

1) зависимость собствен. конст. от T и μ и др. з.з.

распредел. напр. соотв. в соотв.

ср. Ферми-Дирака: $f(\xi, T) = \frac{1}{e^{\frac{\xi - \xi_F}{kT}} + 1}$

собств. напр.: $\bar{e}$ в з.н или p в в.з.

$n_i = N_c e^{-\frac{\xi_c - \xi_F}{kT}}$; $N_c = 2,5 \cdot 10^{19} \left(\frac{m_c^*}{m}\right)^{3/2} \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2}$ з.н.

$p_i = N_v e^{-\frac{\xi_F - \xi_v}{kT}}$; $N_v = 2,5 \cdot 10^{19} \left(\frac{m_v^*}{m}\right)^{3/2} \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2}$ в.н.

2) Ур-ие Ферми в зонорн. (n-типа) напр.

$\xi_{Fn} = \xi_{Fi} + kT \ln(n_i / n_i)$

Ур-ие Ферми в акц. (p-типа) напр.

$\xi_{Fp} = \xi_{Fv} + kT \ln(N_v / p_i)$

3) Перенос носителей в напр.

a) $V_{gp} = \frac{q \bar{L}}{m}$, $E = \mu E$, где μ - подвижн. нос-лей з.н. [$m^2/V \cdot c$]

$j_n^{gp} = q n \mu_n E$; $j_p^{gp} = q p \mu_p E$; $j = j_n^{gp} + j_p^{gp}$
 $j = \sigma \cdot E \Rightarrow \sigma = q(n \mu_n + p \mu_p)$

b) Из-Рунда: поток j_n (в рез. диор.) $\sim$ град конц.

$j_n = -D_n \frac{dn}{dx}$; $j_p = -D_p \frac{dp}{dx}$

D - коэф. диор. [cm^2/c]

$j_n^{диор} = q D_n \frac{dn}{dx}$; $j_p^{диор} = -q D_p \frac{dp}{dx}$

Связи между D и μ :

$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n = \chi_T \mu_n$; $D_p = \frac{kT}{q} \mu_p = \chi_T \mu_p$

$j = j_n^{gp} + j_n^{диор}$ - общ. ток

4) зависимость электропровод. от T .

$\sigma_i(T) = q(\mu_n(T) + \mu_p(T)) \sqrt{N_c(T) N_v(T)}$
 $= e^{-\frac{E_g}{2kT}} = \sigma_0 e^{-\frac{E_g}{2kT}}$

зависимость $\rho_{об-пн}$ от T : $\mu_T = AT^{-3/2}$

5) неравновесн. нос-ли

$N_{po} = N_i^2$ - зн. собствен. масс

полн. конц.: $N = N_o + \Delta N = N_o + N_{уб}$

$\Delta n \Delta p \neq N_i^2$ $P = P_o + \Delta P = P_o + P_{уб}$

ск-ть возврат. нос-лей: $\chi = d_n n p = V_{рек}$, где d_n - коэф. рек.

равнов.: $V_{рек} = V_{инер}$ ($\chi = g_o$)

6) Уравн. непрерывности

$\frac{\partial \Delta p}{\partial t} = g_o - \chi - \frac{1}{q} \text{div } j_p$

где $\text{div } j_p = \frac{\partial j_{px}}{\partial x}$ - поток напр. по x

$j = q j_n n E + q j_p p E - q \Delta p \frac{\partial p}{\partial x} + q \Delta n \frac{\partial n}{\partial x}$

$n: \frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \Delta p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p E \frac{\partial \Delta p}{\partial x} - \mu_p p \frac{\partial E}{\partial x}$

$p: \frac{\partial \Delta n}{\partial t} = -\frac{\partial n}{\partial x} + \Delta n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n E \frac{\partial \Delta n}{\partial x} + \mu_n n \frac{\partial E}{\partial x}$

7) p-n-переход

$j_{gp} = -j_{гуп}$

конц. нос-лей:

p-типа: $N_p = N_i^2 / N_a$

n-типа: $N_n = N_i^2 / N_d$

8) конст. ради-ть потенциалов

n: $\xi_{Fn} = \xi_c - kT \ln(N_c / n_n)$

p: $\xi_{Fp} = \xi_v + kT \ln(N_v / p_p)$

$\Delta \chi_k = \chi_T \ln \frac{P_{po}}{P_{no}} = \chi_T \ln \frac{N_{po}}{N_{no}}$

$\Delta \chi_k$ (в равновесии соот.) = $\chi_T \ln \frac{N_a N_d}{N_i^2}$

9) ширина зон.

