



Диагностика и методы исследования нанообъектов и наносистем

В.И. ПАНОВ

*МГУ им. М. В. Ломоносова
Физический факультет*





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.



Диагностика и методы исследования нанообъектов и наносистем

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



Оптическое разрешение

От миллиметров до нанометров

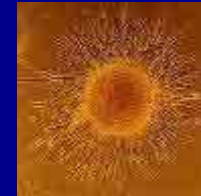


Глаз – разрешающая
способность 10^{-4} м



Лупа – разрешающая
способность 10^{-5} м

Оптический микроскоп
– разрешающая
способность 10^{-7} м



Сканирующий микроскоп
ближнего поля – разрешающая
способность 10^{-8} - 10^{-9} м

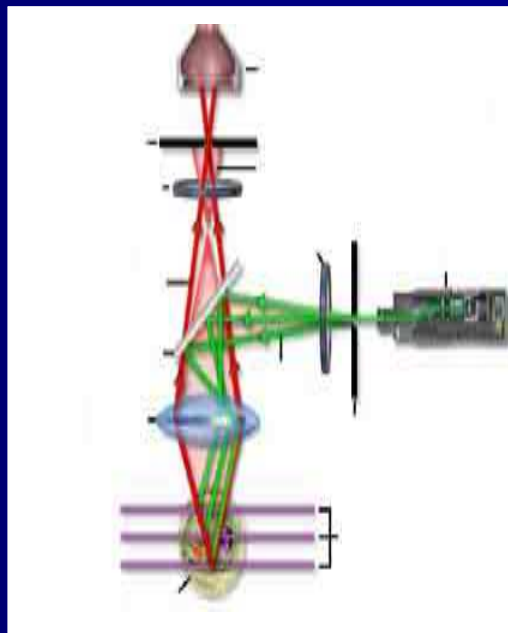




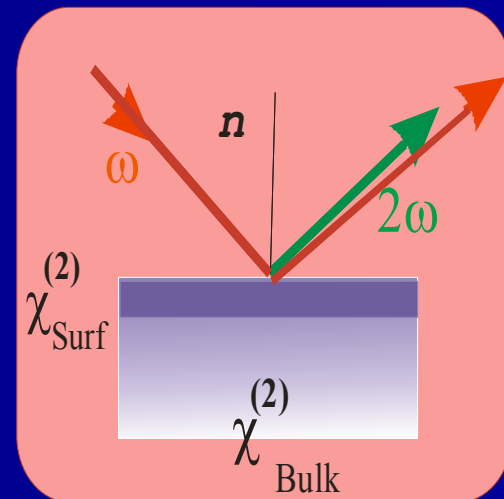
Оптические и нелинейно-оптические методы исследования и диагностики

Оптическая микроскопия: инверсия, наблюдение в проходящем и отраженном свете, фазовый контраст, темное поле и др.

Конфокальная микроскопия



Нелинейно-оптические методы





Конфокальная микроскопия

Возможности, достоинства, особенности и ограничения

Конфокальная микроскопия обеспечивает увеличение контраста изображения за счет фокусирования излучения подсветки с помощью объектива в микрообласть анализа и за счет размещения диафрагмы в плоскости наблюдения перед фотодетектором. Такое увеличение контрастности приводит к возможности разрешения объектов, имеющих различие в интенсивности до 200:1.

В конфокальной микроскопии несколько улучшается разрешение в плоскости объекта (в 1.5 раза) и достигается высокое разрешение вдоль оптической оси.

Конфокальная микроскопия позволяет в ряде случаев получать трехмерные реконструкции объектов.

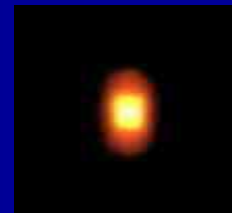
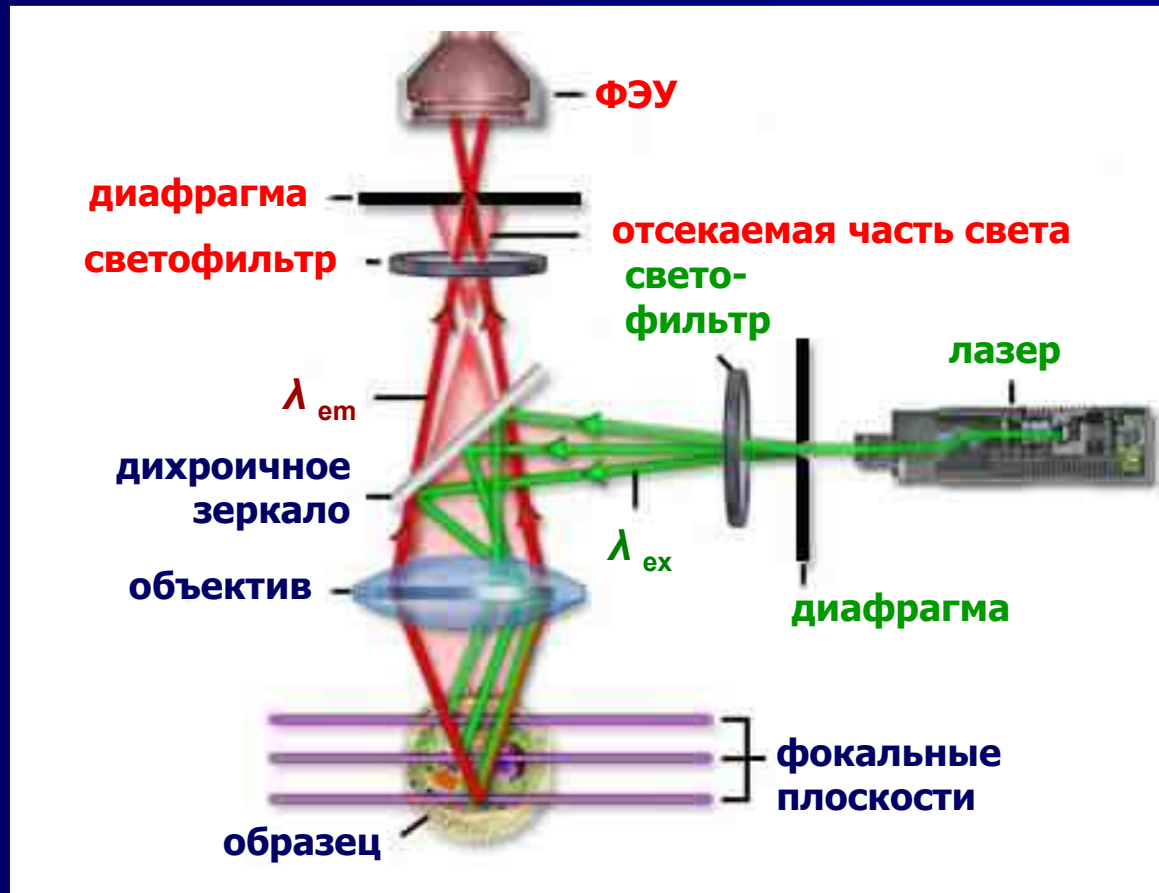
Конфокальная микроскопия требует применения схем сканирования либо путем перемещения образца либо путем перестройки оптической системы. Применение сканирования позволяет увеличить поле зрения по сравнению с обычными оптическими микроскопами.

Пространственное разрешение конфокальной микроскопии остается того же порядка, что и пространственное разрешение обычной («широкопольной») оптической микроскопии.



Конфокальный микроскоп

Принцип действия – пространственная фильтрация излучения, идущего не из фокуса

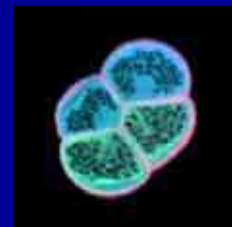


$$r_{\text{lat}} = \frac{0.6\lambda}{NA}$$

$$r_{\text{lat}} = \frac{0.4\lambda}{NA}$$

$$r_{\text{axial}} = \frac{2\lambda h}{NA^2}$$

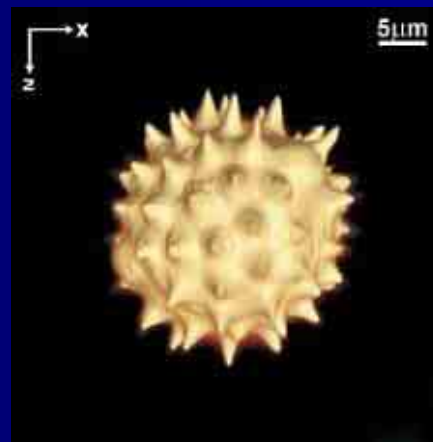
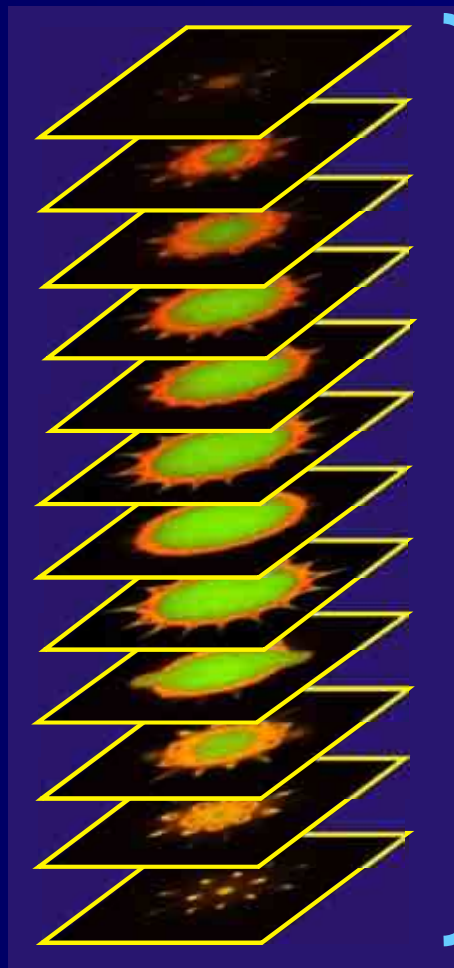
$$r_{\text{axial}} = \frac{1.4\lambda h}{NA^2}$$



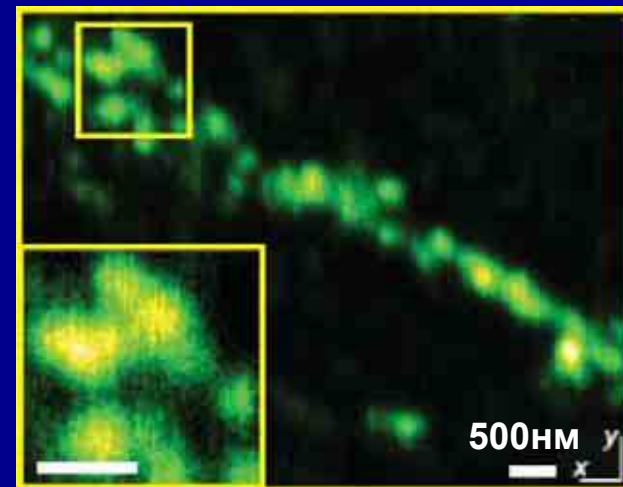


Конфокальный микроскоп

Самое главное преимущество –
возможность построения трехмерных изображений



Реконструированное
3D-изображение
зерна пыльцы



Конфокальное изображение
везикул в синапсах

Повышение контраста
изображения за счет отсутствия
фоновой засветки от участков,
расположенных не в фокусе



Сверхразрешающая оптическая микроскопия

От оптической микроскопии к оптической наноскопии

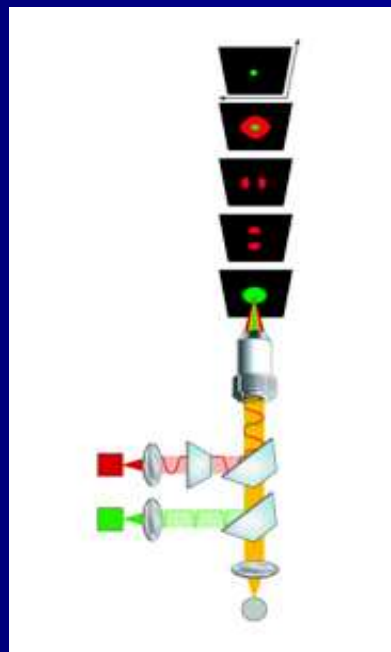


Leica TCS STED

Первый коммерчески доступный световой микроскоп, позволяющий изучать детали объектов с разрешением, превышающим 100 нм:

- XY-разрешение 90 нм
- Z-разрешение около 500 нм

Leica Microsystems, Германия



Принцип действия
STED:
принудительное
обеднение
возбужденных
уровней лазерным
импульсом



Сравнение STED-
изображения и
обычного
конфокального
изображения бактерии



Конфокальные микроскопы

Два примера из широкого спектра приборов, предлагаемых производителями



Nanofinder S

3D сканирующий конфокальный микроскоп со спектрометром
Одновременный / многофункциональный анализ:

- рамановские измерения
- люминесцентные измерения
- измерения лазерного отражения и пропускания

СОЛАР ТИИ, Беларусь



Olympus FLUOVIEW

Семейство конфокальных лазерных сканирующих биологических микроскопов

Наблюдение широкого круга объектов:

- работа одновременно с тремя возбуждающими лазерами
- одновременное детектирование люминесценции в четырех спектральных диапазонах и в проходящем свете

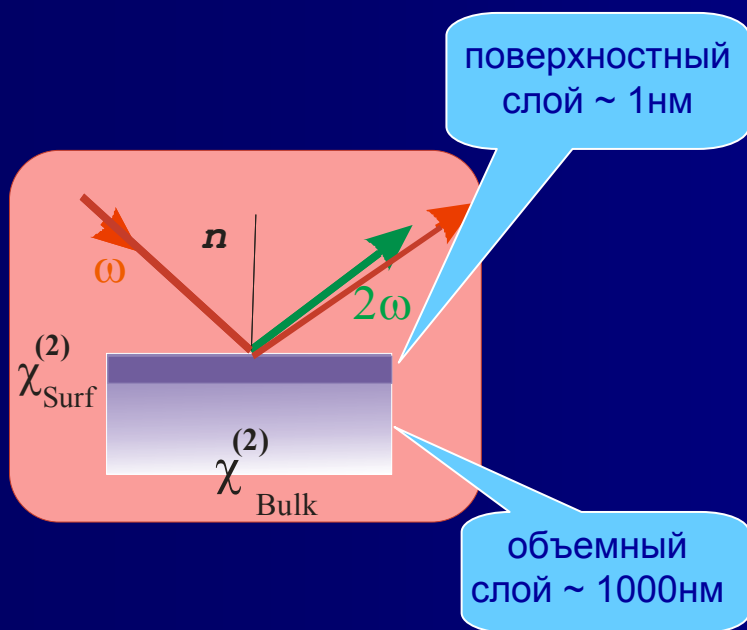
Olympus Optical Co., Япония



Нелинейно-оптические методы диагностики поверхности и наноструктур

В линейной оптике в волновой зоне отраженный свет содержит информацию от слоя толщиной порядка длины световой волны ~ 1000 нм включая поверхностные слои ~ 1 нм. Поэтому вклад сигнала от поверхности и поверхностных наноструктур мал на фоне отраженного света.

При нелинейно-оптическом отражении свет может содержать информацию в основном от поверхностного слоя.

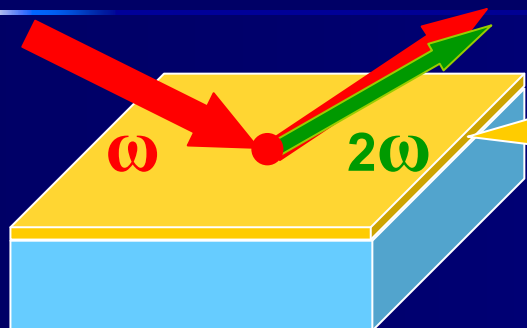


Метод основан на нелинейно-оптическом отражении света с удвоением оптической частоты.

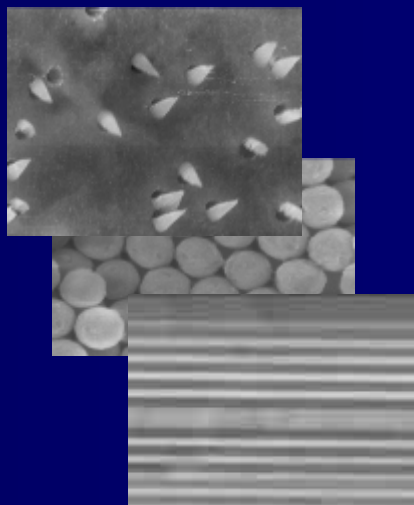
Информация о морфологии, симметрии, спектре поверхностных состояний и др. извлекается из спектров интенсивности и фазы отраженной второй гармоники света, источником которой является поверхностный слой с толщиной не больше 1 нм.



Нелинейно-оптические методы диагностики поверхности и наноструктур



Формирование второй гармоники света на поверхности связано с симметричными правилами запрета для процессов генерации второй гармоники в объеме centrosymmetric сред.



Особенности метода:

Дистанционность – возбуждение лазерным пучком.
Нелокальность – латеральное разрешение определяется шириной падающего пучка оптического излучения.

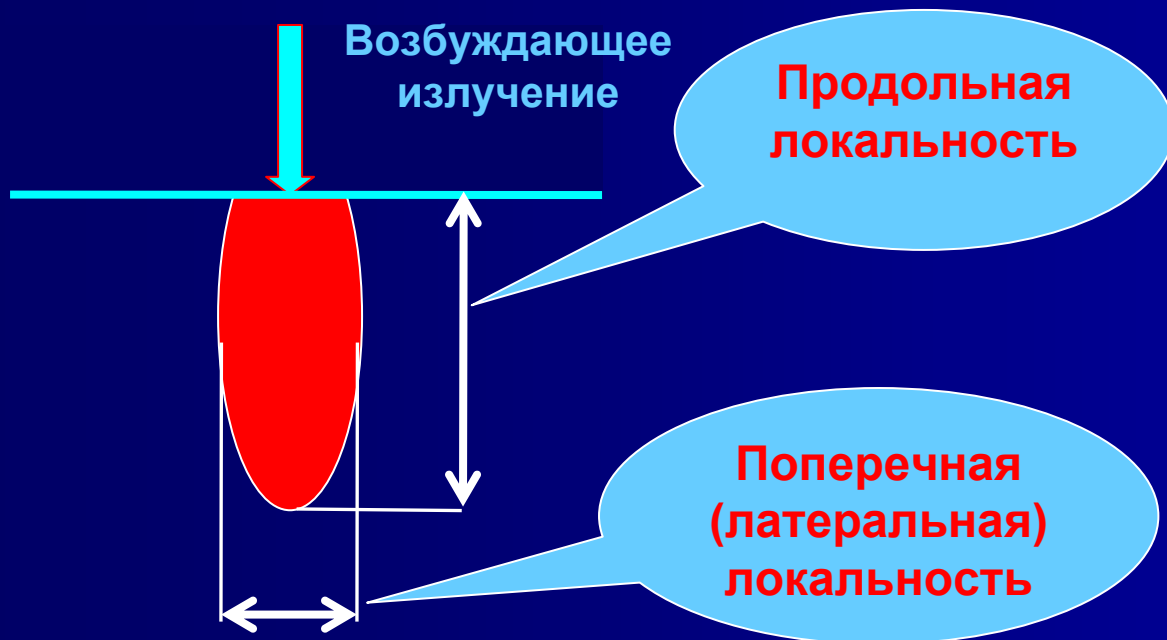
Области применения метода:

Исследование, диагностика и картирование поверхности, поверхностных наноструктур, метаматериалов и фотонных кристаллов.



Нанодиагностика и локальный анализ с помощью электронных и ионных пучков

Локальность - в диагностике это размер области изучаемого объекта, с которой регистрируется сигнал, характеризующий измеряемые параметры объекта.





