

Elektronika

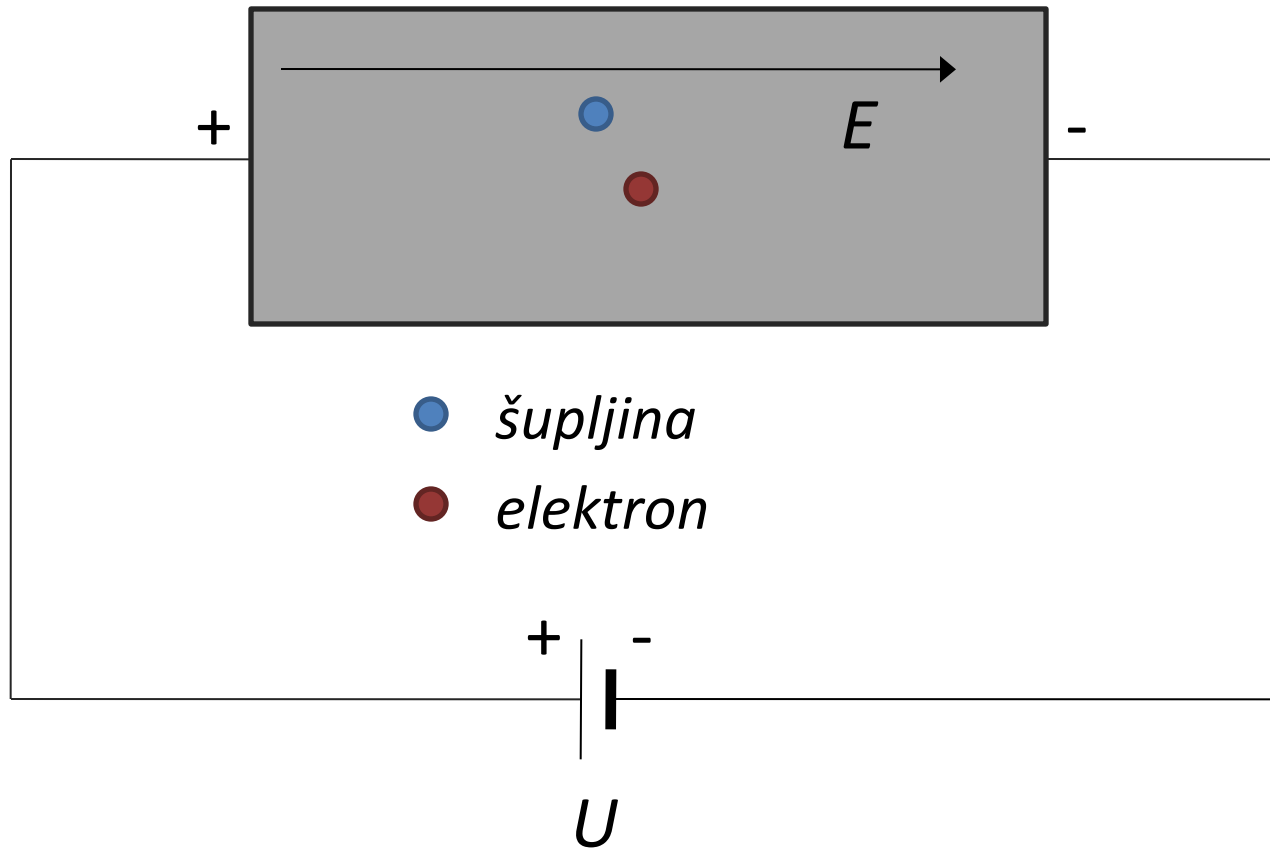
Auditorne vježbe 3

Gibanje nosilaca u poluvodiču

- Usmjereno gibanje nosilaca – električna struja.
- Smjer struje:
 - Jednak smjeru gibanja pozitivnih naboja (šupljina).
 - Suprotan smjeru gibanja negativnih naboja (elektrona).
- Dva osnovna mehanizma:
 - Električno polje – DRIFT
 - Nejednolika raspodjela nosilaca - DIFUZIJA

Driftno gibanje

- Gibanje nosilaca pod utjecajem električnog polja.



Driftno gibanje

- O čemu ovisi driftno gibanje?
- Iznos i smjer priključenog električnog polja!
- Sposobnost gibanja elektrona i šupljine u poluvodiču – **POKRETLJIVOST!**
- Pokretljivost: μ [cm^2/Vs]
 - elektrona μ_n
 - šupljina μ_p
- Pokretljivost ovisi o:
 - gustoći primjesa
 - temperaturi
 - jakosti električnog polja
 - raspršenju i međusobnim sudarima nosilaca i dr.

Pokretljivost nosilaca

- U siliciju na $T=300$ K:

$$\mu = \mu_{\min} + \frac{\mu_{\max} - \mu_{\min}}{1 + \left(\frac{N}{N_{\text{ref}}} \right)^{\alpha}}$$

nosilac	N_{ref} [cm^{-3}]	μ_{\max} [$\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$]	μ_{\min} [$\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$]	α
elektron	$1,12 \cdot 10^{17}$	1430	80	0,72
šupljina	$2,23 \cdot 10^{17}$	460	45	0,72

Električna provodnost

- Električna provodnost: σ [S/cm]
- Ukupna provodnost poluvodiča je zbroj provodnosti zbog gibanja elektrona i šupljina:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p$$

$$\sigma_n = q \cdot n \cdot \mu_n \quad \sigma_p = q \cdot p \cdot \mu_p$$

Zadatak 8.

- Izračunati električnu provodnost silicija pri temperaturi $T=300$ K, ako je gustoća primjesa:
 - a) $N_D=N_A=0$
 - b) $N_D=10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_A=0$
 - c) $N_A=10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_D=0$
 - d) $N_D=N_A=10^{16} \text{ cm}^{-3}$

Rješenje:

- a) ($\mu_p=460 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; $\mu_n=1430 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; $\sigma=3,03 \cdot 10^{-6} \text{ S/cm}$)
- b) ($\mu_p=419,9 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; $\mu_n=1228,3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; $\sigma=1,96 \text{ S/cm}$)
- c) ($\mu_p=419,9 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; $\mu_n=1228,3 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; $\sigma=0,67 \text{ S/cm}$)
- d) ($\mu_p=397,8 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; $\mu_n=1127,1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$; $\sigma=2,44 \cdot 10^{-6} \text{ S/cm}$)

