

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ В ХИМИИ

Лекции для студентов 3-го курса дневного отделения
химического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Лекция 20.

Сканирующая зондовая микроскопия

Лектор: д.х.н., профессор кафедры химии твердого тела ХФ ННГУ
Сулейманов Евгений Владимирович

Литература (специализированная)

1. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Н.Новгород.: ИФМ РАН. 2004. 114 с. – это пособие было использовано как основное при подготовке данной презентации. (<http://phys.unn.ru> - раздел «Библиотека > Материалы лекций, методические пособия > Сканирующая зондовая микроскопия»)
2. Сайт компании «НТ-МДТ», раздел «Методики СЗМ» <http://ntmdt.ru/spm-principles>

История открытий

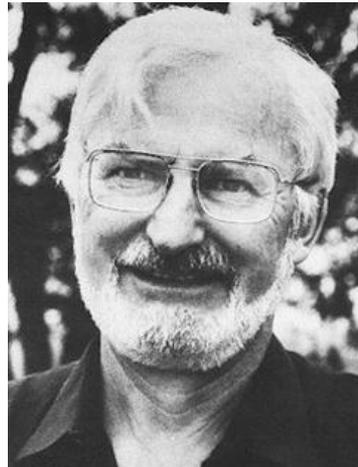
1981 г. - Герд Биннинг и Генрих Рорер (Швейцария) изобрели сканирующий туннельный микроскоп (с атомарным разрешением на проводниках; Нобелевская премия по физике за 1986 г., совместно с Э. Руски)

1982 г. - Дитер Поль (Швейцария) изобрел сканирующий оптический ближнепольный микроскоп (разрешение 50 нм).

1986 г. - Герд Биннинг, Кельвин Куэйт, Кристофер Гербер (США) изобрели сканирующий атомно-силовой микроскоп (с атомарным разрешением на проводниках и диэлектриках)



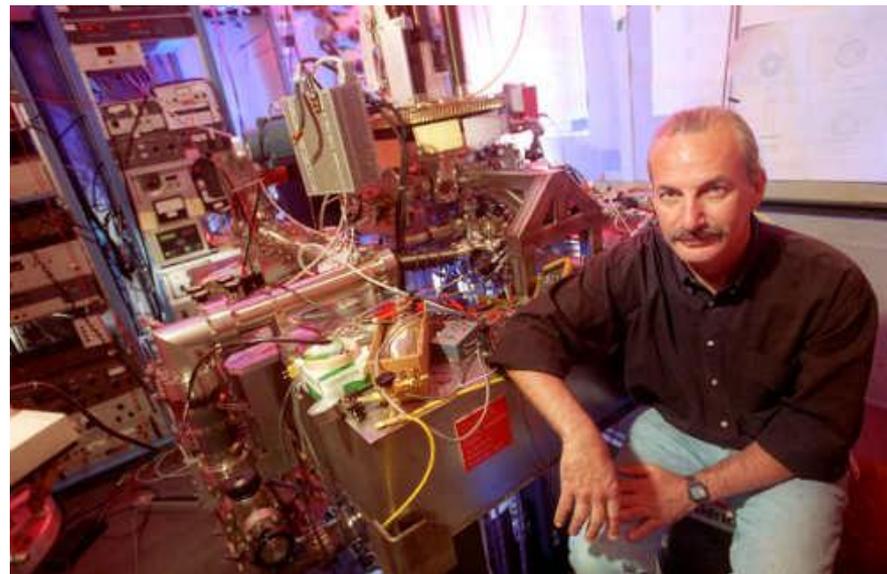
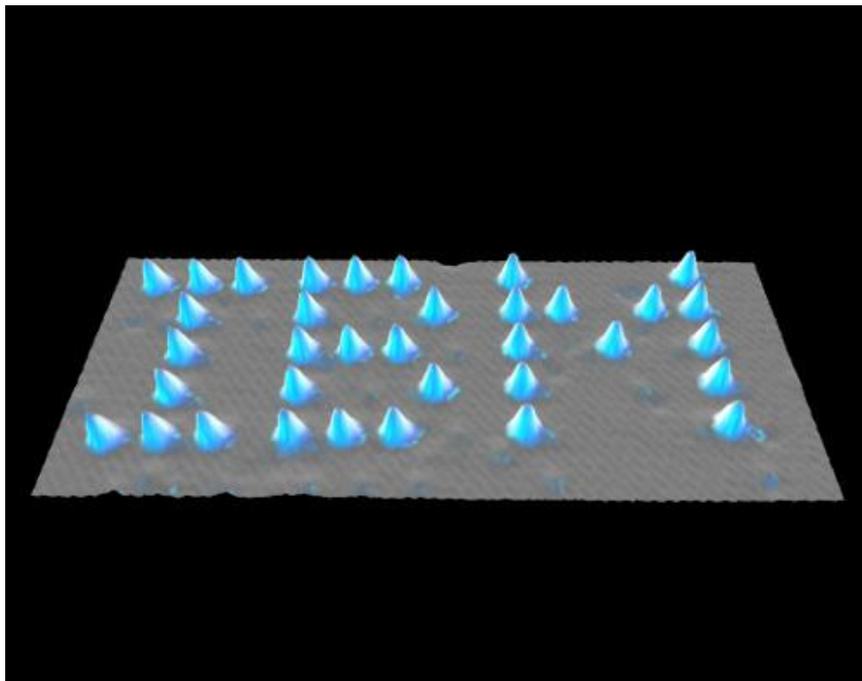
Герд Биннинг
20.07.1947



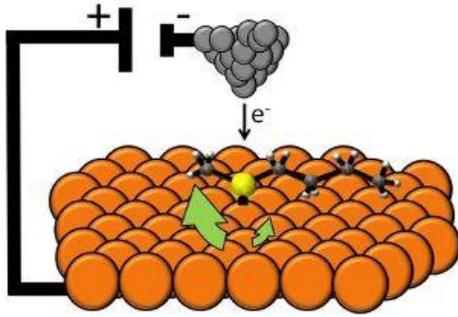
Генрих Рорер
6.06.1933

История открытий

11 ноября 1989 года сотрудник IBM Дон Эйглер (Don Eigler) со своей командой перепрограммировал сканирующий туннельный микроскоп таким образом, чтобы он мог двигать атомы пучком электронов и расположил 35 атомов ксенона в виде букв "IBM". Беспрецедентная возможность манипулировать частицами стала знаковым моментом и начала эру нанотехнологий.



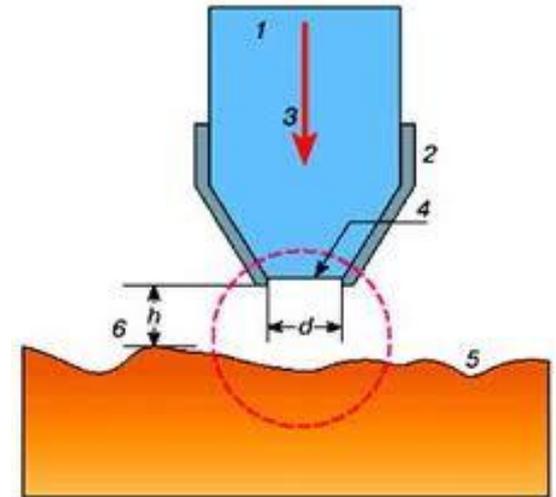
Виды и задачи сканирующей зондовой микроскопии



сканирующий
туннельный
микроскоп



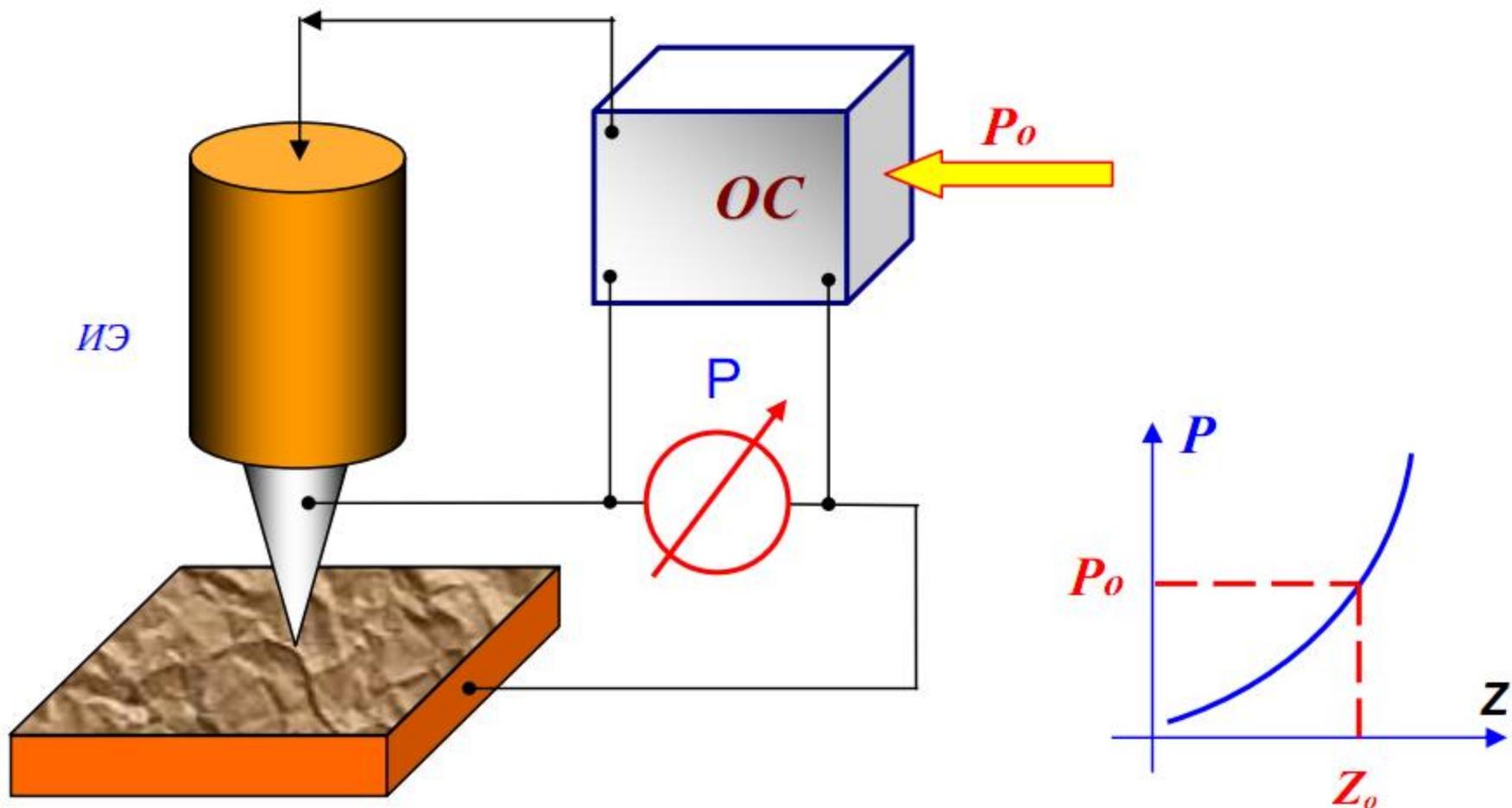
сканирующий
атомно-силовой
микроскоп



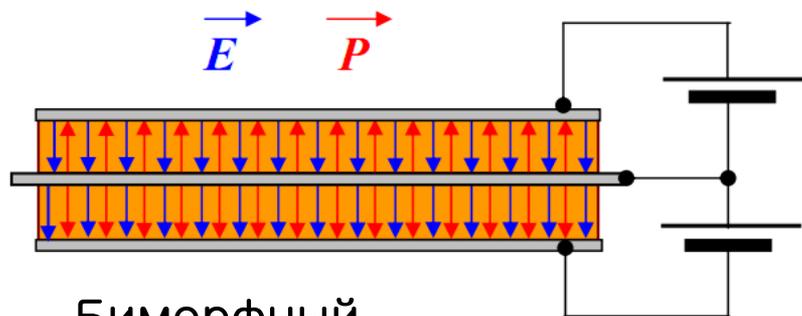
сканирующий
оптический
ближнепольный
микроскоп

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

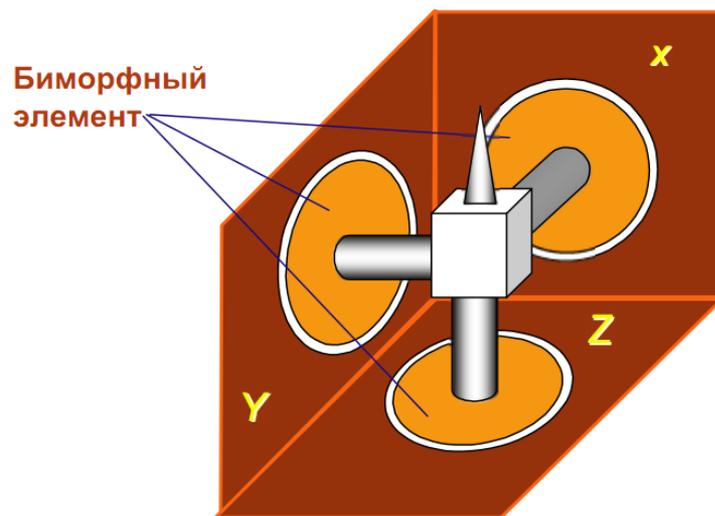
Общие вопросы СЗМ. Обратная связь.



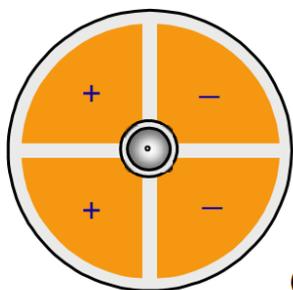
Общие вопросы СЗМ. Positionирование сканирующего элемента.



