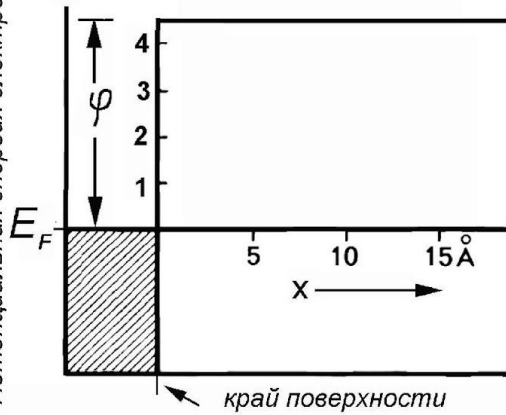


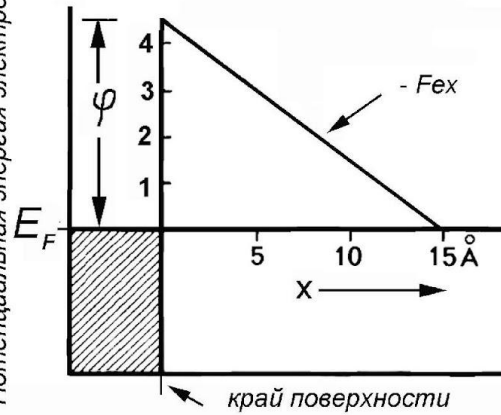
# Полевая электронно-эмиссионная микроскопия -ПЭЭМ

Потенциальная энергия электронов, eV



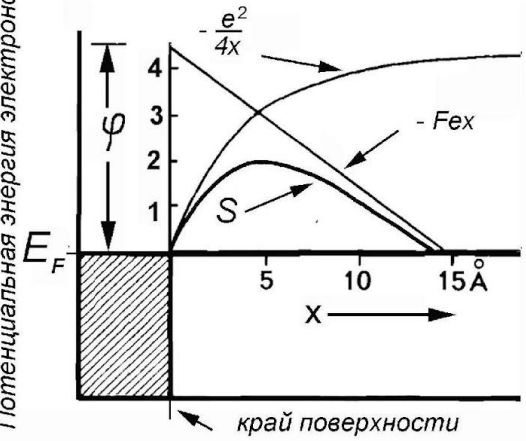
(a)

Потенциальная энергия электронов, eV



(б)

Потенциальная энергия электронов, eV



(в)

**Трансформация потенциального барьера вблизи поверхности металла под действием электрического поля:**

а – без поля,

б – в поле ( $F$ ), величиной  $10^8$  В/см,

в – форма барьера ( $S$ ) в то же электрическом поле, но с учетом сил зеркального отображения.

Вероятность выхода прохождения электронов из поверхности  $P$  равна:

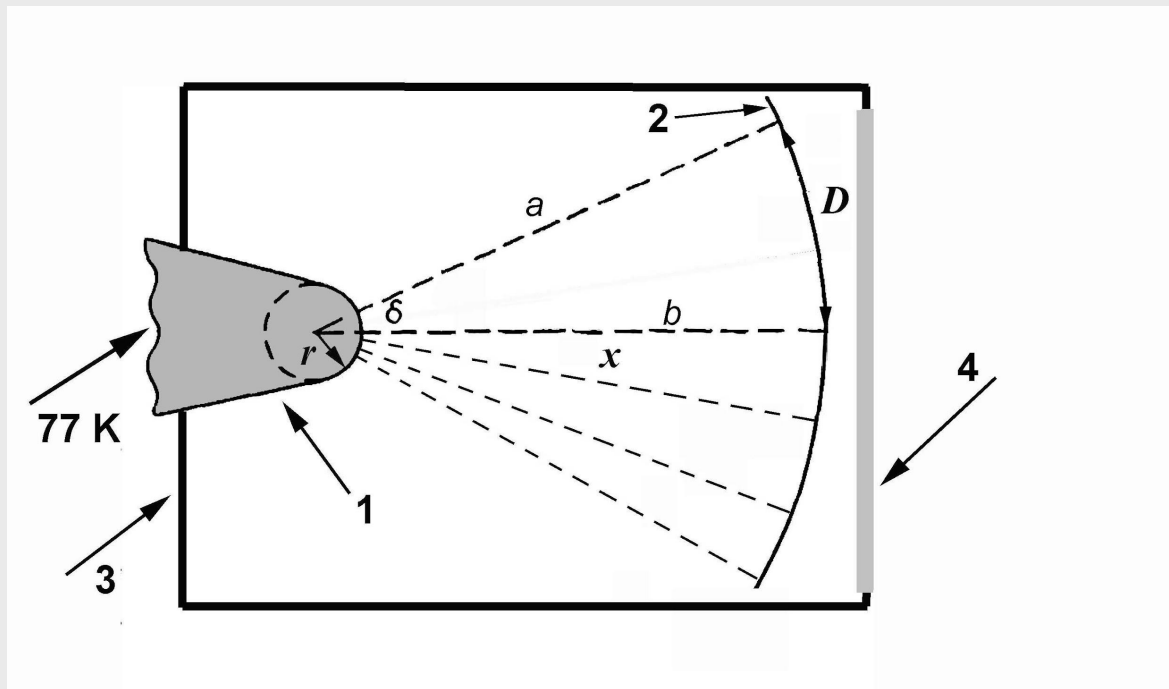
$$P = const \cdot \exp\left[\left(-2^{1/2} m^{1/2} / \hbar\right) \phi^{3/2} / F\right]$$