рез. p-n-перех.: $\phi_o = \phi_p + \phi_n = \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_o \Delta \chi_k}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}$
 $\frac{dN_{np}}{dx} \bigg|_{x=0}$ (конц. мен. сужен)

плавн. p-n-перех.: $\phi_o = \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_o \Delta \chi_k}{q a}}$

(град прим. и др.)

конст. велич.: $N_{np}(x) = N_a(x) - N_d(x) = ax$
 $a = \frac{dN_{np}}{dx} \bigg|_{x=0} = \text{const.}$ "grad"

применение смес. перехода

$L_{np} = \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_o (N_a + N_d)}{q} \left(\Delta \chi_k - U_{np} \right)}$

$I_{np} \approx I_{гуп}$; $U_{np} \max < \Delta \chi_k$

$\phi_{об-п} = \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_o (N_a + N_d)}{q} \left(\Delta \chi_k + U_{об-п} \right)}$ (г/см.)

10) Уравн. конст. нос-лей

$P_{no} = P_{po} e^{-\frac{U}{\chi_T}}$; $N_{po} = N_{no} e^{-\frac{U}{\chi_T}}$

полн. конц.

$P_n(0) = P_{no} e^{U/\chi_T}$; $N_p(0) = N_{po} e^{U/\chi_T}$

$\frac{\Delta P_n(0)}{\Delta P_p(0)} = \frac{P_{no}}{P_{po}} = \frac{N_{po}}{N_d} \approx \frac{N_a}{N_d}$

или - Γ конст. нос-лей (идеал. и др.)

дхер - ур-ие нос-лей при перех.

(11) Равнор. кону. нос-лев в р-н-обл.

$$n: \frac{\partial \Delta p}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial x^2} - \mu_p \frac{E \partial \Delta p}{\partial x}$$

$$p: \frac{\partial \Delta n}{\partial t} = -\frac{\partial n}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} + \mu_n \frac{E \partial \Delta n}{\partial x}$$

$$E=0 \text{ - стационар. поле. } \Rightarrow \frac{\partial \Delta p}{\partial t} = 0, \frac{\partial \Delta n}{\partial t} = 0.$$

$$\epsilon_{kp} = \sqrt{D_p \tau_p} \text{ - диф. длина}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \text{ - диф. длина}$$

$$\text{на гр-це: } \Delta p_n(x) = p_{n0} (e^{u/\varphi_T} - 1) e^{-x/L_p} - n$$

$$\Delta p_p(x) = p_{p0} (e^{u/\varphi_T} - 1) e^{-x/L_n} - p$$

(12) Ток смешения

$$I_s = qS \left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n p_{p0}}{L_n} \right) =$$

$$= qS n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p p_{n0}} + \frac{D_n}{L_n p_{p0}} \right) =$$

$$= qS N_0 N_A \left(\frac{D_p}{L_p N_A} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) e^{-u/\varphi_T}$$

$$(\varphi_T = kT/q) \text{ (прямое)} \quad I_s \sim n_i^2 e^{-u/\varphi_T}$$

$$I_{s, \text{обр}} = qS \frac{D_p p_{n0}}{L_p} = qS n_i^2 \frac{D_p}{L_p N_A}$$

(13) Плавн. пробод: $I_{\text{обр}} = M I_s$,

где $M > 1$ - коэф. плав. умнож.

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{u}{u_{\text{кр}}} \right)^2} = \frac{I}{I_s}; \quad \alpha \leq \beta \leq \beta$$

I_s - ток насыщ.
(обуч. токком
первонач. нос.)

резк. $(p \pm n)$ перек.: $u_{\text{кр}} \approx 60 \left(\frac{D_p}{D_n} \right)^{1/2} \left(\frac{N_A}{N_D} \right)^{1/4}$

л. проб - износитель. обл.

14. Туннельн. пробод (в сильн. поле обл.)

$$(15) \text{ барьерн. эмк: } C_{np} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{L_{\text{онз}}} = S \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 q N_A N_D}{2(N_A + N_D)(\phi_{\text{к}} \pm u)}}$$

$$C_{\text{обр}} = S \sqrt{\frac{q \epsilon \epsilon_0}{2(\phi_{\text{к}} \pm u)}}; \quad a = \frac{dN_p}{dx} \Big|_{x=0}$$

$$\text{Диф. эмк: } C_{p, \text{диф}} = \frac{I_p \tau_p}{\varphi_T}; \quad C_{n, \text{диф}} = \frac{I_n \tau_n}{\varphi_T}$$

$$C_{\text{диф}} = C_{p, \text{диф}} + C_{n, \text{диф}} = \frac{I \tau}{\varphi_T}$$

$$\tau = \frac{L^2}{D} \text{ (дл. пробега)}$$

(к. дифуз. эмк)

$$C_{\text{диф}} = I \tau = \frac{I L^2}{D \varphi_T}$$

(16) Диф. эмк

Ток перемещ. эмк

$$j = A T^2 e^{-\varphi/kT} - q \text{ Реларгесонн.}$$

$$\text{где } A = 120 \frac{\text{мЭ}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} = \left[\frac{A}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} \right]$$

