

Основные электронные эмиссионные процессы

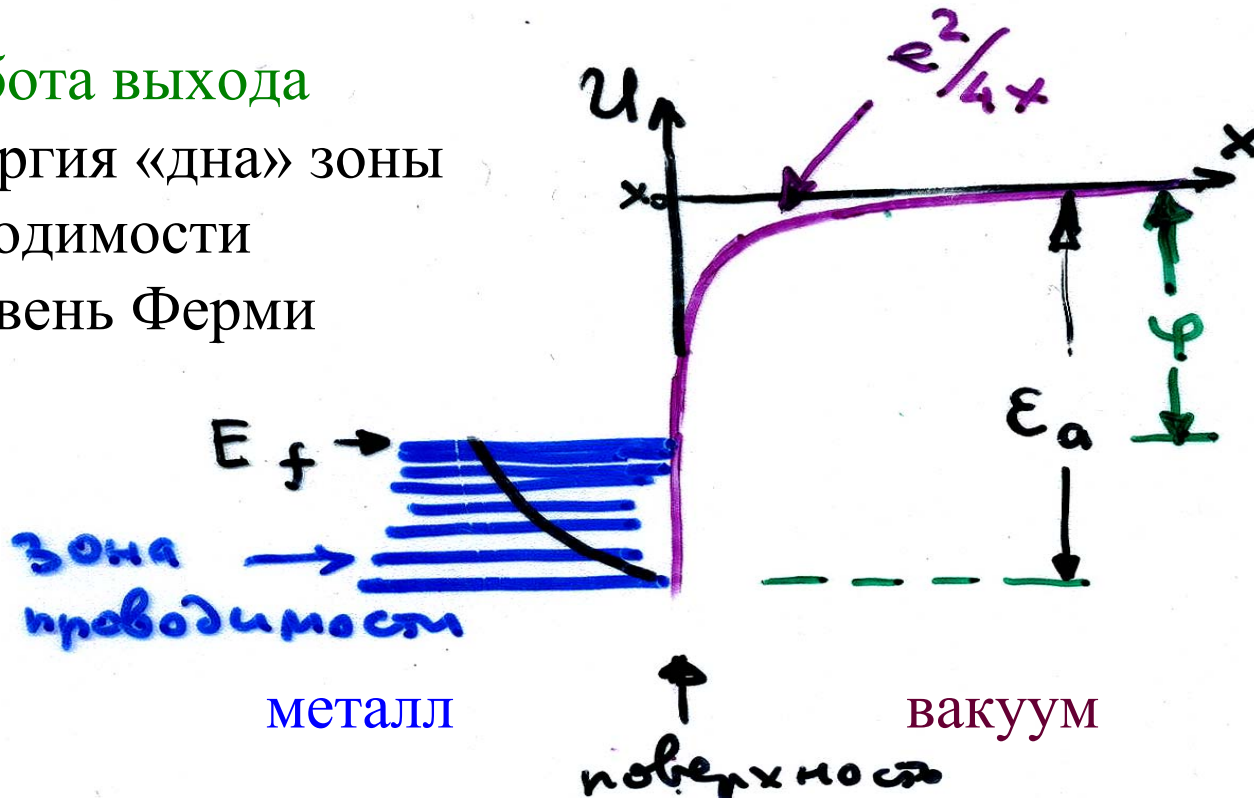
- Термоэлектронная эмиссия
- Автоэлектронная эмиссия
 - ✓ Термоавто-электронная эмиссия
 - ✓ Фотоавто-электронная эмиссия
 - ✓ Экзо-электронная эмиссия
- Вторичная эмиссия
 - Электрон-электронная
 - Фото-электронная
 - Ион-электронная

Термоэлектронная эмиссия

ϕ - работа выхода

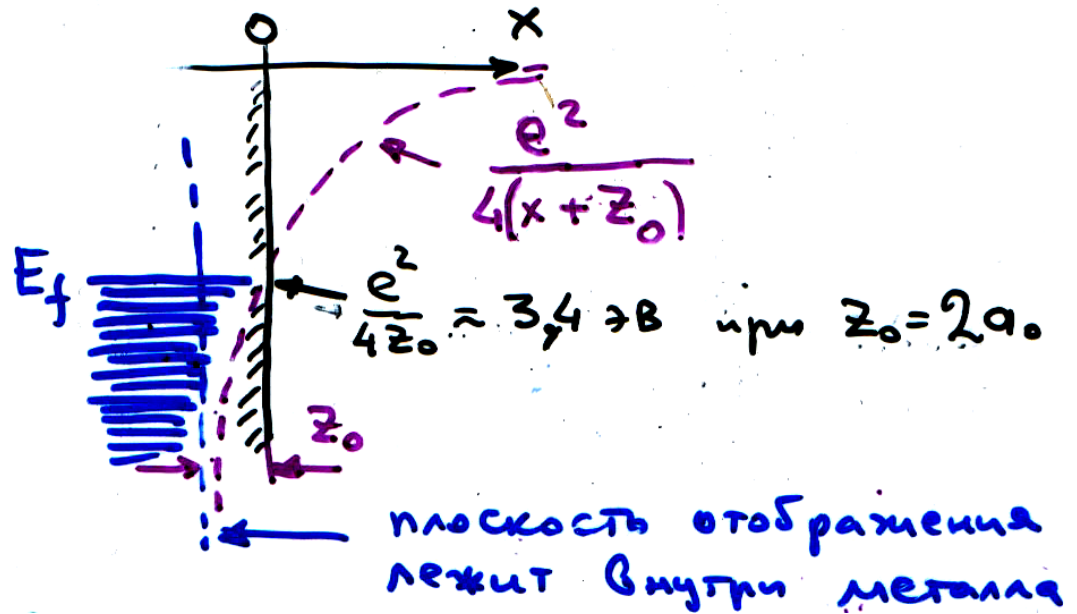
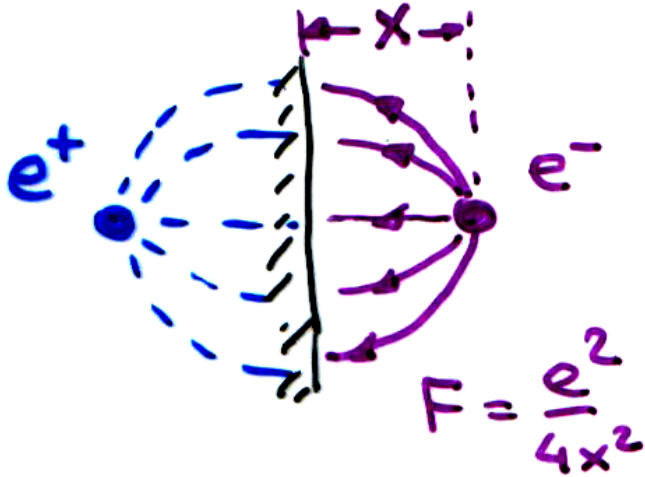
ϵ_a - энергия «дна» зоны проводимости

