

Туннельный эффект
и
его применение
в Сканирующей Туннельной
Микроскопии (СТМ)

Шарипов Камиль

История

В 1826 году немецкий физик Георг Симон Ом установил закон (получивший впоследствии его имя), который определяет связь между электрическим током, текущим через проводник, сопротивлением проводника и напряжением на нем. Из этого закона, в частности, следует, что в разомкнутой электрической цепи, когда сопротивление бесконечно велико, ток всегда равен нулю.



Иллюстрация П. Чернуцкого

Шарипов Камиль. Казанский клуб нанотехнологий.

Открытие

- В 1971 году Рассель Янг (с коллегами) и обнаружил переходную область плавного изменения тока при сближение двух электродов. В своих экспериментах он использовал вольфрамовую иглу и платиновый электрод с плоской поверхностью. Таким образом, Янгом были осуществлены первые прямые эксперименты по регистрации электрического тока, проходящего зазор между проводниками. Обнаруженное им явление есть одно из проявлений так называемого *туннельного эффекта*. Туннельный эффект – это прохождение через *потенциальный барьер* микрочастицы, энергия которой меньше, чем высота барьера. Строгое объяснение этого эффекта дает квантовая механика (исходя из неопределенности импульса микрочастицы в области барьера).

Экскурс в историю

- В начале 1980-х Герд Бинниг и Генрих Рорер, сотрудники швейцарского отделения IBM, сделали прибор, позволяющий рассматривать одиночные атомы вещества. В нем было использовано квантовое явление туннелирования, и он получил название «сканирующий туннельный микроскоп» (СТМ).