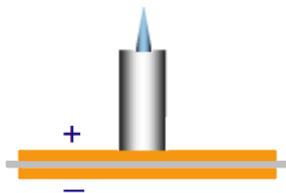
Биморфный пьезоэлемент



Трёхкоординатный сканер на трёх биморфных пьезоэлементах



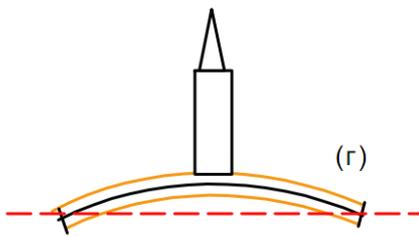
(a)



(b)



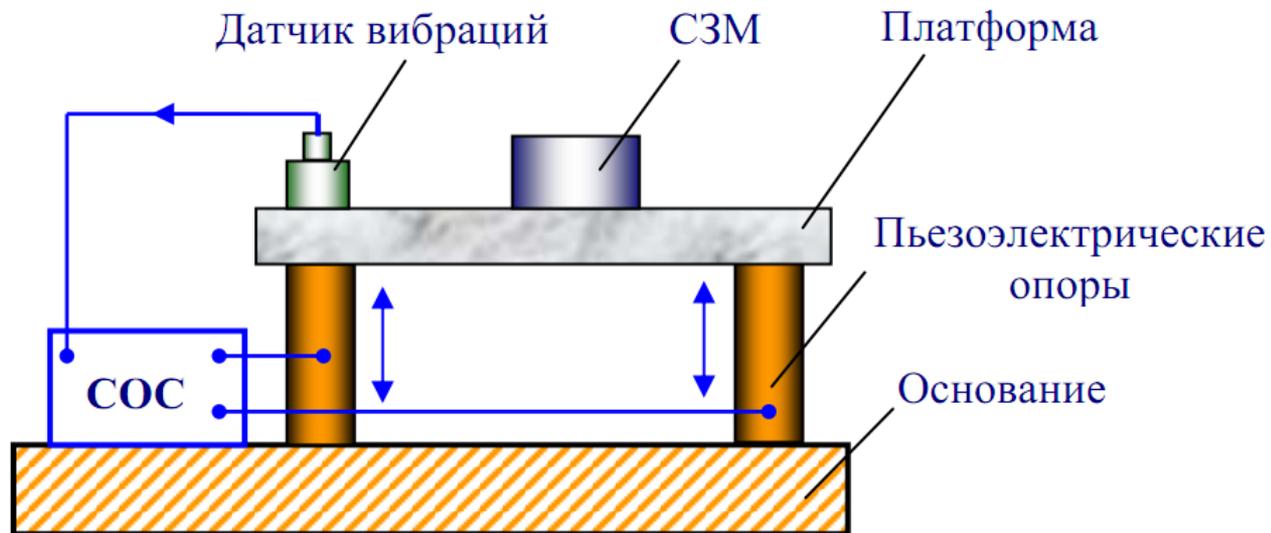
(г)



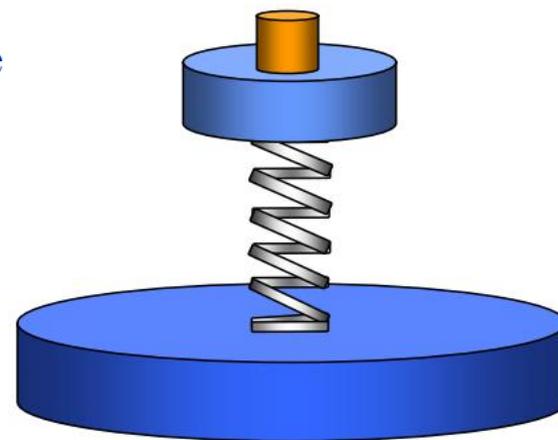
(r)

Схема работы биморфного пьезосканера

Общие вопросы СЗМ. Защита от воздействий. Вибрации.

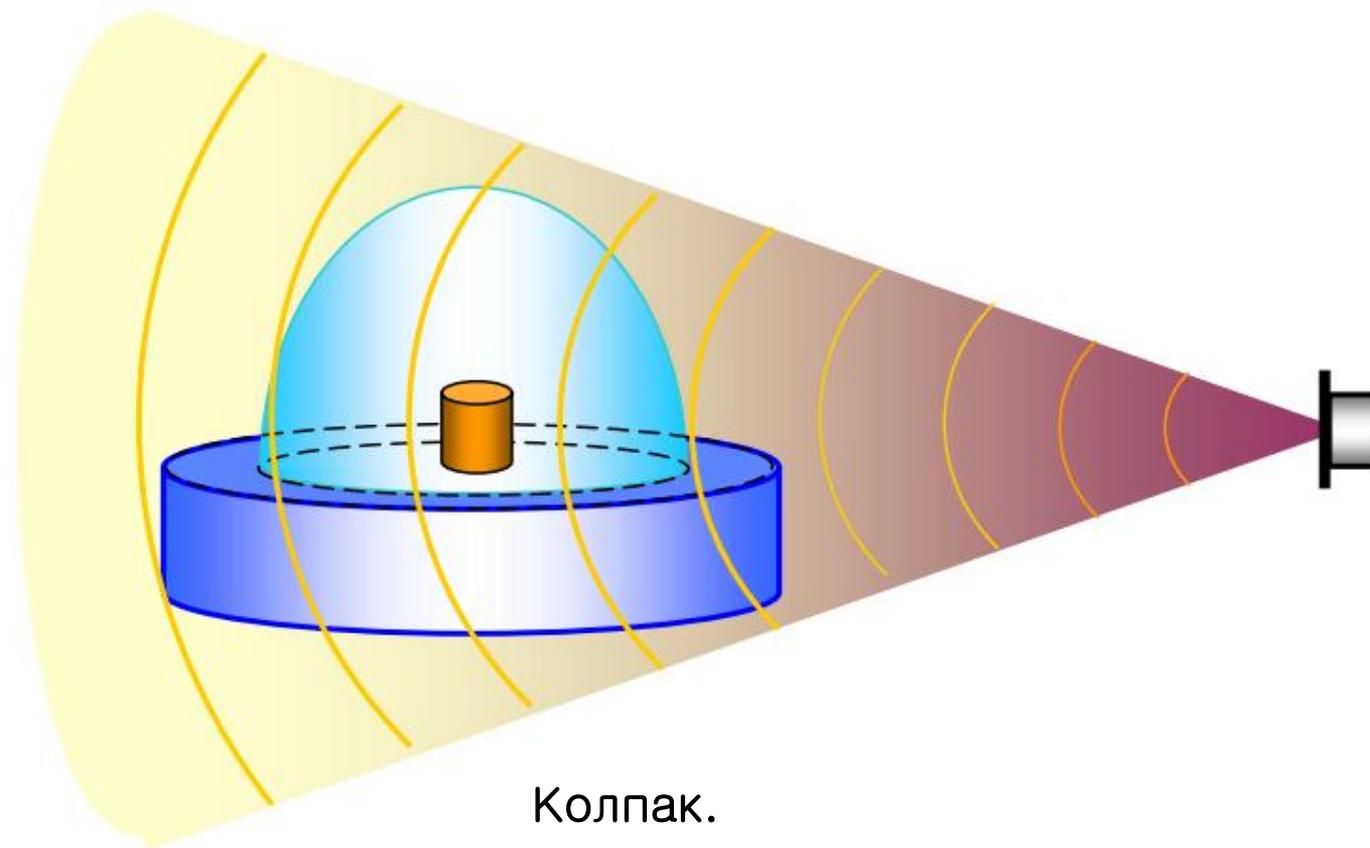


Активная защита



Пассивная защита

Общие вопросы СЗМ. Защита от воздействий. Акустические шумы



Колпак.
Вакуум.

Общие вопросы СЗМ. Защита от воздействий. Компенсация термодрейфа.

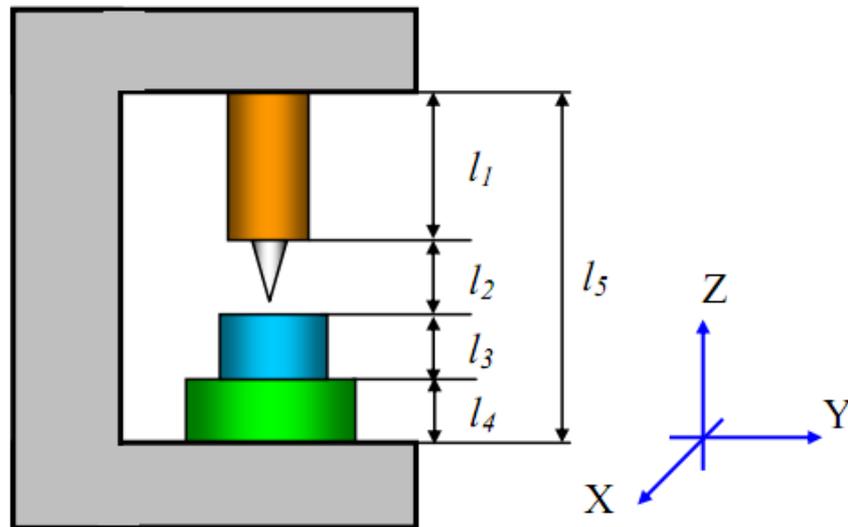
$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

ΔL – удлинение образца

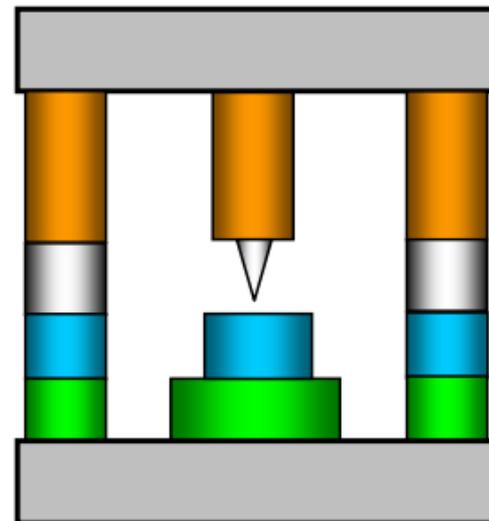
L – длина образца

α – температурный коэффициент расширения

ΔT – изменение температуры

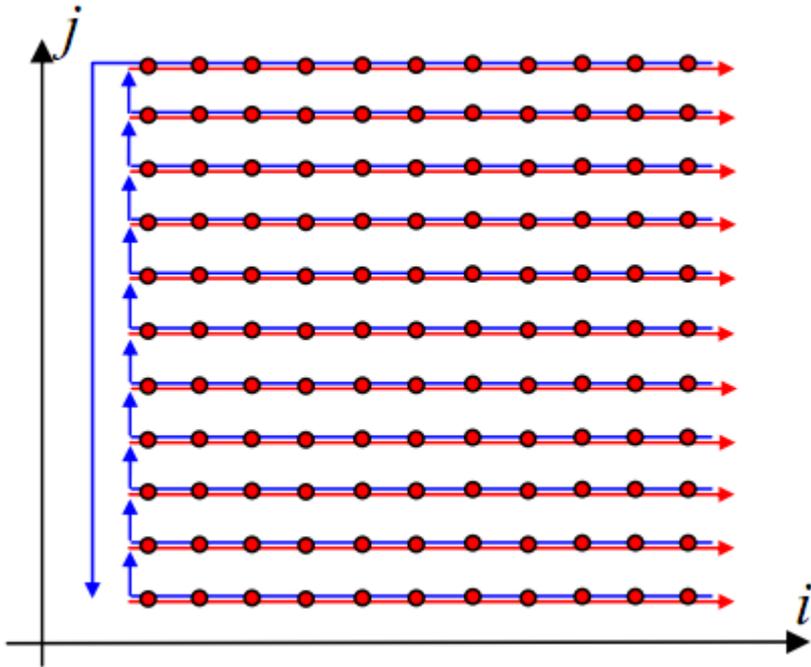


(a)



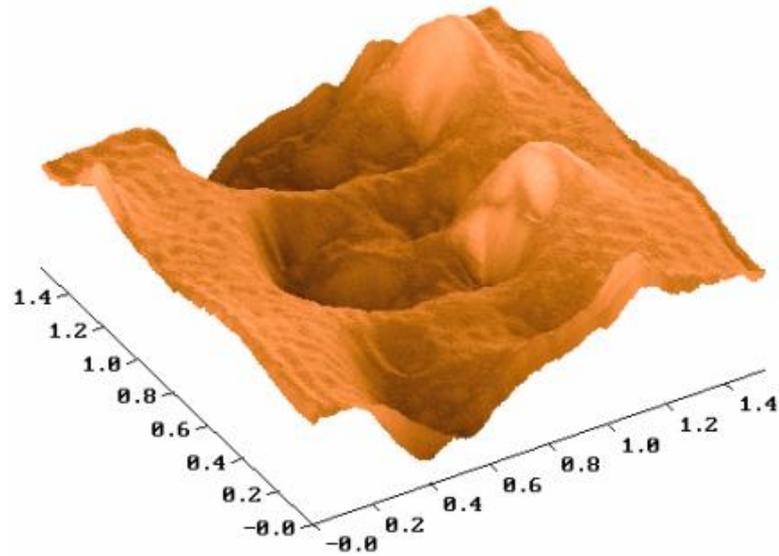
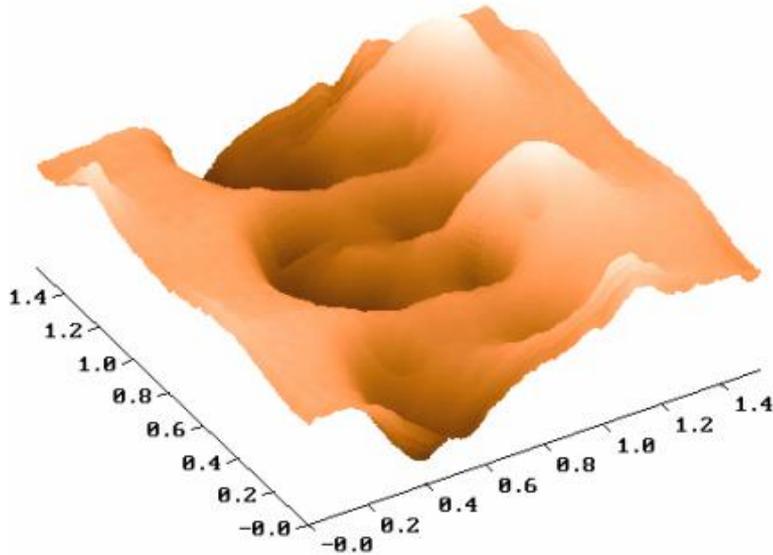
(б)

Общие вопросы СЗМ. Схема сканирования.

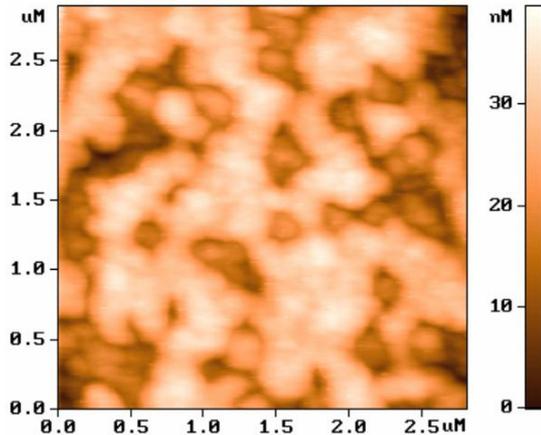


Регистрация сигнала производится на прямом ходе
(красные стрелки)

Общие вопросы СЗМ. Визуализация результата.