Использование электронных пучков для диагностики и микроанализа

Диагностика

В основном упругие
взаимодействия

**Просвечивающая
электронная
микроскопия (ПЭМ)**

**Сканирующая
электронная
микроскопия (СЭМ)**

Электрoнография

Микроанализ

Неупругие взаимодействия

**Спектроскопия
характеристических потерь
энергии электронов (СХПЭЭ)**

**Электронная оже-
спектроскопия (ЭОС)**

**Катодолюминесцентный
микроанализ (КЛМА)**

**Рентгеноспектральный
микроанализ (РСМА)**

Характеристические
потери
энергии
электронов

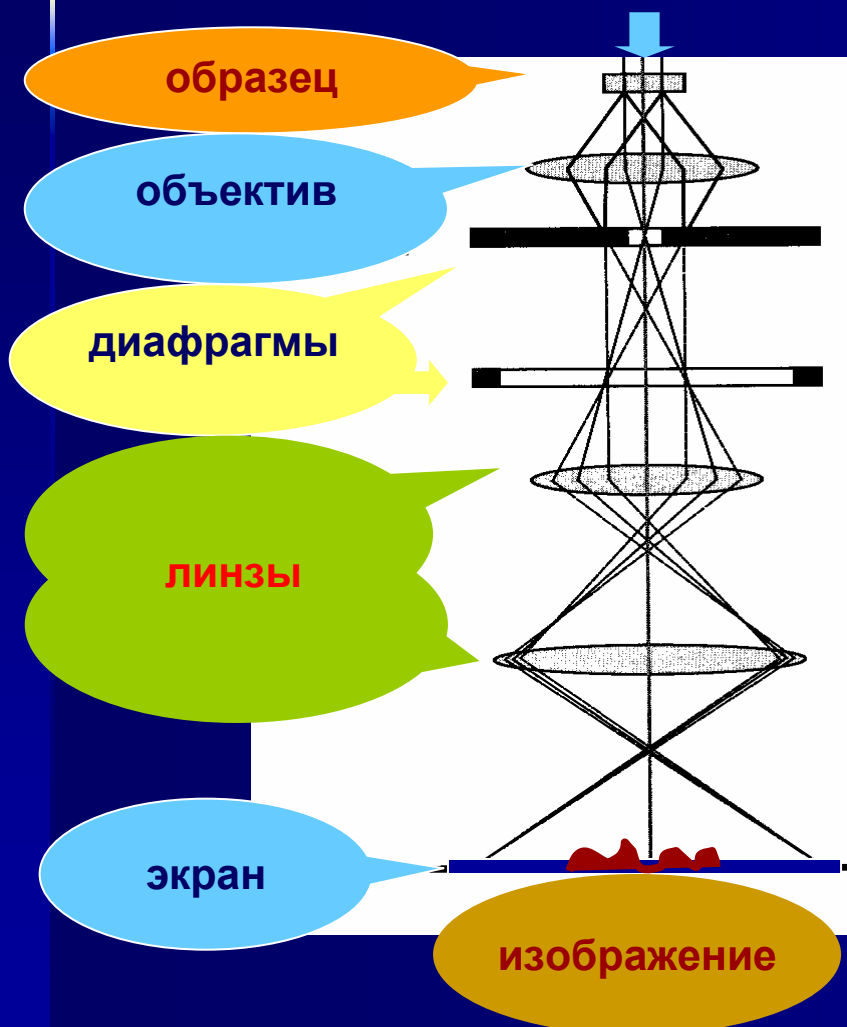
Эмиссия
вторичных
электронов

Испускание
электромагнитного
излучения



Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ)

Схема ПЭМ

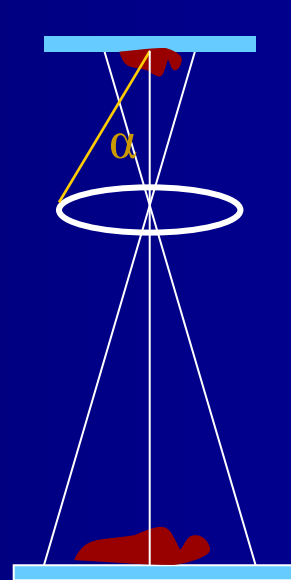


$E \sim 10 \text{ кэВ} - 3 \text{ МэВ}$

Соотношение Де Бройля $\lambda = h/mv$

Критерий Рэлея $\delta = \frac{0.61\lambda}{n \cdot \text{Sin}\alpha}$

Дифракционный предел разрешения



$\delta = 0,15 \text{ нм при } 200 \text{ кэВ}$

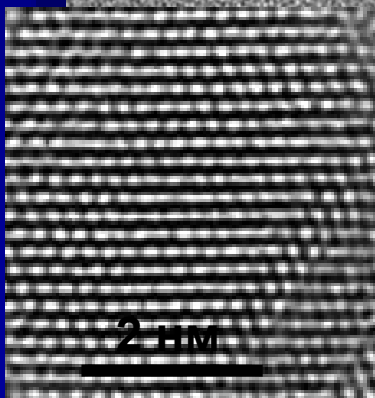
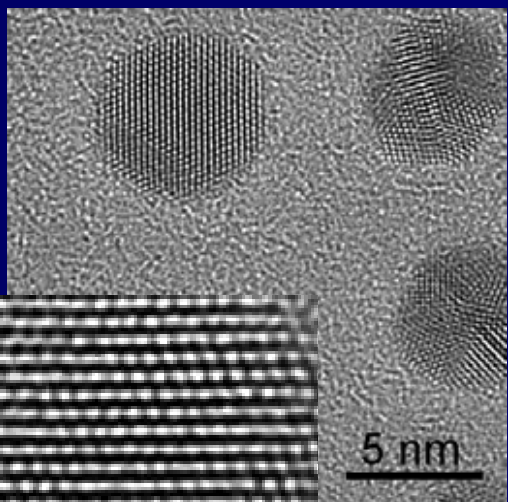
$\Lambda = 0,0025 \text{ нм}$

Реальное разрешение определяется аберрациями и другими эффектами, искажающими форму сечения электронного пучка (зонда)

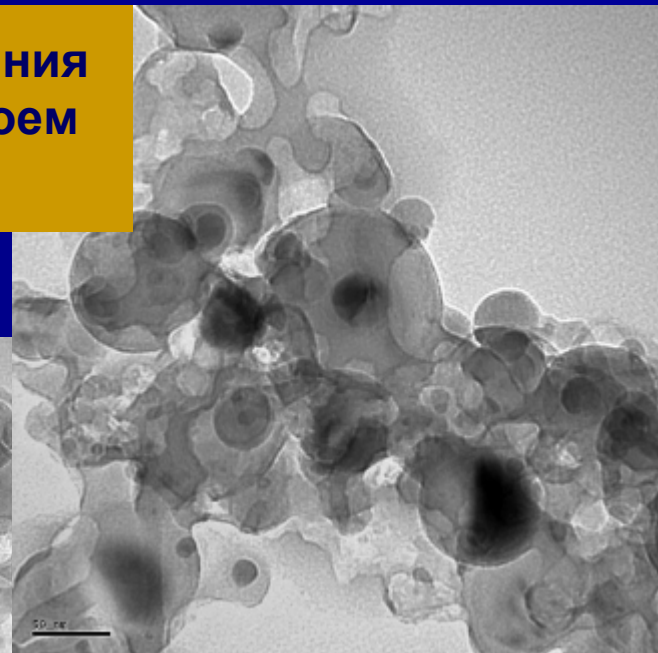
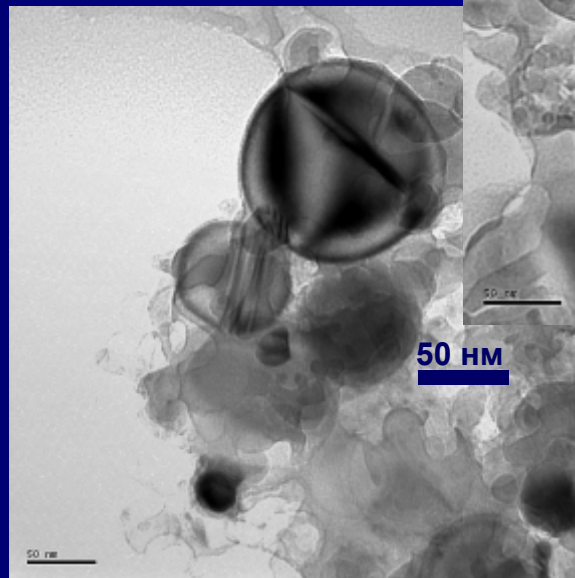


Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ)

Нанокристаллы,
квантовые точки в
полупроводниковой
матрице



Частицы кремния
покрытые слоем
 SiO_2



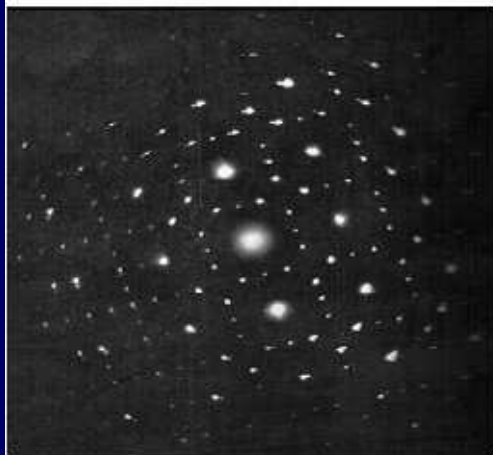
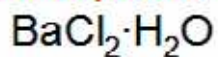
Образцы до
 $D \sim 0.01 \mu\text{m}$,
ультратонкие
срезы до 10 -
100 нм.



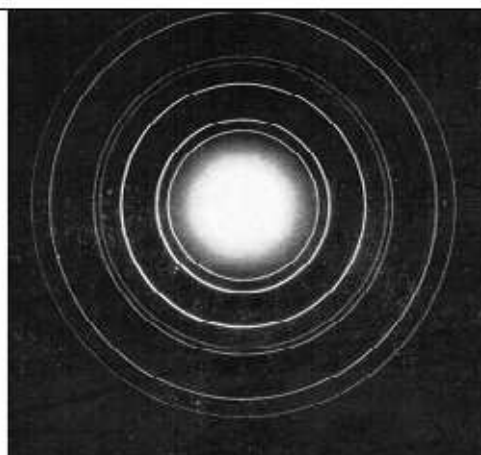
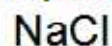
Электроннография

Дифракционный метод изучения структуры вещества, основанный на анализе рассеяния образцом ускоренных электронов. Электроны, прошедшие через образец (толщиной не более нескольких микрон) формируют дифракционную картину (электроннограмму), которая регистрируется.

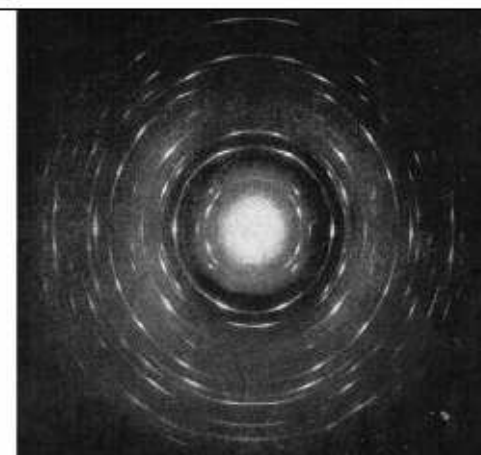
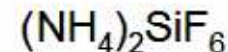
Монокристалл



Поликристалл



Текстура



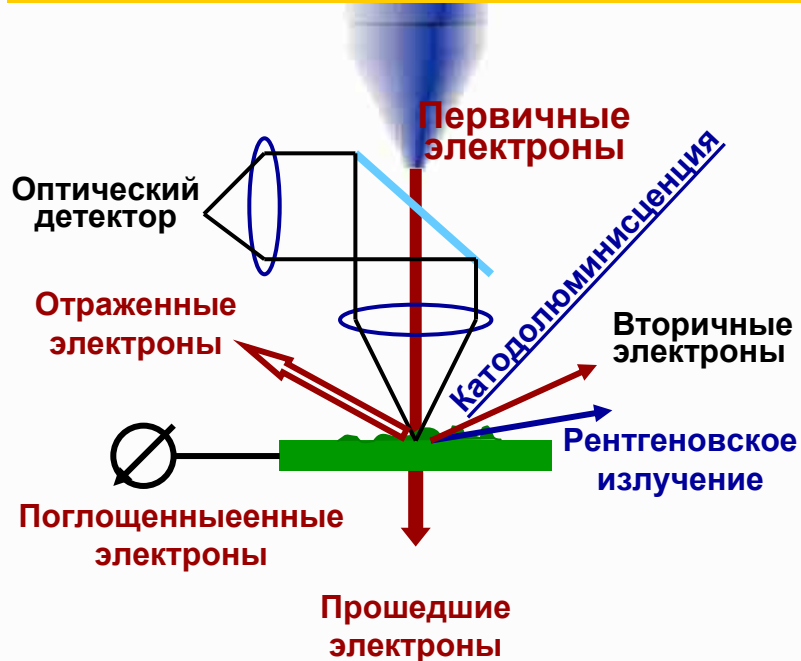


Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)



Z-контраст,
фазовые
неоднородности

Схема регистрации информации в СЭМ



Химический состав,
генерационно-
рекомбинационные
параметры

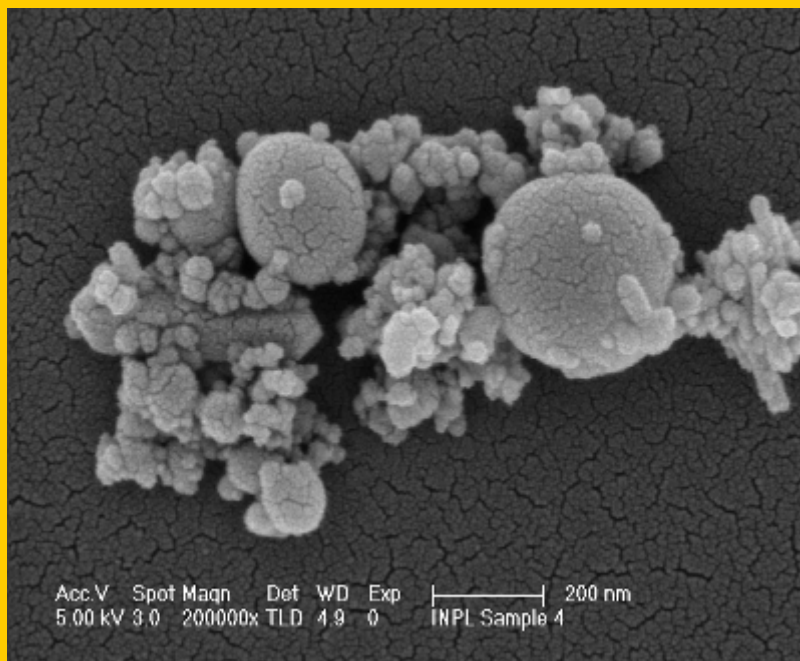
Рельеф поверхности
ЭОС - элементный
состав

Локальный
химический
состав



Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) (примеры использования)

Конгломераты



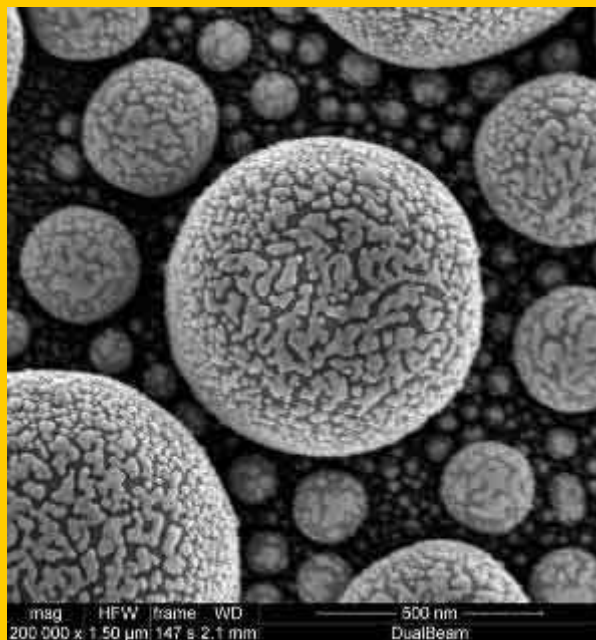
СЭМ изображение оксида меди



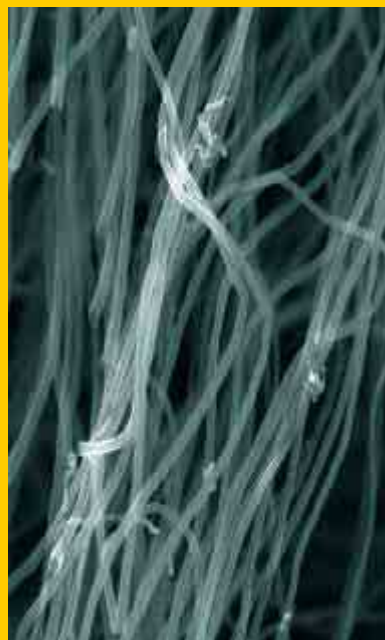


Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) (примеры использования)

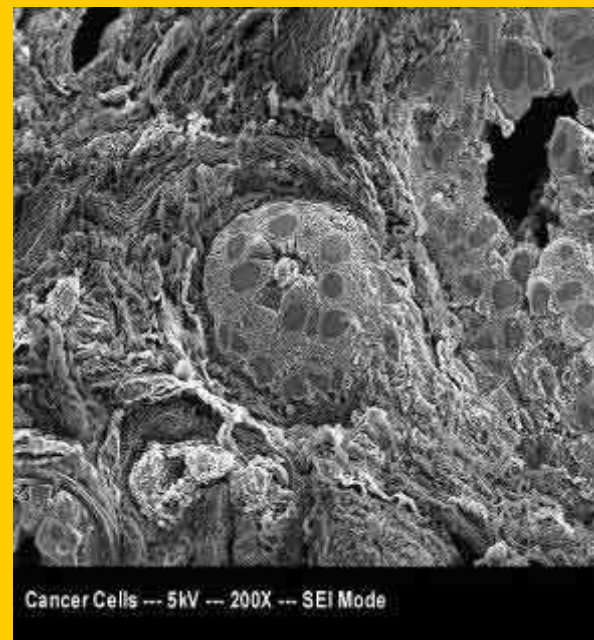
Шарики Sn,
декорированные Au



Углеродные
нанотрубки



Изображение раковой
клетки



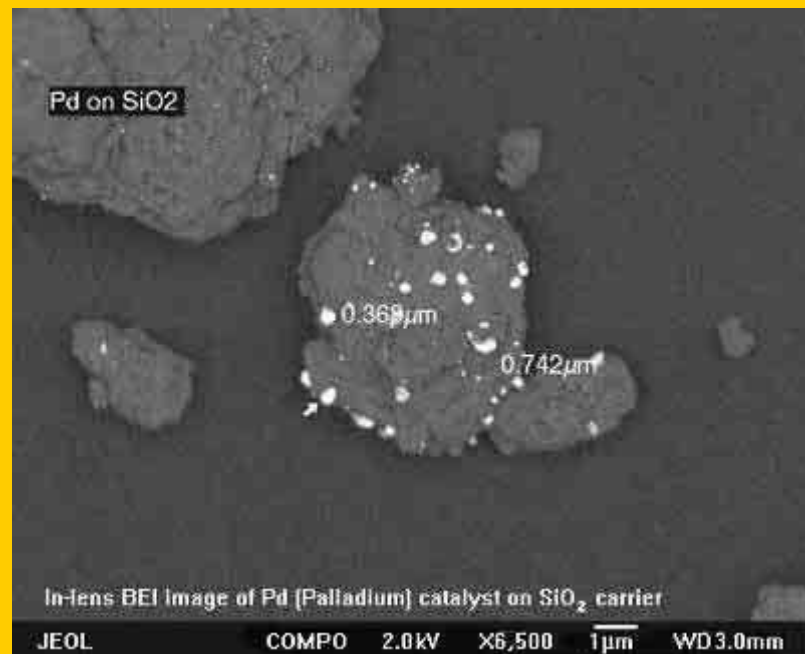


Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) (примеры использования)

Коррозия поверхности
металла



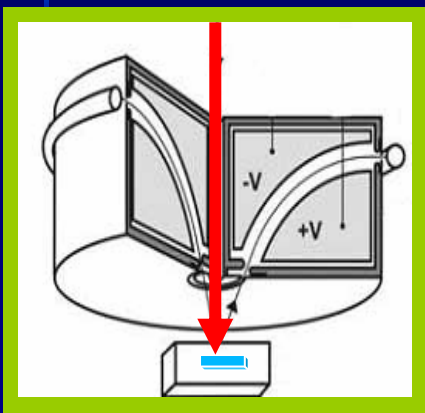
Z-контраст.
Pd- катализатор на SiO₂



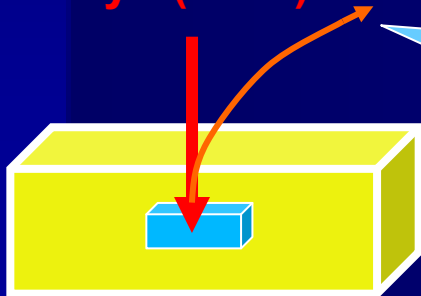


Неразрушающая подповерхностная микро и нанотомография в отраженных электронах

Энергетический спектрометр



Электронный луч (РЭМ)



Глубина зондирования под непрозрачной поверхностью: Min – 1нм; Max – 3000нм.