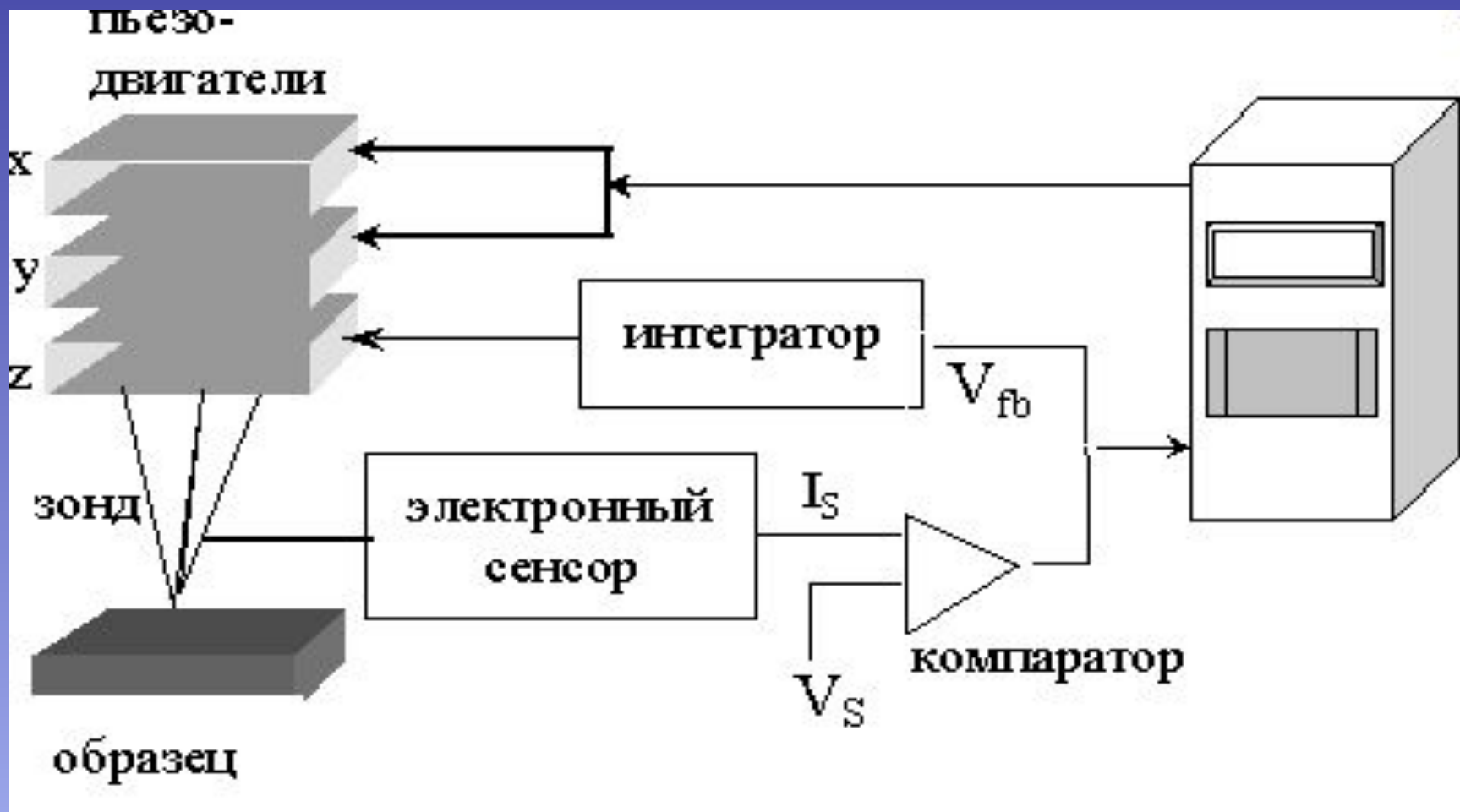
Уникальность метода

- Туннельная микроскопия – метод уникальный, прежде всего потому, что для туннельного эффекта не нужно никаких особых условий – ни вакуума, ни низких температур.



