



Poluvodiči

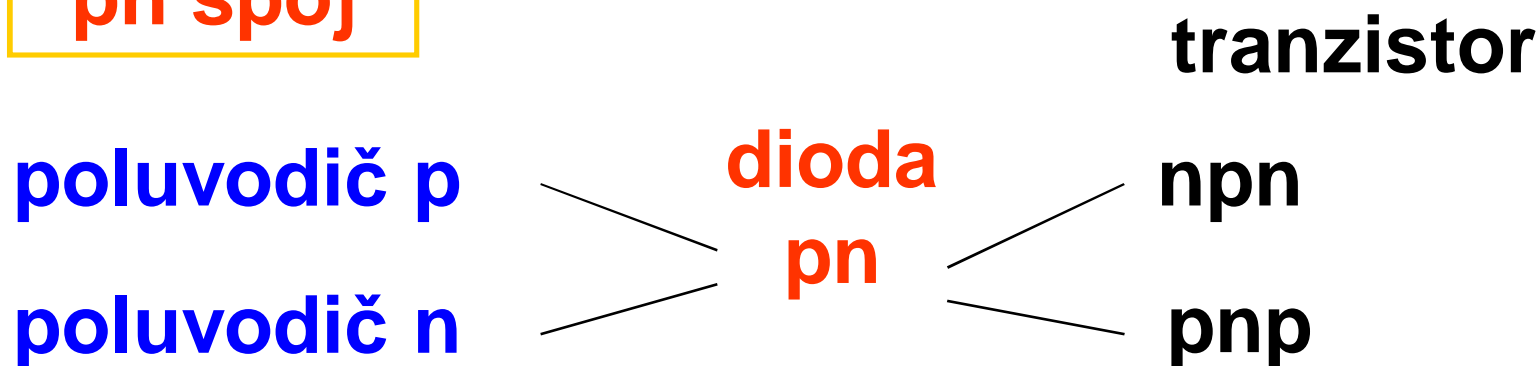
Elektronika - 2. predavanje

FIZIKA (čvrsto stanje; poluvodiči; defekti)

ELEKTRONIČKI ELEMENTI (pn spoj; tranzistor)

ELEKTRONIKA (sklopovi)

pn spoj



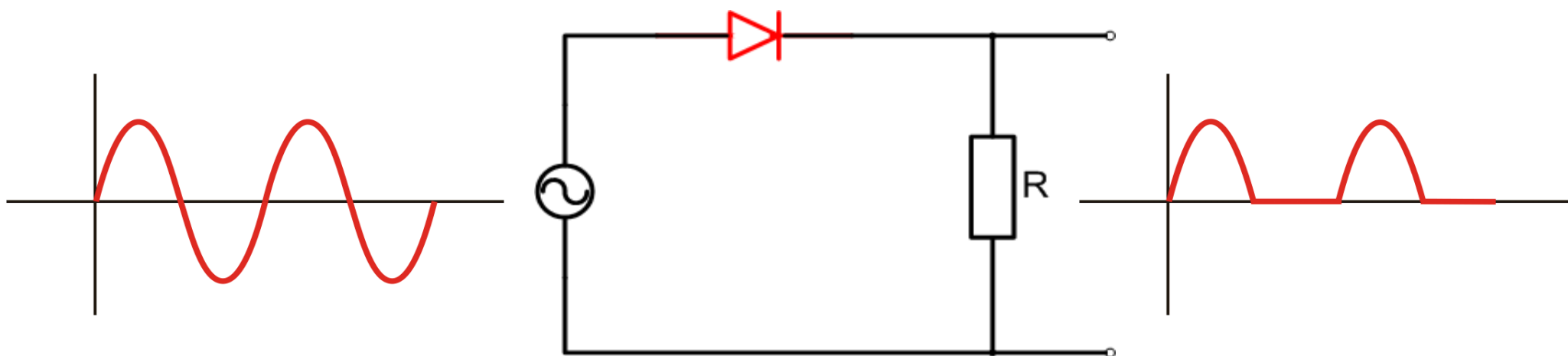
pn-spoj je temelj svekolike elektronike

pn-spoj

- poluvodička dioda
- sunčana ćelija (solar cell)

