

ЛЕКЦИЯ 10,11

Теория автоэлектронной
эмиссии.

Автоэлектронный и автоионный
микроскопы.



АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ



Под электронной эмиссией понимается испускание электронов (как правило в вакуум) из твердого тела или какой-либо другой среды. Тело, из которого испускаются электроны называется катод. Электроны совершают работу против внутренних сил, удерживающих их на границе раздела катод-вакуум.

По способу, которым эта энергия передается катоду, эмиссионные процессы называются: термоэмиссией, когда энергия передается электронам за счет нагревания катода; вторичной электронной эмиссией, когда эта энергия передается другими частицами (электронами или ионами, бомбардирующими катод); фотоэлектронная эмиссией, при которой электроны выбиваются квантами света,

Автоэлектронной эмиссией (в англоязычной терминологии – полевая эмиссия (field emission)) называется явление испускания электронов в вакуум с поверхности твердого тела под действием сильного электрического поля напряженностью $E=10^7-10^8$ В/см.

Автоэмиссия чисто квантовый эффект, при котором для высвобождения электронов не требуется затрат энергии на сам эмиссионный акт в отличие от термо-, фото- и вторичной эмиссии.

АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ



Открытие явления автоэлектронной эмиссии в 1897 г. - Роберт Вуд.

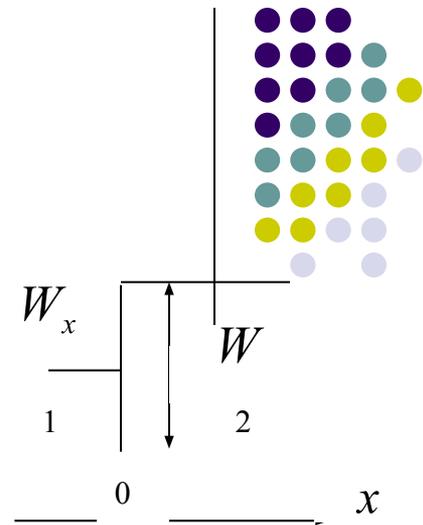
1929 г. Р.Э. Милликен и Р.У. Лоритсен установили линейную зависимость логарифма плотности автоэмиссионного тока j от обратной напряженности электрического поля E : $\lg j = A - B/E$

1928-29 гг. - теория Р. Фаулера и Л. Нордгейма, которая объяснила автоэлектронную эмиссию на основе туннельного эффекта.

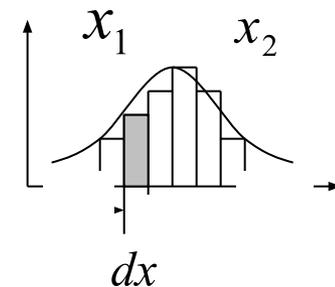
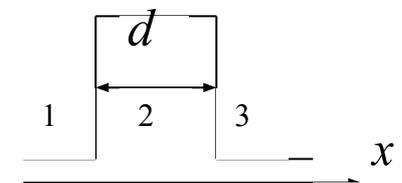
АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Автоэлектронная эмиссия – это явление эмиссии электронов при низкой температуре в присутствии внешнего электрического поля. В присутствии внешнего электрического поля высокой напряженности E ($10^6 \div 10^7$ В/см), помимо увеличения тока эмиссии за счет снижения работы выхода (эффекта Шоттки), из-за ограниченности толщины барьера появляется вероятность подбарьерного перехода – «тунельного» эффекта. Испускание электронов под действием внешнего электрического поля, обусловленное вероятностью подбарьерного перехода потенциального барьера, имеющего во внешнем электрическом поле ограниченную ширину, называется автоэлектронной эмиссией. Если на поверхность раздела двух сред падает электромагнитная волна с энергией W_x то происходит ее отражение от потенциального барьера. Рассмотрим теперь потенциальный барьер конечной ширины. Тогда существует ненулевая вероятность нахождения электрона в среде 3. Относительная плотность электронов в среде 3 определяется вероятностью нахождения электрона на расстоянии x , т.е. коэффициент прозрачности барьера для прямоугольного барьера ширины d :

$$D = \exp\left(-\frac{4\pi}{h} d \sqrt{2m(W - W_x)}\right)$$



Граница раздела двух сред.