Умножение  $P$  на число электронов, приходящихся на единицу поверхности в единицу времени дает плотность тока полевой эмиссии  $J$ . Строгое выражение для  $J$  было получено Фаулером и Нордгеймом. В сжатом виде уравнение Фаулера и Нордгейма можно переписать в виде

$$I / V^2 = a \exp\left[-b\varphi^{3/2} / (cV)\right]$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  - постоянные,  $I$  - ток эмиссии,  $V$  – приложенный к металлу потенциал.

Очевидно, график  $\ln(I/V^2)$  должен быть линейен, и его наклон пропорционален  $\varphi^{3/2}$ .

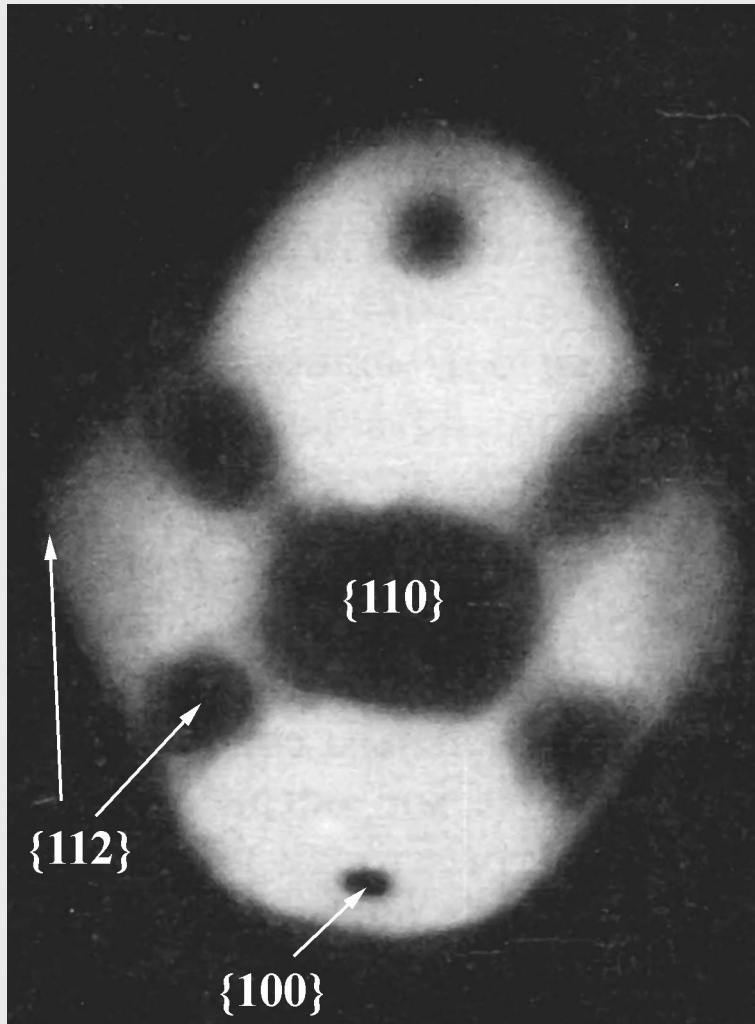


### Упрощенная схема полевого электронно-эмиссионного микроскопа (ПЭЭМ):

- 1 – охлаждаемая жидким азотом заостренная металлическая игла,
- 2 – полупрозрачный люминесцентный экран,
- 3 - корпус вакуумной емкости,
- 4 – прозрачное окно для наблюдения и регистрации свечения.

