

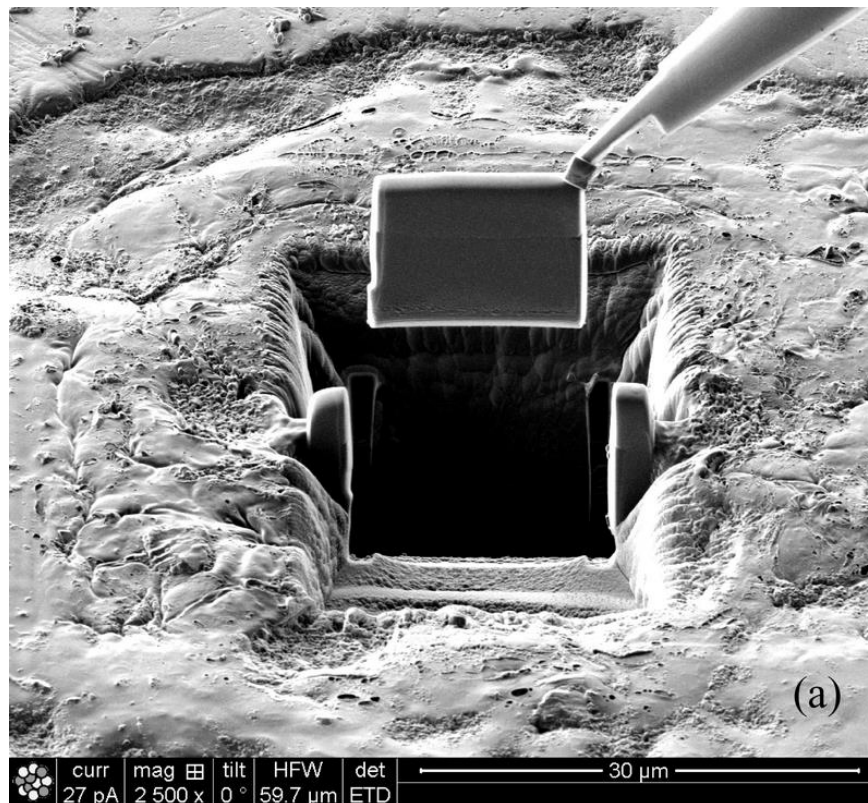
Физические методы исследования состава и структуры веществ

Нано-Микроскопия: Лекция 7

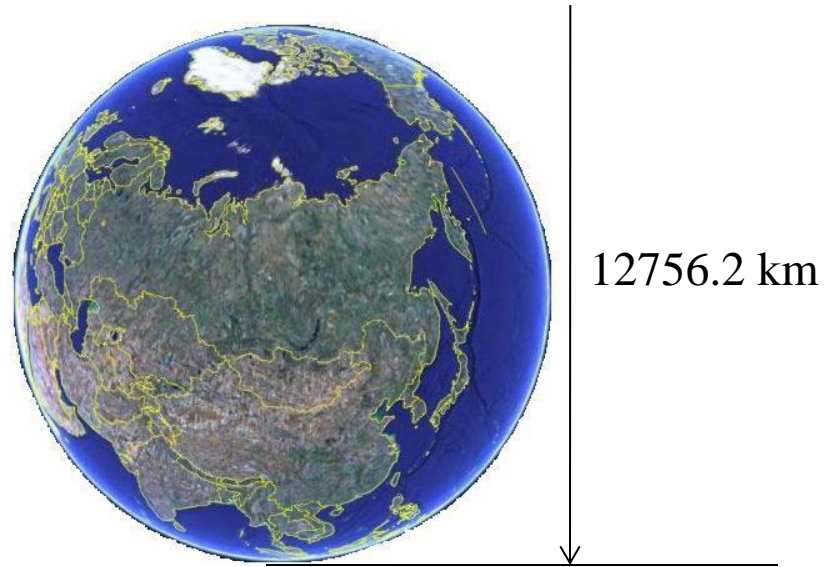


Павел В. Зинин

Принципы туннельной и атомно-силовой микроскопий



Мир нано



$$\frac{1 \cdot \text{meter}}{1 \cdot \text{nanometer}} = 10^9 =$$



Диаметр монеты одна копейка = 12.8 mm

Неоднородные плоские волны

Неоднородные плоские волны. Существует интересное обобщение выражения для плоской гармонической волны. RFR указывалось, что k_x, k_y, k_z представляют собой компоненты волнового вектора по осям координат. При этом предполагалось, что в качестве таких величин можно взять любую тройку *вещественных* чисел, удовлетворяющих соотношению

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \quad (1)$$

Предположим, что совокупность k_x, k_y, k_z является тройкой комплексных чисел

$$k_x = k'_x + ik''_x \quad k_y = k'_y + ik''_y \quad k_z = k'_z + ik''_z \quad (2)$$

При этом мы снова потребуем удовлетворения равенства для плоской волны при вещественном значении $k = \omega/c$. Тогда выражение по-прежнему будет удовлетворять волновому уравнению. Посмотрим, что будет представлять собой волна, описываемая выражением с комплексными значениями k_x, k_y, k_z . Подставляя выражение для плоской волны получаем

$$f = \Phi(\omega) \exp \left[i \left(k'_x x + k'_y y + k'_z z \right) - \left(k''_x x + k''_y y + k''_z z \right) \right] \quad (3)$$

Это выражение описывает волну с переменной амплитудой. Плоскости постоянной амплитуды этой волны, как легко видеть, задаются уравнением

$$k''_x x + k''_y y + k''_z z = C_1$$

Неоднородные плоские волны

$$k_x''x + k_y''y + k_z''z = C_1 \quad (4)$$

Плоскости постоянных фаз уравнением

$$k_x'y + k_y'z = C_2 \quad (5)$$

где c_1 и c_2 —постоянные величины. Можно показать, что плоскости равных фаз ортогональны плоскостям равных амплитуд. Действительно, подставляя (2) в (1) и приравнявая мнимые части обеих частей равенства, получаем

$$k_x''k_x' + k_y''k_y' + k_z''k_z' = 0$$

Это равенство и выражает собой условие ортогональности семейств плоскостей (4) и (5). Волну вида (3) обычно называют *неоднородной плоской волной*. Эта волна распространяется в направлении, задаваемом вектором k' (k_x', k_y', k_z'), и имеет амплитуду, убывающую в перпендикулярном соответствующим выбором системы координат всегда можно **добиться** того, чтобы $k_x' - k_x'' = 0$. Тогда, как и для обычных плоских волн, можно ввести некоторый угол θ и положить

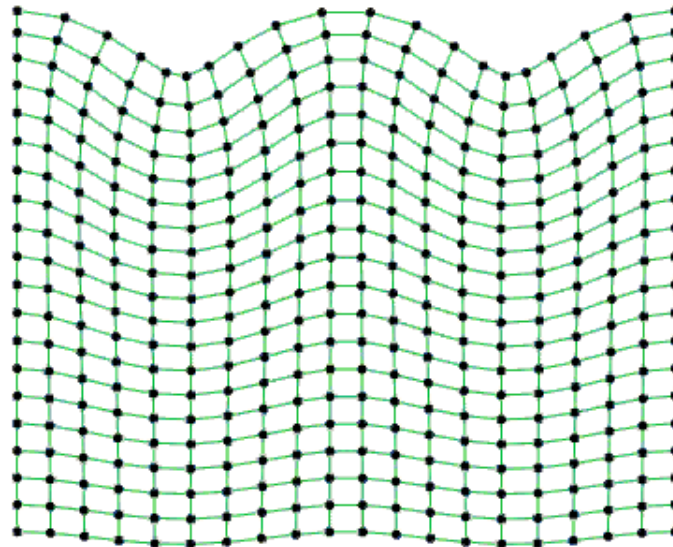
$$k_x = k \sin \theta, \quad k_z = k \cos \theta \quad (6)$$

Рассмотрим, например, случай $\theta = \pi/2 - i\alpha$, где α — вещественная величина. Из (6) получаем $k_x = k \operatorname{ch} \alpha$, $k_z = k \operatorname{sh} \alpha$ и выражение (3) для плоской волны запишется

Неоднородные плоские волны

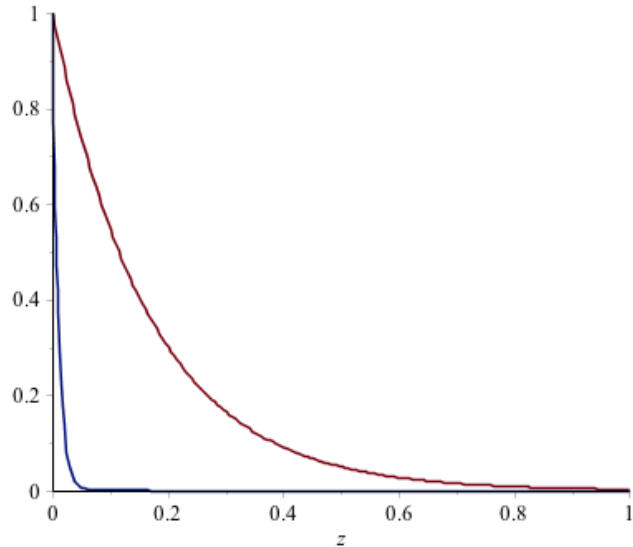
$$f = \Phi(\omega) \exp[ik \cdot ch\alpha \cdot x - k \cdot sh\alpha \cdot z - i\omega t] \quad (7)$$

Таким образом, мы получили волну, которая распространяется в направлении оси x и имеет амплитуду, экспоненциально убывающую в направлении оси z . Скорость распространения волны, как следует из (7), равна $c = \omega/k_x = c/ch\alpha$. т. е. всегда меньше скорости распространения обычной плоской волны c . Длина волны соответственно равняется $2\pi/r \operatorname{ch}\alpha = \lambda/r \operatorname{ch}\alpha$ меньше длины обычной волны при той же частоте. Чем больше α , тем меньше длина волны и тем больше коэффициент затухания волны в направлении оси z .



Генерация неоднородных волн

Evanescent Field Penetration Depth

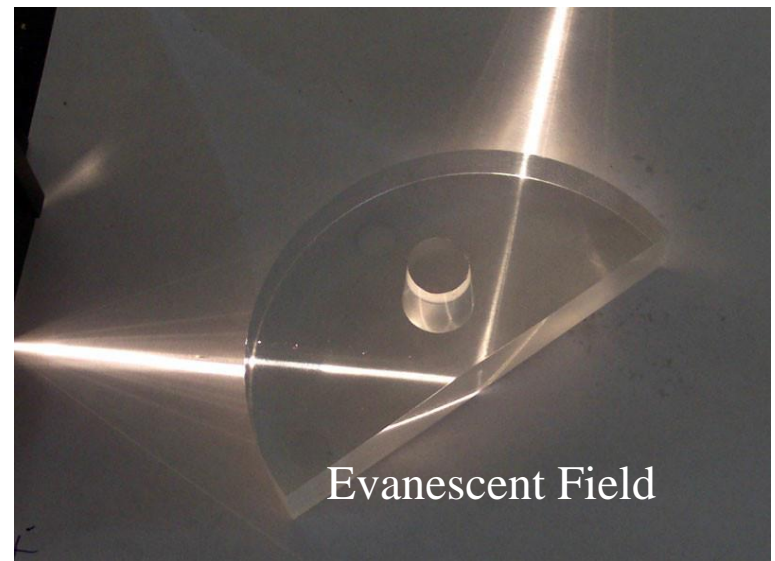
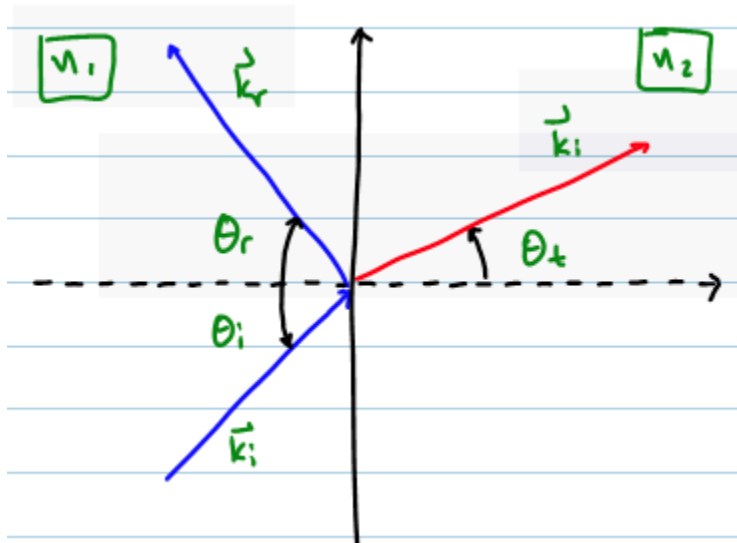


Генерация неоднородных волн

• Полное внутренне отражение:

$$\theta_i > \theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$$

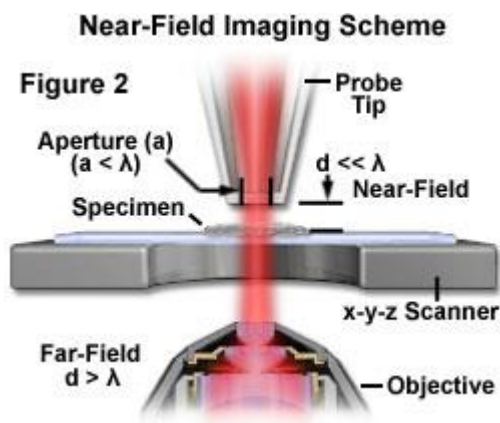
$$\sin(\theta_t) = n_1/n_2 \sin(\theta_i) > 1$$



Сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля (NSOM)

Сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля (NSOM/SNOM) - это метод микроскопии для исследования наноструктур, который нарушает предел разрешения дальнего поля, используя свойства неоднородных волн. Это делается путем размещения детектора очень близко (расстояние намного меньше длины волны λ) к поверхности образца. Это позволяет проводить поверхностный контроль с высокой пространственной, спектральной и временной разрешающей способностью. При использовании этого метода разрешение изображения ограничивается размером апертуры детектора, а не длиной волны освещающего света. В частности, было продемонстрировано боковое разрешение 20 нм и вертикальное разрешение 2-5 нм. Как и в оптической микроскопии, контрастный механизм может быть легко адаптирован для изучения различных свойств, таких как показатель преломления, химическая структура и локальное напряжение.

Типичная схемы визуализации NSOM, в которой освещающая апертура зонда, имеющая диаметр меньше длины волны света, поддерживается в ближнем поле поверхности образца. Поскольку близость или контакт между образцом и зондом (разделение меньше длины волны) является общим требованием для неограниченного дифракцией разрешения, подавляющее большинство всех NSOM требуют системы обратной связи, которая точно контролирует физическое разделение зонда и образца. Кроме того, для управления движением зонда над образцом используется хуз-сканер (обычно пьезоэлектрический). Конфигурация NSOM, показанная на рисунке, позиционирует объектив в дальнем поле обычным способом для сбора оптического сигнала, формирующего изображение.

