#### Полевая электронно-эмиссионная микроскопия -ПЭЭМ



Трансформация потенциального барьера вблизи поверхности металла под действием электрического поля:

а – без поля,

б – в поле (*F*), величиной 10<sup>8</sup> 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:

$$P = const \cdot \exp\left[\left(-\frac{2^{1/2}}{m^{1/2}} / \mathbb{Z}\right) \varphi^{3/2} / F\right]$$

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 линеен, 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 ~ 5. При напряжении 10<sup>4</sup> B, приложенным между катодом и анодом, возникает полевая эмиссия, так как поле на такой заостренной игле составляет 10<sup>9</sup> ÷10<sup>10</sup> B/cм. Объект с линейными размерами **о** на поверхности иглы увеличивается в *х/г* раз и возникает на экране с размером *D* (*a* и *b* – траектории движения электронов). Предел разрешения 2 нм.



Изображение в ПЭЭМ чистой поверхности W

Полученное в полевом электронно-эмиссионном микроскопе изображение поликристаллического вольфрамового острия (увеличенное 10<sup>5</sup>).

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  $\varphi$ , чем окружающие их плоскости.



(a)



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

а - медьфталоцианин (его структурная формула -С<sub>32</sub>Н<sub>16</sub>Си - внизу рисунка);

б - флавантрен (его структурная формула С<sub>18</sub>Н<sub>12</sub>N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>- 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 внешнем электрическом поле,

в – изолированный атом вблизи положительно заряженной металлической поверхности (4 Å – оптимальное расстояние для автоионизации He).



 а- Экспериментальная установка для полевой ионной микроскопии.

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



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



(б)



# 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 Ni<sub>7</sub>Zr<sub>2</sub>:

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. A - ЭВМ-контроль системы цифровых таймеров; <math>E - источник постоянного напряжения 0 -30 кВ; B - источник импульсного напряжения 0 - 6 кВ;  $\Gamma$  - образец;  $\mathcal{A}$  - воздушный шлюз; E - разделительный клапан;  $\mathcal{K}$  - микроканальная пластина; 3 фокусирующая линза;  $\mathcal{H}$  - гибкое соединение; K - зондовое отверстие;  $\mathcal{A}$  - зеркало.