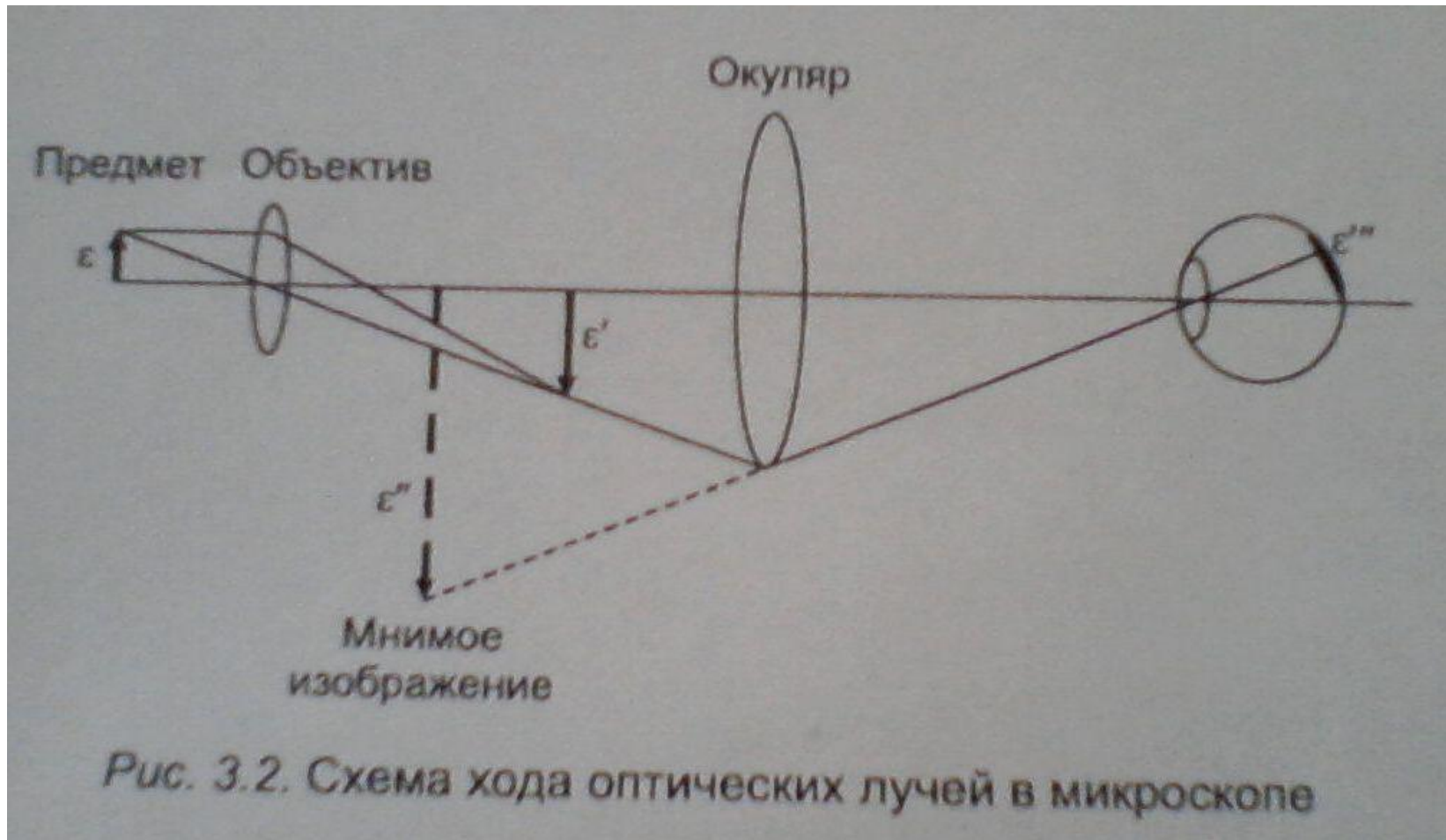


# Тема 4: ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ

# 1. ОПТИЧЕСКАЯ МИКРОСКОПИЯ

**Микроскоп** – это оптический прибор для получения увеличенных изображений объектов.



Микроскоп состоит из двух систем - окуляра и объектива. Объектив, расположенный близко к образцу ( $\varepsilon$  - эpsilon), создает первое увеличенное изображение объекта ( $\varepsilon'$ ). Это изображение еще раз увеличивается окуляром ( $\varepsilon''$ ), который помещают ближе к глазу наблюдателя. На сетчатке формируется изображение  $\varepsilon'''$  под значительно большим углом, что и определяет большое увеличение микроскопа.

