

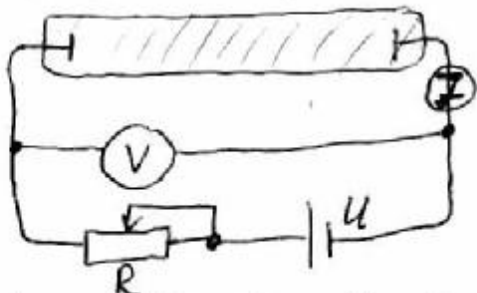
6.11.12. Електричні виміри в газах

Фізика газового розряду:

- Процес проходження струму в газах
  - Проблема відновності газів
  - Повернення іонізованих газів у алектричних та електро-магнітних полях (технічні застосування виміра)
- Газ стає провідним лише при певних ситуаціях.  
Газовий розряд у постійному електричному полі

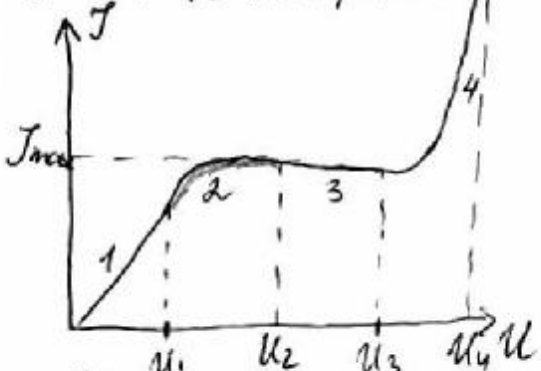
Газорозрядна трубка

$r = 1 \text{ см}$   
 $l = 10 \div 100 \text{ см} \quad (r \ll l)$



U	J
10 В	$10^{-15} \text{ А}$
$> U_1$	↑
$> U_2$	$J = \text{const}$
$> U_3$	↑↑

$P = 1-10 \text{ мм рт.ст.}$



Зовнішні фактори призводять до збільшення к-сті іонізованих молекул (радіаційне випромінювання)  
 $n = 10^3 \text{ на см}^3$  - к-сть іонізованих молекул

мінімальна заледеність

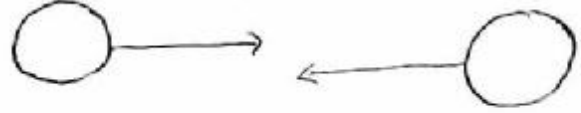
Розрядателю електрони, іони, тому при подальшому збільшенні напруги  $\Rightarrow$  струми заледенітиме келітнісно  
 Для перевірки беремо зовнішній джерело (лампу), спостерігаємо зміну напрямку поправки ( $U_3, U_2$ )

Струм - це заряд, що пройшов через поперечний переріз провідника за  $t$  часу. Крива за час  $10^{-7} - 10^{-3} \text{ см}$  цей процес за постійної напруги, вийде в режим, як ідею не поспридне він негативне змерено газлинок  $\Rightarrow$  розряд самостійним (створив сам умови, що може сам себе підтримувати)

$U_4 = U_{прод.} \quad \frac{10^{-7} \div 10^{-3} \text{ е}}{10^{-6} \div 10^{-1} \text{ А} \cdot \text{см}}$

Кінетична теорія газів (описує ці процеси)

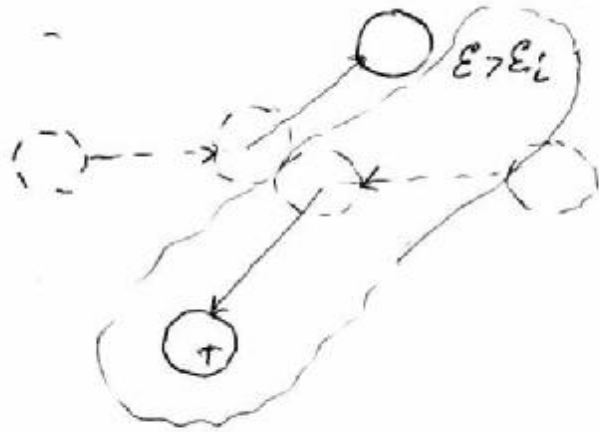
Молекула розрив. як шари, що не має внутр. будови і рухаються в певній поєднанні. Взяті молекули лише у випадку змінено.



Енергія системи:  $E_c = E_1 + E_2$

$m_j$  - маса;  $V_j$  швидкість

$E_c = \sum_{i=1} E_i$   
 $E_j = E_k^{(j)} = \frac{m_j V_j^2}{2}$

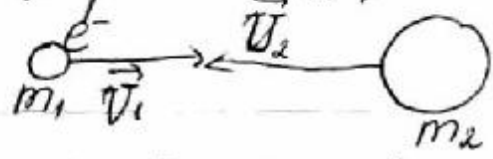


Елементарні процеси

- зіткнення електронів з нейтральними молекулами
- зіткнення нейтральних молекул
- взаємодія фотона і нейтральних молекул
- Рекомбінація електрона і позитивного іона
- Рекомбінація негативного і позитивного іонів

- Вторинна елементарна емісія з поверхні твердого тіла (може бути зворотним процесом електронів)
  - Радіація на поверхні твердого тіла
  - Нейтралізація іонів на поверхні твердого тіла
  - Іонізація молекул на поверхні тв. тіла
  - Терміоелементарна емісія з пов. тв. тіла
  - Автоелектронна емісія з пов. тв. тіла
- Зіткнення електронів з нейтральними молекулами

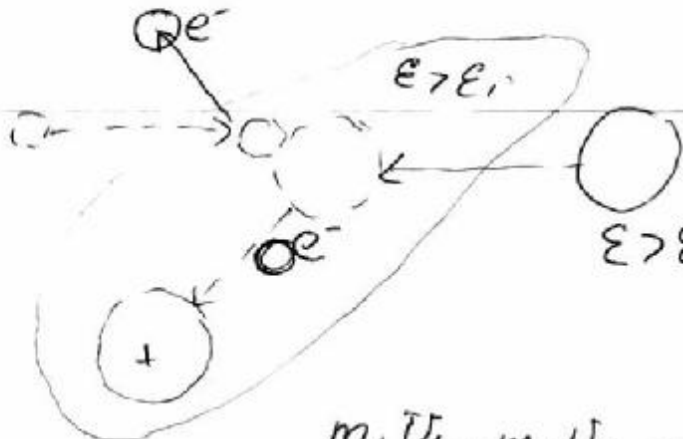
Центральний удар



$\vec{v}_1, \vec{v}_2$  - швидкості  
 $\vec{v}_1', \vec{v}_2'$  - швидкості після взаємодії

ЗЗТ:  $\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_1' + \vec{p}_2'$

ЗЗЕ:  $E_1 + E_2 = E_1' + E_2'$



$$m_1 v_1 - m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2'$$

$$\frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2}$$

Випарки:  $v_2 = 0$ .  $(D/3)!!!$  Довести, що взаємодія електрона і молекули є вадомою рухомою нерухомою частинкою. Це припущення не порушує нашу задачу.

Можна отримати:

Сувідношення мас:  $\frac{m_1}{m_2} \ll 1 \Rightarrow \frac{\epsilon_1'}{\epsilon_1} \approx 1$

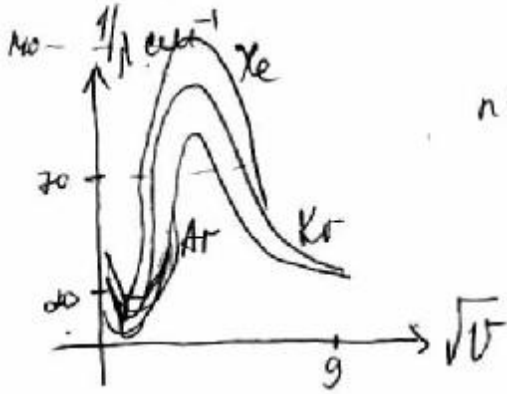
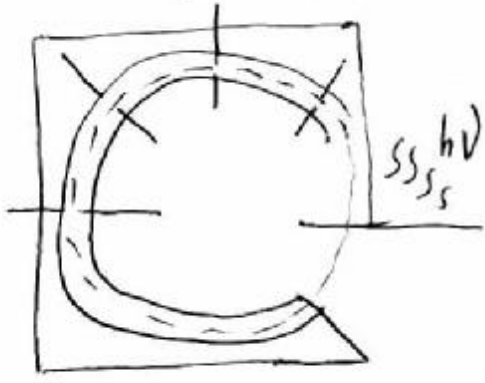
$\frac{\epsilon_1'}{\epsilon_1} = \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}$

$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$

$m_2(\text{min}) = m_{\text{H}} \ominus$

$\ominus 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$

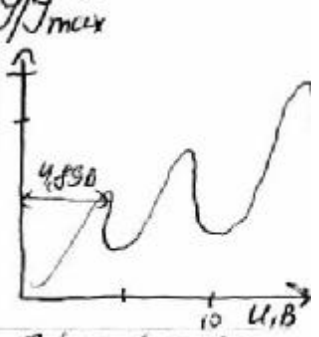
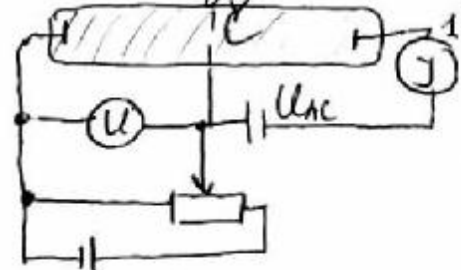
$\frac{m_{\text{H}}}{m_e} = 1836 \text{ разів}$



$n\sigma = \frac{1}{2}$  - ефективний переті.

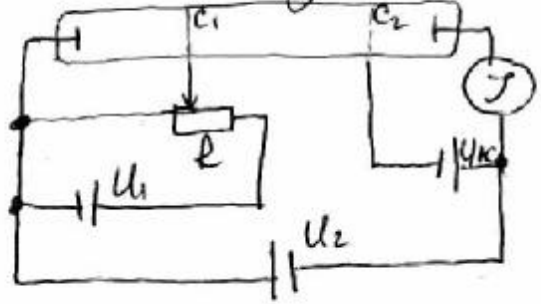
1 - фотокатод  
 2 - сітка, до якої прикл. постійна різниця потенціалів  
 Зміною жорсткості магнітного поля, змінював енергію електронів. Вимірював струм, який вимикав на електроді та торці трубки. Змовірність розсієння - ~~на~~ співвідношення струмів в розсієних електронів до сукупного струму.