E_f - уровень Ферми



Потенциальный барьер для выхода электронов из металла в отсутствие электрического поля

Потенциал сил изображения



Термоэлектронная эмиссия

Распределение Ферми-Дирака: $f(W) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{W - E_f}{kT}\right)}$

Число электронов в интервале $P_x, P_x + dP_x$ (в единичном объеме)

$$dn_{P_x} = \frac{2dP_x}{h^3} \int_{-\infty}^{+\infty} f(W) \cdot dP_y \cdot dP_z$$

На 1 см^2 в сек на границу приходит:

$$dN_{P_x} = V_x \cdot dn_{P_x} = \frac{4\pi m}{h^3} kT \cdot \ln\left(1 + \exp\left(\frac{E_f - W_x}{kT}\right)\right) dW_x$$

Преодолевают барьер электроны с энергией $W_x > E_f + \varphi$

Плотность тока эмиссии

\bar{D} - прозрачность барьера

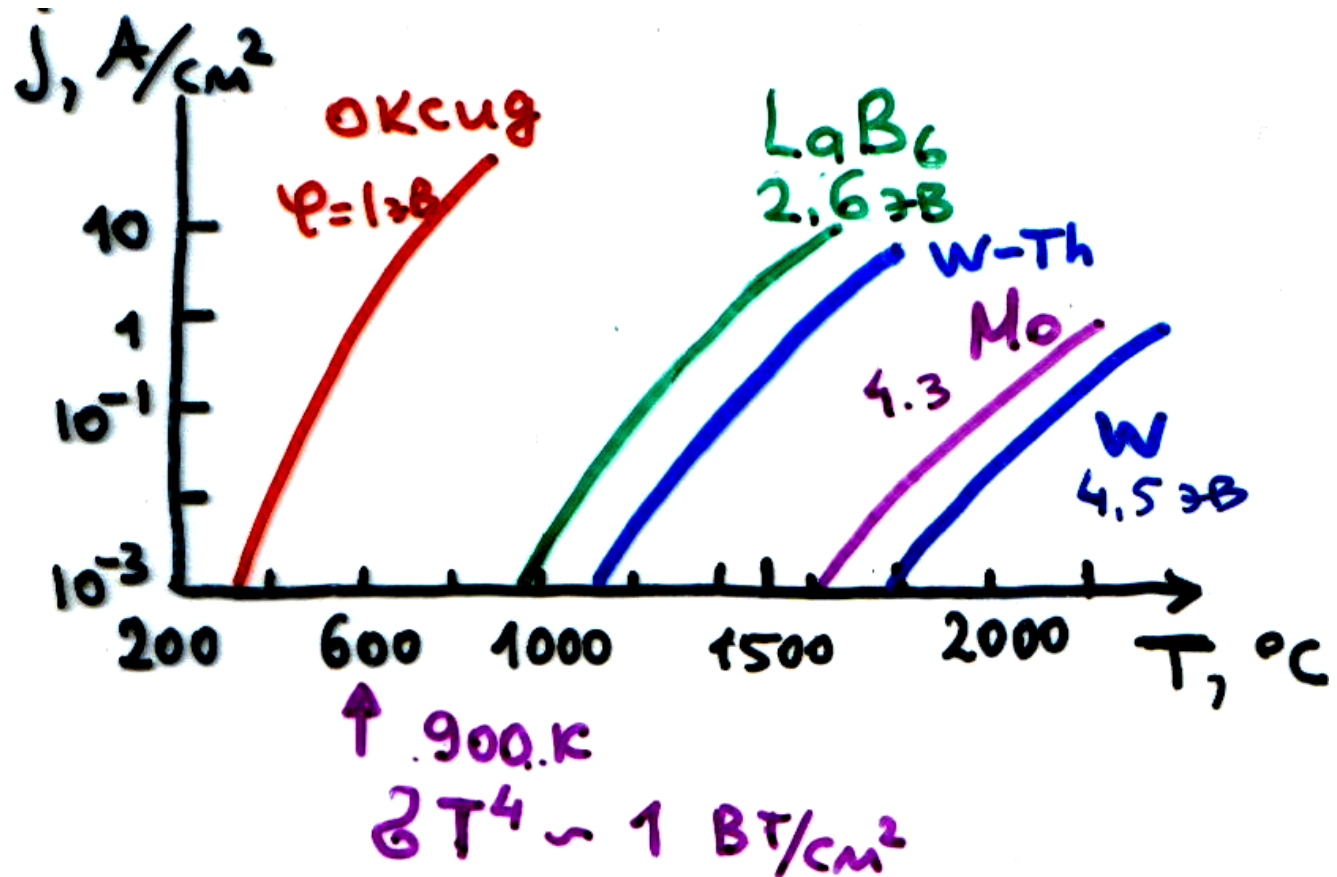
$$j = e \bar{D} \int_{\varphi + E_f}^{\infty} dN_{P_x}$$

Уравнение Ричардсона-Дэшмана: $j = A_0 \cdot \bar{D} \cdot T^2 \exp\left(-\frac{\varphi}{kT}\right)$

$$A_0 = \frac{4\pi m e k^2}{h^3} = 120 \text{ A/cm}^2\text{K}^2 \quad \text{Реально } A_0 \cdot \bar{D} \approx 10 - 3 \cdot 10^3$$

Средняя энергия эмитируемых электронов - $2kT$

Термокатоды



- Металлические
- Оксидные (оксиды бария, кальция, стронция; итрия, тория)
- Металлопористые: камерные, пропитанные, прессованные.
- Боридные – на основе металлоподобных соединений MeB_6 : (LaB_6 и т.д.)