Driftna struja

- Gustoća struje: J [A/cm²]
- Driftno gibanje elektrona:

$$J_{n\,drift} = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot E$$

- Driftno gibanje šupljina:

$$J_{p\,drift} = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot E$$

Difuzijsko gibanje

- Nejednolika raspodjela nosilaca u volumenu poluvodiča.
- Gibanje nosilaca: iz područja veće u područje manje gustoće.
- Difuzijsko gibanje traje dok se gustoća ne izjednači u cijelom volumenu.
- Difuzijska konstanta: D [cm²/s]
 - elektrona D_n
 - šupljina D_p
- Einsteinova relacija: $D_{p,n} = \mu_{p,n} \cdot U_T$

$$U_T = \frac{k \cdot T}{q} = \frac{T}{11605} \quad [V] \quad \text{Naponski temperaturni ekvivalent}$$

Difuzijska struja

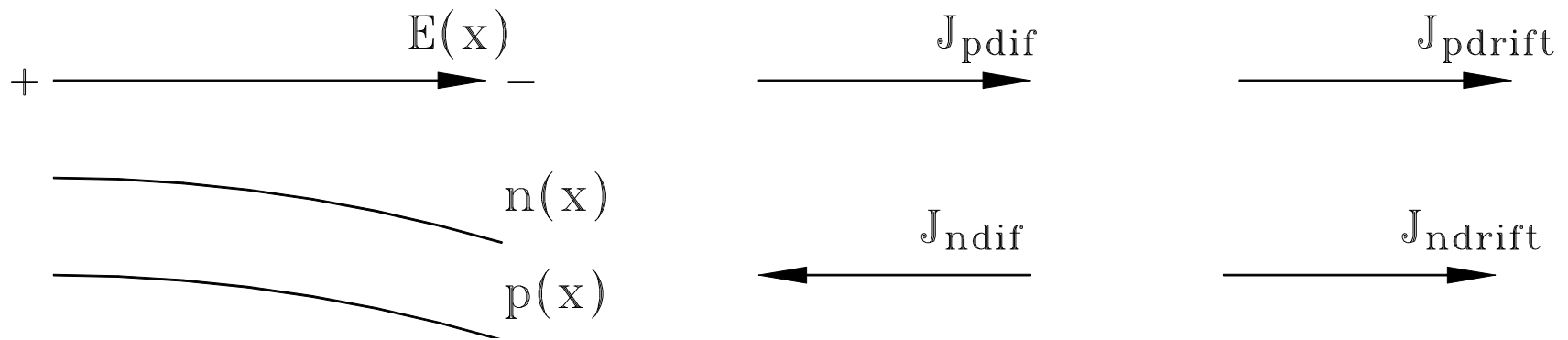
- Gustoća struje: J [A/cm²]
- Difuzijsko gibanje elektrona:

$$J_n = +q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx}$$

- Difuzijsko gibanje šupljina:

$$J_p = -q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$$

Ukupna struja



$$J_n(x) = q\mu_n n(x)E(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad J_p(x) = q\mu_p p(x)E(x) - qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

Generacija i rekombinacija

- Stvaranje nosilaca – **generacija**.
- Nestajanje (ponišćavanje) nosilaca – **rekombinacija**.
- Vrijeme života – vrijeme od nastanka do nestanka.
- Vrijeme života manjinskih nosilaca u Si na $T=300$ K:

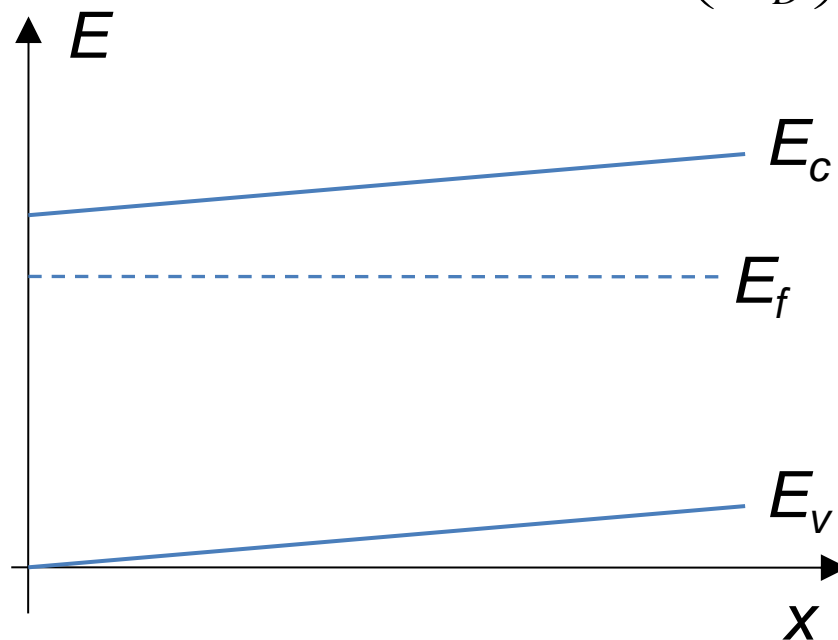
$$\tau_p = \frac{\tau_{p0}}{1 + \frac{N_D}{N_{0D}}}$$

$$\tau_n = \frac{\tau_{n0}}{1 + \frac{N_A}{N_{0A}}}$$

- $\tau_{p0}=3,52 \cdot 10^{-5}$ s, $N_{0D}=7,1 \cdot 10^{15}$ cm⁻³
- $\tau_{n0}=1,7 \cdot 10^{-5}$ s, $N_{0A}=7,1 \cdot 10^{15}$ cm⁻³

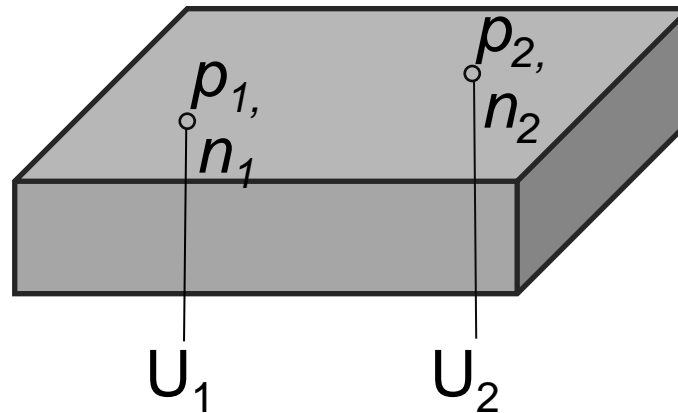
Nehomogeni poluvodič

- Gustoća primjesa nejednoliko raspodijeljena → stalni gradijent gustoće nosilaca.
- Ravnotežno stanje: ukupna struja = 0.
- Za poluvodič n-tipa: $E_C - E_F = kT \cdot \ln\left(\frac{N_c}{N_D}\right)$



Zadatak 9.