При дуже малих енергіях, електрони практично не взаємодіють з молекулами газу.

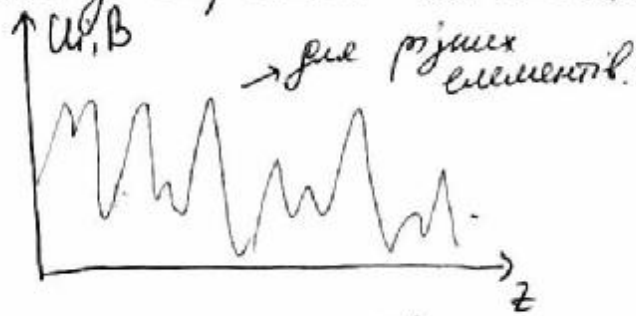


Дослід Фреша-Герца:  
 Використовував пари ртуті.

Збудження та іонізація в певний момент струм різко зростає, тього частинки втрачають енергію, зуминюються. Коли ж мову електронів розраховує, втрачають бар'єр, струм зростає і так далі... зростає різниця між потенціалами електродів - до 4,83 В



Лише модифікувати схему:  
 C2 - захорона сітка для повернення вільних електронів.

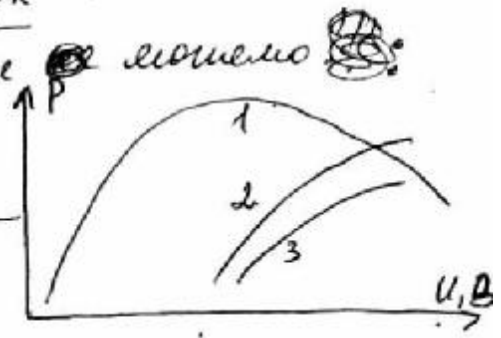


Зміщення іонів нейтральних молекул

Не те саме, що і в попередньому, але ми можемо

$V_2 \neq 0$ .  $m_1 \approx m_2$ ;  $\frac{E_1 - E_1'}{E_1} = \frac{4m_1 m_2}{(m_2 + m_1)^2}$   
 $\frac{m_1}{m_2} \Rightarrow 1 \Rightarrow \frac{\Delta E}{E_1} \approx 1 \Rightarrow E_1 = 2 E_1'$

- 1. e-Ne
- 2. Ne-Ne
- 3. Ne<sup>+</sup>-Ne



$$Z = \frac{4\pi V^2}{\lambda^3} \left( \frac{m}{4\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mV^2}{4kT}\right) V^3 dV$$

↑  
 integrals over just  
 6 independent big 5 + dV

$$Z_i = \int_{v_{up}}^{\infty} dZ ; \frac{m v_{up}^2}{2} = 2 \epsilon_i \Rightarrow \text{rigid rotator, oscillator}$$

$$\int x^n \exp(ax) dx = \frac{x^n \exp(ax)}{a} - \frac{n}{a} \int x^{n-1} \exp(ax) dx$$

$$\Rightarrow Z_i = P_i \cdot \frac{h}{\lambda} \sqrt{\frac{2\pi kT}{m}} \exp\left(-\frac{eV_i}{kT}\right) \left(\frac{eV_i}{kT} + 1\right)$$

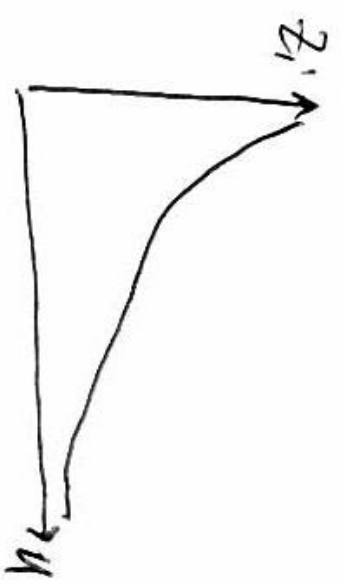
↑  
 P<sub>i</sub> < 1  
 v-cut  
 → integrals  
 working & quantum  
 20g.

Thomas, 'early' Cs = 3,5B.

T<sub>i</sub> (Cs) = 3000 K

T<sub>i</sub> (He) ≈ 10000 K

Z<sub>i</sub> ~ 1/√T  
 Z<sub>i</sub> ~ exp(-U)



$$\lambda_B = h/p$$

$$P_i = \frac{e^{-\epsilon_i}}{Z_i}$$

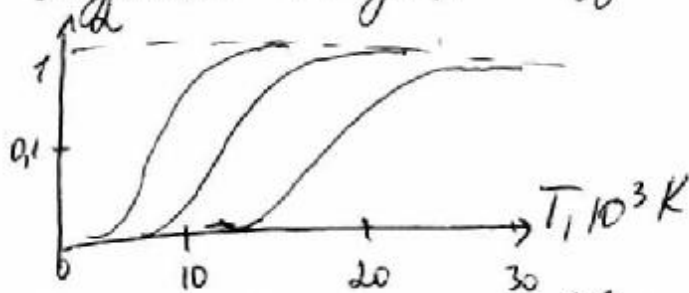
13.11.12 Ступінь іонізації газу.

$$\alpha = \frac{n_e}{n_i + n_n}, \quad n = n_n + n_i + n_e = n_n + 2n_i$$

$$\frac{\alpha}{1-\alpha^2} \sim \frac{kT}{P} \left( \frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp(-\epsilon_i/kT) \Rightarrow$$

$$\alpha \sim \frac{(kT)^{5/4}}{\sqrt{P}} \left( \frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/4} \exp(-\epsilon_i/kT)$$

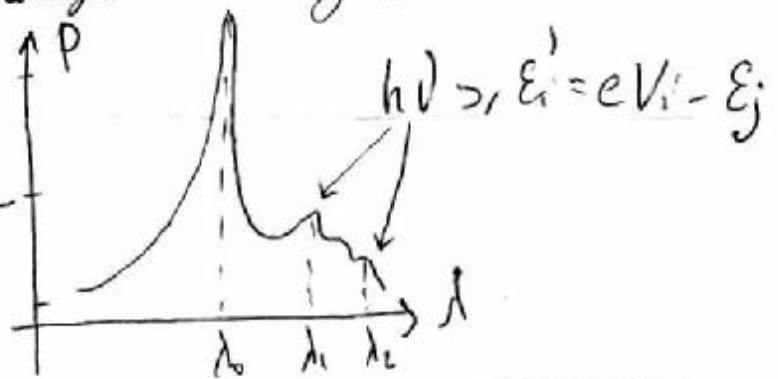
Ступінь іонізації газу:



Фотоіонізація газу. (взаємодія фотона з нейтр. атомом),  
 $h\nu \geq \epsilon_i = eV_i$ ,  $V_i$  - потенціал іонізації.

$$\lambda = c/\nu, \quad \lambda_0 = \frac{ch}{eV_i}$$

$N_i \sim J$  - кількість фотонів  
 $\sim$  інтенсивн. світла.



Електронна іонізація

$E > \epsilon_e + \epsilon_c$  - енергія збудження (іонізації)  
 атом + пружини.

$e + M \rightarrow J^-$  - негативно зар. іон

$$P_i = f(E_e, M)$$

$\hookrightarrow$  імовірність процесу

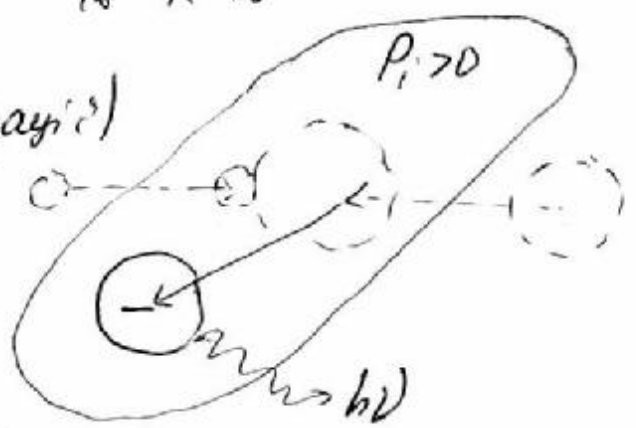
$$E = \epsilon_e + \epsilon_c = h\nu$$

енергія електрона  
 кінет. енергія електрона

$$\epsilon_c = f(M)$$

$P_i = f(\epsilon_e, \epsilon_c)$  - імовірність отримання негативно зарядженого іона

Електронна іонізація - взаємодія електр. і атомів нейтральних молекул  
 захоплювати електр. і отримувати негативно зар. іон



M	O	F	Cl	H
$\epsilon_{c, eB}$	1,46	4,12	382	0,15

хоча не змінився заряд, але змінилася маса іонів  $\Rightarrow$   
випушені злітки рухливості

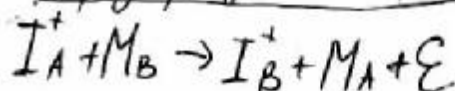
$\Delta q = 0, \Delta m \neq 0, \Delta \mu > 0$

$P = 1 \text{ атм}$

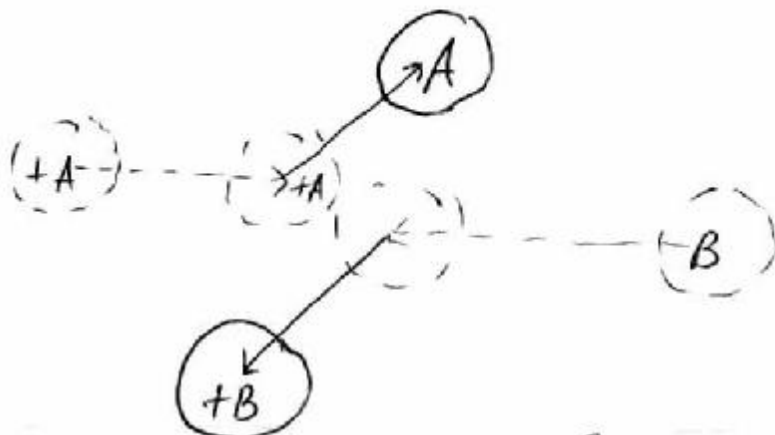
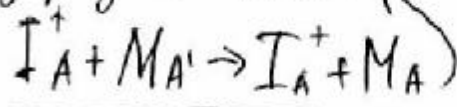
$10^{\circ}\text{C}^{-1} \ll 10^5\text{C}^{-1}$

$\downarrow$   
кількість іонів залишається  
 $\Rightarrow$  приводять до певної частини іонів.

