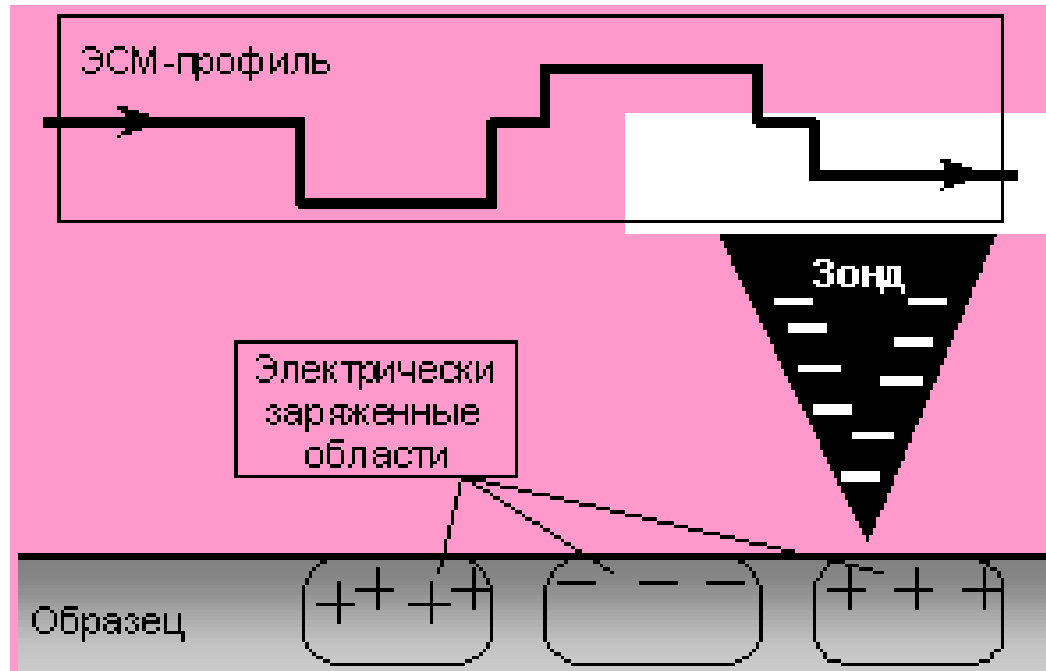


Схема работы магнитно-силового микроскопа. MFM-профиль отображает магнитную структуру поверхностного слоя образца