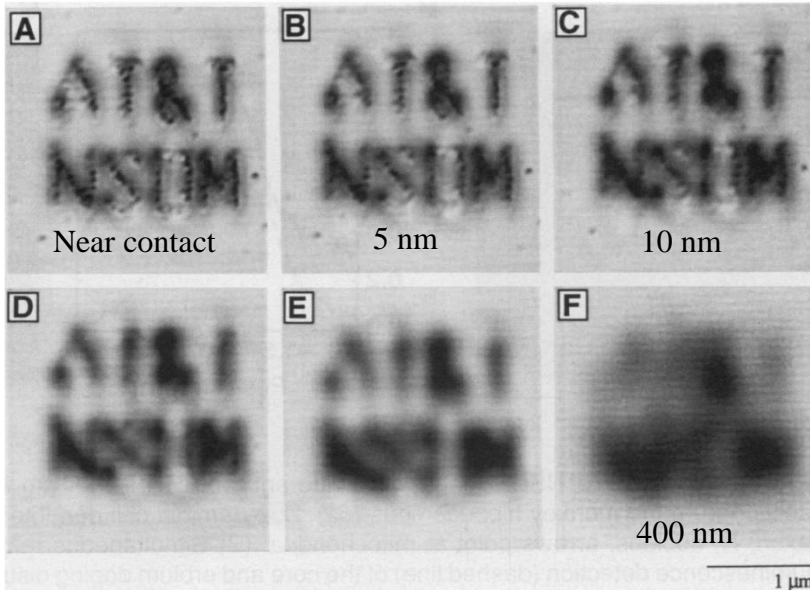
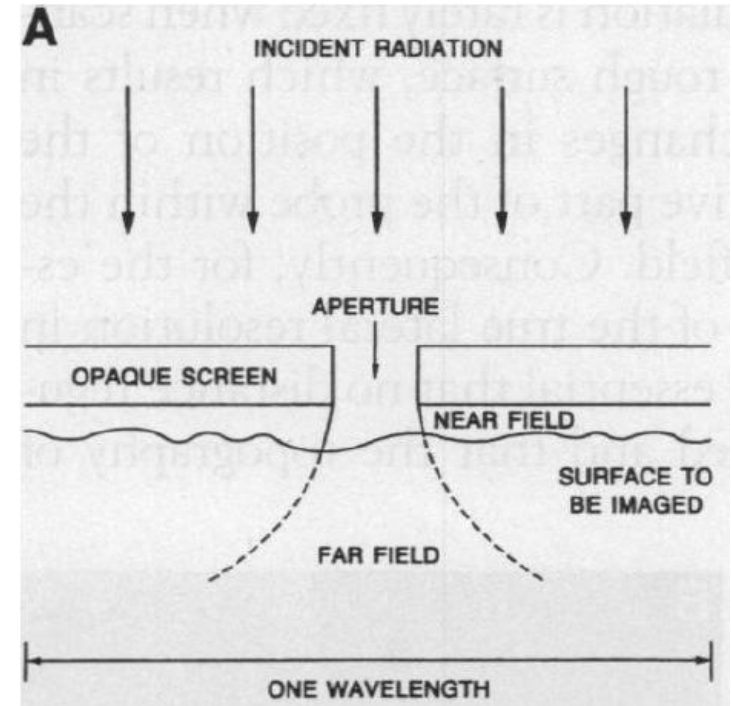
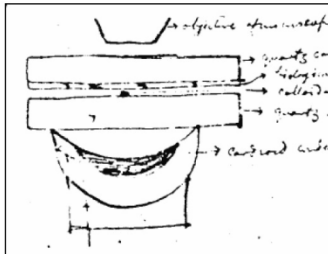


Сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля (NSOM)

E.H. SYNGE (1928)

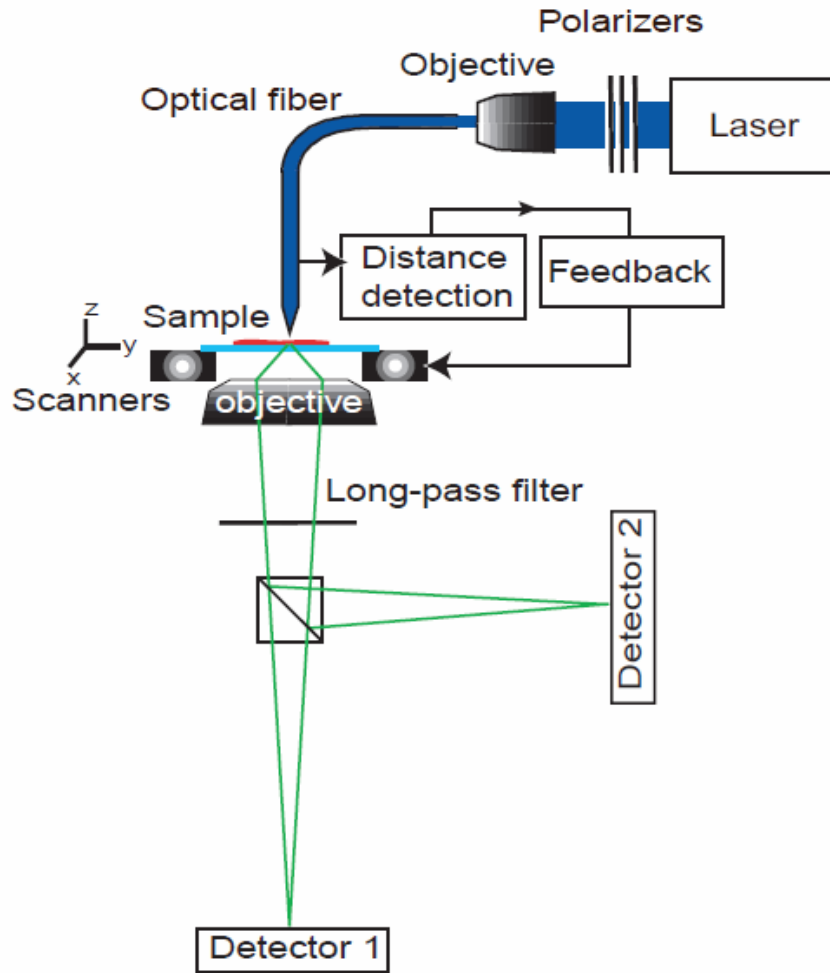
E. H. Synge
22-4-28. G. Dublin
Ireland.

Dear Professor Einstein
You will, I think, be interested to hear that, after many delays, the collected edition of transmitted works has at length been definitely undertaken by the Royal Irish Academy. My notes and another are at present being used



(Betzig & Trautman, 1992)

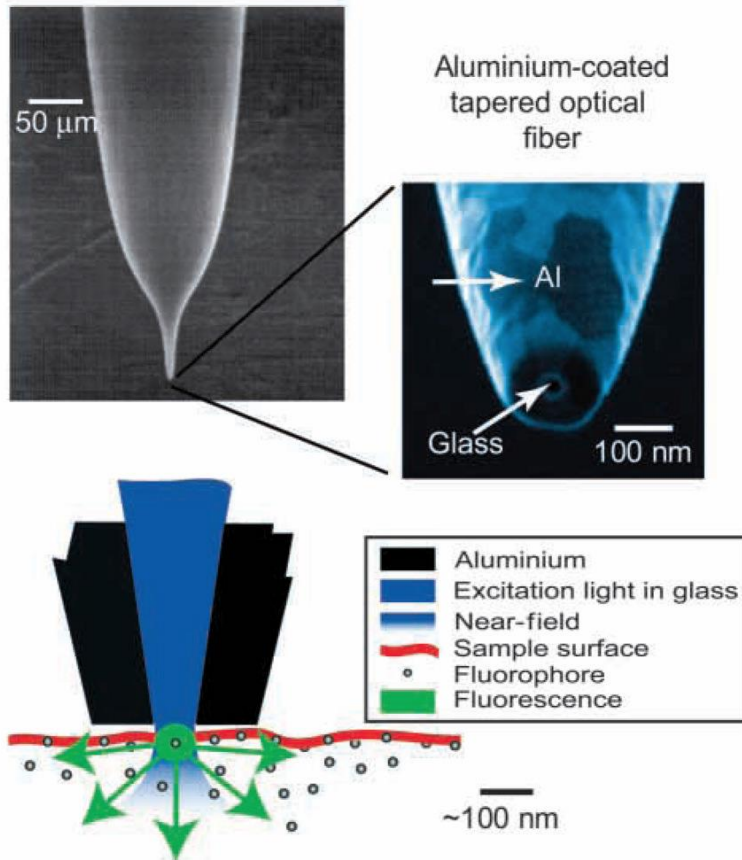
Сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля (NSOM)



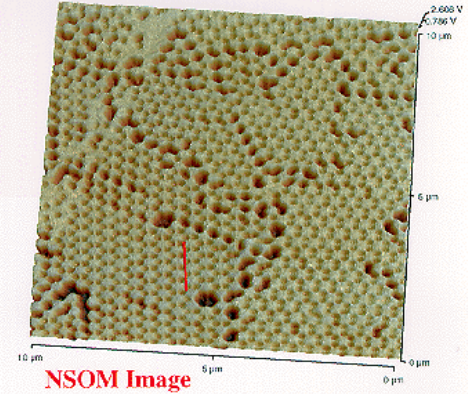
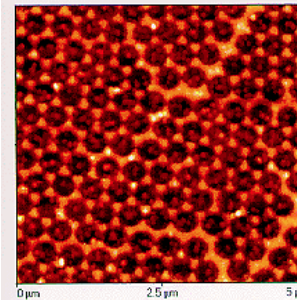
Lange et al. 2001)

Зонд NSOM представляет собой коническое оптическое волокно. Лазерный луч вводится в волокно и используется для возбуждения флуорофоров, когда зонд сканирует поверхность образца. Расстояние между зондом и образцом поддерживается постоянным при <10 нм во время сканирования путем определения расстояния на основе сдвиговой силы в сочетании с электронной системой обратной связи, управляющей пьезоэлектрическим этапом сканирования. Флуоресценция собирается обычным перевернутым микроскопом. Двухканальное оптическое обнаружение позволяет различать длину волны и/или поляризацию.

Сканирующая оптическая микроскопия ближнего поля (NSOM)

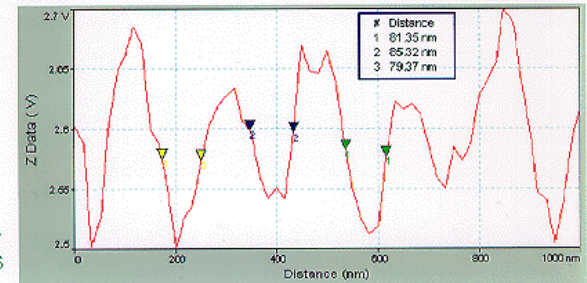


Near-field Scanning Optical Microscopy (NSOM) in Water



Patterned Aluminum on Glass Slide under Water

Line Profile Measurements



Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ)

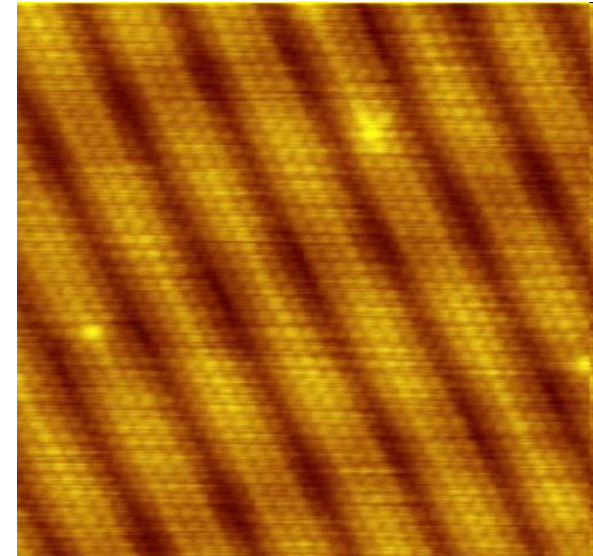
Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) - это мощный метод для наблюдения поверхностей на атомарном уровне. Его разработка в 1981 году принесла его изобретателям Герду Биннигу и Генриху Рореру (в IBM Zurich) Нобелевскую премию по физике в 1986 году. СТМ зондирует плотность состояний материала с помощью туннельного тока. Для СТМ хорошим разрешением считается боковое разрешение 0,1 нм и осевое разрешение 0,01 нм



Binnig



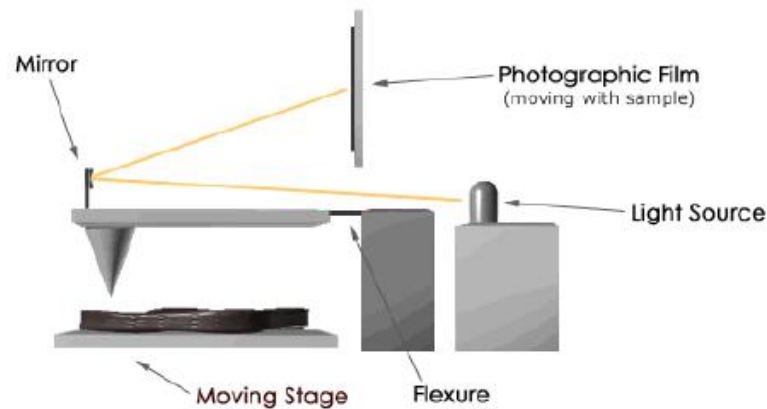
Rohrer



Изображение чистой (100) поверхности золота (From Wikipedia, 2009).

Перьевой профилометр (1929 –Schmalz)

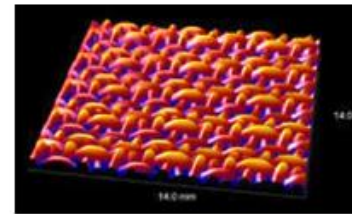
Профилометр, изобретенный Шмальцем в 1929 году, использовал оптический рычаг для контроля движения острого зонда, установленного на конце кантилевера. Увеличенный профиль поверхности создавался путем записи движения стилуса на фотобумаге. Этот тип "микроскопа" генерирует профильные "изображения" с увеличением более 1000X



- Generated profile images up to ~1000X magnification
- Problems with large features (bent probes)



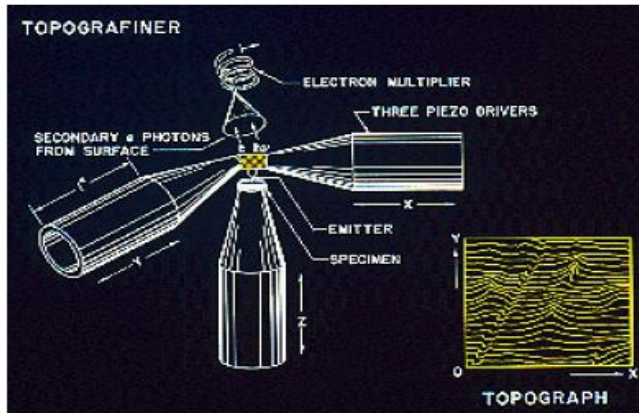
US quarter dollar,
11mm x 18mm scan.



Polyester mesh,
12mm x 12mm scan.

Перьевой профилометр (Schmalz, 1929)

В 1971 году Рассел Янг продемонстрировал бесконтактный тип профилометра, названного **перьевым профилометром**. Янг использовал тот факт, что ток эмиссии электронного поля между острым металлическим зондом и поверхностью очень сильно зависит от расстояния между образцами зондов для электропроводящих образцов. В **перьевым профилометром** зонд был установлен непосредственно на пьезоэлектрической керамике, используемой для перемещения зонда в вертикальном направлении над поверхностью.



- The x and y piezo drivers scan the tip over and slightly above the specimen surface.
 - The z piezo is controlled by a servo system to maintain a constant voltage, and hence a constant vertical separation between the tip and the surface.
 - An electron multiplier detects the tiny fraction of the tunneling current which is scattered by the specimen surface.
- Reference:** R.D. Young, *Physics Today* **24**, 42 (Nov. 1971).



