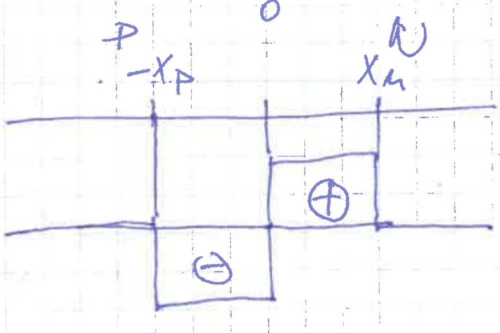
PNE

P-N přechod v rovnováze



$w = x_p + x_N$

$$Q(x) = \begin{cases} -eN_A & -x_p < x < 0 \\ eN_D & 0 < x < x_N \\ 0 & \text{jinde} \end{cases}$$

Podmínka nábojové neutrality $N_A x_p = N_D x_N$

Elektrické pole se počítá z hustoty náboje (Gaussův zákon) Coulombův

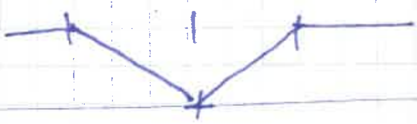
$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \Rightarrow \frac{dE(x)}{dx} = \frac{Q(x)}{\varepsilon}$$

(P) $$E(x) = -\int_{-x_p}^{x} \frac{eN_A}{\varepsilon} dx = -\frac{eN_A}{\varepsilon}(x + x_p) \qquad (-x_p < x < 0)$$

(N) $$= \int_{x_N}^{x} \frac{eN_D}{\varepsilon} dx = \frac{eN_D}{\varepsilon}(x - x_N) \qquad (0 < x < x_N)$$

$E = 0$ jinde

Spojitost pole v $x = 0 \Rightarrow N_A x_p = N_D x_N$



Potenciál ve vrstvě $$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx}$$

(P) $$V(x) = -\int_{-x_p}^{x} E(x)\, dx = \int_{-x_p}^{x} \frac{eN_A}{\varepsilon}(x + x_p)\, dx = \frac{eN_A}{2\varepsilon}(x^2 + 2x x_p)$$

(N) $$= -\int_{x_N}^{x} \frac{eN_D}{\varepsilon}(x - x_N)\, dx = -\frac{eN_D}{2\varepsilon}(x^2 - 2x x_N)$$

spojité v $x = 0$

jinde V je konstantní

Difuzní potenciál

$$V_0 = V(x_N) - V(-x_p) = \frac{e}{2\varepsilon}(N_D x_N^2 + N_A x_p^2)$$

$$= \frac{e}{2\varepsilon} x_N^2 \left(N_D + \frac{N_D^2}{N_A}\right) = \frac{e}{2\varepsilon} x_N^2 \frac{N_D}{N_A}(N_A + N_D)$$

$$\Rightarrow x_N^2 = V_0 \left(\frac{2\varepsilon}{e}\right) \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)}$$

NNE

Diferencial potencial

$$\boxed{w = x_p + x_n = x_p\left(1 + \frac{N_A}{N_D}\right) = \frac{x_p}{N_D}\left(N_D + N_A\right) = \frac{x_n}{N_A}\left(\;+\; \right)}$$

$$V_0 = \frac{e}{2\varepsilon}\left(N_D x_n^2 + N_A x_p^2\right)$$

$$= \frac{e}{2\varepsilon}\left(\frac{N_D N_A^2 w^2}{(\;+\;)^2} + \frac{N_A N_D^2 w^2}{(\;+\;)^2}\right) = \frac{e}{2\varepsilon} N_D N_A \frac{(N_A + N_D)}{(\quad)^2} w^2$$

$$\boxed{V_0 = \frac{e}{2\varepsilon} \frac{N_A N_D}{(N_A + N_D)} w^2}$$

$$x_n^2 = V_0 \left(\frac{2\varepsilon}{e}\right) \frac{N_A}{N_D(\ +\ )} \quad ; \quad x_p^2 = V_0 \left(\frac{2\varepsilon}{e}\right) \frac{N_D}{N_A(\ +\ )}$$