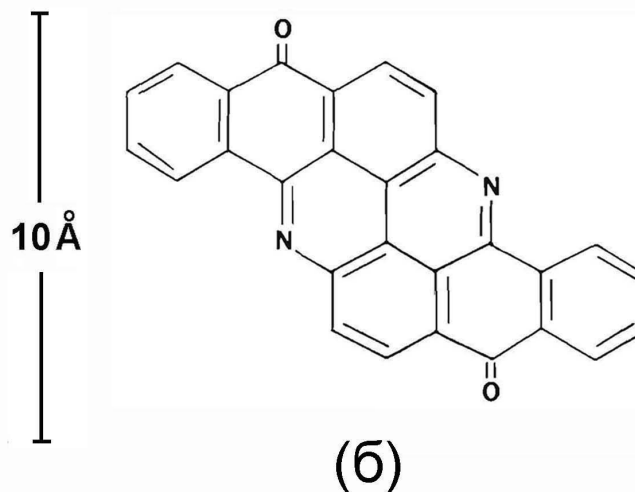
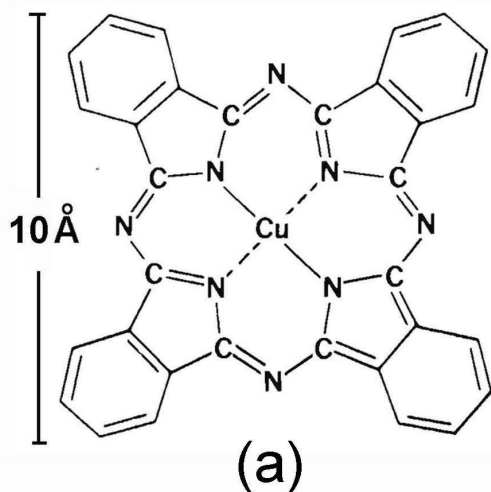
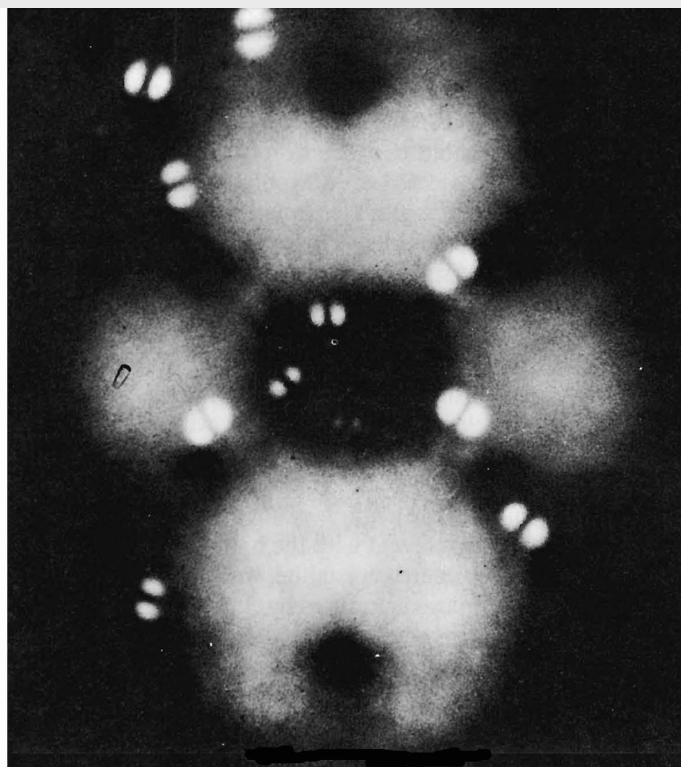
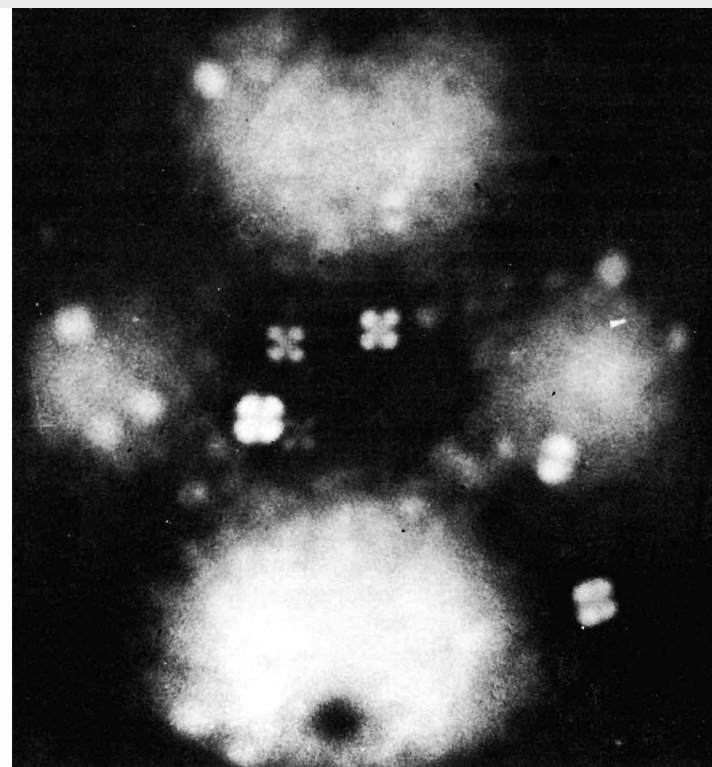
Поле на поверхности заостренной иглы определяется выражением  $F=V/rk$ , где  $k$  - постоянная, равная  $\sim 5$ . При напряжении  $10^4$  В, приложенном между катодом и анодом, возникает полевая эмиссия, так как поле на такой заостренной игле составляет  $10^9 \div 10^{10}$  В/см. Объект с линейными размерами  $\sigma$  на поверхности иглы увеличивается в  $x/r$  раз и возникает на экране с размером  $D$  ( $a$  и  $b$  – траектории движения электронов). Предел разрешения 2 нм.