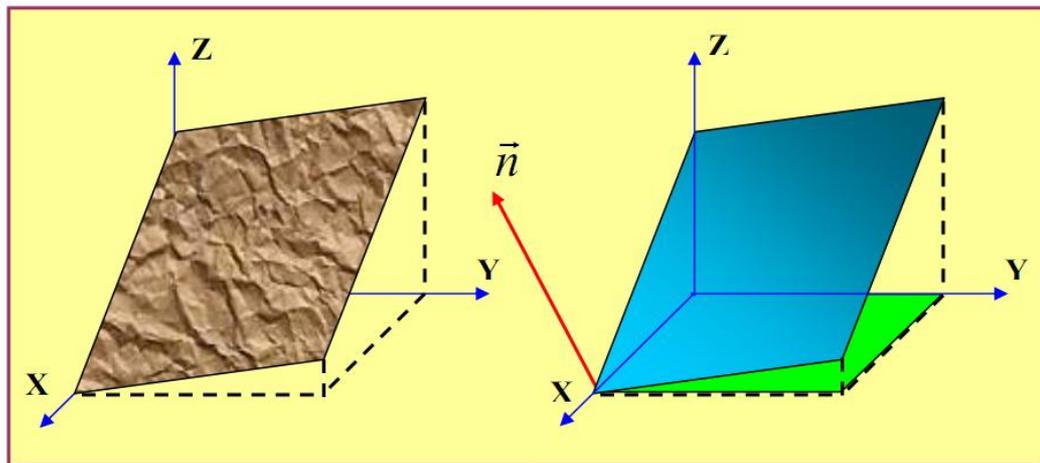


Трехмерное изображение (3D) с вертикальной (рис. слева) и боковой (рис. справа) подсветкой

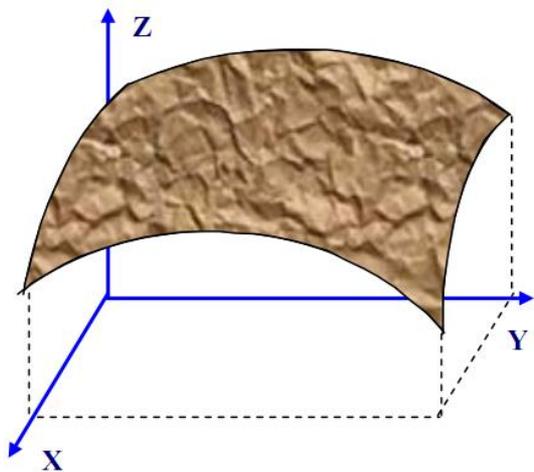


Яркостное двумерное изображение

Общие вопросы СЗМ. Корректировка изображения.

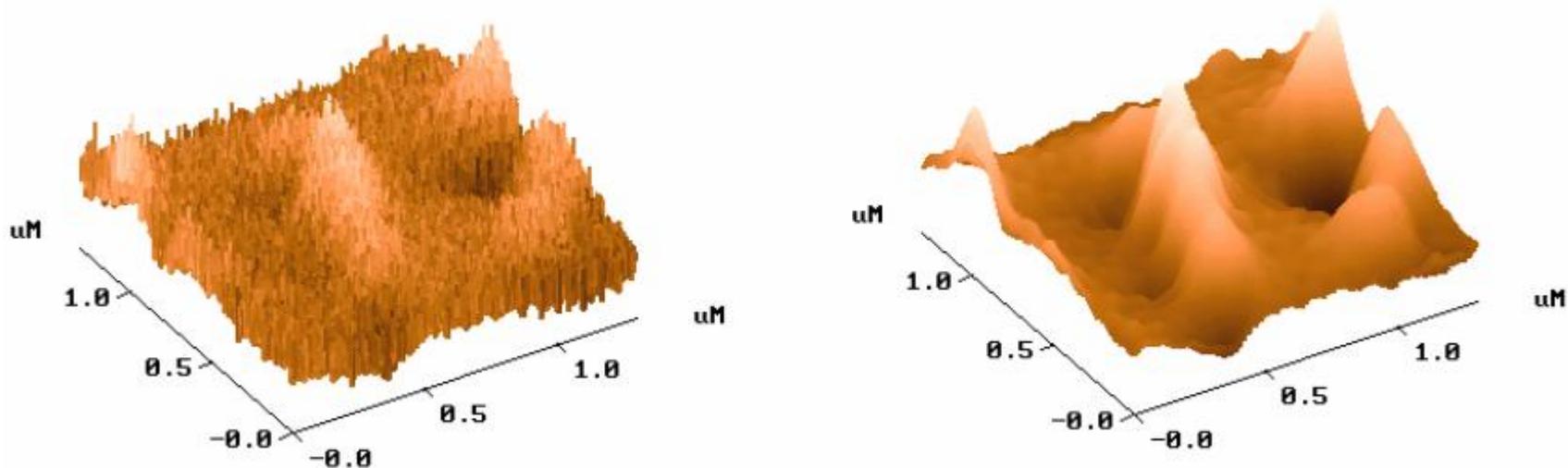


Вычитание постоянного наклона



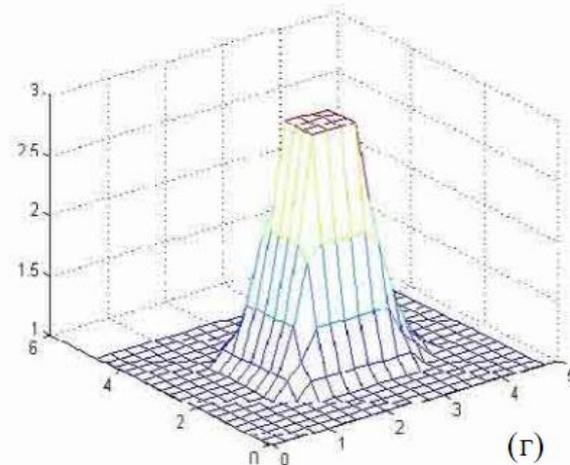
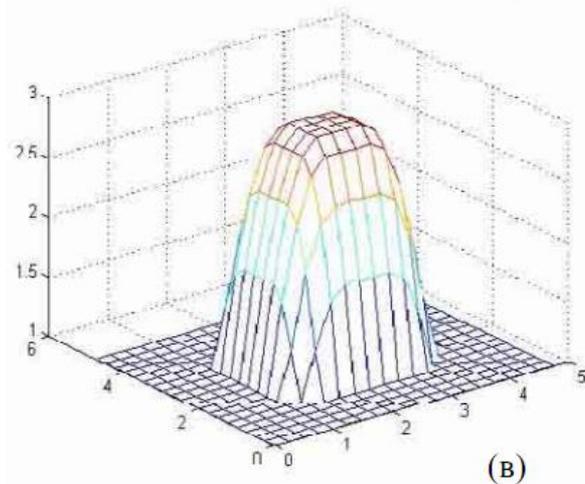
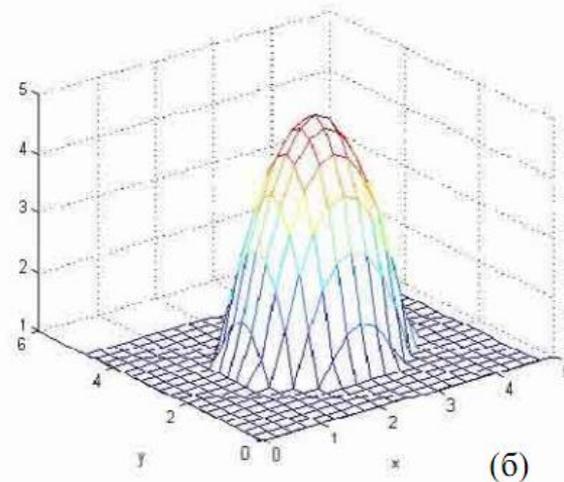
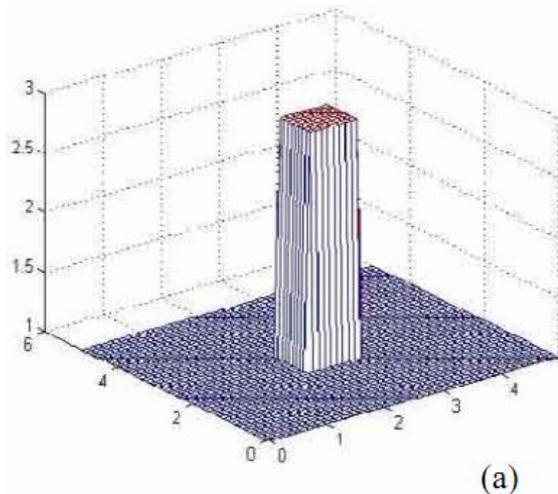
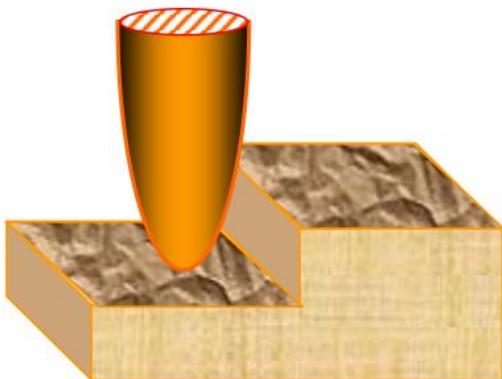
Вычитание поверхности второго порядка

Общие вопросы СЗМ. Фильтрация изображения.



Изображение до (слева) и после (справа) фильтрации

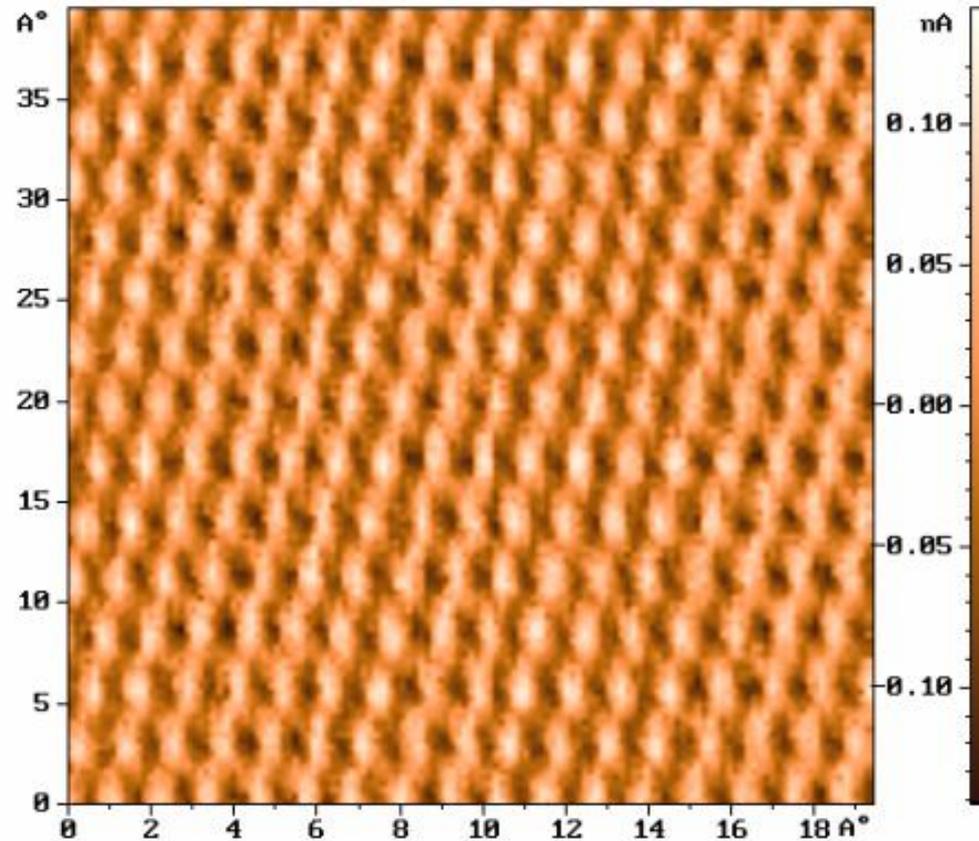
Общие вопросы СЗМ. Восстановление истинного изображения.