В 1677 году, рассматривая каплю воды из канавы, микроскопист-любитель А. Ливенгук впервые увидел простейшие организмы.

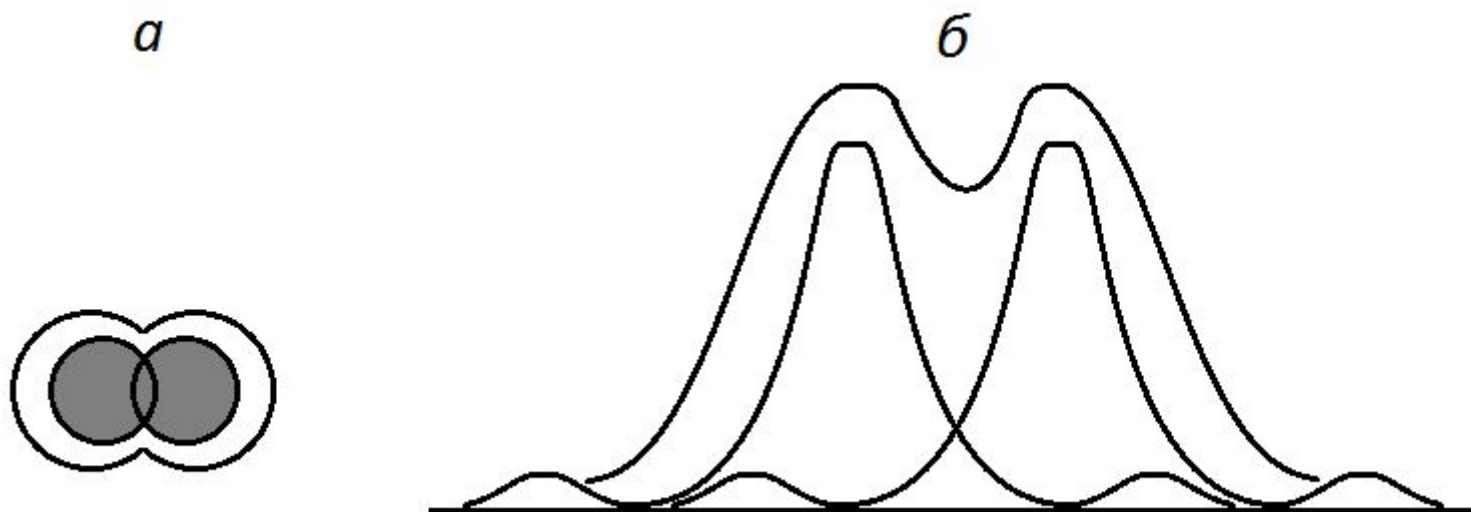
В современных микроскопах применяются сложные оптические системы, а также создаются специальные условия освещения объектов. В результате такой микроскоп может увеличивать в несколько тысяч раз:  $N_{\text{опт}} \approx 10^3$ ,

$N_{\text{опт}}$  - видимое увеличение оптического микроскопа.

Если объект освещается обычным белым светом, то изображение объекта получается нерезким. В системе линз оптические пучки лучей разного цвета не совпадают, они имеют разный путь, в результате изображение для каждой длины волны получается сдвинутым, так как оптическая система разлагает белый свет в спектр. В результате мелкие детали становятся неразличимы. Чтобы организовать монохроматическое освещение в микроскопах используют специальные лампы и оптические фильтры. Наиболее приближенными к монохроматическому свету одной длины волны является излучение некоторых лазеров. Даже в случае монохроматического освещения существует предел разрешающей способности микроскопа. Этот предел обусловлен волновой природой света, которая проявляется в дифракции световой волны на краях линз оптической системы.

**Рисунок а – общий вид дифракционной картины при наблюдении двух мелких объектов на небольшом угловом расстоянии.**

**Рисунок б – предел разрешения двух точек по Релею.**



В оптической микроскопии для характеристики возможности увеличения фактической микроскопии используют понятия **предельный угол разрешения и разрешающая способность**.

