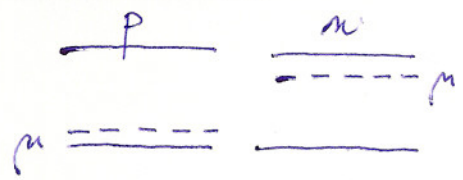


Ⓐ ROVNOVAHA

9 p-n PŘECHOD

konc.  $N_d$  akceptorů



2 polovodiče typu p a n,  
které nejsou v kontaktu

konc.  $N_d$  donorů

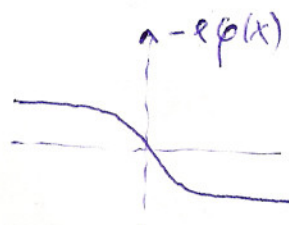
$\leftarrow e$  difúzie elektronů  
 $\rightarrow h$  difúzie díry

po "zapnutí" kontaktů mezi p a n

vnitřní  
elektrostatika

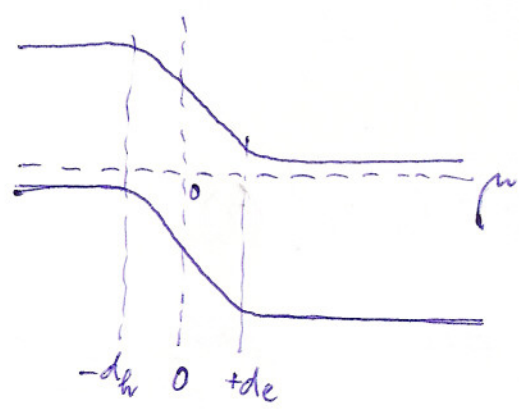


potenciál



energie elektronů

Teda p-n přechod v rovnováze:



rovnovážné koncentrace:

$$n(x) = n_0 e^{\frac{q + e\phi(x) - \Delta}{T}}$$

$$p(x) = p_0 e^{-\frac{q + e\phi(x)}{T}}$$

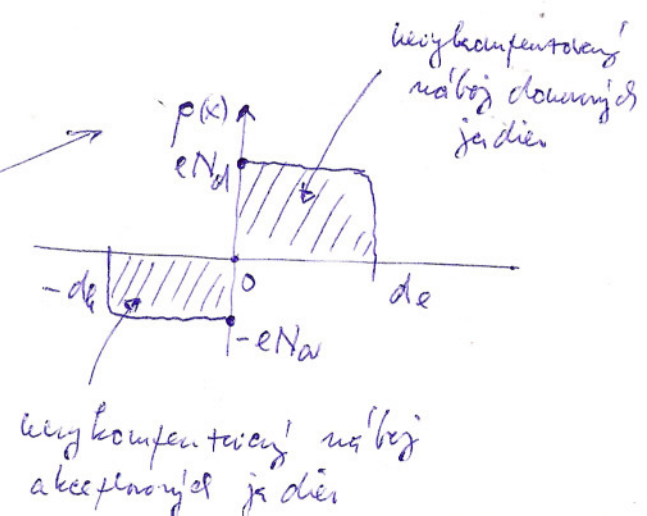
Ohrajové podmínky pro  $\phi(x)$ :

$$\left. \begin{aligned} x \rightarrow \infty: n &\stackrel{!}{=} N_d \rightarrow N_d = n_0 e^{\frac{q + \phi_\infty - \Delta}{T}} \\ x \rightarrow -\infty: p &\stackrel{!}{=} N_a \rightarrow N_a = p_0 e^{-\frac{q + \phi_{-\infty}}{T}} \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{N_d N_a}{n_0 p_0} = e^{\frac{e\phi_\infty - \Delta}{T}}$$

$$\delta\phi = \phi_\infty - \phi_{-\infty}$$

$$e\delta\phi = \Delta + T \ln \left( \frac{N_d N_a}{n_0 p_0} \right)$$

- v intervalu  $-d_n < x < d_e$  je  $\mu$  daleko od látky párov
- $\rightarrow$  malá rovnovážná elektronů a díry
- $\rightarrow$  OCHUDOBNENÁ OBLAST