Полученное в полевом электронно-эмиссионном микроскопе изображение поликристаллического вольфрамового острья (увеличенное  $10^5$ ).



Изображение в ПЭЭМ чистой поверхности W

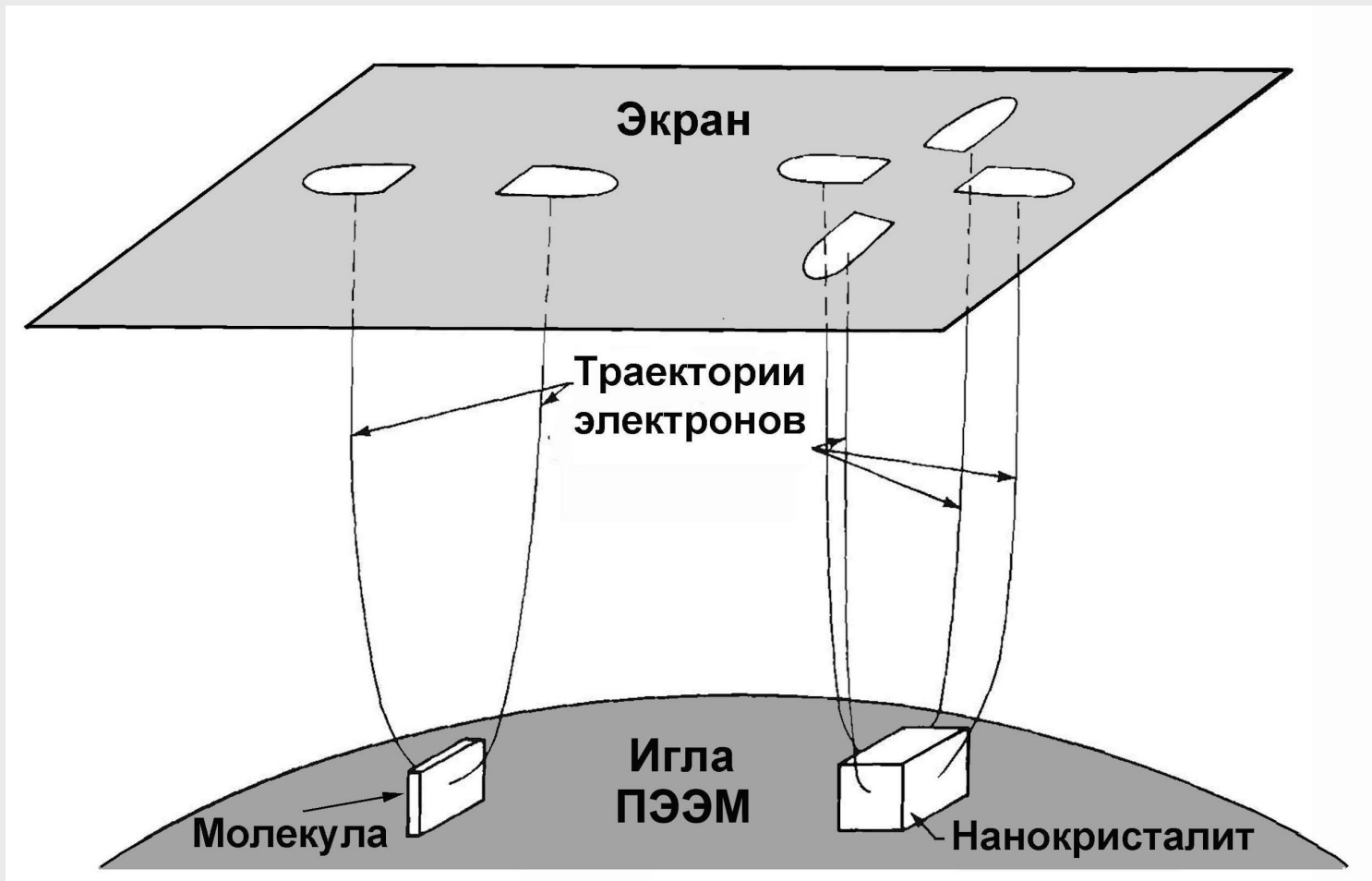
ПЭЭМ изображение представляет собой карту проекции работы выхода электронов из кристаллографических плоскостей: проекцию плоскости  $\{110\}$ , расположенную в центре, и проекции четырех плоскостей  $\{112\}$ , расположенных симметрично вокруг нее. Плоскости  $\{110\}$  и  $\{112\}$  характеризуются более высокими значениями работы выхода, чем окружающие их плоскости, поэтому они проявляются в виде темных пятен на более ярком фоне, которые характеризуются более высокими значениями  $\phi$ , чем окружающие их плоскости.