Измеряемые геометрические параметры объекта, скрытого под поверхностью :

по высоте

(по нормали к поверхности) – 1нм ;

по горизонтали

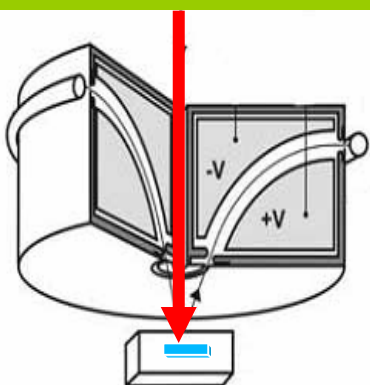
(в плоскости поверхности) – 30нм

обратнорассеянные
электроны, собираемые
в спектрометре

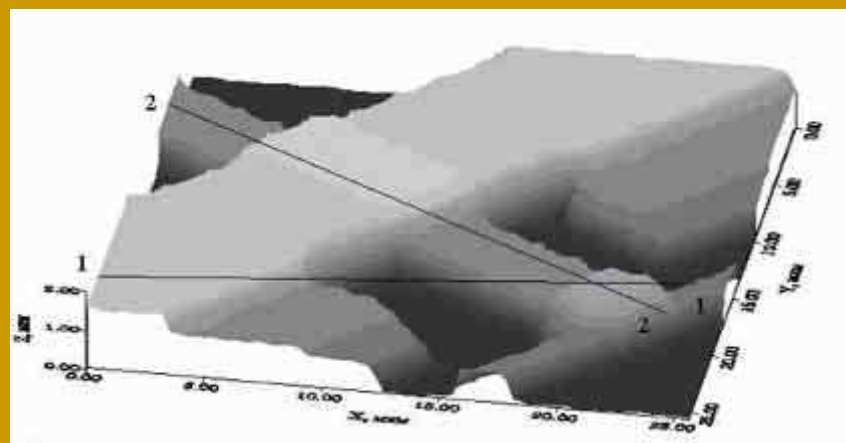


Подповерхностная микро и нанотомография в отраженных электронах

Энергетический
спектрометр



Реконструированное трехмерное
изображение элемента микросхемы



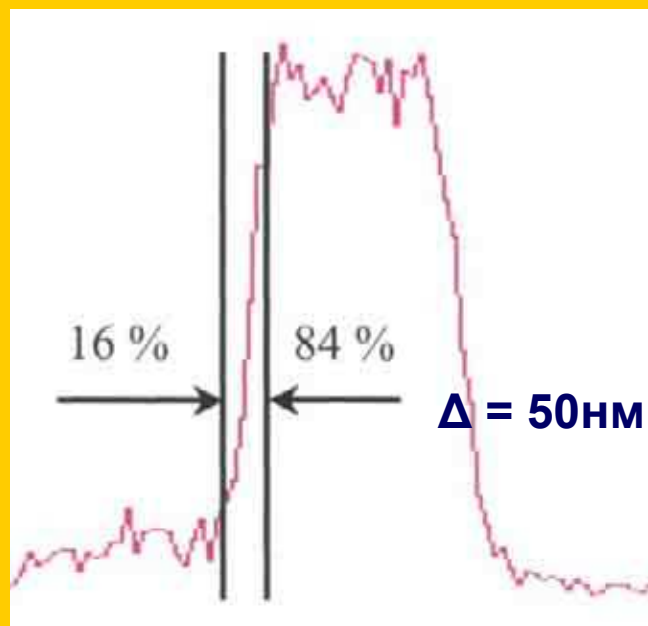


Использование ионных пучков



Масс-спектрометрия вторичных ионов

Латеральное распределение Cl на кристалле галогенида Ag





Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ) и нанотехнологии – краткая историческая справка

- 1959 Р. Фейнман – нанотехнология – 1 атом – носитель информации.
- 1966 (1971) Создание первой модели туннельного профилометра (R.Young).
- 1982 Создание СТМ, наблюдение атомных ступенек. (G. Binning, H. Rohrer).
- 1983 СТМ наблюдение атомной структуры поверхности Si (111) 7x7 (G. Binning, H. Rohrer, Ch. Gerber, E. Weibel).
- 1984 Создание СОМБП (D. Pohl, et al., A. Lewis et al.).
- 1986 Создание АСМ (G. Binning, C. Quate, Ch. Gerber).
- 1986 Нобелевская премия по физике за СТМ (G. Binning, H. Rohrer).
- 1987-1989 Начало массового производства СЗМ.

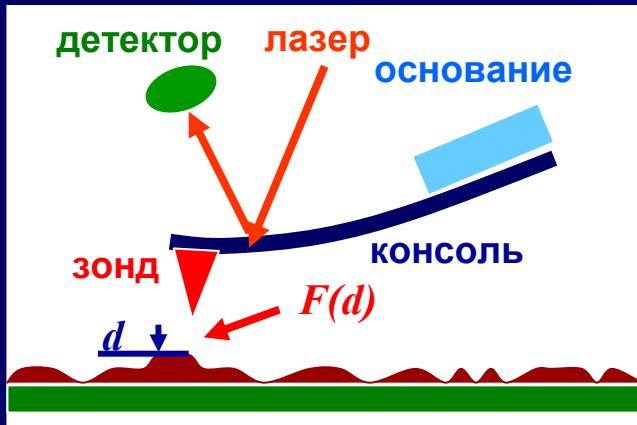
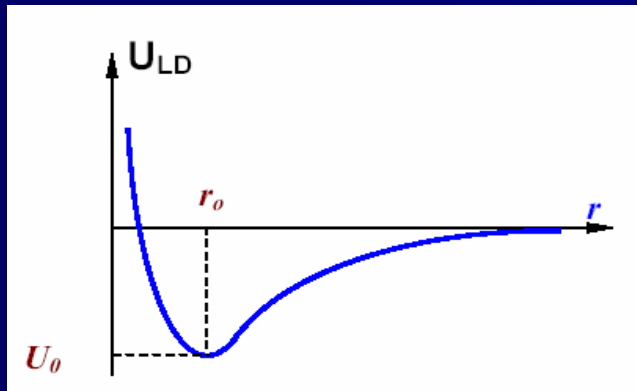


Основные методы сканирующей зондовой микроскопии и спектроскопии

- Сканирующая туннельная микроскопия и спектроскопия.
- Сканирующая силовая микроскопия (атомно-силовая микроскопия и спектроскопия (АСМ), магнитная силовая микроскопия (МСМ), электросиловая микроскопия (ЭСМ) и др.).
- Сканирующая оптическая микроскопия и поляриметрия ближнего поля.
- Другие СЗМ использующие различные методы и методики: акустическое воздействие, методика емкостных измерений, регистрация температуры, тока проводимости и др.



Принцип работы атомно-силового микроскопа (АСМ)



Взаимодействие двух атомов



Потенциал Леннард-Джонса

$$U(r) \sim \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-12} - B \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-6}$$

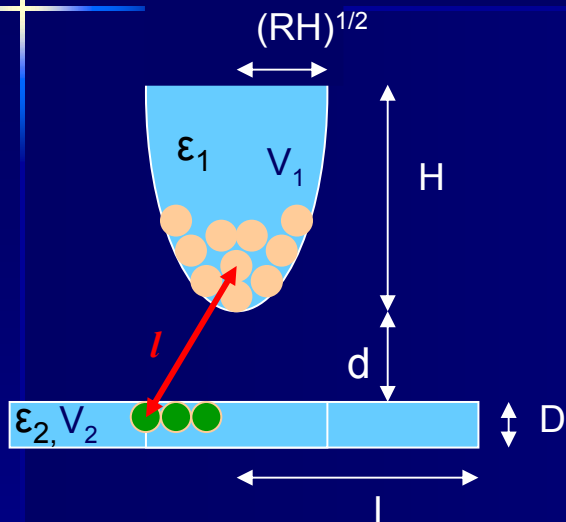
Отталкивание

Притяжение



АСМ микроскопия.

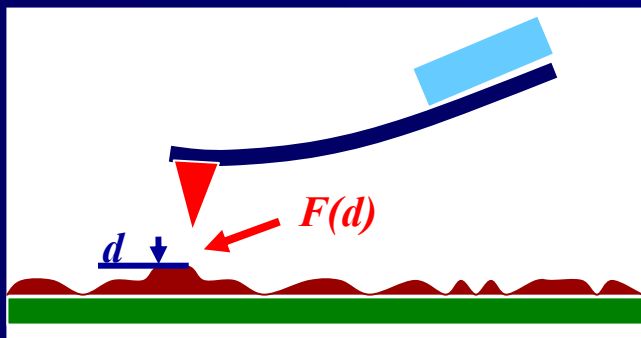
Молекулярные взаимодействия между острием и поверхностью



Полная сила взаимодействия $F(d)$ между острием и плоскостью складывается из обменных сил отталкивания (для расстояний d менее 0.1-0.3 нм) и В-д-В сил притяжения ($d > 0.3$ нм):

$$F(d) \approx \frac{\alpha N}{(\Delta + d)^{13}} - \frac{\pi C R}{(\Delta + d)^2}$$

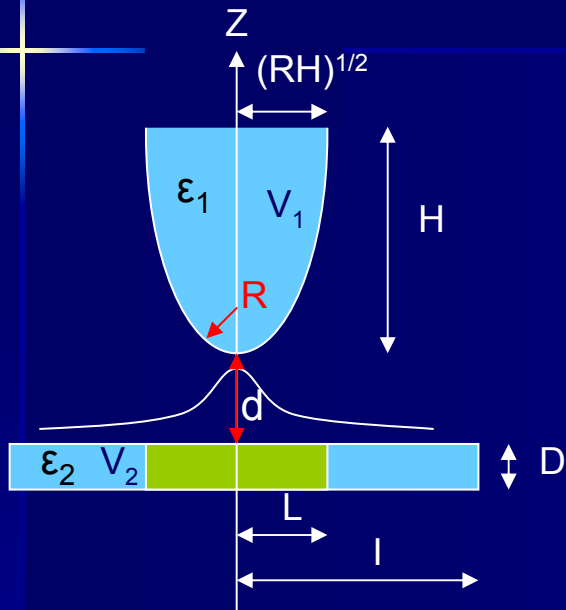
α – константа обменного взаимодействия, N – число атомов, Δ – локальная деформация. C – В-д-В константа, R – радиус острия.



Формулы служат для определения констант межатомного взаимодействия и вычисления предельных величин латерального разрешения АСМ.



Латеральное разрешение АСМ

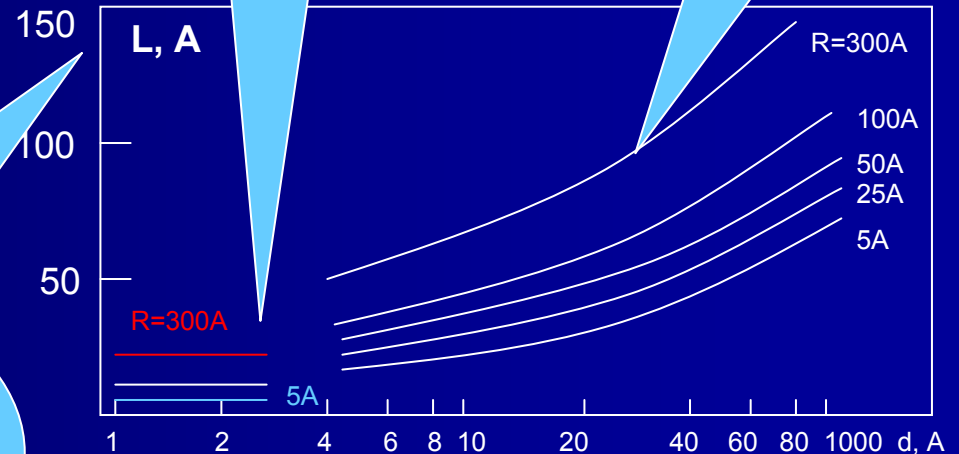


Зависимость L от радиуса острия и от расстояния до поверхности. L – область пластины под острием, на которую действует 70% от полной силы $F(d)$

Латеральное (продольное) разрешение L вычисляется из формулы силы $F(d)$

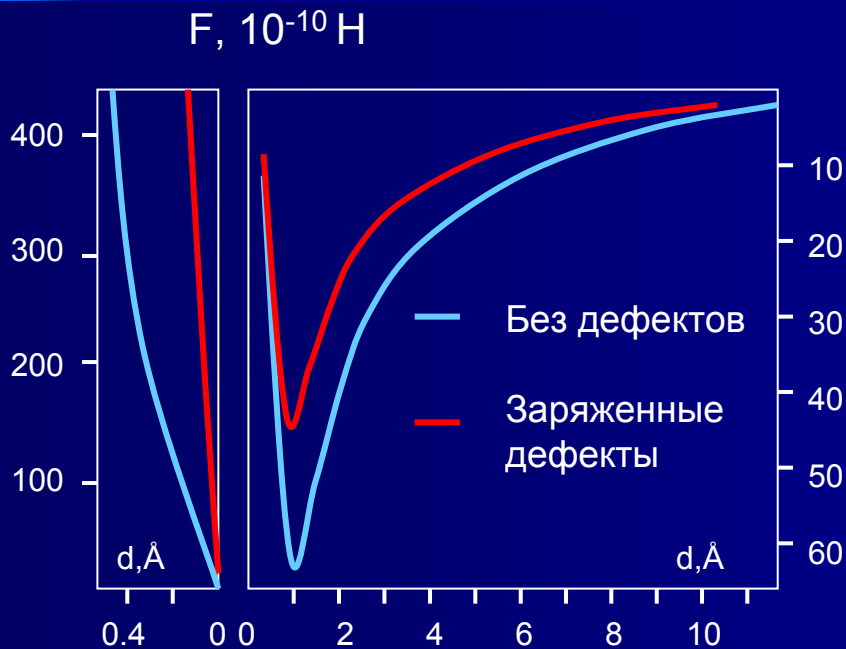
Для сил отталкивания

Для сил притяжения





Спектроскопия межатомных взаимодействий в АСМ

Для Al_2O_3
 $CR = 1.8 \cdot 10^{-28} \text{ Дж.м}, \alpha N = 7 \cdot 10^{-17} \text{ Ннм}^{13}, \Delta = 0.24 \text{ нм}.$
Заряд $Q = 2(1.9 \pm 0.4) \cdot 10^{-19} \text{ Кул}.$

Спектроскопия

$$F(d) \approx \frac{\alpha N}{(\Delta + d)^{13}} - \frac{\pi CR}{(\Delta + d)^2}$$

Поверхностный заряд

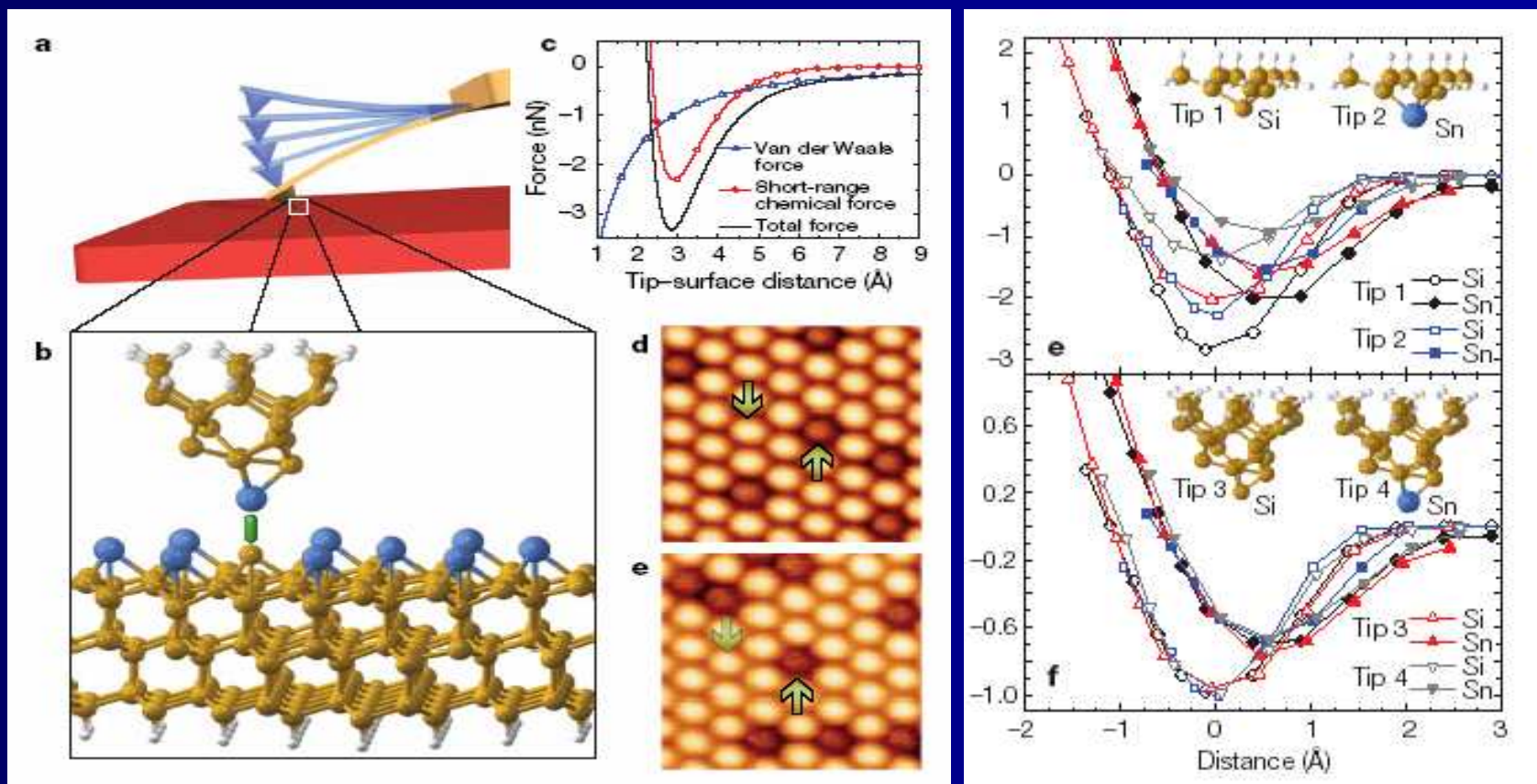
$$Q = 2 \left[\frac{\varepsilon + 1}{\varepsilon - 1} \pi R (C_0 - C_Q) \right]^{\frac{1}{2}}$$

После измерения $F(d)$ определяются константы материалов αN , CR , Δ — и поверхностный заряд Q в нанометровом масштабе



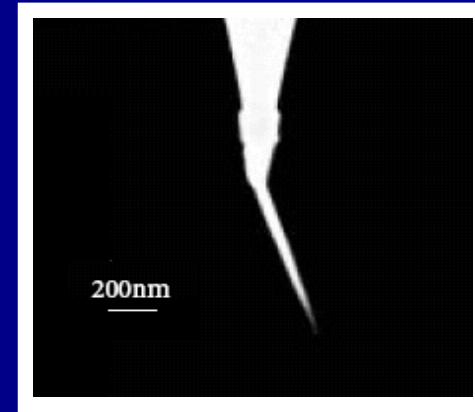
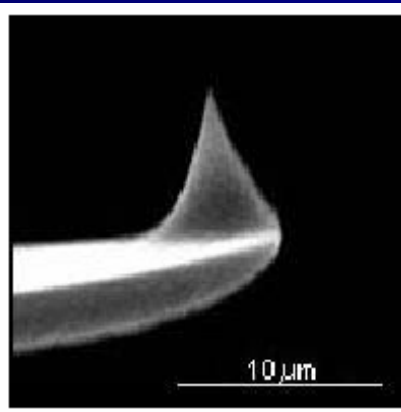
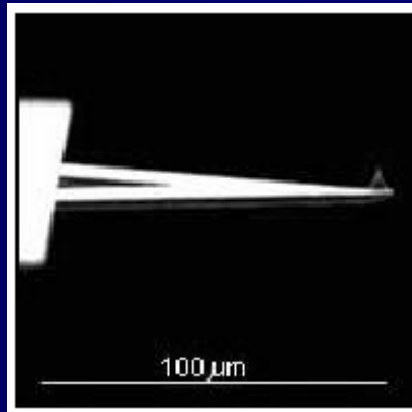
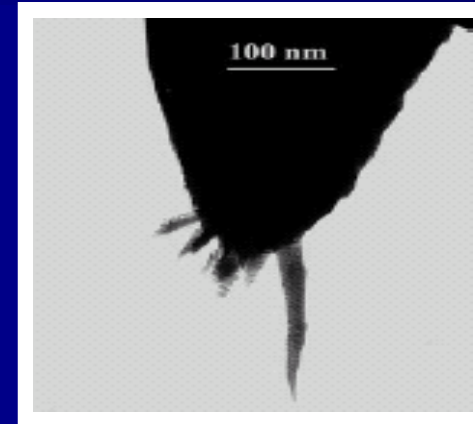
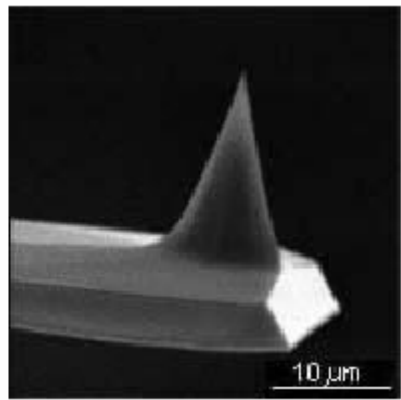
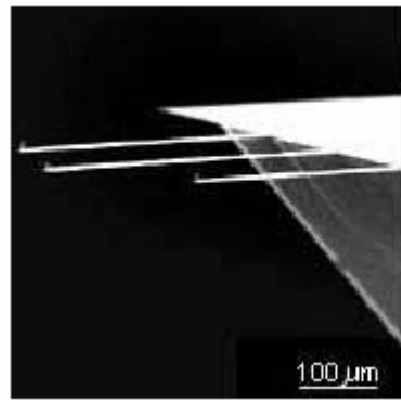
Спектроскопия межатомных взаимодействий в АСМ

(химическая идентификация индивидуальных атомов на поверхности)





Конструкции зондов АСМ

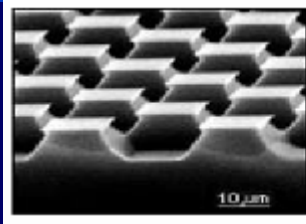


1. В. Миронов, Основы сканирующей зондовой микроскопии.- М. Техносфера, 2004, 143 с.
2. Интернет-сайт компании «НТ-МДТ»: <http://www.ntmdt.ru>

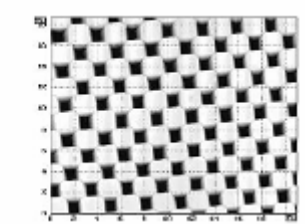


Определение формы зонда, калибровка АСМ, тестовые структуры

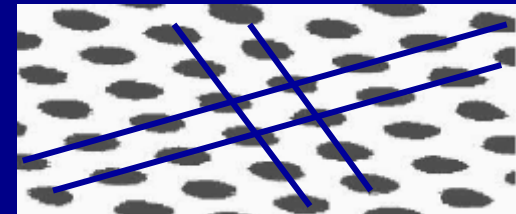
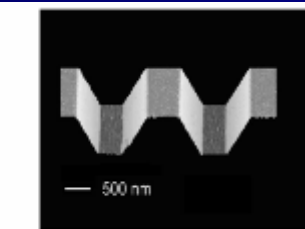
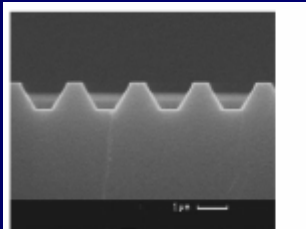
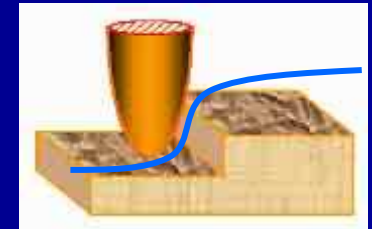
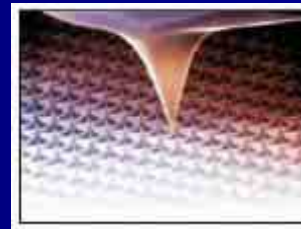
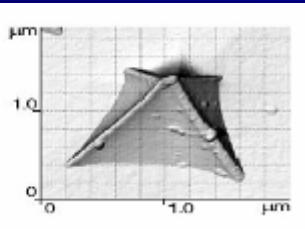
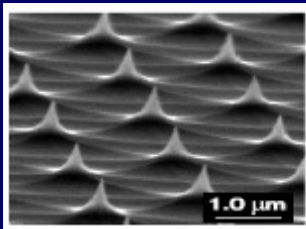
A