Перезарядка іонів



$E \rightarrow$  реакція перезарядки іонів



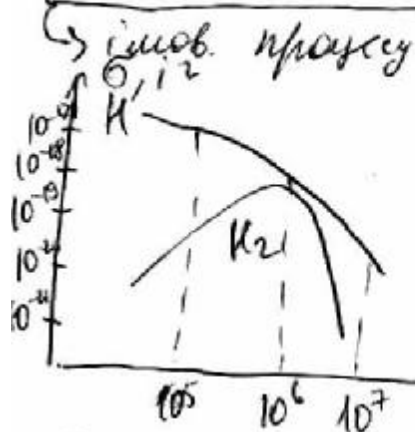
$P = f(\epsilon) \sim \frac{d\epsilon}{h V_{AB}}$

$V_{AB}$  - потенціал швидкого зближення іонів

$d$  - коеф. узаємодії іонів

$\Gamma_B \approx 0,5 \text{ А}$   
 $\sigma \approx 10^{-24} \text{ м}^2$

$\rightarrow$  густина струму ватт/м<sup>2</sup>

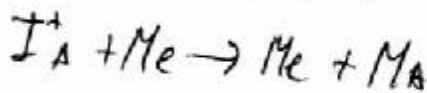


$V_{AB}, \text{ в/с}$  Це відбувається за рахунок тунелювання, основний механізм перезарядки іонів

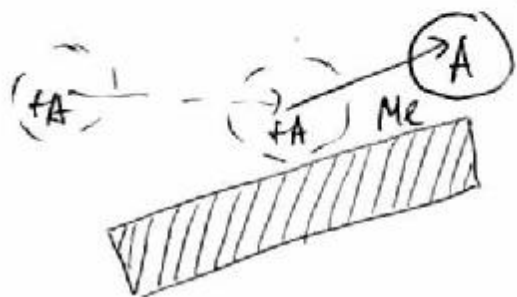
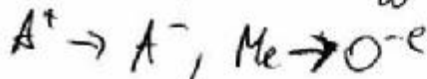
Тисяч:  $\Delta q = 0, \Delta m \neq 0, \Delta \mu \neq 0, \Delta T > 0$

До вільності:  $V_A \sim T, V_{A^+} \sim E$ -ен. поле

Після вільності:  $V_{A^+} = V_A, V_A = V_{A^+} \Rightarrow T \uparrow$

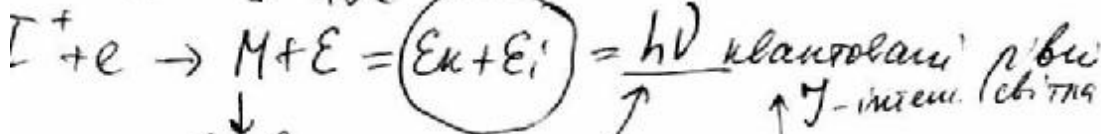
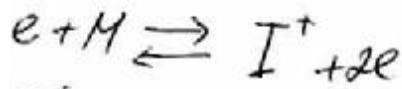


$\epsilon_c > \epsilon_w$  - робота виходу металу,  $\circ$



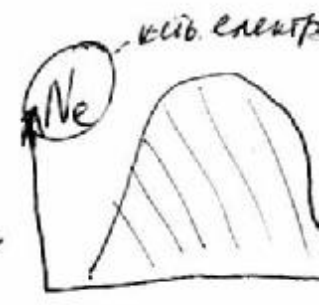
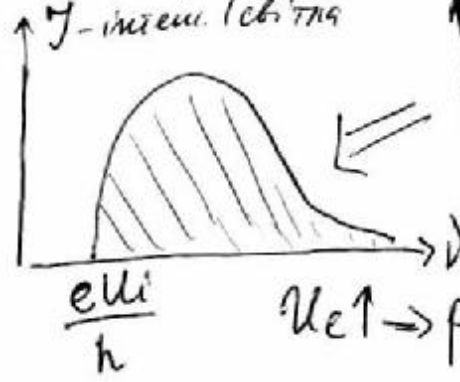
11.12 Ренолдianape

$(\sigma_e \gg \sigma_i)$



*дуплика*

$h\nu = \frac{mev^2}{2} + e(U_i - U_j\delta)$



Убывание = f(n)

$n_+ = n_-$  *концентр. зарядов равна*

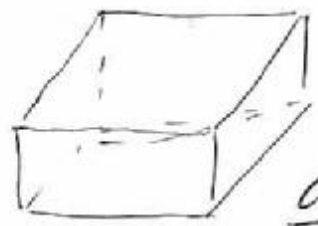
$\frac{dn_+}{dt} = \frac{dn_-}{dt} = -kn_+n_- = -kn^2$

$\frac{dn}{dt} = -kn^2 \Rightarrow \frac{dn}{n^2} = -k dt ; \int \frac{dn}{n^2} = -k \int dt \Rightarrow$

$n = \frac{n_0}{1 + kn_0 t}$  *n<sub>0</sub> - концентрация в момент t=0 (n<sub>0</sub> = n(t=0))*

$\tau = \frac{1}{k} \left( \frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right)$  *τ - промежуток t<sub>1</sub> ↔ t<sub>2</sub>*

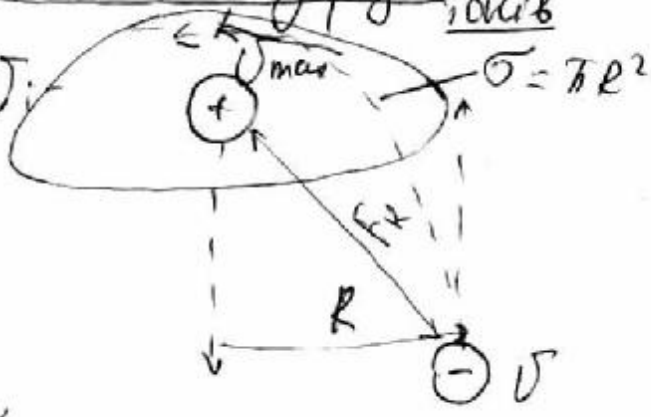
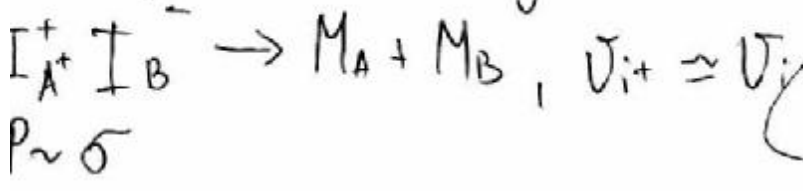
ε элемент объема



$n=0, t=0$   
*n' - постоянство гурена ионизации (убывание гурена концентрации?)*  
 $\frac{dn}{dt} = n' - kn^2$  [рiвновiсiя] =  $\frac{dn}{dt} = 0, n' = kn^2$

Для поверхности земли:  $n = 10^3 \text{ см}^{-3}$ ,  $k_{\text{воздуха}} = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3/\text{с}$  ( $10^3 \cdot 10^3$ )  
 $n' = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3/\text{с} = 1.6 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{см}^3 \cdot \text{с}} = 1.6 \cdot \frac{1}{\text{см}^3 \cdot \text{с}} \approx 2 \frac{1}{\text{см}^3 \cdot \text{с}}$

11.12 Рендінація позитивно і негативно заряджених іонів



Заміємо закон збереження:

$E_i = \frac{m_i U_i^2}{2} \sim \frac{3}{2} kT$

$E_k = k_k \frac{e^2}{r}$   $k_k$  - константа Кулона

Оскільки  $E_i \ll E_k$ , то  $E_i$  - нехтуємо. Отримуємо:

$m_i U_{max}^2 = m_i U^2 R$  → закон збереження енергій і імпульсів

$\sigma = \pi R^2 \Rightarrow E_k = \frac{m_i U_{max}^2}{2}$

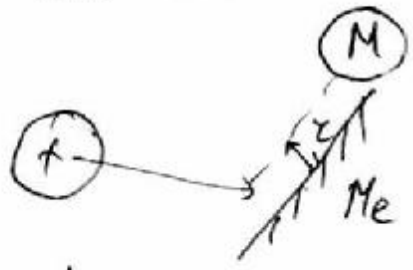
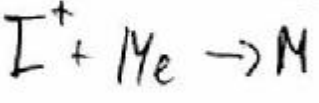
$\sigma = \frac{\pi k_k e^2 z}{2 \epsilon} = \frac{\pi k_k e^2 z}{3 kT}$

$D^+ + I_B^-$	$1,1 \cdot 10^{13} \text{ м}^3/\text{с}^2$
$T^+ + H^-$	3,9
$O^+ + O^-$	2,7
$N^+ + N^-$	2,6
$O_2^+ + O_2^-$	4,2

$k_k$  - стала Кулона  
 $k$  - стала Больцмана

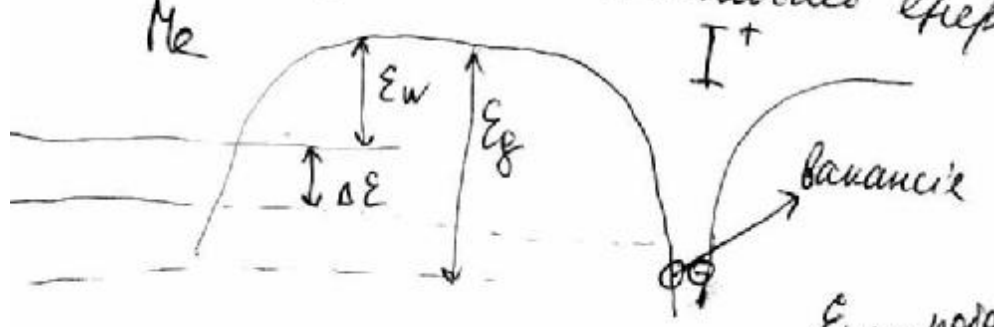
$\textcircled{D/3}$  !!! Отримавши, що  $k_{i-} > k_{e-}$   
 Пояснити, що коэф. рекомб.  
 $k_{i-} > k_{e-}$ . Довести.