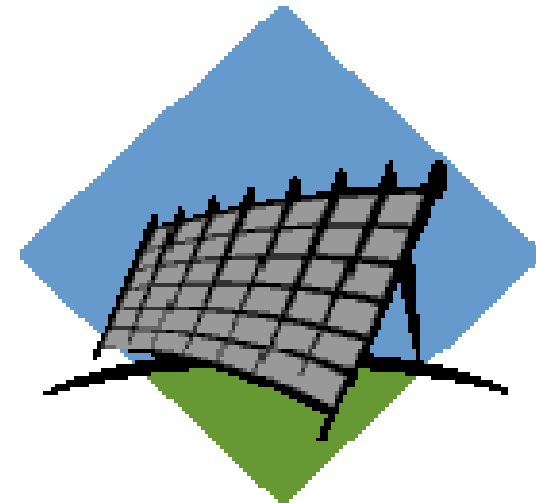
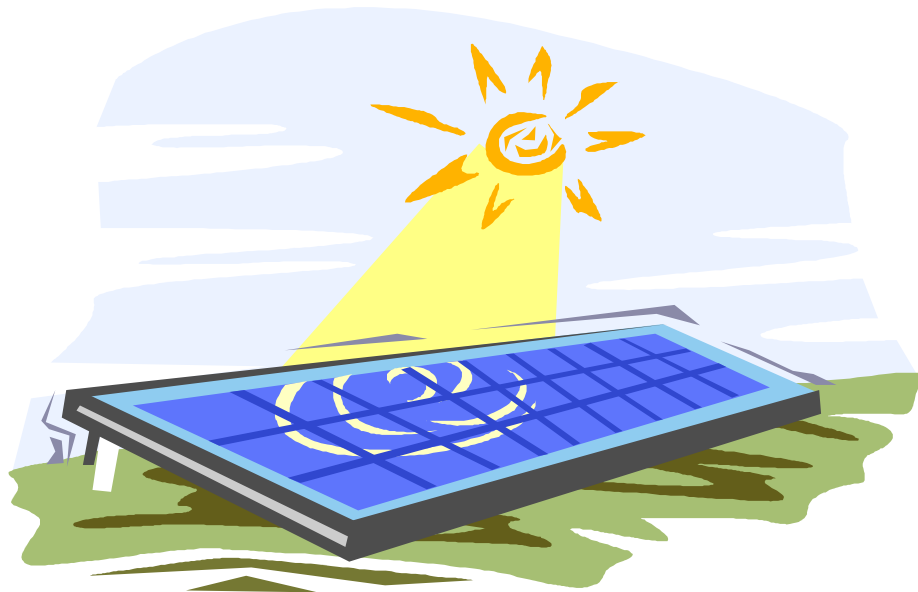
Poluvodička dioda

osnovno svojstvo:
ispravljačko djelovanje



Sunčana ćelija

pretvorba sunčane energije
u električnu



Čvrsta tvar

Podjela čvrste tvari

Podjela s obzirom na stupanj uređenosti

- ◆ **Amorfna struktura**

- ◆ **Kristalična struktura**

monokristali

polikristali



Podjela s obzirom na sile kristalnih veza:

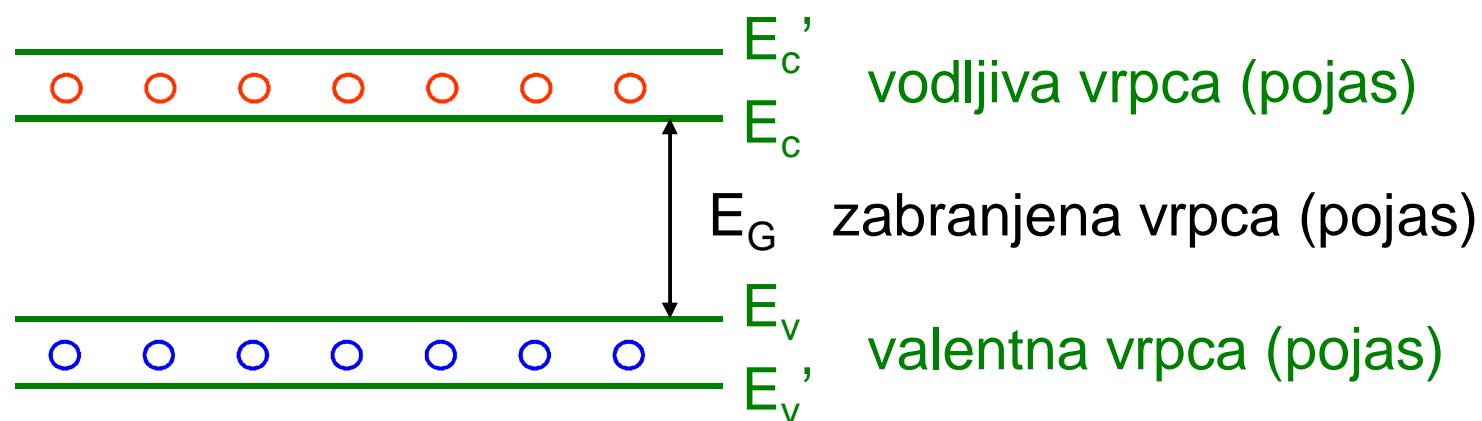
- ♦ ioni
- ♦ metalni
- ♦ molekularni
- ♦ kovalentni