Изображения  
«отдельных»  
молекул,  
адсорбированных  
на кончике  
вольфрамовой  
иглы, полученные  
с помощью ПЭЭМ:

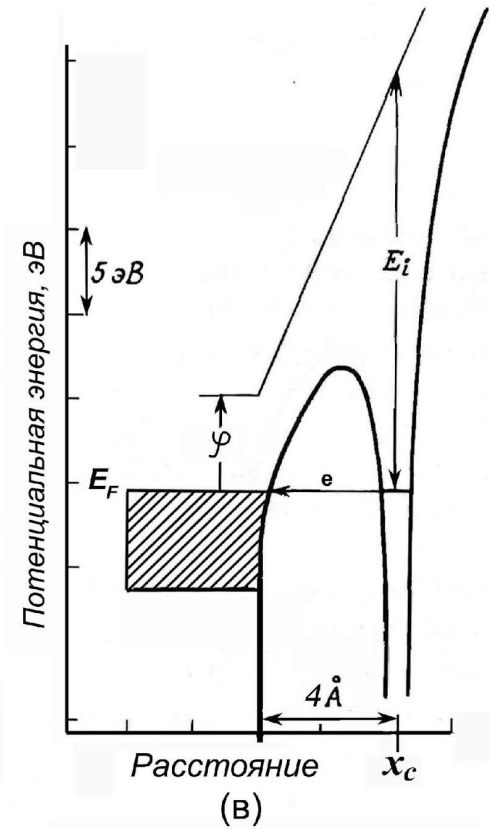
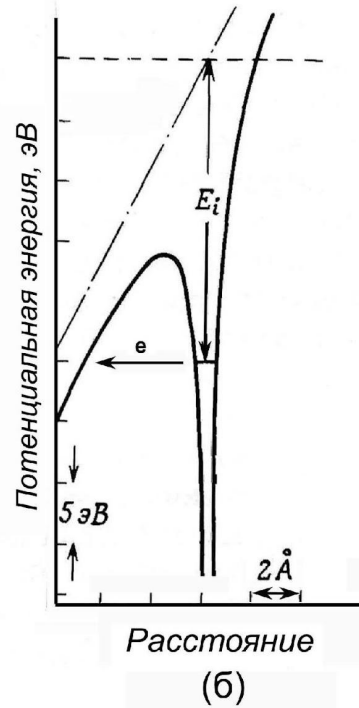
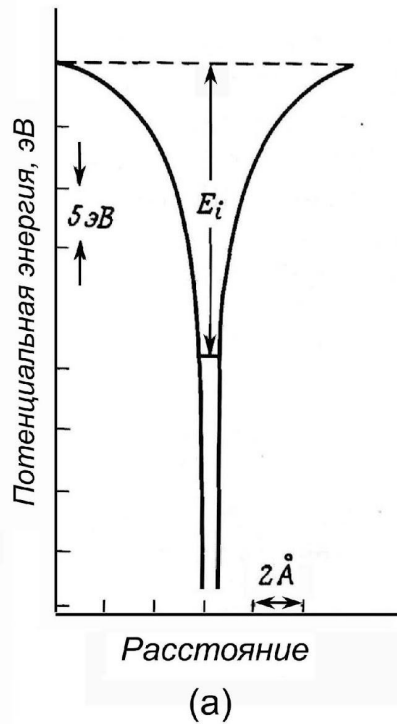
а - медь-  
фталоцианин (его  
структурная  
формула -  
 $C_{32}H_{16}Cu$  - внизу  
рисунка);

б - флавантрон  
(его структурная  
формула  
 $C_{18}H_{12}N_2O_2^-$  - внизу  
рисунка).