Рендінація на поверхні



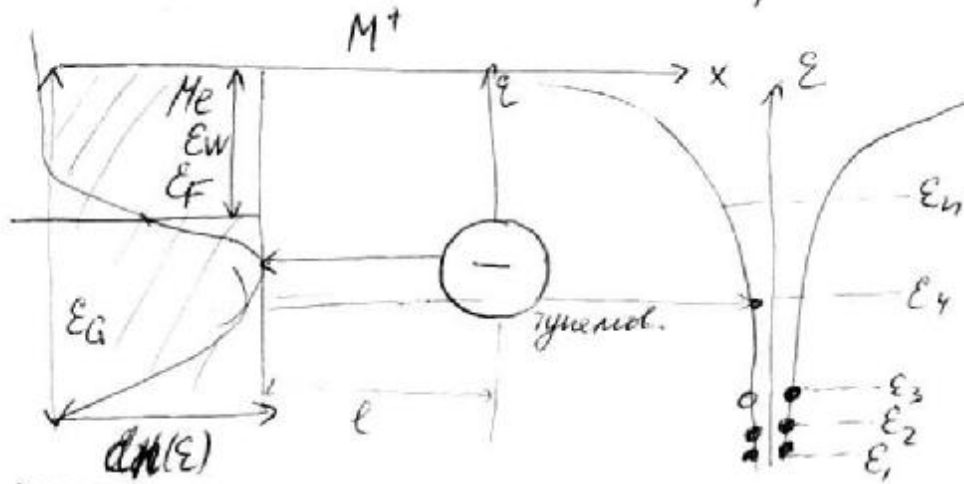
$z$  - тунелювання (мін. відстань між іоном і поверхнею метала, щоб відбулося тунелювання)

Намало енергетичну дисперсію іона!



$eU_i - \epsilon_w + \Delta \epsilon = \epsilon$   
 $E_i$   
 $\epsilon_w$  - робота виходу  
 $h\nu$





$\epsilon = \epsilon_i - (E_W + \Delta\epsilon)$  → энергия, она увеличивается

$\epsilon_i$  - энергия ионизации?  
 $E_W$  - работа выхода

$\epsilon > 0$  - возбуждена ионизация

$\epsilon > E_W \Leftrightarrow \epsilon_i - (E_W + \Delta\epsilon) > E_W$

$\epsilon_i > 2E_W \Rightarrow$  электронная эмиссия

Рух заряженных частинок т.д. в е.о. электрического поля

$E=0$

$\vec{z} = f(t)$  (рух хаотичний)  $\vec{z}_1(t)$   $\vec{z}_2(t)$



, тож  $W(\vec{z}(t)) = W(\vec{z}, t)$

лишь появл. поле ( $E \neq 0$ ), дрейф

взрост силевок ліній електричного поля.

$V_x$  - сер. хаотична швидкість руху част.

$\lambda$  - сер. довжина вільного пробігу. (відстань між зтолками, де частинки зустріли в'язальні?)

$t$  - сер. час між зіткненням.

Впливним поле: по дрейфової швидкості:  $V_D = \frac{1}{2} V(\vec{E}, t)$

$V(\vec{E}, t)$  - сер. швидкість частинки ліній площі зіткненнями.

Вони з напруженістю  $E$  за час  $t$ .

$\frac{qEt}{m} = \frac{qE}{m} \frac{\lambda}{v} \rightarrow$  закон руху  $\frac{\lambda}{v}$  - сер. час пробігу  $y = t$

Відобразивши:  $\Rightarrow \mu = \frac{qE\lambda}{2mV}$   $V = \int \mu E$ ,  $\mu$  - рухливість ліній швидкості руху; напруженість,

11.12  $\mu = \frac{q\lambda}{2mV}$  → рухливост,  $V$  - ср. швидкість хаотичного (теплого)

але тут треба враховувати висок дрейфової швидкості. Це використати коли  $V_D < V$ .

1/3) Коли наступає малий момент, коли не можна користуватися цією формулою (сильно відхилене поле, нештрафу або лише проті поле, або лише температура)

є дані відносимість до однієї газу:

$I = V_D E e$  - робота прихорення частинки.

$\frac{1}{I} = \frac{V}{\lambda} \Rightarrow \eta = \frac{E_1 - E_1'}{E_1}$   $E_1$  - енергія до взаємодії,  $E_1'$  - після взаємодії

- кількість ударів за однією газу

$\nu_{взаєм} = \eta \cdot \frac{mV^2}{2} \cdot \frac{V}{\lambda}$  → ср. енергія, яку витрачає частинка за однією газу.

$E_{взаєм}$  - витрачає колишню роботу, яку поле виконувало на частинку

вирішимо:  $V_D E e = \eta \frac{mV^2}{2} \cdot \frac{V}{\lambda} = \frac{\eta m V^3}{2\lambda} \Rightarrow$

$V_D = \sqrt{\frac{\eta}{2}} \sqrt{\frac{e\lambda E}{m}}$  - дрейфова швидкість

$V = \sqrt{\frac{2}{\eta}} \sqrt{\frac{e\lambda E}{m}}$  - ср. швидкість, визначена температурою дрейфової швидкості

ашиємо в такому вигляді:

$V_D = \mu E = \sqrt{\frac{\eta}{2}} \sqrt{\frac{e\lambda}{mE}} E$

рухливост  $\mu = \sqrt{\frac{\eta}{2}} \sqrt{\frac{e\lambda}{mE}}$

Вамсам, що  $\eta$  - коеф. взаєм. взаємодії.

$\eta = \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}$

$= \frac{E_1'}{E_1}$

$\Rightarrow \eta = \frac{2m_1}{m_2 + m_1}$

- при дуже великій масі  $m_2$  сильне відхилене теплого дрейфова швидкості

# 2.11.12 Електронна температура

$$T = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sqrt{\frac{e \lambda E}{m}} - \text{сер. швидкість}; \quad \boxed{\frac{m v^2}{2} = \frac{4}{\pi} k T_e}$$

$T_e$  - електронна температура (така, при якій сер. хаот. швидкості іонів при  $p_i$  асиметричного кола)

Підставляючи  $\Rightarrow$  
$$T_e = \frac{\pi m v^2}{8k} = \frac{\pi e \lambda \sqrt{\frac{2}{\pi}} E}{8k} \rightarrow \text{електронна температура}$$

## Рухливість іонів

Близькість до здеревини швидкості:

Тут треба повторити всю книгу розв'язків, тільки вращаючись, що в них близькі маси. Ізгодом  $\lambda$  поперечному розмаху, як не робили!

Зрадувавши всі ці поправки, отр.  $\Rightarrow$

$$T_D = \lambda \frac{e \lambda_i}{m_i v_i} \sqrt{1 + \frac{m_i}{m_H}} E \rightarrow \text{дрейфова швидкість} \quad \left| \begin{array}{l} i - \text{іон} \\ M - \text{нейтральні молекули} \end{array} \right.$$

$\lambda$  - коеф., що залежить від структури іонів (таблицей)

2/5) Розрахувати електронну температуру для гелію при  $\lambda = 1 \text{ мм}$  р. а., якщо  $E = 100 \text{ В/см}$ ,  $\lambda = 5 \cdot 10^{-4} \text{ ч}$ .

Знайти, при якій напруженості електр. поля  $E$  дрейфова швидкість ст. в розмірні із теплотою

Дифузії - пошук газів, вихідні кин. ризики концентруються в збук. томах:

$$n = \text{const} \neq f(\vec{r}) \Rightarrow \vec{V}d = 0; \quad \vec{V}d - \text{дифузійна швидкість}$$

$$n = f(\vec{r}) \Rightarrow \vec{V}d \neq 0; \quad p_e = f(\vec{r}) \Rightarrow \vec{V}d_e \neq 0; \quad p_i = f(\vec{r}) \Rightarrow \vec{V}d_i \neq 0$$

е означає, що з'являються електрони і іони струми.

$$I_e \neq 0, \quad I_i \neq 0$$

$$\vec{j}_i = -e D_i \text{grad}(n_i) \quad \left| \begin{array}{l} - \text{пошук газів} \\ D - \text{коеф. дифузії} \end{array} \right.$$

аналогічно: 
$$\vec{j}_e = -e D_e \text{grad}(n_e)$$

Амбиполерна дифузії:  $D = \frac{\lambda V}{3}; \quad \frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e}$

$$j_i + j_e = 0$$

20.11.12.  $\vec{j}_i = en\mu_i \vec{E} - eD_i \text{grad}(n)$  - вимітаний струм -4-

$$\vec{j}_e = en\mu_e \vec{E} + eD_e \text{grad}(n)$$

$n_e = n_i = n$

$$\vec{j}_i = -\vec{j}_e = -e \frac{\mu_i D_e - \mu_e D_i}{\mu_e + \mu_i} \text{grad}(n)$$

$$D_a = \frac{\mu_i D_e - \mu_e D_i}{\mu_e + \mu_i}$$

- коефіцієнт дифузії

Якщо струм  $i$ , але виходить вміст  $Q$  ноне на струм  $i$  нон. Амперметрною струмом

Рівняння газовой струму:

$f(\vec{r}, t)$  вивчення, ємо нам видати:

- 1)  $V(\vec{r}, t)$  - потенціал потенціалу
- 2)  $\vec{E}(\vec{r}, t)$  - напруженість електричного поля
- 3)  $n_i(\vec{r}, t)$  - концентрація іонів
- 4)  $n_e(\vec{r}, t)$  - " електронів
- 5)  $\vec{j}_i(\vec{r}, t), \vec{j}_e(\vec{r}, t)$  - швидкості електричного та іонного струмів

Все це береться з рівнянь газовой струму:

①  $\vec{E}(\vec{r}, t) = -\text{grad}(V(\vec{r}, t))$  зв'язок між напруженістю і потенціалом потенціалу.

