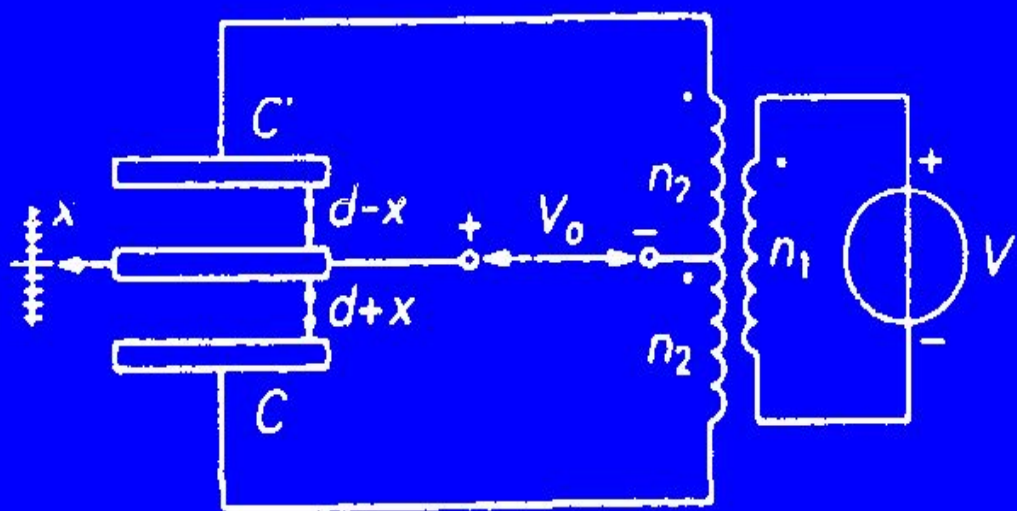
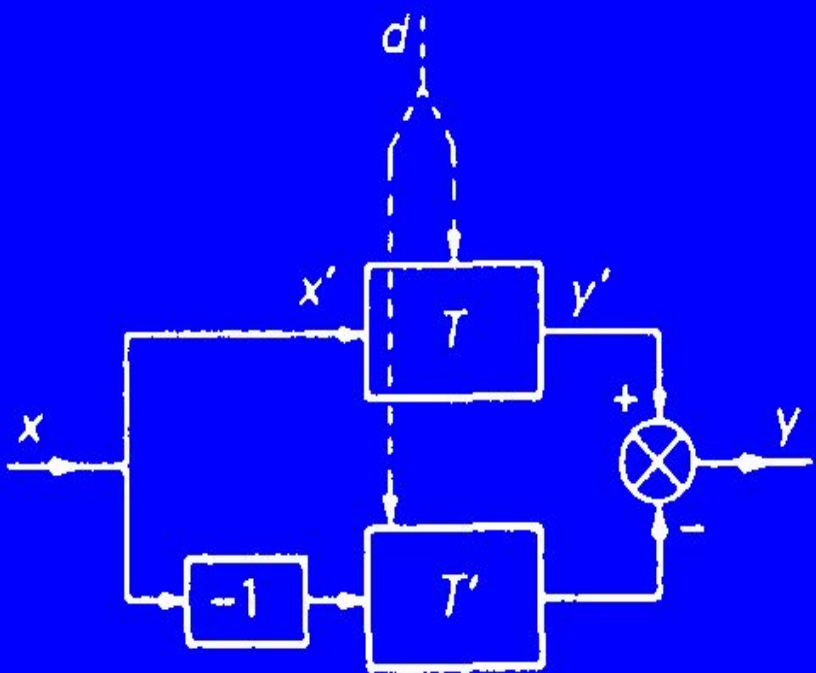


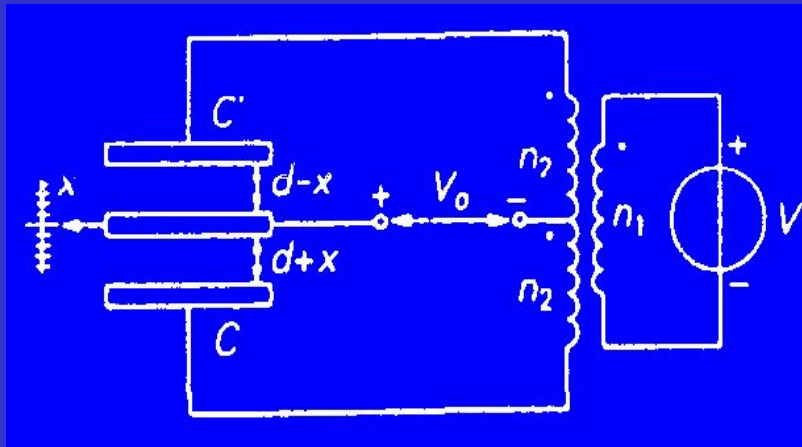
Задача 1. Получить уравнение для расчета чувствительности дифференциального (разностного) емкостного датчика.