Схематическое изображение эмиссии электронов из молекулярных структур, адсорбированных на поверхности вольфрамового эмиттера, объясняющее образование изображений от «отдельных» молекул.

# Полевая ионная микроскопия

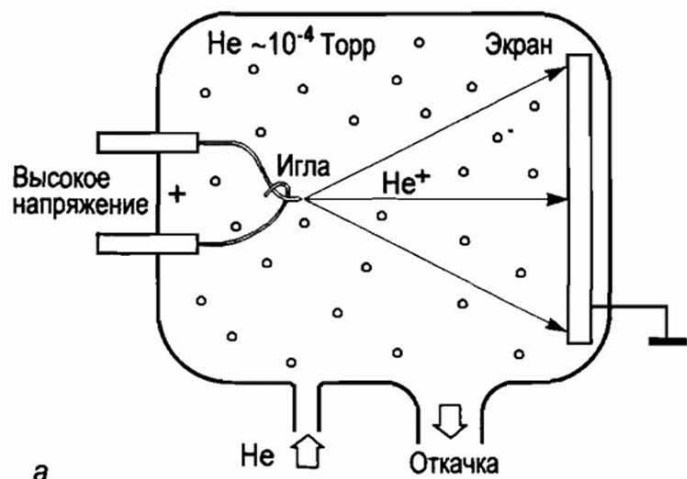


Потенциальная энергия атома гелия:

а – изолированный атом,

б – изолированный атом во внешнем электрическом поле,

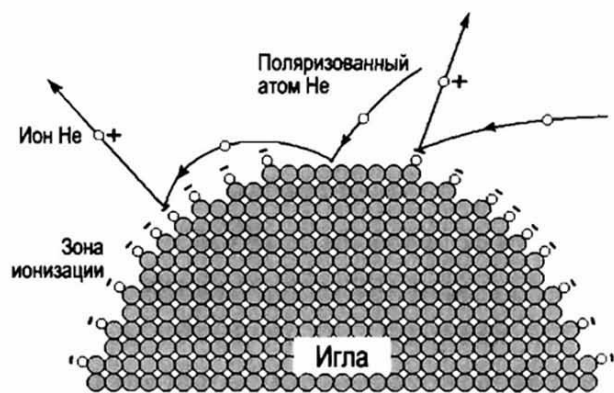
в – изолированный атом вблизи положительно заряженной металлической поверхности ( $4 \text{ \AA}$  – оптимальное расстояние для автоионизации He).



а

а - Экспериментальная установка для полевой ионной микроскопии.

б - Схематическая диаграмма, иллюстрирующая процесс получения изображения в микроскопе. В поле напряженности в несколько В/Å поляризованные атомы He притягиваются к игле и образуют монослой на поверхности. Другие атомы He, совершая скачки по этой поверхности, могут ионизироваться и в виде положительных ионов ускориться в сторону экрана, на котором и формируется микроскопическое изображение