Шарипов Камиль. Казань

Устройство и принципы работы сканирующего туннельного микроскопа



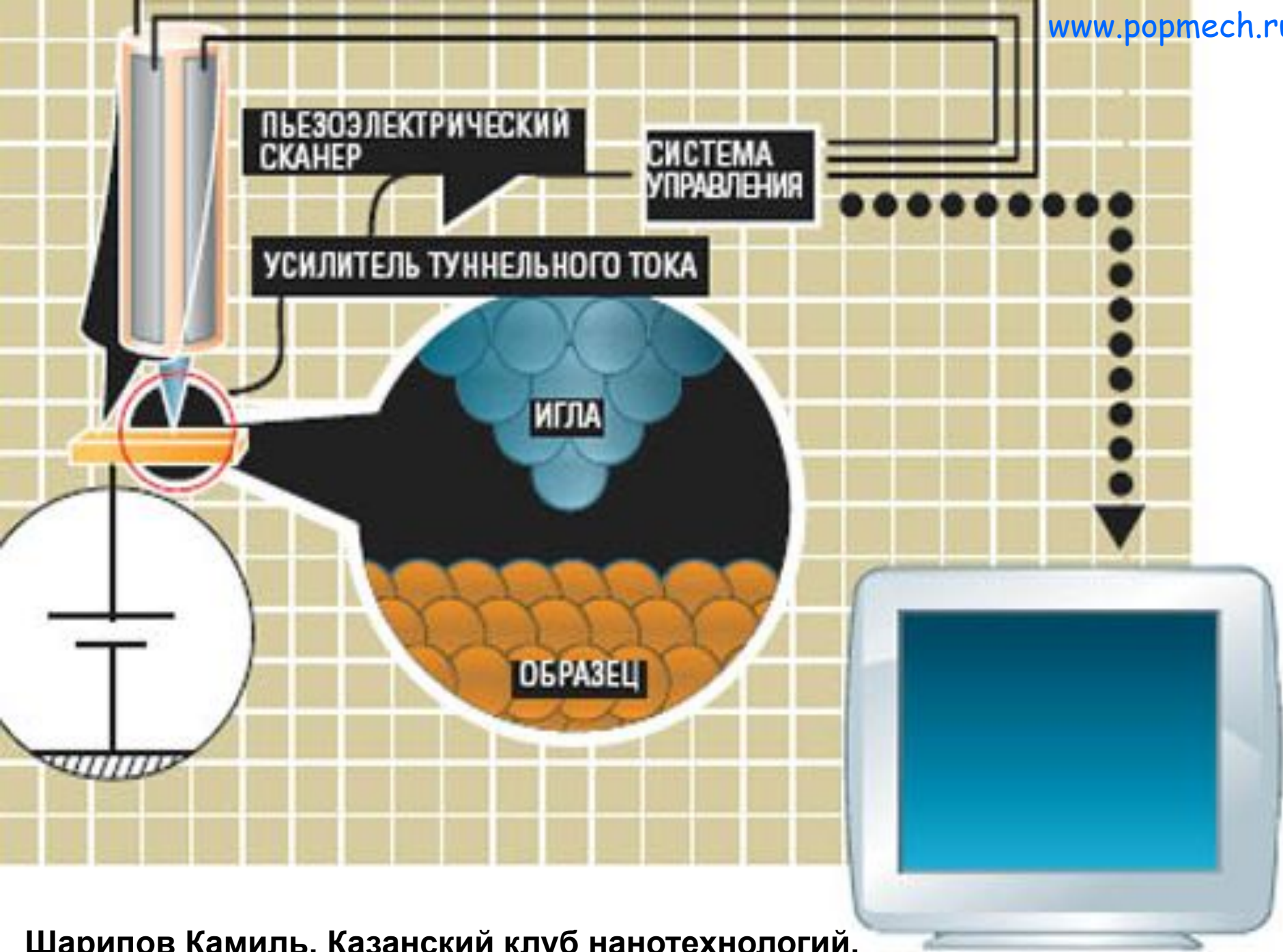
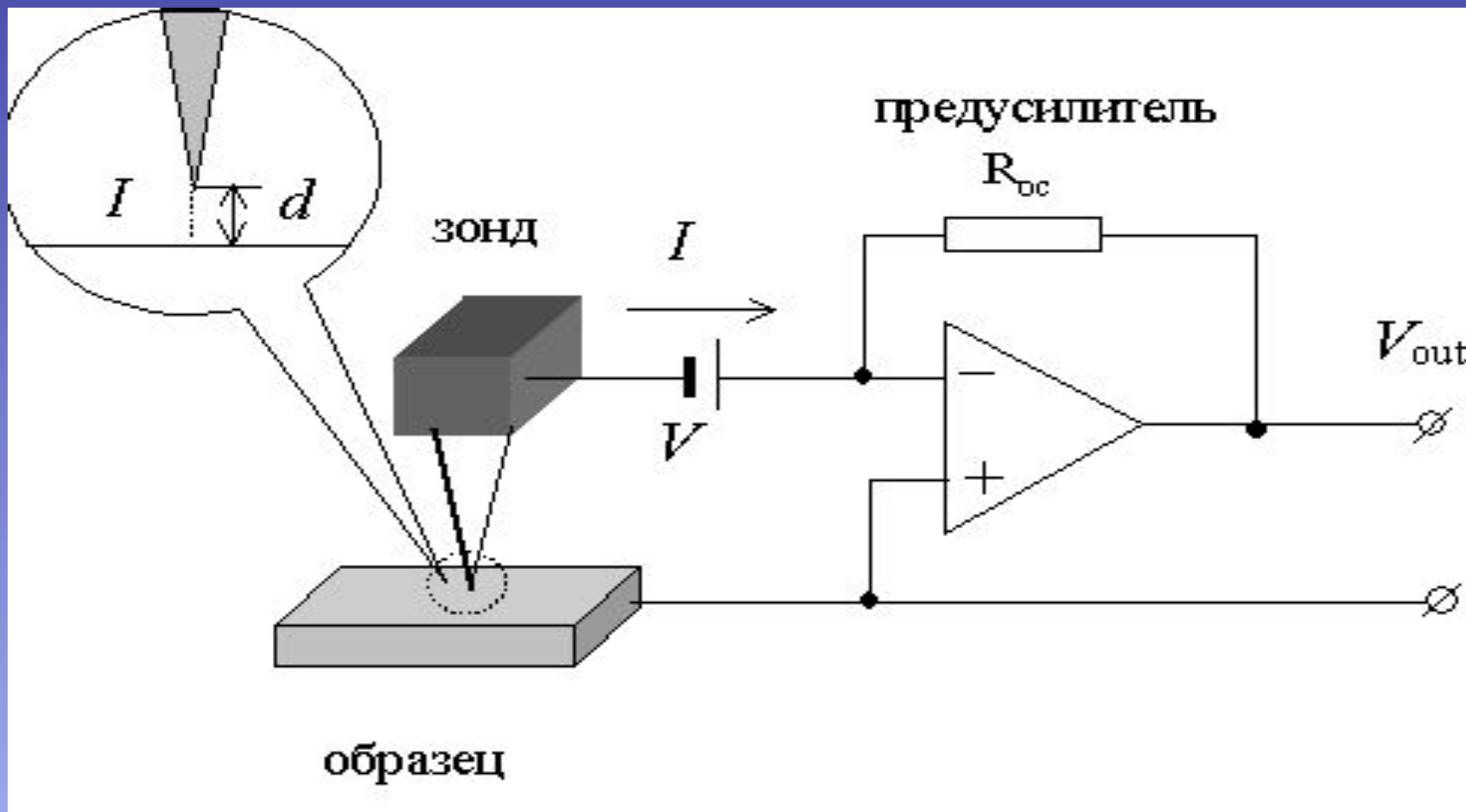
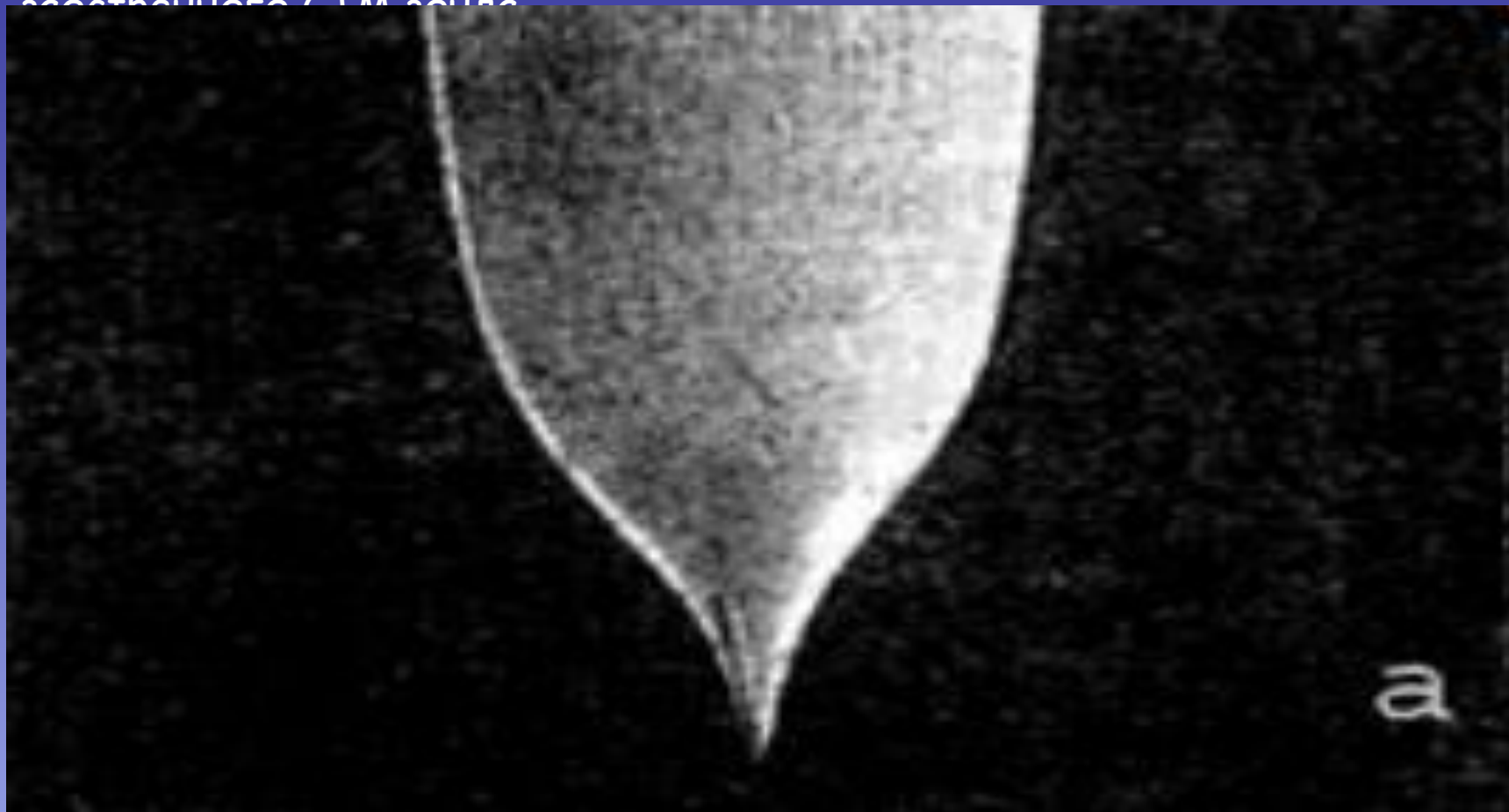