Podjela s obzirom na električna svojstva (provodnost, odnosno otpornost):

- ♦ vodiči
- ♦ poluvodiči
 - INTRINSIČNI (ČISTI)
 - EKSTRINSIČNI (PRIMJESNI)
- ♦ izolatori

Poluvodiči

■ INTRINSIČNI POLUVODIČ



○ šupljina ○ elektron

$$n_0 = p_0 = n_i$$

n_0 – ravnotežna gustoća elektrona

p_0 – ravnotežna gustoća šupljina

n_i – intrinzična gustoća

gustoća : (koncentracija)



- Broj vodljivih elektrona u energijskom intervalu dE :

$$n_0 = \int_{E_c}^{E_c'} f_{FD}(E) \cdot \rho_c(E) dE$$

$\rho_c(E)$ – gustoća kvantnih stanja u vodljivoj vrpici:

$$\rho_c(E) = 4\pi \cdot \left(\frac{2 \cdot m_c}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot (E - E_c)^{\frac{1}{2}}$$

m_c – efektivna masa elektrona

h – Planckova konstanta

$f_{FD}(E)$ – Fermi-Diracova vjerojatnost:



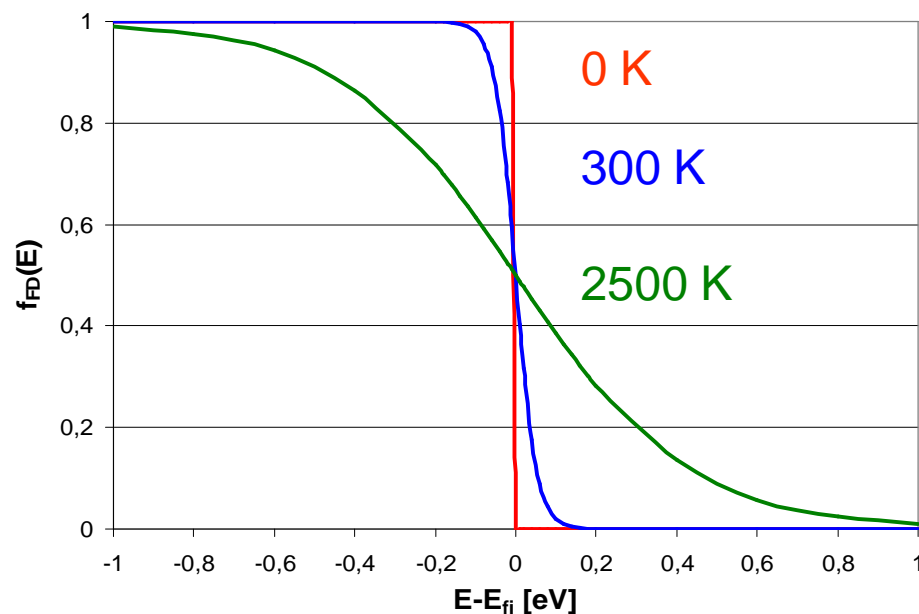
$$f_{FD} = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{E - E_{fi}}{k \cdot T}\right]}$$

E_{fi} – Fermijeva energija u intrinzičnom poluvodiču

k – Boltzmannova konstanta

T – oznaka za termodinamičku temperaturu izraženu u kelvinima

$k \cdot T = E_T$ – energijski temperaturni ekvivalent



Ravnotežna gustoća n_0 dana je izrazom:

$$n_0 = n_i = N_C \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_{fi}}{k \cdot T}\right)$$
$$N_C = 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot m_c \cdot k \cdot T}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$$