Основные характеристики термокатодов:

- Рабочая температура
- Эмиссионная плотность тока
- Скорость испарения активного вещества

Таблица 25.5 Термоэмиссионные свойства вольфрамового термокатада [6] (чистый вольфрам, $\rho = 19,3 \text{ г/см}^3$, $e\phi = 4,54 \text{ эВ}$)

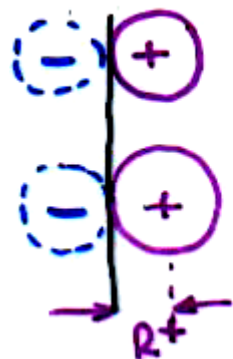
T, К	$j_{\text{э}}, \text{ А/см}^2$	$v_{\text{исп}}, \text{ г/(см}^2 \cdot \text{с)}$	$j_{\text{э}}/v_{\text{исп}}, \text{ Кл/г}$	$d_1 \text{ ч}, \text{ мм/ч}^*$	Срок службы, ч		
					$d = 0,1 \text{ мм}$	$d = 1 \text{ мм}$	массивный катод
2100	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-12}$	$2,5 \cdot 10^9$	$3,0 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$
2200	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$	$1,1 \cdot 10^9$	$2,3 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^7$
2300	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$7,8 \cdot 10^{-11}$	$5,0 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$	$2,2 \cdot 10^6$
2400	$1,2 \cdot 10^{-1}$	$4,4 \cdot 10^{-10}$	$2,7 \cdot 10^8$	$8,2 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^5$
2500	$3,0 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^8$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	830	8300	$8 \cdot 10^4$
2600	$7,0 \cdot 10^{-1}$	$8,8 \cdot 10^{-9}$	$8,0 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	180	1800	$1,8 \cdot 10^4$
2700	1,6	$3,2 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^7$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	50	500	$5 \cdot 10^3$
2800	3,5	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^{-4}$	14	140	1440
2900	7,3	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^7$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	4,6	46	460
3000	14,0	$9,7 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	1,7	17	170

Параметры гексаборида лантана (LaB_6)

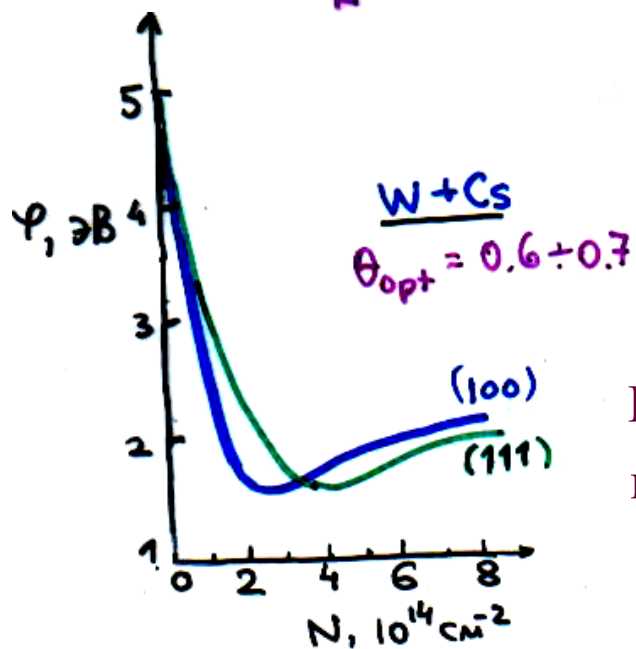
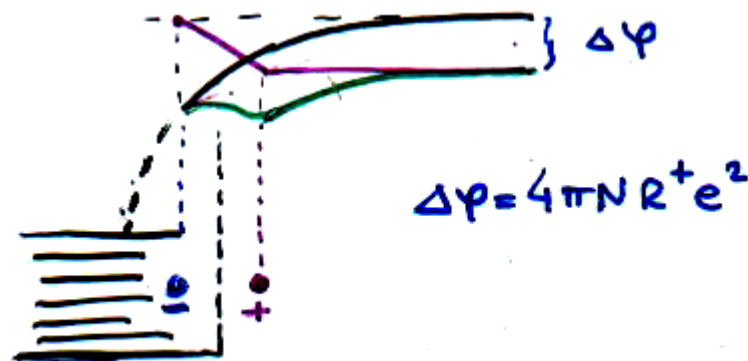
T, K	$j_{\text{э}}, \text{A/cm}^2$	$\nu_{\text{исп}}, \text{г/(см}^2 \cdot \text{с)}$	$j_{\text{э}} / \nu_{\text{исп}}, \text{Кл/г}$	Срок службы катода с косвенным подогревом, ч	
				Точечный монокристаллический, $d_{\text{кр}} \approx 3 \text{ мкм}$	Массивный, $d_{\text{кр}} \approx 100 \text{ мкм}$
1600	0,4	$1 \cdot 10^{-11}$	$4,0 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^5$
1700	1,0	$1 \cdot 10^{-10}$	$1,0 \cdot 10^{10}$	2150	$7 \cdot 10^4$
1800	3,0	$1 \cdot 10^{-9}$	$3,0 \cdot 10^9$	215	$7 \cdot 10^3$
1900	8,5	$9 \cdot 10^{-9}$	$9,5 \cdot 10^8$	25	800
2000	25	$7 \cdot 10^{-8}$	$3,6 \cdot 10^8$	3	100
2100	100	$6 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^8$	0,35	12
2200	400	$4 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^8$ ²	0,05	1,8