обр. смещ. (u отриц. на мет < 0):

$$\varphi_s = \phi_{\text{мн}} + u$$

прям. смещ. ($u > 0$): $\varphi_s = \phi_{\text{мн}} - u$

(17) Биполярн. перем. эмк

$$I_k = \alpha I_3 + I_{pk}, \text{ где } \alpha = \text{коэф. перем. эмк}$$

$$I_3 = I_k + I_b$$

$$I_b = I_3 (1 - \alpha) - I_{ko}$$

$$\alpha = \frac{I_k}{I_3}; \quad \delta(k. \text{ эмк}) = \frac{I_{n3}}{I_{n3} + I_p} = \frac{1}{1 + \frac{I_p}{I_{n3}}}$$

$$\delta(k. \text{ перем. эмк}) = \frac{I_{nk}}{I_{n3}} = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{N_D}{N_A} \right)^2$$

$$\alpha^* (k. \text{ кар. эмк}) = \frac{I_k}{I_{nk}}$$

$$\alpha^* = M = \frac{1}{1 - \left(\frac{u_{\text{кр}}}{u_{\text{проб}}} \right)^2} > 1$$

$$\alpha = \delta \alpha^* = I_k / I_3$$

(18) Уравнения Звонке - Мона.

$$I_3 = I_1 - \alpha I_2$$

$$I_k = \alpha I_1 - I_2$$

$$I_b = I_3 - I_k$$

$$\Rightarrow I_3, I_k, I_b$$

$$I_1 = I_{30} (e^{u_{30}/\varphi_T} - 1)$$

$$I_2 = I_{k0} (e^{u_{k0}/\varphi_T} - 1)$$

$$\alpha I = I_3 / I_k$$

$$\alpha N = I_k / I_3$$

$$\alpha N I_{30} = \alpha I_{k0}$$

(19) ВАХ б. тр-ров в эк. с об

$$I_k = f(u_{k0}) / I_3 = \text{const}$$

$$I_k = \alpha I_3 - I_k (e^{u_{k0}/\varphi_T} - 1)$$

вх. хар.

$$I_3 = f(u_{30}) | u_{k0} = \text{const}$$

$$I_3 = I_{30} (e^{u_{30}/\varphi_T} - 1)$$

(20) ВАХ б. тр-ров в эк. с об

$$I_k = f(u_{k0}) / I_b = \text{const}$$

$$I_k = \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_b + \frac{1}{1 - \alpha} I_{k0} = \beta I_b + (1 + \beta) I_{k0}$$

вх. хар.

$$I_b = f(u_{b0}) | u_{k0} = \text{const}$$

$$I_b = I_{b, \text{рек}} - I_{k0}; \quad I_{b, \text{рек}} = \frac{I_3}{1 + \beta}$$

21. Зав. эк. в. тр. па $g/\text{магнет. ел.м.}$

06 $\chi_3 = \frac{dU_{30}}{dI_3} \cdot \frac{1}{I_3} = \frac{dI_3}{dU_{30}} = I_3 \cdot e^{U_{30}/I_3}$

$\chi_k = \frac{dU_{k0}}{dI_k} = \frac{\kappa \sqrt{U_{k0}}}{I_k}, \kappa = \frac{h^2}{m} \sqrt{\frac{q N d}{2 \epsilon \epsilon_0}}$

07 $\chi_k^* = (1 - \alpha) \chi_k = \frac{\chi_k}{1 + \beta}$

22. Прав. тр. как акм. 4-х-н.

χ -нар

$\begin{cases} U_1 = \chi_{11} i_1 + \chi_{12} i_2, \text{ где } \chi_{11} = \frac{U_1}{i_1} |_{i_2=0} \\ U_2 = \chi_{21} i_1 + \chi_{22} i_2 \end{cases}$

$\chi_{12} = \frac{U_1}{i_2} |_{i_1=0}$

$\chi_{21} = U_2 / i_1 (i_2=0)$

$\chi_{22} = U_2 / i_2 (i_1=0)$

g -нар

$\begin{cases} i_1 = g_{11} U_1 + g_{12} U_2, \text{ где } g_{11} = i_1 / U_1 (U_2=0) \\ i_2 = g_{21} U_1 + g_{22} U_2 \end{cases}$

$g_{12} = i_1 / U_2 (U_1=0)$

$g_{21} = i_2 / U_1 (U_2=0)$

$g_{22} = i_2 / U_2 (U_1=0)$

h -нар

$\begin{cases} U_1 = h_{11} i_1 + h_{12} i_2, \text{ где } h_{11} = U_1 / i_1 (i_2=0) \\ U_2 = h_{21} i_1 + h_{22} i_2 \end{cases}$

$h_{12} = U_1 / i_2 (i_1=0)$

$h_{21} = U_2 / i_1 (i_2=0)$

$h_{22} = U_2 / i_2 (i_1=0)$

23. Связь h -нар с нар. Т-в. эк. замкн.