**Предельный угол разрешения** - это угол, при котором первое тёмное кольцо дифракционной картины проходит через светлый центр второго. Предельный угол разрешения зависит от длины волны света  $\lambda$  освещающего объект, при этом минимальное разрешаемое микроскопом расстояние определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\min} = \lambda / 2A$$

$A$  – числовая апертура. Числовая апертура определяется показателем преломления материала и диаметром линз.  $A \leq 1$ .

## **Разрешающая способность**

микроскопа - это величина, обратная предельному углу разрешения.

**Правило Релея:** предельное разрешение оптического микроскопа не может быть больше половины длины волны освещающего объект света.



## 2. Электронная микроскопия.

Чтобы увеличить разрешающую способность микроскопа, в 1930-е гг. предложили вместо светового излучения (фотонов) использовать поток электронов, длина волны которых определяется по формуле:

$$\lambda = h/mv, \text{ где}$$

$\lambda$  - длина волны Дебройля.

$h$  – постоянная Планка, равная  $6.624 \cdot 10^{-24}$  Дж\*с г

$m$  – масса электрона, равная  $0.9 \cdot 10^{-27}$

$v$  – скорость электрона, которую можно регулировать с помощью разности потенциалов.

Предельная разрешающая способность электронных микроскопов в 1000 раз больше чем у оптических микроскопов. Для того, чтобы получить изображение в микроскопе, используется поток электронов, испускаемых раскалённым катодом. Управляются электроны с помощью внешних электромагнитных полей. Электронное изображение формируется электрическими и магнитными полями так же, как световое - оптическими линзами.

Устройства фокусировки и рассеивания электронного пучка называют электронными линзами. Поскольку глаз не может непосредственно воспринимать электронные пучки, то они направляются на люминесцентные экраны мониторов.

Поскольку длина волны электрона на несколько порядков меньше, чем фотона, в современных электронных микроскопах увеличение достигает 10 млн раз:  $N_{\text{эл}} \approx 10^7$ , что соответствует разрешению в единицы нанометров и **позволяет различить отдельные атомы.**

Наибольшее распространение получил **растровый электронный микроскоп (РЭМ)**. В таком микроскопе тонкий луч электронов диаметром 10 нм сканирует образец по горизонтальным строчкам и синхронно передаёт сигнал на монитор, аналогичен работе телевизора. Источник электронов - металл (вольфрам), из которого при нагревании в результате термоэлектронной эмиссии испускаются электроны.

Главный недостаток - необходимость работы в полном вакууме, поскольку наличие газов внутри камеры может привести к его ионизации и исказить результаты. Кроме того, электроны оказывают разрушительное воздействие на некоторые биологические объекты, что делает их неприменимыми для исследований во многих областях биотехнологий. Электронный микроскоп позволяет увидеть атомную решётку, различить атом, однако его разрешения недостаточно, чтобы увидеть атомную структуру или строение химических связей в молекуле.

Для этой цели используют **нейтронные микроскопы**.

Нейтроны вместе с протонами, входят в состав атомных ядер и имеют массу в 2000 раз больше чем электроны. Разрешающая способность в 1000 раз выше, чем у электронных микроскопов.

Преимущество – нейтроны хорошо проникают в толстые слои образцов.

Основной недостаток - нейтроны не могут управляться электромагнитными полями, поэтому управлять ими очень трудно.

### **3. Сканирующая зондовая микроскопия (СЗМ).**

**В основе работы СЗМ лежит  
принцип «ощупывания»  
мельчайших неровностей  
поверхности сверхтонким  
зондом.**

микроскопами:

- Обеспечивают возможность атомарного разрешения при работе не только в вакууме, но и в газовой, жидкой среде.
- Осуществляют возможность манипуляции с отдельными атомами и молекулами, например отрыв и перенос атома в заданное место.