Пленочные катоды

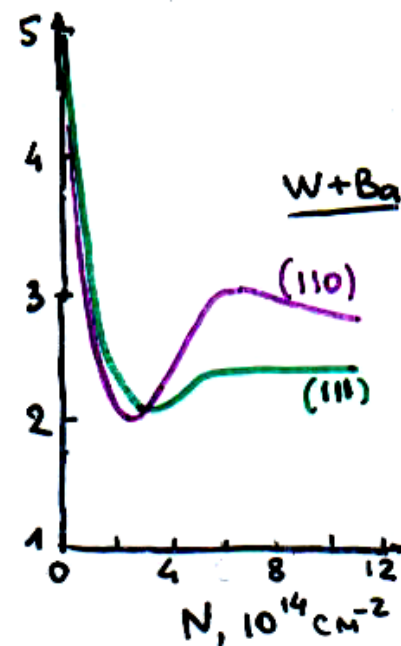
Электроположительные добавки снижают работу выхода:



Дипольный слой



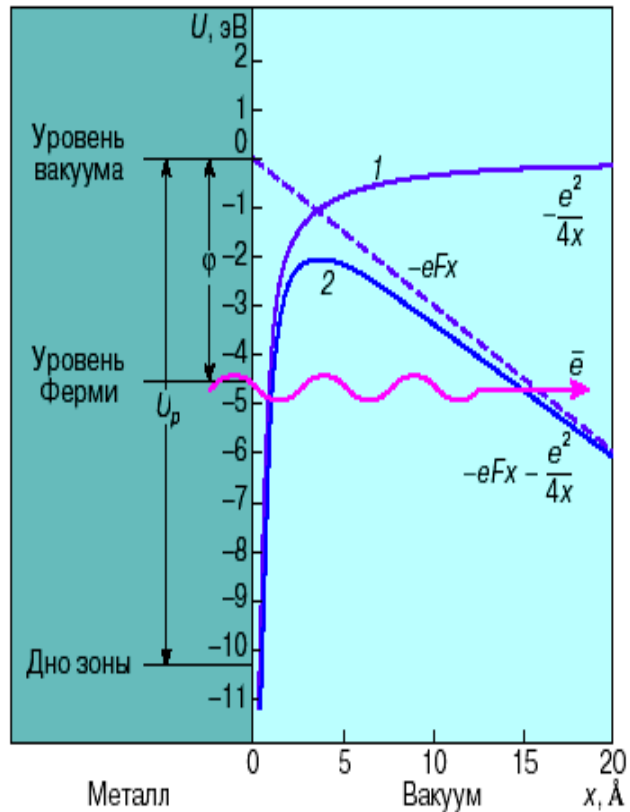
Изменение работы выхода при адсорбции Cs и Ba на поверхности W



Применения термокатодов

- для генерации плазмы
- в термоэмиссионных преобразователях (ТЭП) (приложение 1)
- в термоэмиссионных микроскопах
- в электровакуумных приборах (вакуумные и газоразрядные лампы, СВЧ приборы и т.д.)

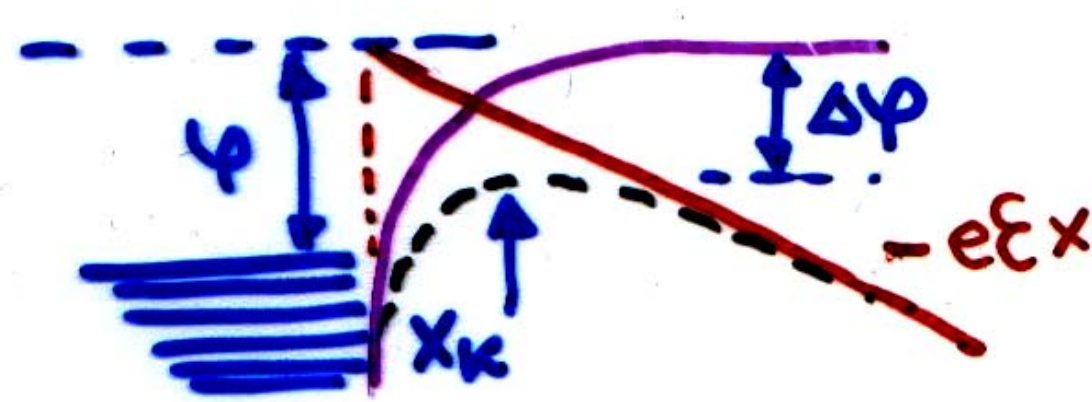
Автоэлектронная (полевая) эмиссия



Потенциальный барьер на границе металл-вакуум
в присутствии электр. поля

- 1 – потенциал сил изображения, пунктир – потенциал электр. поля
- 2 - суммарный потенциал

Понижение барьера (эффект Шоттки)



$$F = 0 \quad x_k = \frac{\sqrt{e}}{2\sqrt{E}} \quad \Delta\phi = eEx_k + \frac{e^2}{4x_k} = e\sqrt{eE}$$

$$x_k \sim 30 \cdot a_0 \quad \Delta\phi = 0,35 \text{ эВ} \quad \text{при } E=10^6 \text{ В/см}$$

Туннелирование

Плотность тока $j = e \int_0^{\infty} D(W_x, E) \cdot v(W_x) dW_x$

На 1 см² в сек на границу приходит:

$$\begin{aligned} dN_{P_x} &= v \cdot dW_x = \frac{4\pi m}{h^3} kT \ln \left(1 + \exp \frac{E_f - W_x}{kT} \right) dW_x = \\ &= \frac{4\pi m}{h^3} \cdot (E_f - W_x) dW_x \quad \text{При } T=0 \ (W_x < E_f) \end{aligned}$$

Прозрачность барьера $D = \exp \left(- \frac{4\pi \sqrt{2m}}{h} \int_{x_1}^{x_2(E)} \sqrt{U(\varphi, E_f) - W_x} dx \right)$