06: $h_{110} = \chi_3 + (1 - \alpha) \chi_5, h_{210} = \alpha$
 $h_{120} = \chi_5 / \chi_k, h_{220} = 1 / \chi_k$

07: $h_{113} = \chi_5 + (1 + \beta) \chi_3, h_{213} = \beta$
 $h_{123} = \frac{\chi_3}{\chi_k^*}, h_{223} = 1 / \chi_k^*$

24. ПТГП: $\epsilon_{\text{нз}} = \sqrt{\frac{2 \epsilon \epsilon_0 (N_A + N_D)}{q N_A N_D}} (\phi_{\text{н}} + 1/2 \phi_{\text{г}})$

$\phi_{\text{г}} = \frac{q^2 N_D}{2 \epsilon \epsilon_0} - \phi_k$

$W_k(x) = q \left(1 - \sqrt{\frac{U_{\text{г}} + U_{\text{н}}}{U_{\text{г}}}} \right)$

график макс. ($U_{\text{н}} = \text{max}$): $U_{\text{н}} = U_{\text{г}} - U_{\text{г}}$

25. Сила тока ВАН ПТГП

эк. нар. $I_{\text{эк}} = I_{\text{г}} = f(U_{\text{г}}) |_{U_{\text{н}} = \text{const}}$

век. нар: $I_{\text{е}} = f(U_{\text{н}}) |_{U_{\text{г}} = \text{const}}$

$I_{\text{е}} = \frac{1}{R_k} \left[U_{\text{н}} - \frac{2}{3 \sqrt{U_{\text{г}}}} \left\{ (U_{\text{г}} + U_{\text{н}})^{3/2} - U_{\text{г}}^{3/2} \right\} \right]$

$I_{\text{е макс}} = \frac{1}{R_k} \left[\frac{1}{3} U_{\text{г}} - U_{\text{г}} \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{U_{\text{г}}}{U_{\text{г}}}} \right)^2 \right]$

26. Нар. ток ПТГП

- критич. пред. нар. $S = \frac{dI_{\text{е}}}{dU_{\text{н}}} |_{U_{\text{н}} = \text{max}}$

$S = - \frac{2}{3 R_k} \left(1 - \frac{U_{\text{г}}}{U_{\text{г}}} \right) \cdot \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{U_{\text{г}}}{U_{\text{г}}}} \right]$

- проводимость канала g и $U_{\text{н}}$

$g = \frac{dI_{\text{е}}}{dU_{\text{е}}} |_{U_{\text{г}} = \text{const}}$

27. Уг. МАН-тр.

$n: \phi_{\text{МН}} = \phi_{\text{н}} - \left(\frac{\chi_{\text{н}} + \frac{\partial \epsilon_{\text{г}}}{\partial U_{\text{г}}}}{g} - \phi_k \right) = 0$

$p: \phi_{\text{МН}} = \phi_{\text{н}} - \left(\frac{\chi_{\text{н}}}{g} + \frac{\partial \epsilon_{\text{г}}}{\partial U_{\text{г}}} + \phi_k \right) = 0$

28. Нар. нар.

$U_{\text{нар}} = \underbrace{\sqrt{\frac{2 q \epsilon \epsilon_0 (N_A + N_D)}{C_d}}}_{\text{св. и устр. см}} + 2 \phi_{\text{н}} - \underbrace{\phi_{\text{МН}} - \frac{U_{\text{с0}}}{C_d}}_{\text{устр. см}}$

$2 \phi_{\text{н}} = - \phi_{\text{с нар}} = 2 \phi_{\text{н}} - \phi_{\text{МН}} - \frac{U_{\text{с0}}}{C_d}$

29. $S(\omega) = \frac{S_0}{1 + \frac{\omega}{\omega_s}} = \frac{S_0}{1 + \frac{f}{f_s}}$ - частот. нар. критич., где ω_s, f_s - гранич. частоты

$\tau_s = \frac{L^2}{\mu_n (U_{\text{г}} - U_{\text{нар}})}$