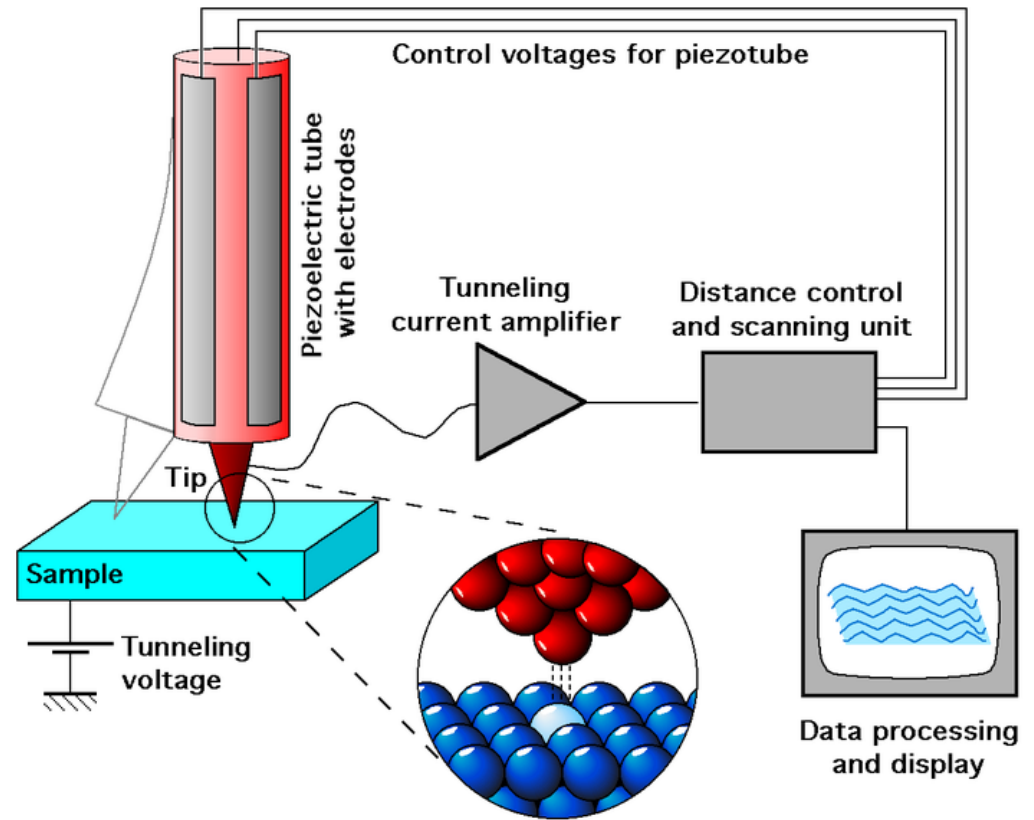
FIRST SCANNING PROBE IMAGE.

Topographic map of a 180-line-per-mm diffraction-grating replica, obtained with the Topografiner, a non-contacting field-emission probe developed at NBS.

Reference: R. Young, J. Ward, and F. Scire, *Rev. Sci. Instrum.* **43**, 999 (1972).

Сканирующая туннельная микроскопия: Принципы

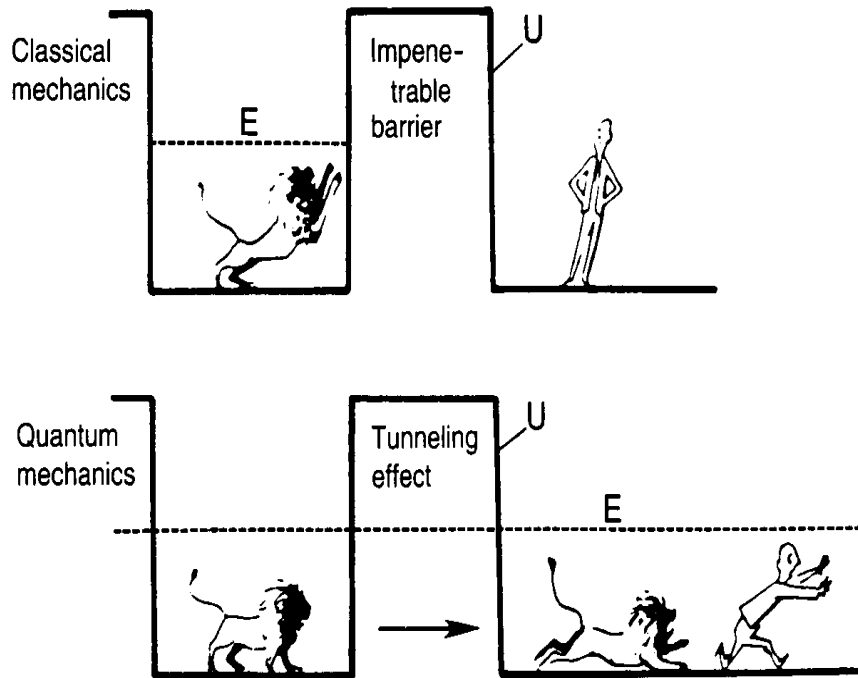
Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ) основана на концепции квантового туннелирования. Когда проводящий наконечник подводится очень близко к исследуемой поверхности, разность напряжений, приложенная между наконечником и поверхностью образца, позволяет электронам туннелировать через вакуум между ними. Результирующий туннельный ток является функцией положения наконечника, приложенного напряжения и локальной плотности состояний образца. Информация получена путем контролировать течение по мере того как Положение зонда просматривает через поверхность, и обычно отображается в форме изображения.



Схематическое представление сканирующего туннельного микроскопа СТМ (From Wikipedia, 2009)

Феномен туннелирования

STM - это электронный микроскоп, который использует один атомный наконечник для достижения атомарного разрешения.



- В классической физике электрический ток невозможен без прямого соединения проводом между двумя поверхностями
- В атомарном масштабе квантово-механическая частица представляет волну, и её поведение описывается волновой функцией.
- Имеется вероятность, что квантовая частица проникнет за барьер, который непреодолим для классической элементарной частицы.

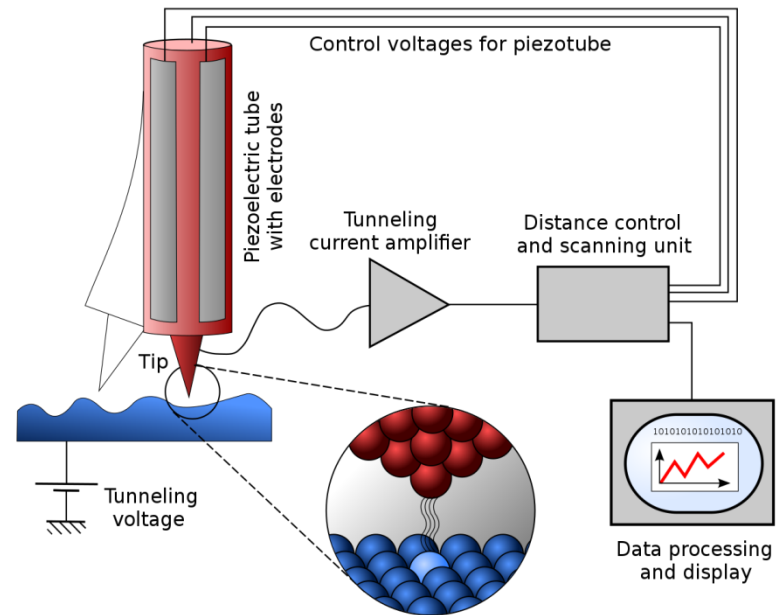
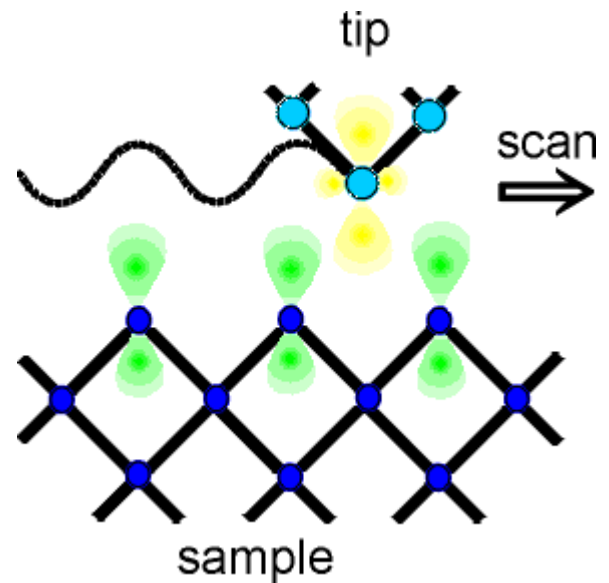


Схема работы сканирующего туннельного микроскопа: piezoelectric tube with electrodes — трубка с электродами; tunneling current amplifier — амперметр для измерения величины туннельного тока; distance control and scanning unit — модуль для перемещения иглы и контроля расстояния игла-образец; tip — игла; sample — образец, карту рельефа которого требуется построить; tunneling voltage; data processing and display — модуль для обработки результатов измерений и вывода карты рельефа (Википедия, 2020)

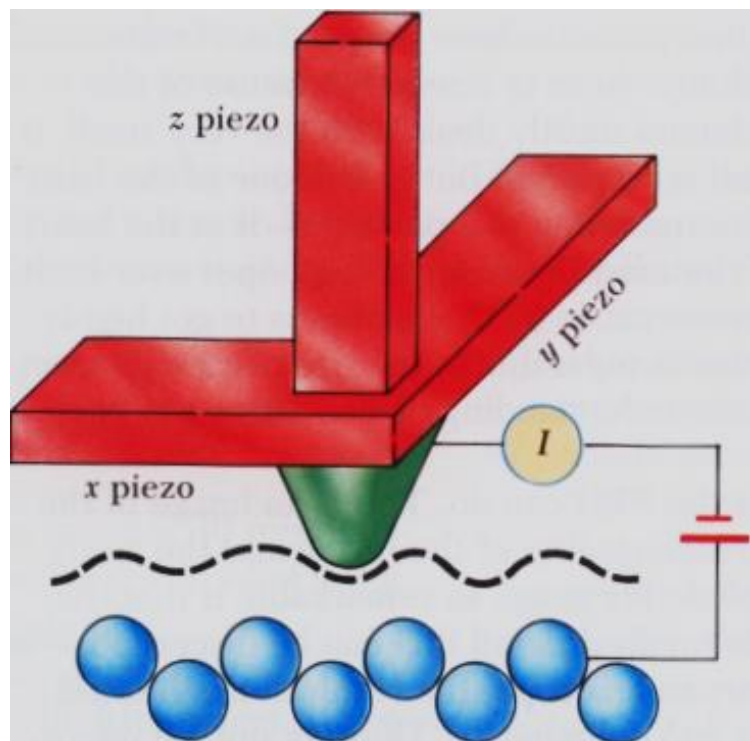
СТМ зонды (иглы)



- Срез платинового-иридиевой проволоки
- Электрохимическое травление вольфрамовой проволоки
- Вольфрам, заточенный с помощью ионного утончения
- Лучшие наконечники имеют вершину шириной в несколько сотен нм

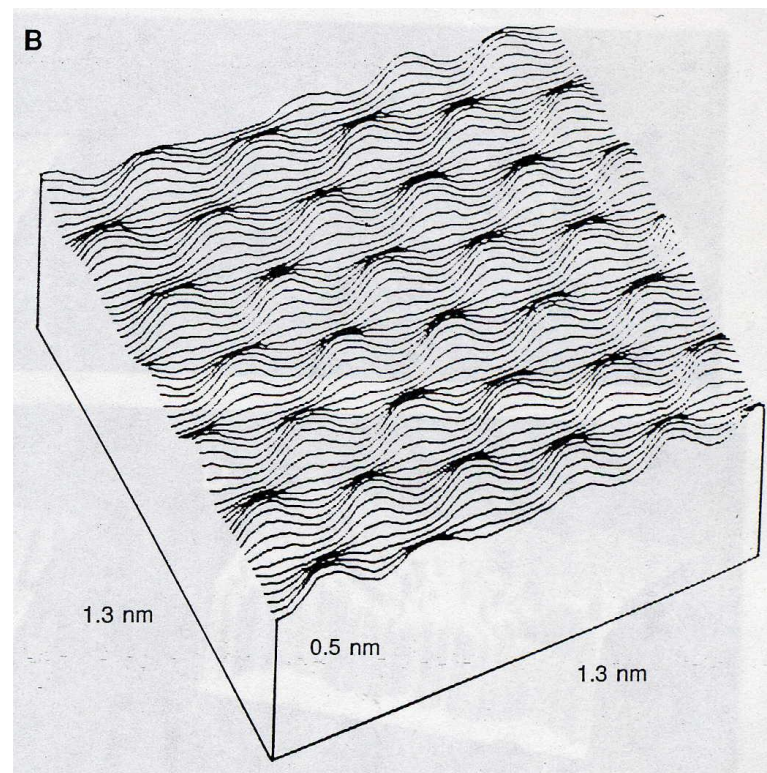


Инструментальная конструкция: управление наконечником



Схематическое представление STM. Наконечник, изображенный в виде закругленного конуса, установлен на пьезоэлектрическом сканере x, y, z. Сканирование зонда над образцом может выявить контуры поверхности вплоть до атомарного уровня. (Based on a drawing from P. K. Hansma, V. B. Elings, O. Marti, and C. Bracker, Science 242:209, 1988)

- Точное управление наконечником осуществляется за счёт пьезоэлектрического сканера.
- Смещение с точностью до $\pm .05 \text{ \AA}$



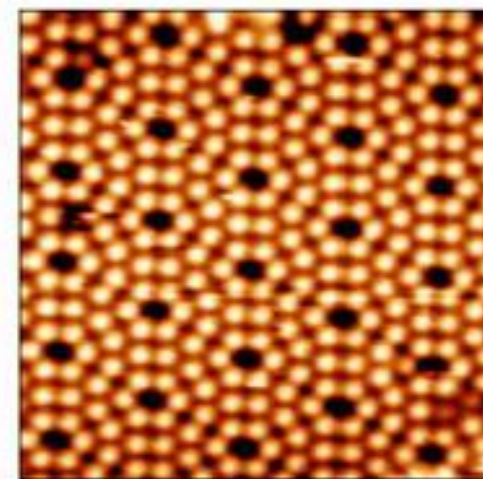
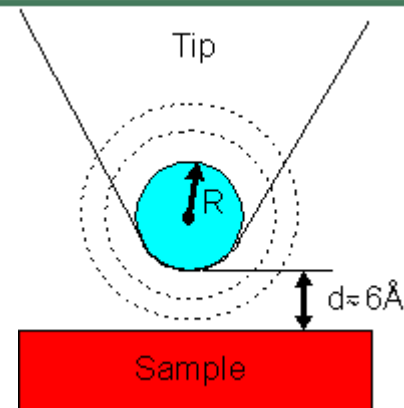
Raster scanning

Атомное разрешение и СТМ

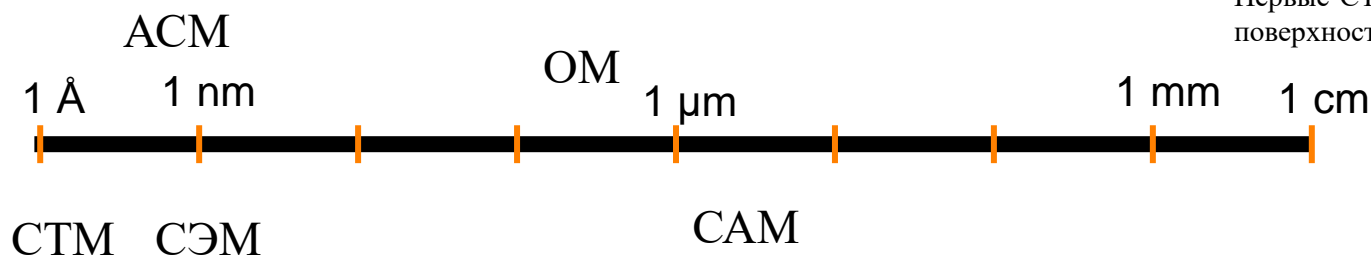
Латеральное разрешение СТМ не может быть понято в терминах дифракционного разрешения Рэля. Реальное атомное разрешение может быть понято только с точки зрения квантовой механики

- Максимальное латеральное разрешение: 0.1 \AA
- Максимальное аксиальное разрешение: 0.01 \AA
- Максимальное поле зрения: 100 \mu m

При типичном атомном диаметре, например $0,3 \text{ нм}$, туннельный ток изменяется в 1000 раз!