$S - ?$

|



$S - ?$

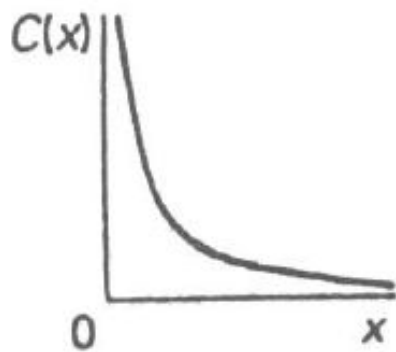
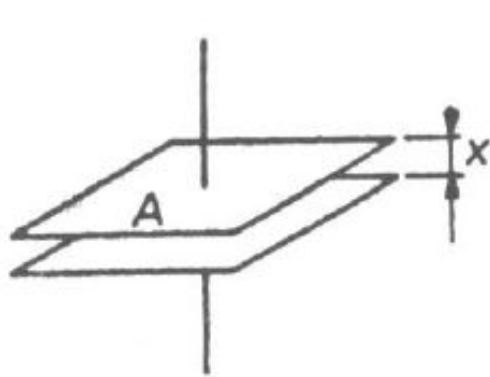


$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d+x}; \quad C' = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d-x};$$

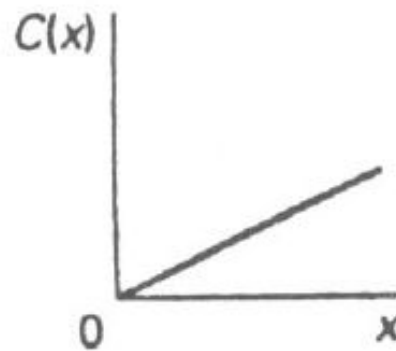
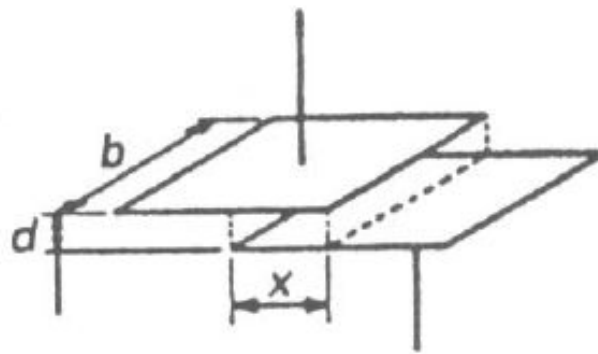
$$V_0 = V \frac{C' - C}{C' + C} \cdot \frac{n_2}{n_1}$$

$$V_0 = V \frac{x}{d} \frac{n_2}{n_1} = xS$$

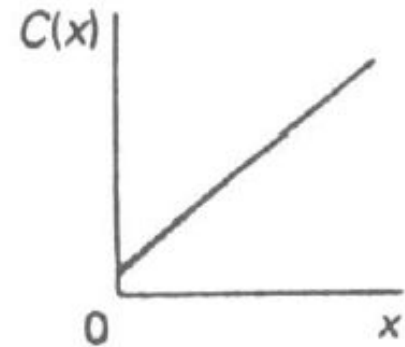
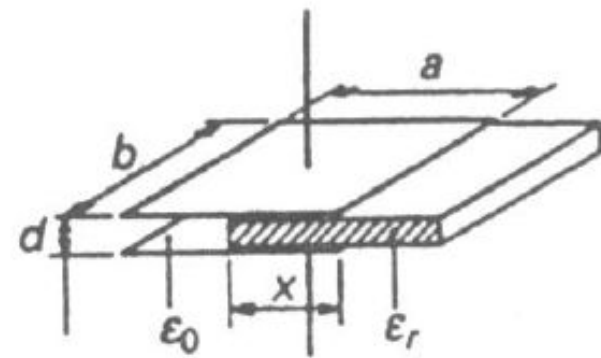
$$S = \frac{Vn_2}{dn_1}$$



(a)