Схема туннельного сенсора



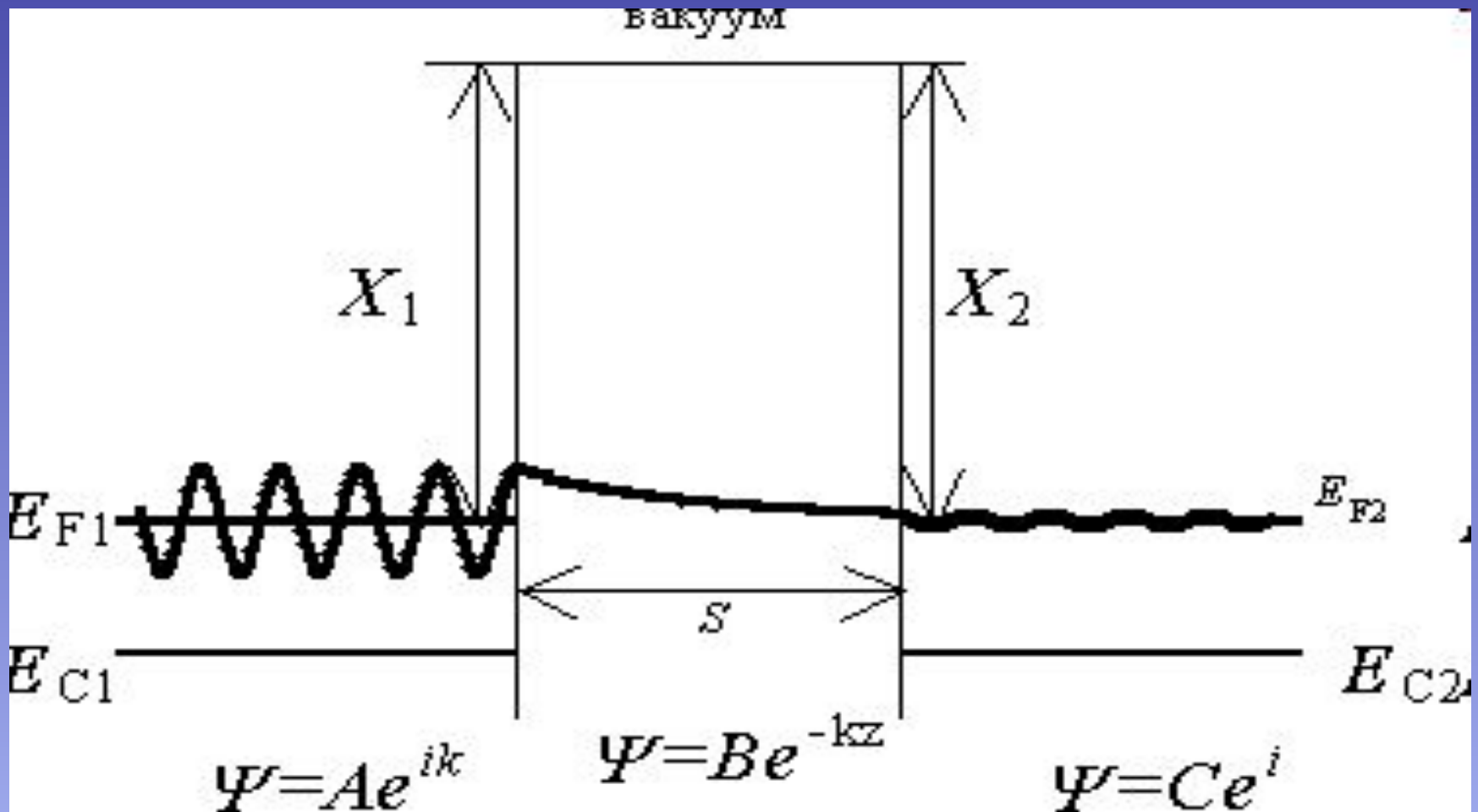
Электронно-микроскопическое изображение электрохимически
заостренного СТМ зонда
Электронно-микроскопическое изображение электрохимически
заостренного СТМ зонда



Самый важный элемент у атомно-силового микроскопа – игла. Так как мы заглядываем в наномир посредством взаимодействия между электронными оболочками атомов образца и атомов иглы.

Шарипов Камиль. Казанский клуб нанотехнологий.

Волновые функции электронов в металле и в барьере в приближении эффективной массы



Одномерная модель протекания туннельного тока [2].

Предположим, что образец – сплошная электропроводящая среда, и к его свободной поверхности на расстоянии $S \sim 2 \text{ \AA}$ подведено металлическое острое, заканчивающееся одним атомом. При приложении разности потенциалов $V \gg 0,1 - 1 \text{ В}$ между образцом и острием в цепи появится ток, обусловленный туннельным эффектом. Вероятность туннелирования в квазиклассическом приближении по порядку величины

Вероятность туннелирования в квазиклассическом приближении по порядку величины

$$T \cong \exp\left(-\frac{2}{\hbar} S \sqrt{2m\chi}\right)$$

где характерная работа выхода $\sim 5 \text{ эВ}$, $m \gg 10^{-27} \text{ г}$ – масса электрона проводимости. Учитывая экспоненциальную зависимость $T(S)$, для оценки туннельного тока I будем считать, что он целиком проходит через самый кончик острия, т. е. площадь туннельного контакта $A \gg 10^{-16} \text{ см}^2$. Приняв плотность электронов проводимости $n \gg 10^{22} \text{ см}^{-3}/\text{В}$ и их скорость $v \gg 10^8 \text{ см/с}$, получим оценку туннельного тока

$$I \sim e n v A T V \approx 1 \div 10 \text{ нА}$$

т.е. вполне измеримую величину. Видно, что при увеличении зазора ток экспоненциально уменьшается примерно на порядок на каждый ангстрем перемещения острия по нормали к образцу.