- Odrediti razliku potencijala između točaka 1 i 2 sa slike ako je u točki 1 gustoća elektrona $n_1=2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ i šupljina $p_1=1,5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, a u točki 2 je gustoća elektrona $n_2=10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Koliki je iznos gustoće p_2 ? $T=300 \text{ K}$.

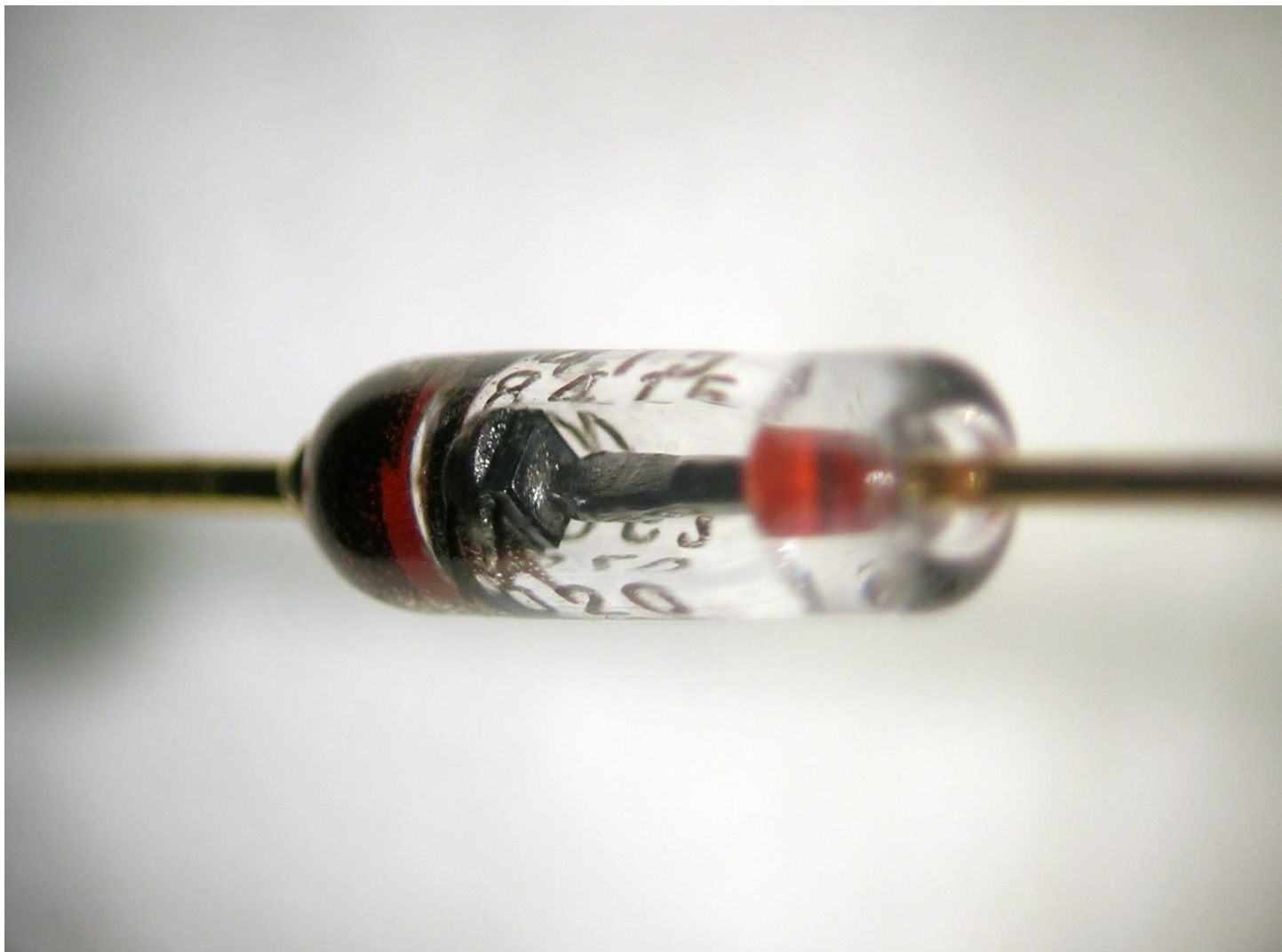


✓ Rješenje:

$$p_2 = 3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3} ;$$

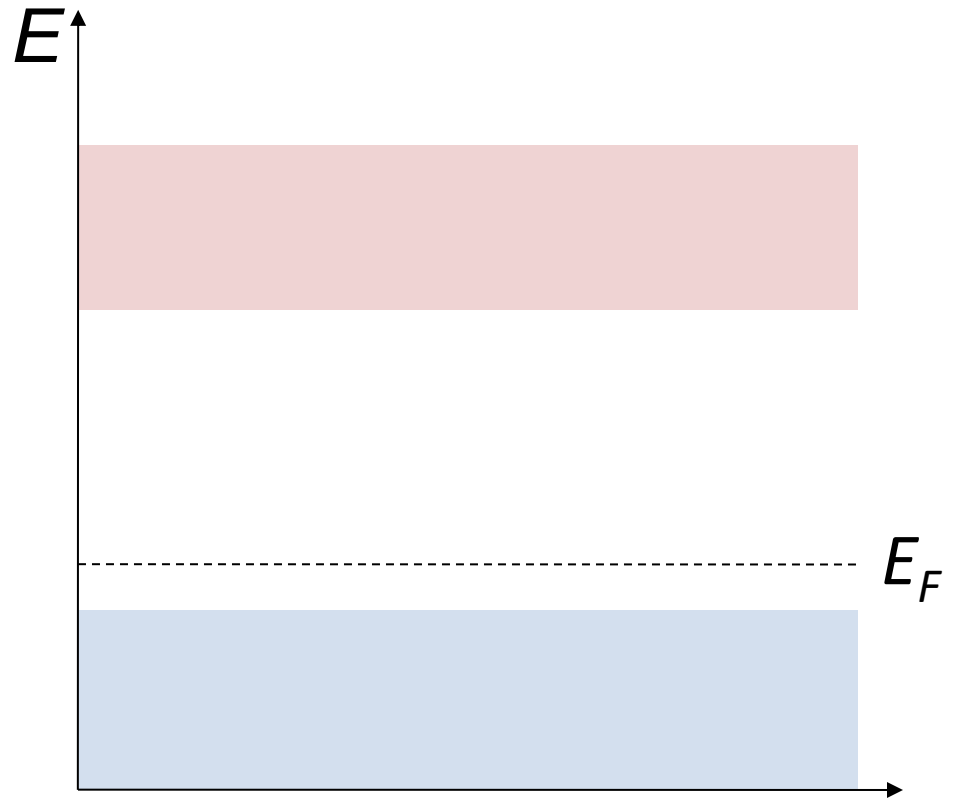
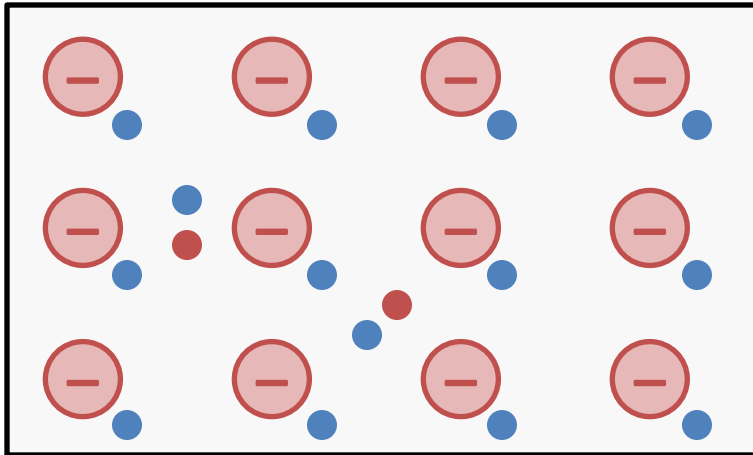
$$U_2 - U_1 = -17,92 \text{ mV}.$$

pn spoj – poluvodička dioda



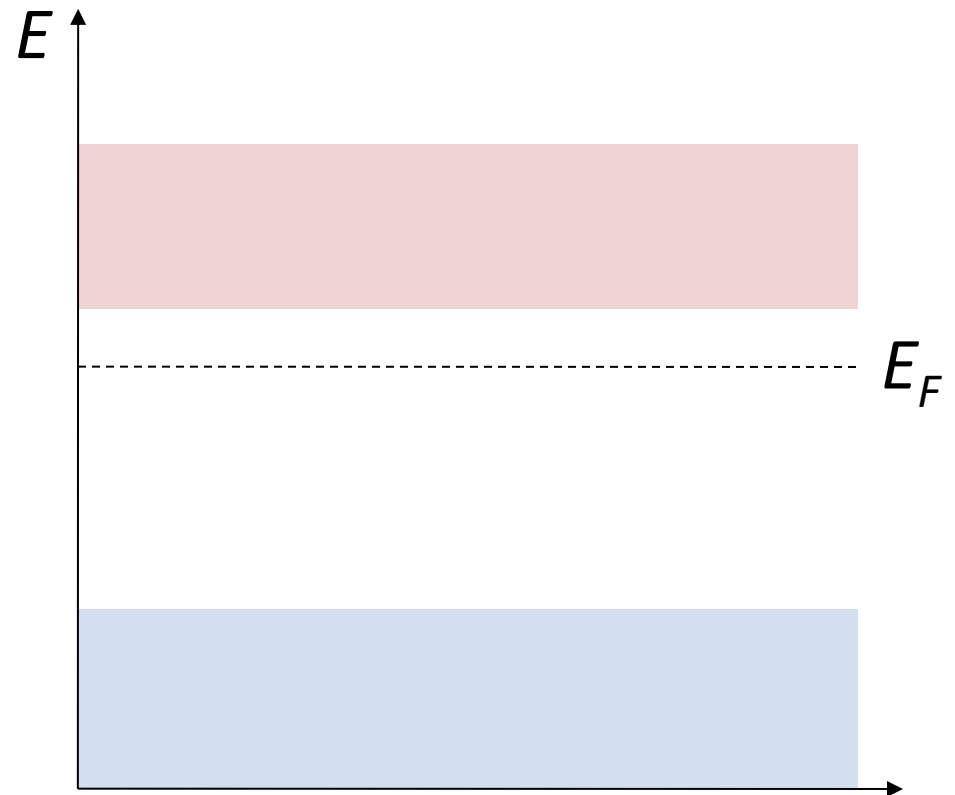
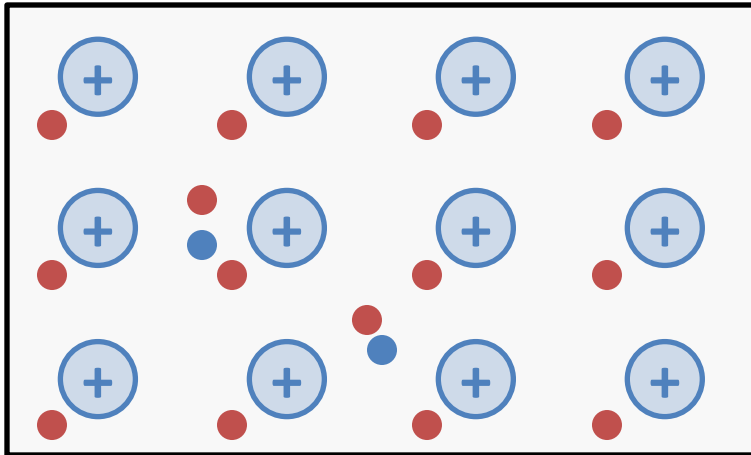
pn spoj