(а) – реальная поверхность

(г) – восстановленное изображение поверхности

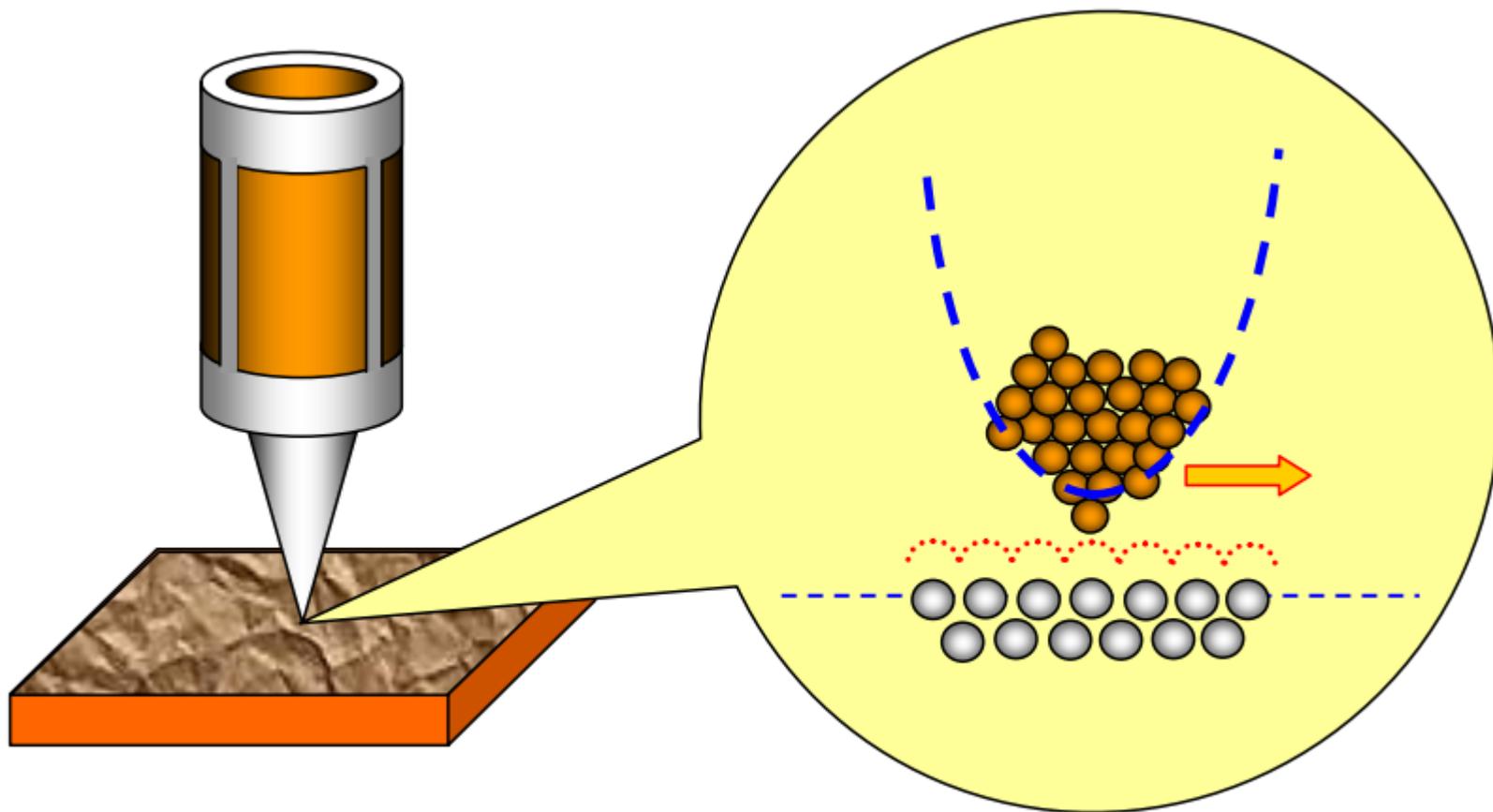
Пример изображения СТМ



СТМ изображение атомарной структуры поверхности пиролитического графита

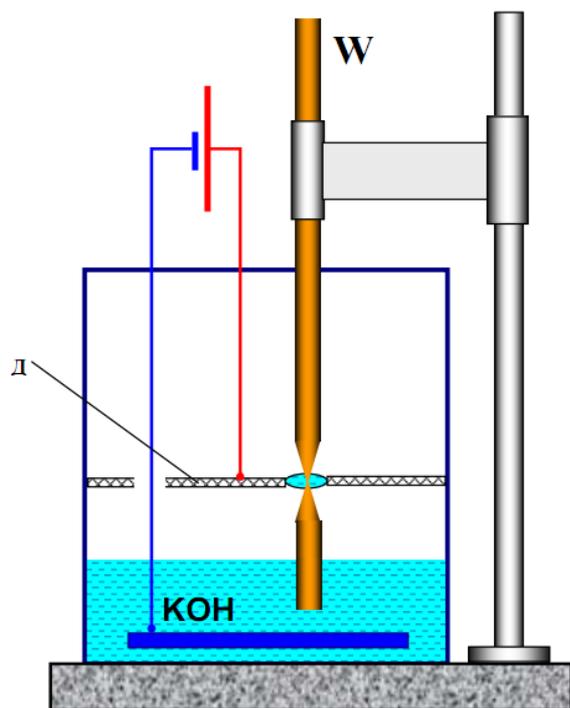
Сканирующая туннельная микроскопия

Получение атомарного разрешения

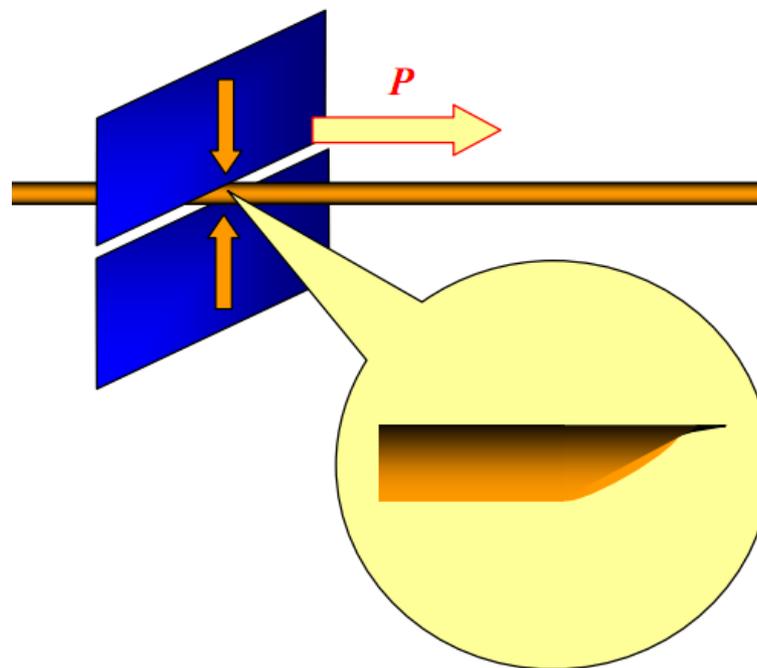


Реализация атомарного разрешения в сканирующем туннельном микроскопе

Схемы изготовления зондов для СТМ



Метод электрохимического травления
(проволока из вольфрама)



Метод перерезания
проволоки
(Pt/Ir – сплав)

Туннелирование электронов в СТМ

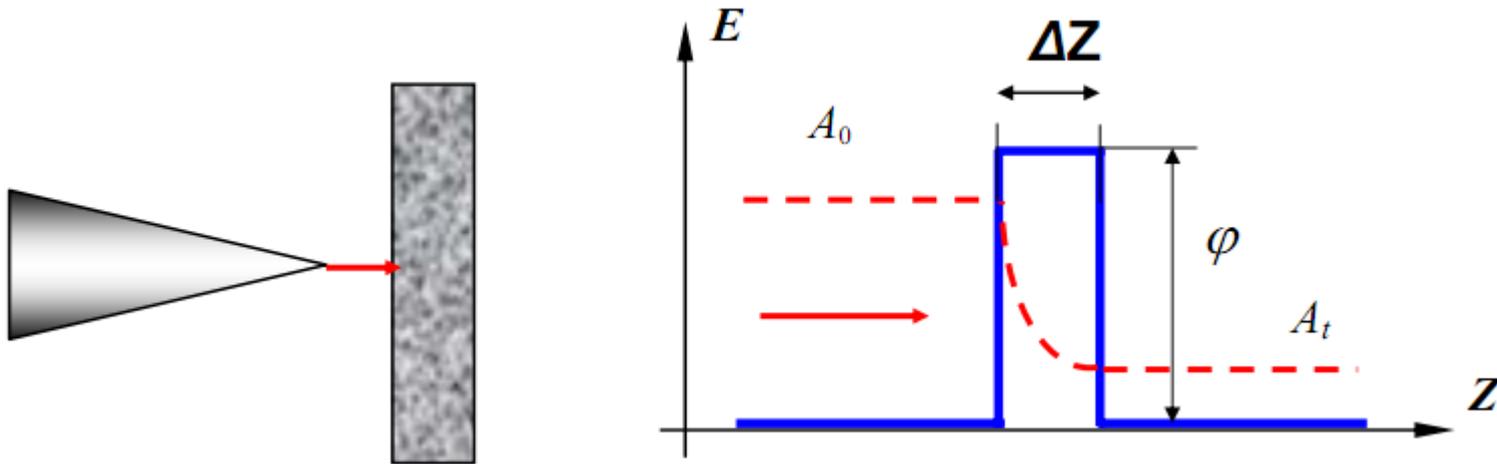
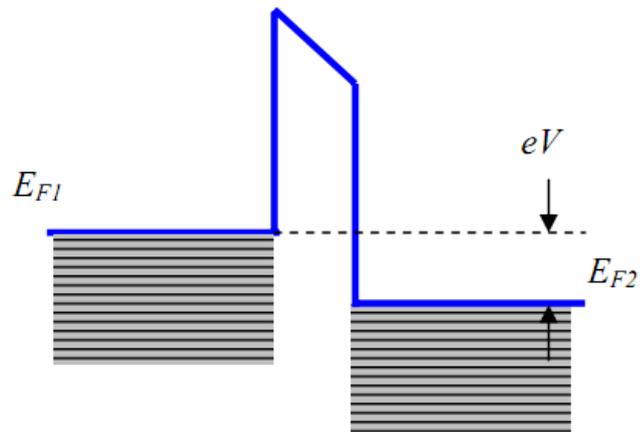
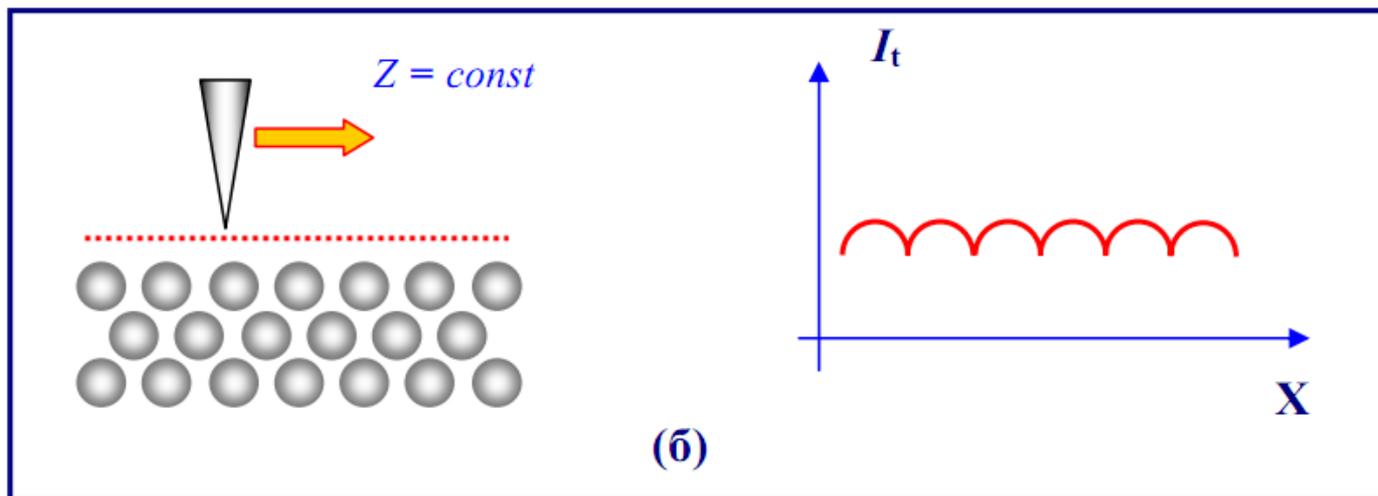
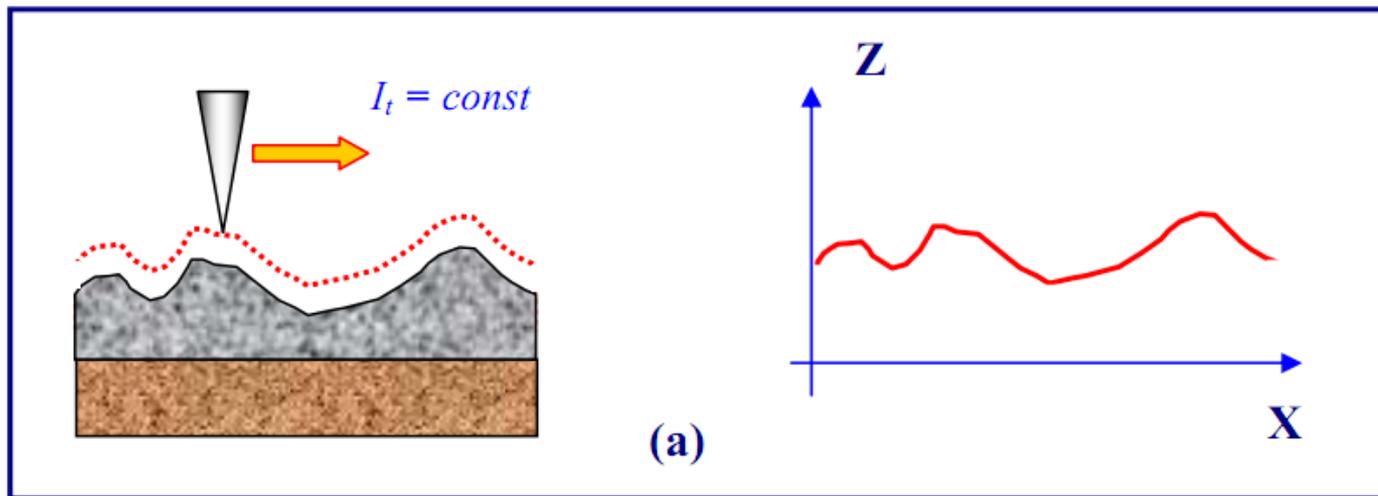


Схема туннелирования электронов через потенциальный барьер



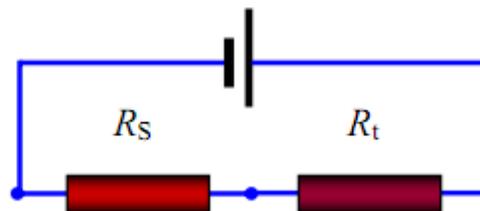
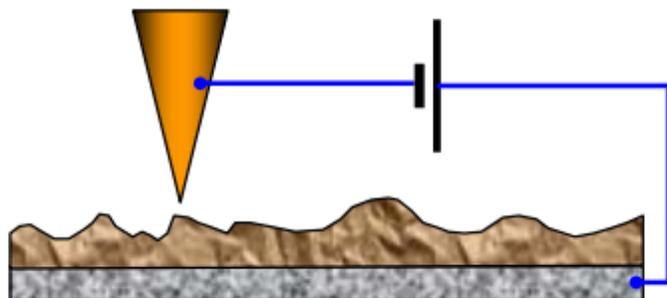
Энергетическая диаграмма туннельного контакта двух металлов

Два приёма СТМ



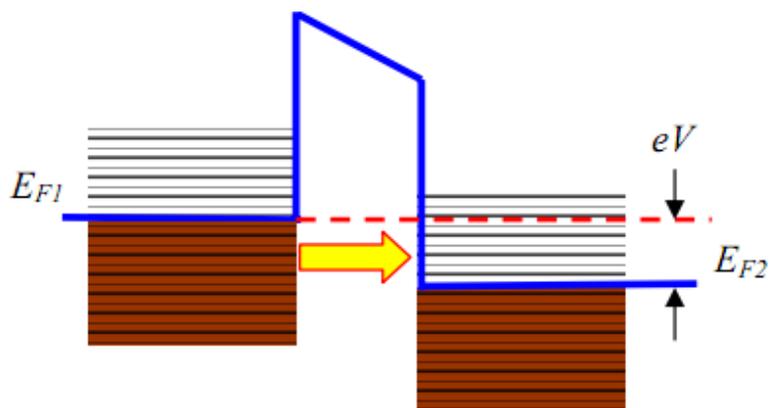
Формирование СТМ изображений поверхности по методу постоянного туннельного тока (а) и постоянного среднего расстояния (б)

Спектральные задачи в СТМ (1)