B



Тестовые структуры для калибровки АСМ и определения формы зондов (А). АСМ изображение этих тестовых структур (В)

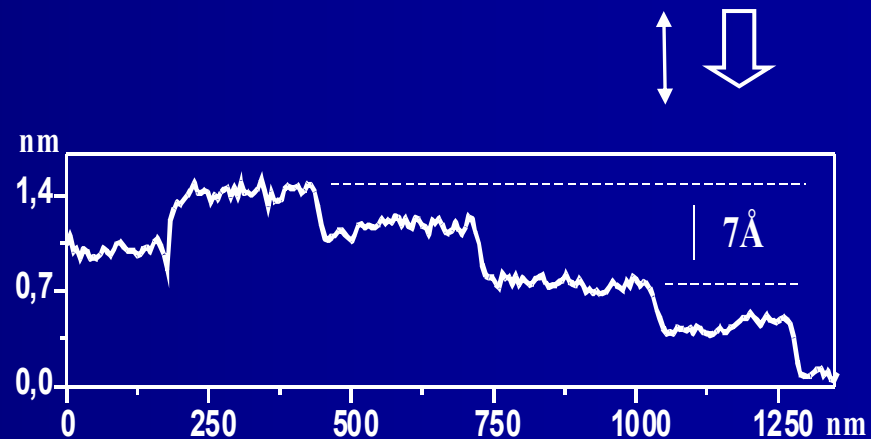
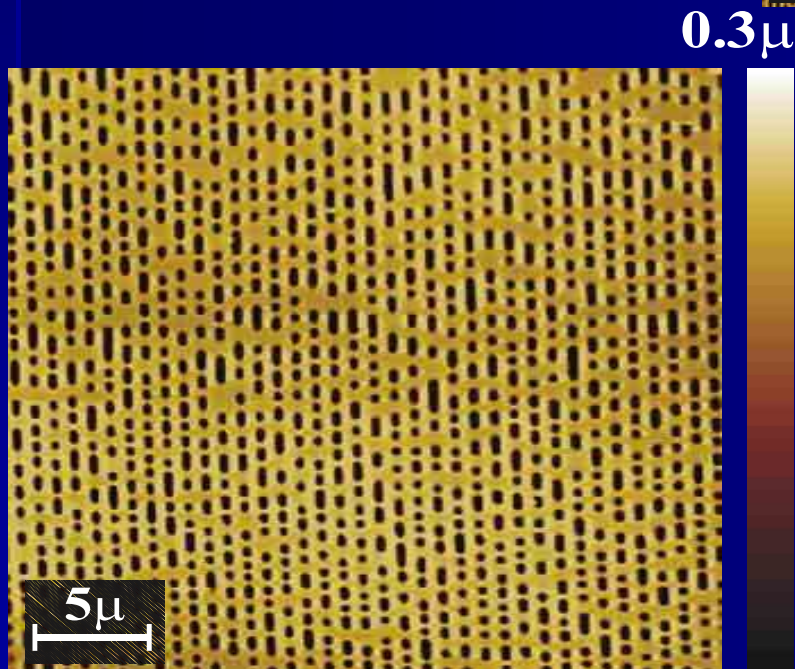
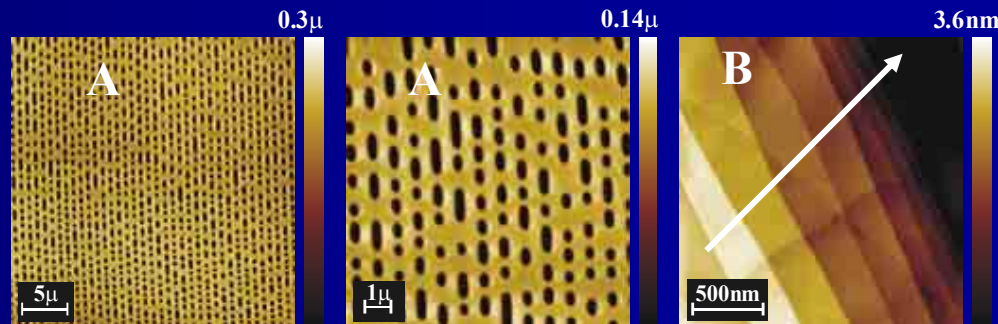


1. А.В. Раков, Ю.А. Новиков, П.А. Тодуа, Измерительная техника, N. 5, с. 13 (2008)
2. В. Миронов, Основы сканирующей зондовой микроскопии.- М. Техносфера, 2004, 143 с.
3. Интернет-сайт компании «НТ-МДТ»: <http://www.ntmdt.ru>
4. G. Dai, F. Pohlentz, T. Dziomba, et al., Meas. Sci. Technol., **18**, p. 415 (2007)



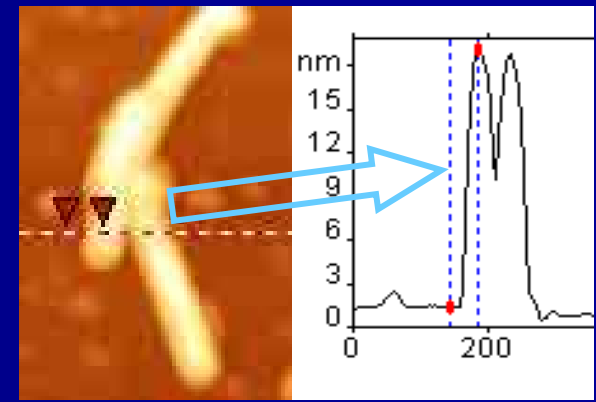
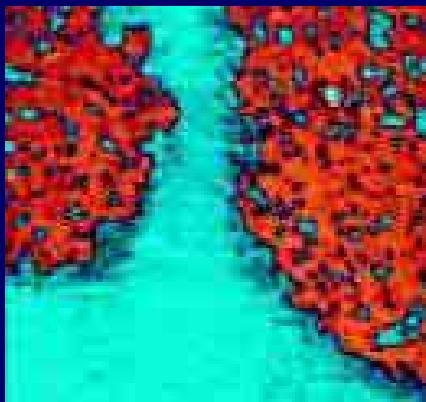
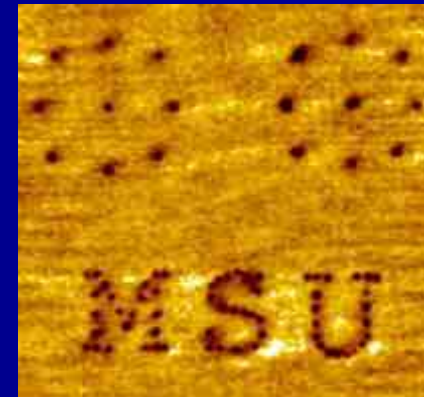
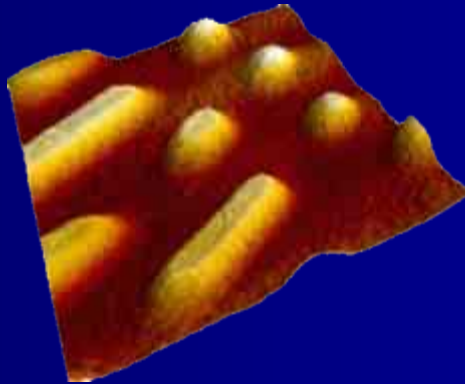
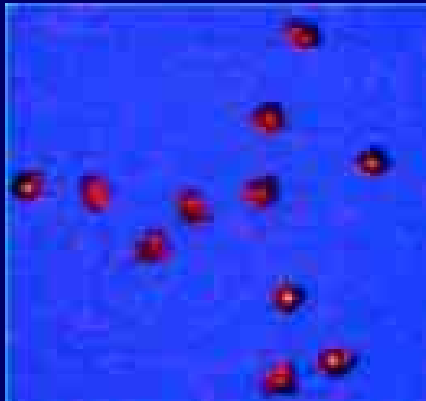
Прецизионная Силовая Микроскопия в диагностике наноструктур

Shear - force изображение стандартной DVD реплики (A) и монокристаллических ступенек графита (HOPG) (B).





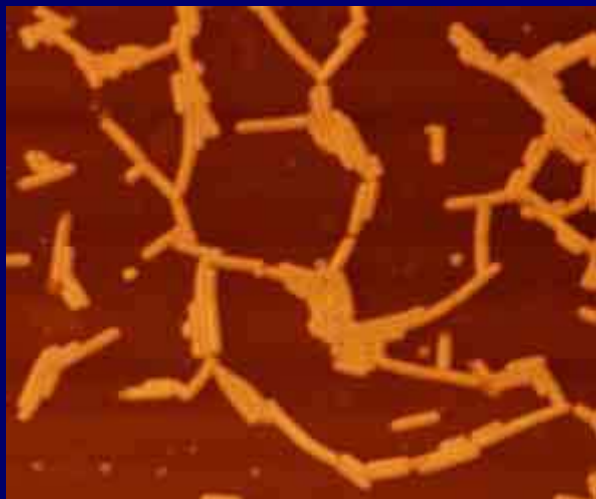
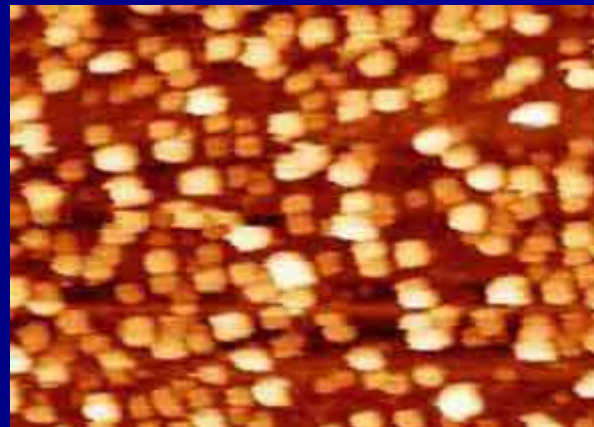
Примеры АСМ изображений объектов на поверхности



1. В. Миронов, Основы сканирующей зондовой микроскопии.- М. Техносфера, 2004, 143 с.
2. Е.В. Дубровин, М.Н. Кирикова, В.К. Новиков, и др. Коллоидный журнал, **66** (6), с. 750 (2004).

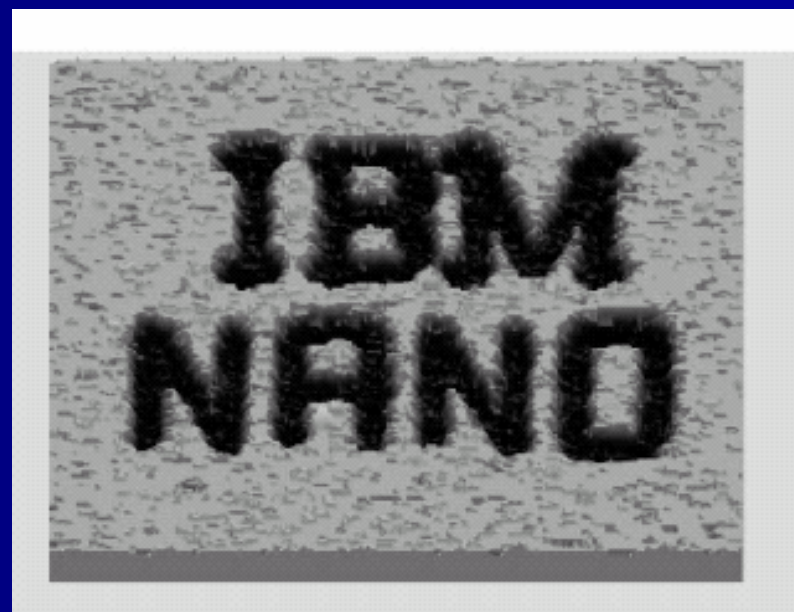
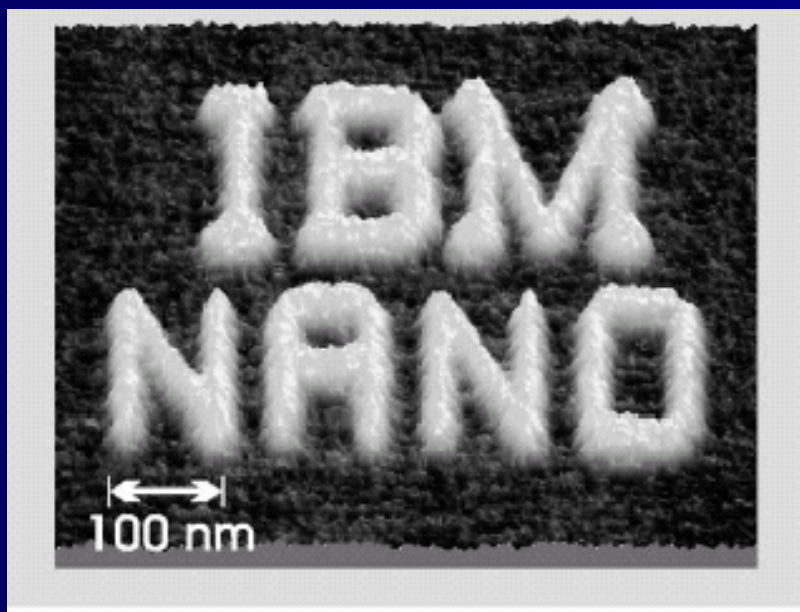


Примеры АСМ изображений объектов на поверхности





Локальное травление поверхности. АСМ нанолитография

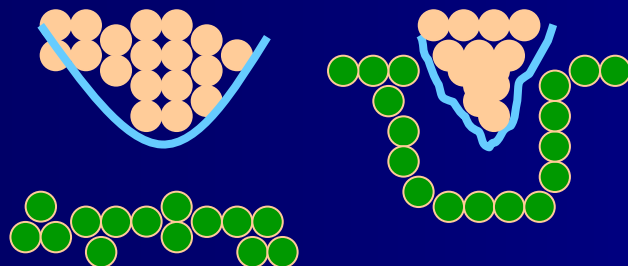


Результат локального окисления поверхности Si (100) с помощью зонда АСМ (А) и результат травления окисленной поверхности (В)

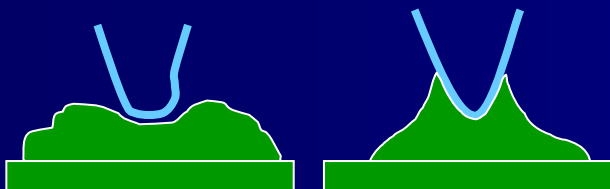


Задачи измерений в АСМ, требующие решений

1. Определение геометрических параметров острия зонда при $\langle R \rangle < 10\text{нм}$.



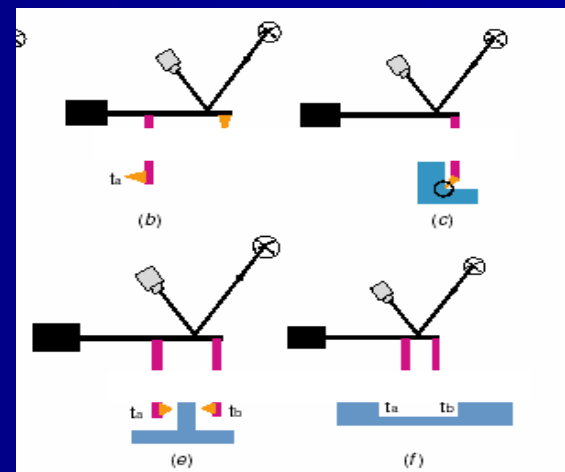
2. Локальная деформация острия и объекта измерений.



3. Локальная спектроскопия, определение химсостава.

4. Влияние окружающей среды (в отсутствие вакуума).

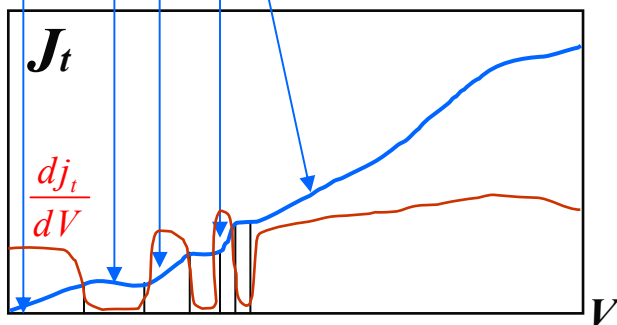
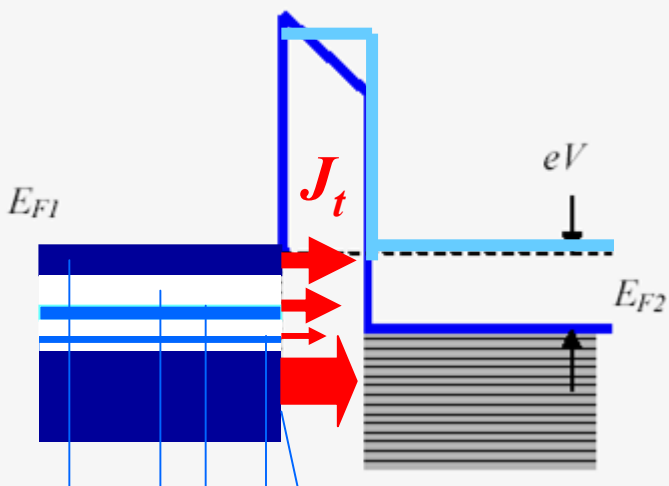
5. Измерение геометрических параметров и топологии сложных объектов.





Измерение плотности состояний

$$\frac{dj_t}{dV} \approx \rho(E, x, y)$$

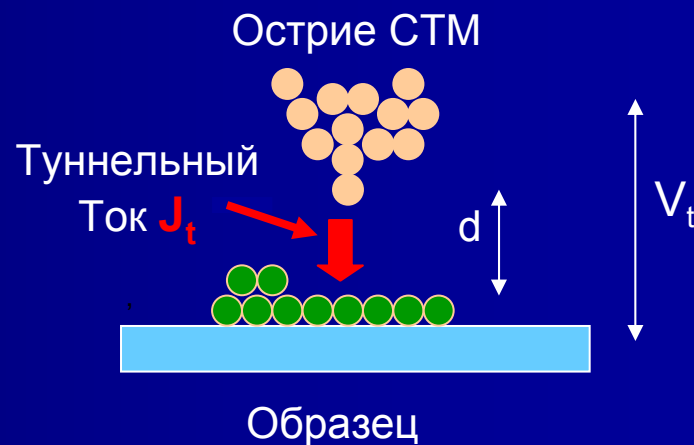


Измерение рельефа поверхности

$$j_t \approx j_0(V_t) \cdot e^{-B\sqrt{\phi} \cdot \Delta Z}$$

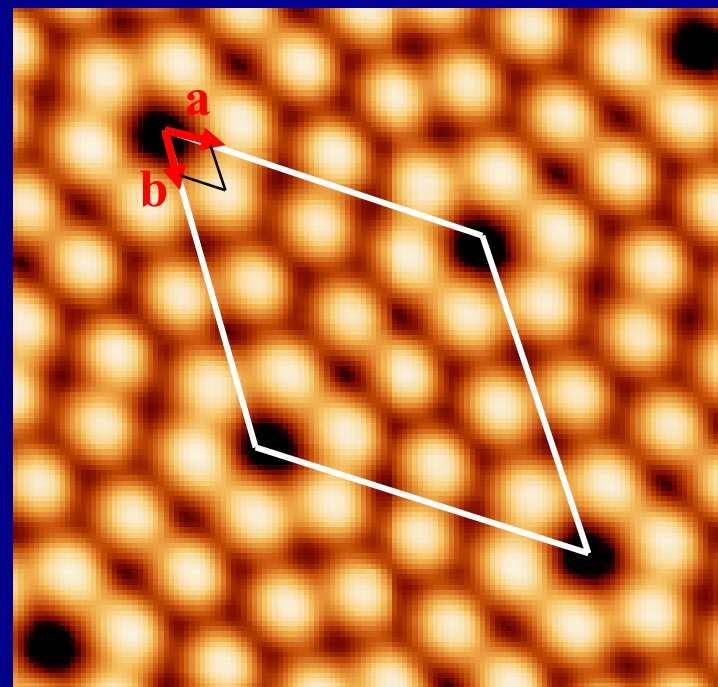
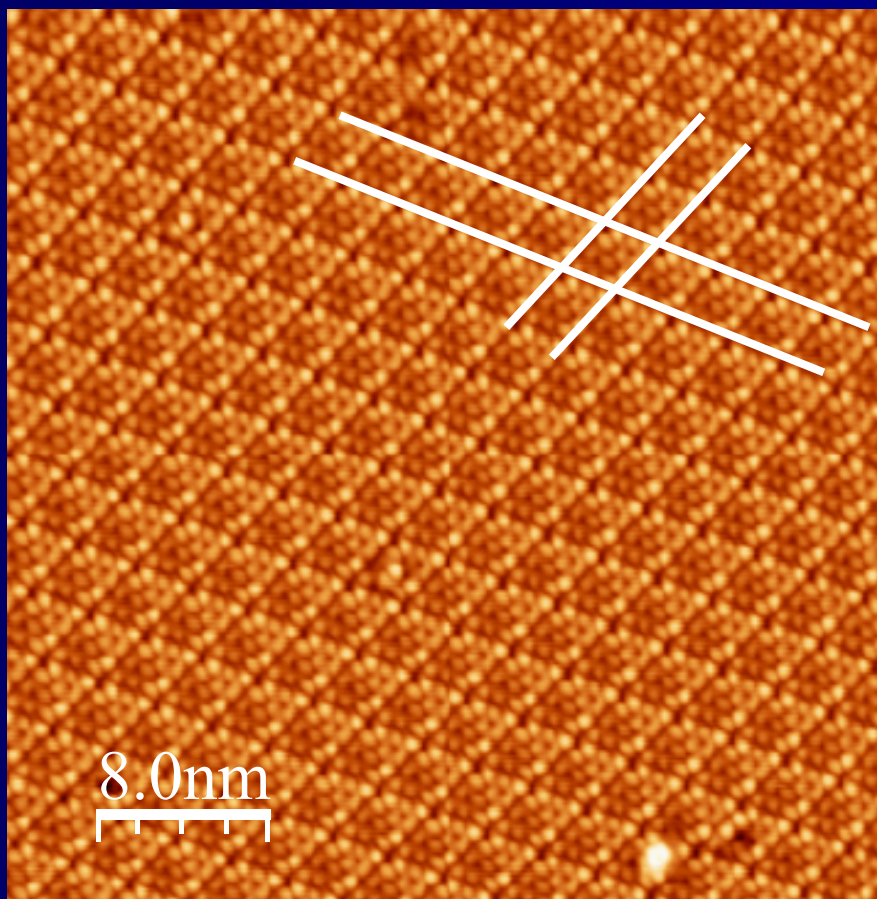
Если ϕ выражено в эВ, а Z в \AA ,
то $B = 1.025 \text{ \AA}^{-1} (\text{eV})^{-1}$