Диэлектрики – в отсутствие сил изображения

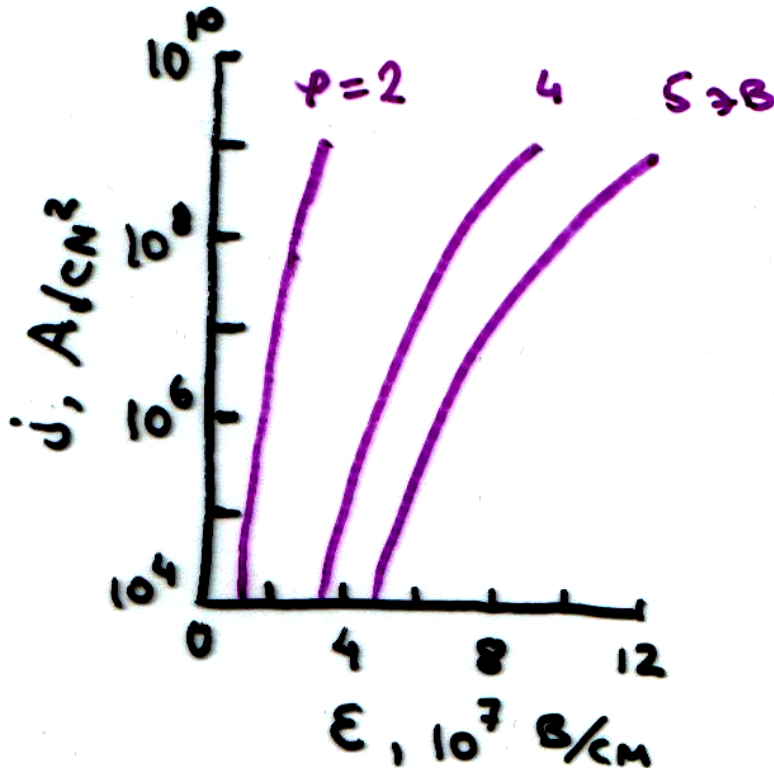
$$j_c = \frac{e^3}{2\pi\hbar} \frac{\sqrt{E_+}}{(E_+ + \varphi) \cdot \sqrt{\varphi}} \varepsilon^2 \exp\left[-\frac{32\pi^2 m}{3\hbar^2} \frac{\varphi^{3/2}}{\varepsilon}\right]$$



Металлы - есть силы изображения - формула Фаулера-Нордгейма

$$j = \underbrace{\frac{e^3}{8\pi\hbar}}_{1.5 \cdot 10^{-6}} \frac{\varepsilon^2}{\varphi \cdot t^2(y)} \exp\left[-\underbrace{\frac{8\pi\sqrt{2m}}{3\hbar e}}_{6.85 \cdot 10^7} \frac{\varphi^{3/2}}{\varepsilon} \theta(y)\right]$$

$$t^2(y) \sim 1.1; \theta(y) = 0.95 - y^2 \quad y = \frac{e\sqrt{eE}}{\varphi} = \frac{\Delta\varphi}{\varphi}$$



$\varphi = 2,0$		$\varphi = 4,5$		$\varphi = 6,3$	
$E \cdot 10^{-7}$	$\lg j$	$E \cdot 10^{-7}$	$\lg j$	$E \cdot 10^{-7}$	$\lg j$
1,0	2,98	2,0	-3,33	2,0	-12,90
1,2	4,45	3,0	1,57	4,0	-0,88
1,4	5,49	4,0	4,06	6,0	3,25
1,6	6,27	5,0	5,59	8,0	5,34
1,8	6,89	6,0	6,62	10,0	6,66
2,0	7,40	7,0	7,36	12,0	7,52

При автоэмиссии ($T=0$) напряженность поля E «эквивалентна» температуре:

$$AT^2 e^{-\varphi/kT} \rightarrow C \frac{E^2}{\varphi} e^{-\varphi^{3/2}/E}$$

Узкий энергетический спектр автоэлектронов:

полуширина энергораспределения
(при $T=0$ К)

$$\sigma = 6.7 \cdot 10^{-9} \frac{E}{\sqrt{\varphi}}$$

при $\varphi=4,4$ эВ и $E = 3-6 \cdot 10^7$ В/м

$$\sigma \sim (0.1 - 0.2) \text{ эВ}$$

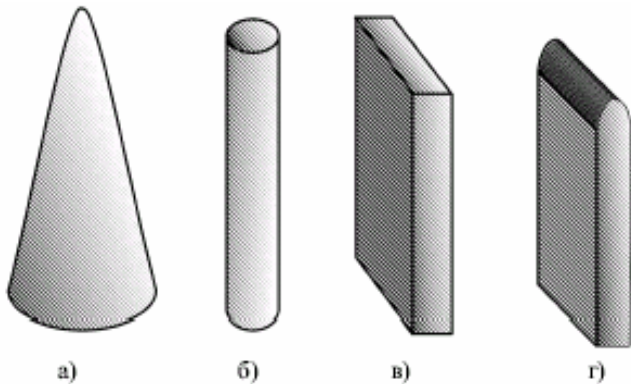
Эффект Ноттингема

Эффект Ноттингема - нагрев эмиттера при низких температурах эмиттера

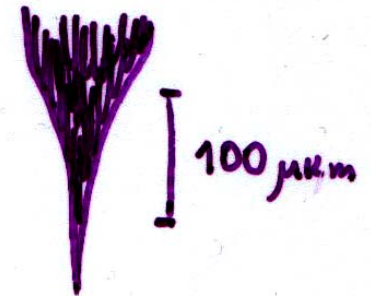
Инверсия эффекта Ноттингема - охлаждение эмиттера при высоких температурах эмиттера

Автоэлектронные эмиттеры

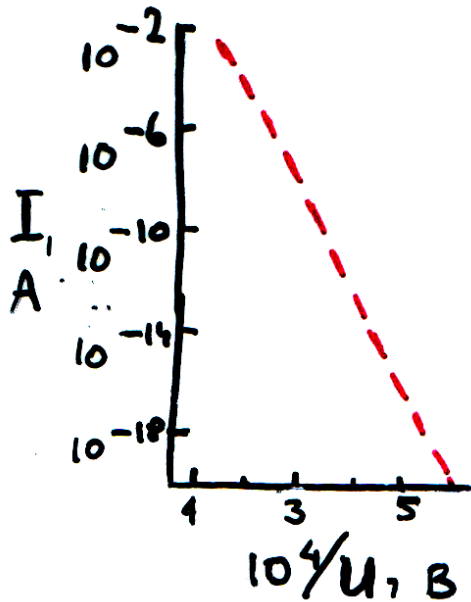
Поверхности с большой кривизной: острия, лезвия и т. п.