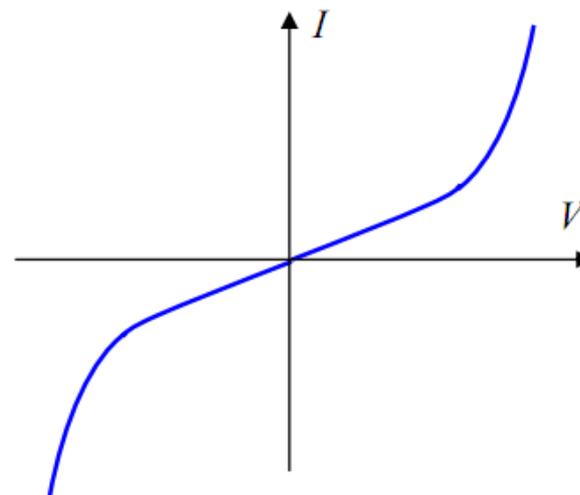


$$R_S \ll R_t$$

Эквивалентная схема туннельного контакта по постоянному току

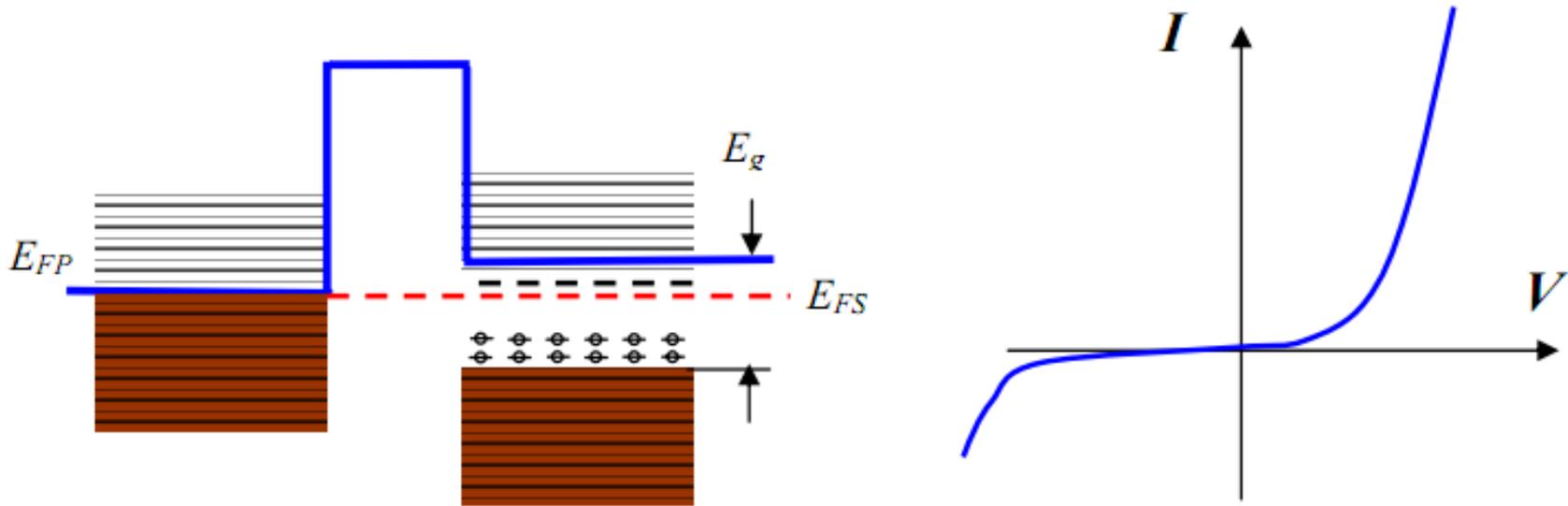


Энергетическая диаграмма туннельного контакта двух металлов



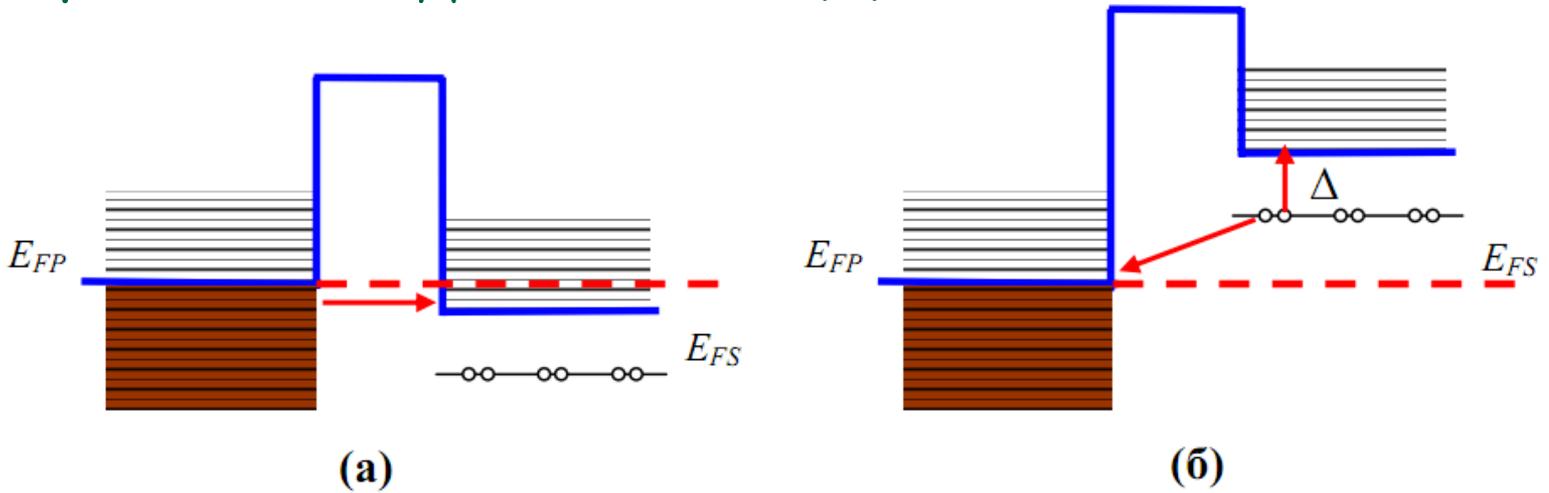
Характерный вид ВАХ туннельного контакта металл-металл

Спектральные задачи в СТМ (2)

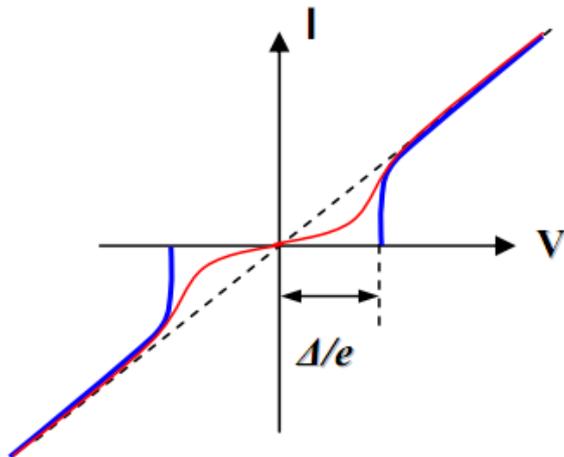


Энергетическая диаграмма и характерный вид вольт-амперной характеристики туннельного контакта металл-полупроводник

Спектральные задачи в СТМ (3)

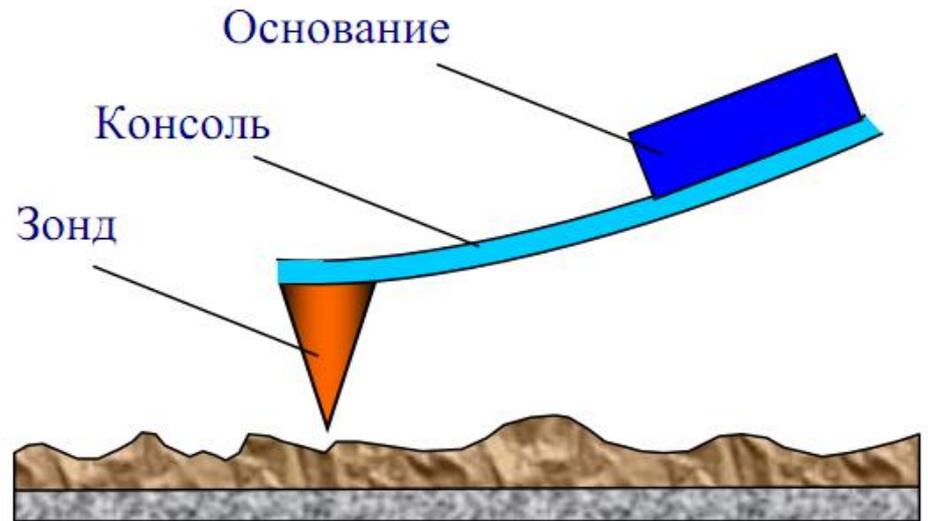


Энергетическая диаграмма контакта металл – сверхпроводник при прямом и обратном смещении



Вольтамперная характеристика контакта металл – сверхпроводник

АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ



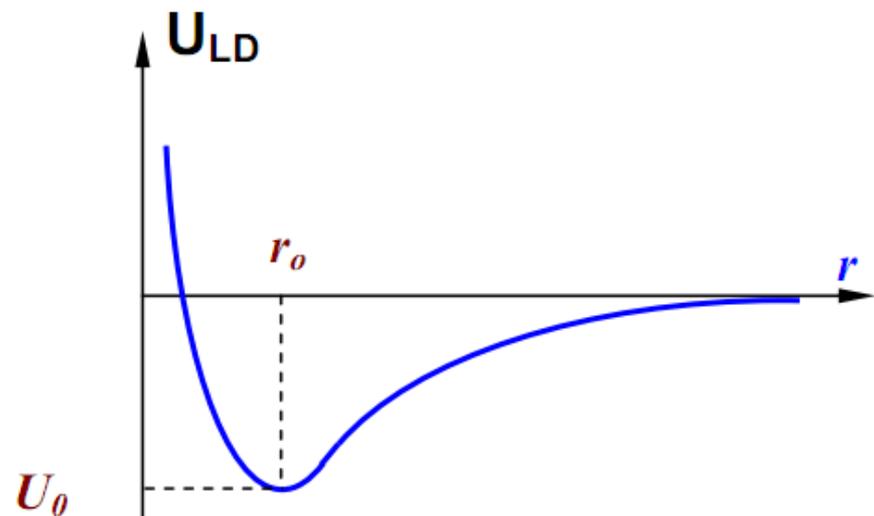
Схематическое изображение зондового датчика АСМ

Ван-дер-ваальсова сила, действующая на атомы зонда со стороны атомов образца приводит к изгибу консоли и этот изгиб может быть зафиксирован

Физические основы АСМ



Потенциал Леннарда-Джонса



$$U_{LD}(r) = U_0 \left\{ -2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 + \left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} \right\}$$

Техника АСМ

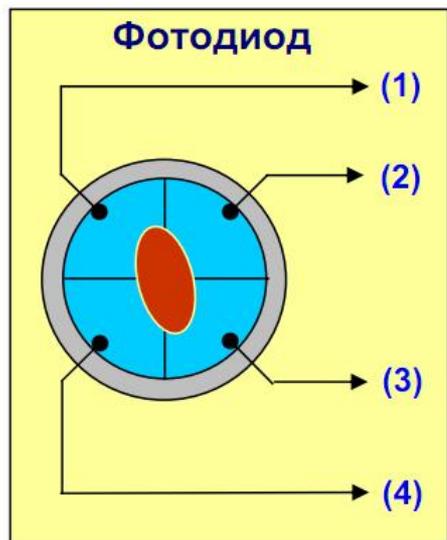
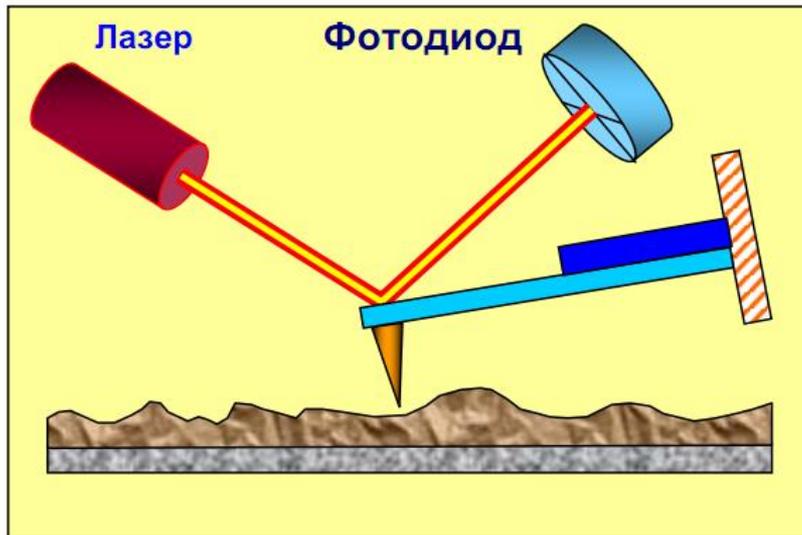
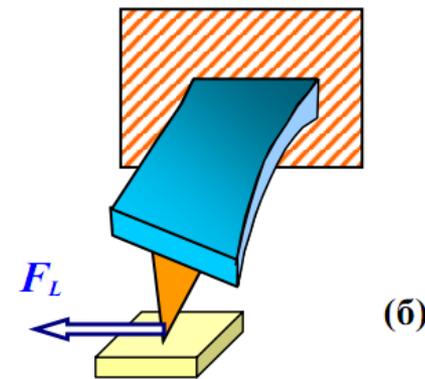
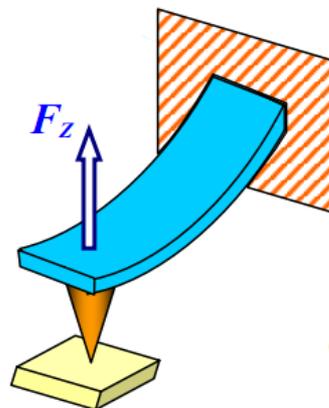
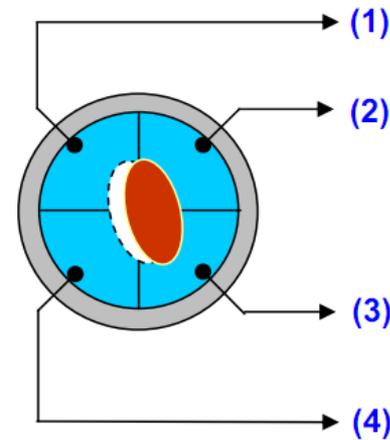
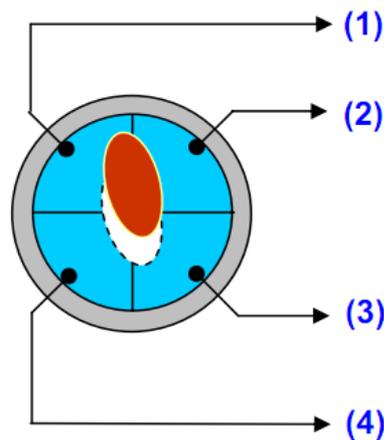
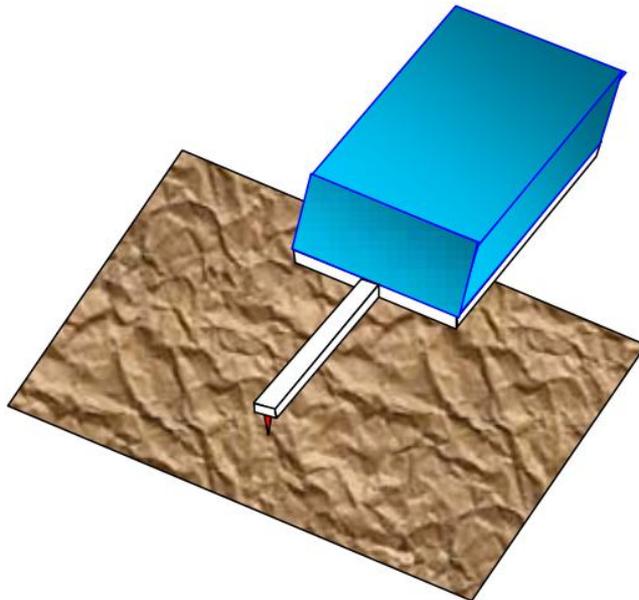
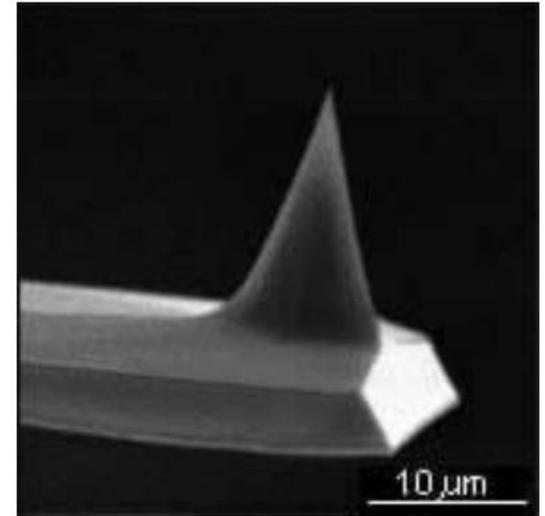
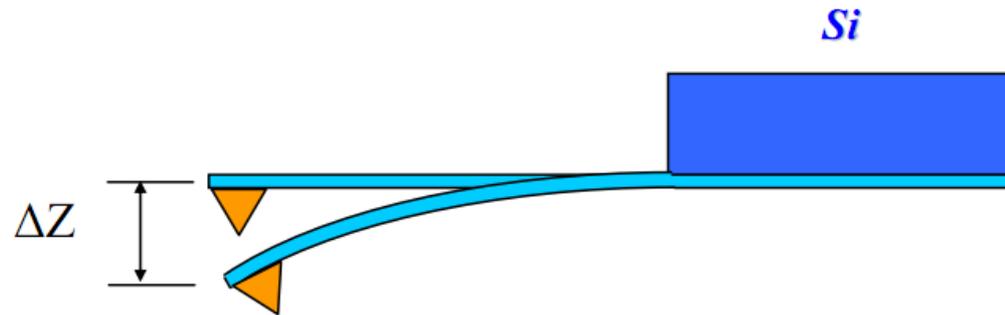