### *Недостатки:*

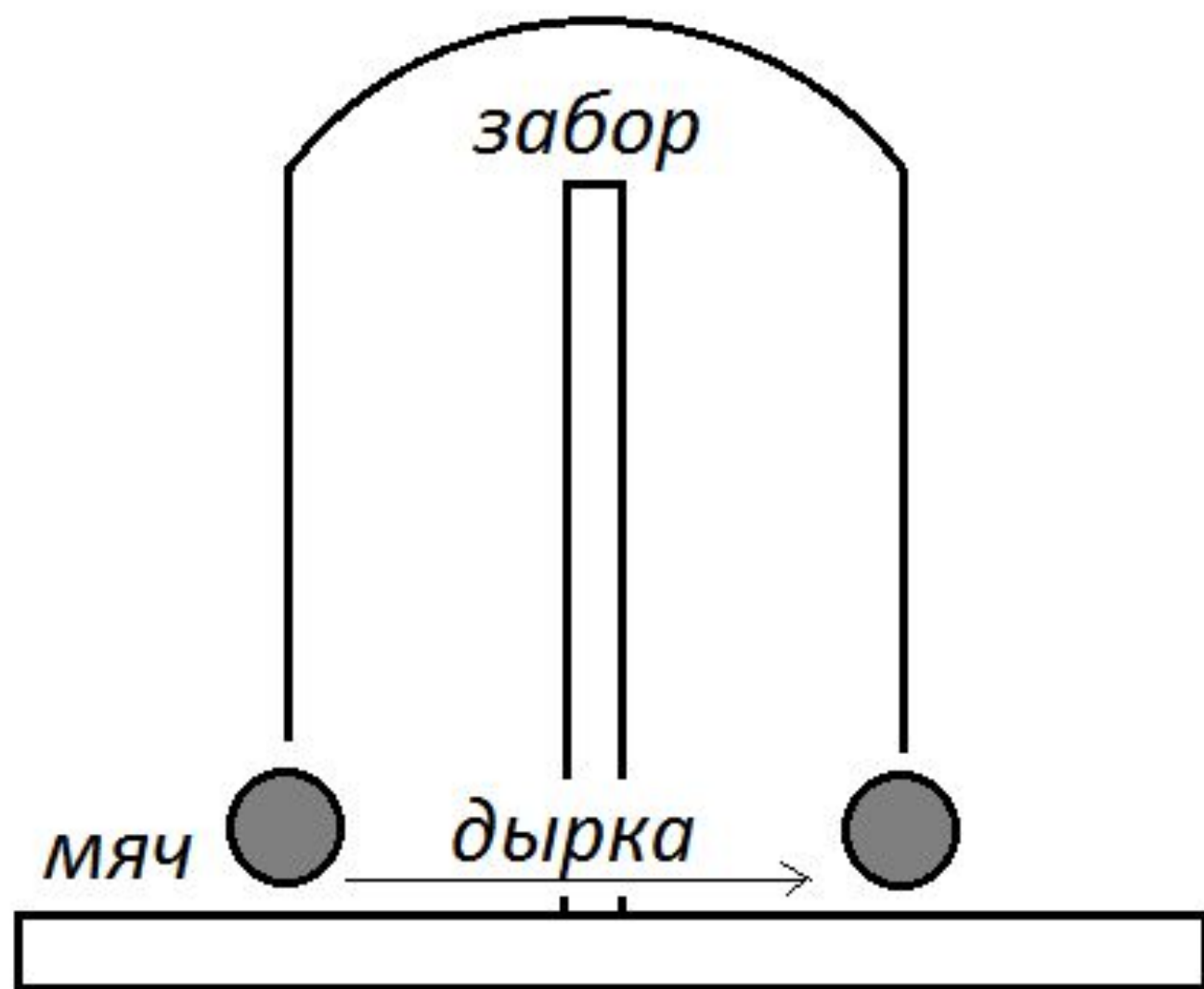
- Сложны в использовании, затупившаяся или повреждённая игла зонда, недостаточно чистая поверхность образца могут мешать достижению атомарного разрешения.
- Для надёжного функционирования необходимо обеспечить вибро- и шумоизоляцию.

В настоящее время с помощью СЗМ наблюдают за атомарной структурой микрокристаллов, полупроводников.



### 3.1. Сканирующий туннельный микроскоп

Сканирующий туннельный микроскоп основан на квантовом эффекте, который не имеет аналогов в классической физике. Согласно классической механике материальное тело, имеющее энергию  $E$ , не может преодолеть потенциальный барьер. Например, мяч не перелетит высокий барьер, если ему не сообщить энергии достаточной для подъёма на данную высоту. Чтобы мяч массой  $m$  оказался по другую сторону забора высотой  $h$ , нужно в нижней точке сообщить ему  $E = mv^2$  больше чем в верхней точке  $v = mgh$ . Однако, если в заборе имеется дырка или туннель, то мяч может оказаться за забором почти без дополнительной энергии.