②  $\text{div}(\vec{E}(\vec{r}, t)) = \frac{e}{\epsilon\epsilon_0} (n_i(\vec{r}, t) - n_e(\vec{r}, t))$  зв'язок між полем і різницею концентрацій електронів і іонів.

③  $\vec{j}_i = en\mu_i \vec{E} - eD_i \text{grad}(n)$

④  $\vec{j}_e = en\mu_e \vec{E} + eD_e \text{grad}(n)$

→ швидкості струмів

② - р-те вгедо і рівняння Максвелла

Використавши рівняння неперервності:

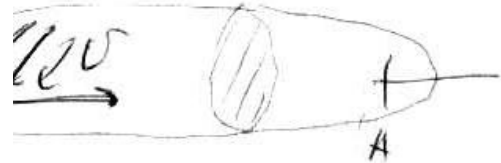
⑤  $\text{div}(\vec{j}(\vec{r}, t)) + \frac{\partial \rho(\vec{r}, t)}{\partial t} = 0$  → розділимо його на дві:

1)  $e \frac{\partial n_i(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\text{div}(\vec{j}_i(\vec{r}, t)) + en_i'$  - закон збереження іонів

2)  $e \frac{\partial n_e(\vec{r}, t)}{\partial t} = \text{div}(\vec{j}_e(\vec{r}, t)) + en_e'$  - закон збереження електронів

$en_e'$  - зовнішній джерело

Несамостійний газовий розряд. Вважаємо, що створює іонізація на поверхні катода (ФЕ  $E \neq 0$ ). Елементарні розряди будуть електронні

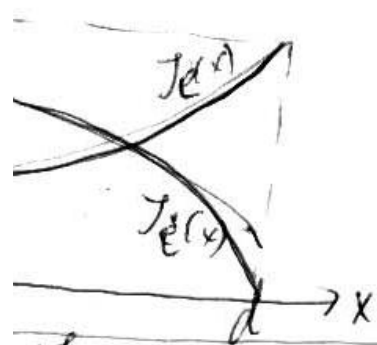


A - к-сть зарядів, які створює електрон на одиницю довжини пробігу

$2ndx \rightarrow$  приріст концентрації,  $dx$  - одиниця

$$d \rightarrow \int_{n_0}^n \frac{dn}{a} = \int_0^x a dx : \boxed{n = n_0 \exp(ax)}$$

$x=d, \boxed{nd = n_0 e^{ad}}$ . Задавимо, що  $J \sim n, J$  - струм  
 $J_0 \exp(ax)$  - струм



$$\boxed{J_{max} = J(d) = J_0 \exp(ad)}$$

$$\boxed{J_i = J_{max} - J_e} \rightarrow \text{фізичне буре-екоіт}$$

$$\boxed{J_0 \exp(ad) - J_0 \exp(ax) = J_0 (\exp(ad) - \exp(ax))}$$

яко напруження  $U \uparrow \Rightarrow a \uparrow$ . Треба визначити межю при переході від несамостійного, до самостійного. електрон

$\exp(ad) \exp$ . - з них  $\boxed{\exp(ad) - 1}$  ти, які утворили самі  
 На катоді, коли  $x=0$  III така ж саме к-сть іонів вторичних, іонів - електронів емісії

- $\boxed{\nu \cdot (\exp(ad) - 1) < 1}$  - несамостійний розряд
- $\boxed{\nu \cdot (\exp(ad) - 1) = 1}$  - границя переходу до самостійного
- $\boxed{\nu \cdot (\exp(ad) - 1) > 1}$  - розряд стане самостійним.

27.11.12 розглядаємо неіонізуючий газовий розряд.

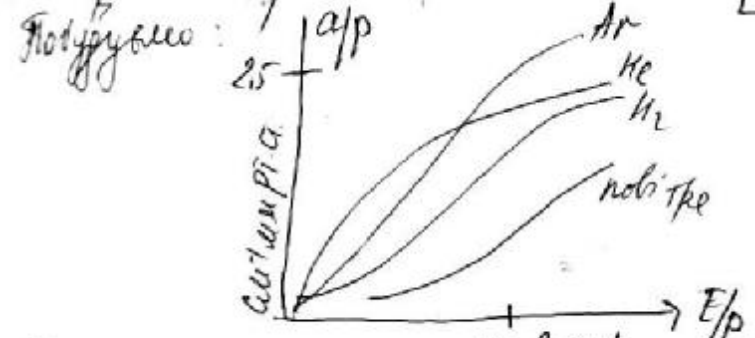
$n(x) = n_0 \exp(ax)$   
 $J(x) = J_0 \exp(ax)$

Тонкий катод:  $J(x) = J_{max} - J_0 \exp(ax) \rightarrow$  було.  
 Випуск в електричному полі:

Катод ~  $n \sim p$ :  $a \sim \epsilon = f(V^2) = f(V) = f(\lambda E)$

$a$  - кількість електронів на одиницю довжини.

$a \sim p \cdot f(\lambda E)$   
 $\lambda \sim p^{-1} \sim p^{-1}$ ,  $p$  - тиск,  $\Rightarrow \frac{a}{p} \sim f\left(\frac{E}{p}\right)$



Поведінку кривої поблизу мінімуму промінь...  
 утворюється вторинна електронна емісія.  
 $\nu$  - коеф. втор. ел. емісії.

$n(x) = n_0 \exp(ax)$

Три умови:  $\nu(\exp(ad) - 1) < 1$  - несамоіонізуючий розряд  
 $\nu(\exp(ad) - 1) \approx 1$  - самоіонізуючий розряд.

зробимо похідні вимірює  $\nu$  (коеф. втор. електр. емісії)

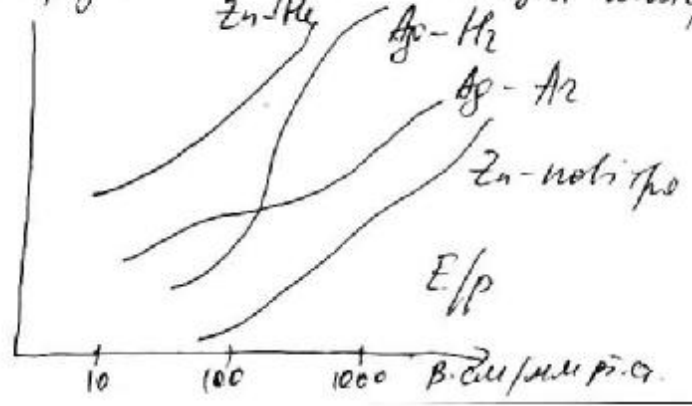
Емісія електронів в вакуумній лампі енергійно іонів, електронів і іонів.

$\nu \sim \epsilon_i \sim \tilde{f}(V_i^2) = \tilde{f}(V) = \tilde{f}(\lambda_i E)$

$\nu \sim \tilde{f}(\lambda_i E)$

$\lambda_i \sim n^{-1} \sim p^{-1} \Rightarrow \nu \sim \tilde{f}\left(\frac{E}{p}\right)$

Але різні пар. координати матеріал електроду:



$\nu(\exp(ad) - 1) \approx 1$   
 $\nu \sim \tilde{f}\left(\frac{E}{p}\right)$   $\frac{a}{p} \sim f\left(\frac{E}{p}\right)$

$\tilde{f}\left(\frac{E}{p}\right) \cdot [\exp(p d \cdot \tilde{f}\left(\frac{E}{p}\right)) - 1] \approx 1$

Виринити по умову:

$$\tilde{f}\left(\frac{E_{кр}}{p}\right) \cdot \left[ \exp\left(p d \cdot f\left(\frac{E_{кр}}{p}\right)\right) - 1 \right] = 1$$

$E_{кр} = \frac{V_{кр}}{d}$  → критичне значення  $f$  для електричного поля

Отже:  $\tilde{f}\left(\frac{V_{кр}}{p d}\right) \cdot \left[ \exp\left(p d \cdot f\left(\frac{V_{кр}}{p d}\right)\right) - 1 \right] = 1$

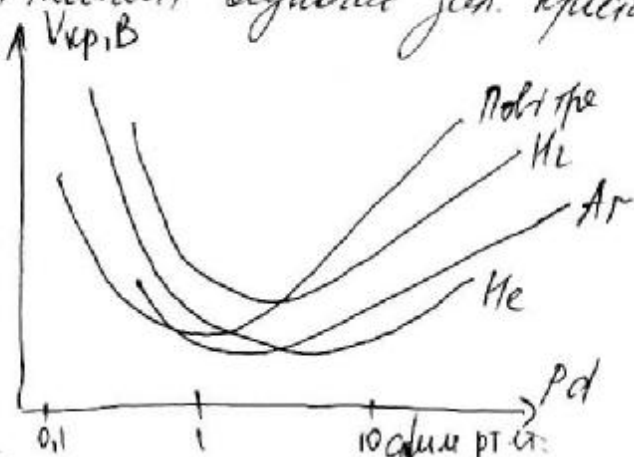
$V_{кр}$  - критична напруга  
Закон Пащенко

$$\tilde{f}\left(\frac{V_{кр}}{p d}\right) \cdot \left[ \exp\left(p d \cdot f\left(\frac{V_{кр}}{p d}\right)\right) - 1 \right] = 1$$

Інше:  $p d = const \Rightarrow V_{кр} = const$

$V_{кр} = f(p d)$  → критична напруга  
Закон Пащенко  
зв'язок між критичною напругою та товщиною

З-и Пащенко виводить закон критичної напруги



Приклад: Повітря (чисте)  
 $p = 760 \text{ мм рт.ст.}$   
 $d = 1 \text{ см}$   
 $V_{кр} = 30 \text{ кВ}$

Порушують з-и Пащенко при:

$$\cancel{V_{кр} = f(p d)}$$

- ① Малий  $p d < 0,004 \text{ мм см рт.ст.}$
  - ② Великий  $p d > 10^4 \text{ мм см рт.ст.}$
- У високому вакуумі немає молекул і не виникають іони, але будуть електрони (періодично). Іночі молекула газу, то молекула просто летить до катода і утворює струм.
- ② Великий тиск: мала кількість електронів. Виникає для  $V_{кр}$  не високого і воно стає розміром середнього (розмір електрона співрозмірний з розміром вільного пробігу).