Потенциальный барьер конечной ширины.

АВТОЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ.

Вычислим прозрачность потенциального барьера с учетом сил электрического изображения. В вакууме распределение потенциала:

$$eV(x) = -eEx - \frac{e^2}{4x}, \quad x > 0$$

Учтем, что снижение потенциального барьера за счет эффекта Шоттки

$$\Delta(e\varphi_a) = e^{3/2} \sqrt{E}$$

много меньше энергии W_x

$$x_1 = \frac{-W_x + W_x - \frac{1}{2} \frac{e^3 E}{W_x}}{2eE} = -\frac{1}{4} \frac{e^2}{W_x}, \quad x_2 = \frac{-W_x - W_x + \frac{1}{2} \frac{e^3 E}{W_x}}{2eE} = -\frac{W_x}{eE} + \frac{1}{4} \frac{e^2}{W_x}.$$

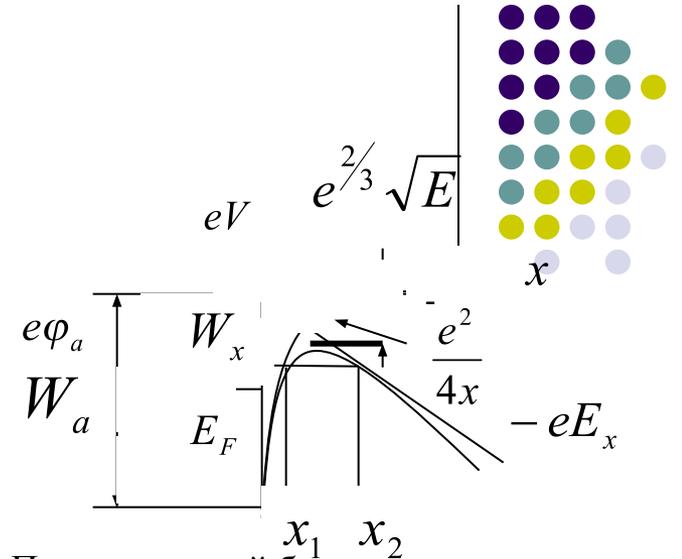
Для этих пределов интегрирование даст

$$D = \exp\left(-\frac{4}{3} \frac{\sqrt{2m}}{\hbar eE} \theta(y) (-W_x)^{3/2}\right)$$

- функция Нордгейма

где

$$\theta(y) = \frac{3}{4} y \int_{\frac{y}{2}}^{\frac{2-y}{y^2}} \sqrt{1 - \frac{y}{2} \left(\xi + \frac{1}{\xi}\right)} d\xi$$



Потенциальный барьер на границе металл – вакуум в присутствии внешнего электрического поля с учетом сил электрического изображения.



Плотность тока автоэлектронной эмиссии.

Число электронов, падающих на единицу поверхности в единицу времени и имеющих импульс от p_x до $p_x + dp_x$:

$$v_x = V_x dn_x = \frac{4\pi mkT}{h^3} d\left(\frac{p_x^2}{2m}\right) \ln \left(1 + \exp\left(-\frac{\frac{p_x^2}{2m} - E_F}{kT}\right) \right)$$

Плотность тока автоэлектронной эмиссии:

$$j_A = \int_0^{\infty} e D v_x$$

$$j_A = \frac{e^3 E^2}{8\pi h (e\phi_a)} \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m}}{3\hbar e E} \theta(y) (e\phi_a)^{3/2}\right) = \zeta E^2 \exp\left(-\frac{C_2 (e\phi_a)^{3/2}}{E}\right)$$

- формула Фоулера-Нордгейма.