Изменение рельефа поверхности
приводит к изменению туннельного тока





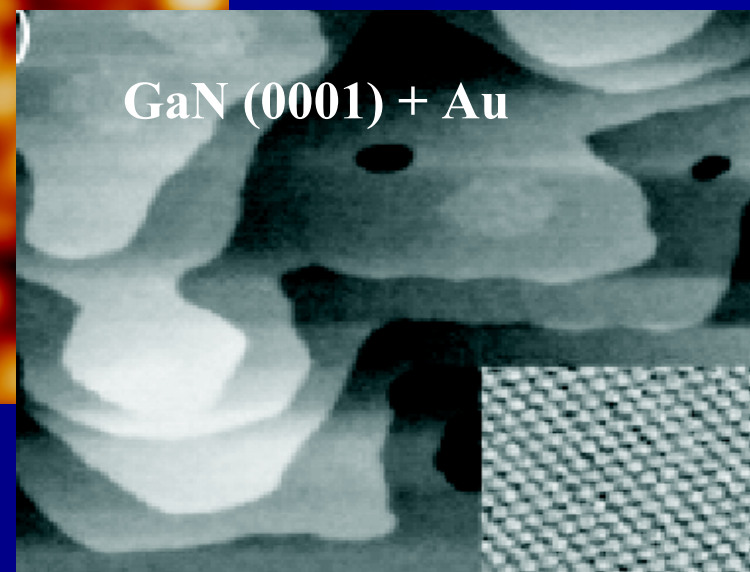
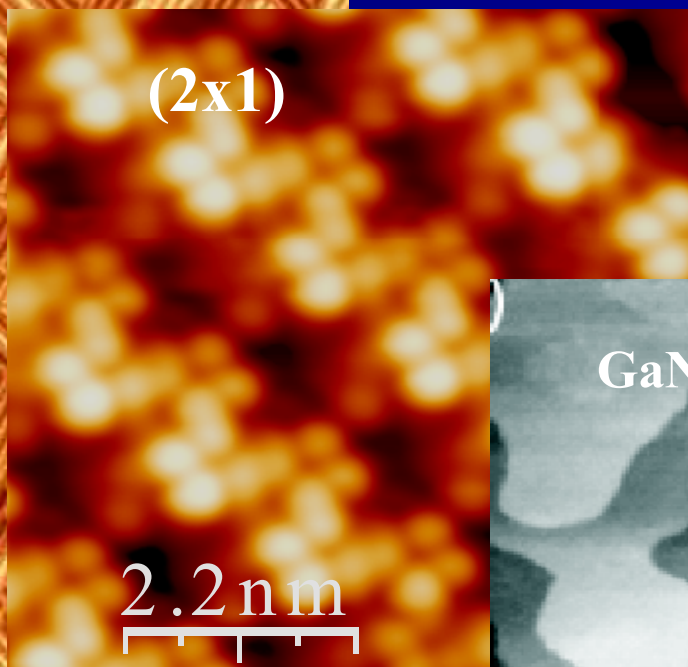
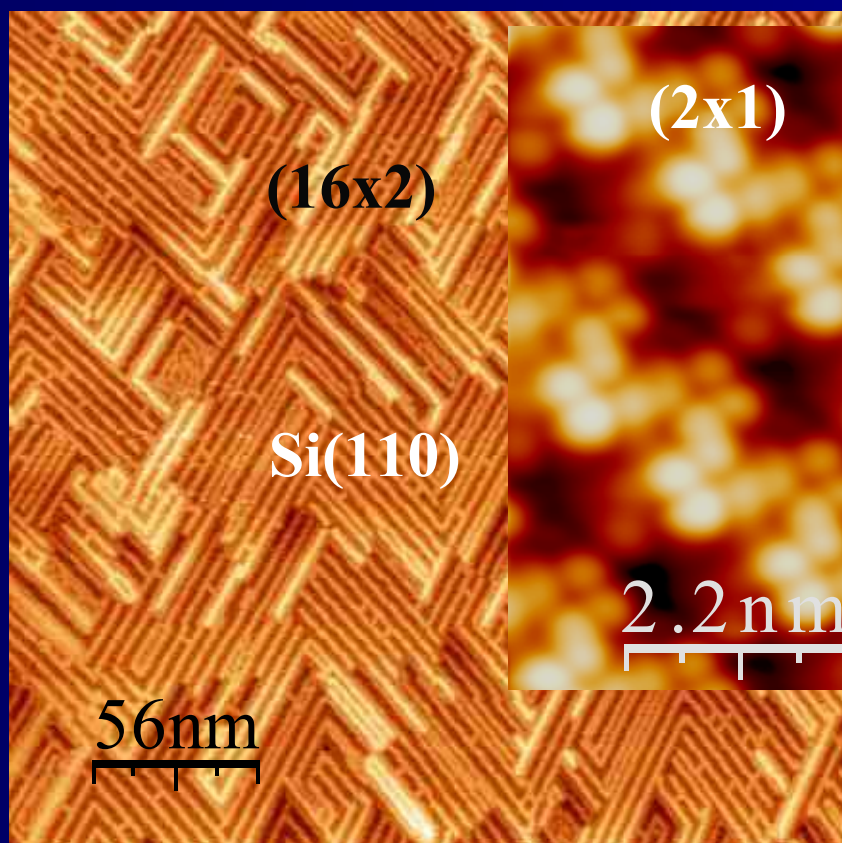
Структура поверхности Si (111) 7x7





СТМ/СТС диагностика поверхностных атомных структур

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

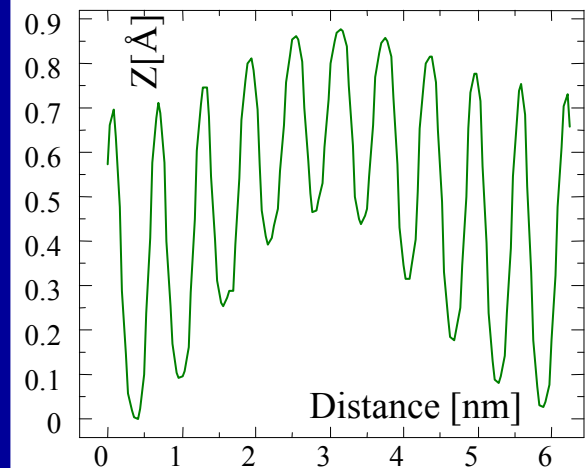
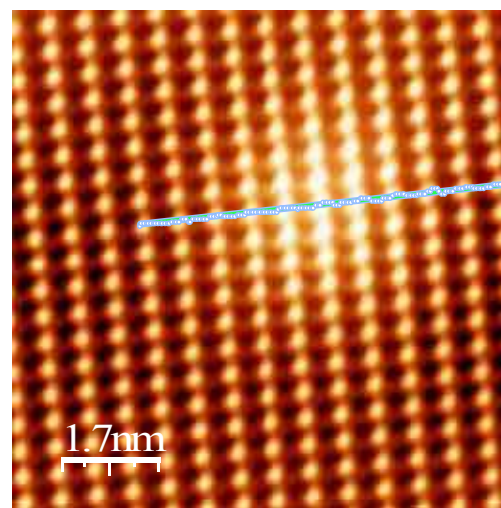




СТМ/СТС диагностика поверхностных атомных структур

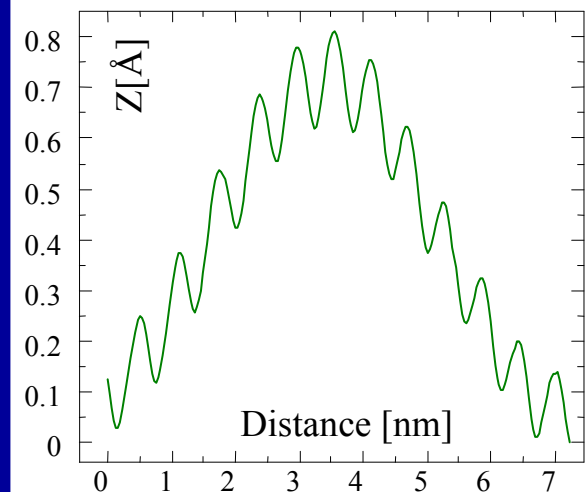
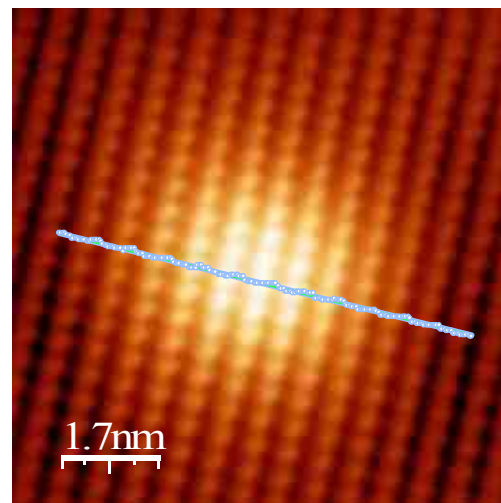
СТМ изображение
примесного атома
S на поверхности
InAs

$U = -1,1\text{В}; I = 30\text{пА}$



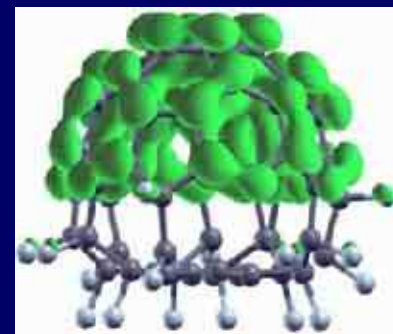
СТМ изображение
примесного атома
Mn на
поверхности InAs

$U = +0,8\text{В}; I = 30\text{пА}$

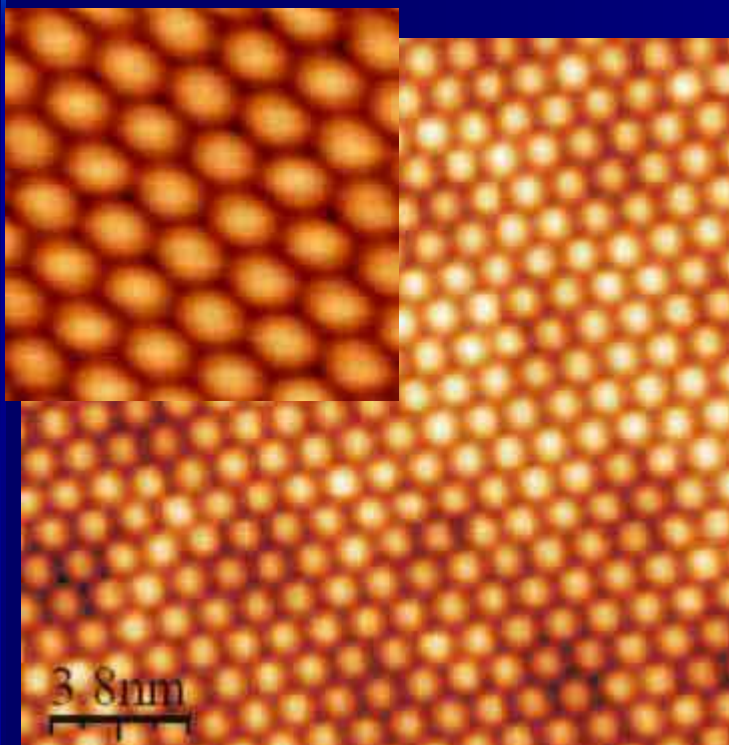




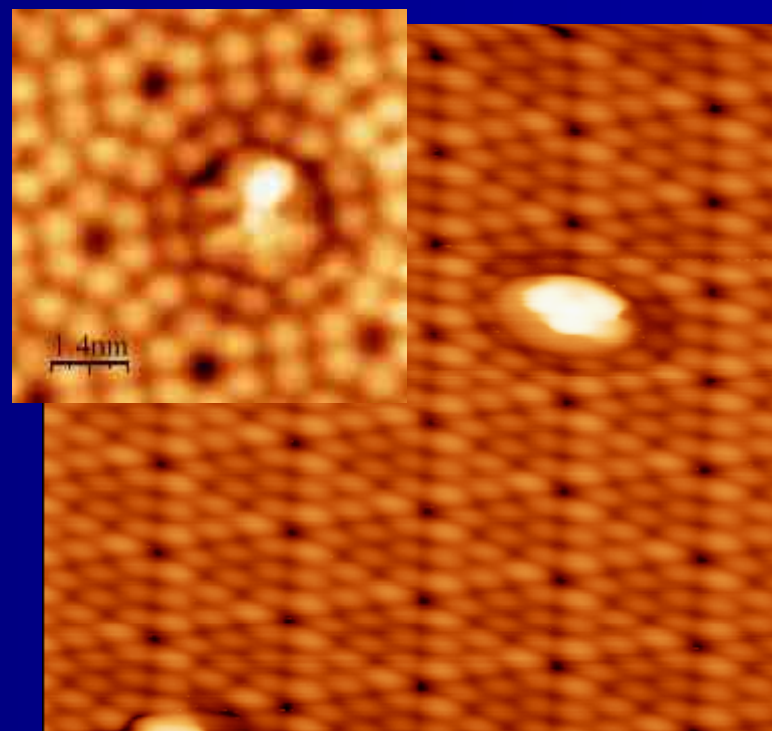
СТМ изображение углеродных молекул на поверхности Si(111)-7×7



C_{60} на Si(111)-7×7

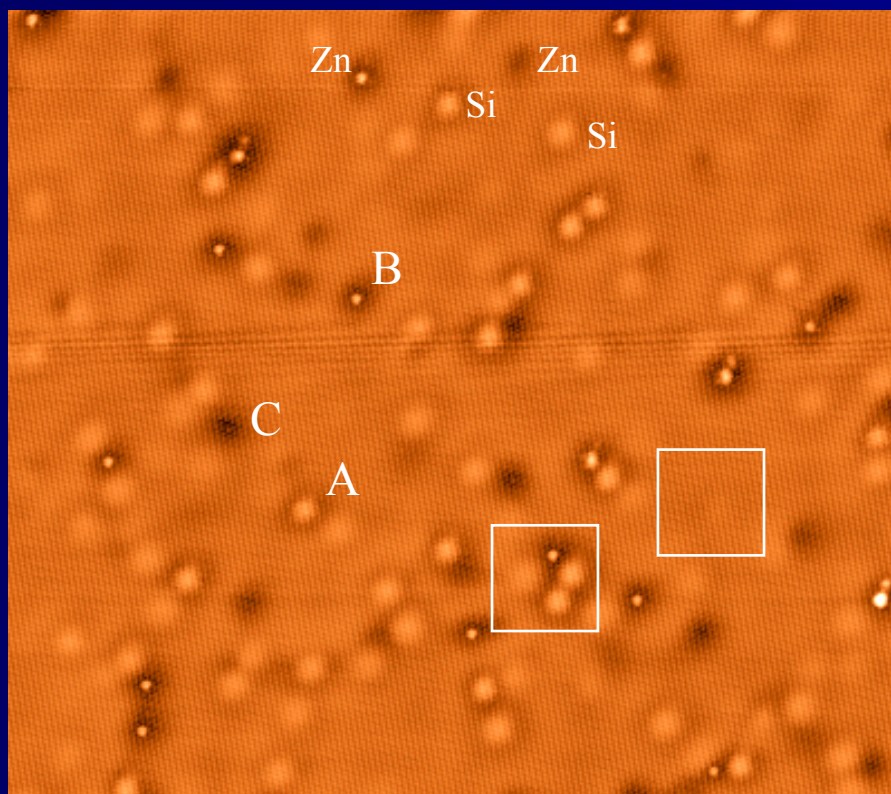


$C_{60}F_x$





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



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

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

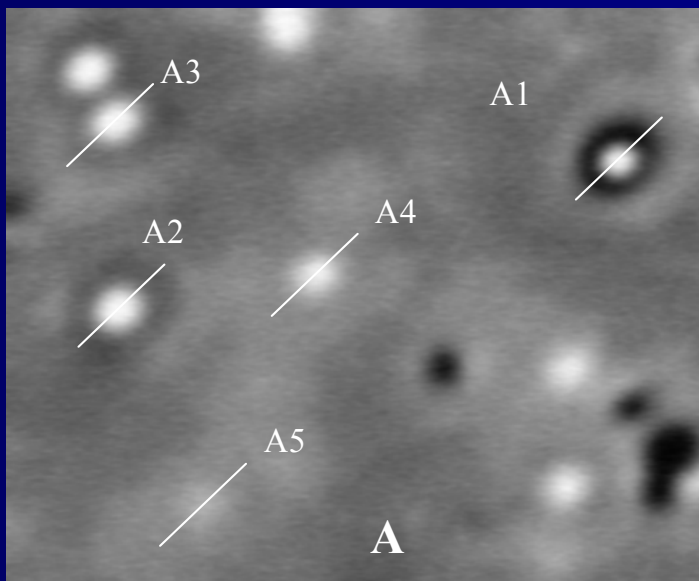
Распределение допирующих атомов Si и Zn вдоль поверхности и по глубине залегания.