27.11.12 Вибірною катод, утвореною р'шоткою  
конструкції:

$N_0 \rightarrow N_\Sigma = N_0 + N_s$  - сумарний струм  
 $N_s$  (s-secondary) - вторинні електрони.

$$N_s = N_\Sigma \beta (\exp(ad) - 1)$$

$\beta$  - еф. в. Од'яналим, всі попередні вимозги, випливають:

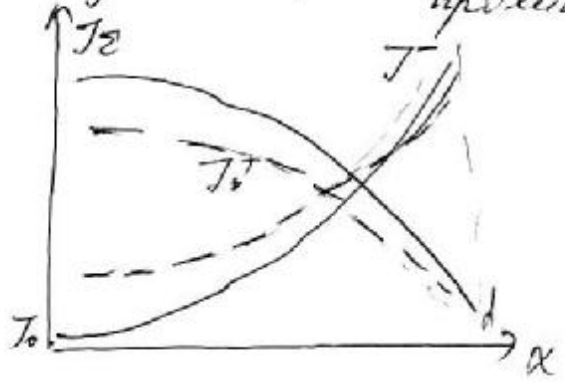
$$N_\Sigma = \frac{N_0}{1 - \beta (\exp(ad) - 1)}$$

$$n(x) = N_\Sigma \exp(ax)$$

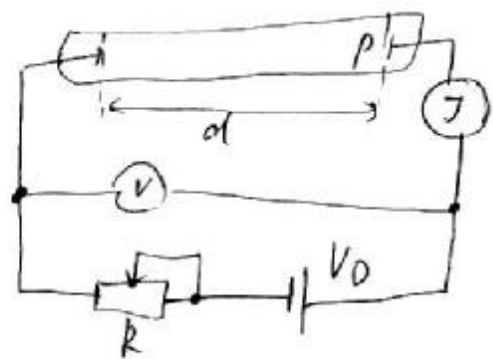
$\Rightarrow$  Залежність струму електрону

$$J(x) = \frac{J_0 \exp(ax)}{1 - \beta (\exp(ad) - 1)}$$

в мікроскопічному  
пробієнні



Пам'ятоківний розряд



$$J(x) = \frac{J_0 \exp(ax)}{1 - \beta (\exp(ad) - 1)}$$



Іонізаційний коеф. Пам'ятоків  
 $1 \mu \rightarrow a$

$a \cdot dx = p_i$  - імовірність іонізації на шляху dx  
всередині електронів зох & нових носіїв заряду.

$$P_i = P_{ei} \cdot P_{i\text{твк}}$$

$\rightarrow$  імов. іонізації.

$P_{ei}$  - електрон набуває певної енергії.

$$E_i = \chi e E \Rightarrow P_{ei} = P_{\chi = E_i / eE}$$

$\rightarrow$  імов. того, що електрон уряде  
визмано

$$P_{\chi = E_i / eE} = \exp\left(-\frac{E_i}{\lambda e E}\right)$$

$\rightarrow$  імов. того, що електрон отримав  
необхідну енергію для іонізації



27.11.12  $\left| P_{zinc} = \frac{dx}{\lambda} \right|$ ,  $\lambda$  збільшена вільною пробією

$$a \cdot dx = \frac{\exp\left(-\frac{E_i}{\lambda e E}\right)}{\lambda} dx$$

$$, \text{ або } \left[ a = A \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right) \right]$$

$$, \left[ A = \lambda^{-1} \right] \Rightarrow$$

Підставимо вимоги:

$$\Rightarrow \left[ b(\exp(ad) - 1) = 1 \right]$$

$$\Rightarrow \left[ \begin{aligned} \exp(ad) &= 1 + \frac{1}{b} \\ ad &= \ln\left(1 + \frac{1}{b}\right) \end{aligned} \right]$$

Візьмемо в умови:

$$b = 10^{-3} \div 10^{-4}; \quad \left[ ad = 7 \div 10 \right]$$

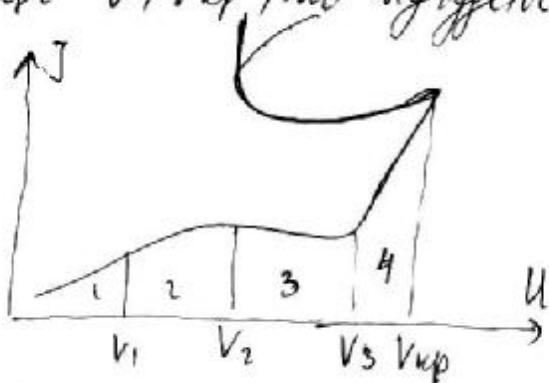
- це означає, що електрон, коли пролітає вздовж одного з іонів, матиме створити  $7 \div 10$  нових електронів.

Д/З Сиродукати повторити ці вимірювання для виснагу, коли значення швидкості електронів рівномірно змінюються (замінивши перехід самостійності розрядів) Самостійний газовий розряд

$V < V_{кр}$  - несамостійний зр.

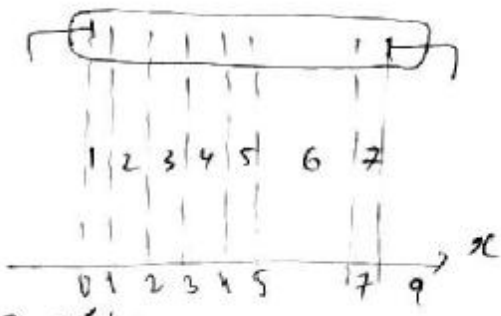
Якщо  $V > V_{кр}$ , то відбувається самозбудова сферичної струми.

X-ий неврівноважений газовий розряд:



$$\left[ \begin{aligned} U &= 10^2 \div 10^3 \text{ Вольт} \\ I &= 10^{-4} \div 10^{-1} \text{ А} \end{aligned} \right]$$

$$P = 10^{-2} \div 10^2 \text{ мм рт.ст.}$$



- 1) Мелка астопова область
- 2) Світлий катодний шар (шар)
- 3) Катодний темний шар
- 4) Область іонів високої швидкості кожного стігана
- 5) Паралельна мелка область (шар)
- 6) Позитивний світлий шар (світлий стіган)
- 7) Анодний шар (область)

Мишемо процес, що відбувається у  $\text{SiO}_2$ .

$\text{ЗЕВ} \Rightarrow$  іонізація - не стітяться  
збуршення область,  $d \sim \lambda$   
 $d$  - розмір об'єкта  
 $d$  - довжина хвилі

не + іонізація  
 $\rightarrow E_i(E_{\text{ЗВ}})$ .  $x_i$  - координата в області 2

Мишемо центральний смуг для  $x_1, x_2, x_3$ ,  
 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 \rightarrow$  довжина хвилі

$E_i(E_{\text{ЗВ}})$ . То електрон віддає всю енерг. галтми:  
 $E_i(E_{\text{ЗВ}})$ , тому ця область буде темна.

$E_{\text{ЗВ}}(E_i)$  - лавиноподібний процес не стітяться.  
Видувовані світлення.

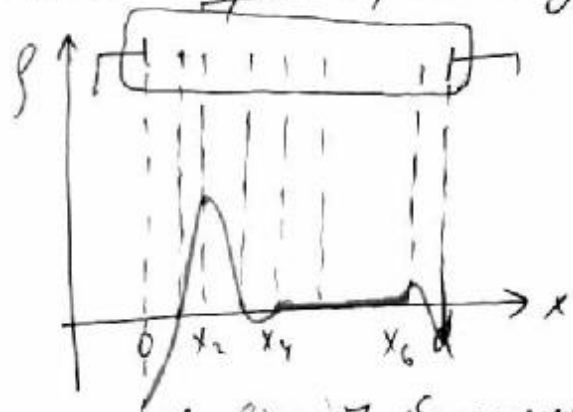
$x_2^{(4)} < x_3^{(4)}$   
 $\lambda_2^{(4)} > \lambda_3^{(4)}$   
 $\lambda_2^{(4)} < \lambda_3^{(4)}$   
Тому область ④ носить назву металев  
протилежна до області ②.

$E_{\text{ЗВ}}$ . Темна область. Вмтає велика к-сть повільних  
Протікати через електричне поле, виникає вел  
різниця потенціалів.

$E_i(E_{\text{ЗВ}})$ . - відбувається масове збуршення атом  
область стітяться.  $\Rightarrow [n_e = n_i]$  Роль  
її.

На атомі великий негат. потенціал. Ви  
ликується іони, електрони приєднуються і  
іють на заряд.