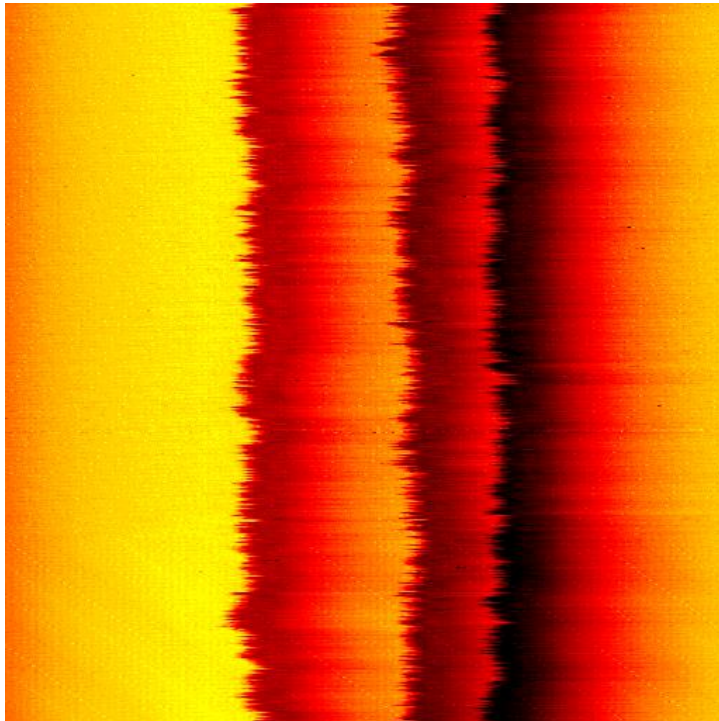


Первые СТМ изображения были получены на поверхности Si (111)



СТМ поверхности Cu(111)

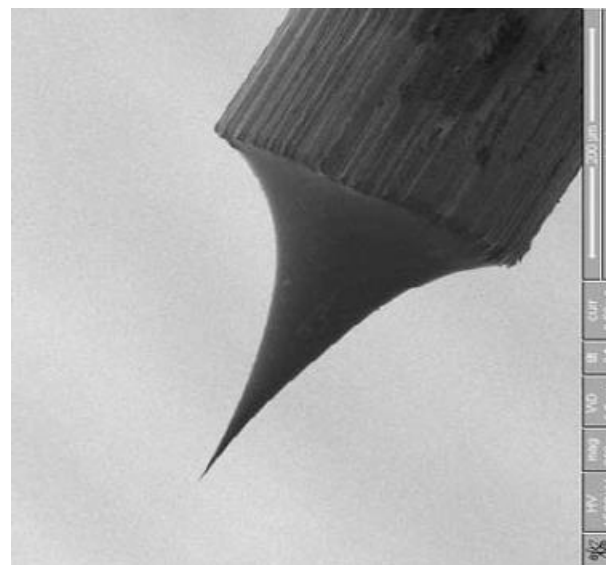
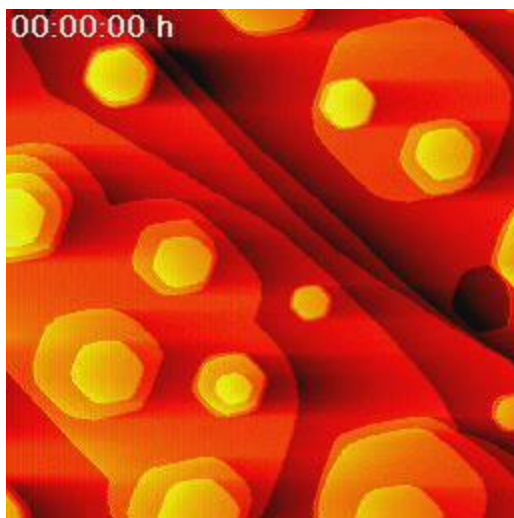
На видео показана последовательность из 155 отдельных изображений сканирующей туннельной микроскопии (СТМ). Каждое изображение занимало около 30 секунд для записи.



- «Топографическая» модель хороша для крупномасштабных изображений, но не для атомарного уровня.
- Модель плотности заряда электронов более точная для изображений атомного уровня.
- Лучшая модель требует сложных квантово-механических соображений

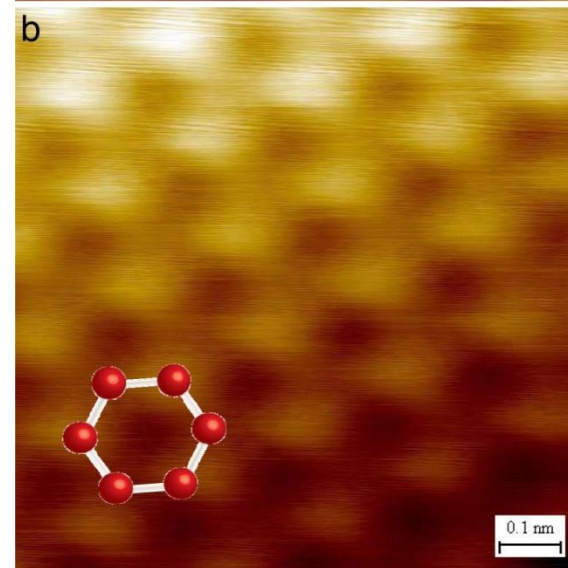
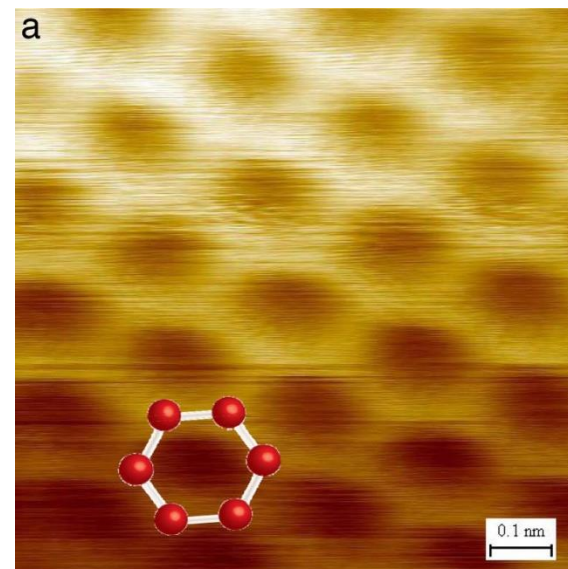
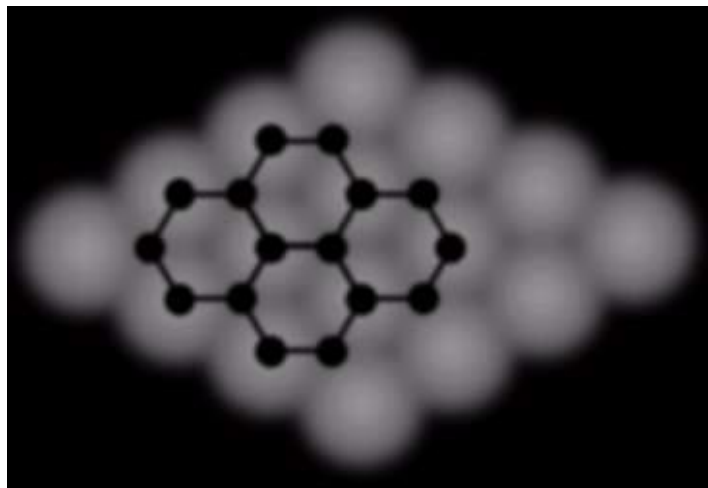
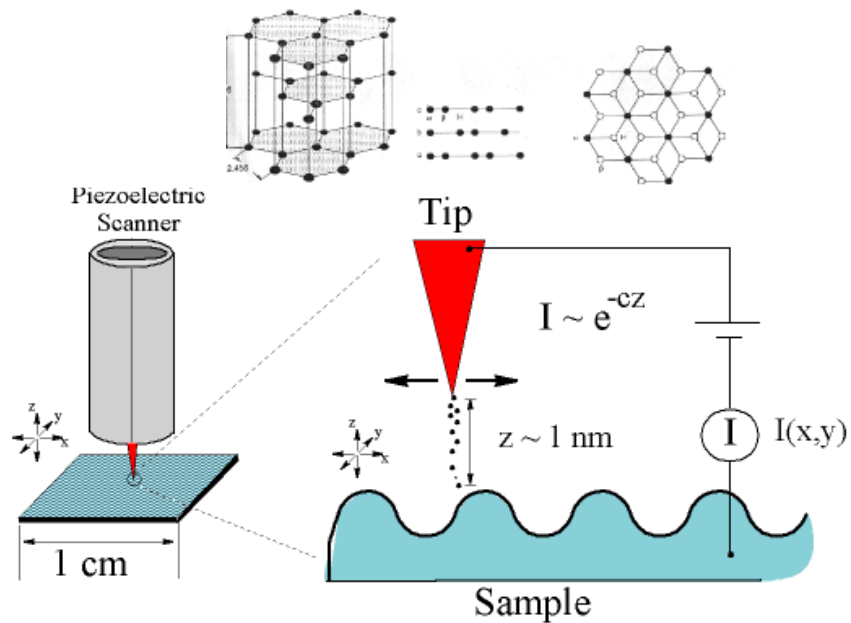
Реальное время видео длится примерно полтора часа. Видны три параллельные ступени на поверхности Cu (111) при температуре 27°C. Отображаемая площадь поверхности составляет 24x24 nm², а высота поверхности уменьшается слева направо. Благодаря атомному движению по краям ступеней не остаются прямыми и неподвижными, а претерпевают тепловые флуктуации вокруг своего равновесного положения.

СТМ поверхности Cu(111)



На СТМ изображении показана площадь поверхности Cu(111) размером $200 \times 200 \text{ nm}^2$ при температуре 36°C после осаждения нескольких монослоев меди. Осажденная медь образует многослойные высокие шестиугольные островки. Эти острова подвижны из-за диффузии атомов вдоль краев острова и из-за присоединения/отделения атомов.

СТМ изображения графита



Преимущества

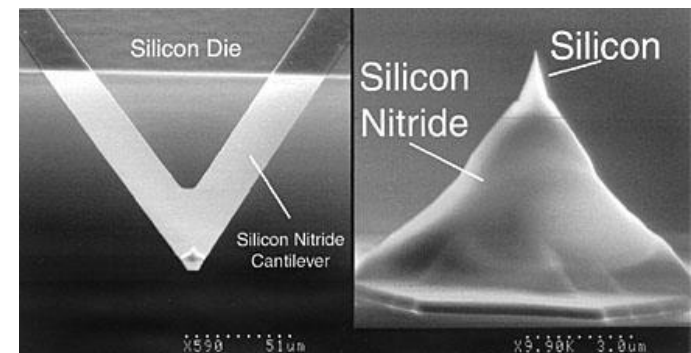
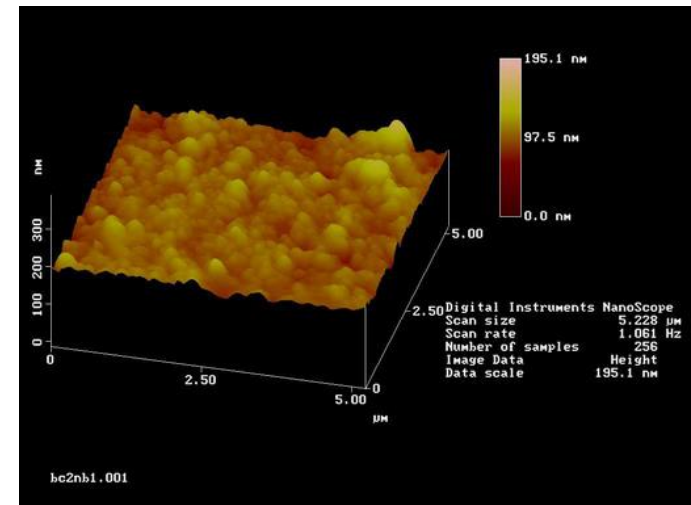
- Отсутствие повреждения образца
- Разрешение лучше чем в СЭМ
- Спектроскопия отдельных атомов
- Наилучшее латеральное разрешение: 0.1 \AA
- Наилучшее аксиальное разрешение: 0.01 \AA
- Наибольшее поле зрения: 100 \mu m

Недостатки

- Образцы должны быть проводящими: проводники и полупроводники
- Использование в биологии: АСМ
- Вообще это сложная техника для выполнения

Атомно-силовой микроскоп (АСМ)

Атомно-силовой микроскоп был изобретен Гердом Биннингом, Кристофом Гербером и Кэлвином Ф. Куэйттом в середине восьмидесятых годов (Binnig et al., *Phys. Rev. Letters* 1986). Используется для определения рельефа поверхности с разрешением от десятков ангстрем вплоть до атомарного (и даже субатомарного).



Атомная (Сканирующая) Силовая Микроскопия

Принцип действия: Принцип работы атомно-силового микроскопа основан на регистрации силового взаимодействия между поверхностью исследуемого образца и зондом. В качестве зонда используется наноразмерное остриё, располагающееся на конце упругой консоли, называемой кантилевером. Сила, действующая на зонд со стороны поверхности, приводит к изгибу консоли. Появление возвышенностей или впадин под остриём приводит к изменению силы, действующей на зонд, а значит, и к изменению величины изгиба кантилевера. Таким образом, регистрируя величину изгиба, можно получить изображение рельефа поверхности.