N_C – efektivna gustoća kvantnih stanja u vodljivoj vrpici

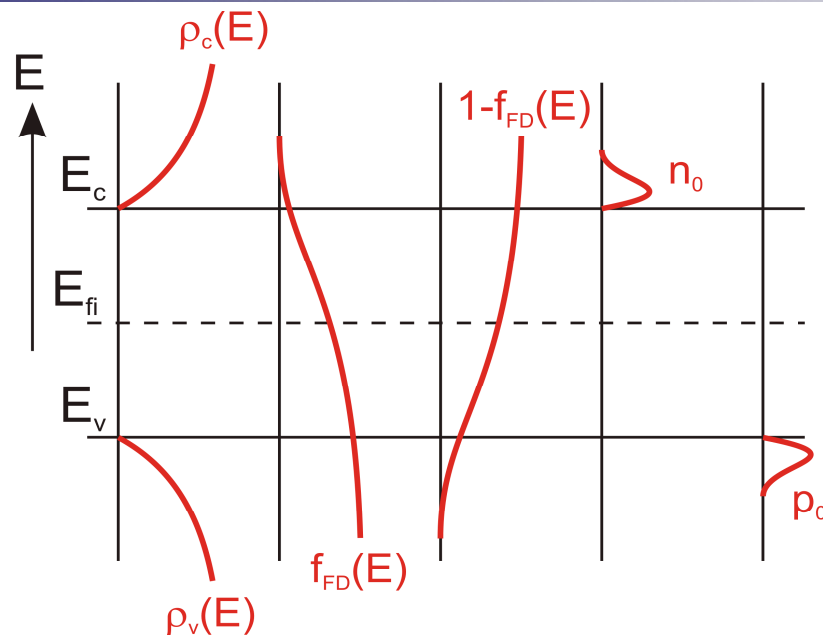
m_c – efektivna masa elektrona

Ravnotežna gustoća šupljina p_0 :

$$p_0 = p_i = N_V \cdot \exp\left(-\frac{E_{fi} - E_v}{k \cdot T}\right)$$
$$N_V = 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot m_v \cdot k \cdot T}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}$$

N_V – efektivna gustoća kvantnih stanja u vodljivoj vrpici

m_v – efektivna masa šupljina

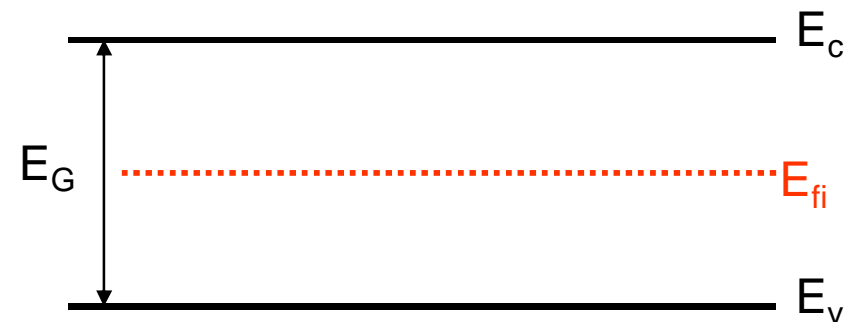


Iz uvjeta $n_0=p_0$ može se odrediti položaj Fermijeve razine u odnosu prema rubu valentne vrpce E_v i vodljive vrpce E_c :

$$N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_{fi}}{k \cdot T}\right) = N_v \cdot \exp\left(-\frac{E_{fi} - E_v}{k \cdot T}\right)$$

$$E_c - E_{fi} = \frac{E_c - E_v}{2} + \frac{k \cdot T}{2} \ln\left(\frac{N_c}{N_v}\right)$$

$$E_c - E_{fi} = \frac{E_c - E_v}{2} + \frac{3}{4} k \cdot T \ln\left(\frac{m_c}{m_v}\right)$$



Zakon termodinamičke ravnoteže:

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2 \qquad n_i^2 = N_V N_C \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{E_T}\right) = N_V N_C \exp\left(-\frac{E_G}{E_T}\right)$$

$$n_i = 2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot m_0}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{m_c(T) \cdot m_v(T)}{m_0^2}\right)^{\frac{3}{4}} \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_G(T)}{2E_T(T)}\right)$$

$$E_T(T) = k \cdot T$$

k – Boltzmannova konstanta ($k=1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1} = 8,61734682 \cdot 10^{-5} \text{ eVK}^{-1}$)