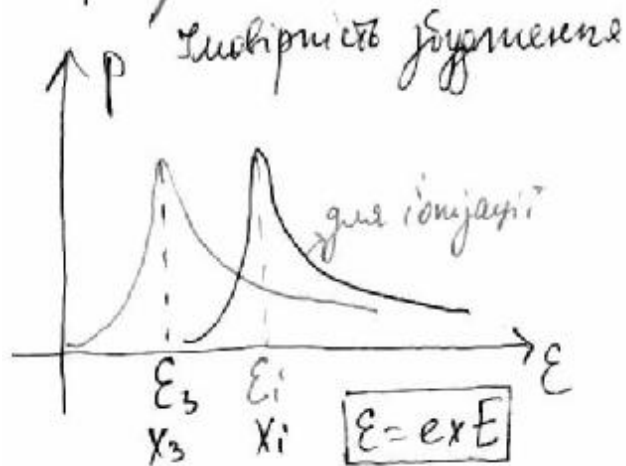
4.12.12 Простороки заряду



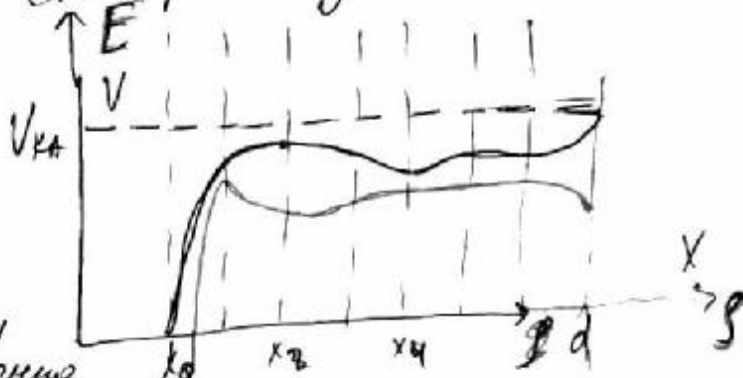
$$\frac{dE}{dx} = 4\pi \rho; \rho = e(n_i - n_e)$$

$$\int_0^d \alpha E(x) dx = U_0 \left(1 + \frac{1}{\epsilon}\right)$$

$V(p,d) > V(p, x_i)$  - якщо притоки

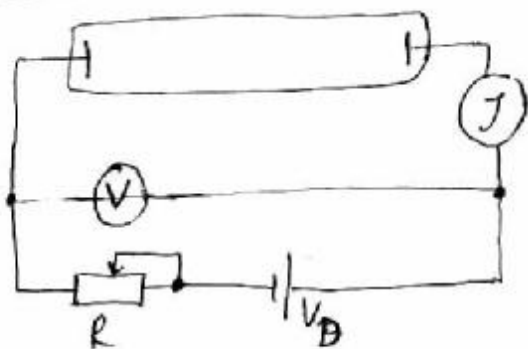


$\epsilon_3$  - енергія збудження  
 $\epsilon_i$  - енергія іонізації



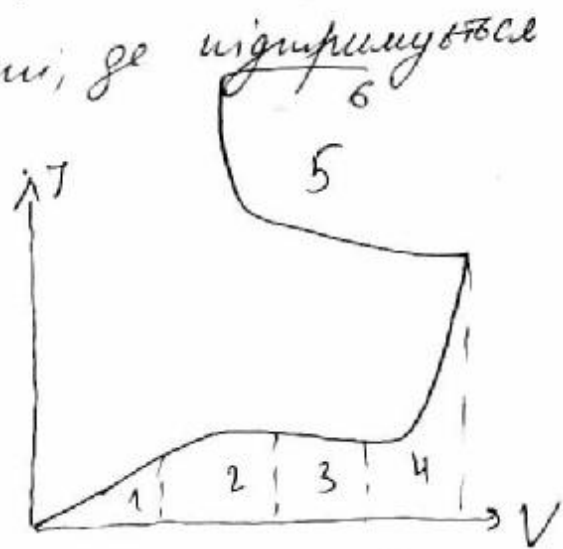
Основним виради'пованнем + вторинно термоелектронне злітіння. Область 0 -  $x_2$  - основні області, де відбуваються невірні розряд.

Самостійний газовий розряд



$$V \uparrow \Rightarrow I \uparrow \Leftrightarrow j = \text{const}$$

не відрізняє катоди і аноди зрештою  
Збільшення струму  $\Rightarrow$  збільшення площі, на якій відбуваються процеси розряду.  $S_k > S_p$  - площа розряду  
Ділення 5 - нормальний невірний розряд  
Ділення 6 - аномальний невірний розряд



Обертання катоди і аноду при цьому дообертання області 1-4. Область 5-6 не відрізняє обертання катоди і анода, бо там тепловий рух і зрештою рух.

2/3 Чи буде сформовано зовнішнє електричне поле менши шари заповнення іонами, емією:

$$j_i = 10^{-10} \text{ A/cm}^2$$

$$V_{KA} = 300 \text{ В}$$

$$d_i = 0,1 \mu$$

$$U_i = 1 \text{ м/с}$$

М. Вуєршити час встановлення, стаціонарного стану несамоцінного розряду при  $E = \text{const}$ , емією іонізації зростає за допомогою електричного удару, речовинна поглинається при збільшенні з'ткнення

Продовження: ...

$V \uparrow \Rightarrow j \uparrow \Rightarrow V \downarrow$  - напруження падає на рівня пореднів, а струм зростає на кінцях пореднів

Це різниця  $\neq$  (дуговий розряд)

Для дугового розряду:

$$j < 10^2 \div 10^7 \text{ A/cm}^2$$

$$V_{KA} = n \cdot 10 \text{ В}$$

$$j = 10^5 \text{ A}$$

Для тельврічного:

$$j < 150 \text{ A/cm}^2$$

$$V_{KA} = 10^2 \div 10^3 \text{ В}$$

$$j = 10^{-4} \div 0,1 \text{ A}$$



Невелике зростає напруження катодна напружені - різниця між дуговим і тельврічним розрядами

Атак показують словна  
 Дуговий розряд  
 Тип середовища  
 Характеристичні процеси на катоді

Процеси	
М.р.	Д.р.
Вись іонізація на емісії	Термоелектр. емісія
$X \downarrow$	Автерелектронні емісії
Вись напружені розривлення іонізації $E \uparrow$	$T \uparrow$
	$E$
	Електричний удар $E$

Типи дугових розрядів

① Два з гарячим катодом  $T_k \approx 3000 \text{ K}$   
 $T_{\text{катод}} = 4000 \text{ K}$ ,  $T_{\text{анод}} = 3700 \text{ K}$ ,  $T_{\text{катод}} = 5000 \text{ K}$   
 С-графіт (карбон), W-вольфрам (типопривидні матеріали).  $S = \text{const}$   
 Вись матеріали: Mo, Zr, Ta, W, C.

на із зовнішнім розташуванням  
 дугою (пари матеріалів)  
 на високому тиску  $\Phi$  ( $0,1 \text{ атм} \leq p \leq 1 \text{ атм}$ )

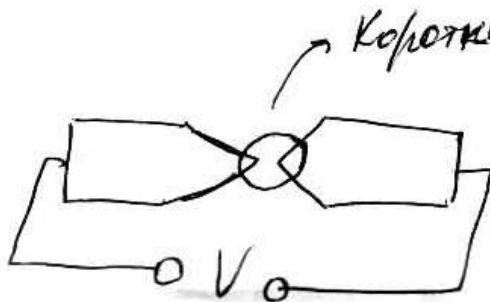
1 - атмосферна дугою.

6000-12000 K, в мікросекундах  $T_k \approx 50000 \text{ K}$  - заповнюють  
 емісія, явище міне само тупотавших матер  
 а на високого тиску ( $p > 5 \text{ атм}$ ).

$\frac{1}{p} \Rightarrow$  випромінювання (основний механізм не  
 від однієї дугою до іншої). Це заповнюють з  
 л. світла

на тиску тиску (подібна до невірного розр.  
 $10^{-3} \text{ мкмр.с.}$

змі омишюние  
 тани електродів



Коротке замикання  $\Rightarrow$  і  
 $\Rightarrow$  Плавлення мо.  
 $\Rightarrow$  випаровуван.  
 $\Rightarrow$  дугою  $\Rightarrow$  зам.

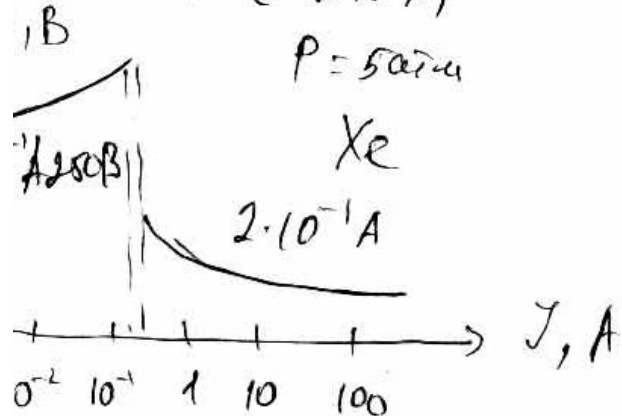
$> V_{кр}$  (пробити газу)

об'ї  $\Rightarrow$  перехід до дугово розр.

і джерело забезпечує  $V \uparrow, I \uparrow$ .

період від невірного до дугово розр.

$\rightarrow 7 (BAx)$



1.12 Прямая у катодашного шарі

Відміну від теврілого розряду є і інші процеси термоелектронна емісія: вторгнення емісія. Тут є різниця.

новий розряд

$\approx 0,1 \div 0,3$

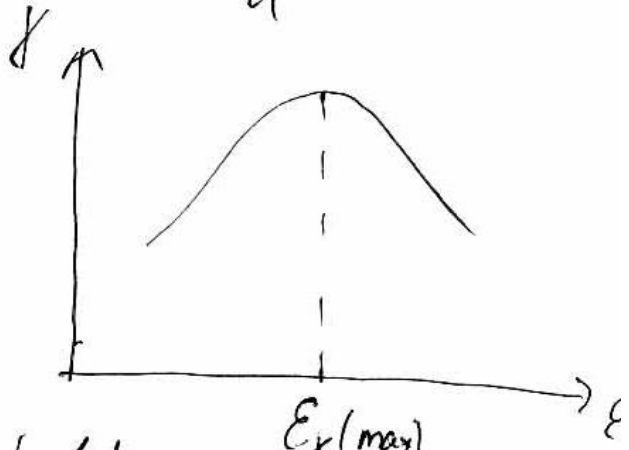
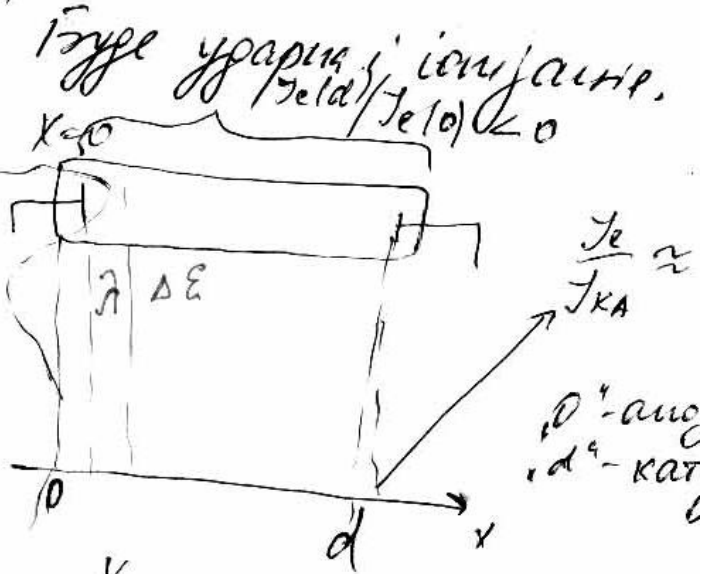
$\approx 0,7 \div 0,9$