б

○ Атом гелия      ● Атом металла

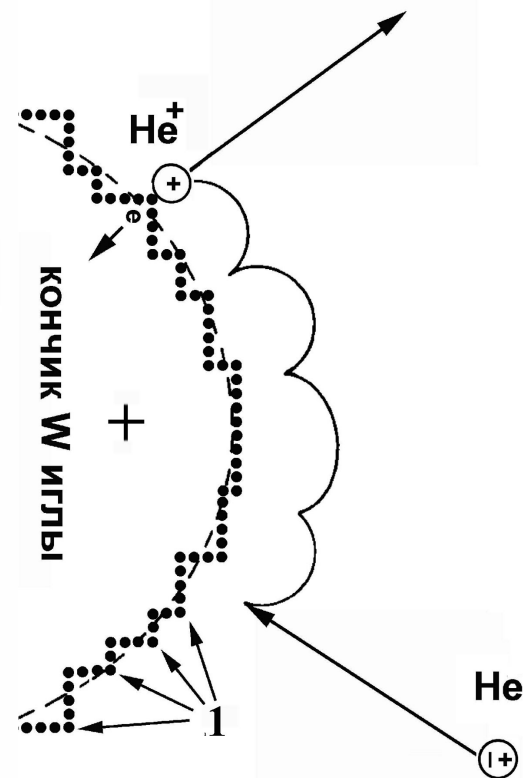
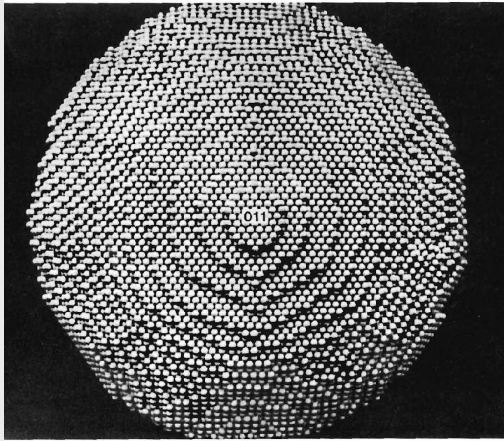
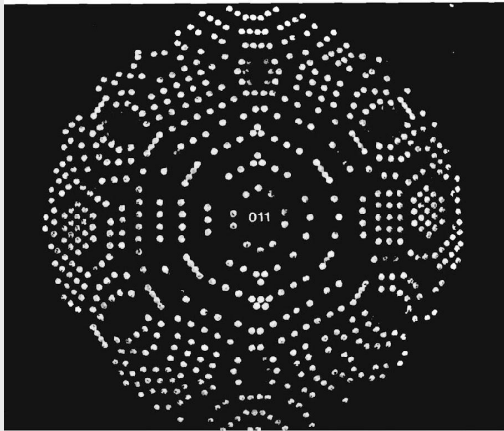


Схема перемещения и ионизации атома гелия вблизи поверхности положительно заряженной вольфрамовой иглы. 1- выступающие на краях кристаллографических плоскостей атомы, вблизи которых электрическое поле максимально.

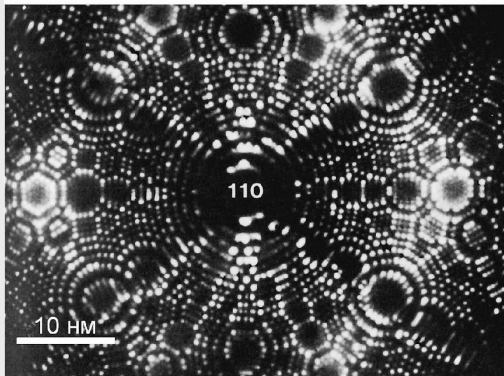




(a)



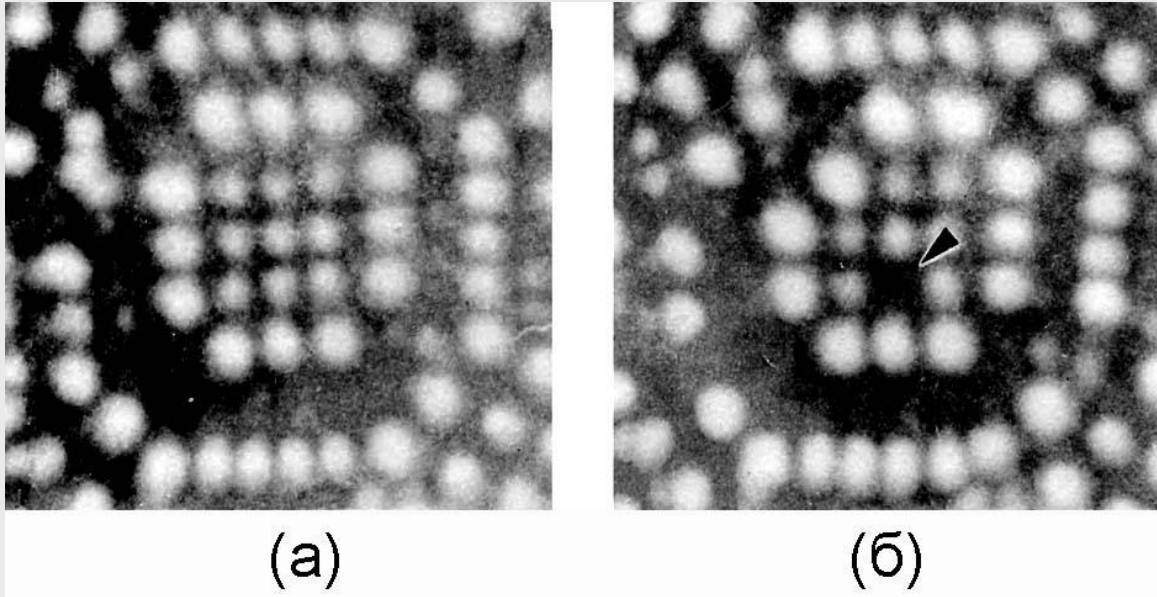
(б)



(в)

Сравнение смоделированных (а) и (б) ПИМ изображений кончика иглы W с экспериментальным ПИМ изображением кончика W иглы (в), из которого ясно почему видимые в ПИМ отдельные атомы W расположены как бы в виде колец.