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



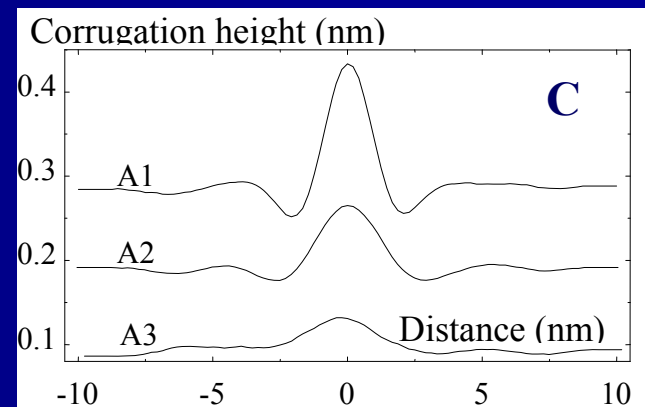
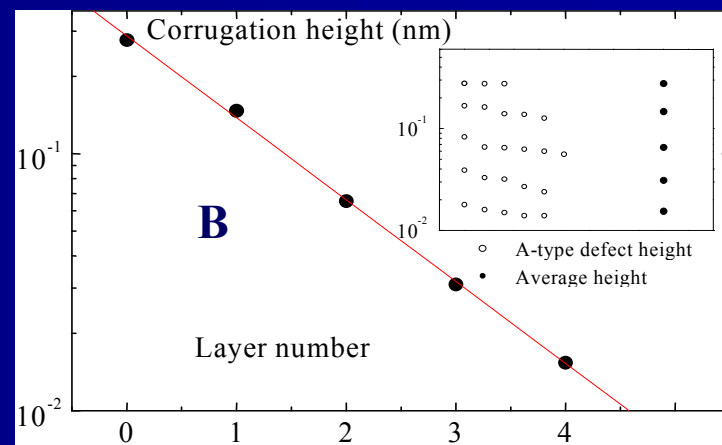
СТМ\СТС диагностика атомных примесных состояний

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



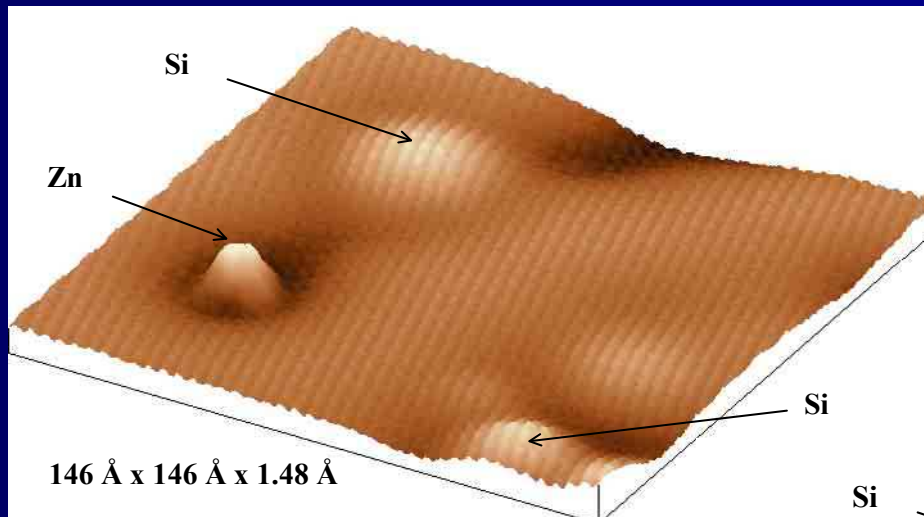
$V_{TIP} = + 1.5 \text{ V}; \quad 40 \times 40 \text{ nm}$

СТМ изображение атомов примеси на поверхности



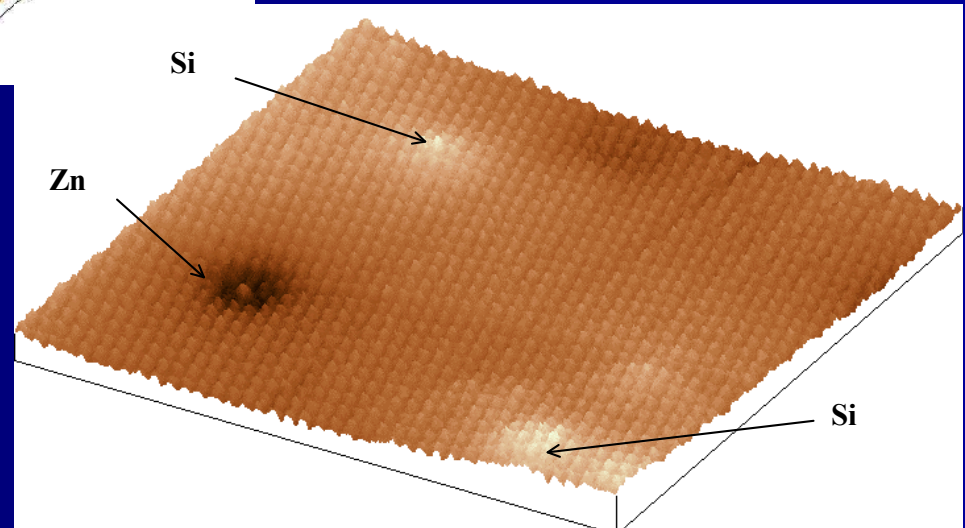


Зависимость СТМ изображения примесей от V_t (GaAs/Si-Zn)



$U_{\text{tip}} < 0$; 14.6 x 14.6 nm²

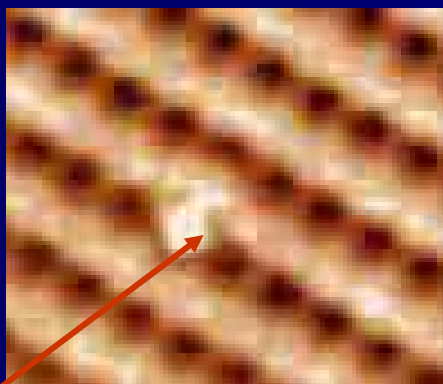
$U_{\text{tip}} > 0$; 14.6 x 14.6 nm²





СТМ диагностика гибридных орбиталей примесных атомов на поверхности

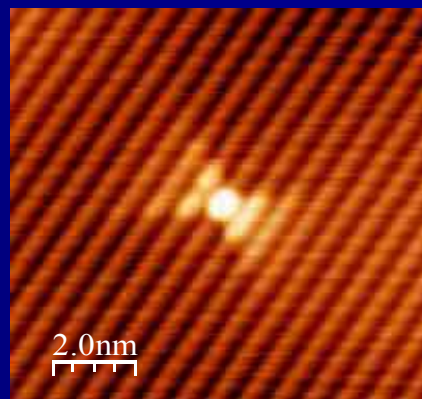
$V_{tip} = + 1.05V$



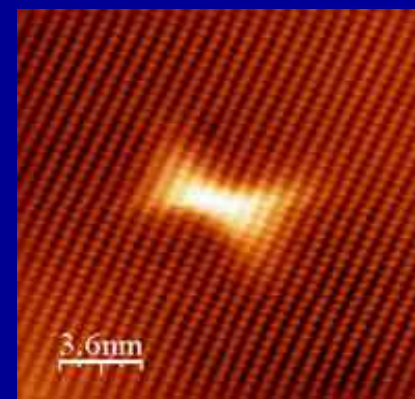
Атом Cr замещает атом As на поверхности InAs(110). Вытянутая форма орбитали оборванной связи Cr с размером $0.5 - 0.6 \text{ nm}$ указывает на присутствие d – электронного состояния.

СТМ изображения орбиталей примесных атомов на поверхности InAs (110)

Sn



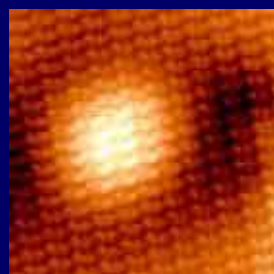
Mn



1. А.В. Картавых, Н.С. Маслова, В.И. Панов и др., Физика и техника полупроводников. **34** (4), 395 (2000)
2. P.I. Arseyev, N.S. Maslova, V.I. Panov et al. International Journal of Nanoscience, **2** (6), 575-584 (2003)
3. F. Marczinowski, J. Wiebe, F. Meier, K.Hashimoto, and R. Wiesendanger, Phys.Rev..B **77**, 115318 (2008)

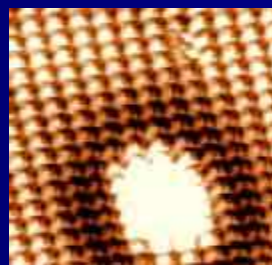
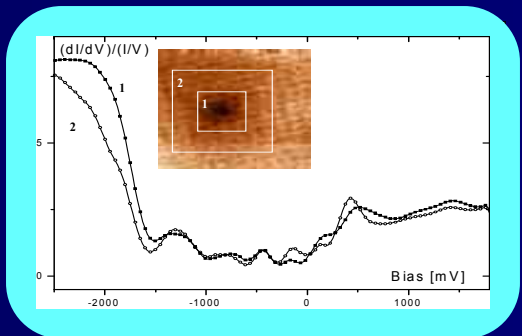


СТМ/СТС идентификация единичных атомов примеси в полупроводнике: GaAs

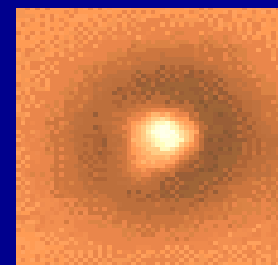
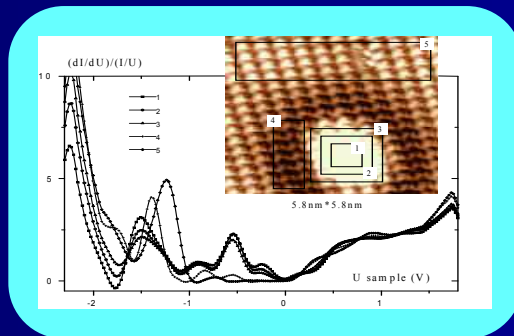


Si

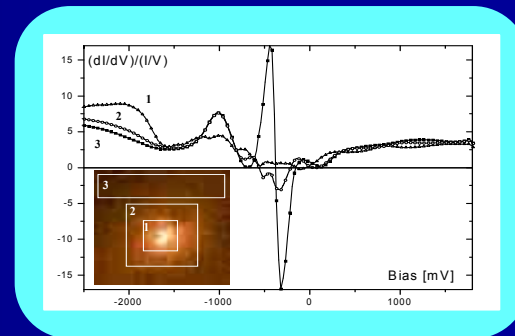
6 nm



Te



Zn



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



СТМ\СТС поверхностных химических реакций Si (111) 7x7 + NH₃

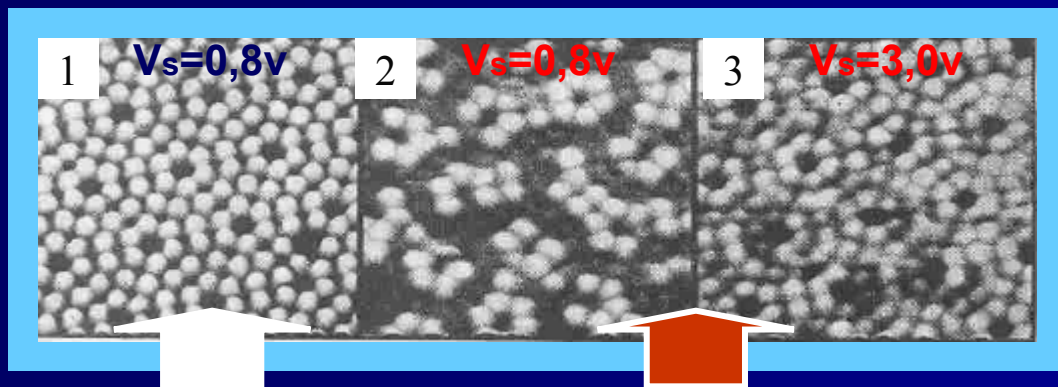


Рис.1 Чистая поверхность Прореагировавшая с NH₃ поверхность

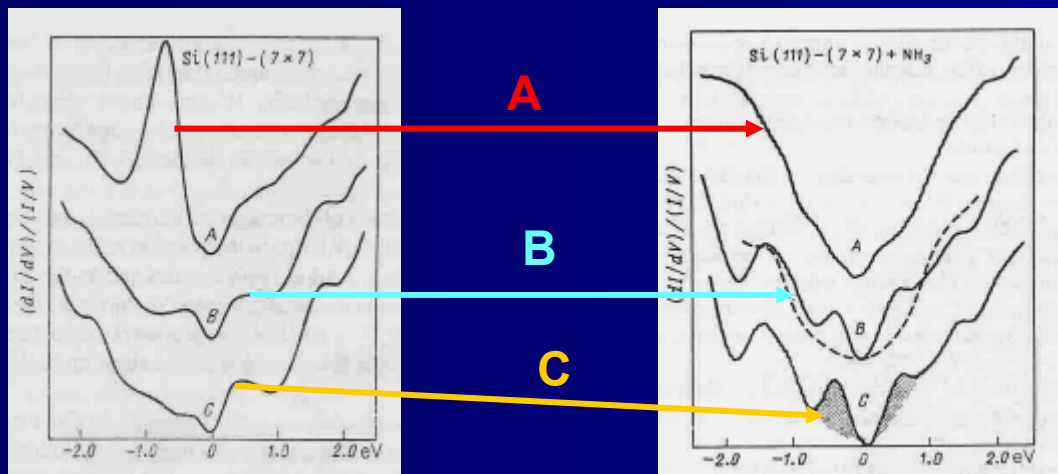


Рис. 2 - $V=0,8$ v. Исчезают изображения части адатомов (преимущественно центральных)
Рис.3 - $V=3,0$ v. Изображения адатомов восстанавливается.

Вывод: Химические связи на поверхности образованы за счет «болтающихся» электронов, а не за счет разрыва валентной связи Si – Si. **Образуются** Si-H связи на адатомах и Si-NH₂ на rest атомах

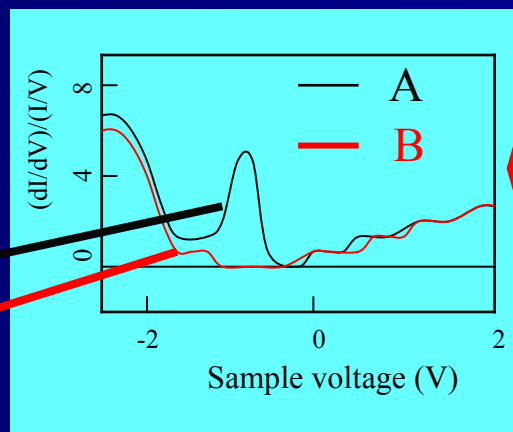
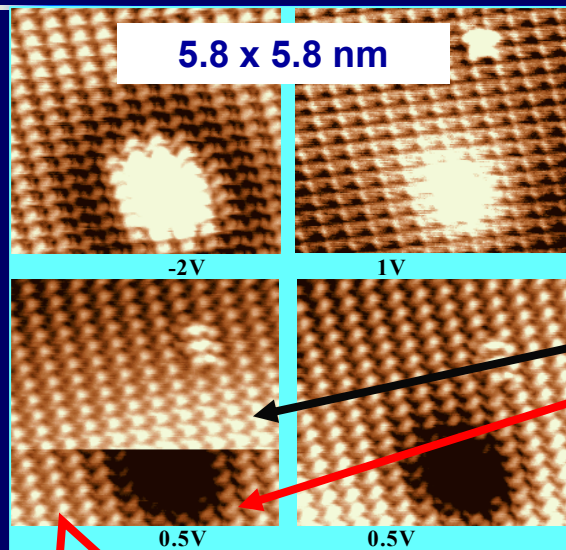
A – DOS rest атомов после реакции.

B – (пунктир) DOS угловых адатомов после реакции

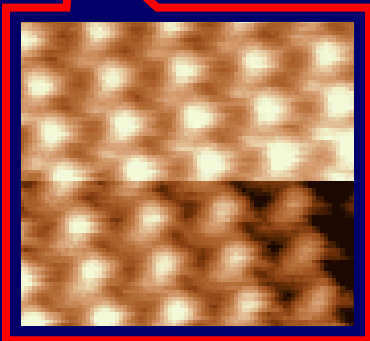
B и **C** – (сплошные линии) DOS непрореагировавших угловых и центральных адатомов



Влияние локализованного состояния (ЛС) зонда СТМ на изображения атомов и дефектов



Туннельная проводимость над бездефектным участком поверхности GaAs перед (A) и после (B) скачка в СТМ изображении



СТМ изображение примесного атома Te при различных туннельных напряжениях на образце. Скачок СТМ изображения от светлого до темного вызван изменением ЛС на конце зонда. Вдали от дефекта СТМ изображение атомных рядов до и после скачка не изменяется.



Размерное квантование на атомных кластерах. (InAs допирован Sn, $n \approx 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)

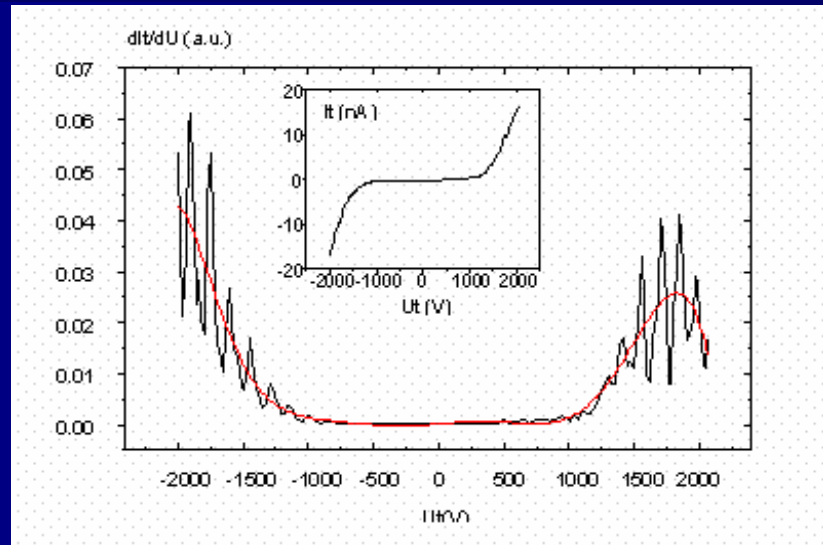
4 x 4 nm

T=4.2K

Подрешетка

As

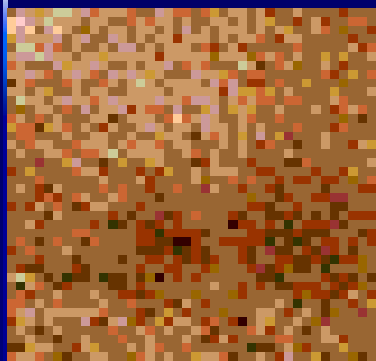
$U_{\text{зонда}} = + 0.5 \text{ V}$



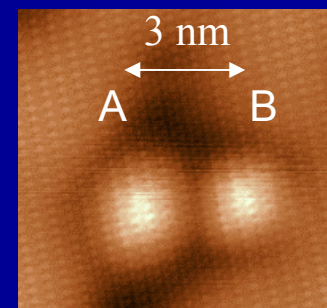
Осцилляции туннельной проводимости, измеренные СТМ\СТС над трехатомным кластером и над чистой поверхностью.



Взаимодействие примесных атомов Si на поверхности. (атомное переключающее устройство)



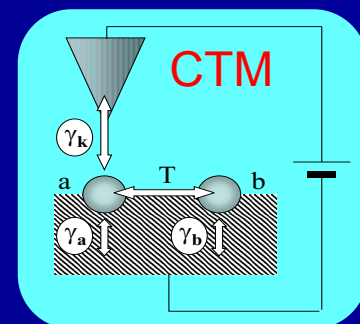
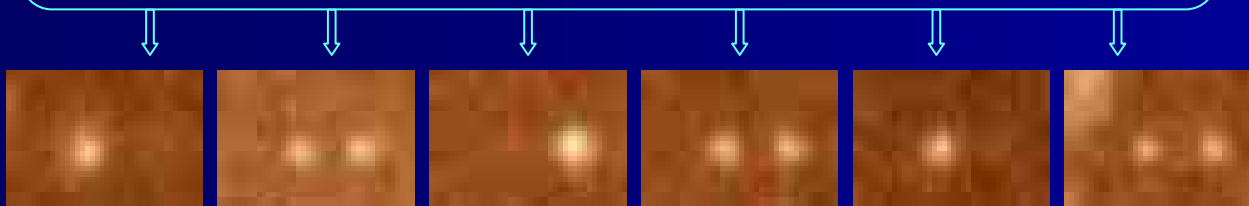
«Фильм» демонстрирует изменение электронной плотности вблизи взаимодействующих атомов Si при изменении напряжения на зонде СТМ с шагом 0.01V. Каждый атом дважды «включается» и «выключается». Эффект может быть основой создания новой элементной базы, использующей отдельные атомы и/или «АТОМНОГО» компьютера.



СТМ изображение двух атомов примеси А и В на поверхности GaAs

Схема измерений

Ключевые состояния взаимодействующих атомов.
«ВКЛ/ВЫКЛ» каждый из атомов или оба совместно.





Изготовление и СТМ/СТС диагностика наноструктур, состоящих из единичных молекул фуллерена C_{60}

Туннельная проводимость наноструктуры, содержащей молекулу C_{60}

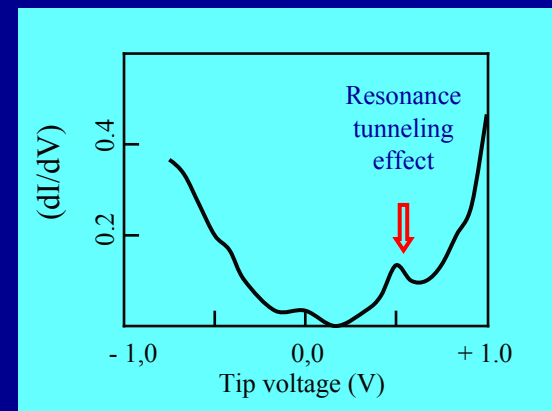
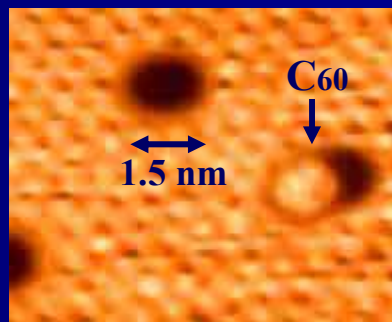
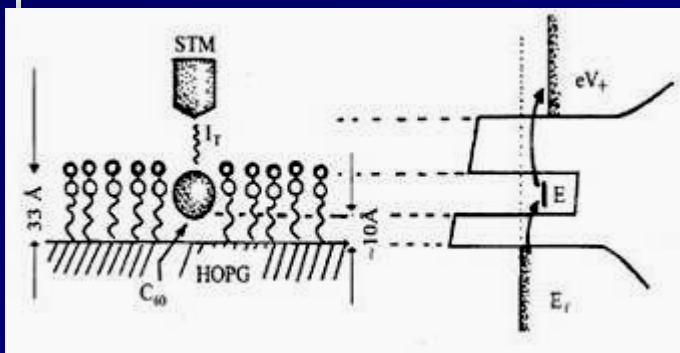


Схема и СТМ изображение наноструктуры

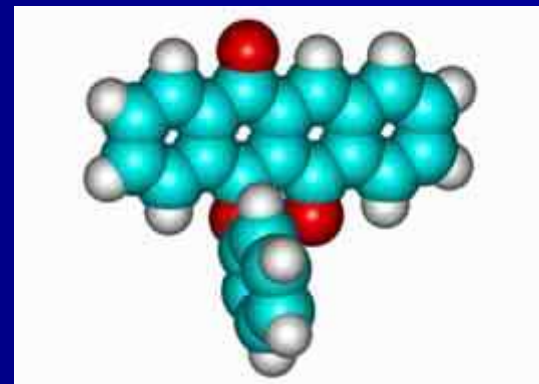
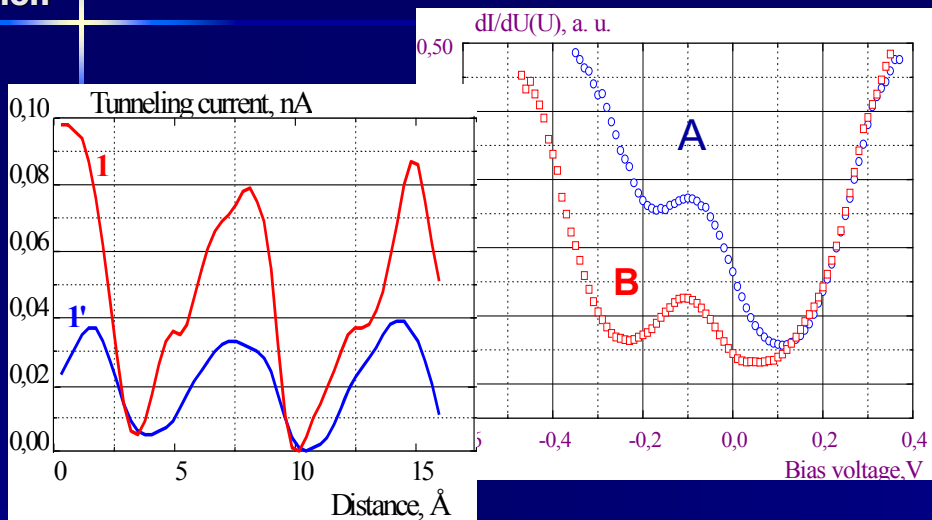
Технология изготовления наноструктуры с использованием СТМ:

1. Нанесение методом ЛБ (ЛШ) двухкомпонентной мономолекулярной пленки на атомно-гладкую проводящую подложку.
2. Перфорирование мономолекулярной пленки.
3. Осаждение молекул C_{60} на поверхность пленки.
4. Использование острия СТМ для манипуляций молекулами C_{60} и «сталкивания» их в углубления.