Výpočet šířky odlehlejších oblastí

$$\Delta\varphi = -\frac{f}{\varepsilon} \rightarrow \text{pro } x > 0: \varphi'' = -\frac{eN_d}{\varepsilon}$$

$$\varphi(x) = \varphi_{\infty} - \frac{eN_d}{2\varepsilon} (x - d_e)^2$$

(pro  $x = d_e$  hledáme spojilost  $\varphi, E = -\varphi'$ )

Třeba tořit

v bodě  $x = 0$ :

$$\text{pro } x < 0: \varphi'' = \frac{eN_a}{\varepsilon}$$

$$\varphi(x) = \varphi_{-\infty} + \frac{eN_a}{2\varepsilon} (x + d_h)^2$$

$$\varphi(0_+) = \varphi_{\infty} - \frac{eN_d}{2\varepsilon} d_e^2$$

$$\varphi(0_-) = \varphi_{-\infty} + \frac{eN_a}{2\varepsilon} d_h^2$$

$$\text{Máme } \varphi(0_+) = \varphi(0_-) \rightarrow$$

$$\boxed{\delta\varphi = \frac{e}{2\varepsilon} (N_d d_e^2 + N_a d_h^2)} \quad (1)$$

Podobně

$$\varphi'(0_+) = \frac{eN_d}{\varepsilon} d_e$$

$\rightarrow$

$$\boxed{N_d d_e = N_a d_h} \quad (2)$$

$$\varphi'(0_-) = \frac{eN_a}{\varepsilon} d_h$$

elektronenutíla: náboj dvojvrstvy = 0

Riesenie rovnice (1,2):

$$d_e = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e^2} \frac{N_a}{N_d} \frac{e\delta\varphi}{N_a + N_d}}$$

$$d_h = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e^2} \frac{N_d}{N_a} \frac{e\delta\varphi}{N_a + N_d}}$$

potom  $\boxed{e\delta\varphi = \Delta + T \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_0 p_0}\right)}$

Typické parametre:

$$N_d, N_a \sim 10^{14} \text{ až } 10^{18} / \text{cm}^3$$

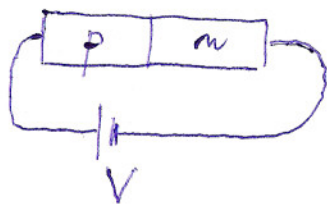
$$\varepsilon e \delta\varphi \sim \text{teV}$$

$$d_e, d_h \sim 10^4 \text{ až } 10^2 \text{ \AA}$$

$$E \sim 10^5 \text{ až } 10^7 \text{ V/m}$$

# B [Elementárna kóia usmenovania]

3

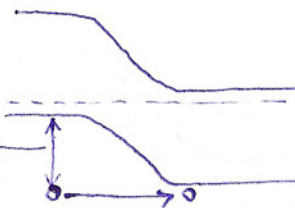


$V > 0 \Leftrightarrow$  kladný potenciál priložený k oblasti p

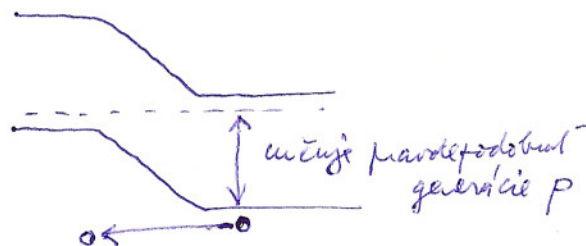
• rovnováha,  $V = 0$

prúd smer:  $J_{h \rightarrow} =$  rekombinačný prúd:

mnoho väčší, pretože v oblasti n je viac diera  
prúdov =  $e \delta p$



$J_{h \leftarrow} =$  generačný prúd:

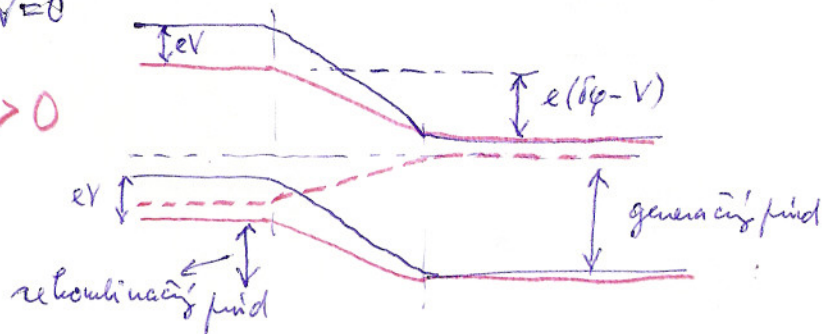


v rovnováhe  $J_{h \rightarrow}(0) = J_{h \leftarrow}(0) = J_{h0}$

• pri kladnej napätí  $V > 0$ :