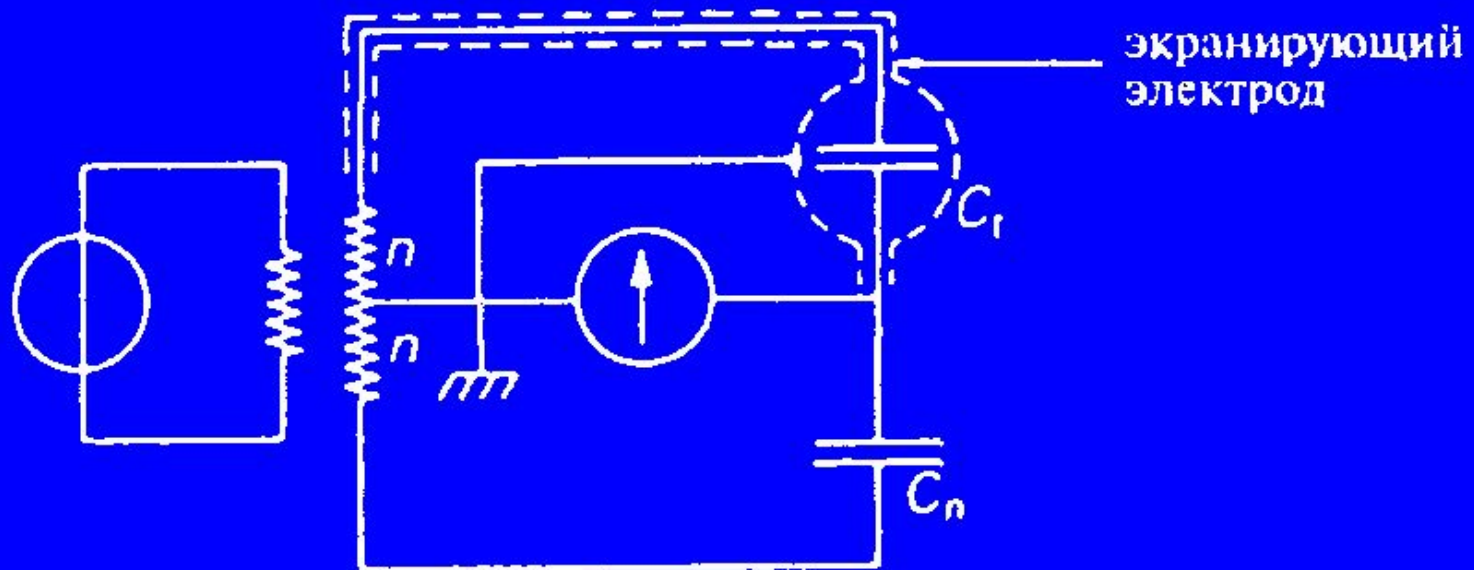
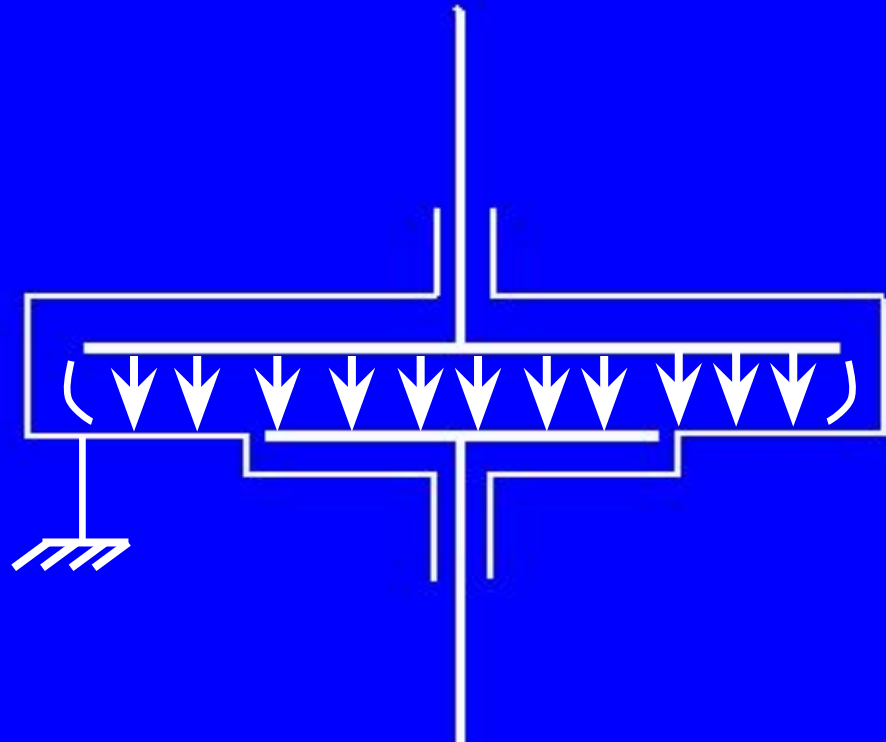


(b)



(c)

$$a) C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{x}; \quad b) C = \frac{b \epsilon \epsilon_0}{d} x; \quad c) C = \frac{\epsilon_0 a b}{d} \left( 1 + \frac{x(\epsilon_r - 1)}{a} \right)$$



Задача 2. Какая сила прикладывается к подвижной пластине емкостного датчика смещения, если емкость датчика в начальном состоянии равна  $100 \text{ нФ}$ , напряжение питания равно  $10 \text{ В}$ , а максимальное смещение составляет  $2 \text{ мм}$ .

$$C = 100 \text{ nF}$$

$$V = 10 \text{ V}$$

$$x = 2 \text{ mm}$$

$$F = ?$$



$$C = 100 \text{ nF}$$

$$V = 10 \text{ V}$$

$$x = 2 \text{ mm}$$

$$F = ?$$

$$E_f = E_m + E_e$$

$$E_f = d\left(\frac{1}{2} QV\right) = \frac{1}{2} QdV + \frac{1}{2} VdQ$$

$$E_e = d(QV) = QdV + VdQ$$

$$E_m = Fdx$$

$$C = 100 \text{ nF}$$

$$V = 10 \text{ V}$$

$$x = 2 \text{ mm}$$

$$F = ?$$

$$E_f = E_m + E_e$$

$$dV = 0$$

$$E_f = \frac{1}{2} V dQ; \quad E_e = V dQ$$

$$\frac{1}{2} V dQ = V dQ + F dx$$

$$F = -\frac{1}{2} V \frac{dQ}{dx}$$

$$C = 100 \text{ nF}$$

$$V = 10 \text{ V}$$

$$x = 2 \text{ mm}$$

$$F = ?$$

$$F = -\frac{1}{2} V \frac{dQ}{dx}$$

$$dQ = d(VC) = C dV + V dC$$

$$F = -\frac{1}{2} V^2 \frac{dC}{dx}$$

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{x} \Rightarrow \frac{dC}{dx} = -C \frac{dx}{x}$$