Реверсивные изменения структуры и проводимости молекул под действием света

(оптоэлектронное устройство на единичной молекуле)



Структура молекул Naphthacenequinone реверсивно меняется при изменении длины световой волны



Поведение молекулярной проводимости соответствует появлению дополнительной плотности состояний (vacant states) в результате обратимой фотореакции.

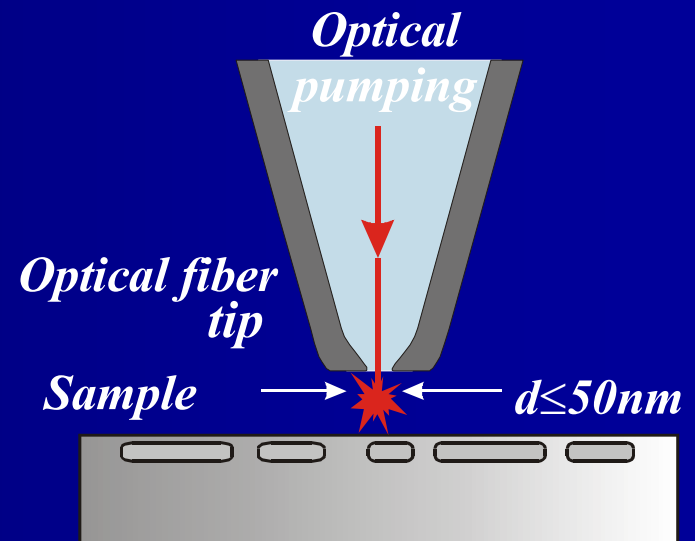
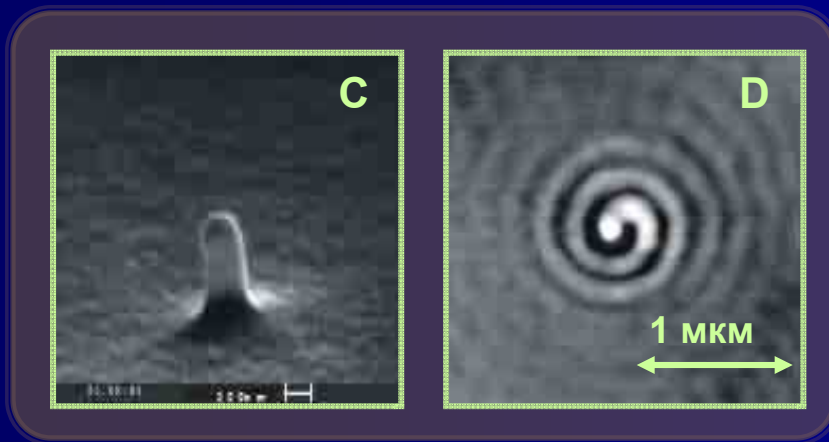
Туннельная проводимость пленок ЛБ в зависимости от напряжения на СТМ переходе

$\Lambda = 400\text{nm} \leftrightarrow \Lambda = 480\text{nm}$
Form A \leftrightarrow Form B



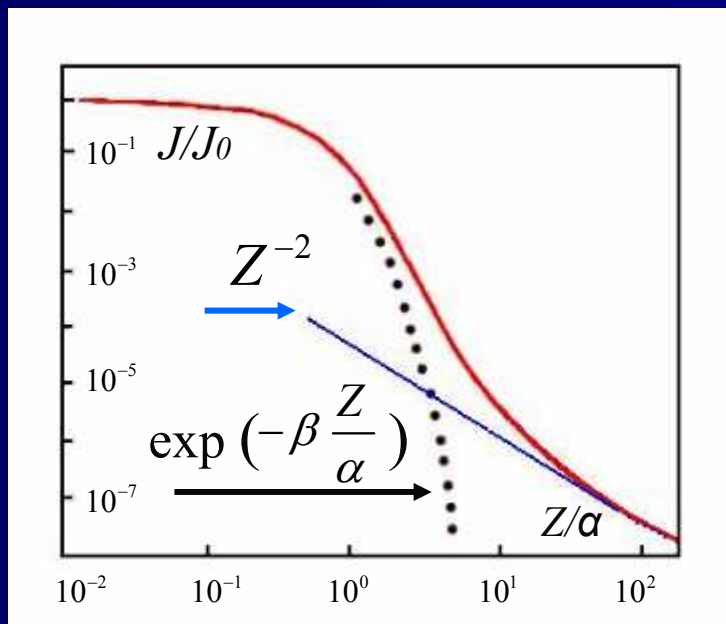
Оптическая Микроскопия и Поляриметрия Ближнего Поля

Измерение и диагностика оптических полей и оптических свойств объектов с разрешением, значительно превышающим дифракционный предел. Выявление механизмов взаимодействия света с наноструктурами. Обработка и передача оптической информации.





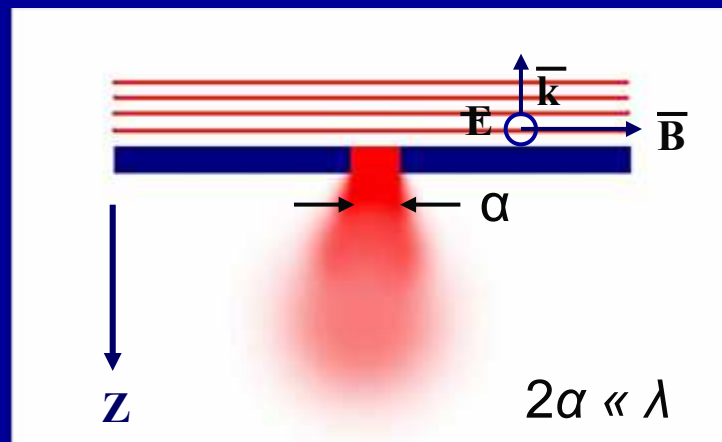
Прохождение света через диафрагму с субволновой апертурой ($2\alpha \ll \lambda$) (принцип работы СОМБП)



Зависимость интенсивности света,
прошедшего через диафрагму в
металлическом экране от соотношения z/α .

Z – расстояние до экрана.

J уменьшается на 50% при $Z \sim \alpha/2$



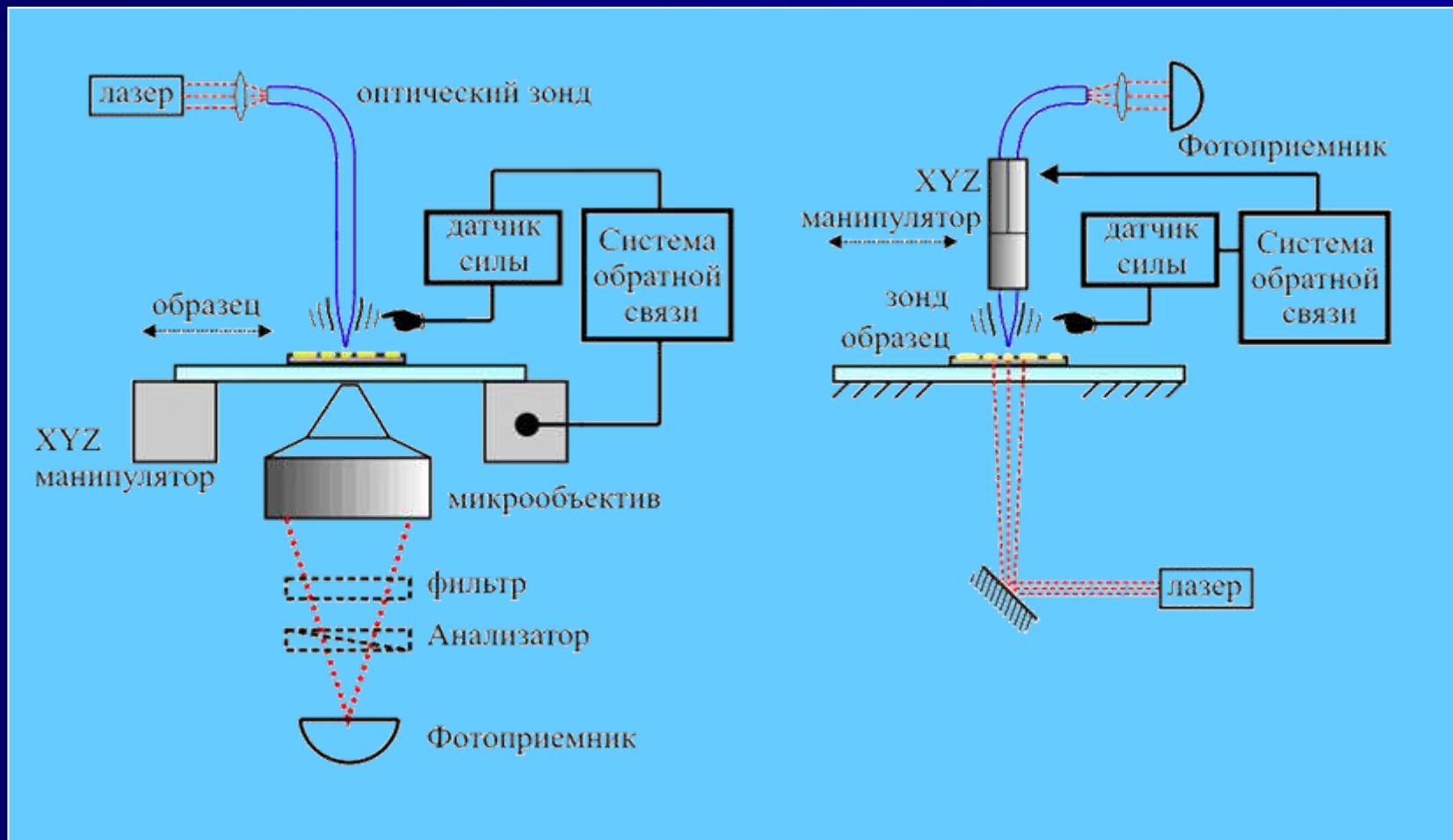
$$j(z) \sim \left(\frac{8k\alpha}{3\pi} \right)^2 \exp\left(-\frac{3\pi z}{4\alpha} \right)$$

$$0 < z < 2\alpha$$

1. H. A. Bethe, Phys. Rev. 66, 163 (1944)
2. C. J. Bouwkamp, Philips. Res. Rep., 5 (1950)

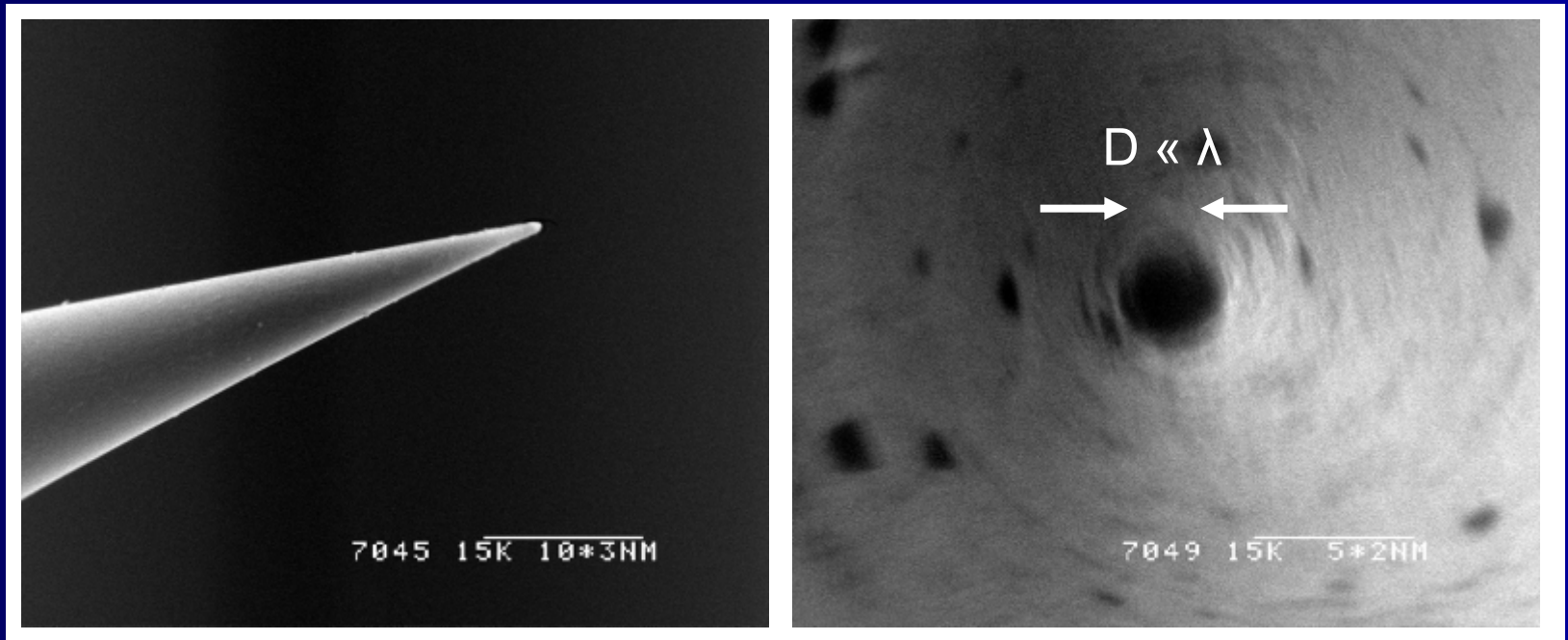


Схематическое изображение устройства СОМБП





Зондирующие острия для сканирующей микроскопии ближнего оптического поля

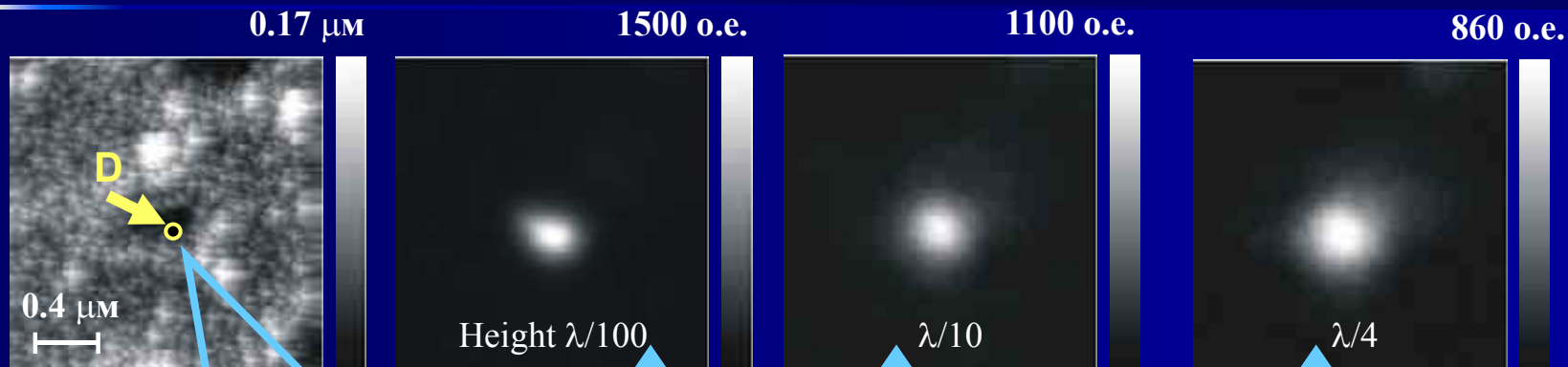


Апертурный зонд, полученный методом химического травления с последующим напылением металла на его боковую поверхность



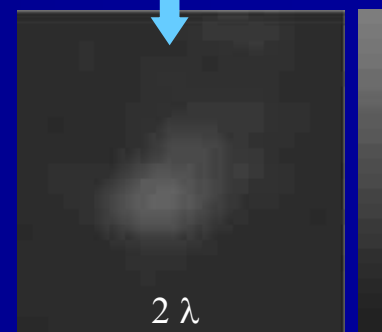
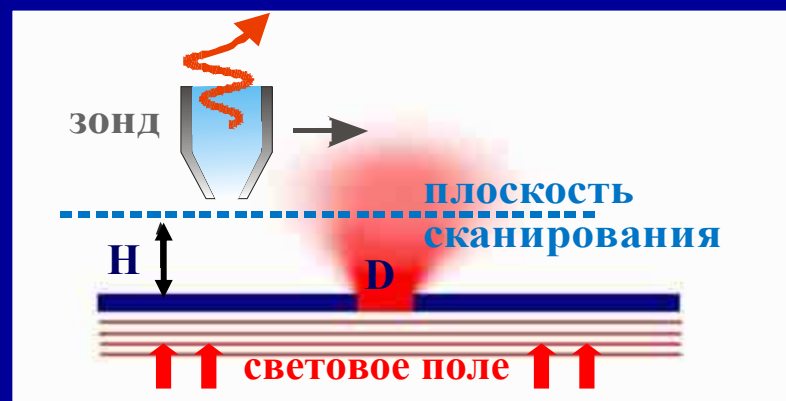
Пространственное распределение света прошедшего через субдлинноволновую диафрагму

(СОМБП изображение диафрагмы на разных расстояниях от зонда)



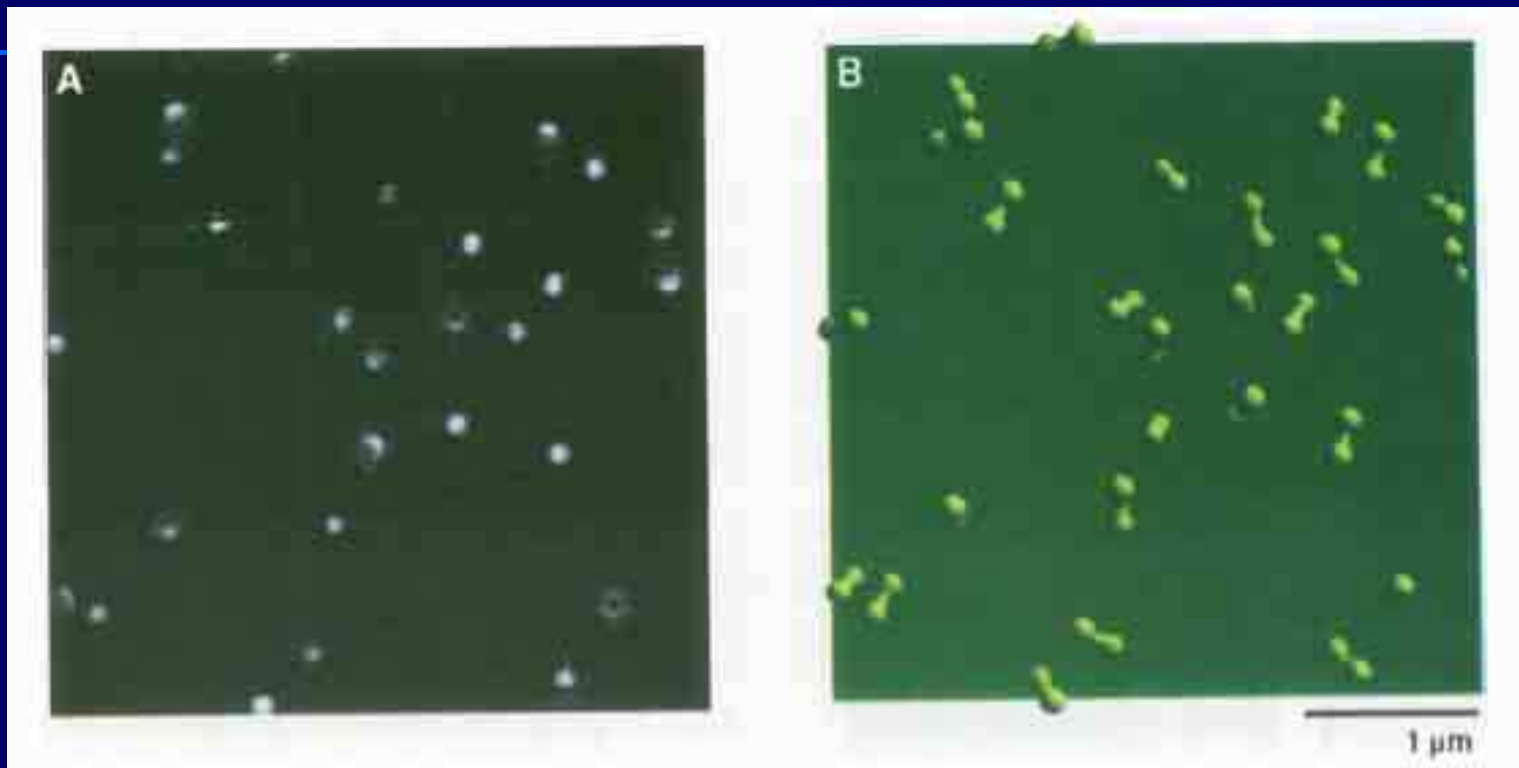
АСМ изображение рельефа поверхности в области диафрагмы D