$V=0$

$V > 0$



generačný prúd

$$J_{h \leftarrow}(V) = J_{h0}$$

$$J_{h \rightarrow}(V) = J_{h0} e^{\frac{eV}{T}}$$

↑  
viššie bariéra  
pre rekombinačný prúd

• dierový prúd pri  $V > 0$ :

$$j_h = e J_h = e (J_{h \rightarrow} - J_{h \leftarrow}) = \boxed{e J_{h0} \left( e^{\frac{eV}{T}} - 1 \right)}$$

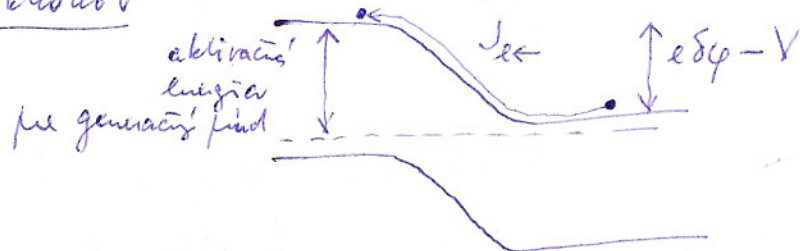
↓

prúd náboja

↓

prúd častíc

## Průdy elektronů



$$J_{e\rightarrow} = \text{generační proud}$$

$$J_{e\leftarrow} = \text{rekombinační proud}$$

rovinně:

$$J_{e\rightarrow}(V=0) = J_{e\leftarrow}(V=0) = J_{e0}$$

pod napětím:

rovnice: variace pro generaci  $\longrightarrow J_{e\rightarrow}(V) = J_{e0}$

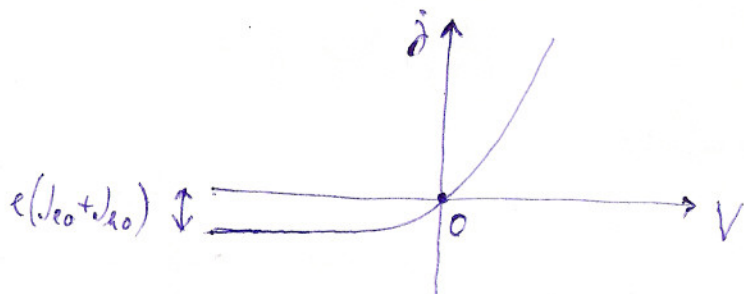
variace: variace pro rekombinaci  $\longrightarrow J_{e\leftarrow}(V) = J_{e0} e^{\frac{eV}{T}}$

$$j_e = -e J_e = e (J_{e\leftarrow} - J_{e\rightarrow}) = e J_{e0} (e^{\frac{eV}{T}} - 1)$$

• celkový proud cez diodu:

$$j = j_e + j_h$$

$$j = e (J_{e0} + J_{h0}) (e^{\frac{eV}{T}} - 1)$$



# C Kvantilátima kória usmeriovania

5

Ked  $V \neq 0$ , pudy a koncentracie profily utno mit  $\neq 0$  rovnice:

$$(1) \quad \vec{J}_e = -\mu_e n \vec{E} - D_e \vec{\nabla} n \quad (\mu_e, \mu_h = \text{polybilivni elektrony, dier})$$

$$(2) \quad \vec{J}_h = \mu_h p \vec{E} - D_h \vec{\nabla} p \quad D_e, D_h = \text{difuzne konstanty } e, h$$

$$(3) \quad \frac{\partial n}{\partial t} = - \frac{n - \bar{n}}{\tau_e} - \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_e \quad \left. \begin{array}{l} \text{rovnice kontinuity} \\ \bar{n}, \bar{p} = \text{rovnovazne koncentracie } e, h \end{array} \right\}$$

$$(4) \quad \frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{p - \bar{p}}{\tau_h} - \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_h \quad \left. \begin{array}{l} \text{rovnice kontinuity} \\ \tau_e, \tau_h = \text{rekombinacne casy } e, h \end{array} \right\}$$

$$(5) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{e}{\epsilon} (p - n + N_d(x) - N_a(x)) \quad \text{Coulomb}$$