- p-tip

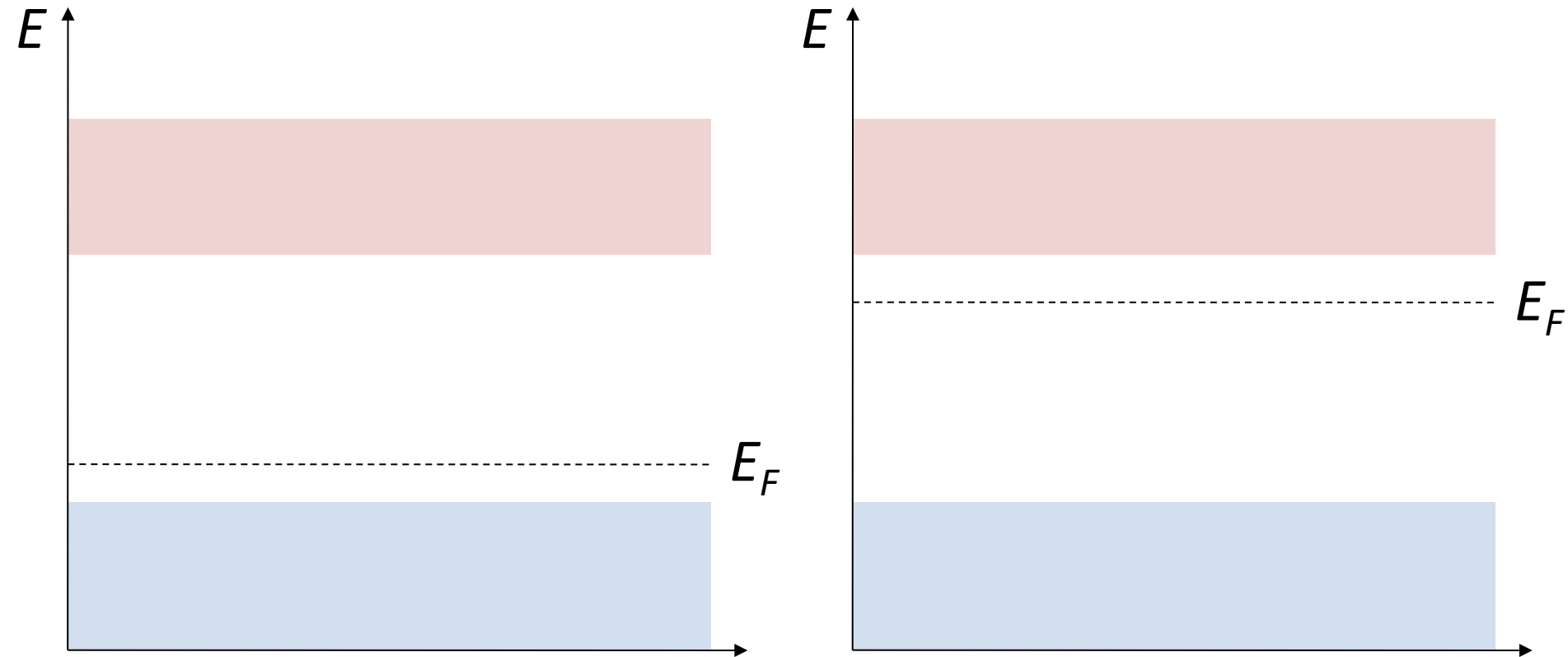


pn spoj

- n-tip

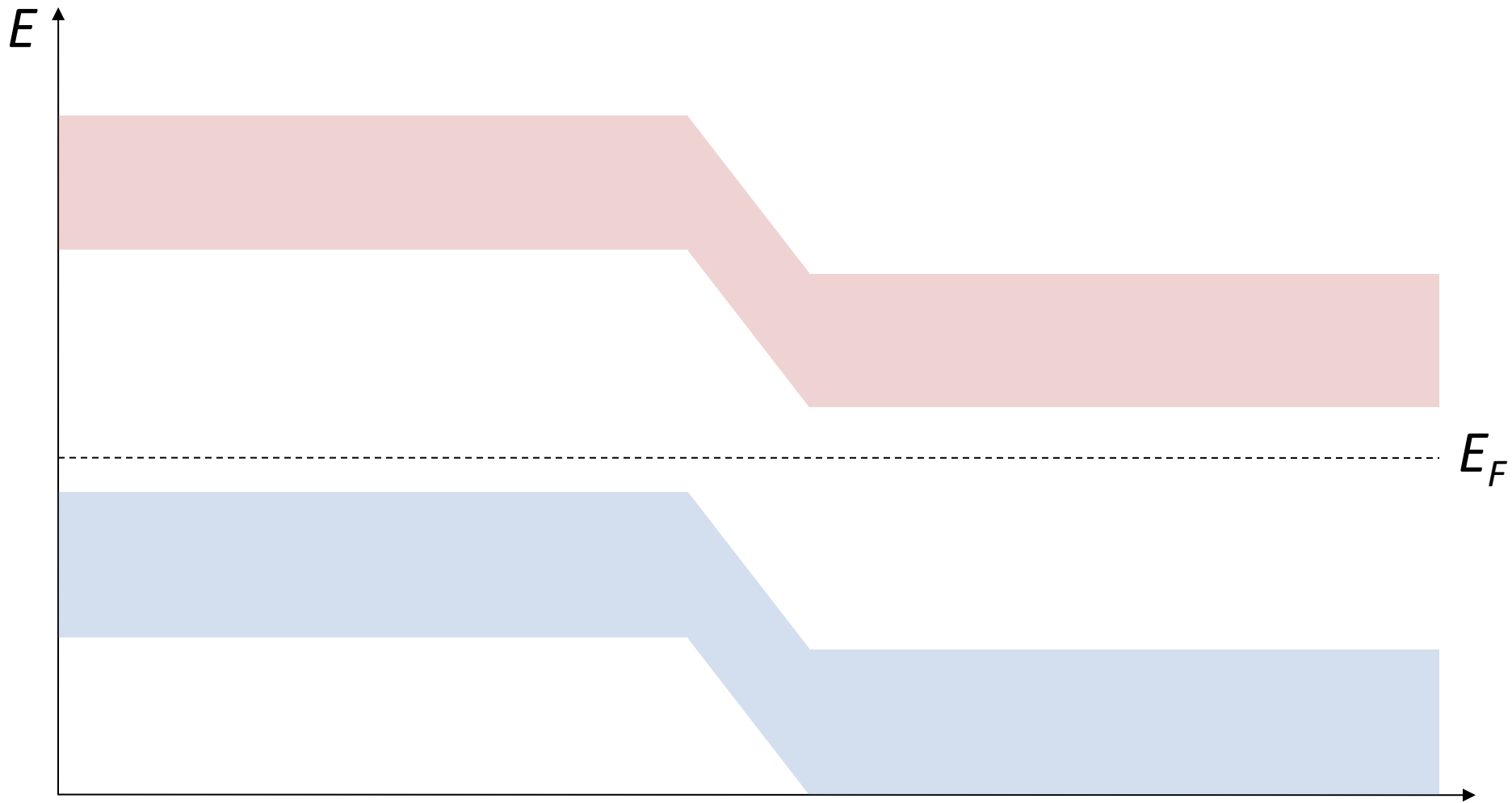