Электростатический силовой микроскоп

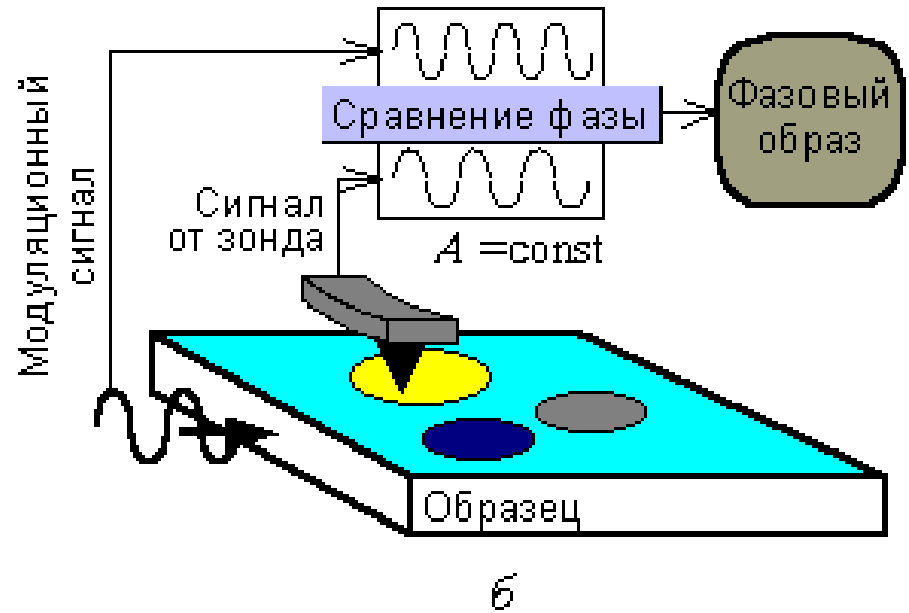
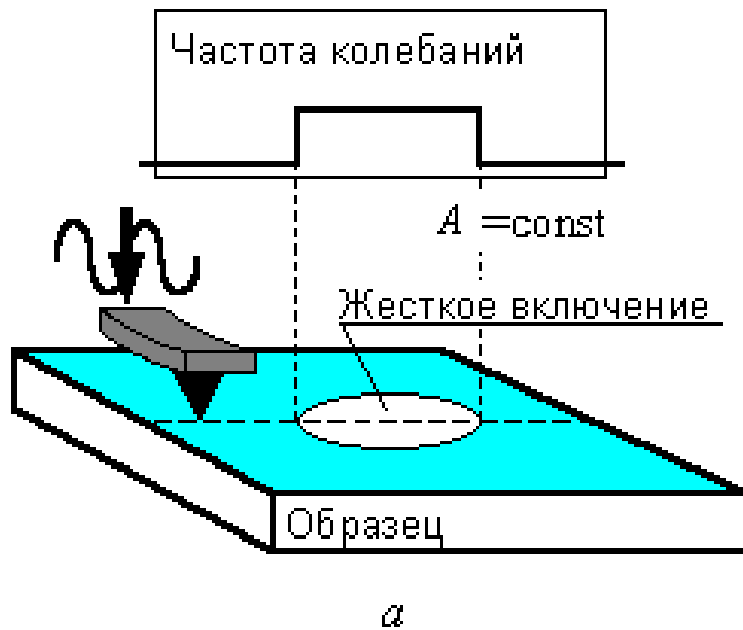
Электростатический силовой микроскоп



Картографирование электростатических полей с помощью ЭСМ