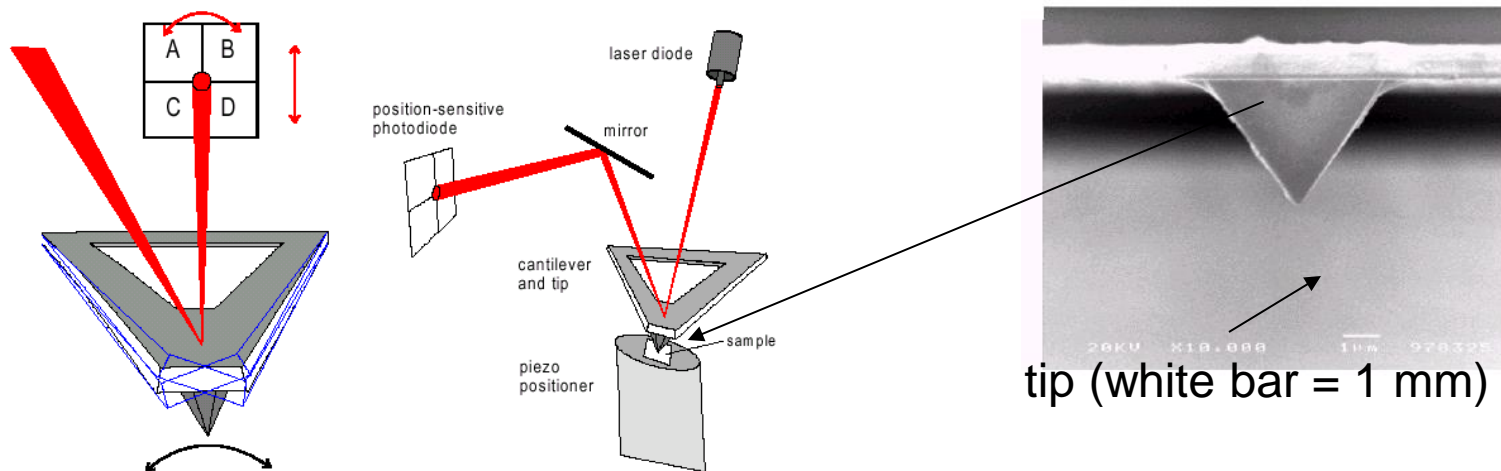
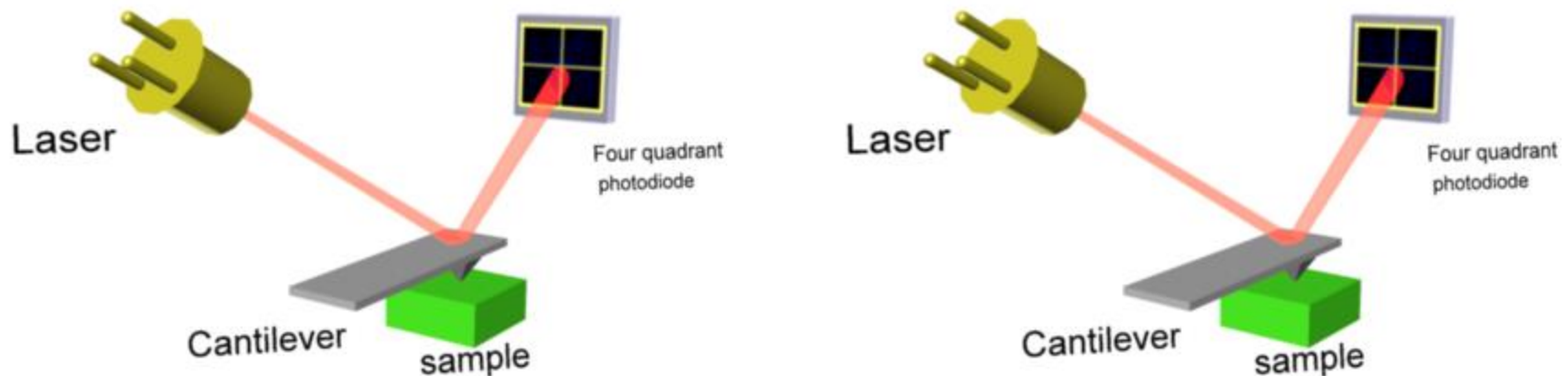


Figure 2.10 Cantilever and photodiode (left) and schematic diagram of contact mode AFM (right).

Излучение полупроводникового лазера фокусируется на упругой консоли зондового датчика. Регистрация отраженного излучения выполняется с помощью фоточувствительного элемента – четырехквadrантного фотодиода, который позволяет определять направление и уровень смещения консоли зондового датчика

Атомная (Сканирующая) Силовая Микроскопия

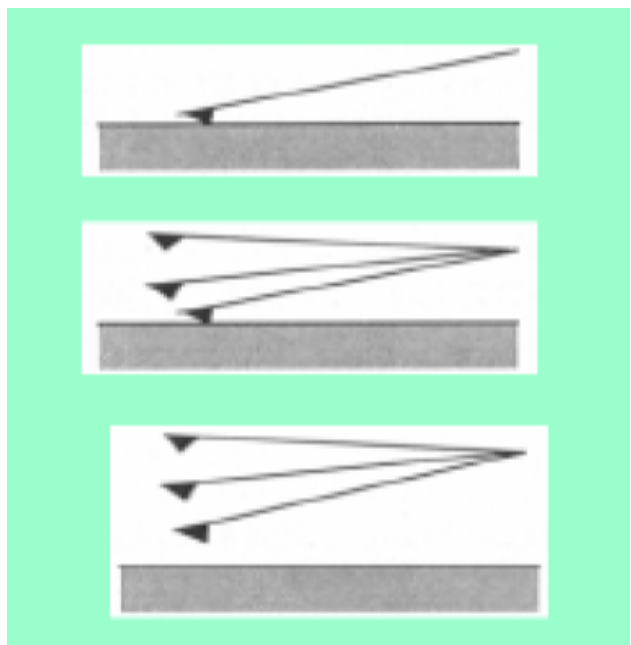
Одним из наиболее важных факторов, влияющих на разрешение, которое может быть достигнуто с помощью АСМ, является резкость сканирующего наконечника. Лучшие наконечники могут иметь радиус кривизны всего около 5 нм.



Одним из важных применений АСМ (помимо визуализации) является силовая спектроскопия, измерение кривых сила-расстояние. Для этого метода наконечник АСМ выдвигается к поверхности и отводится от нее, поскольку статическое отклонение кантилевера контролируется в зависимости от пьезоэлектрического смещения. Эти измерения были использованы для измерения наноразмерных контактов, атомных связей, ван-дер-ваальсовых сил и сил Van der Waals, сил растворения в жидкостях и сил растяжения и разрыва отдельных молекул. Силы порядка нескольких пиконьютонов теперь можно регулярно измерять с разрешением вертикального расстояния более 0,1 нанометра (Wikipedia, 2009). a function of piezoelectric displacement.

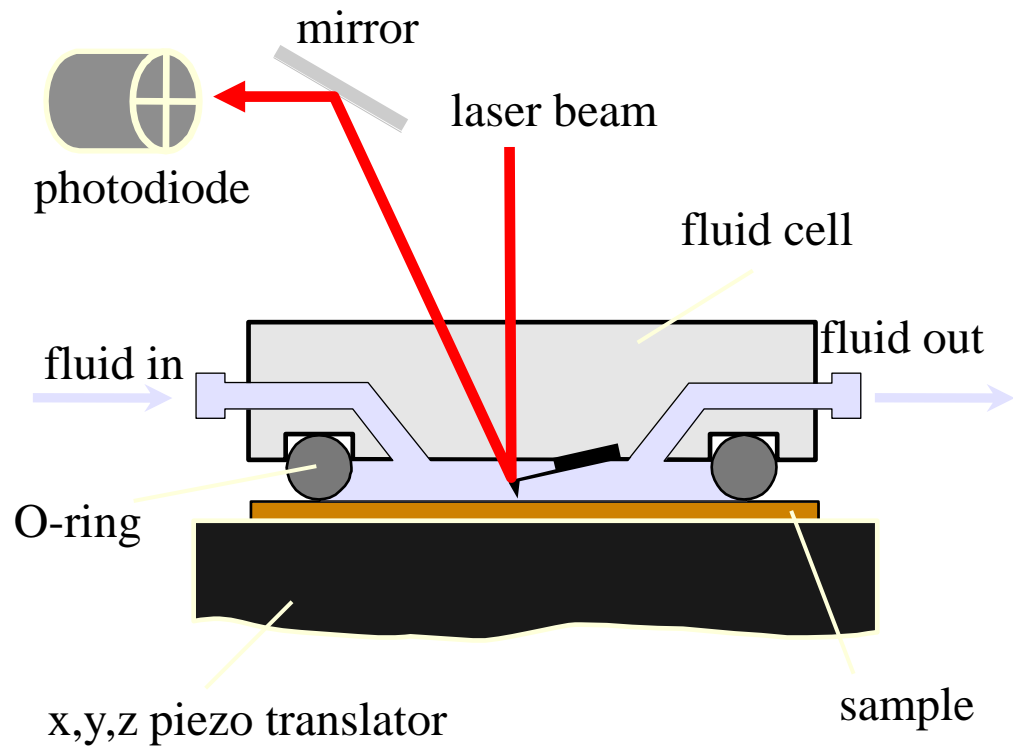
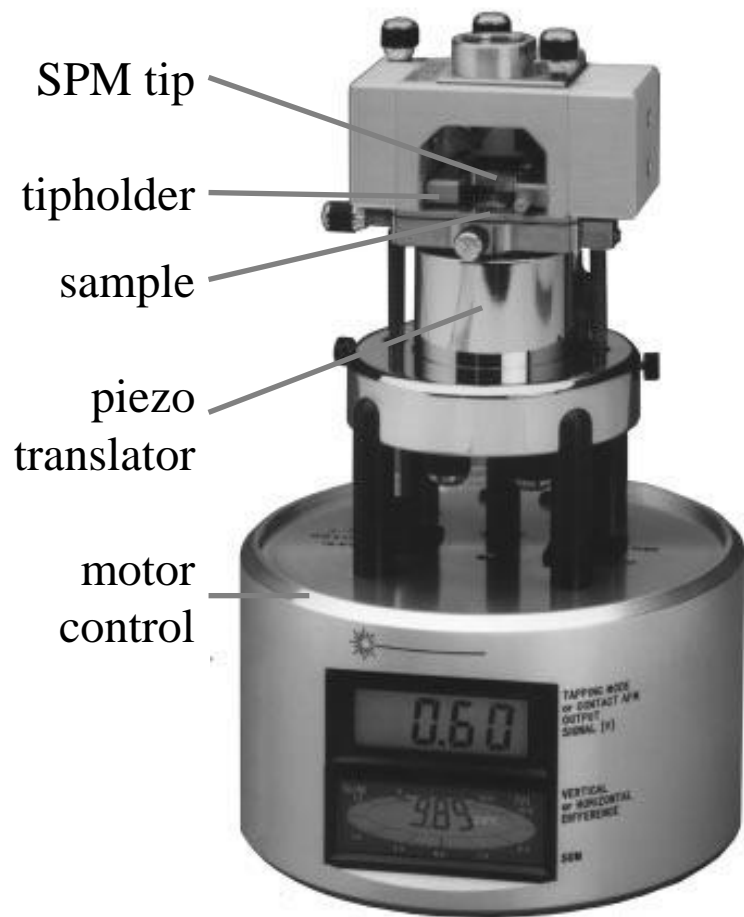
АСМ: контактный и бесконтактный режимы

Контактный режим - постоянная сила или постоянное расстояние в контактном режиме наконечник обычно поддерживается на постоянном усилии путем перемещения кантилевера вверх и вниз по мере его сканирования. Контактный режим АСМ обладает рядом преимуществ перед другими режимами. Он позволяет сканировать поверхность с высокой скоростью, что важно, например, при изучении протекания некоторых процессов в реальном времени. Кроме того, образцы со значительными вертикальными изменениями топографии проще всего сканировать именно в контактном режиме. Только в контактном режиме можно достичь атомарного разрешения исследуемой поверхности.



Бесконтактный режим. В бесконтактном режиме кантилевер совершает вынужденные колебания порядка 1 нм. При приближении зонда к поверхности на кантилевер начинает действовать дополнительная сила со стороны образца. Регистрация изменения амплитуды и фазы колебаний кантилевера в бесконтактном режиме требует высокой чувствительности и устойчивости работы обратной связи. На практике чаще используется так называемый «полуконтактный» режим колебаний кантилевера. При работе в этом режиме возбуждаются вынужденные колебания кантилевера вблизи резонанса с амплитудой порядка 10-100 нм. Кантилевер подводится так, чтобы в нижнем полупериоде колебаний происходило касание поверхности образца.

Атомно силовая микроскопия (Nanoscope III)



На воздухе и в воде

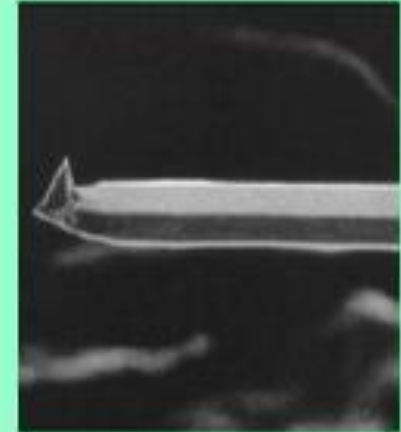
Микрозонды



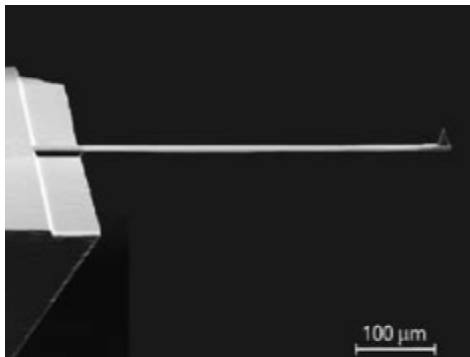
Тепловой зонд



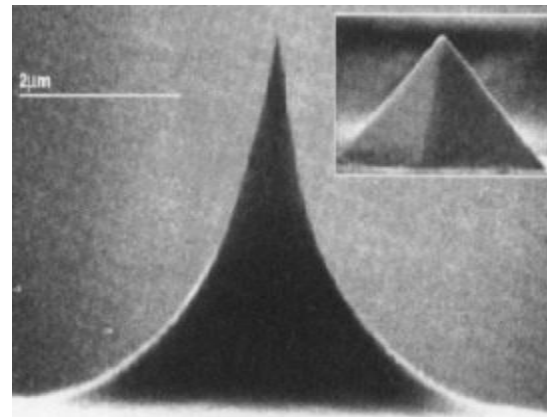
Алмазный зонд



PtIr/DLC зонд покрытый алмазной пленкой.