pn spoj

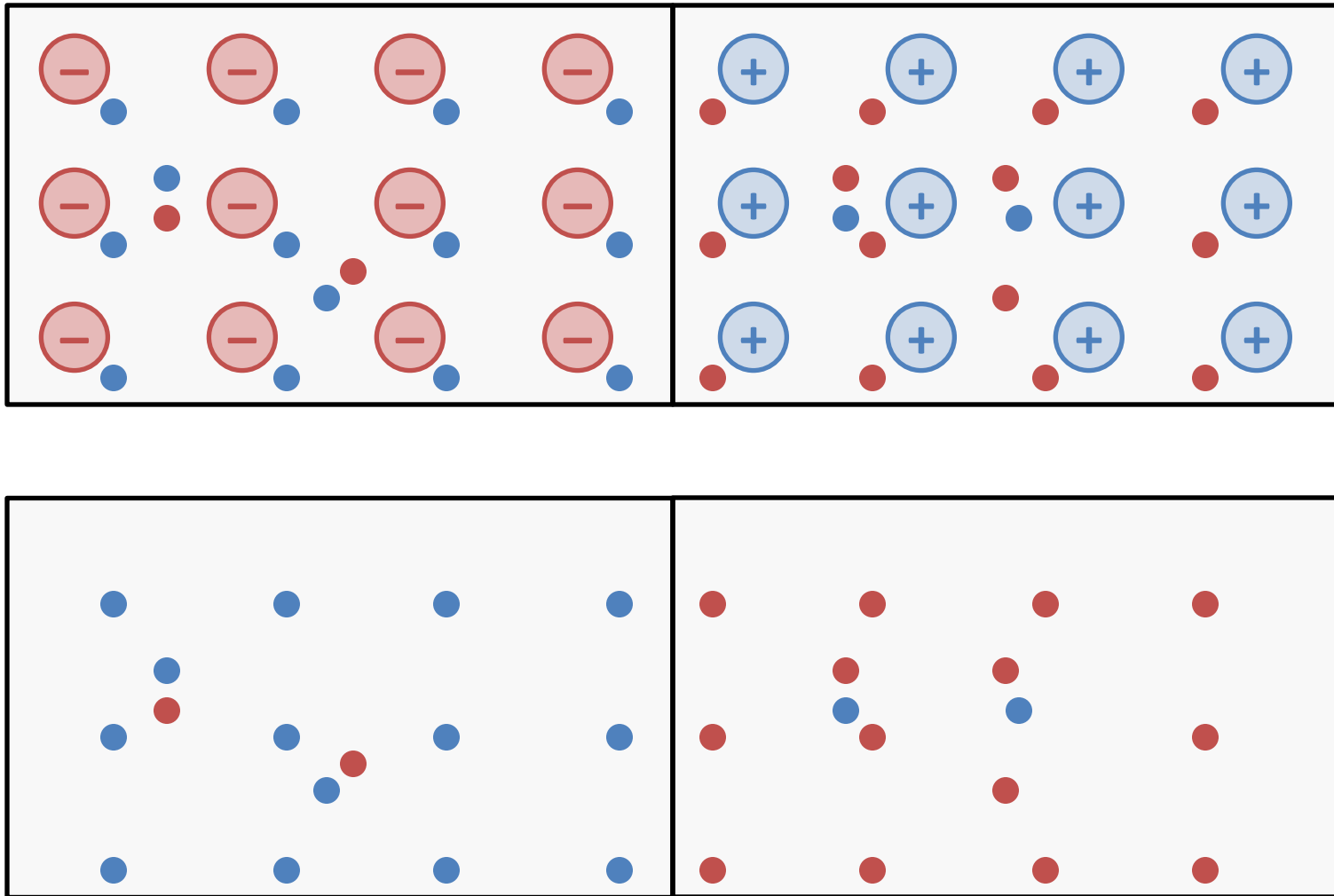


- Fermijeva razina mora biti ista u cijelom poluvodiču!!!