Микроскопия поверхностных свойств

Микроскопия поверхностных свойств

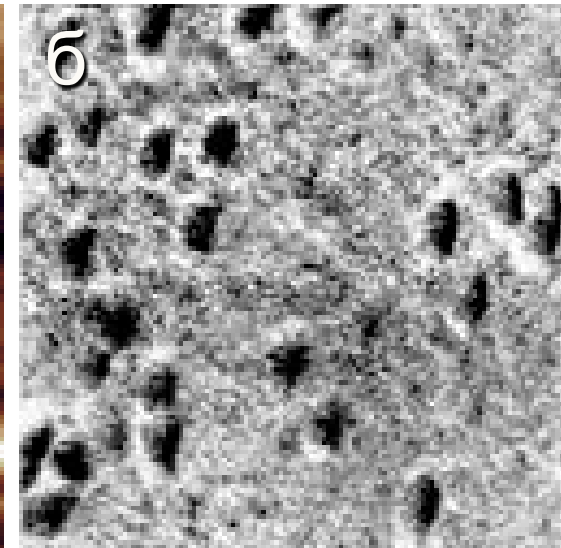
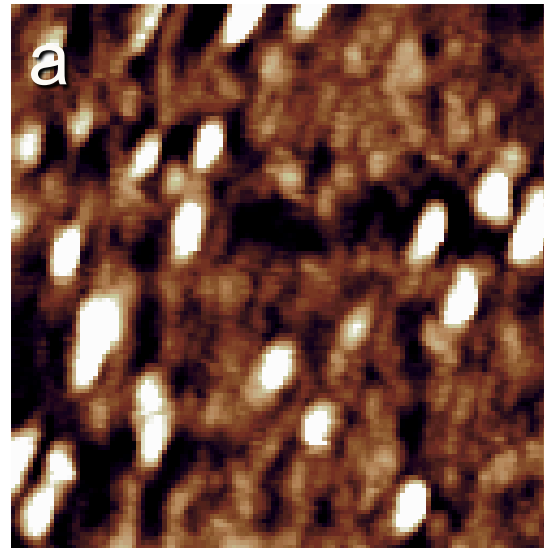
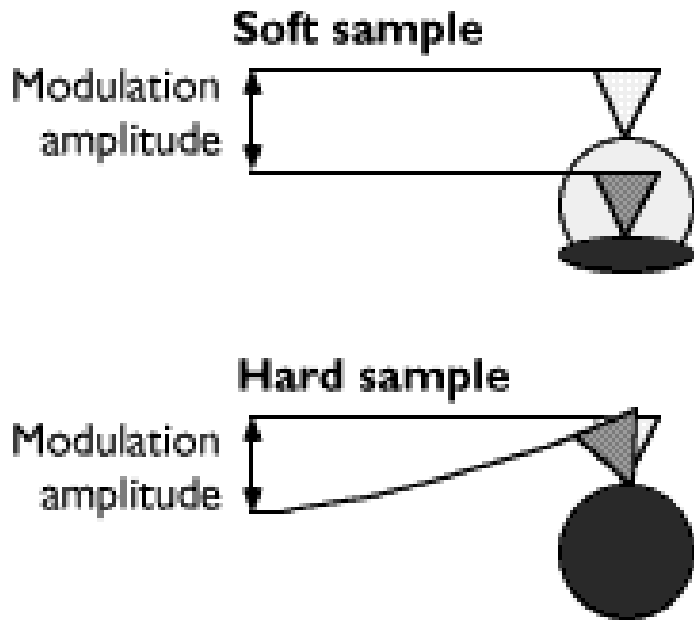