## Полевое испарение атома в ПИМ



ПИМ изображение с атомарным разрешением одного и того же участка кончика иглы из сплава  $\text{Ni}_7\text{Zr}_2$ :

а – до воздействия импульса электрического поля,

б - после воздействия импульса напряжения (стрелкой указано место, которое покинул атом под действием электрического поля).

Этот эффект используется в ПИМ с атомным зондом.

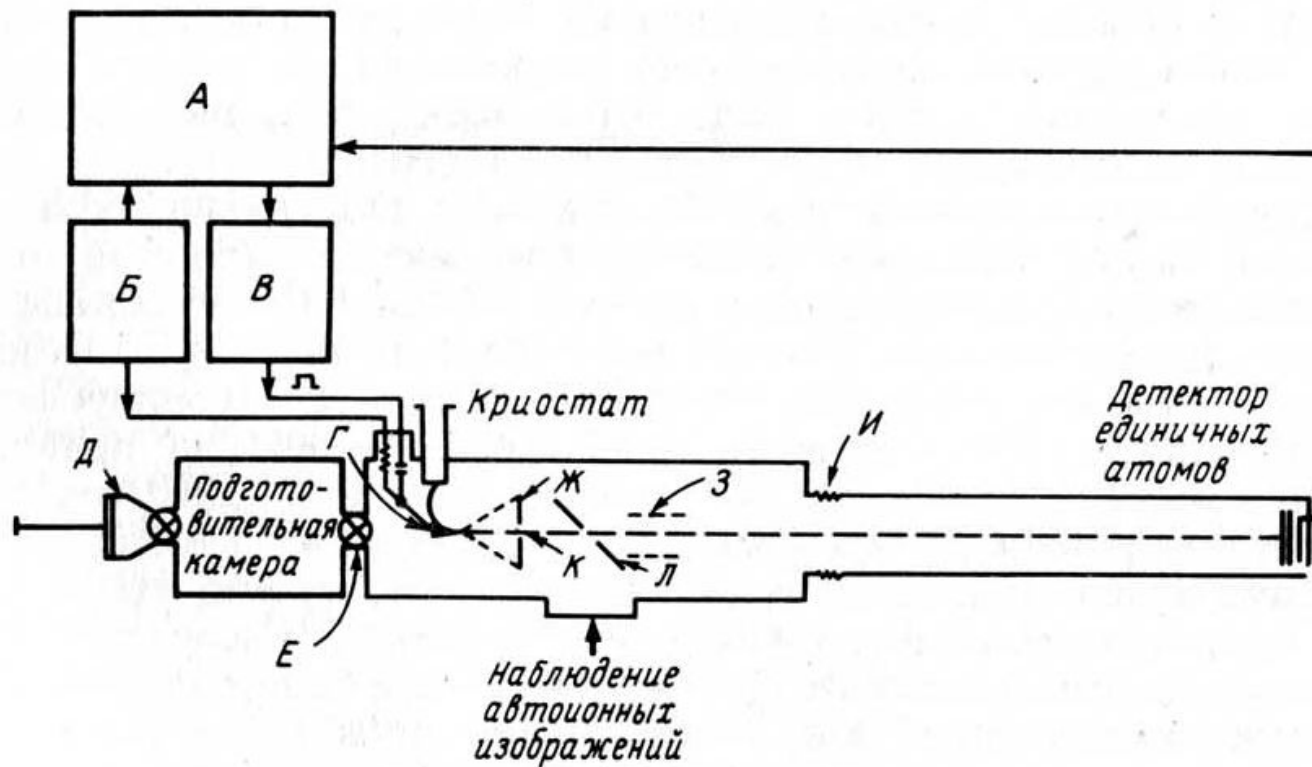


Схема прямолинейного времяпролетного атомного зонда. А - ЭВМ-контроль системы цифровых таймеров; Б - источник постоянного напряжения 0 - 30 кВ; В - источник импульсного напряжения 0 - 6 кВ; Г - образец; Д - воздушный шлюз; Е - разделительный клапан; Ж - микроканальная пластина; З - фокусирующая линза; И - гибкое соединение; К - зондовое отверстие; Л - зеркало.