$$V = -10-30 \text{ кВ}$$



$$E = \begin{cases} U/r \\ \frac{U}{r \ln R/r} \end{cases}$$



$$\left. \begin{aligned} r = 1 \text{ мкм} = 10^{-4} \text{ см} &\rightarrow U \sim 10 \text{ кВ} \\ r = 0.01 = 10^{-6} \text{ см} &\rightarrow U \sim 10^2 \text{ В} \end{aligned} \right\} E = 10^8 \frac{\text{В}}{\text{см}}$$

Максимальные плотности тока

Условия	$j_{\text{record}}, \text{A/cm}^2$
$\tau \approx 10^{-9} \text{ с}$	До 10^9
Глубокое охлаждение (4,2 К), $\tau = 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$	$2 \cdot 10^9$
Локализация (W + ZrO), $\tau = 2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$	$5 \cdot 10^9$
Субмикроострие ($r = 10^{-7} \text{ см}$), стационарный отбор тока	$10^9 - 10^{10}$
Нанометровое острие ($r = 10^{-7} \text{ см}$), $\tau = 10^{-4} \text{ с}$	$10^{10} - 10^{11}$

Теоретически

(при $D=1$, $T=0$ и $E_f = 5 \text{ эВ}$)

$$j = \frac{\pi \cdot e m E_F^2}{h^3} \approx 4.3 \cdot 10^9 E_F^2 \approx 10^{11} \text{ A/cm}^2$$

Достоинства автокатодов:

1. Отсутствие накала
2. Высокая плотность тока эмиссии (до 10^9 А/см²)
3. Узкий энергетический спектр электронов
4. Малые габариты
5. Большая крутизна $j(V)$
6. Мгновенность действия

Применение автокатодов:

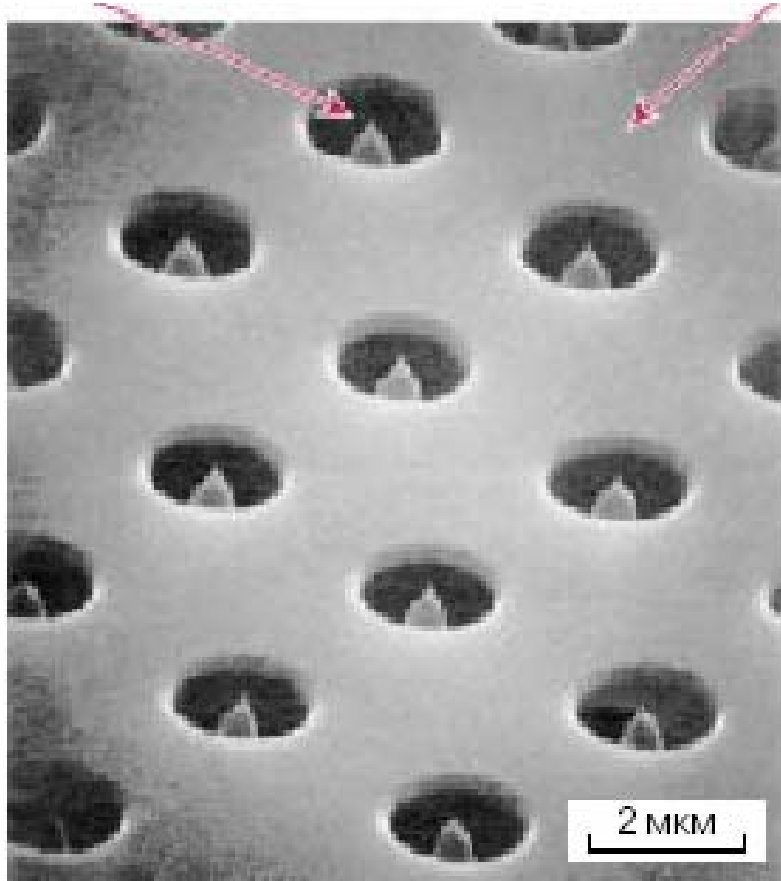
- Матричные эмиттеры, плазменные дисплеи
- Автоэлектронная микроскопия

Матричные эмиттеры



эмиттер

анод

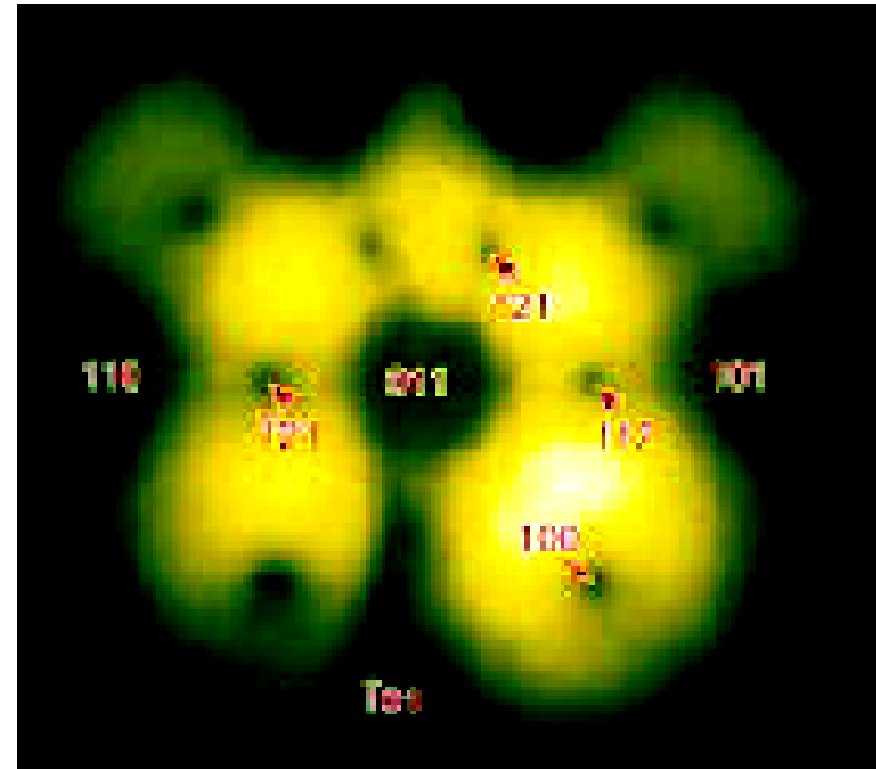
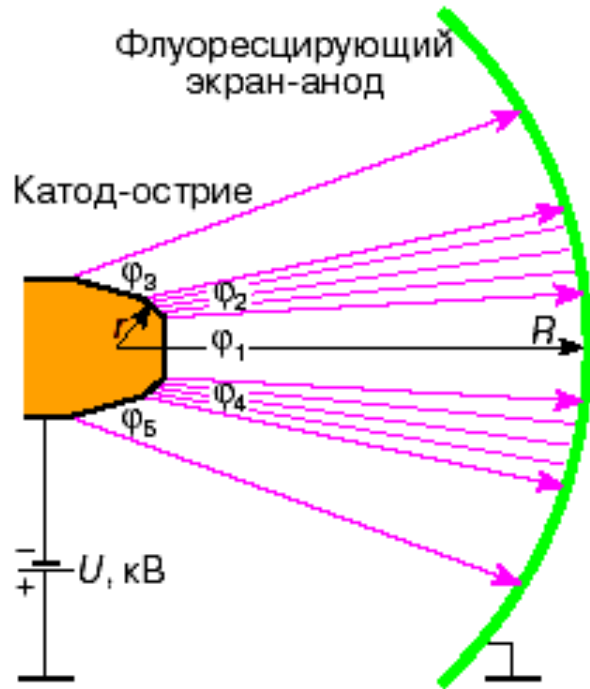