$$F = \frac{CV^2}{2x}$$

$$C = 100 \text{ нФ}$$

$$V = 10 \text{ В}$$

$$x = 2 \text{ мм}$$

$$F - ?$$

$$F = \frac{CV^2}{2x}$$

$$F = \frac{100 \cdot 10^{-12} \cdot 100}{4 \cdot 10^{-3}} = 0.25 \text{ мкН}$$

Ответ:  $F = 0.25 \text{ мкН}$

Задача 3. Определить температурный коэффициент сопротивления (чувствительность) полупроводникового материала при комнатной температуре, если энергия активации полупроводника равна  $0.8 \text{ эВ}$ .

$$T = 300 \text{ K}$$

$$E_a = 0.8 \text{ эВ}$$

$$\alpha(T) - ?$$



Рис. Структура примесных уровней

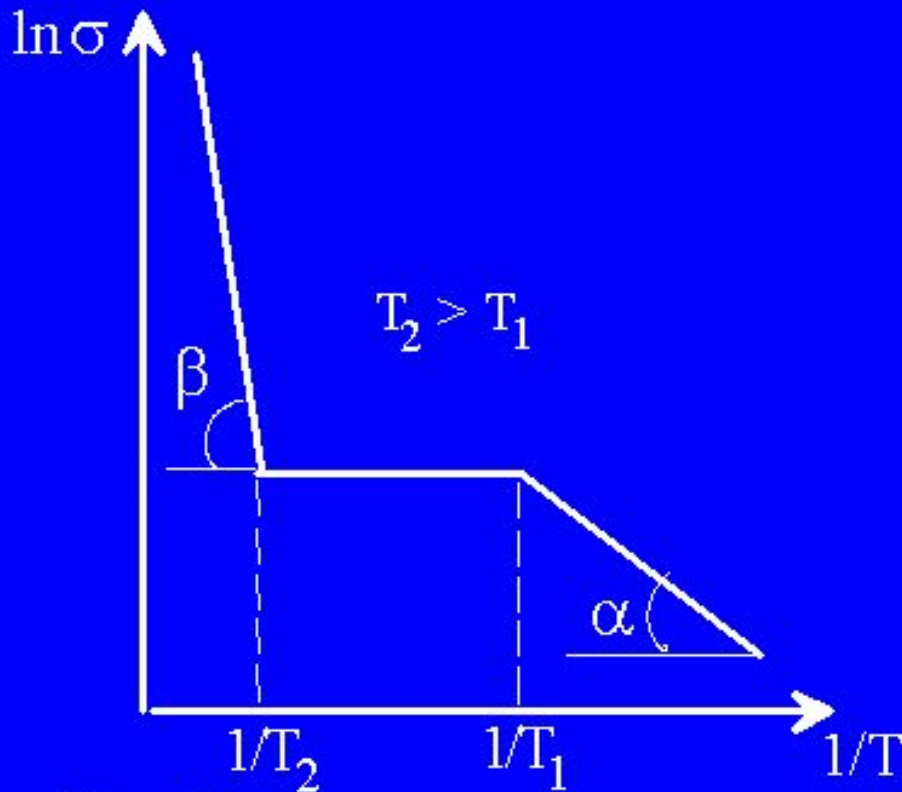


Рис. Температурная зависимость проводимости примесного полупроводника

$$n = \text{Const} \cdot e^{-\frac{E_d}{2kT}}$$

$$\sigma = ne\mu_n$$

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{E_d}{2kT}}$$

$$\text{tg} \alpha = \frac{E_d}{2kT};$$

$$\text{tg} \beta = \frac{E_g}{2kT}$$



$$R(T) = A \cdot e^{\frac{B}{T}} = Ae^{\frac{E_a}{2kT}};$$

$$R(T) = R(T_0) \cdot e^{B(1/T - 1/T_0)}$$

$$S_T = \alpha(T) = \frac{dR}{RdT} = -\frac{B}{T^2}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