Визуализация механических свойств поверхности:

(а) – при отслеживании частоты колебаний зонда (частота увеличивается на более жестких участках);

(б) – при записи разности фаз частоты сигнала, прикладываемого для возбуждения колебаний, и частоты колебаний зонда (построение фазового образа)

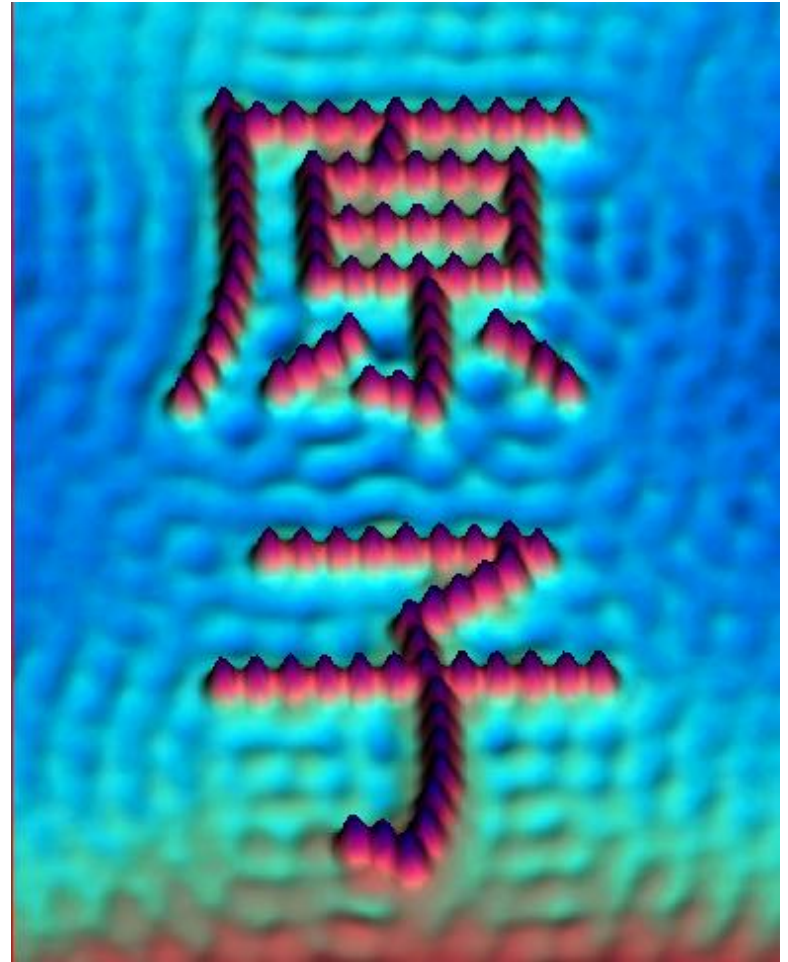
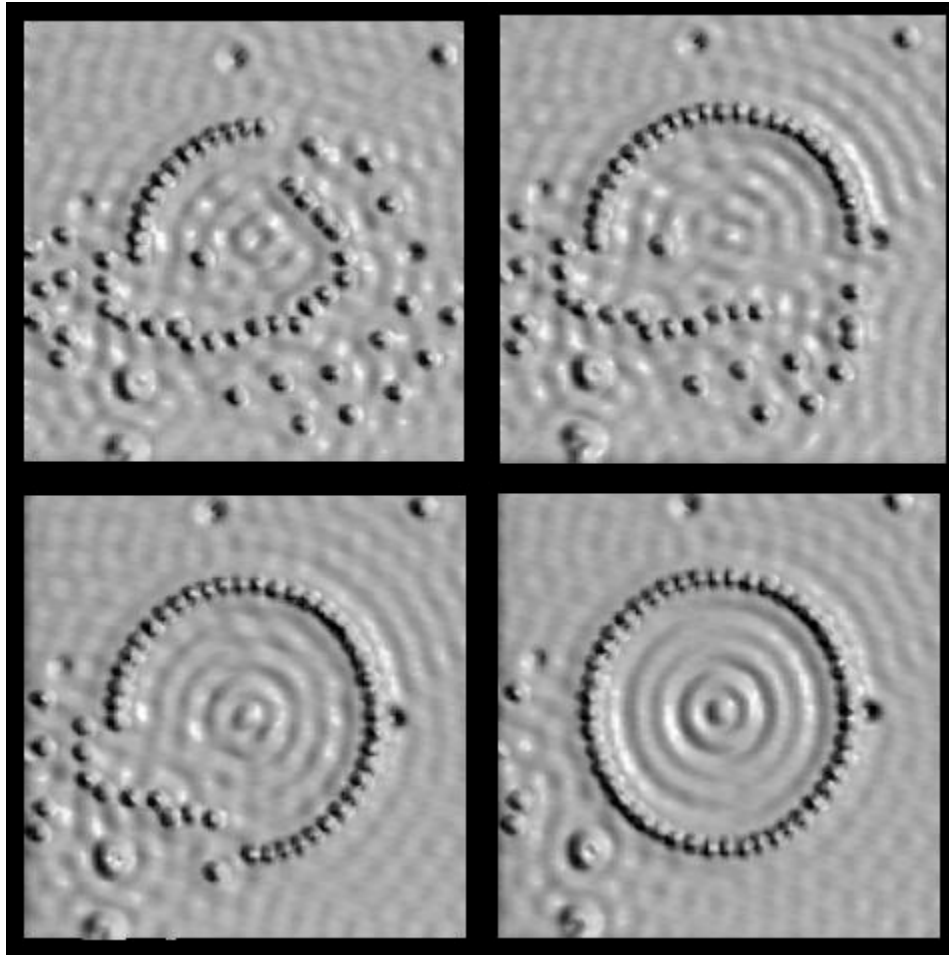
Микроскопия поверхностных свойств



Одновременно полученные изображения молекул протеина на поверхности кремния в режимах измерения топографии (а) и жесткости (б)