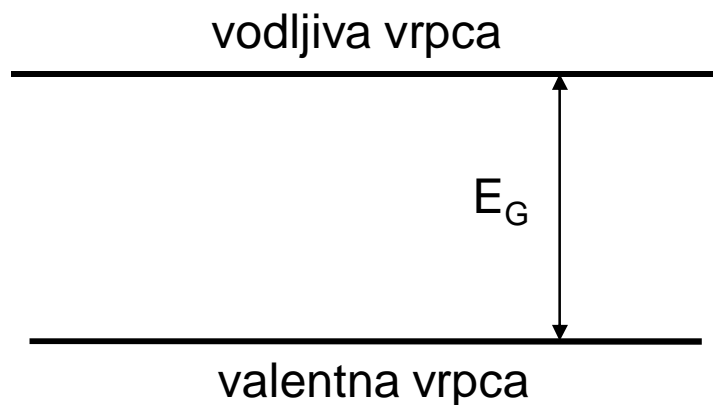
Za silicij uz $T=300 \text{ K}$:

| | |
|-------------------|-------------------|
| $\frac{m_c}{m_0}$ | $\frac{m_v}{m_0}$ |
| 1,18 | 0,81 |

$$n_i(\text{Si}, 300 \text{ K}) = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$



Širina zabranjene vrpce



$$E_G(T) = E_{G0} - \frac{\alpha \cdot T^2}{\beta + T}$$

| E_{G0} [eV] | α [eVK ⁻¹] | β [K] |
|---------------|-------------------------------|-------------|
| 1,17 | $4,73 \cdot 10^{-4}$ | 636 |

$$E_G(T) = a - b \cdot T$$

| a [eV] | b [eVK ⁻¹] |
|----------|--------------------------|
| 1,21 | $3,60 \cdot 10^{-4}$ |

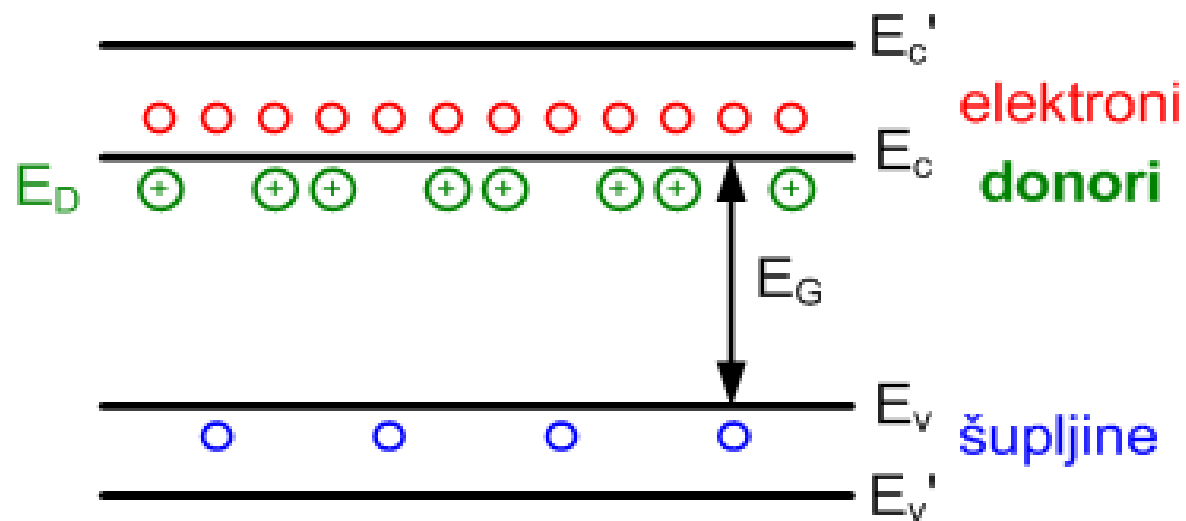
$$E_G(T) = 1,170 - 1,059 \cdot 10^{-5} \cdot T - 6,05 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \quad T \leq 170 \text{ K}$$

$$E_G(T) = 1,1785 - 9,025 \cdot 10^{-5} \cdot T - 3,05 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \quad T > 170 \text{ K}$$