$$E_a = 0.8 \text{ эВ}$$

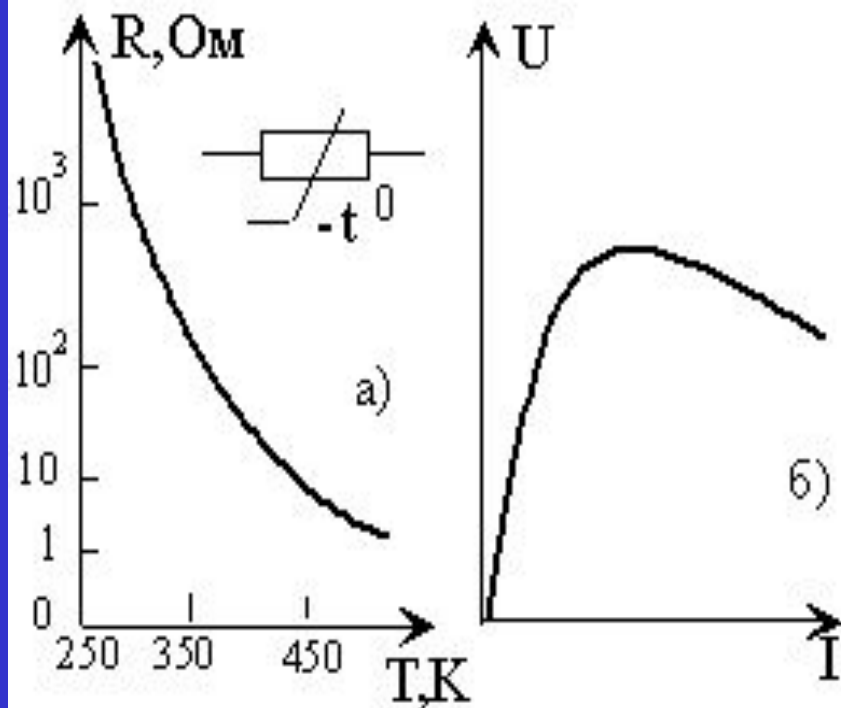
$$\alpha(T) = ?$$

$$S_T = \alpha(T) = \frac{dR}{RdT} = -\frac{B}{T^2}$$

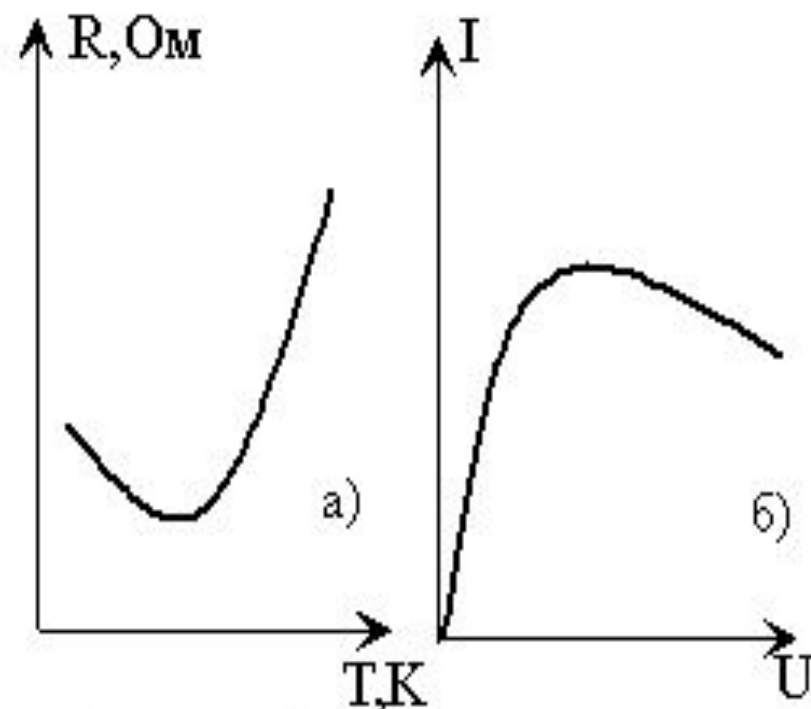
$$\alpha(T) = -\frac{0.8 \cdot 1.6}{2 \cdot 1.38 \cdot 9} = -5.2 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Ответ:  $\alpha = -5.2 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$

$$TKC = \frac{\Delta R}{\Delta T \cdot R}$$

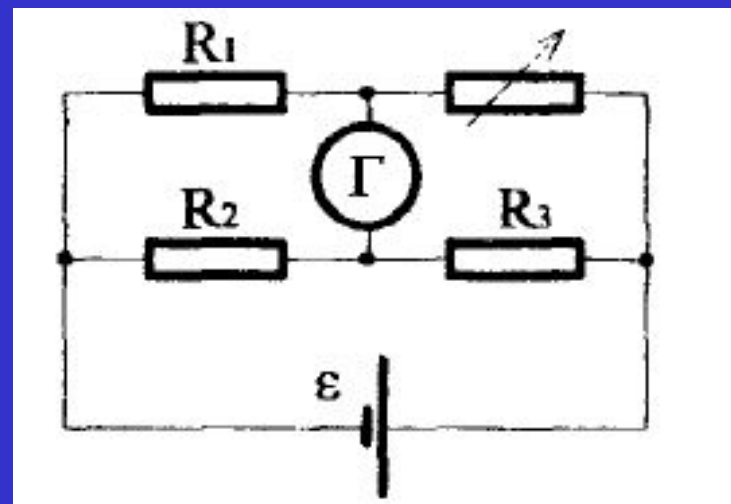


Характеристики термистора



Характеристики позистора

Задача 4. В измерительном мосте, изображенный на рис., сопротивления равны  $R_1 = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 4 \text{ Ом}$ . Вольтамперная характеристика нелинейного элемента имеет вид:  $I = \alpha U^2$ . Определить коэффициент пропорциональности, если мост сбалансирован при ЭДС батареи равной  $12 \text{ В}$ . Внутренним сопротивлением батареи пренебречь.