Potencialy:

- rovnice (1) mit dat  $\vec{J}_e = 0$  v rovnovaze; ues  $n(x) = n_0 e^{\frac{q + \phi(x) - A}{T}}$

$$\text{potom } \vec{J}_e = -\mu_e n \vec{\nabla} \phi - D_e n \frac{e}{T} \vec{\nabla} \phi \stackrel{!}{=} 0 \Rightarrow \boxed{\mu_e = \frac{e D_e}{T}}$$

$$\text{podobne } \boxed{\mu_h = \frac{e D_h}{T}} \rightarrow \text{Einstein}$$

- rovnice kontinuity: členy s  $\tau$  popisují usachování fotoelektronů a dier:  $e^+ + e^- \rightleftharpoons \text{energia}$

$$\text{v detailnější kórii } \left( \frac{dn}{dt} \right)_{\text{generace rekombinace}} = A - Bnp \xrightarrow{\text{utno plyn}} = - \frac{n - \bar{n}}{\tau_e}$$

$$\text{at rovnováze } \frac{1}{\tau_e} = Bp, \quad \bar{n} = \frac{A}{Bp}$$

podobne

$$\left( \frac{dp}{dt} \right)_{\text{generace rekombinace}} = A - Bnp = - \frac{p - \bar{p}}{\tau_h}$$

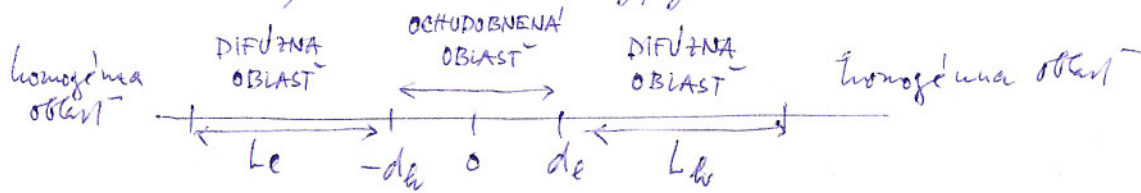
$$\text{ked } \frac{dn}{dt} = 0 \text{ pro } np = n_i^2$$

$$\rightarrow A = B n_i^2$$

$$\rightarrow \boxed{\bar{p} = \frac{n_i^2}{\bar{n}}, \quad \bar{n} = \frac{n_i^2}{\bar{p}}}$$

$$\frac{1}{\tau_h} = Bn, \quad \bar{p} = \frac{A}{Bn}$$

zakl'adne, fe existujuj' 3 typy oblast':



oobmožnica' oblast': velič' difúzná a difúzná prúd, IBA má je prieskum' nájaz  $\rho \neq 0$   
čl'ne' sa lakšie komponujú

predpoklad: je krátka, p'elo  $J_e$  a  $J_d$  môžeme považovať za konštantné

mat'ajme stacionárny stav  $\rightarrow \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} = 0$  v (3,4)

rovnice 1,2 môžeme písať:

$$u' - \frac{e\varphi'}{T}u + \frac{J_e}{De} = 0 \rightarrow u(x) = \left\{ u(-d_e) - \int_{-d_e}^x dx' \frac{J_e}{De} e^{-\frac{e}{T}[\varphi(x') - \varphi(-d_e)]} \right\} \cdot e^{\frac{e}{T}[\varphi(x) - \varphi(-d_e)]}$$

$$p' + \frac{e\varphi'}{T}p + \frac{J_d}{De} = 0$$

$$p(x) = \left\{ p(d_e) + \int_x^{d_e} dx' \frac{J_d}{De} e^{-\frac{e}{T}[\varphi(d_e) - \varphi(x')] } \right\} \cdot e^{\frac{e}{T}[\varphi(d_e) - \varphi(x)]}$$