Схема оптической регистрации изгиба консоли зондового датчика АСМ

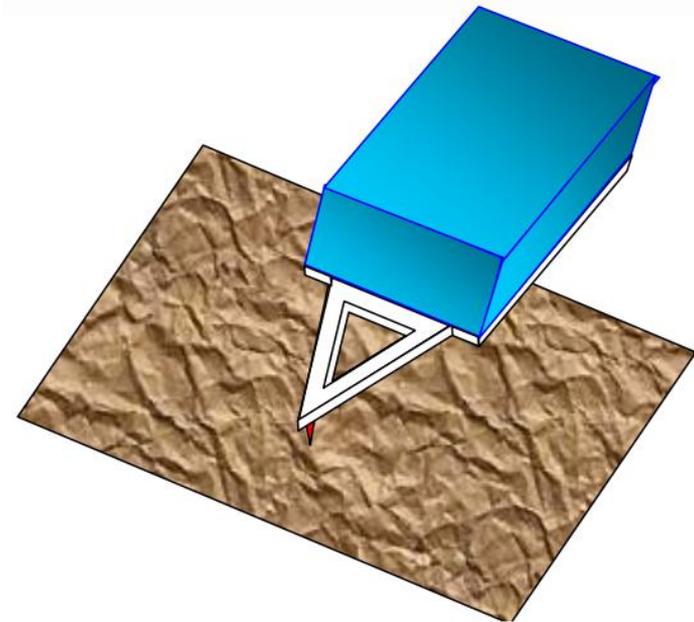


Соответствие между типом изгибных деформаций консоли зондового датчика и изменением положения пятна засветки на фотодиоде

Датчики в АСМ

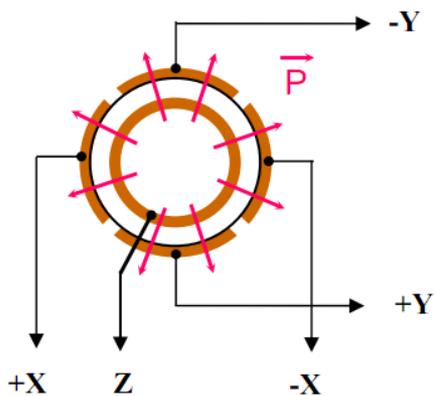
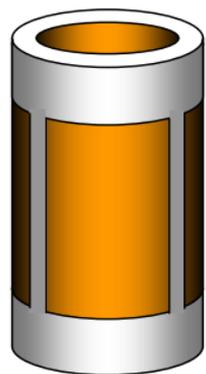