$$R_1 = 5 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 2 \text{ Ом}$$

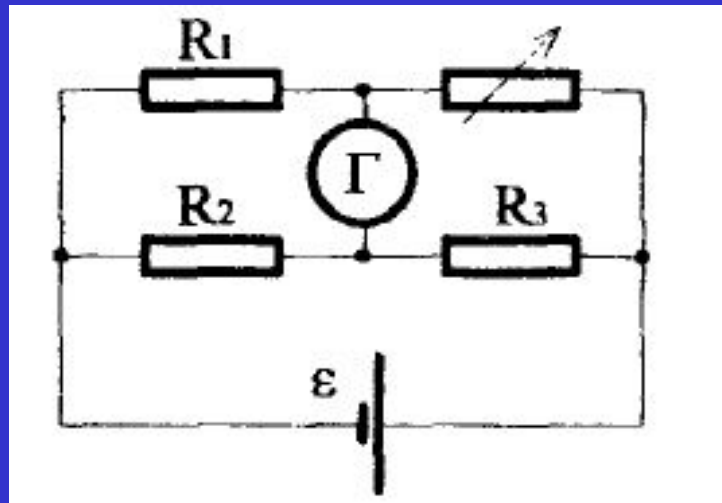
$$R_3 = 4 \text{ Ом}$$

$$I = \alpha U^2$$

$$E = 12 \text{ В}$$

---

$\alpha - ?$



$$R_1 = 5 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 2 \text{ Ом}$$

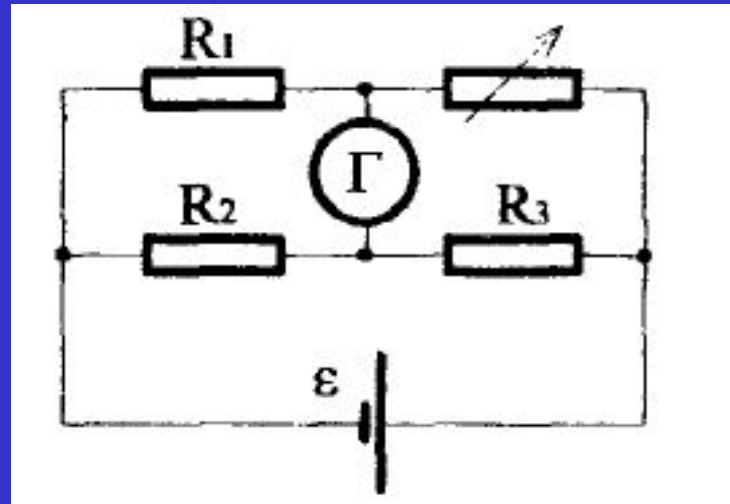
$$R_3 = 4 \text{ Ом}$$

$$I = \alpha U^2$$

$$E = 12 \text{ В}$$

---

$\alpha - ?$



$$\alpha = I/U^2 = 1/(UR)$$

$$R = R_1 R_3 / R_2$$

$$U = E \cdot R_3 / (R_2 + R_3)$$

$$R_1 = 5 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 2 \text{ Ом}$$

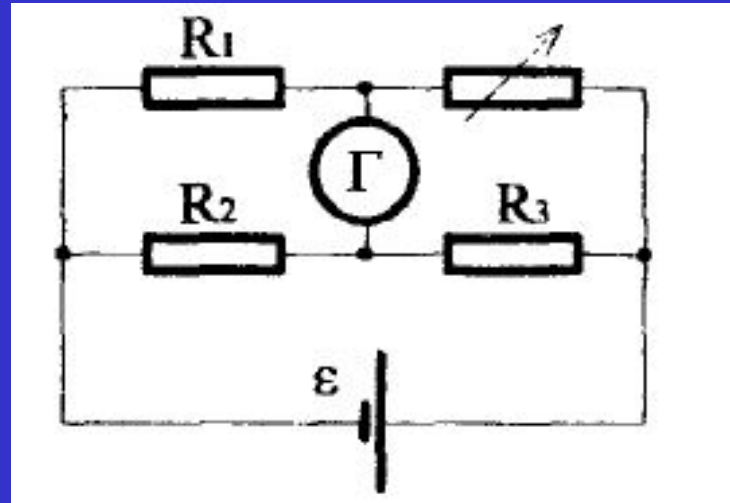
$$R_3 = 4 \text{ Ом}$$

$$I = \alpha U^2$$

$$E = 12 \text{ В}$$

---

$\alpha - ?$



$$\alpha = R_2(R_2 + R_3)/(E \cdot R_1 R_3^2)$$

Ответ:  $\alpha = 0.0125 \text{ А/В}^2$

Задача 5. При насыщении магнитная индукция чистого железа равна  $2.2 \text{ Тл}$ . Учитывая, что  $\alpha\text{-Fe}$  обладает ОЦК решеткой с параметром  $0.286 \text{ нм}$ , рассчитать магнитный момент, приходящийся на один атом железа (в магнетонах Бора).



$$B = 2.2 \text{ Тл}$$

$$a = 0.286 \text{ нм}$$

$$M - ?$$

$$B = 2.2 \text{ Тл}$$

$$a = 0.286 \text{ нм}$$

$M$  - ?