Интенсивность света для разных расстояний $H=n\lambda$ между зондом СОМБП и диафрагмой D





СОМБП изображение молекул красителя

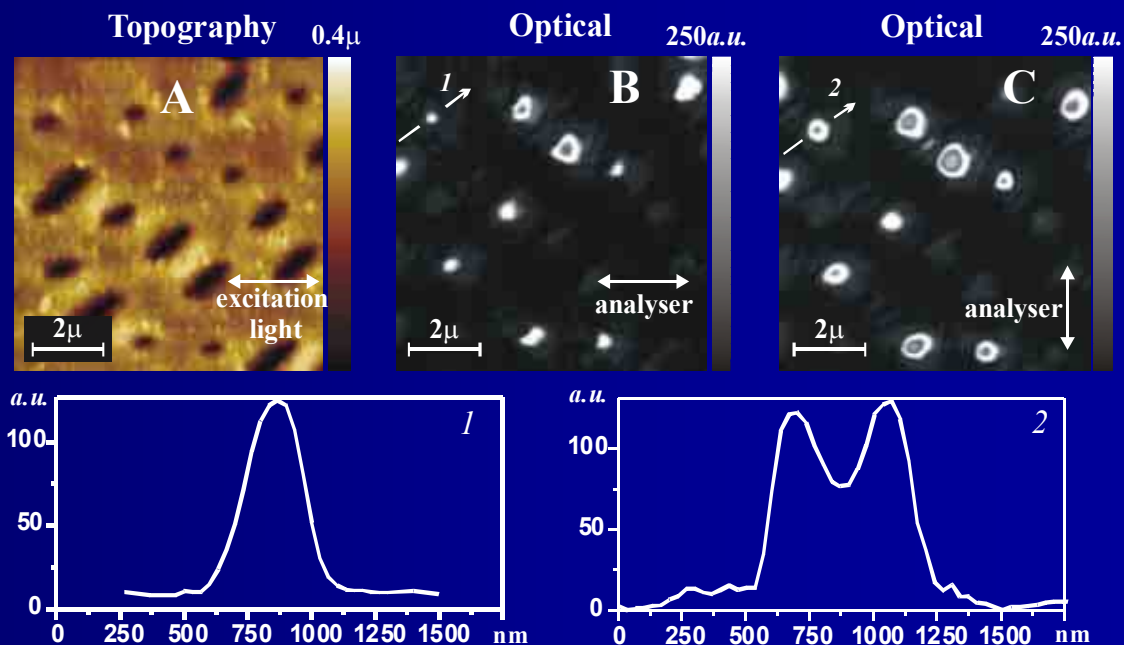


А) СОМБП изображение молекул красителя, усредненное по поляризации возбуждения,
В) схематическое изображение молекул в виде диполей



Поляризационные СОМБП эффекты при прохождении света через диафрагмы нанометровых размеров

Оптические
изображения
диафрагм (В,С) и
сечения этих
изображений (1,2)
для ортогонально
поляризованных
компонент света

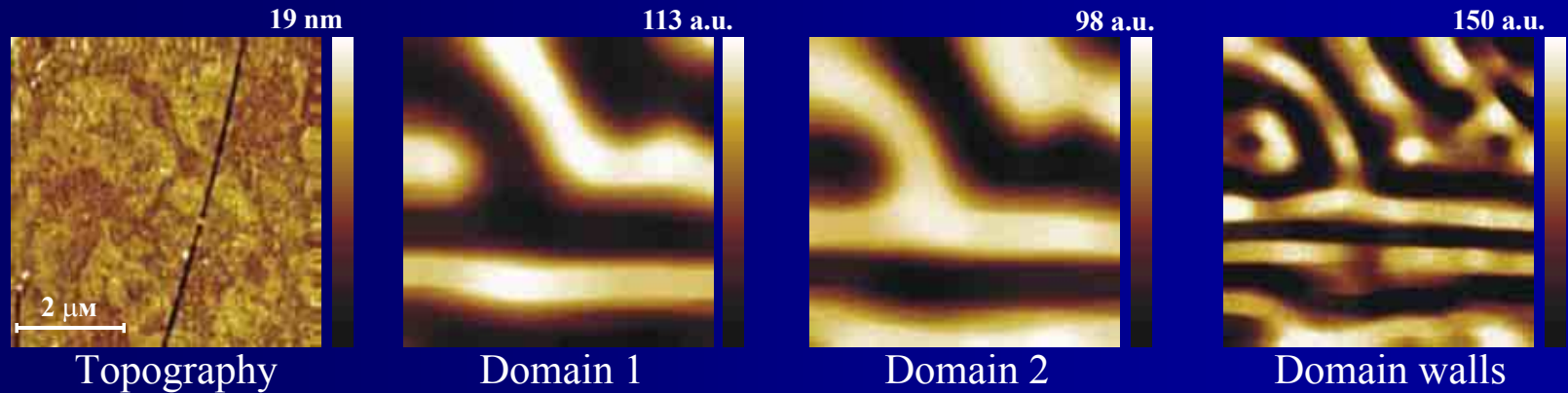


Локальные магнитооптические измерения методом Оптической Микроскопии Ближнего Поля

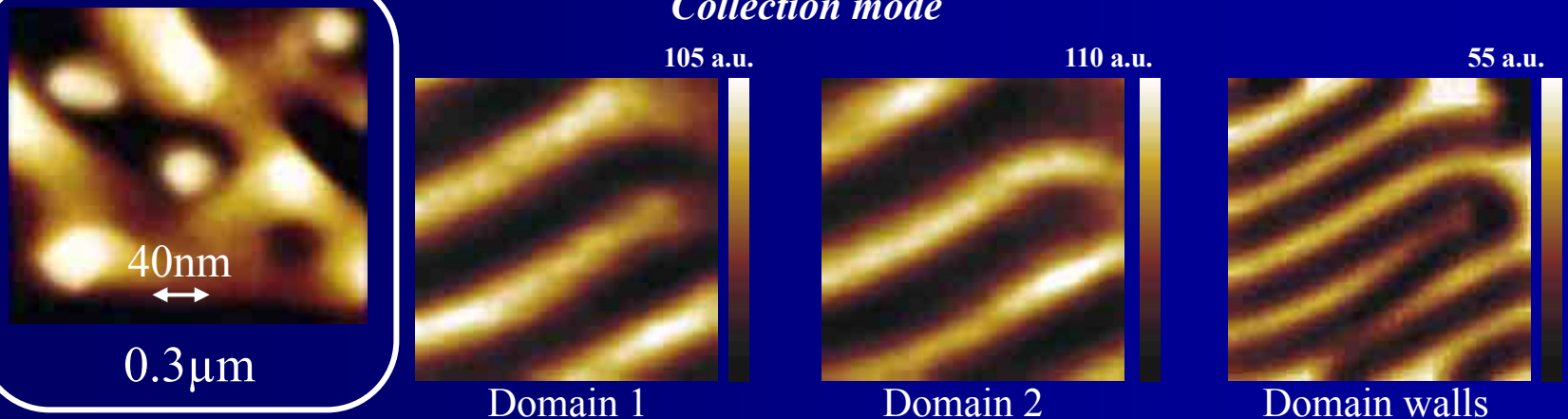
(СОМБП изображения доменов и доменных стенок пленок ферритов-гранатов)



Illumination mode



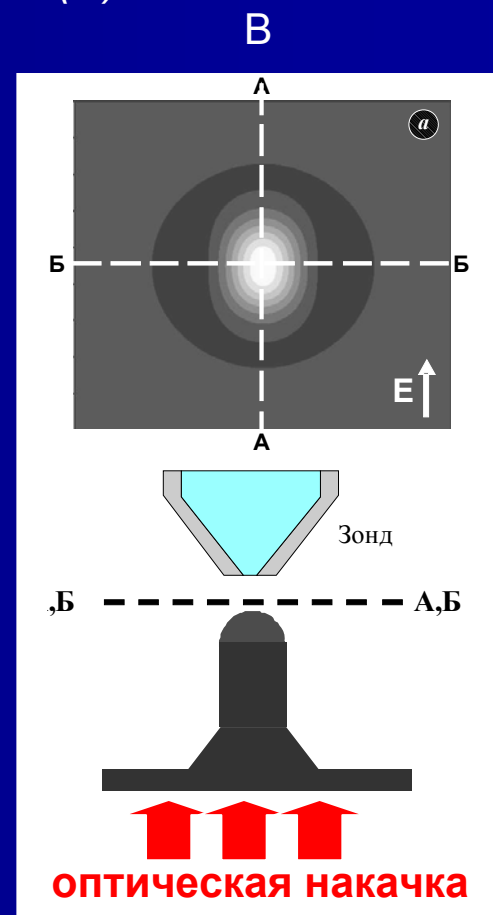
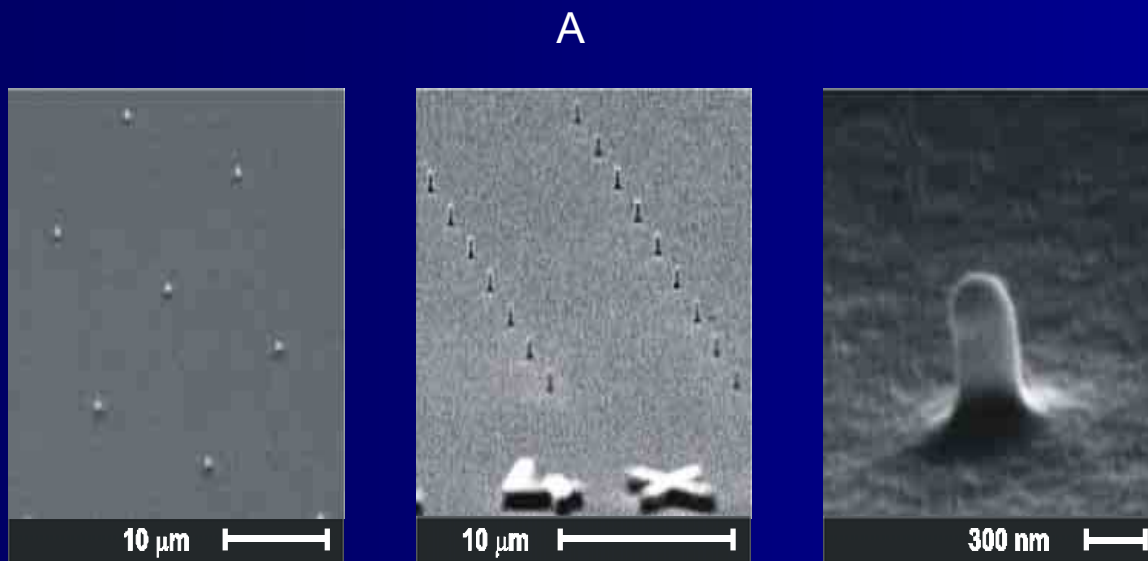
Collection mode





СОМБП локальная диагностика пространственного распределения светового поля вблизи наноструктур

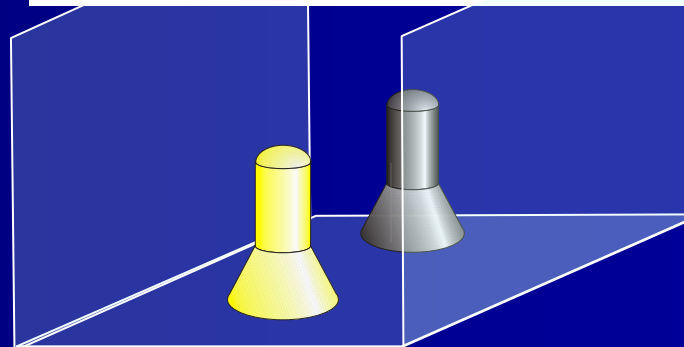
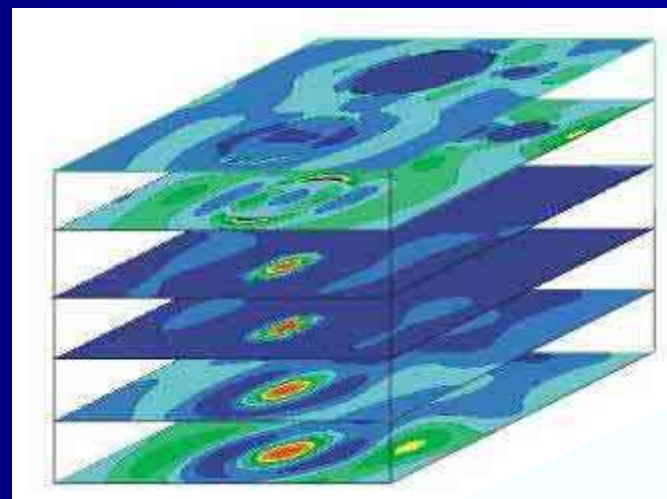
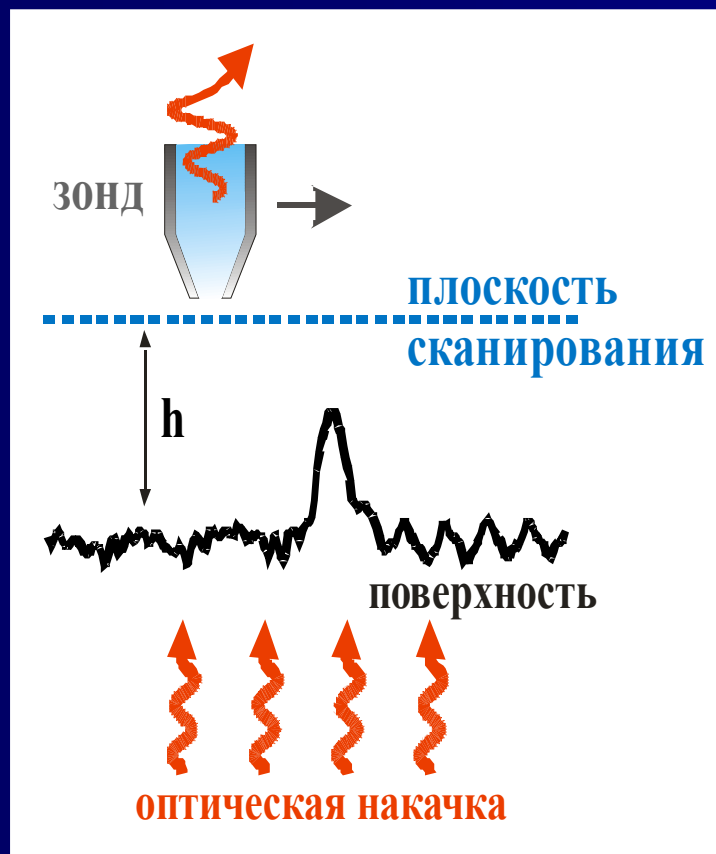
Образцы (А) и геометрия эксперимента (В)



СЭМ изображение полимерных наноцилиндров



Трёхмерное картирование локальных оптических полей. Взаимодействие наноструктур со светом.



Оптическая накачка

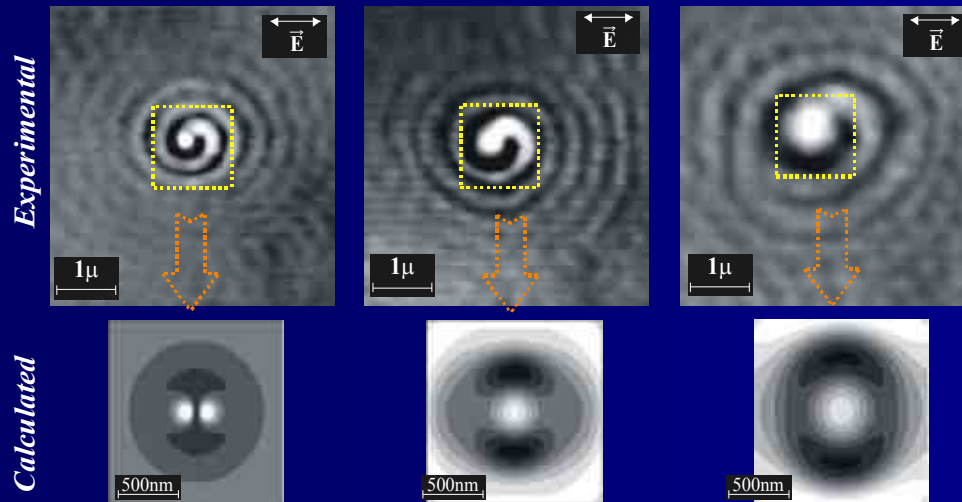
Распределение интенсивности ЭМП



Трёхмерное картирование локальных оптических полей. Взаимодействие наноструктур со светом.

Constant height mode

Height: 20 nm 100 nm 700 nm



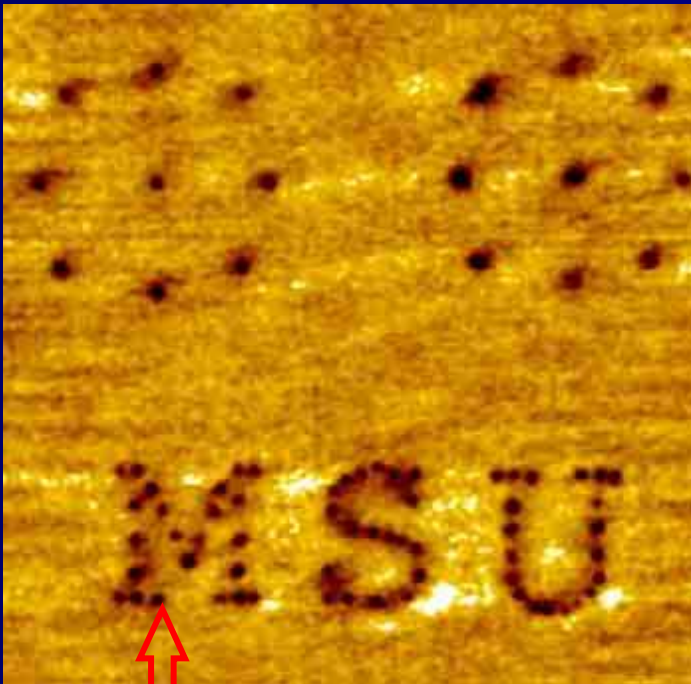
Спиральная структура локального оптического поля (оптические вихри) связана с резонансным возбуждением круговых поверхностных плазмонов вблизи металлизированной наноструктуры, которые интерферируют с падающей и отраженной волной в ближнеполевой области

Применения в нанофотонике: однонаправленные элементы, концентраторы, разветвители

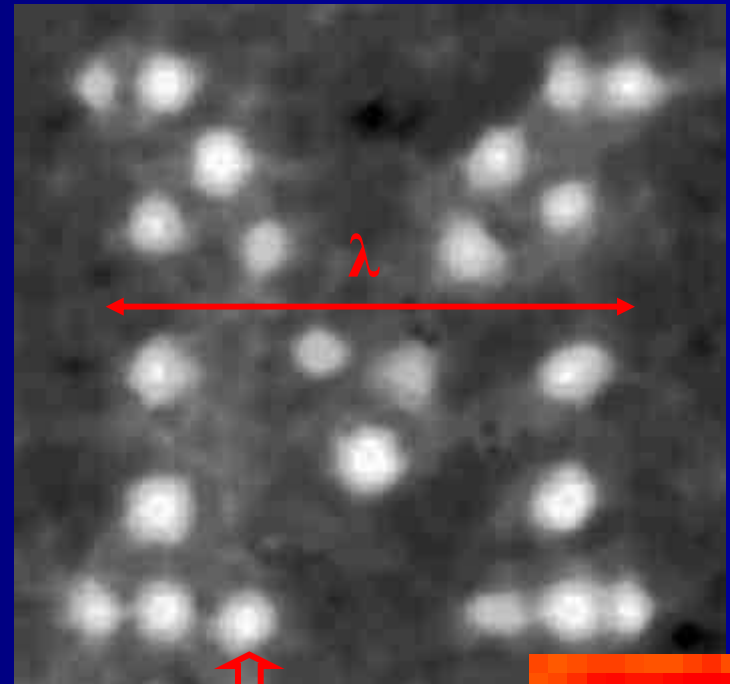
1. Ежов А. А., Магницкий С. А., Маслова Н.С., и др., Письма в ЖЭТФ, **82**, № 9-10. С. 678-681 (2005)
2. A.A. Ezhov, S.A. Magnitskii, N.S. Maslova, D.A. Muzychenko, A.A. Nikulin, V.I. Panov. International Journal of Nanoscience, v.6, n.3/4, p.233-236 (2007)



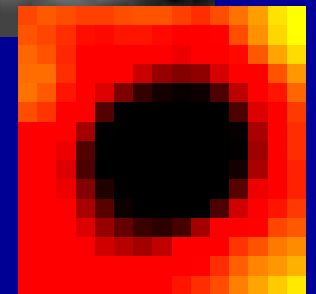
Применение СОМБП для сверхплотной оптической записи



Топография



Средний диаметр ямки 50 нм.



MSU



Quantum
Electronics
Division

Благодарю за внимание!

