

# Elektronika

## Auditorne vježbe 2

# Osnovni zakoni u poluvodičima

1) Zakon električne neutralnosti:

$$n_0 + N_A = p_0 + N_D$$

2) Zakon termodinamičke ravnoteže:

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$$

## Zadatak 4.

- Silicijskom poluvodiču dodane su akceptorske primjese gustoće  $N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . Odrediti gustoće slobodnih nosilaca naboja na temperaturama:
  - a)  $0^\circ\text{C}$
  - b)  $27^\circ\text{C}$
  - c)  $175^\circ\text{C}$

### Rješenje:

Primjese=akceptori  $\rightarrow$  p-tip poluvodiča!  $\rightarrow$  prevladavaju šupljine!

Primijeniti osnovne zakone o poluvodičima!

## Zadatak 4.

### ✓ Rješenje:

a)  $T=273,15$  K:

$$E_G=1,1312 \text{ eV}$$

$$n_i=7,72 \cdot 10^8 \text{ cm}^{-3}$$

$$\left. \begin{array}{l} (1) \quad n_0 + N_A = p_0 \\ (2) \quad n_0 \cdot p_0 = n_i^2 \end{array} \right\}$$

$$p_0 = \frac{N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2}}{2}$$

$$N_A^2 \gg n_i^2 \Rightarrow p_0 \approx N_A$$

$$p_0 \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_0 = \frac{n_i^2}{p_0} = 5954 \text{ cm}^{-3}$$

## Zadatak 4.

☑ Rješenje:

b)  $T=300$  K:

$$E_G=1,1245 \text{ eV}$$

$$n_i=8,68 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

$$N_A^2 \gg n_i^2 \Rightarrow p_0 \approx N_A$$

$$p_0 \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_0 = \frac{n_i^2}{p_0} = 7,53 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

## Zadatak 4.

☑ Rješenje:

c)  $T=448$  K:

$$E_G=1,0824 \text{ eV}$$

$$n_i=3,63 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$p_0 = \frac{N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2}}{2} = 1,12 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_0 = \frac{n_i^2}{p_0} = 1,18 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

## Zadatak 5.

- U silicijskom poluvodiču na 350 K izmjerena je gustoća elektrona iznosa  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ . Odrediti tip poluvodiča i neto gustoću dodanih primjesa.

☑ Rješenje:

n-tip

$$N_D = 9,07 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}.$$

## Zadatak 6.

- Silicijskom poluvodiču dodane su akceptorske primjese gustoće  $N_A = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ . Odrediti tip i gustoću primjese koju treba pridodati na  $T = 300 \text{ K}$  da bi se gustoća elektrona:
  - a) udvostručila;
  - b) smanjila peterostruko;
  - c) bila četiri puta manja od gustoće šupljina prije drugog dopiranja.

### ☒ Rješenje:

- a)  $N_D = 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ;
- b)  $N_A = 4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ;
- c)  $N_D = 1,25 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .



## Zadatak 7.

- Silicijskom poluvodiču dodane primjese gustoća  $N_A=10^{13} \text{ cm}^{-3}$  i  $N_D=2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ . Odrediti tip poluvodiča i ravnotežne gustoće slobodnih nosilaca naboja na temperaturama:
  - a)  $T=300 \text{ K}$ ;
  - b)  $T=400 \text{ K}$ .