Влияние множителя E^2 , подобно влиянию множителя в формуле Ричардсона-Дэшмана, незначительно. Более существенно влияние экспоненциальной зависимости от работы выхода электрона $e\phi_a$. Автоэлектронная эмиссия становится заметной при

$$E \sim 10^6 \frac{\text{В}}{\text{см}}$$

Механизм автоэлектронной ЭМИССИИ



Основные положения теории Фаулера-Нордгейма

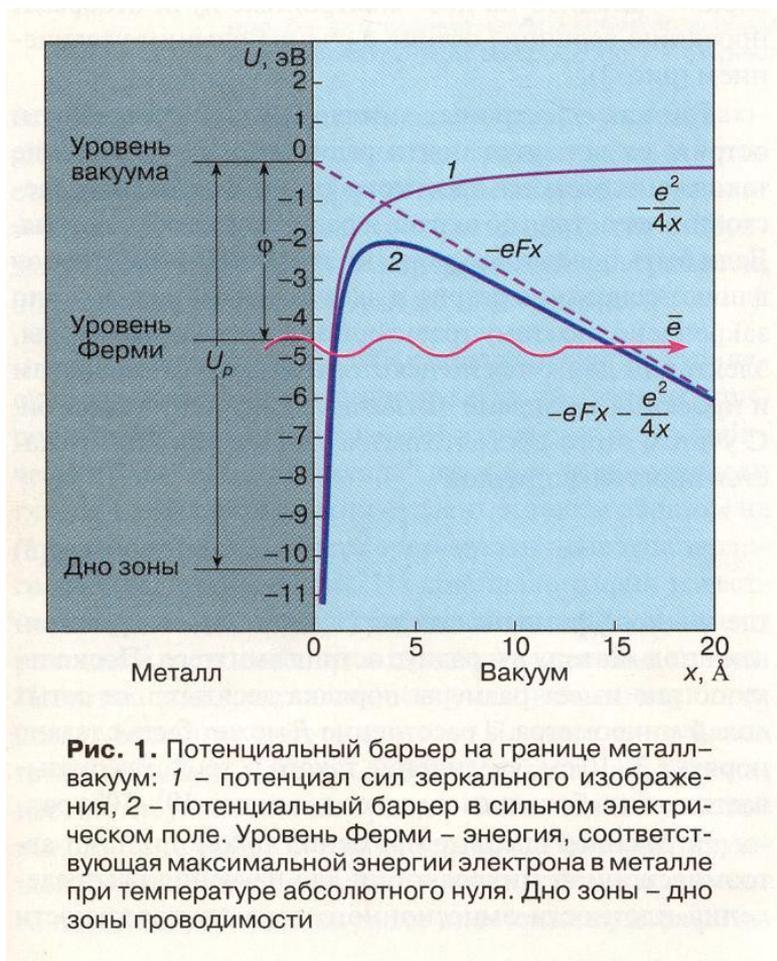
1. Задача ставится как одномерная (иными словами, поверхность раздела металл-вакуум считается идеальной плоскостью), потенциал $U(X)$ зависит только от координаты x . Соответственно внешнее поле оказывается однородным.
2. Внутри металла $U(X) = \text{const} = -U_0$, вне металла весь потенциальный порог обусловлен исключительно действием поляризационных сил $U = -e^2/4x$.
3. Прозрачность барьера вычисляется с помощью метода Венцеля, Крамера и Бриллюэна и выражается как

$$D = \exp \left[-\frac{2}{h} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(U - E)} dx \right]$$

Здесь x_1 и x_2 точки поворота, где $U - E = 0$.

4. В качестве модели металла выбрана зонмерфельдовская модель свободных электронов в потенциальном ящике, образующих вырожденный газ, подчиняющийся статистике Ферми-Дирака.
5. Теория построена для $T=0$.

Механизм автоэлектронной эмиссии



Механизм автоэлектронной эмиссии



Зависимость плотности эмиссионного тока от напряженности электрического тока:

$$j = 1.54 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{\varphi t^2(y)} \exp \left[-6.83 \cdot 10^7 \frac{\varphi^{2/3}}{E} g(y) \right]$$
$$y = 3.79 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{E}}{\varphi}$$

Функции $t(y)$ и $g(y)$ затабулированы.