(riešenia obvolané variáciou konštánt)

z konštantného riešenia vidíme, že

$$\left. \begin{aligned} \frac{T}{e\delta\varphi} \cdot \frac{J_e}{De} \cdot (d_e + d_e) &\ll u(-d_e) \\ \frac{T}{e\delta\varphi} \cdot \frac{J_d}{De} \cdot (d_e + d_e) &\ll p(d_e) \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{členy číselne' prúdov' v } u(x), p(x) \text{ môžeme zanedbať}$$

$$\rightarrow \boxed{\begin{aligned} u(d_e) &= u(-d_e) e^{\frac{e(\delta\varphi - V)}{T}} \\ p(-d_e) &= p(d_e) e^{\frac{e(\delta\varphi - V)}{T}} \end{aligned}} \quad (6) \quad \text{lebo } \varphi(d_e) - \varphi(-d_e) = \delta\varphi - V \quad (\text{vid' schéma na str. 3})$$

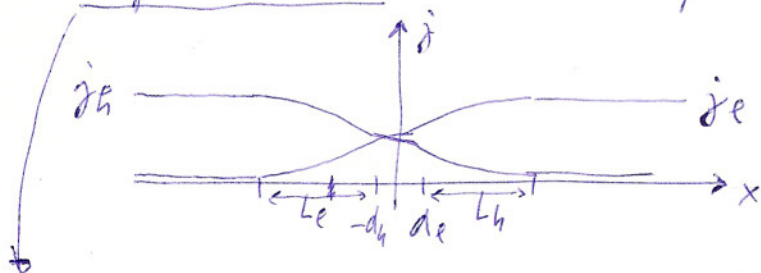
podmínka rovnováhy přechodného náboje  
na hranicích technologické zóny:

$$\begin{cases} n(d_e) - p(d_e) = N_d \\ p(-d_e) - n(-d_e) = N_a \end{cases} \quad (*)$$

z rovnice (\*) a max

$$\begin{cases} p(d_e) = \frac{n_i^2}{N_d} e^{\frac{eV}{T}} \\ n(-d_e) = \frac{n_i^2}{N_a} e^{\frac{eV}{T}} \end{cases}$$

• Difúzní oblast: Koncentrace přechodného náboje na dle rovnice



minoritní nosiče náboje: malé koncentrace  $\Rightarrow$  dominují difúzní proudy

$x > d_e$ :

rovnice 4 v stat. stavě  $\rightarrow$   $\boxed{\frac{p - \bar{p}}{\tau_h} = D_h \frac{d^2 p}{dx^2}}$

difúzní délka  $L_h = \sqrt{D_h \tau_h}$

řešení:  $p(x) = \bar{p} + [p(d_e) - \bar{p}] e^{-\frac{x-d_e}{L_h}}$   $\bar{p} = \frac{n_i^2}{N_d}$

Potéto  $\boxed{J_h(d_e) = \frac{n_i^2}{N_d} \frac{D_h}{L_h} \left( e^{\frac{eV}{T}} - 1 \right)}$  tedy  $J_e = -D_e \frac{dp}{dx}$

$x < -d_e$ :

rovnice 3 v stat. stavě  $\rightarrow$   $\boxed{\frac{n - \bar{n}}{\tau_e} = D_e \frac{d^2 n}{dx^2}}$   $\bar{n} = \frac{n_i^2}{N_a}$

difúzní délka:

$L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$

řešení  $n(x) = \bar{n} + [n(-d_e) - \bar{n}] e^{\frac{x+d_e}{L_e}}$

$\boxed{J_e(-d_e) = -\frac{n_i^2}{N_a} \frac{D_e}{L_e} \left( e^{\frac{eV}{T}} - 1 \right)}$  tedy  $J_e = -D_e \frac{dn}{dx}$

8 celkový proud  $j = e [J_h(d_e) - J_e(d_e)] \approx e [J_h(d_e) - J_e(-d_e)]$

$$j = e n_i^2 \left[ \frac{D_h}{L_h N_d} + \frac{D_e}{L_e N_a} \right] \left( e^{\frac{eV}{T}} - 1 \right)$$

→ rovnice ideální  
diody (Shockley)