### Rješenje:

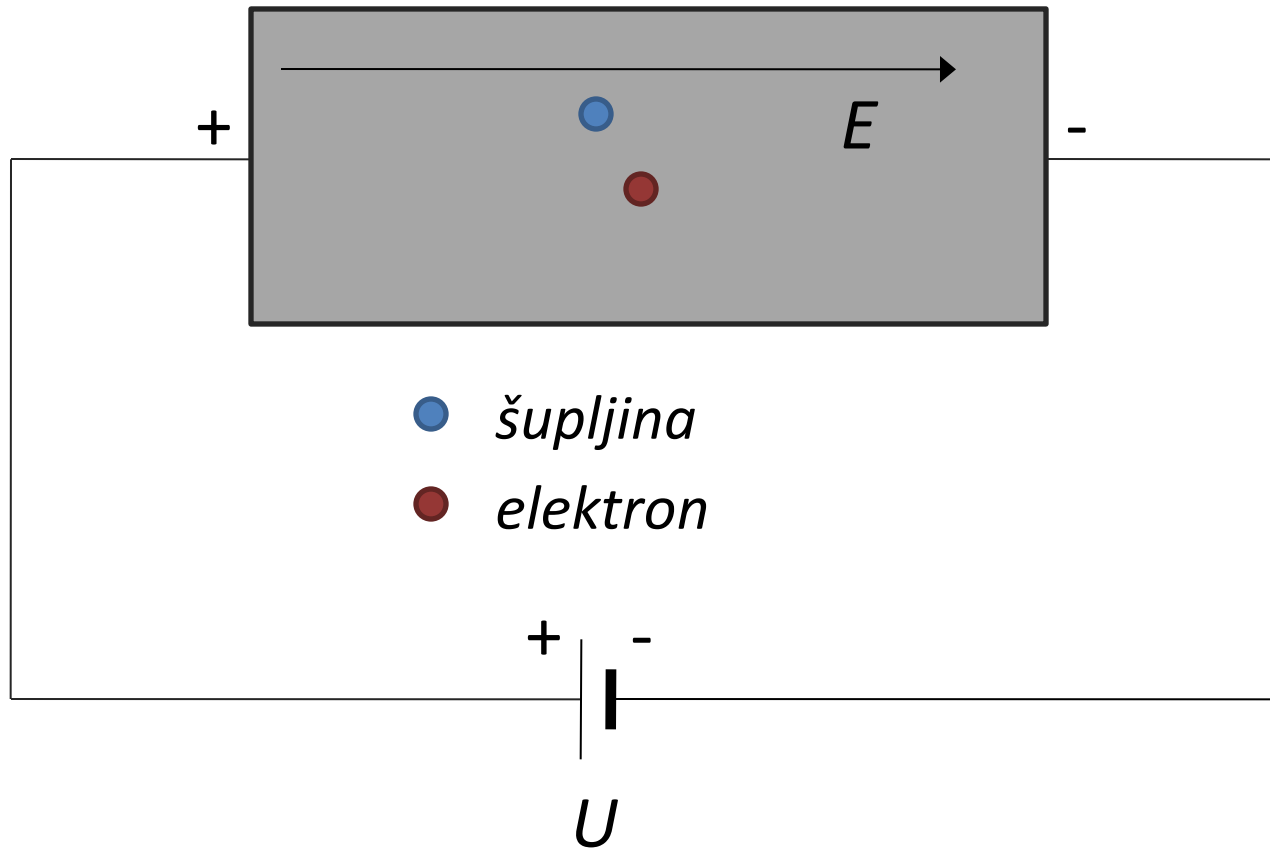
- a)  $n_0=10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_0=10^7 \text{ cm}^{-3}$ ;
- b)  $n_0=1,05 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ,  $p_0=2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ .

# 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:  $\mu$  [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ]
  - elektrona  $\mu_n$
  - šupljina  $\mu_p$
- Pokretljivost ovisi o:
  - gustoći primjese
  - 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	$N_{\text{ref}}$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$\mu_{\max}$ [ $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ]	$\mu_{\min}$ [ $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ]	$\alpha$
elektron	$1,12 \cdot 10^{17}$	1430	80	0,72
šupljina	$2,23 \cdot 10^{17}$	460	45	0,72

# Električna provodnost

- Električna provodnost:  $\sigma$  [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/cm<sup>2</sup>]
- 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:  $D$  [cm<sup>2</sup>/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