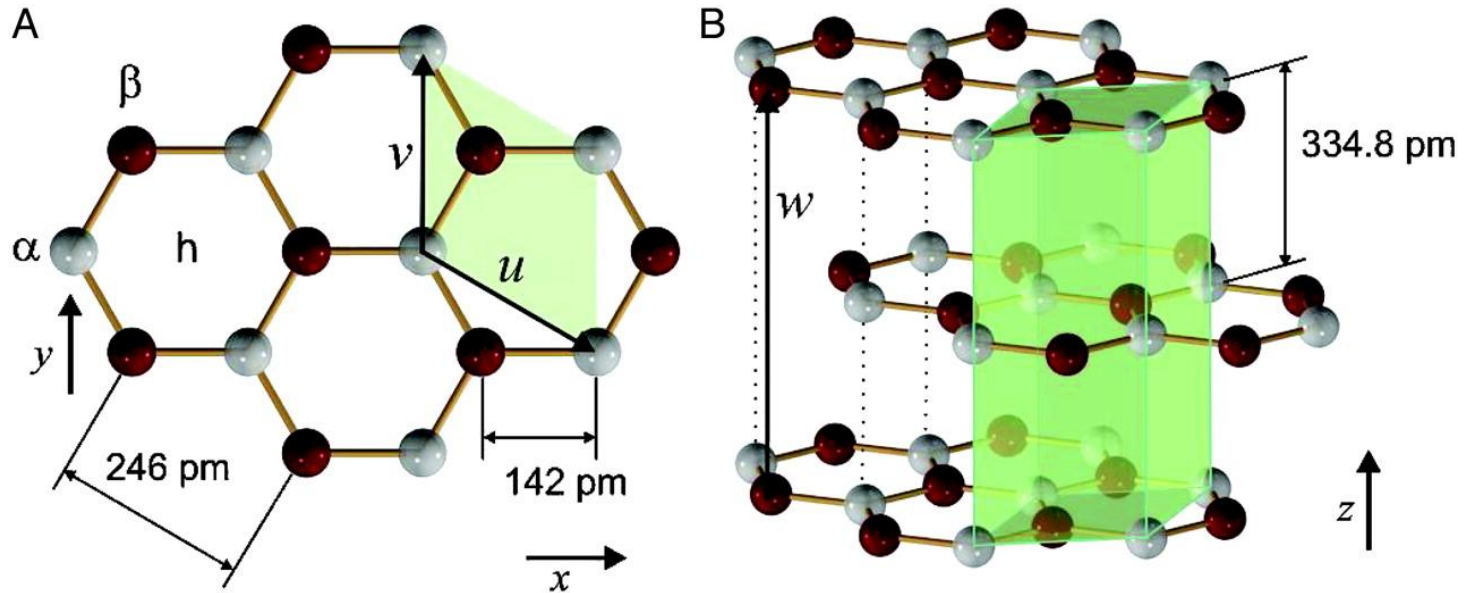


Зонд прикрепляется на кусочке стекла



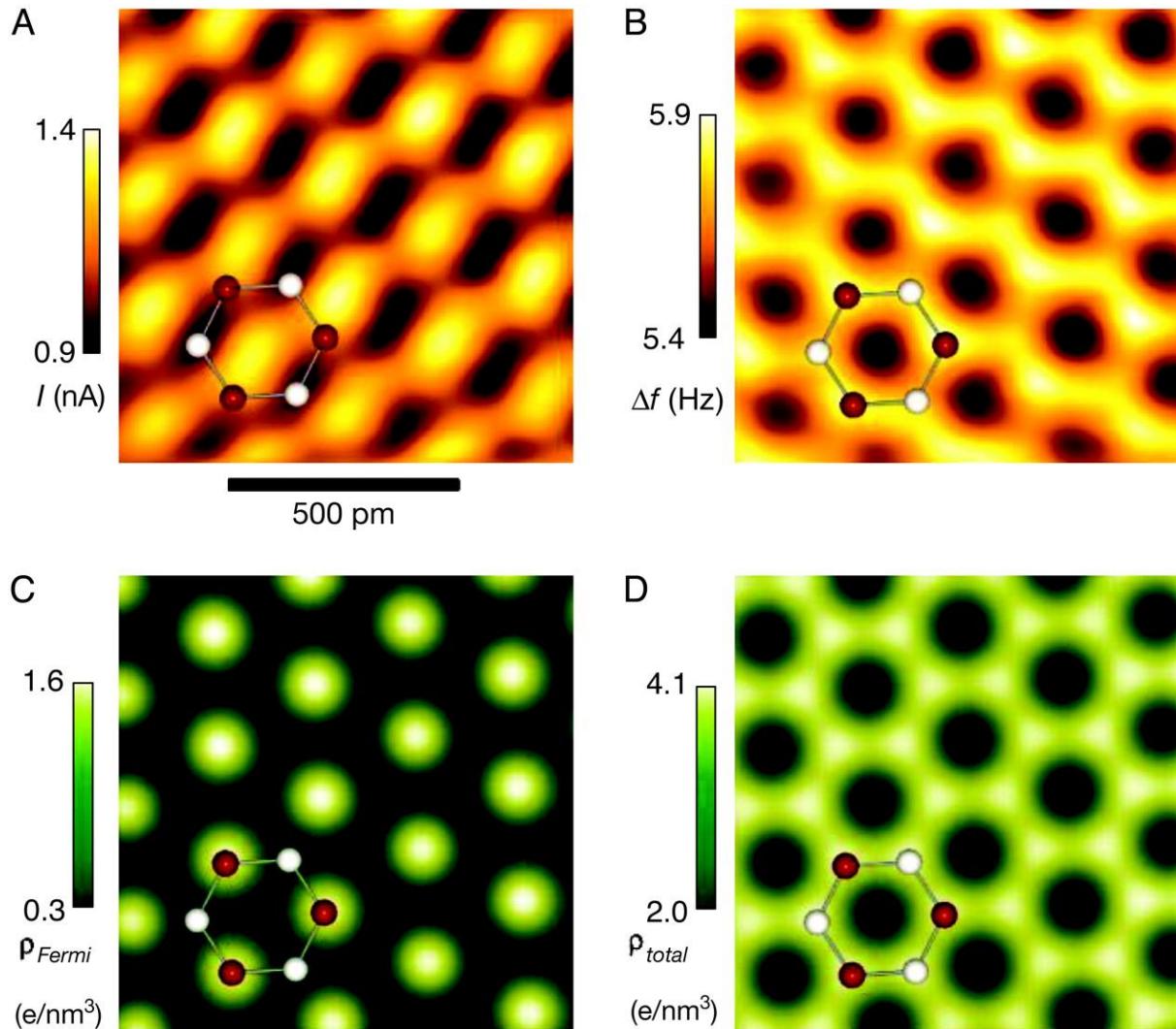
Зонд (Si_3N_4 , Si) имеет диаметр от 10 to 200 нм.

Кристаллическая структура графита



Элементарная ячейка заштрихована зеленым цветом. А) вид сверху на поверхностный слой. Гексагональная поверхностная решетка определяется двумя единичными векторами u и v в плоскости xu длиной 246 пм и углом 120° , образующими сотовую сеть из шестиугольных колец. Основа решетки состоит из двух атомов углерода α (белый) и β (красный) с расстоянием 142 пм. (Б) перспективный вид, показывающий слоистую структуру. Расстояние между слоями в 2,36 раза больше расстояния между соседними атомами внутри одного слоя, и связь между слоями слабая. А-атомы (белые) находятся непосредственно над α -атомом в слое непосредственно под ним на расстоянии 334,8 пм; β -атомы (красные) находятся над полым участком.

Experimental and simulated STM and AFM images of graphite



Гексагональная поверхностная элементарная ячейка с двумя базисными атомами α (белый) и β (красный) накладывается для ясности.

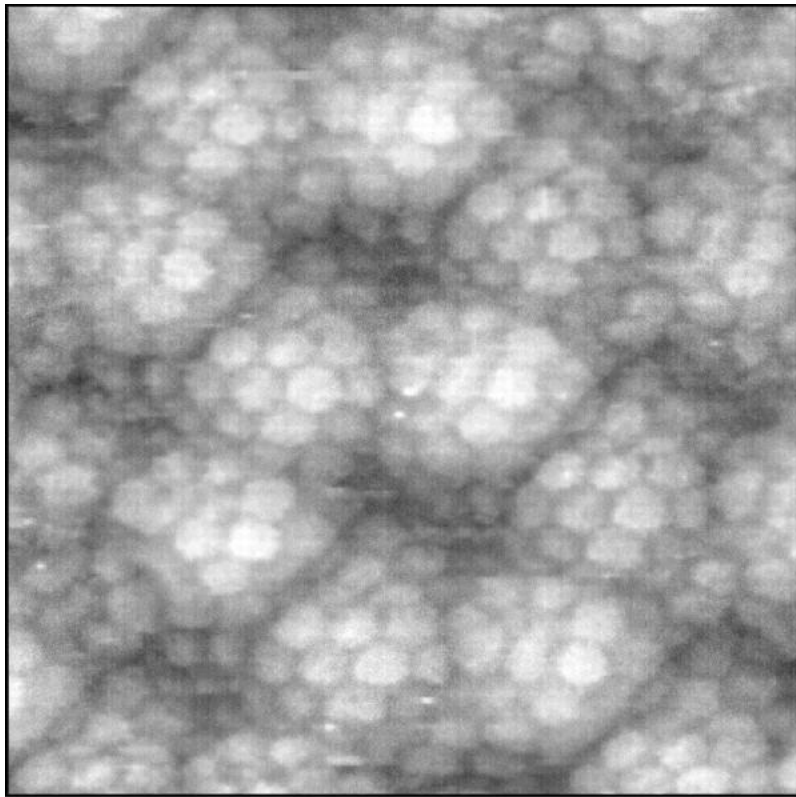
(А) экспериментальное изображение графита в режиме постоянной высоты динамики ТМ. На изображении появляются только β -атомы.

В) экспериментальное изображение графита в динамическом АСМ-режиме постоянной высоты, показывающее как α -, так и β -атомы.

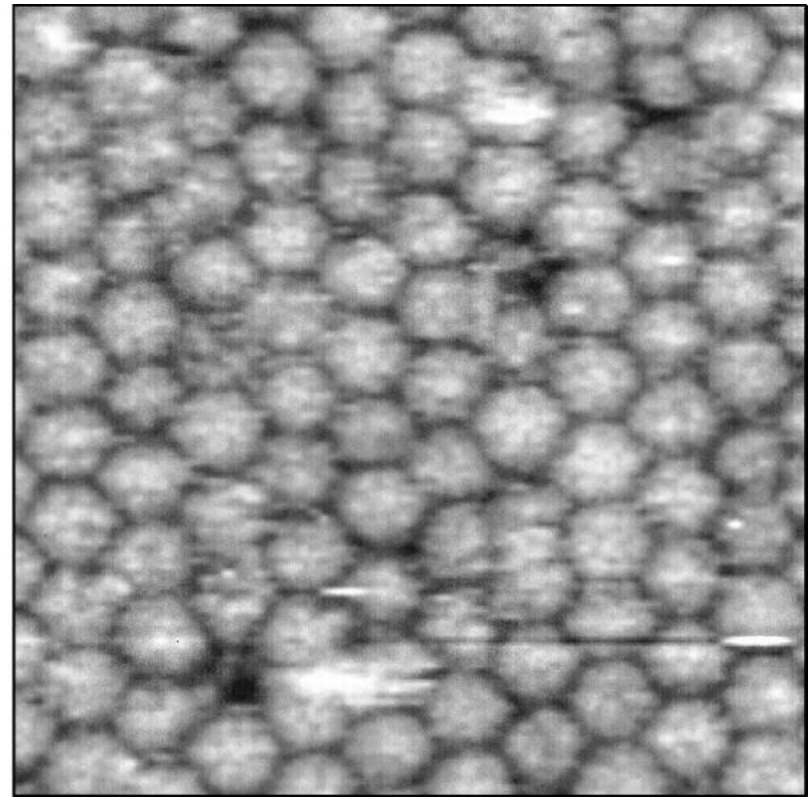
С) вычисленная плотность заряда графита на уровне Ферми. Максимумы уровня Ферми находятся в положениях β атома. Изображение STM отражает плотность заряда на уровне Ферми.

Д) рассчитанная общая плотность заряда.

АСМ мозаичных вирусных кристаллов



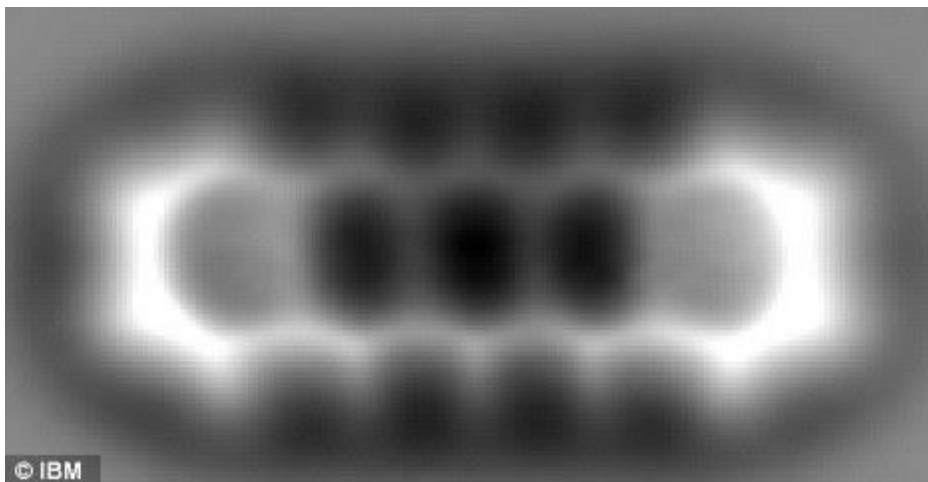
a



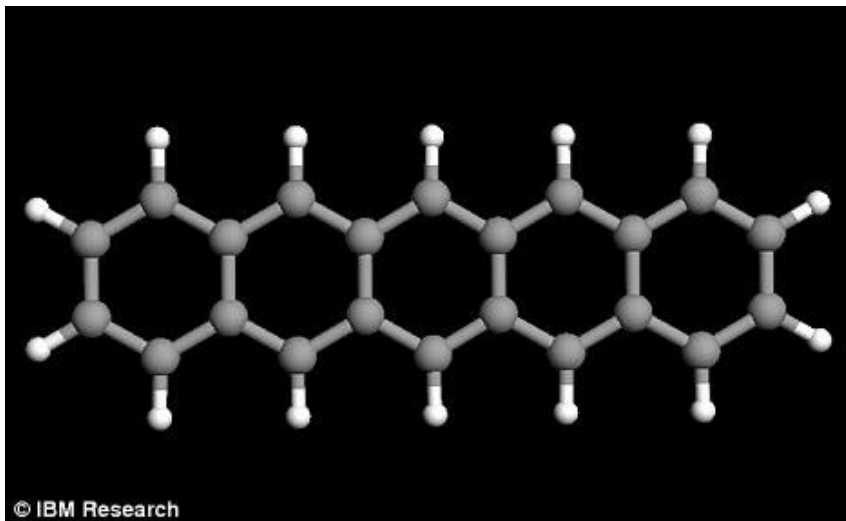
b

АСМ изображения участков на поверхности (а) репы желтых кристаллов вируса мозаики, и (б) кристаллс вирусf мозаики костра. Области сканирования составляют (а) $140 \times 140 \text{ нм}^2$, (б) $275 \times 275 \text{ нм}^2$. (from A. McPherson *et al*, *Annu. Rev. Biophys. Biomol. Struct.* 2000. 29:361-410.

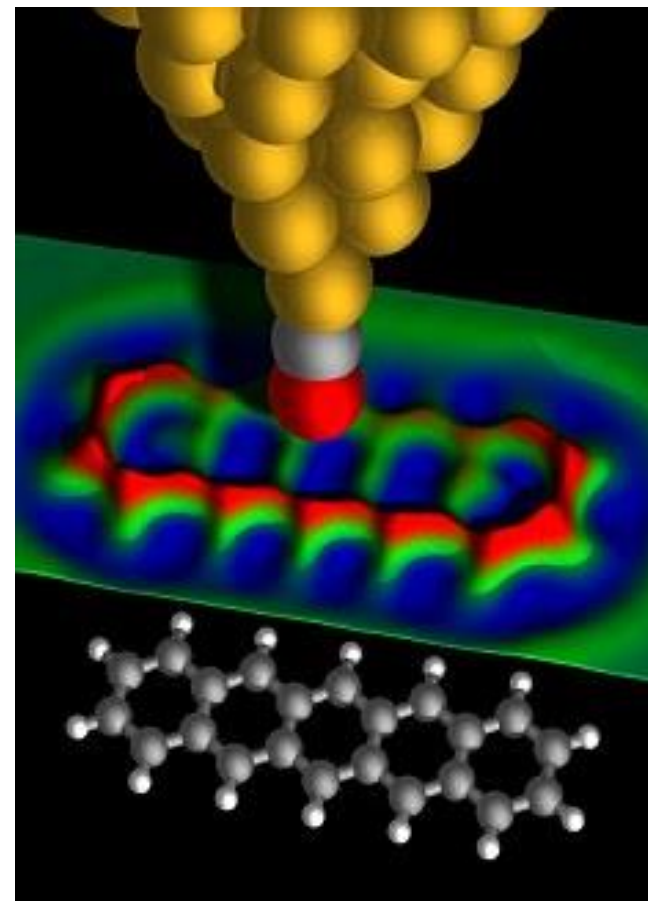
Одна молекула (пентацен), в миллион раз меньше песчинки



Тонкая внутренняя структура молекулы пентацена была изображена с помощью атомно-силового микроскопа

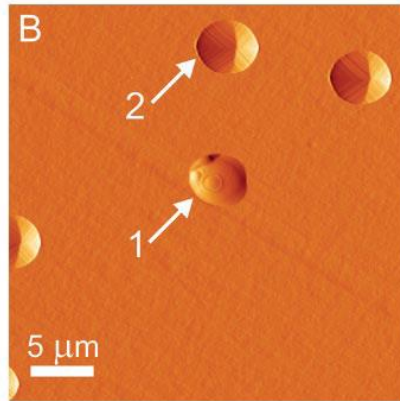
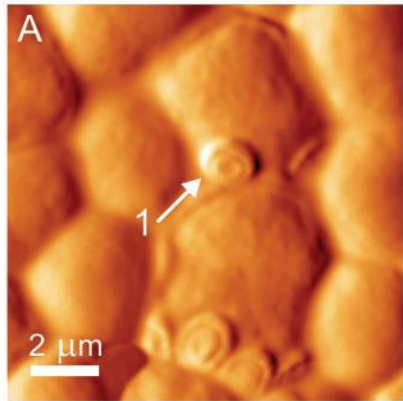


Компьютерное изображение того, как мы привыкли видеть молекулу, представленную шариками и палочками



3D-изображение, показывающее, как одна молекула монооксида углерода была использована для создания изображения с использованием эффекта камертона (www.photonics.com, 2009: “Results by IBM scientists in Zurich”).