Функция $t(y)$, стоящая в предэкспоненциальном множителе, близка к единице и слабо меняется с изменением аргумента.

Функция $g(y)$ называется функцией Нордгейма и учитывает понижение потенциального барьера.

АВТОЭЛЕКТРОННЫЙ И АВТОИОННЫЙ МИКРОСКОП

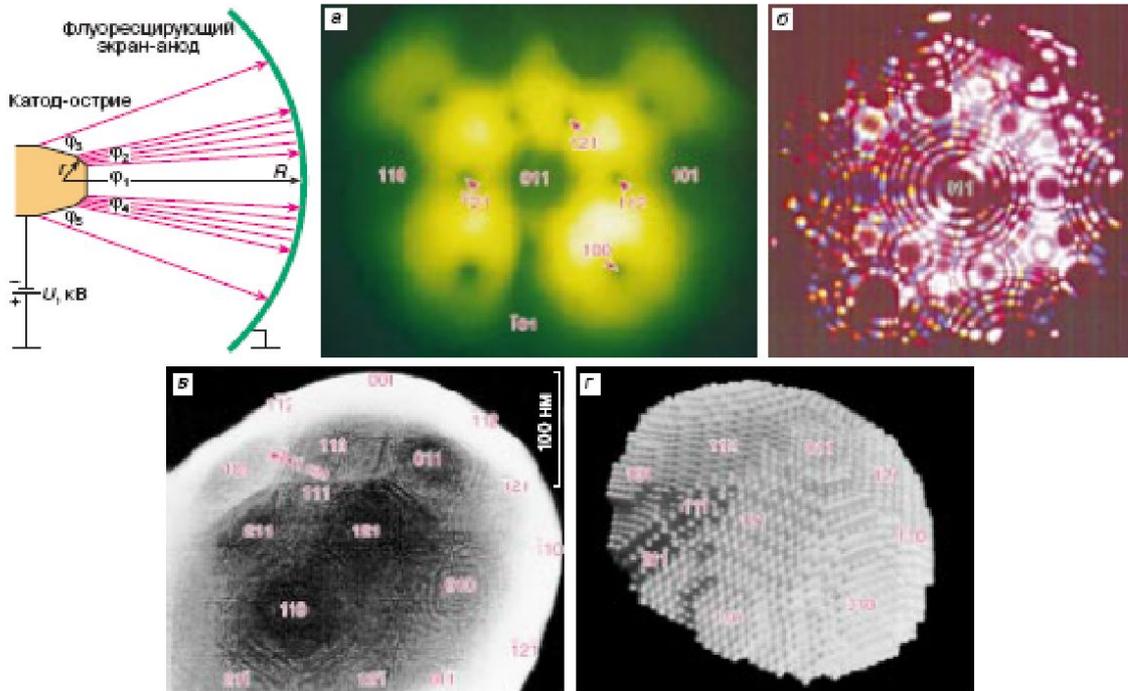
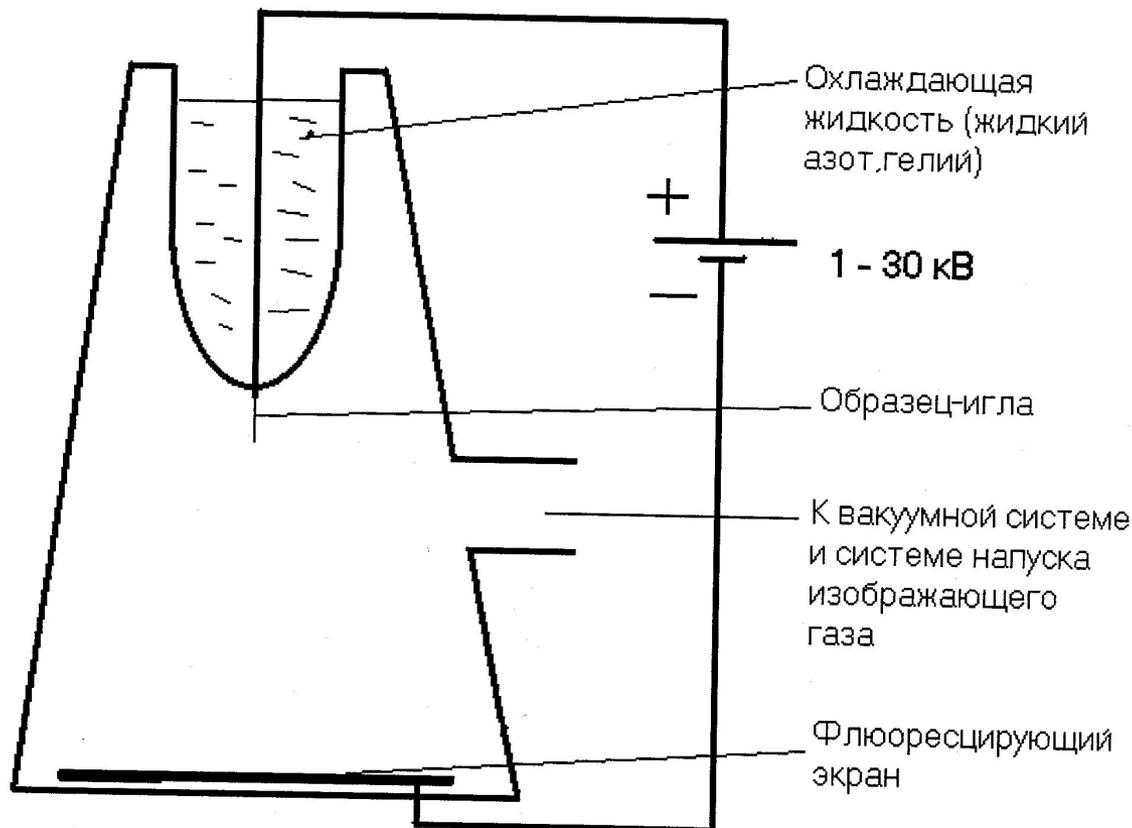