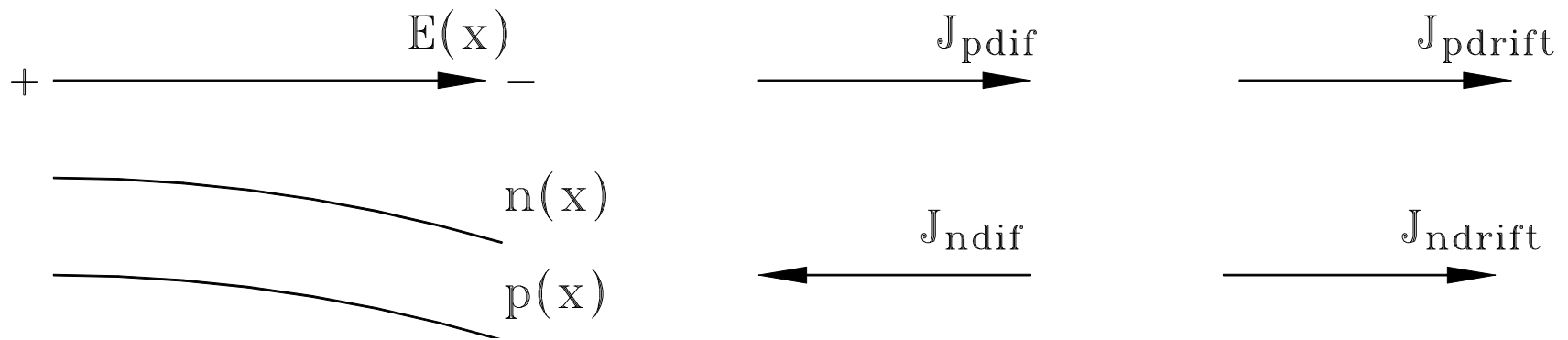
- Gustoća struje:  $J$  [A/cm<sup>2</sup>]
- Difuzijsko gibanje elektrona:

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

- 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:

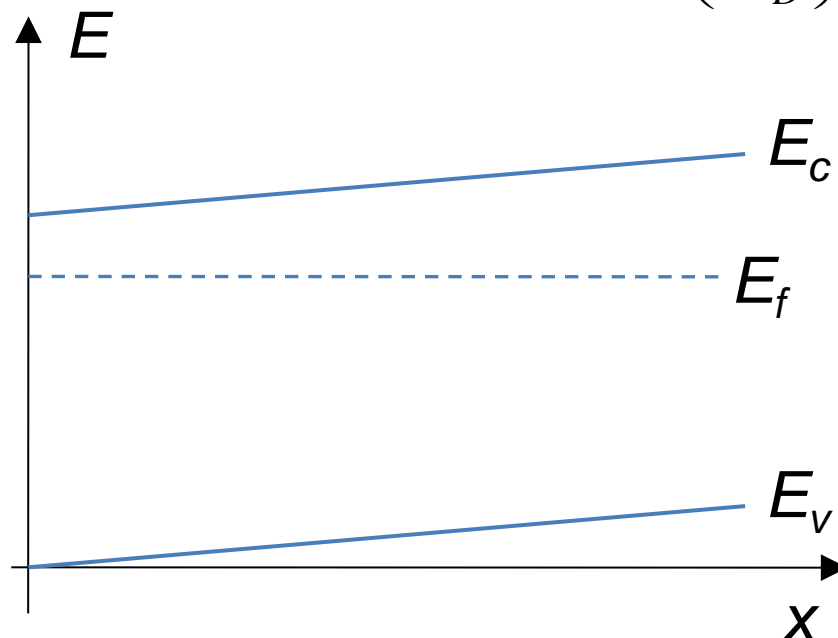
$$\tau_p = \frac{\tau_{p0}}{1 + \frac{N_D}{N_{0D}}}$$

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

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

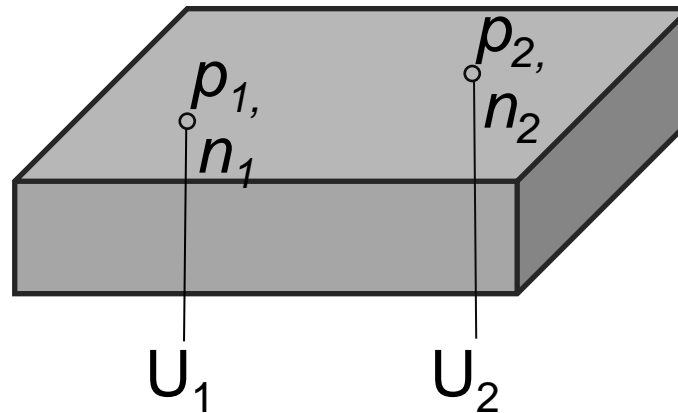
# Nehomogeni poluvodič

- 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:

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

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