$\approx 2 \div 9$

$$\delta \approx 10^{-2}$$

$$\frac{J_i}{J_{KA}} = \frac{1}{1+\delta} \approx 1$$

$$\frac{J_e}{J_{KA}} = \frac{\delta}{1+\delta} \approx \delta$$



формула Річардсона-Демімонна (термоелектронна емісія)

$$E = A \exp\left(-\frac{E_w}{kT}\right)$$

Ті температура розігріти катод до величезної температури. (Випрями) є величезна кількість іонів, і вони розшаруються.  $\rightarrow 12000 K \rightarrow 11000$   $\rightarrow 500 K$

це є більше пов. катоду. Тут є середніми розмірами електронів ходять більше, ніж у теврілого розряду, але вони втрачають енергію внаслідок величезного поля.  $\Rightarrow$  зменшення роботи виходу  $\Rightarrow$  на катод емісія виходу емісійний струм.

$$E = \int_{E_g}^{E_g + \Delta E} A \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right)$$

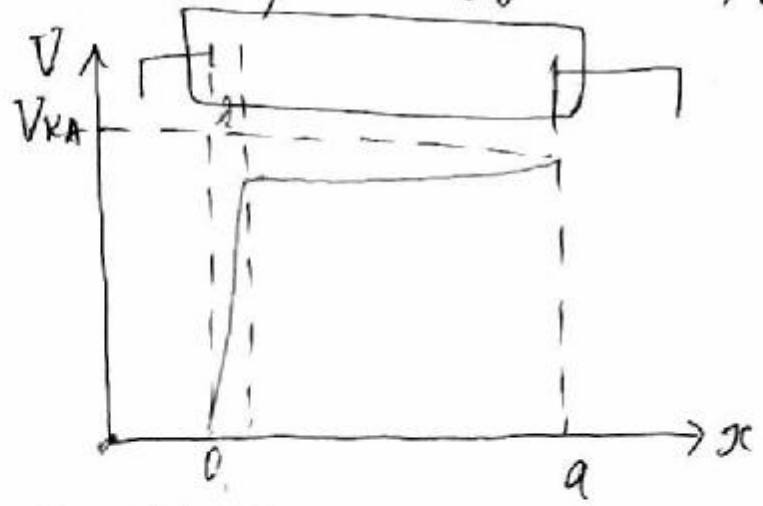
$$\frac{J_i}{J_{KA}} = \frac{J_i}{J_i + J_e} \approx 10^{-2}$$

$\Rightarrow$  Ті температура до абсолютної емісії

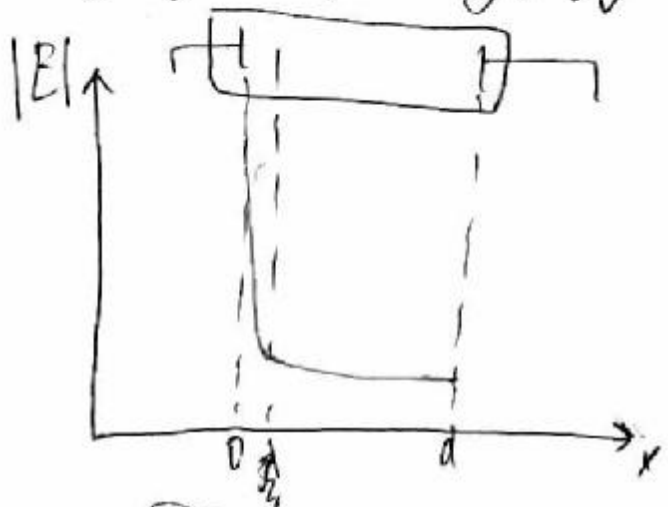
$$AE = a E^2 \exp\left(-\frac{b E_w^{3/2}}{E}\right) Q(E)$$

$Q(E)$  - функція Нортейма

д. концентрации дырочек  $V$  поперек.



Поле в перех. слое:

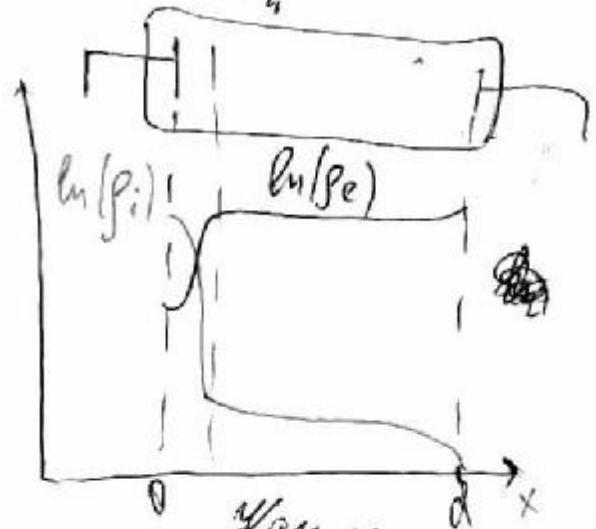


$$\vec{E} = -\text{grad } V$$

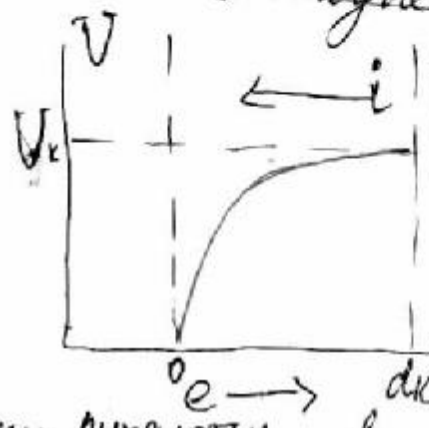
$$\frac{dE}{dx} = \chi \pi \rho$$

$$\rho = e(n_i - n_e)$$

2/3!!! Де использовать дырочный заряд?  
(мен. x-ки)



Канонич. напряж. напряж.



$$\text{div } E = \frac{dE}{dx} = \chi \pi \rho$$

$$\rho = e(n_i - n_e) \rightarrow \text{заряд}$$

Осильным зарядом не  
или симметрия

$$E_e(x) = \frac{m_e (V_e(x))^2}{2} = e V(x)$$

энергия электронов в дырочном слое

Температура

18.12.12

$$\left( \epsilon_i (dx-x) = \frac{m_i (v_i (dx-x))^2}{2} = e (V_k - V(x)) \right)$$

Гіонна енергія.

$J = j_i + j_e$  → загальна густина струму (електр. і іонній)

$$\begin{aligned} j_e &= e n_e v_e = \alpha j \\ j_i &= e n_i v_i = (1-\alpha) j \\ \alpha &= \frac{j_e}{j} \end{aligned}$$

$$n_e = \frac{\alpha j}{e v_e}$$

$$n_i = \frac{(1-\alpha) j}{e v_i}$$

залежить  
концентрації від  
швидкості.

$$v_e = \sqrt{\frac{2eV(x)}{m_e}}$$

$$v_i = \sqrt{\frac{2e(V_k - V)}{m_i}}$$

$$n_e = \frac{\alpha j \sqrt{m_e}}{e \sqrt{2eV}}$$

$$n_i = \frac{(1-\alpha) j \sqrt{m_i}}{e \sqrt{2e(V_k - V)}}$$

Катодне напруження  
 $j = j_e + j_i$  напруження:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi j}{\sqrt{2e}} \left( \frac{(1-\alpha) \sqrt{m_i}}{\sqrt{V_k - V}} - \frac{\alpha \sqrt{m_e}}{\sqrt{V}} \right)$$

$$\vec{E} = -\text{grad} V = -\frac{dV}{dx}$$

$$E = \frac{-dV}{dx}$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{4\pi j}{\sqrt{2e}} \left( \dots \right)$$

згідно з рівнянням Лапласа (Позначте границю, яку...)

$$\frac{dE^2}{dV} = -\frac{8\pi j}{\sqrt{2e}} \left( \dots \right) \Rightarrow$$

$$\frac{dE^2}{dV} = \frac{2dV}{dx^2}$$





$$n(z) = \frac{W}{V_{-0.0144}}$$

$$V_1 = z^3, \quad z^3 h = 1 \Rightarrow$$

$$z = \sqrt[3]{\frac{1}{h}}$$

Базисные функции на базисах:

$$z_D \gg r$$

$z_D$ -логиче  
Безле

функции, где  $meq_{11}$ :

$$G_{B_1} = 0, G_L \neq 0$$

$$1) \begin{bmatrix} z_D^3 \\ z_D \cdot n \gg 1 \end{bmatrix}$$

$G_B$ -расстояние эн-ли

$$E \neq 0 \Rightarrow \vec{F} \neq 0.$$

$$2) \begin{bmatrix} T_3 \omega_{PE} \gg 1 \end{bmatrix}$$

$G_L$ -номинала эн

Тогда

$$T_3 \ll T_3, \omega_{PE} \gg V_3$$

Т-функция базиса: (принципиально) замкнутая

опе-расстояние

между,  $V_3$ -расстояние

$$3) \begin{bmatrix} z_D^3 \\ V_{-0.0144} \ll 1 \end{bmatrix}$$

, отсюда следует

$\Rightarrow z_D$  и  $L$ -характеристики

функции

связаны между собой

логиче

связаны между собой (связи, логиче...)