$$U=10^2 \text{ В}, j=1 \text{ А/см}^2$$

$$\text{Зазор} \sim 10^{-4} \text{ см}$$

Нет ионного распыления острия

АВТОЭМИССИОННЫЙ ПРОЕКТОР



увеличение $\beta = \frac{R}{r} \sim \frac{10 \text{ см}}{10^{-6} \text{ см}} = 10^7$

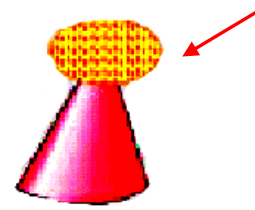
разрешающая способность

$$\delta \sim (20 \div 30) \text{ \AA}$$

изображение W острия
(темные пятна – высокая работа выхода)

Взрывная эмиссия

При взрывном разогреве острия образуется прикатодная плазма (при $>10^9$ А/см²)

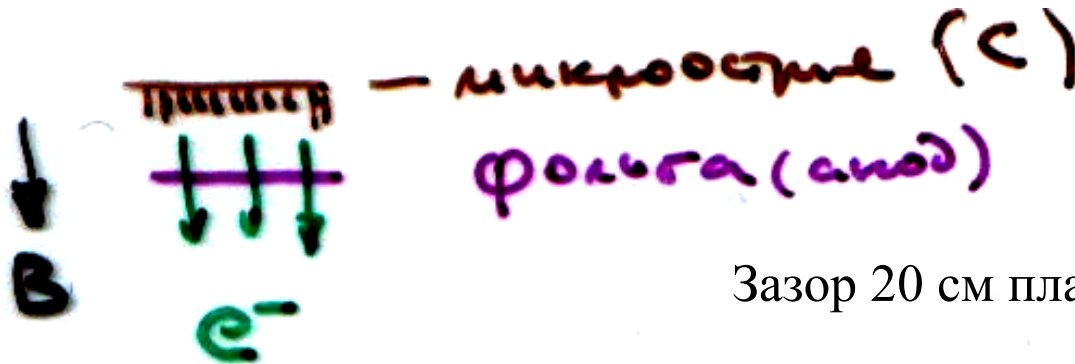


Плазменный факел

Начальная плотность $10^{19} - 10^{20}$ см⁻³, $T_e = 4-5$ эВ
по мере расширения плазмы T_e падает до 1-2 эВ

Скорость плазмы $V = (1-2) \times 10^6$ см/с

Взрывные эмиттеры



Зазор 20 см плазма закорачивает за 10 мкс

$U = 10^5 - 10^6$ В, $t = 5 - 10$ мкс, $I_e = 10^6$ А

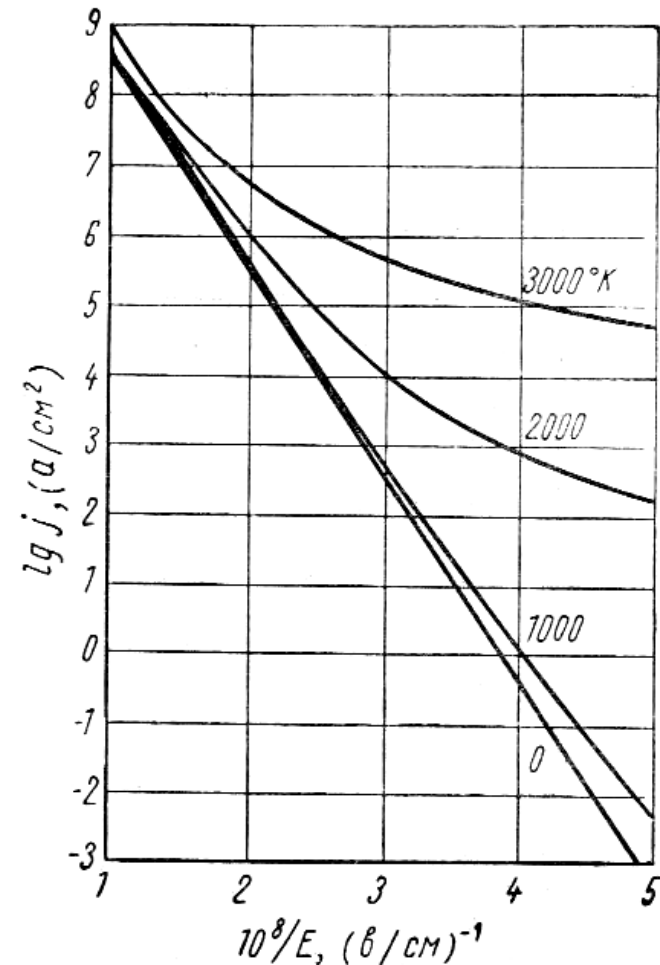
Однородность эмиссии: $B = 0.1 - 1$ Т

Термоавтоэлектронная эмиссия

Дополнительное (к термоэмиссии) туннелирование

Уравнение Ричардсона-Шоттки

$$j \text{ [A/m}^2\text{]} = A_0 T^2 \exp\left[-\frac{1.16 \cdot 10^4}{T} (\phi - 3.79 \cdot 10^{-5} \sqrt{E})\right]$$