Колебания дрожжевых клеток с помощью АСМ



Типичные АСМ изображения дрожжевых клеток показаны в (А и Б). Дрожжевые клетки имеют около 5 μm в диаметре и часто имеют бутоновые рубцы на поверхности клеток (стрелка 1).

Механические колебания кантилевера улавливание используется для изучения живых клеток в при 30°C. В (В) показано типичное изображение живой дрожжевой клетки (стрелка 1), захваченной в пору фильтра 5- μm [пустые поры (стрелка 2) легко отличимы от захваченных клеток на изображении].

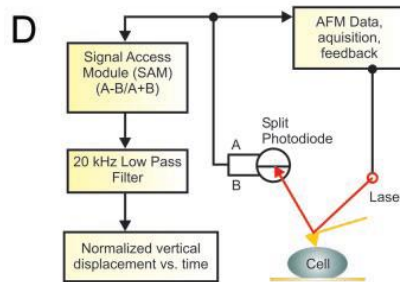
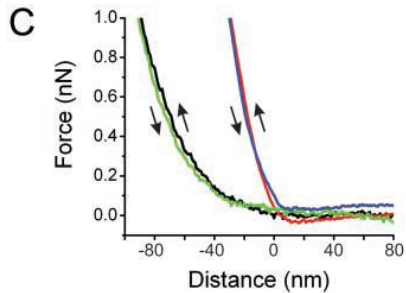
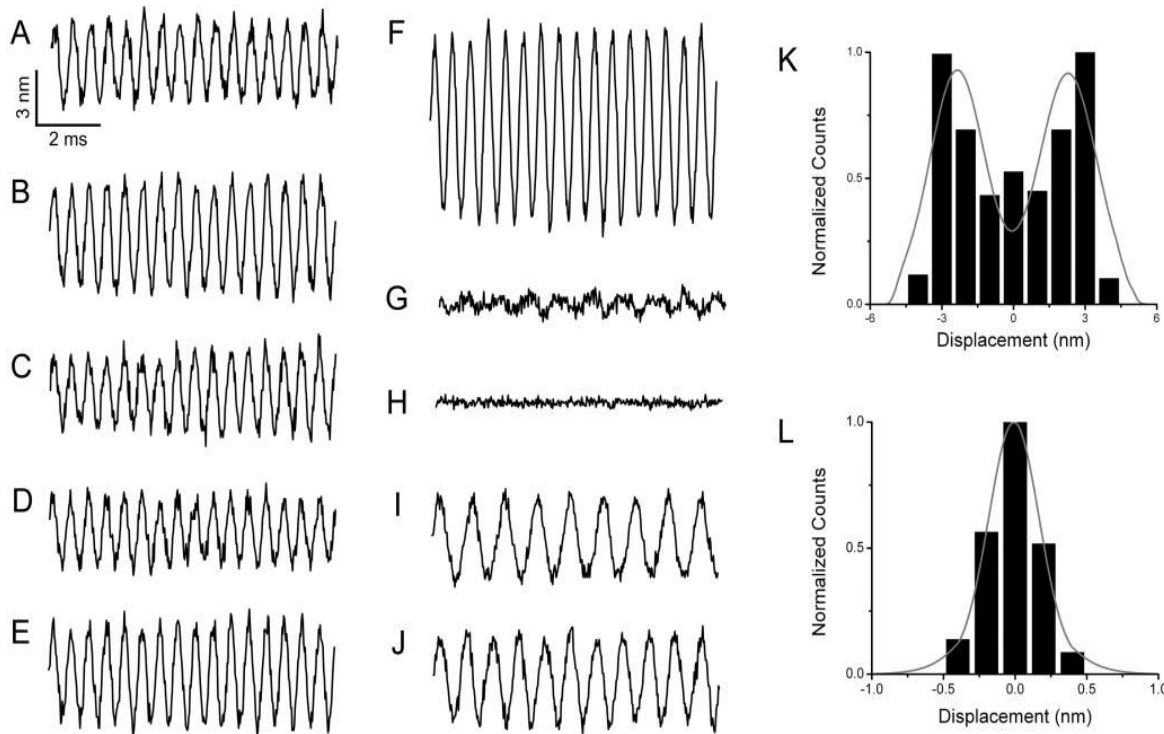


Схема экспериментальной установки (г) описывает процесс измерения локального наномеханического движения клеточной стенки. АСМ-кантилевер устанавливается поверх живой клетки, а размер сканирования устанавливается равным 0 Нм. Отклонение кантилевера измеряется с помощью фотодиода (Pelling et al, *Science*, 2004).

Кривые силового расстояния (С) могут быть получены путем контроля прогиба кантилевера при его вытягивании (стрелка вверх) и втягивании (стрелка вниз) из ячейки с целью измерения локальных наномеханических свойств ячейки.

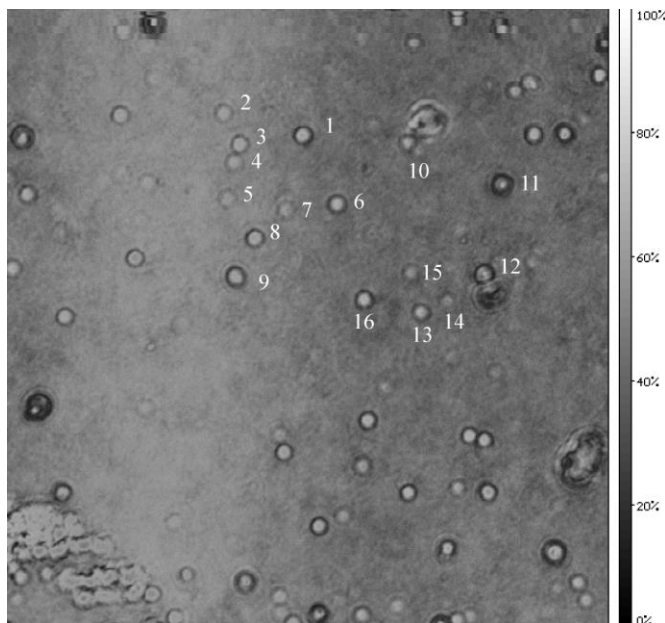
Колебания дрожжевых клеток с помощью АСМ



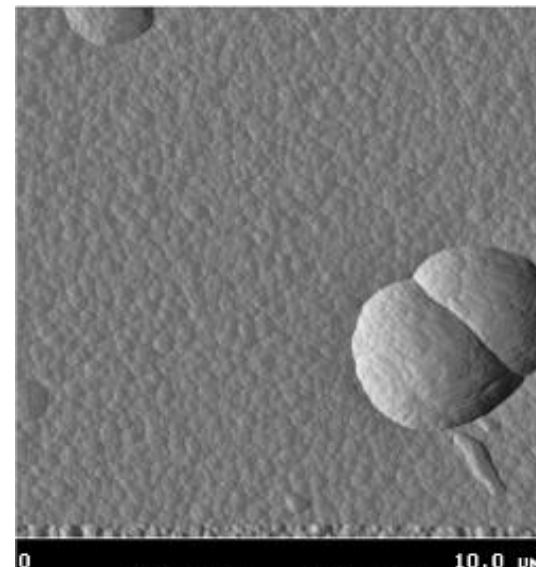
Клеточная стенка живых *Saccharomyces cerevisiae* (пекарские дрожжи) проявляла локальное наномеханическое движение на характерных частотах. Периодические движения в диапазоне от 0,8 до 1,6 кГц с амплитудами 3 нм измерялись с помощью кантилевера атомно-силового микроскопа (АСМ) (Pelling et al, *Science*, 2004).

Типичные временные следы движения клеточной стенки живых дрожжей. Данные в (A - G) взяты из одной ячейки, а данные в (H-J) - это измерения на разных отдельных ячейках в разные дни. В большинстве экспериментальных пробегов (70%) амплитуда движения составляла 3 нм при 30°C (A - D), но она также постоянна и при других температурах. Иногда наблюдались амплитуды размером до 7 нм (F) и до 1 нм (G). Воздействие на клетки азида натрия в течение 1 часа (14) привело к прекращению движения (H) .

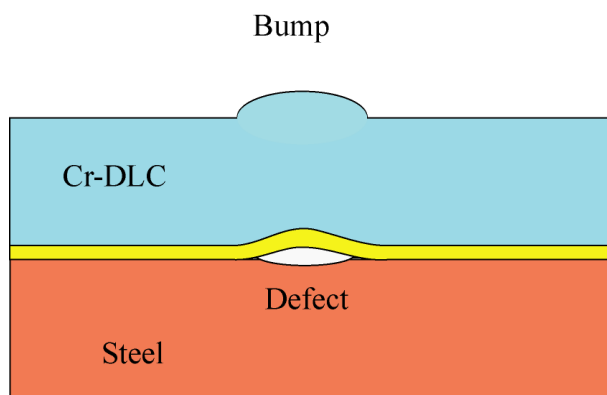
АСМ, СЭМ и ФИБ дефектов в покрытии DLC



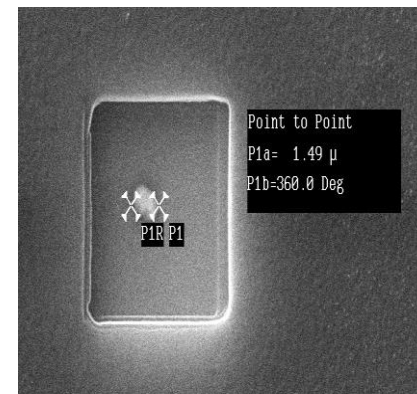
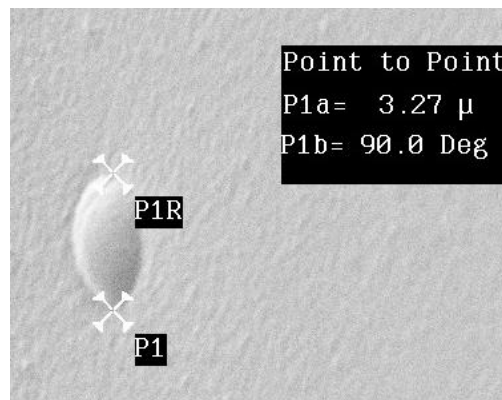
Слева: Акустическое изображение, полученные в образце Cr-DLC на частоте 1,0 ГГц, с расфокусировкой - 4 μ м. Поле зрения составляло $240 \times 240 \mu\text{m}^2$.



Справа: режим АСМ отклонения контрастного изображения образца Cr-DLC (поле зрения было $10 \times 10 \mu\text{m}$).



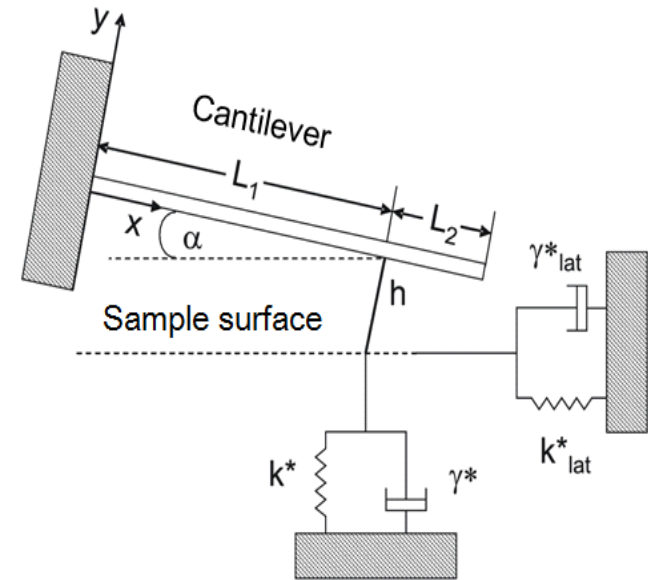
Эскиз модели подповерхностного дефекта в пленке Cr-DLC



Электронно-микроскопические изображения дефекта : (а) дефектов С до распыления, изображения с наклоном 60° . Глубина траншеи составляет примерно $1,9 \mu\text{m}$.

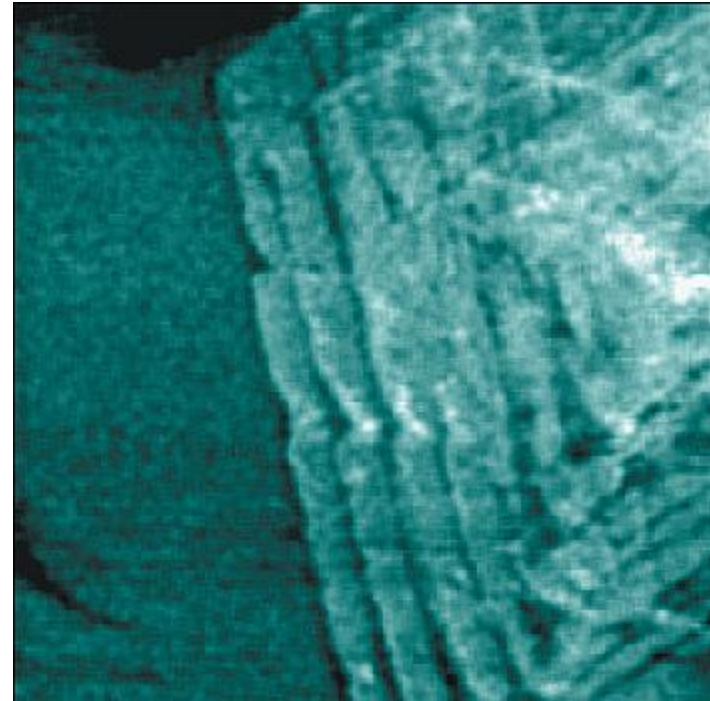
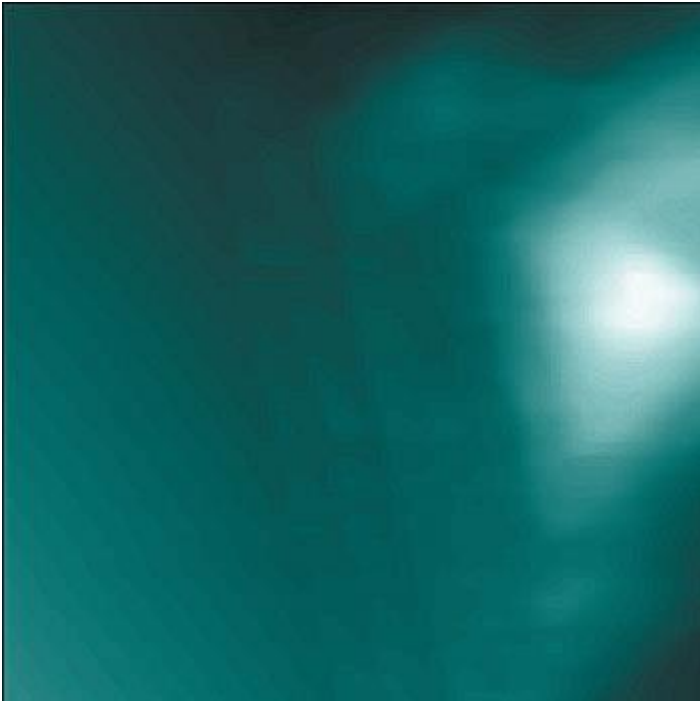
Акустическая Атомно-Силовая Микроскопия

Атомно-силовая акустическая микроскопия - это новый метод измерения SPM. Этот метод позволяет измерять качественные и количественные показатели локальные упругие свойства различных материалов. Основная идея состоит в том, чтобы возбудить кантилевер атомно-силового микроскопа в изгибные колебания, когда наконечник находится в контакте с образцом. Частота собственных мод кантилевера зависит, помимо прочих параметров, от жесткости контакта наконечника с образцом и от радиуса контакта, которые, в свою очередь, являются функцией модуля Юнга образца и наконечника, радиуса наконечника, нагрузки, оказываемой наконечником, и геометрии поверхности. Такая методика позволяет определить модуль Юнга по жесткости контакта с разрешением в несколько десятков нанометров, чувствительность режима составляет около 5%. томно - силовой акустической микроскопии (АСАМ) была первоначально разработана Рабе и Арнольд из Института неразрушающего контроля Фраунгофера, Саарбрюккен, Германия в 1994 году. В настоящее время используется для качественных и количественных измерений локальных упругих свойств материалов..