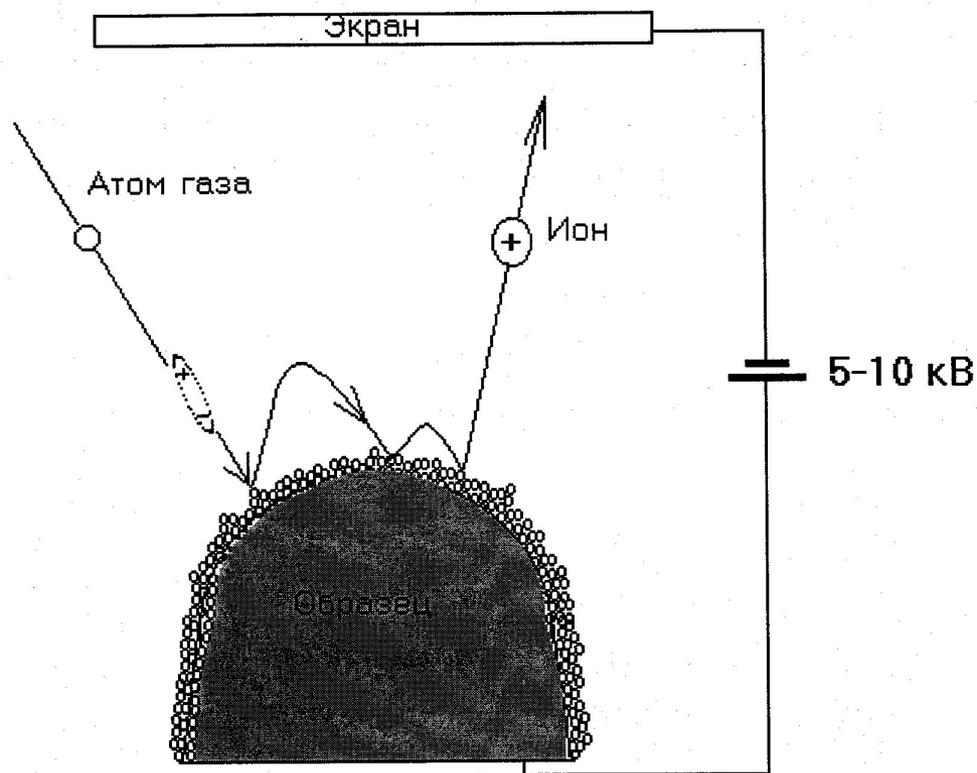
Рис. 2. Иллюстрация к принципу работы автоэмиссионного микроскопа: а – автоэмиссионное, б – автоэмиссионное изображение вольфрамового острия; в – вольфрамовое острие в растровом электронном микроскопе, г – шариковая модель вольфрамового острия