Общий вид зондового АСМ датчика с одиночной консолью прямоугольного сечения

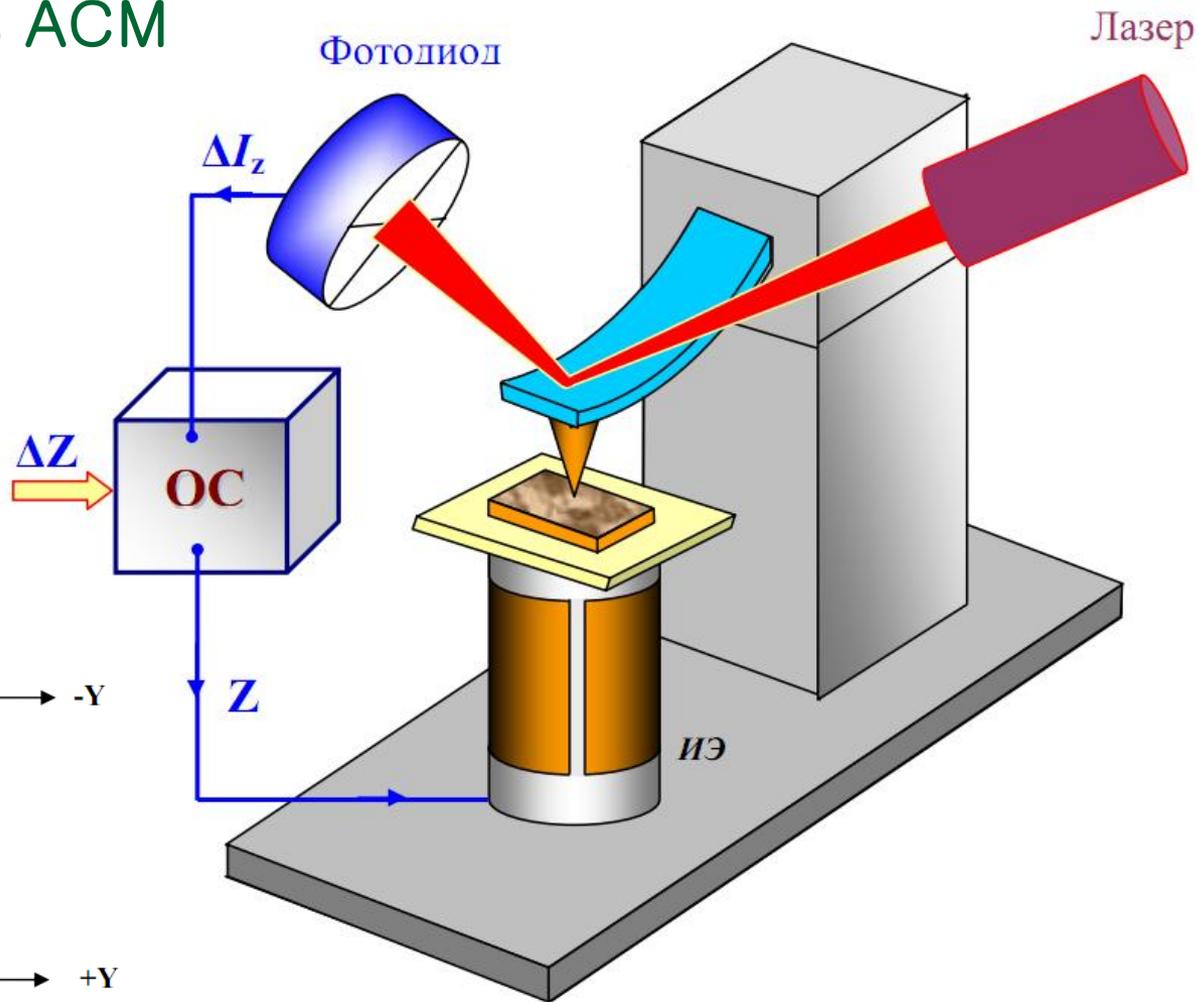


Общий вид зондового датчика с треугольным кантилевером

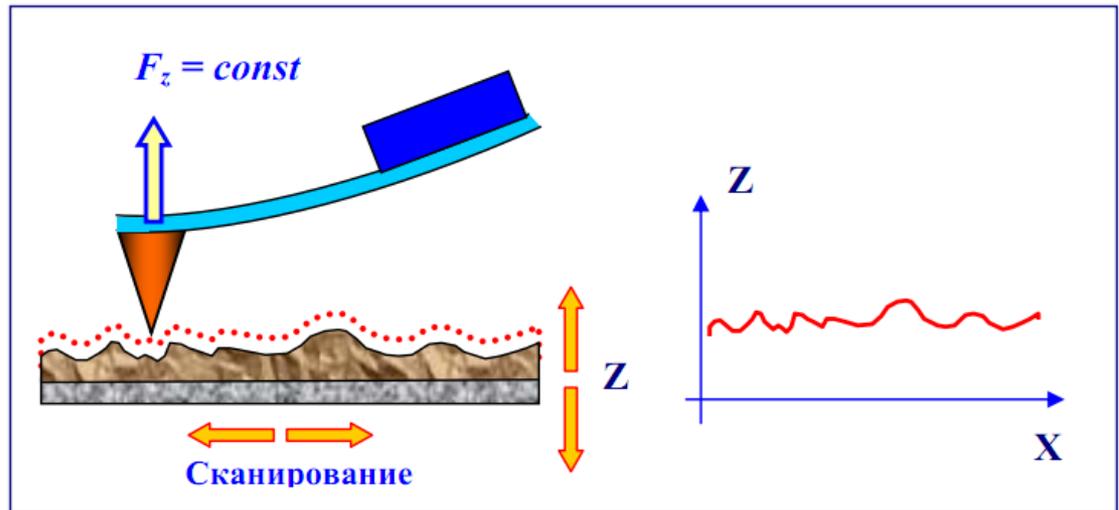
Обратная связь в АСМ



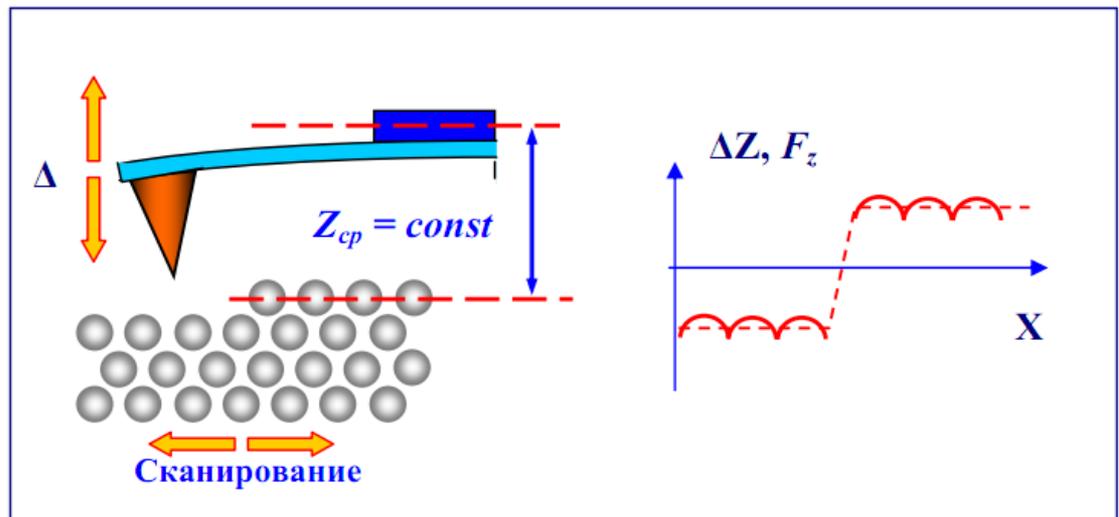
Трубчатый пьезосканер



Два приёма АСМ

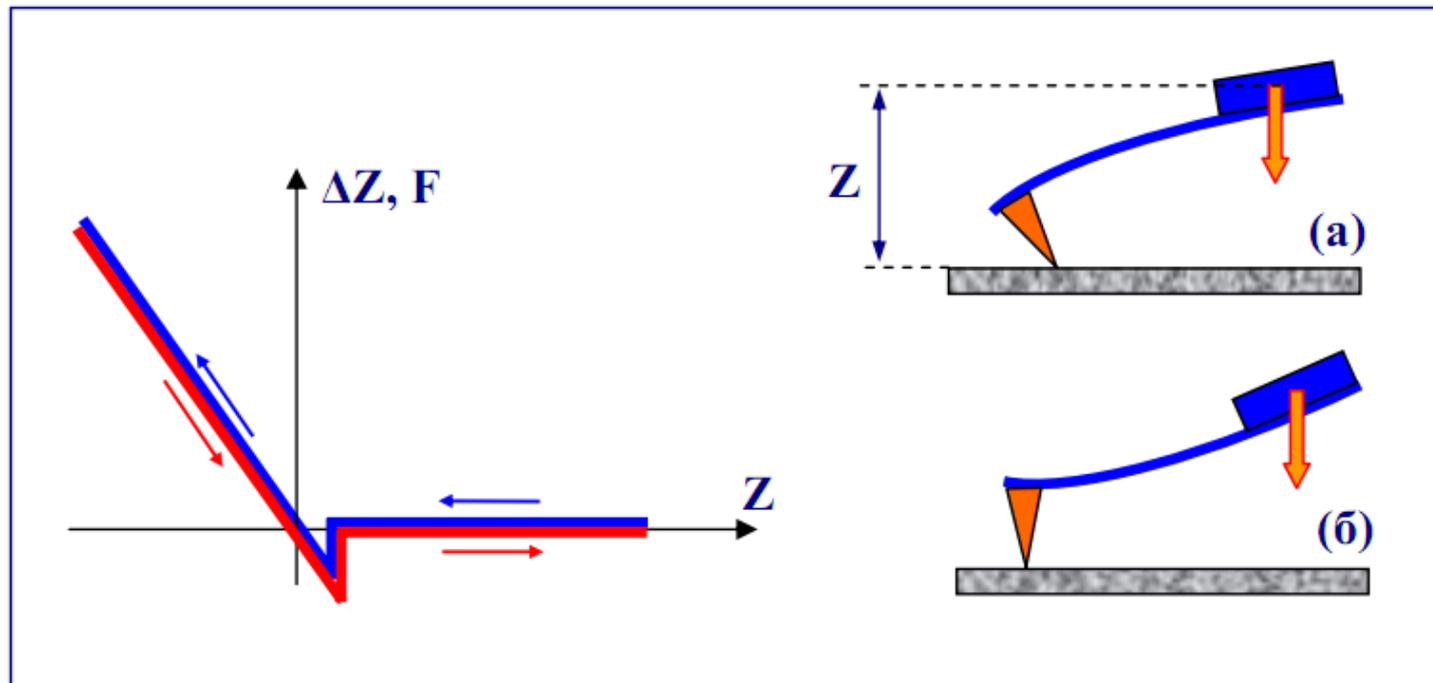


Формирование АСМ изображения при постоянной силе взаимодействия зонда с образцом



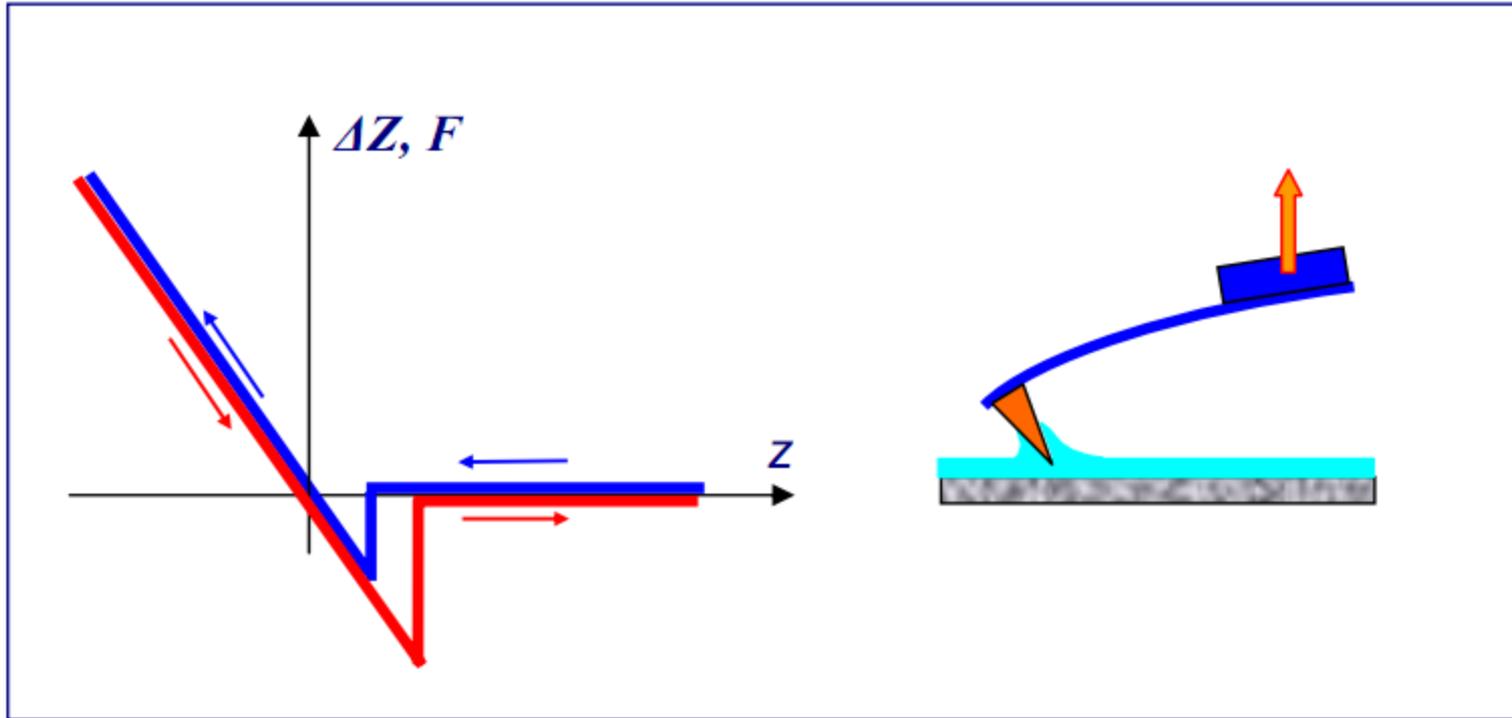
Формирование АСМ изображения при постоянном расстоянии между зондовым датчиком и образцом

Сигнал АСМ (в точке)



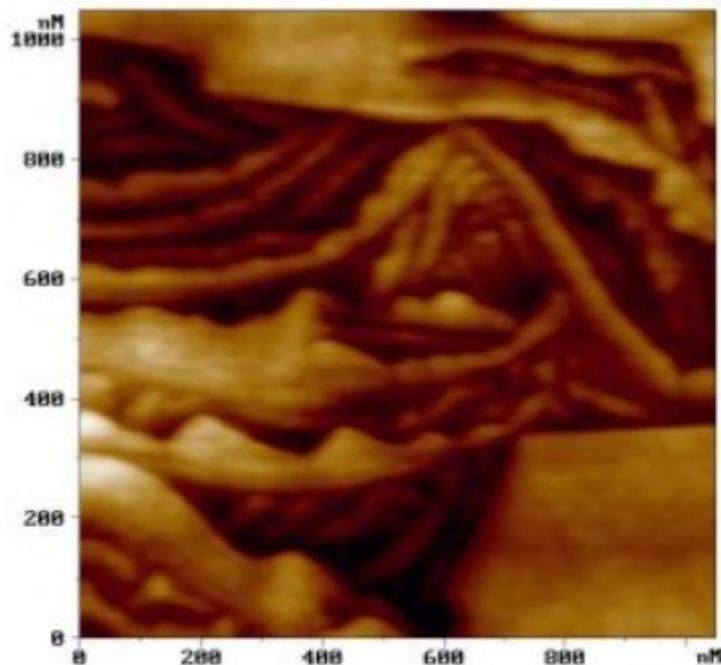
Схематическое изображение зависимости изгиба кантилевера (силы взаимодействия зонда с поверхностью) от расстояния Z между зондовым датчиком и поверхностью образца. Прямой и обратный ход показаны разным цветом

Сигнал АСМ (в точке)

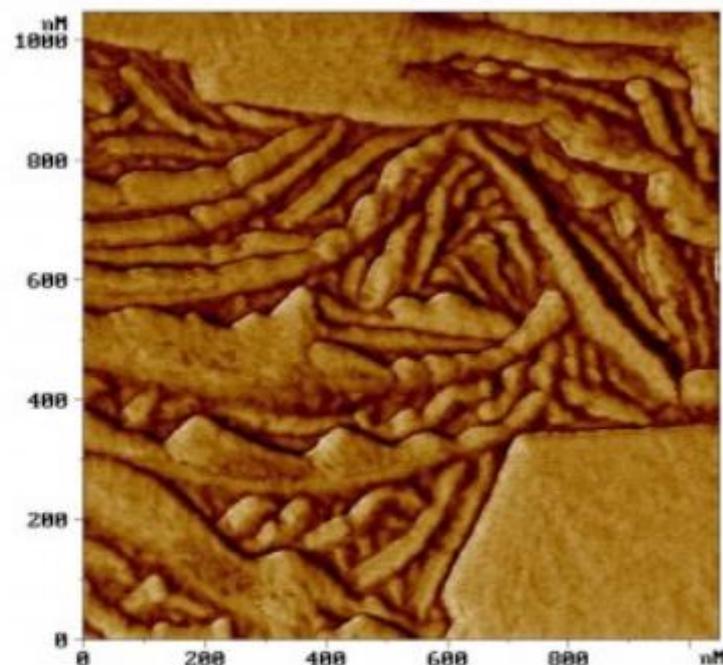


Схематическое изображение зависимости изгиба кантилевера от расстояния Z между зондовым датчиком и образцом, содержащим на поверхности адсорбированный слой жидкости.

Пример изображения АСМ



(а)



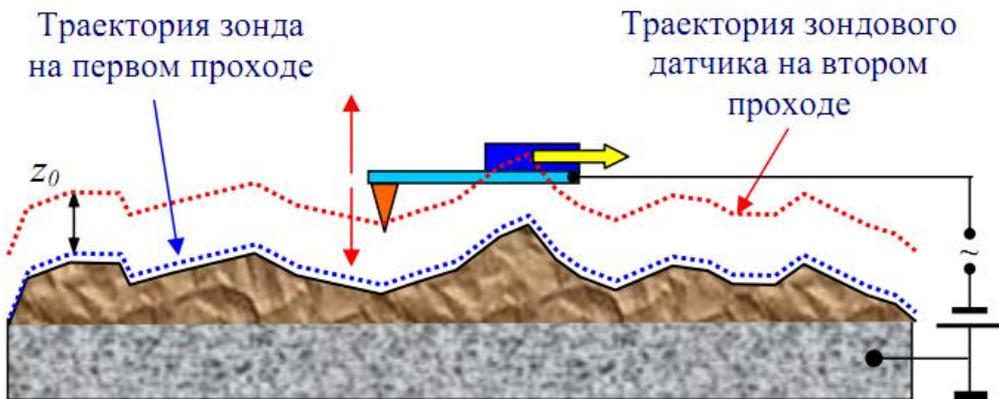
(б)

АСМ изображения участка поверхности пленки полиэтилена, полученные в "полуконтактном" ("tapping mode") режиме.

(а) - рельеф поверхности, полученный в режиме постоянной амплитуды

(б) - соответствующее распределение фазового контраста

Аналоги АСМ. Электросиловая микроскопия



Двухпроходная методика ЭСМ

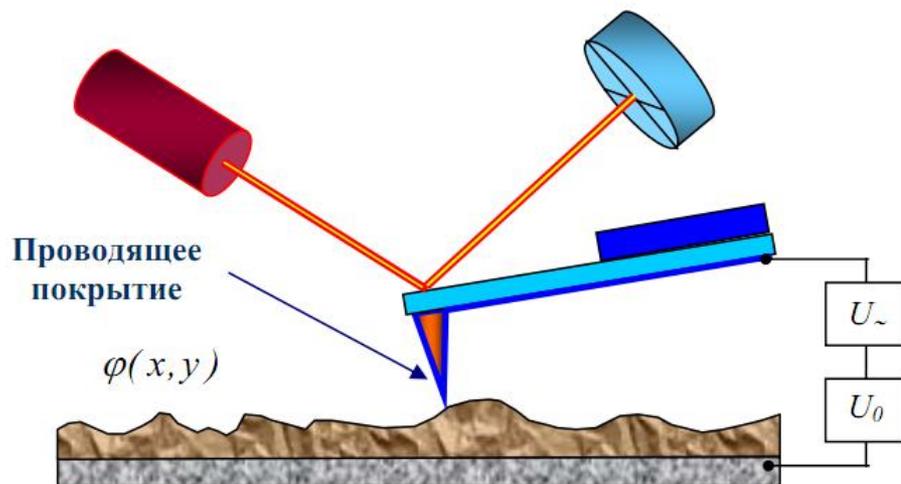
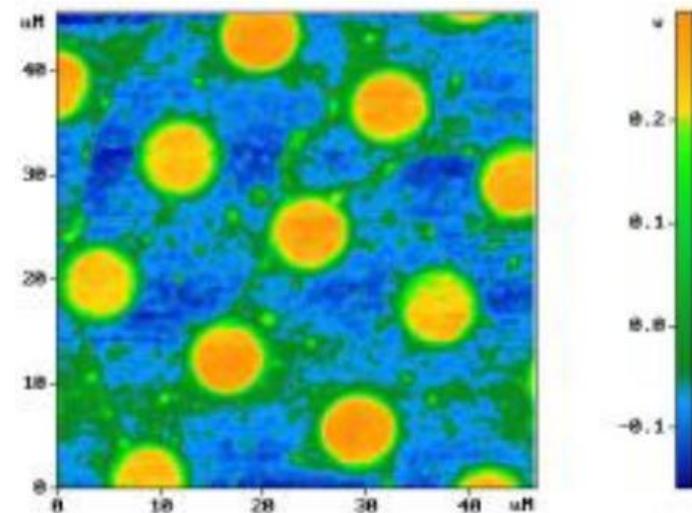


Схема измерения электрического взаимодействия зонда с образцом

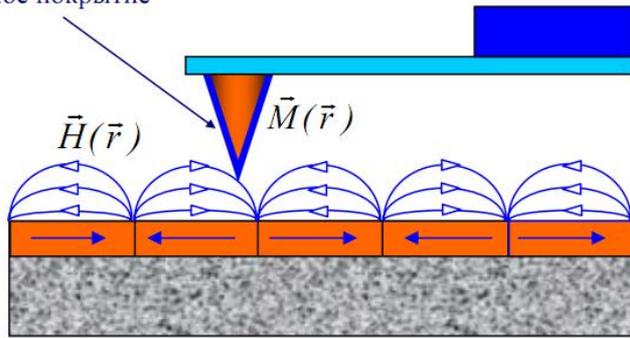
С помощью ЭСМ изучают диэлектрические свойства приповерхностных слоев (изучение приповерхностного потенциала)



Заспределение зарядов в пленке азобензола

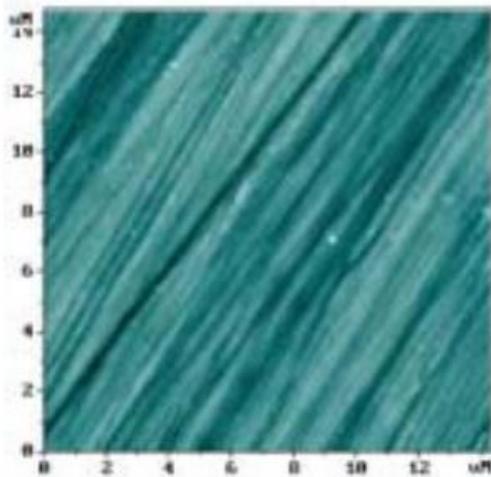
Аналоги АСМ. Магнитно-силовая микроскопия