Шарипов Камиль. Казанский клуб нанотехнологий.

Шарипов Камиль. Казанский клуб нанотехнологий.

Из этих оценок понятна работа СТМ при изучении топографии поверхности проводников:

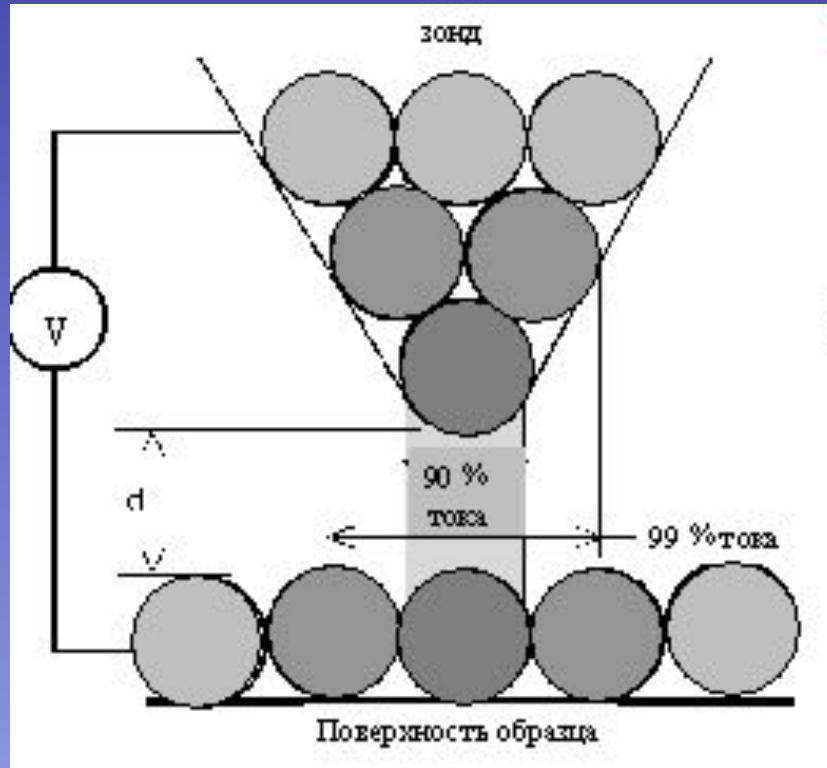
- пусть острие укреплено на пьезоэлементе, изменяющем свои размеры под воздействием управляющего напряжения в цепи обратной связи. Если теперь подвести его к образцу на расстояние, обеспечивающее протекание туннельного тока I , и сканировать вдоль поверхности, поддерживая системой обратной связи постоянство тока I (так называемый режим постоянного туннельного тока), то зависимость $V(X, Y)$ отражает рельеф поверхности, если ее электронные свойства (т.е. работа выхода) однородны.

Шарипов Камиль. Казанский клуб нанотехнологий.

Факторы, влияющие на качество изображения СТМ

- Разрешение по оси z ограничивается, во-первых, чувствительностью сенсора, и, во-вторых, амплитудой вибраций зонда относительно поверхности образца. Конструкция микроскопа должна обеспечивать уменьшение амплитуды этих вибрации до долей ангстрема. Разрешение СТМ по нормали к поверхности образца для атомно-чистых поверхностей достигает в благоприятных случаях сотых долей ангстрема. Благодаря крутой зависимости $I(Z)$ электронные шумы аппаратуры, дробовой шум туннельного тока и т.п. слабо влияют на результаты.
- Максимальное разрешение в плоскости x - y определяется, прежде всего, точностью позиционирования зонда. Важное значение имеет геометрия острия зонда.

Таким образом, для оценки предельного разрешения можно принять, что туннелирование происходит с единственного атома. Макроскопическая геометрия зонда не является определяющей для атомного разрешения. Однако, как показали численные расчеты, на поверхности образца можно разделить только атомы, разнесенные не менее, чем на $\sim 4A$.