$$W = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e} V_0} \frac{1}{\sqrt{N_A+N_D}} \left(\sqrt{\frac{N_D}{N_A}} + \sqrt{\frac{N_A}{N_D}}\right)$$

$$= \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e} V_0} \frac{1}{\sqrt{N_A+N_D}} \frac{N_D+N_A}{\sqrt{N_A \cdot N_D}}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e} V_0} \sqrt{\frac{N_D + N_A}{N_D N_A}}$$ UMOCNIT

$$V_0 = \frac{e}{2\varepsilon}\left(N_D x_n^2 + N_A x_p^2\right) = \frac{e}{2\varepsilon} N_D x_n^2 \left(1 + \frac{N_D N_A^2}{N_A N_D^2} \frac{x_p^2}{x_n^2}\right)$$

$$= \frac{e}{2\varepsilon} N_D x_n^2 \left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right) = \frac{e}{2\varepsilon} \frac{N_D}{N_A} x_n^2 (N_A + N_D)$$

$$W_0 = x_p + x_n = x_n\left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right) \Rightarrow x_n = \frac{W_0}{1 + \frac{N_D}{N_A}} = \frac{W_0 N_A}{(\ +\ )}$$

$$V_0 = \frac{e}{2\varepsilon} \frac{N_D}{N_A} \frac{W_0^2 N_A^2}{(\ +\ )^2} (\ +\ ) = \frac{e}{2\varepsilon} \frac{N_D \cdot N_A}{(N_D+N_A)} W_0^2$$

Potenciál je kvadraticky závislý na šířce ochuzené oblasti

Einstein /1905/ Brownův pohyb

⇒ poměr mezi difuzním a driftovým koeficientem jakékoliv částice (nabité)

$$\frac{D_e}{\mu_e} = \frac{D_h}{\mu_h} = \frac{k_B T}{e}$$ – difuzi způsobuje tepelný pohyb
– drift v el. poli stimulující náboj

Výpočet proudu elektronů a děr

rovnováze — drift — difuze

$\ominus$ $j_e(x) = e\mu_n n(x) E(x) + e D_e \dfrac{dn(x)}{dx} = 0$

$\oplus$ $j_p(x) = e\mu_p p(x) E(x) - e D_p \dfrac{dp(x)}{dx} = 0$

$$n(x) E(x) = -\boxed{\frac{D_e}{\mu_e}} \frac{dn}{dx} = -\boxed{\frac{k_B T}{e}} \frac{dn}{dx} = -n \frac{dV}{dx} \quad !$$

$$\frac{dn}{n} = \frac{e}{k_B T} dV \quad \Big| \quad \frac{dp}{p} = -\frac{e}{k_B T} dV$$

$$\int_{p_p}^{p_n} \frac{dp}{p} = -\int_0^{V_0} \frac{e}{k_B T} dV \Rightarrow \ln\left(\frac{p_n}{p_p}\right) = -\frac{eV_0}{k_B T} \Rightarrow V_0 = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{p_p}{p_n}\right)$$

$$\int_{n_p}^{n_n} \frac{dn}{n} = \int_0^{V_0} \frac{e}{k_B T} dV \Rightarrow \ln\left(\frac{n_n}{n_p}\right) = \frac{eV_0}{k_B T} \Rightarrow V_0 = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{n_n}{n_p}\right)$$