Для того чтобы преодолеть силы притяжения ядра и покинуть атом, электрон должен приобрести дополнительную энергию. Эта энергия равна работе выхода электрона. Однако, в отличие от мяча, электрон обладает корпускулярно-волновыми свойствами, которые описываются с помощью волновой функции, распределённой в пространстве. Так же как волна присутствует сразу во всех точках пространства, так и электрон имеет вероятность оказаться за барьером.

Если два проводящих образца поместить на расстоянии  $x$  ( $10^{-10}$  метра), то волновые функции электронов ближайших друг к другу атомов перекрывается. При этом для электрона с энергией меньше потенциальной энергией барьера существует нулевая вероятность оказаться с другой стороны барьера, как если бы в барьере открылся туннель. Если к образцам приложить разность потенциалов, то между ними возникает электрический ток, который называется **туннельным током**.

Величина туннельного тока зависит от расстояния между поверхностями ( $x$ ), вычисляется по формуле:

$$I_t = I_0 \exp(-Kx)$$

$$K = \sqrt{m_e \frac{\Phi}{h}}$$

$h$  – постоянная планка.

$\Phi$  – работа выхода.

$K$  – константа затухания.

При изменении зазора  $x$  на 0.1 нм ток  $I_t$  меняется примерно 10 раз. Такая сильная зависимость туннельного тока от расстояния между двумя образцами лежит в основе работы сканирующего туннельного микроскопа (СТМ).

Основной частью СТМ является зонд – острая игла, скользящая над исследуемой поверхностью почти касаясь её. Зазор между иглой и поверхностью составляет менее 1 нм.

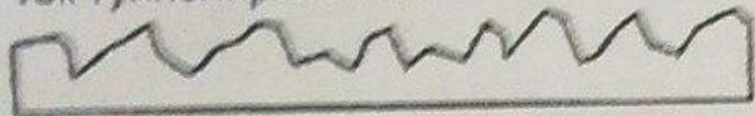
Между остриём иглы и поверхностью возникает туннельный ток. Экспоненциальная зависимость туннельного тока от расстояния обеспечивает высокую чувствительность микроскопа.

Существует **два варианта СТМ** в зависимости от режима сканирования образцов:

1). Режим **ПОСТОЯННОЙ ВЫСОТЫ**: остриё иглы перемещается в горизонтальной плоскости над образцом, а  $I_t$  изменяется в зависимости от расстояния между иглой и поверхностью.

2). В режиме **ПОСТОЯННОГО ТОКА**: применяется система обратной связи для поддержания туннельного тока постоянным путём подстройки высоты сканирующего устройства над поверхностью каждой её точки.

а Ток туннелирования



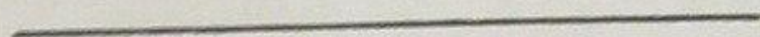
Зонд



Образец



б Ток туннелирования



Зонд



Образец



Рис. 3.6. Сканирование:

а — в режиме постоянной высоты; б — в режиме постоянного тока



Перемещение зонда над поверхностью с точностью до тысячных долей нанометра обеспечивается механическим прецизионным манипулятором, который изготавливается из пьезокерамического материала. Пьезоэффект состоит в изменении размеров образца под действием разности потенциалов и наоборот, при деформации образца образуется разность потенциалов.

Изображения, основанные на измерении туннельного тока и получаемые с помощью микроскопа, дают информацию о пространственном распределении электронных облаков вблизи поверхности.

## ***Основными частями СТМ являются:***

- 1).** Зонд – заточенная игла из вольфрама, платино-иридиевого сплава, углерода.
- 2).** Манипулятор грубого перемещения (до 0,1 мм).
- 3). Пьезоэлектрические двигатели для прецизионного перемещения.
- 4).** Электронная цепь обратной связи для контроля вертикальным движением сканирующего устройства.
- 5).** Компьютер со специальным программным обеспечением.