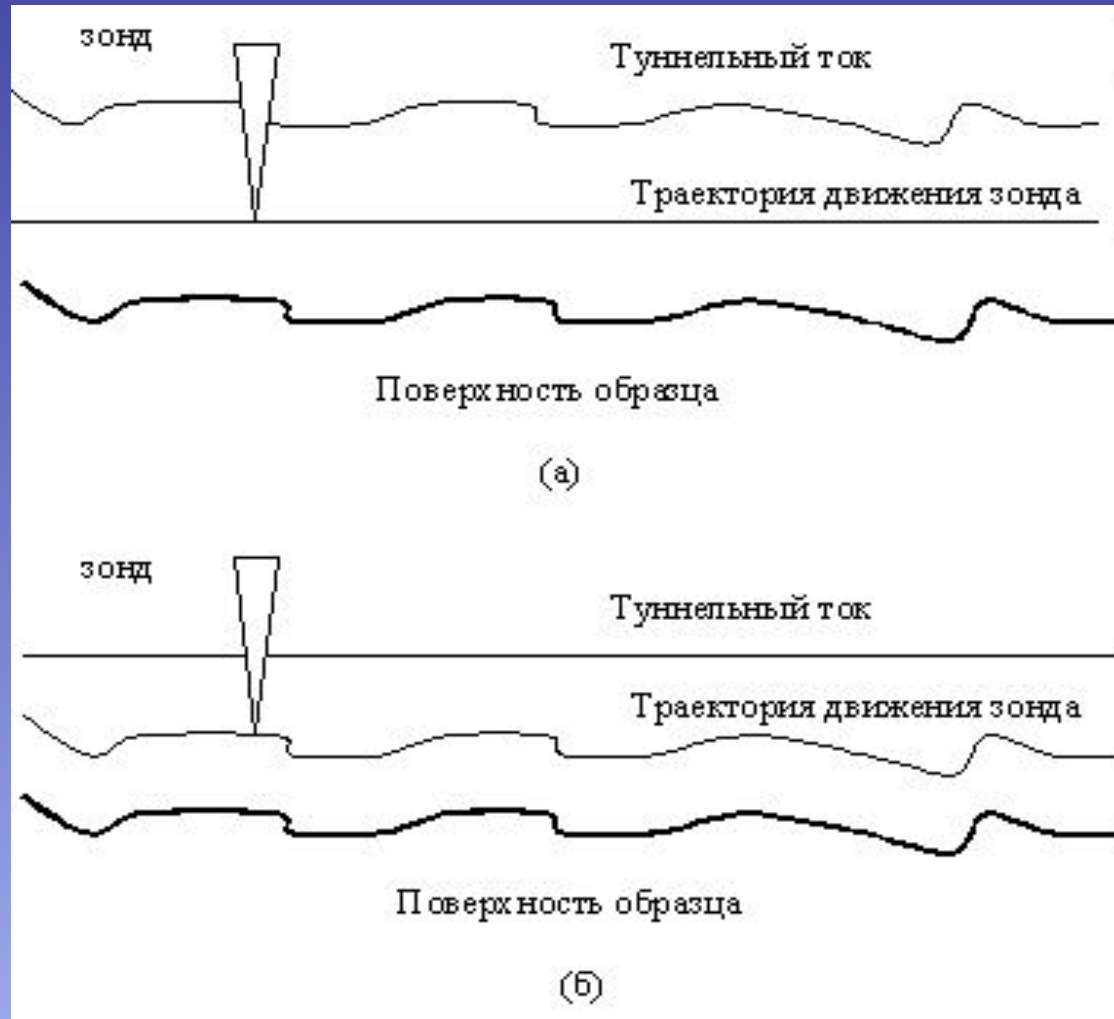
Распределение плотности туннельного тока между образцом и пирамидальным СТМ зондом

Таким образом, для оценки предельного разрешения можно принять, что туннелирование происходит с единственного атома. Макроскопическая геометрия зонда не является определяющей для атомного разрешения. Однако, как показали численные расчеты, на поверхности образца можно разделить

Шарипов Камиль. Казанский клуб нанотехнологий.

наблюдать только атомы, разнесенные не менее, чем на $\sim 4A$.

Режимы постоянного тока и постоянной высоты



Режимы постоянного тока (а) и постоянной высоты (б)