АВТОЭЛЕКТРОННЫЙ И АВТОИОННЫЙ МИКРОСКОП



Схематичное изображение автоионного микроскопа

АВТОЭЛЕКТРОННЫЙ И АВТОИОННЫЙ МИКРОСКОП



Процесс автоионизации

АВТОЭЛЕКТРОННЫЙ И АВТОИОННЫЙ МИКРОСКОП



УВЕЛИЧЕНИЕ АВТОЭЛЕКТРОННОГО И АВТОИОННОГО МИКРОСКОПА

Так как электроны, эмитируемые с поверхности острия, разлетаются почти радиально, то увеличение такого микроскопа проектора равно отношению расстояния от острия до экрана к радиусу вершины острия.

на траекторию электронов влияют основание острия и электроды, на которых оно закреплено, поэтому траектории не совсем радиальны, электроны движутся по некоторым параболам и проекция на экране оказывается немного поджатой.

С учетом этого обстоятельства увеличение M выражается простой формулой

$$M = \frac{1}{\gamma} \frac{R}{r}$$

где γ - коэффициент сжатия (1.5- γ -2), R – расстояние анод-катод, r – радиус острия эмиттера. Поскольку острие имеет размеры порядка десятых или сотых долей микрометра, а расстояние R может быть сделано порядка нескольких сантиметров (3-10 см), увеличение такого устройства оказывается очень большим и может достигать 10^5 - 10^6 крат.

АВТОЭЛЕКТРОННЫЙ И АВТОИОННЫЙ МИКРОСКОП



Рис. 3. Нановыступы на W-острие, образующиеся при перестройке его поверхности в сильном электрическом поле

АВТОЭЛЕКТРОННЫЙ И АВТОИОННЫЙ МИКРОСКОП

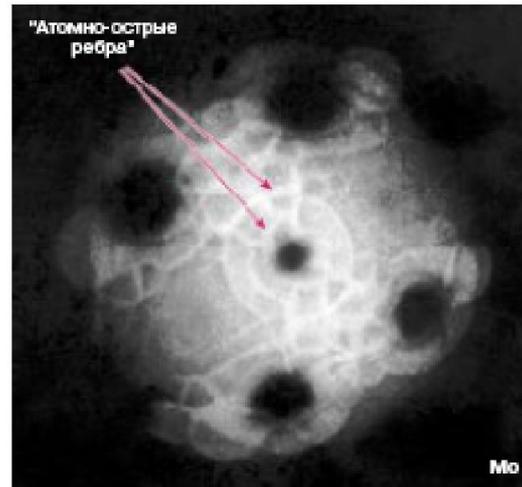
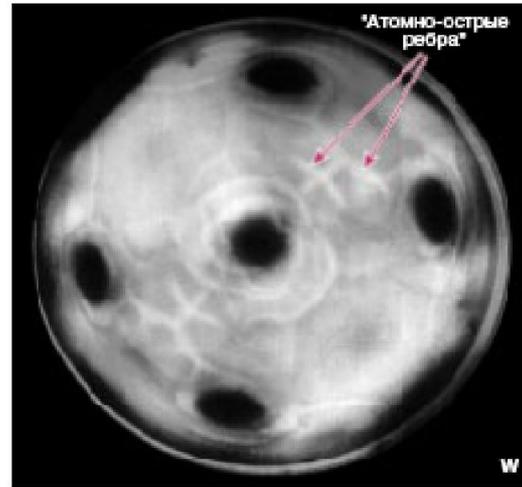


Рис. 4. Атомно-острые ребра, сформированные на поверхности острых монокристаллов W и Mo в процессе перестройки поверхности в сильном электрическом поле

ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ



РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЭМИССИОННЫХ МИКРОСКОПОВ

Разрешающая способность ИП находится в обратной зависимости от тангенциальной составляющей скорости иона, т.е. кинетической энергии. Поэтому острие охлаждают до 4-77 К (кроме того, охлаждать надо, чтобы игла не грелась из-за тока).