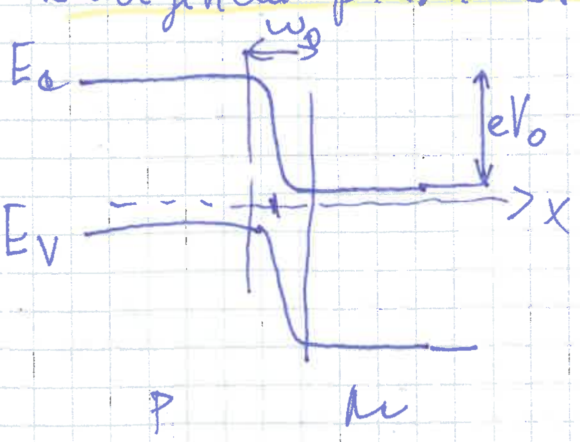
Použijeme dopování

$p_p = N_A$ $\qquad$ $n_n = N_D$

$n_p = n_i^2/N_A$ $\qquad$ $p_n = n_i^2/N_D$

$$\Rightarrow V_0 = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{N_D}{n_i} \cdot \frac{N_A}{n_i}\right)$$

K energetické pásové struktuře je nutné přičíst $\boxed{-eV(x)}$



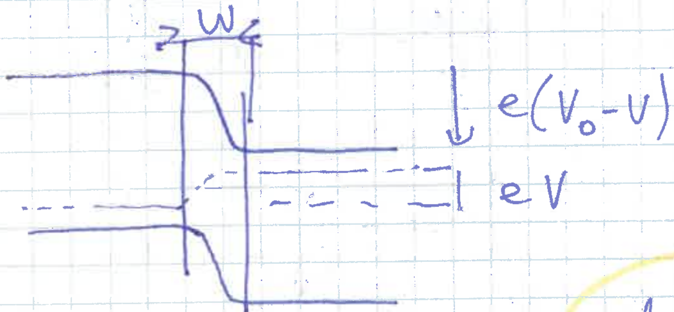
P-N přechod s přiloženým napětím, I-V charakteristika

- mimo rovnováhu
- drift ≠ difuzi

} napěťový schod $V_0 - V$

propustný směr ⊕—▷|—⊖ $V > 0$, $W < W_0$

závěrný směr ⊖—▷|—⊕ $V < 0$, $W > W_0$



jiné okrajové podmínky

ale jinak stejné

$$\boxed{w^2 = \frac{2\varepsilon}{e}\frac{(N_D + N_A)}{N_D \cdot N_A}(V_0 - V)}$$

$$x_p' = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e}\frac{N_D}{N_A(+)}(V_0 - V)} \qquad x_n' = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e}\frac{N_A}{N_D(+)}(V_0 - V)}$$

$$\frac{n(-x_p')}{n_p} = \frac{p(x_n')}{p_n} = e^{eV/k_BT}$$

⇓ rozdíl díky přiloženému napětí

↓ nalevo ↓ napravo

$$\Delta n_p = n_p\left(e^{eV/k_BT} - 1\right) \;;\; \Delta p_n = p_n\left(e^{eV/k_BT} - 1\right)$$

Proud je součet difuzních proudů minor. nosičů na hranicích

$$j = e D_e \frac{\Delta n_p}{L_n} + e D_h \frac{\Delta p_n}{L_p}$$

L_n, L_h ... difuzní délky

$$= e\underbrace{\left(\frac{D_e}{L_n} n_p + \frac{D_h}{L_p} p_n\right)}_{I_0}\left(e^{eV/k_BT} - 1\right)$$

$$\Rightarrow I = I_0\left(e^{eV/k_BT} - 1\right)$$

I_0 určen koncentrací minoritních nosičů

Poměr koncentrací 1 řád $\Rightarrow e^{\frac{eV}{k_BT}} = 10 = \frac{n_n}{n_p}$

$$\Rightarrow \frac{eV}{k_BT} = \ln(10) = \ln\left(\frac{n_n}{n_p}\right)$$

$$V = \frac{k_BT}{e} \ln(10)$$

$$\underline{V = 0{,}06 \text{ Voltů}}$$

$\ln(10) = 2.3$

$T = 300K$

$\frac{k_BT}{e} = 26 \text{ meV}$