Магнитное покрытие

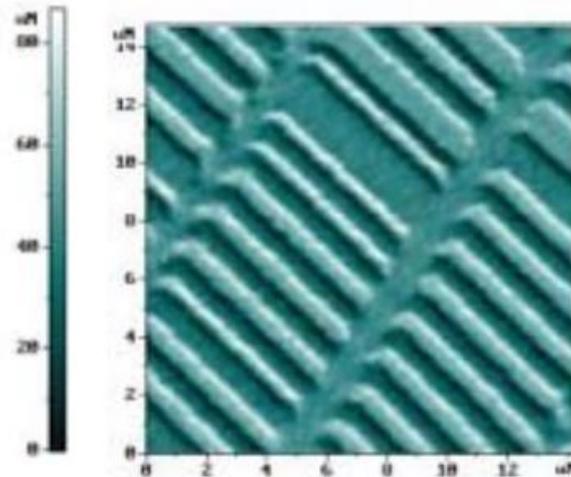


Зонд МСМ в магнитном поле образца

С помощью МСМ изучают локальные магнитные свойства образцов



(а)



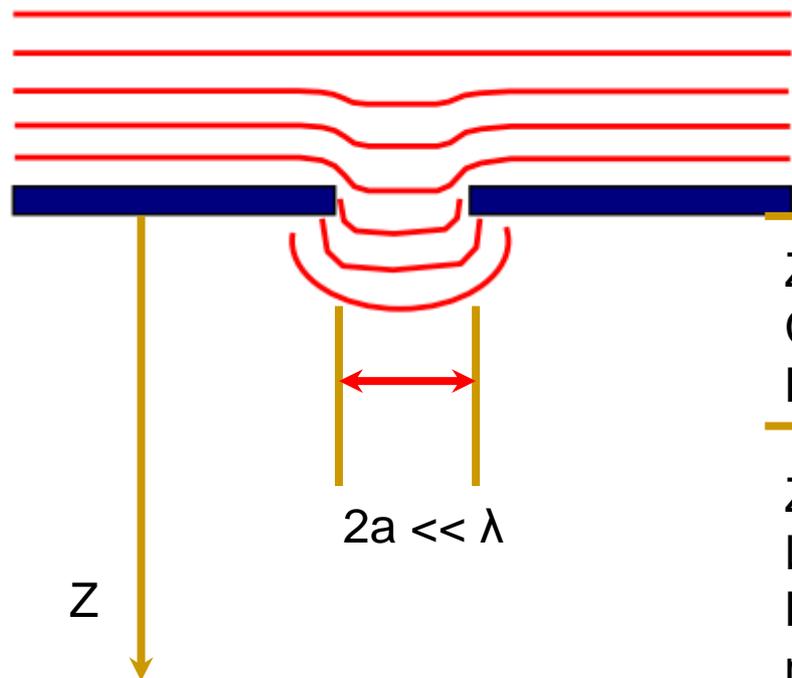
(б)

МСМ исследования поверхности магнитного диска:

- (а) – АСМ изображение рельефа поверхности;
- (б) – МСМ изображение

Ближнепольная оптическая микроскопия

Область исследования в БОМ



$Z < 100a$ ($Z \sim 10$ нм)

Субволновая (ближняя) область

Разрешение – 10 нм и менее

$Z > 100a$

Излучательная (дальняя) область

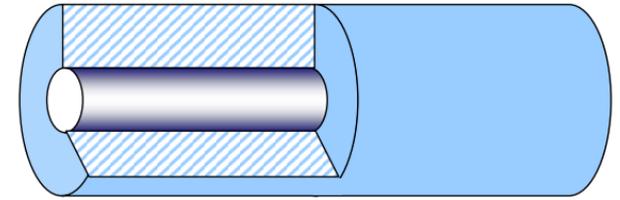
Предельный размер частиц $R \approx \lambda / 2n$

n – показатель преломления среды

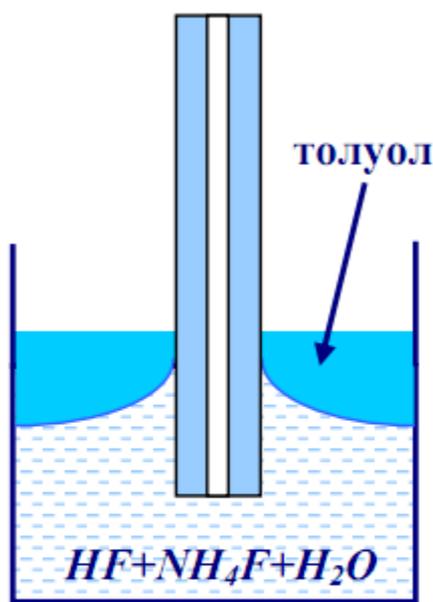
$R \sim 200 - 300$ нм

Интенсивность излучения $\sim 10^{-10} I_0$

Датчик БОМ



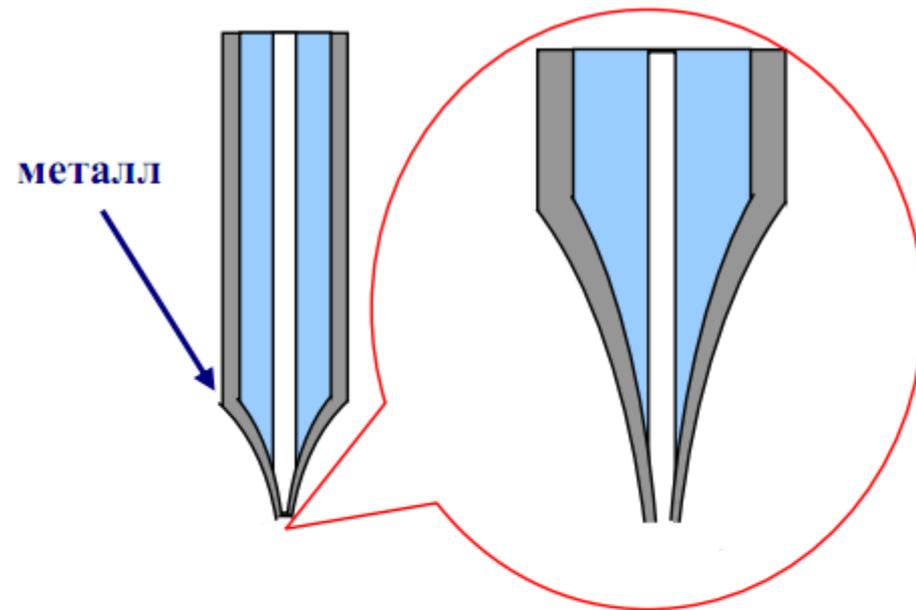
Схематическое изображение строения оптического волокна



(а)



(б)

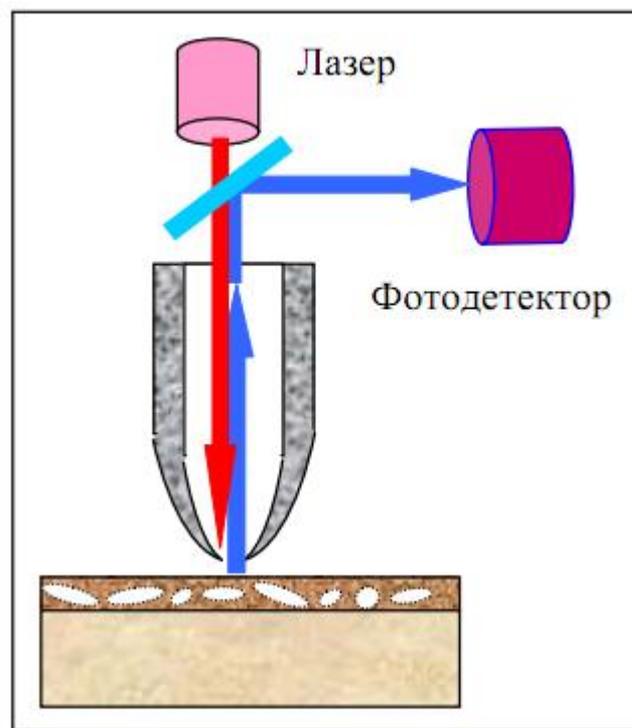
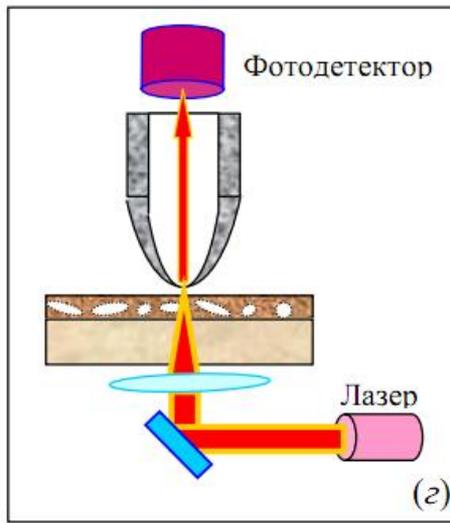
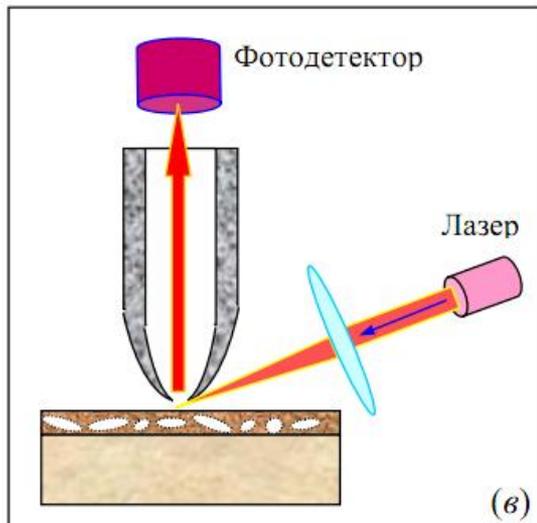
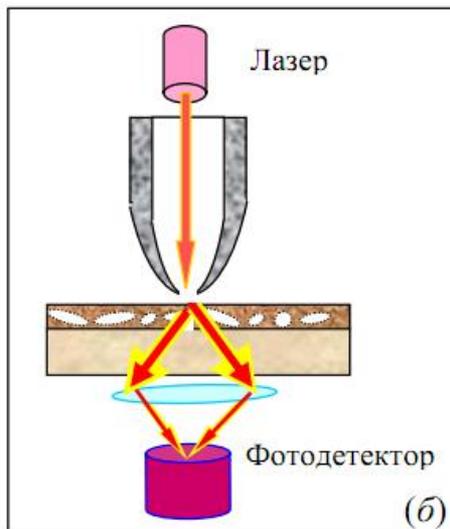
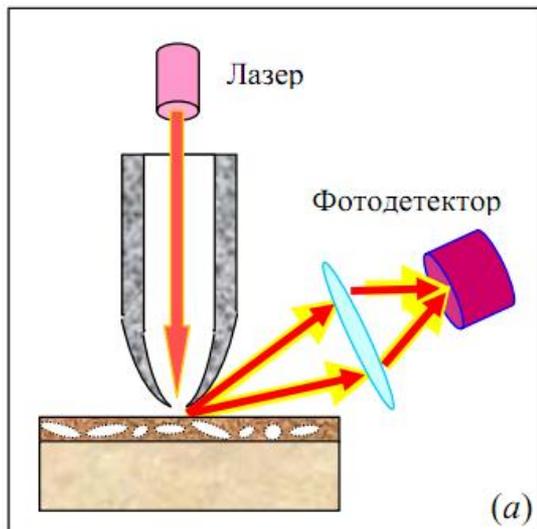


(в)

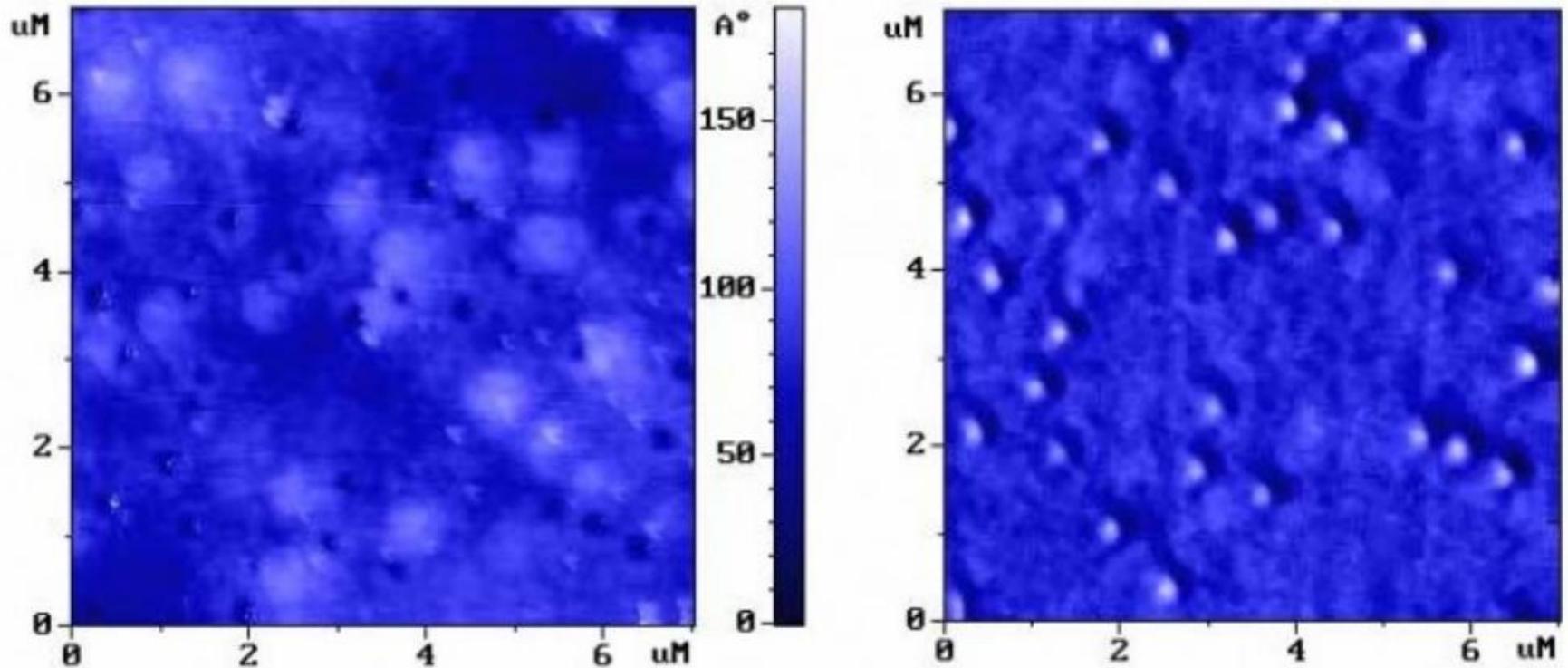
Изготовление БОМ зондов на основе оптического волокна:

- (а) – химическое травление волокна;
- (б) – вид кончика волокна после травления;
- (в) – напыление тонкой пленки металла.

Конфигурации БОМ



Сигнал АСМ (в точке)



“Shear force” АСМ изображение рельефа поверхности (слева) и ближнепольное оптическое изображение (справа) образца с квантовыми точками InAs