Разрешающая способность ИП – до 4 А, полевого микроскопа – 29-30 А.

Более высокая разрешающая способность ИП определяется меньшей длиной волны де Бройля для ионов.

ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ



Требования к игле:

1. Радиус закругления $r=100 - 5000 \text{ \AA}$.
2. Угол при вершине не более 5 град.
3. Материал должен быть прочным и тугоплавким.
4. Игла должна проводить электрический ток.
5. Если образец комбинированный, т.е. состоит из иглы и объекта исследования, то контакт должен быть очень надежен.
6. Обычно материалом для игл служит вольфрам, тантал, LaB_6 , ZrC . Если надо анализировать другие вещества, используют
 - напыление на иглу;
 - осаждение из растворов;
 - клеевой контакт с проводящей пудрой.

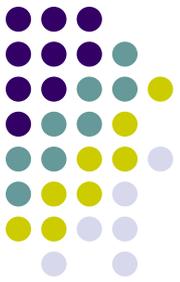
ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ



Основные проблемы эмиссионной микроскопии:

- интерпретация изображения (большая роль компьютерного моделирования);
- испарение и модификация иглы;
- артефакты из-за примесных веществ на игле.

ЭМИССИОННАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ



Основные направления автоионномикроскопических исследований

1. Изучение кристаллической структуры металлов.
2. Исследование процессов автоионизации.
3. Изучение процессов испарения электрическим полем.
4. Исследование дефектов (точечные, дислокации, дефекты упаковки, структуры границ зерен и др. границы, радиационные повреждения).
5. Исследование механических свойств.
6. Коррозия поверхности.
7. Процессы адсорбции и десорбции.
8. Поверхностная диффузия.
9. Процессы кристаллизации и рекристаллизации.
10. Исследование сплавов.
11. Пленки на поверхности металлов.
12. Изучение крупных молекул
13. Исследование стимулированных электрическим полем химических реакций.
14. Создание практических устройств – светящихся катодов и матриц..

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОЭЛЕКТРОННОЙ ЭМИССИИ

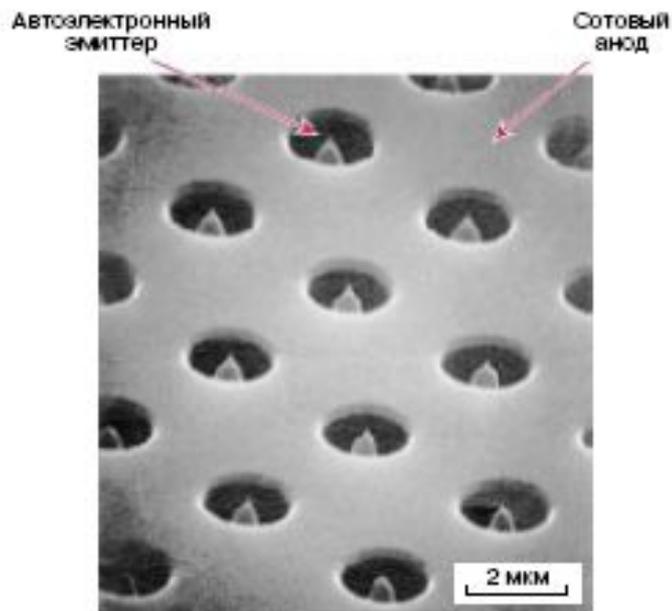


Рис. 5. Многоэмиттерная матрица с сотвым анодом. Напряжение на аноде 25 кВ