pn spoj

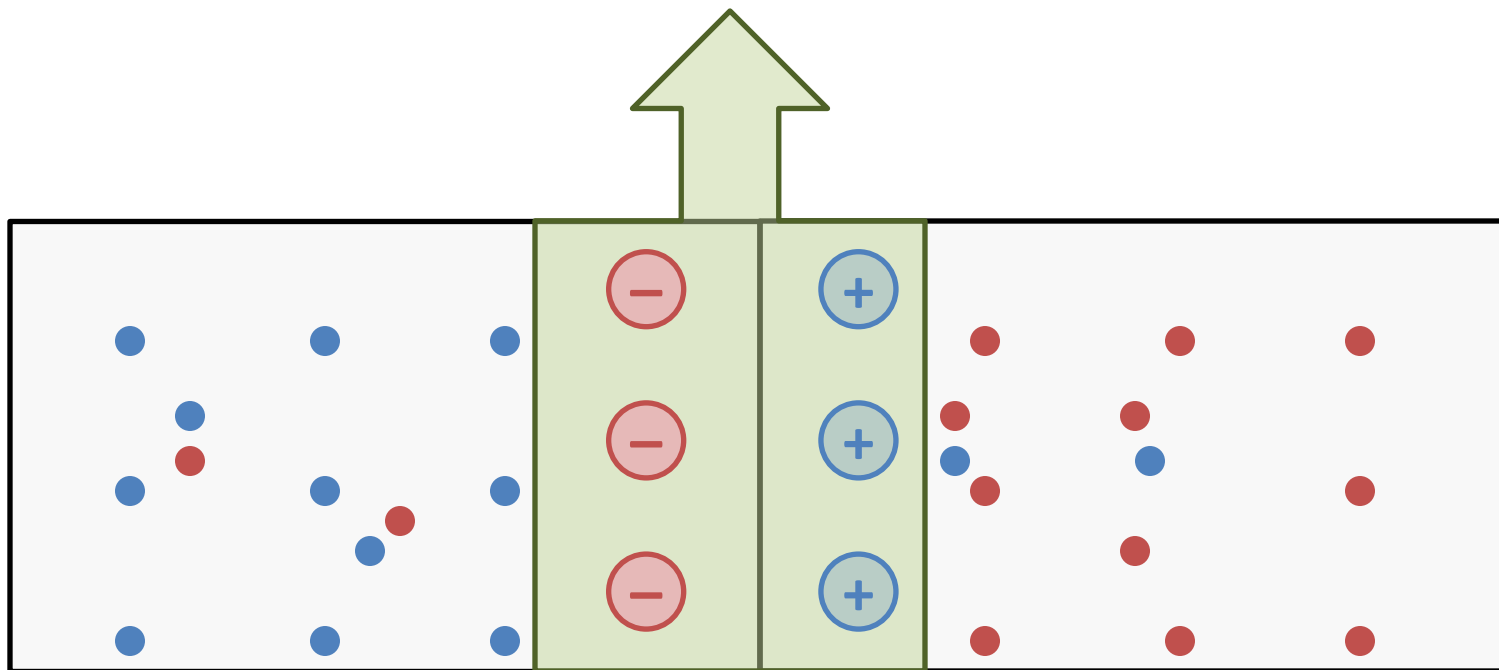


pn spoj

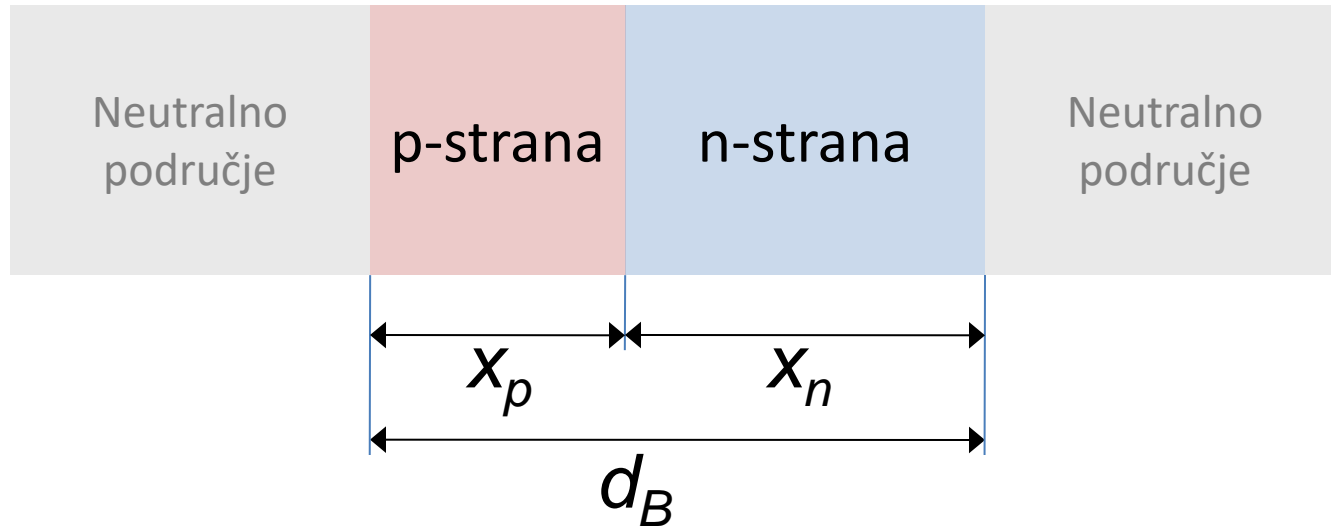


pn spoj

Osiromašeno područje
(pn barijera)