Зависимость эмиссионного тока от напряженности электрического поля при различных температурах ($\phi = 4.5$ эВ)

Экзоэлектронная эмиссия

Нестационарная эмиссия вследствие возбуждения:
при механической обработке, облучении, физ-хим. процессы

Ток ЭЭЭ 10^{-16} - 10^{-19} А

Энергия экзоэлектронов: доли эВ – эВ

Максвелловский спектр смещён в область более
высоких энергий

ЭЭЭ после возбуждения быстро затухает $n_e \sim 1/t$

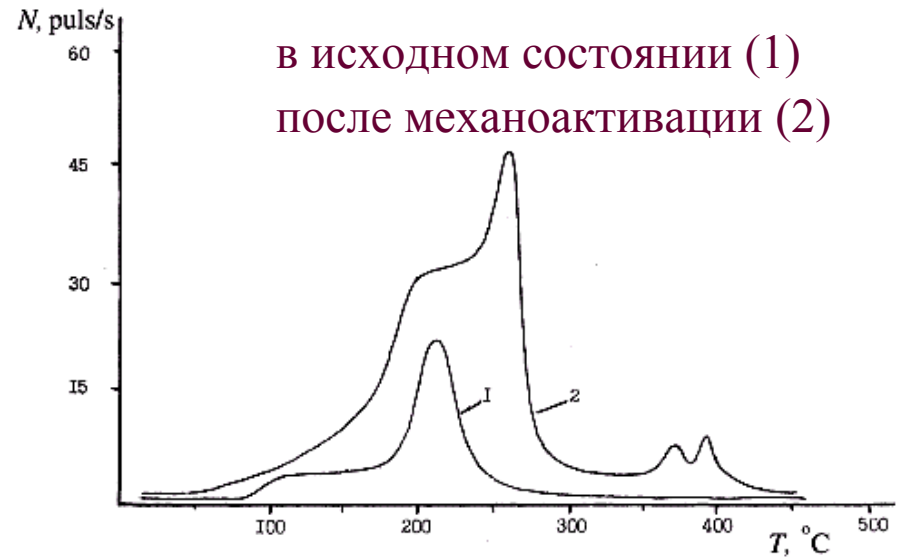
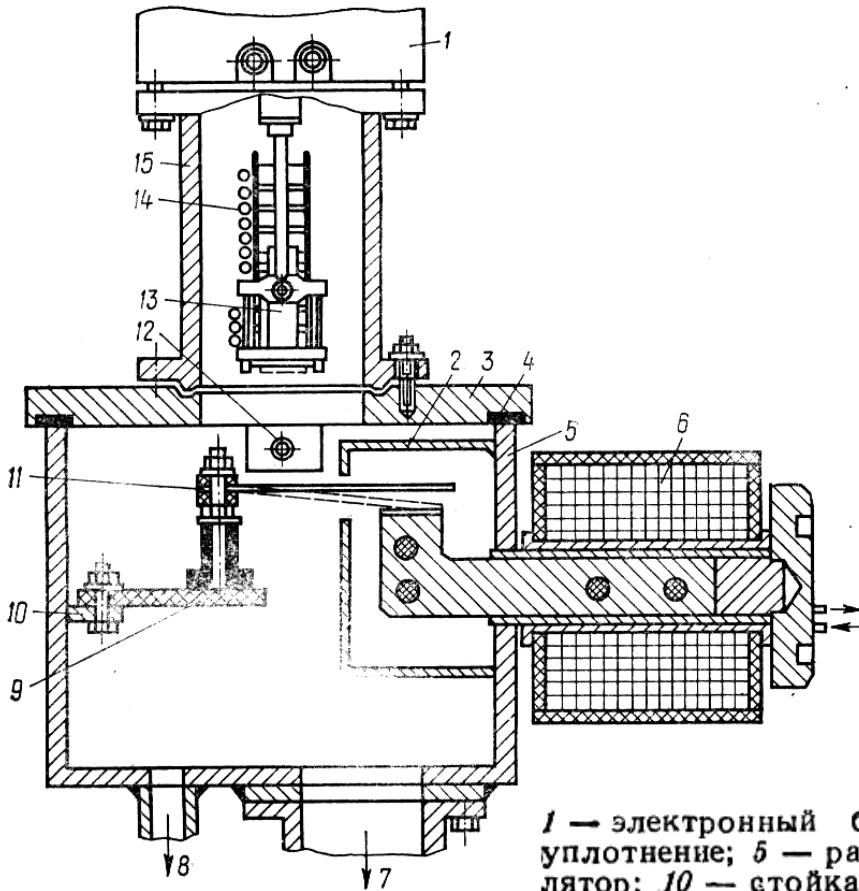
Виды ЭЭЭ

- Фотостимулированная ЭЭЭ
- Термостимулированная ЭЭЭ
- «темновая» ЭЭЭ

Экзоэлектронная спектроскопия

Неразрушающий контроль

Трение, износ, усталостное разрушение, коррозия, радиационные разрушения, структурные и фазовые превращения



в исходном состоянии (1)
после механоактивации (2)

Спектр термостимулированной ЭЭЭ

Установка для измерения ЭЭЭ в
процессе усталостных нагрузений

1 — электронный блок; 2 — экран вибратора; 3 — крышка; 4 — вакуумное уплотнение; 5 — рабочая камера; 6 — электромагнит; 7, 8 — откачка; 9 — изолятор; 10 — стойка держателя образца; 11 — головка держателя; 12 — осветитель; 13 — ВЭУ; 14 — делитель; 15 — металлический экран.