$$B = \mu_0 H + \mu_0 J_M \Rightarrow B \approx \mu_0 J_M$$

$$M = \frac{J_M}{\mu_B N} = \frac{B}{\mu_0 \mu_B N} = \frac{B \cdot a^3}{\mu_0 \mu_B \cdot 2}$$

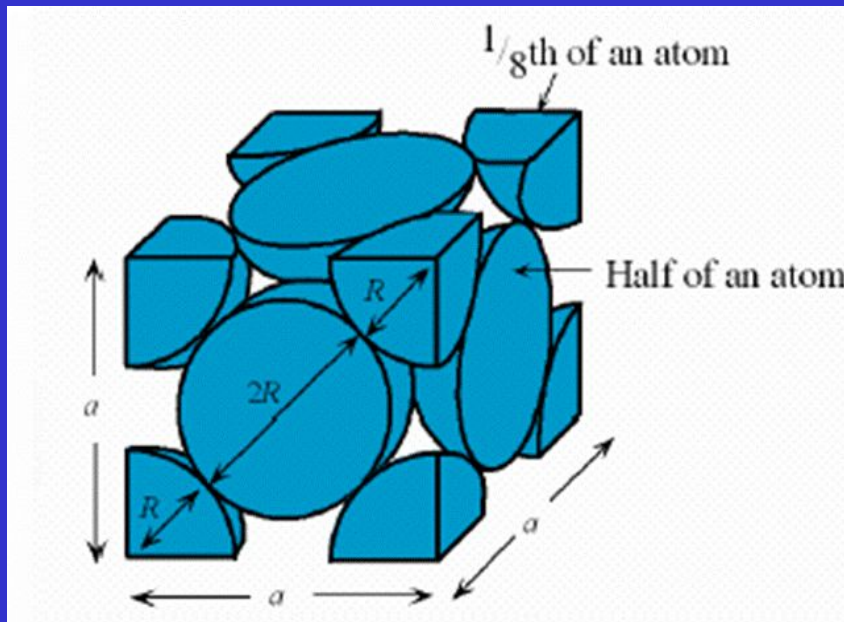
$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi \cdot m_e} = 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ Джс / Тл}$$

$$B = 2.2 \text{ Тл}$$

$$a = 0.286 \text{ нм}$$

$M$  - ?

$$M = \frac{J_M}{\mu_B N} = \frac{B}{\mu_0 \mu_B N} = \frac{B \cdot a^3}{\mu_0 \mu_B \cdot 2}$$



$$B = 2.2 \text{ Тл}$$

$$a = 0.286 \text{ нм}$$

$M - ?$

$$B = \mu_0 H + \mu_0 J_M \Rightarrow B \approx \mu_0 J_M$$

$$M = \frac{J_M}{\mu_B N} = \frac{B}{\mu_0 \mu_B N} = \frac{B \cdot a^3}{\mu_0 \mu_B \cdot 2}$$

$$M = \frac{2.2 \cdot (0.286)^3 \cdot 10^{-27}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 9.27 \cdot 10^{-24} \cdot 2} \approx 2.21$$



Задача 6. На частоте  $50 \text{ Гц}$  удельные потери на вихревые токи в сердечнике из электротехнической стали при индукции магнитного поля  $B = 1.2 \text{ Тл}$  составляют  $6.5 \text{ Вт/кг}$ . Определить потери на вихревые токи в сердечнике на частоте  $400 \text{ Гц}$  при магнитной индукции  $0.5 \text{ Тл}$ , если масса сердечника  $m = 0.5 \text{ кг}$ .

$$f_1 = 50 \text{ Гц}$$

$$B_1 = 1.2 \text{ Тл}$$

$$W_1 = 6.5 \text{ Вт/кг}$$

$$f_2 = 400 \text{ Гц}$$

$$B_2 = 0.5 \text{ Тл}$$

$$m = 0.5 \text{ кг}$$

---

$$P_2 - ?$$

$$W = W_{\text{Ф}} + W_{\text{Т}}$$

$$W_{\text{Г}} = c_1 B^n f$$

$$W_{\text{Т}} = c_2 B^2 f^2$$

$$f_1 = 50 \text{ Гц}$$

$$B_1 = 1.2 \text{ Тл}$$

$$W_1 = 6.5 \text{ Вт/кг}$$

$$f_2 = 400 \text{ Гц}$$

$$B_2 = 0.5 \text{ Тл}$$

$$m = 0.5 \text{ кг}$$

---

$$P_2 - ?$$

$$W_T = c_2 B^2 f$$

$$W_{T1} = c_2 B_1^2 f_1^2$$

$$W_{T2} = c_2 B_2^2 f_2^2$$

$$P_2 = W_{T1} B_2^2 f_2^2 m / (B_1^2 f_1^2)$$

Ответ: 36.11 Вт



Задача 7. Магнитная восприимчивость некоторого ферромагнитного сплава при температурах 400 и 800<sup>0</sup>С равна, соответственно,  $1.25 \cdot 10^{-3}$  и  $1.14 \cdot 10^{-4}$ . Определить температуру Кюри .