Нанолитография

Нанолитография



Перемещение с помощью СЗМ атомов Fe на поверхности Си

Ближнепольный оптический микроскоп

Ближнепольный оптический микроскоп

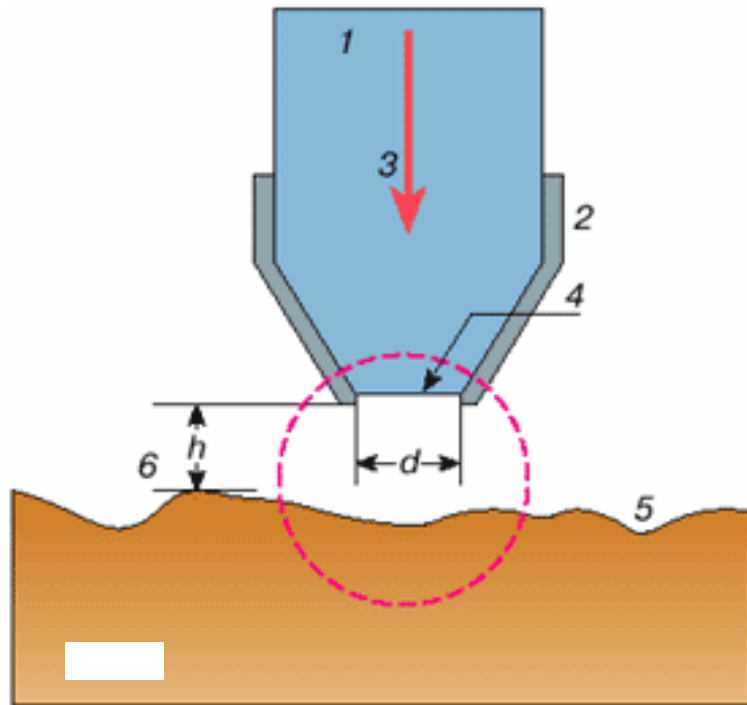


Рис. 1. Схема волоконно-оптического ближнепольного зонда: 1 – заостренное оптическое волокно; 2 – металлическое покрытие; 3 – проходящее через зонд излучение; 4 – выходная апертура зонда, $d \ll \lambda$; 5 – поверхность исследуемого образца; 6 – расстояние между исследуемой поверхностью и апертурой зонда, $h \ll \lambda$. Штрихами очерчена область ближнепольного контакта

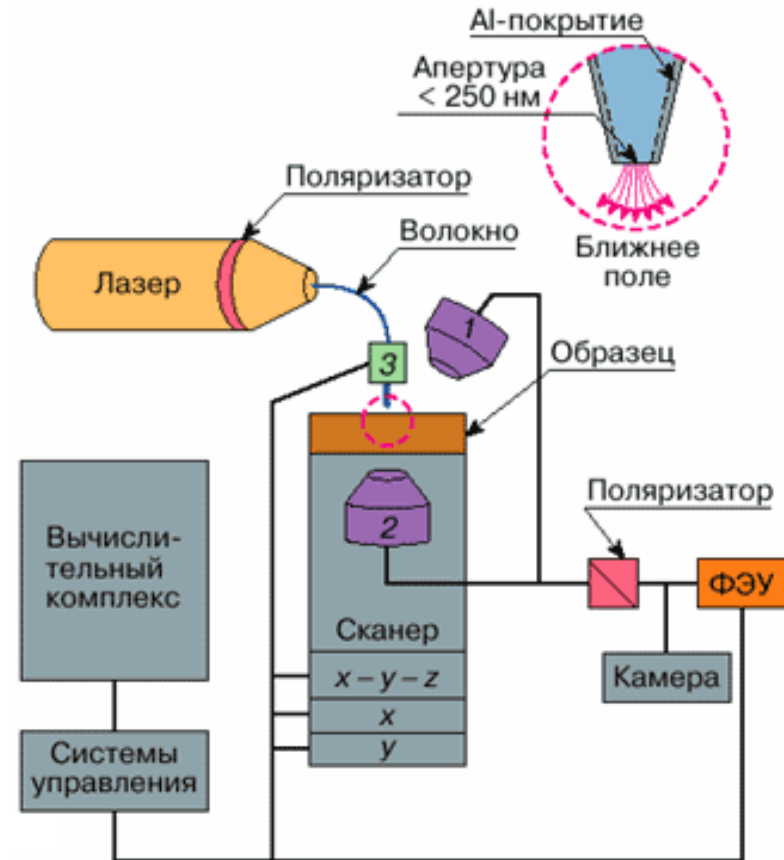


Рис. 2. Блок-схема ближнепольного микроскопа: 1 – микрообъектив, работающий в отраженном свете; 2 – микрообъектив, работающий в проходящем свете; 3 – пьезодвижитель для перемещения зонда. Штрихами очерчена область ближнепольного контакта

Спасибо за внимание