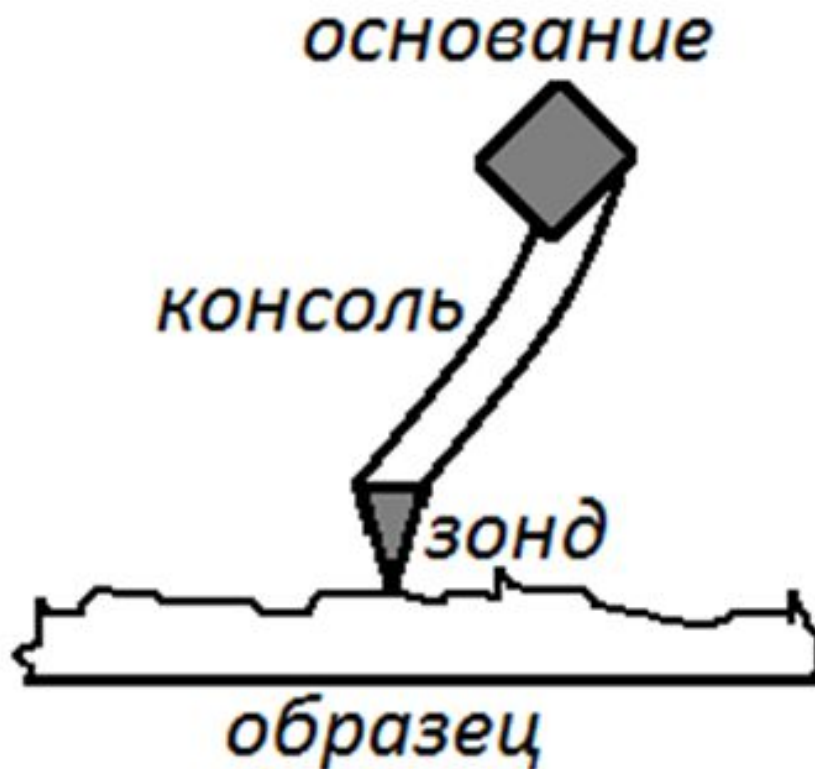
## **Основные характеристики СТМ:**

- 1).** Разрешение СТМ определяется качеством острия зонда; для вольфрамового острия, на конце которого располагается всего 1 атом, разрешение составляет 0.3 нм.
- 2).** Поле сканирования СТМ может составлять несколько десятков микрометров (достаточно образца  $3\text{мм}^2$ ).
- 3).** Скорость сканирования СТМ сопоставима со скоростью компьютерной обработки информации.
- 4).** Рабочей средой СТМ может быть как вакуум, так и воздух, жидкости диэлектрические, при широком диапазоне температур.

## 3.2. Атомно-силовой микроскоп (АСМ)

Принцип действия атомно-силового микроскопа (1986 г.) сходен с принципом действия туннельного микроскопа, но, в отличие от туннельного микроскопа, где измеряется туннельный ток, работа АСМ основана на измерении сил межатомных связей. По мере приближения иглы к поверхности ее атомы все сильнее притягиваются к атомам образца. Сила притяжения будет возрастать, пока игла и поверхность не сблизятся настолько, что их электронные облака начнут электростатически отталкиваться. При дальнейшем сближении электростатическое отталкивание экспоненциально ослабляет силу притяжения. Эти силы уравниваются на расстоянии между атомами 0.2 нм.

**В качестве зонда АСМ обычно используется алмазная игла с радиусом закругления менее 10 нм, закреплённая вертикально на конце горизонтальной пластинки – консоли.**



Острие сканирующей иглы называется tip, а консоль – cantilever. При изменении силы, действующей между поверхностью и остриём, консоль отклоняется и это регистрируется датчиком (лазерный луч).

Мельчайшее отклонение кантилевера детектируется с помощью лазерного луча, отражающегося от его поверхности на фотодиод. Показания фотодиода передаются на компьютер, где с помощью программного обеспечения воссоздается рельеф исследуемого объекта. Преимущество – возможность исследовать структуру электропроводящих образцов и неэлектропроводящих материалов, в том числе керамики, пластмасс, стекол.

## Разновидности АСМ:

- 1). Магнитно-силовой микроскоп.** В качестве зонда используется намагниченное остриё. Его взаимодействие с поверхностью образца позволяет регистрировать магнитные микрополя и представлять их в виде карты намагниченности.
- 2). Электросиловой микроскоп.** Остриё и образец рассматриваются как конденсатор. Измеряется изменение ёмкости вдоль поверхности образца.
- 3). Сканирующий тепловой микроскоп.** Регистрирует распределение температуры по поверхности образца. Разрешение достигает 50 нм.
- 4) Сканирующий фрикционный микроскоп.** Зонд скребётся по поверхности, оставляя карту сил трения.
- 5). Магнитно-резонансный микроскоп.**
- 6). Атомно-силовой акустический микроскоп.**