P. Zinin, W. Arnold, W. Weise, S. Berezina, "Theory and Applications of Conventional and Atomic Force Acoustic Microscopies", in T. Kundu ed., *Ultrasonic Nondestructive Evaluation: Engineering and Biological Material Characterization*. Taylor & Francis, N.Y., chapter 11, second edition, 613-687 (2012).

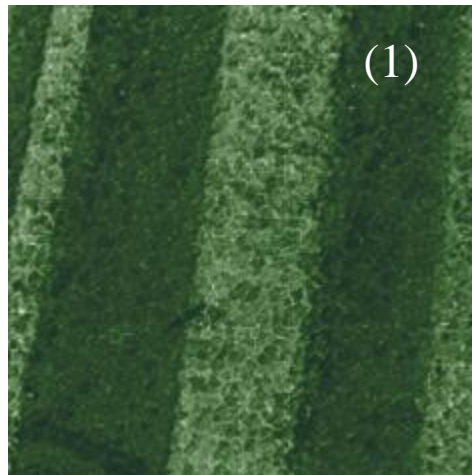
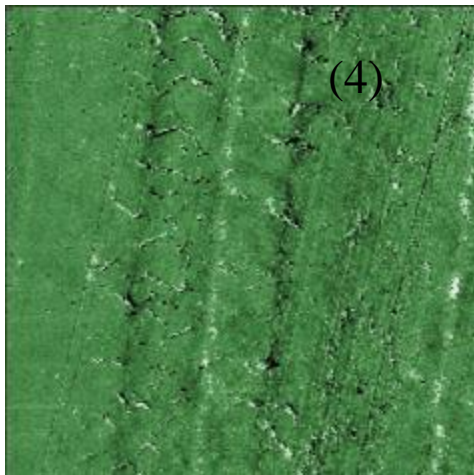
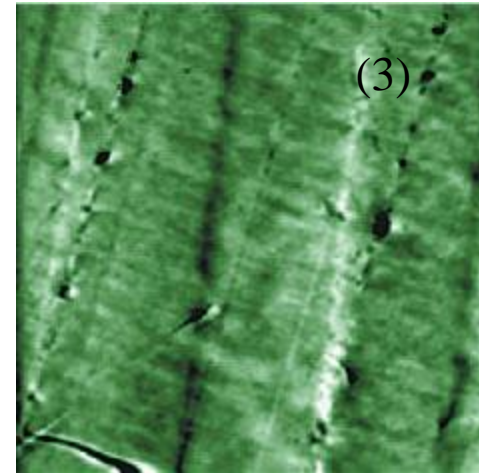
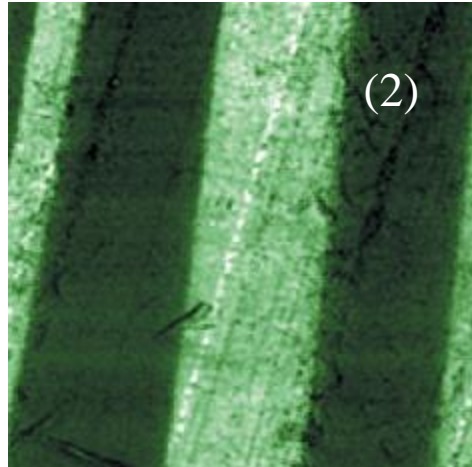
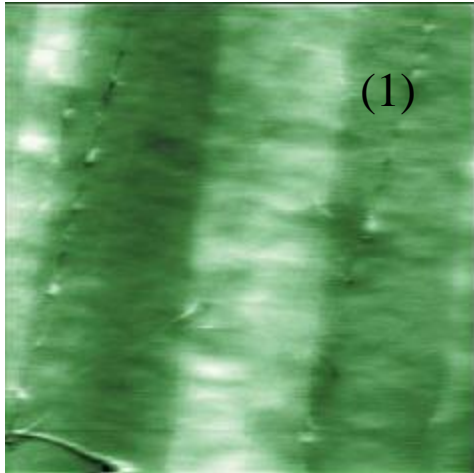
Акустическая Атомно-Силовая Микроскопия



Ромбический полиэтиленовый Кристалл на слюдяной подложке. Контактное изображение в режиме топографии (слева) и АСФМ (справа). Размер сканирования : $7 \times 7 \mu\text{m}$.

Любой тип материала может быть измерен с этим микроскопом. В частности,, такие как модули упругости, модуль сдвига и коэффициент Пуассона могут быть измерены с нанометровым разрешением.

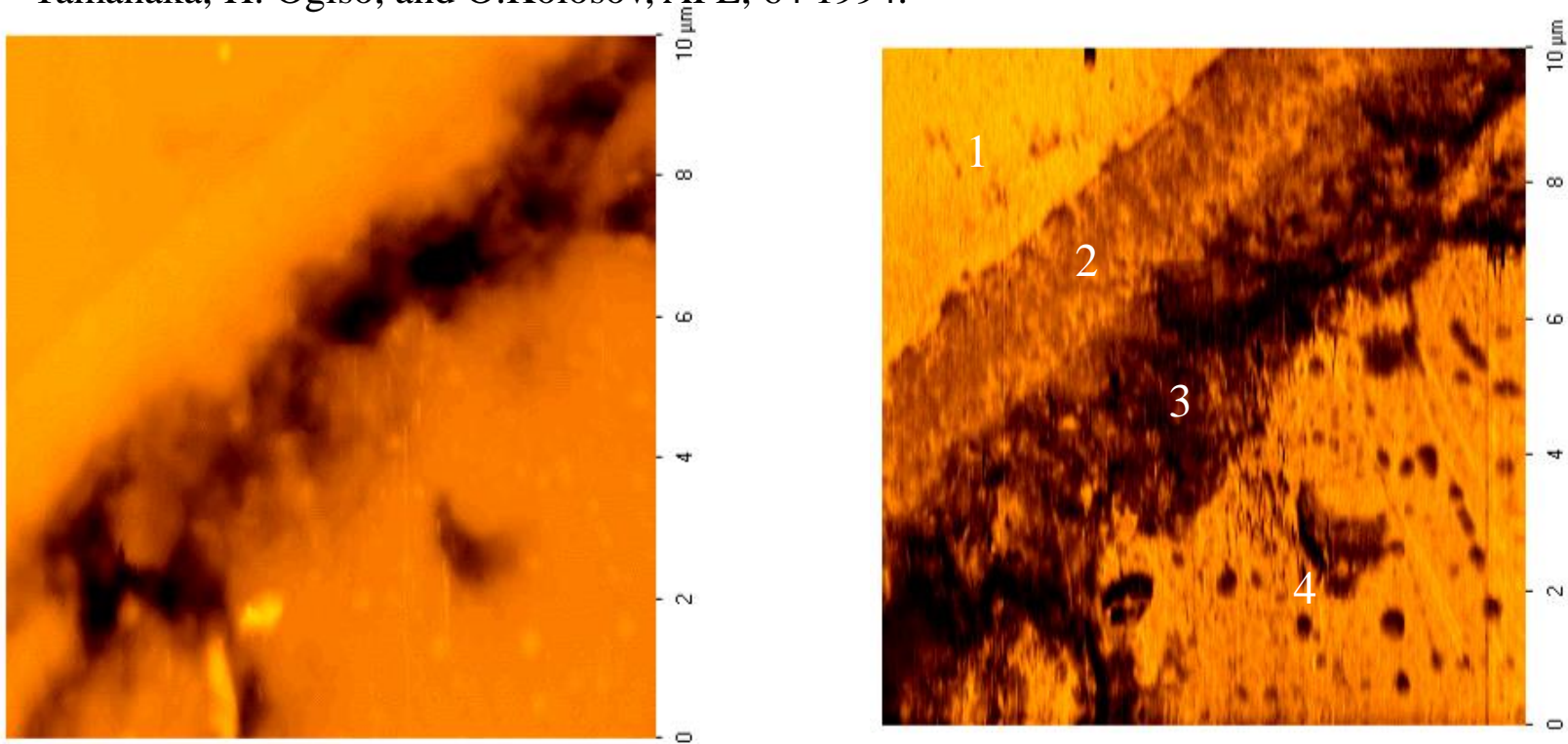
Применение АФАМ



Полосы низкой и высокой плотности полиэтилен с разными свойствами эластичность. Топография (1), Амплитуда АФАМ (2), Сила Модуляция (3) и Фаза (4) изображения и модуль Юнга карта (5). Размер сканирования: 47x47 μm .

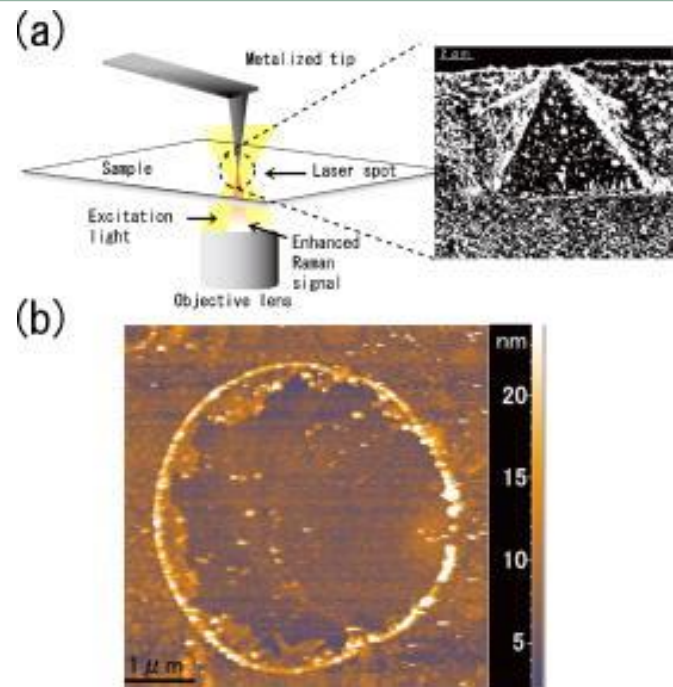
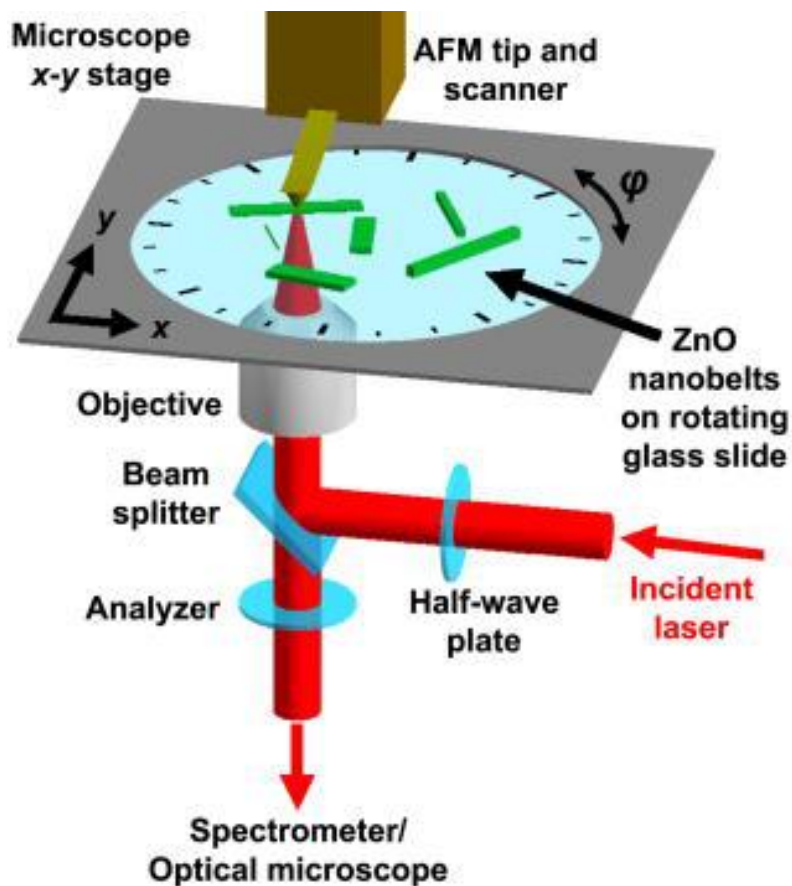
Ультразвуковая силовая микроскопия

Ультразвуковая силовая микроскопия (АСМ) - механика акустического зондирования на наноуровне. (Ultrasonic force microscopy for nanometer resolution subsurface imaging, К. Yamanaka, Н. Ogiso, and О. Kolosov, APL, 64 1994.



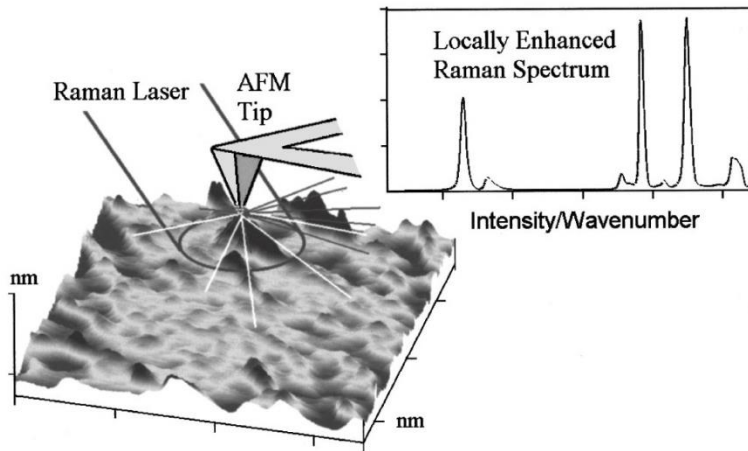
В ультразвуковой силовой микроскопии (АСМ) легко различимы четыре области границы раздела волокно-матрица : 1. волокно SiC; 2. углеродный слой; 3. область реакции; 4. муллитовая матрица.

Локально усиленная спектроскопия КР с АСМ



(a) Схематический вид безапертурного оптического микроскопа ближнего поля. Показана схема топографического изображения иммобилизованного наконечника наночастицы серебра, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа. б) топографические изображения лукообразной углеродной наночастицы углеродного лука. (Kodama, et al, *Appl. Phys. Lett.*, 27, 2006).

КР-спектры и АСМ углеродных луковичных наночастиц



- (a) КР спектры луковичных углеродных наночастиц, измеренные с помощью наконечника SNI. Сплошные, пунктирные, ломаные и тонкие черные спектры были измерены при различных положениях поверхности образца с входной мощностью 25 мкВт ($1,3 \times 10^4$ Вт/см²) и временем экспозиции of 25 μ W ($1,3 \times 10^4$ Вт/см²) and exposure time of 0.3 s.
- (b) КР-СЕРС изображение луковичных углеродных наночастиц. Разрешение изображения-32 \times 32. Изображение измерялось путем детектирования сигнала SERS при 1595 см⁻¹ с входной мощностью 25 мкВт ($1,3 \times 10^4$ Вт/см²) и временем экспозиции 0,3