Osiromašeno područje

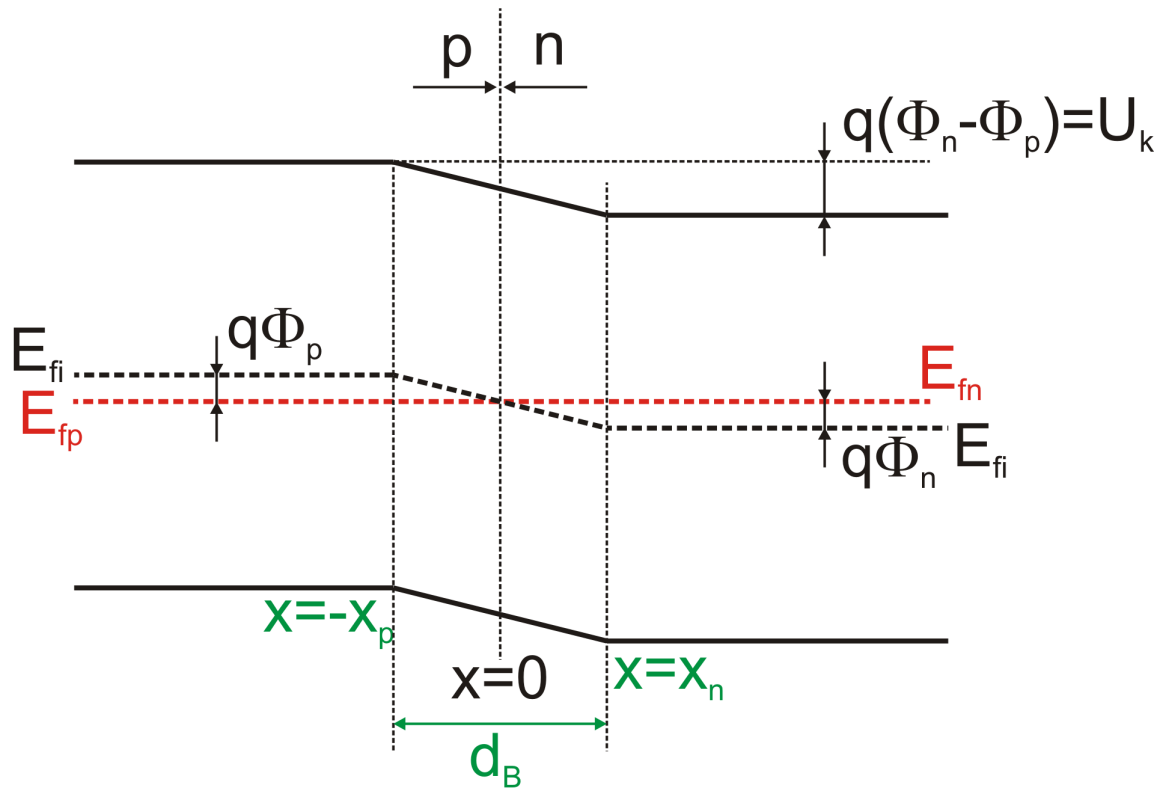


$$d_B = x_p + x_n$$

$$x_p = \frac{N_D}{N_A + N_D} \cdot d_B$$

$$x_n = \frac{N_A}{N_A + N_D} \cdot d_B$$

Kontaktni potencijal



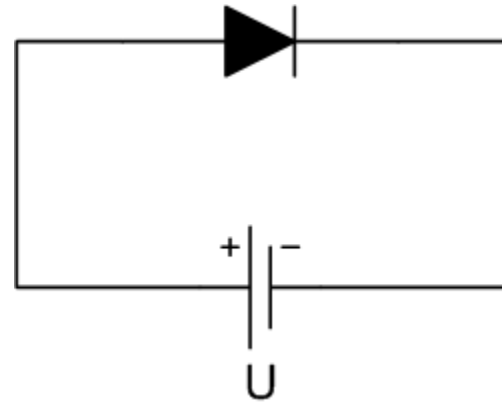
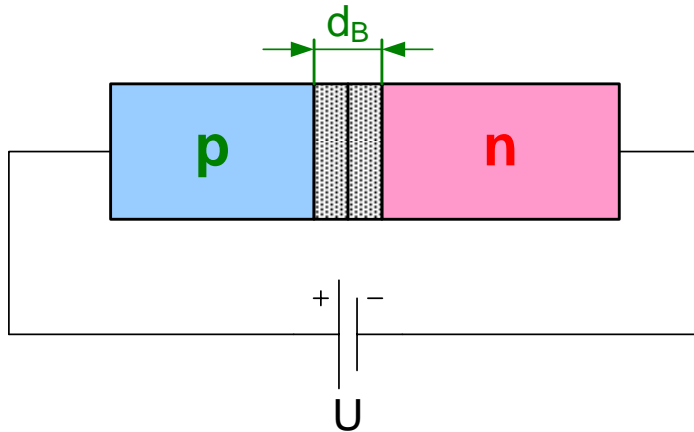
$$U_k = U_T \ln \left(\frac{p_{0p}}{p_{0n}} \right)$$

$$U_k = U_T \ln \left(\frac{n_{0n}}{n_{0p}} \right)$$

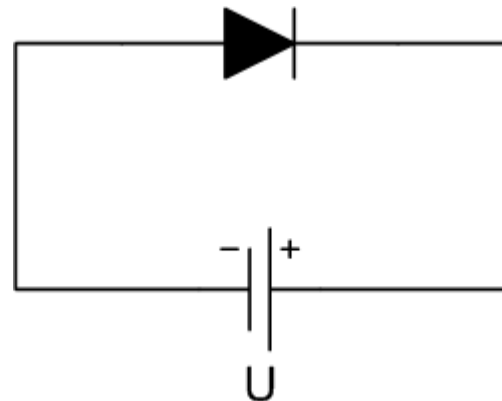
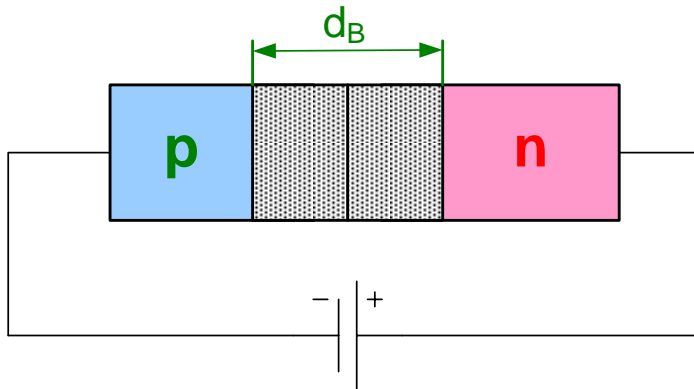
$$U_k = U_T \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right)$$

Polarizacija pn spoja

- Propusna polarizacija



- Nepropusna polarizacija



Polarizacija pn spoja

- Ukupni napon na diodi: $U_{TOT} = U_k - U$
- Širina barijere: $d_B = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \cdot \frac{(N_A + N_D)}{N_A \cdot N_D} \cdot U_{TOT}}$
- Maksimalna jakost el. polja: $E_{\max} = -\frac{2U_{TOT}}{d_B}$
- Barijerni kapacitet: $C_T = \varepsilon \cdot \frac{S}{d_B}$

Zadatak 10.

- Silicijski skokoviti pn spoj ima gustoće primjesa: $N_A=10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $N_D=5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Izračunati širinu barijere, maksimalnu jakost el. polja i barijerni kapacitet ako je površina pn spoja $S=1 \text{ mm}^2$, temperatura $T=300 \text{ K}$ i $\epsilon_r=11,7$ kad je:
 - a) $U=0$
 - b) $U=0,6 \text{ V}$
 - c) $U=-5 \text{ V}$

✓ Rješenje:

$$U_K=0,696 \text{ V};$$

- a) $U_{TOT}=0,696 \text{ V}$; $d_B=9,58 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$; $E_{max}=-14,53 \text{ kV/cm}$; $C_T=108 \text{ pF}$;
- b) $U_{TOT}=0,096 \text{ V}$; $d_B=3,57 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$; $E_{max}=-5,4 \text{ kV/cm}$; $C_T=291 \text{ pF}$;
- c) $U_{TOT}=5,696 \text{ V}$; $d_B=2,74 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$; $E_{max}=-41,56 \text{ kV/cm}$; $C_T=37,8 \text{ pF}$.

Zadatak 11.

- Širina osiromašenog područja skokovitog silicijskog pn spoja pri kontaktnom potencijalu $U_k=0,65$ V iznosi $d_{B1}=0,34$ μm . Odrediti maksimalnu jakost el. polja i širinu barijere pri priključenom naponu $U=-6$ V.

✓ Rješenje:

$$d_{B2}=1,087 \mu\text{m}; E_{\text{max}2}=-122,3 \text{ kV/cm}.$$

Zadatak 12.

- Silicijska dioda sa širokim stranama ima širinu barijere na n-strani $x_n=2\text{ }\mu\text{m}$, a na p-strani $x_p=1,2\text{ }\mu\text{m}$. Na $T=300\text{ K}$ kontaktni potencijal iznosi $U_k=0,65\text{ V}$. Izračunati ravnotežne gustoće većinskih i manjinskih nosilaca na obje strane diode te napon priključen na diodu.

✓ Rješenje:

$$N_D=2,23\cdot 10^{15}\text{ cm}^{-3}; N_A=3,72\cdot 10^{15}\text{ cm}^{-3};$$

$$n_{0n}=N_D; p_{0n}=4,48\cdot 10^4\text{ cm}^{-3};$$

$$p_{0p}=N_A; n_{0p}=2,69\cdot 10^4\text{ cm}^{-3};$$

$$U=-10,4\text{ V}.$$