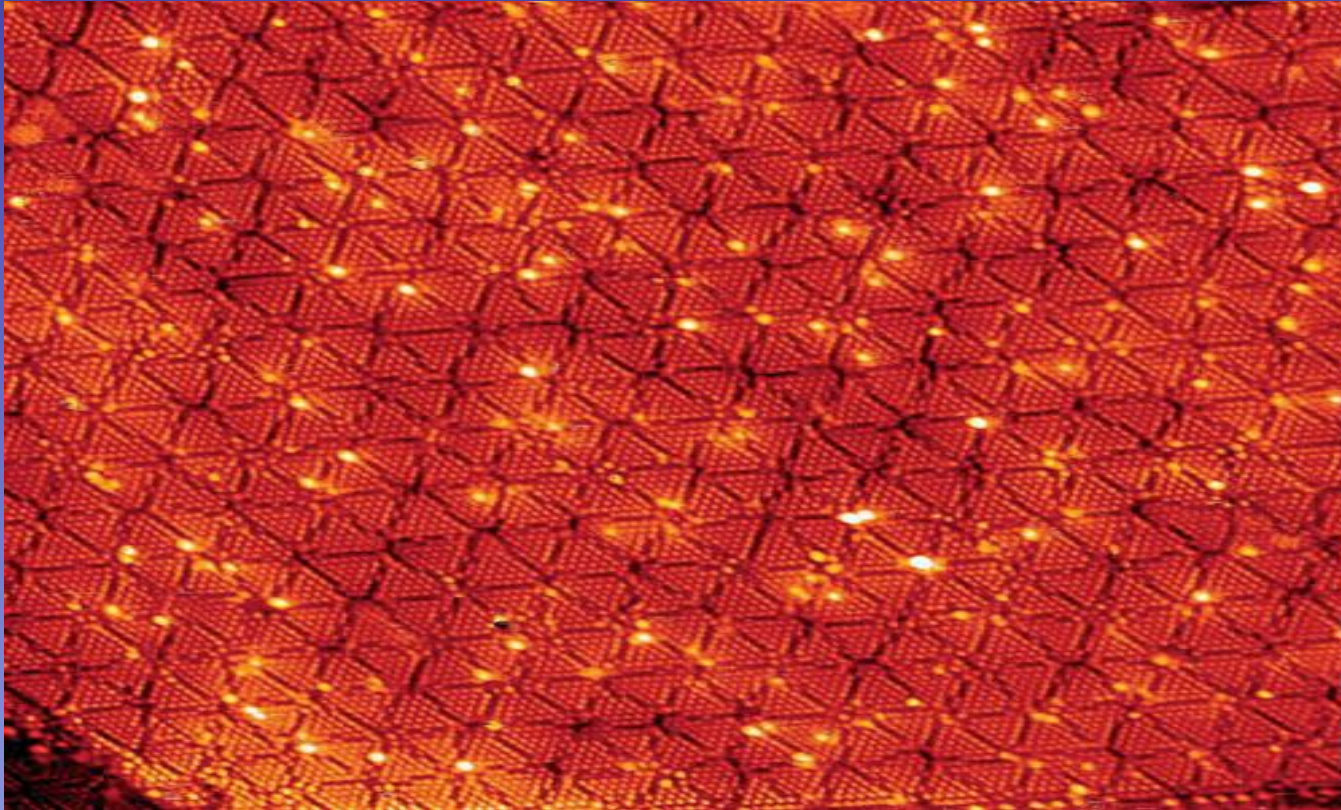
недостаток СТМ

- СТМ имеет одно существенное ограничение: объект исследования должен быть проводящим – металл или полупроводник, иначе не будет туннельного тока. Получается, что в туннельный микроскоп нельзя «рассмотреть» ни один изолятор, например алмаз.

АСМ 😊

- туннельный и атомно-силовой микроскопы очень похожи, но у них есть одно важное отличие – конструкция иглы. В туннельном игла принципиально закреплена очень жестко и никогда не должна касаться поверхности, а в атомно-силовом – обязательно на упругом подвесе (кантилевере) и может работать даже в прямом контакте с образцом. Для СТМ чем острее игла, тем лучше, а в атомно-силовом микроскопе слишком острая игла будет давать слишком маленький сигнал, который трудно зарегистрировать.

Изображения, полученные СТМ



Так выглядит слой алюминия на поверхности кремния на изображении, полученном с помощью СТМ в Отделе физики поверхности ИАПУ ДВО РАН. Из-за того что атомы алюминия больше по размеру, чем атомы кремния, образуется такая необычная сверхструктура в виде треугольников

Шарипов Камиль. Казанский клуб нанотехнологий.

Физфак КГУ

АТОМЫ И МОЛЕКУЛЫ НА ПОВЕРХНОСТИ (А.А. Бухараев)

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Зенгуил "Физика поверхности" М., Мир, 1990.

Д. Вудраф, Т. Делчар "Современные методы исследования поверхности", М., Мир, 1989.

Ф. Фельдман, Д. Майер "Основы анализа поверхности и тонких пленок", М., Мир, 1989.

С. Моррисон "Химическая физика поверхности твердого тела", М., Мир, 1989.

А.А. Бухараев, Д.В. Овчинников, А.А. Бухараева "Диагностика поверхности с помощью сканирующей силовой микроскопии (обзор)" // Заводская лаборатория, 1997, N5. с. 10-27.

Бухараев А.А. "Диагностика поверхности с помощью сканирующей туннельной микроскопии. (обзор)" // Заводская лаборатория 1994, N 10,

Шарипов Камиль. Казанский клуб нанотехнологий.

Спасибо за внимание