$$t_1 = 400^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 800^{\circ}\text{C}$$

$$\chi_1 = 1.25 \cdot 10^{-3}$$

$$\chi_2 = 1.14 \cdot 10^{-4}$$

---

$$T_K - ?$$

$$t_1 = 400^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 800^{\circ}\text{C}$$

$$\chi_1 = 1.25 \cdot 10^{-3}$$

$$\chi_2 = 1.14 \cdot 10^{-4}$$

---

$$T_K - ?$$

$$\chi = \frac{C}{T - T_K}$$

$$\chi_1 = \frac{C}{T_1 - T_K}$$

$$\chi_2 = \frac{C}{T_2 - T_K}$$

$$t_1 = 400^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = 800^{\circ}\text{C}$$

$$\chi_1 = 1.25 \cdot 10^{-3}$$

$$\chi_2 = 1.14 \cdot 10^{-4}$$

---

$$T_K - ?$$

$$\chi_1 = \frac{T_2 - T_K}{T_1 - T_K}$$

$$\chi_2 = \frac{T_1 - T_K}{T_2 - T_K}$$

$$\chi_1(T_1 - T_K) = \chi_2(T_2 - T_K)$$

$$T_K(\chi_1 - \chi_2) = T_1\chi_1 - T_2\chi_2$$

$$T_K = \frac{T_1\chi_1 - T_2\chi_2}{\chi_1 - \chi_2}$$

$$T_K = \frac{400 \cdot 1.25 - 800 \cdot 0.114}{1.25 - 0.114}$$

Ответ:  $T_K = 359.6^{\circ}\text{C}$

Задача 8. Определить подвижность и концентрацию электронов в кремнии n-типа (из которого изготовлен датчик Холла), если удельное сопротивление кремния  $2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ , а коэффициент Холла  $2.6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{Кл}$ .

$$\rho = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

$$R_H = 2.6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{Кл}$$

---

$$\mu_n - ? \quad n - ?$$

$$\begin{array}{l|l}
 \rho = 2 \cdot 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м} & R_H = 1/(en) \\
 R_H = 2.6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{Кл} & n = 1/(eR_H) \\
 \hline
 \mu_n - ? & n = 1/(1.6 \cdot 2.6 \cdot 10^{-22}) \text{ м}^{-3} \\
 n - ? & n = 2.4 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}
 \end{array}$$

$$1/\rho = \sigma = e \cdot n \cdot \mu_n$$

$$\mu_n = 1/(\rho \cdot e \cdot n) = R_H/\rho$$

$$\mu_n = 2.6 \cdot 10^{-3} / 2 \cdot 10^{-2} = 0.13 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

$$\text{Ответ: } n = 2.4 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}; \mu_n = 0.13 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$$

Задача 9. В образце германия подвижность дырок  $0.19 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , а электронов  $0.38 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . В этом образце эффект Холла не наблюдается. Какая часть тока переносится дырками?



$$\mu_p = 0.19 \text{ M}^2/(B \cdot c)$$

$$\mu_n = 0.38 \text{ M}^2/(B \cdot c)$$

---

$$j_p / (j_p + j_n) - ?$$

$$\mu_p = 0.19 \text{ m}^2 / (\text{B} \cdot \text{c})$$

$$\mu_n = 0.38 \text{ m}^2 / (\text{B} \cdot \text{c})$$

---

$$j_p / (j_p + j_n) = ?$$

$$j_p = e \cdot p \cdot \mu_p \cdot E$$

$$j_n = e \cdot n \cdot \mu_n \cdot E$$

$$j_p / (j_p + j_n) = p \cdot \mu_p / (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n)$$

$$\begin{aligned} \mu_p &= 0.19 \text{ m}^2/(\text{B}\cdot\text{c}) \\ \mu_n &= 0.38 \text{ m}^2/(\text{B}\cdot\text{c}) \end{aligned}$$

---

$$j_p/(j_p + j_n) - ?$$

$$R_H = \frac{A}{e} \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{(p\mu_p + n\mu_n)^2}$$

$$n\mu_n^2 = p\mu_p^2 \Rightarrow n = p\mu_p^2/\mu_n^2$$

$$\begin{aligned}\mu_p &= 0.19 \mathcal{M}^2/(B \cdot c) \\ \mu_n &= 0.38 \mathcal{M}^2/(B \cdot c)\end{aligned}$$

---

$$j_p/(j_p + j_n) - ?$$

$$n = p\mu_p^2/\mu_n^2$$

$$j_p/(j_p + j_n) = p \cdot \mu_p / (p \cdot \mu_p + n \cdot \mu_n)$$

$$j_p/(j_p + j_n) = p \cdot \mu_p / (p \cdot \mu_p + p \cdot \mu_p^2 / \mu_n)$$

$$j_p/(j_p + j_n) = 1 / (1 + \mu_p / \mu_n)$$

$$\mu_p = 0.19 \text{ M}^2 / (B \cdot c)$$

$$\mu_n = 0.38 \text{ M}^2 / (B \cdot c)$$

---

$$j_p / (j_p + j_n) = ?$$

$$j_p / (j_p + j_n) = 1 / (1 + \mu_p / \mu_n)$$

$$j_p / (j_p + j_n) = \mu_n / (\mu_n + \mu_p)$$

$$j_p / (j_p + j_n) = 0.38 / 0.57 \approx 0.67$$

ОТВЕТ:  $j_p / (j_p + j_n) = 67\%$