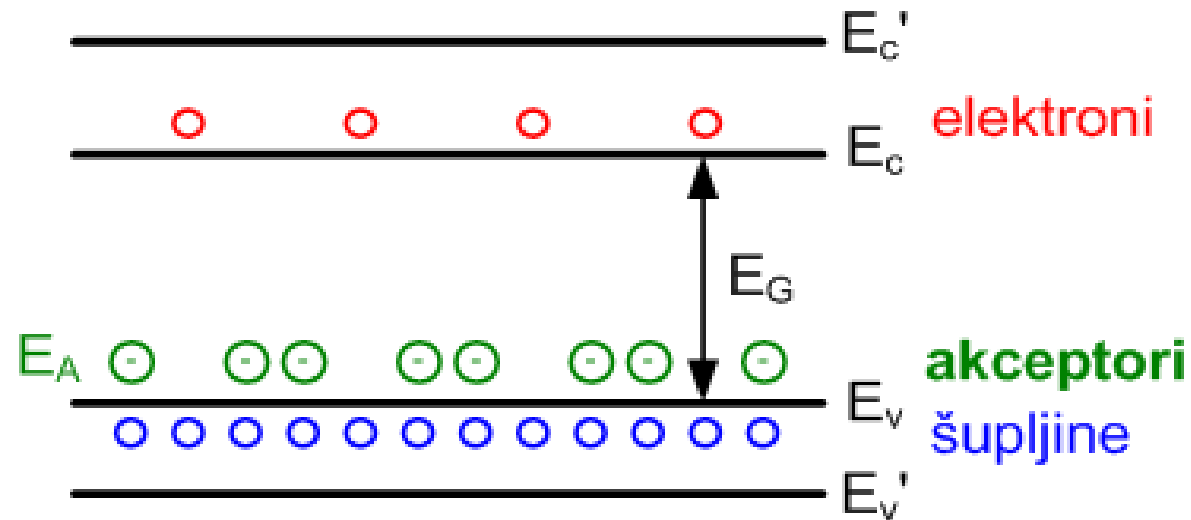
■ EKSTRINSIČNI (primjesni) POLUVODIČ

Poluvodič n-tipa



Primjese su **5-valentni** elementi: **dušik (N)**, **fosfor (P)**

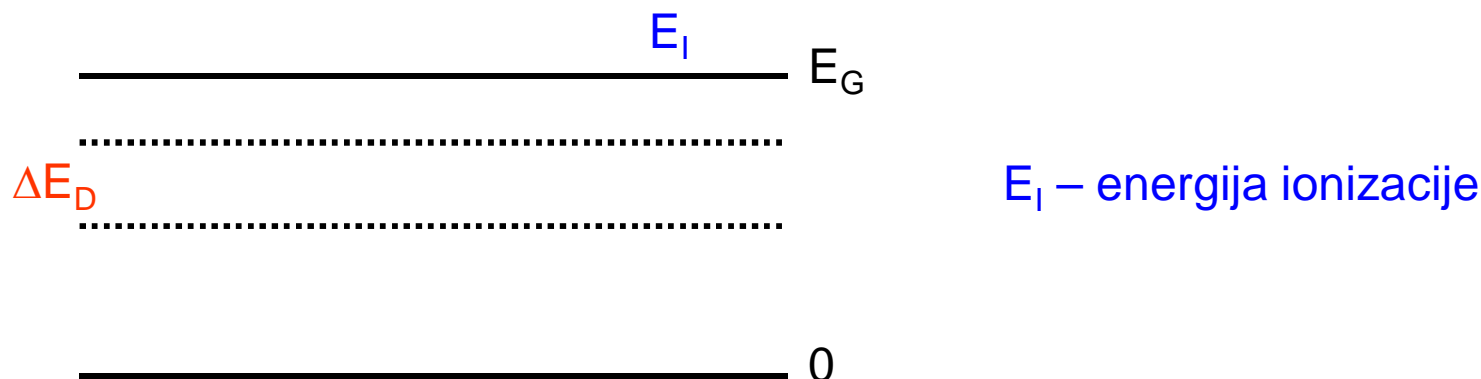
Poluvodič p-tipa



Primjese su **3-valentni** elementi: **aluminij (Al)**, **bor (B)**

Degenerirani poluvodič

Pri gustoćama primjesa **iznad 10^{17} cm^{-3}** diskretne energijske razine donora, odnosno akceptora cijepaju se u **vrpce energija**:



Lanyon & Tuft:

$$\Delta E_G = \frac{3 \cdot q^3}{16 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \sqrt{\frac{N}{\varepsilon \cdot k \cdot T}}$$

ΔE_G – suženje zabranjene vrpce

N – gustoća primjesa

ε – permitivnost poluvodiča

q – naboj elektrona



■ Određivanje gustoće elektrona i šupljina:

$$n_0 = N_C \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{k \cdot T}\right)$$

$$E_c - E_f = k \cdot T \cdot \ln\left(\frac{N_C}{n_0}\right)$$

$$p_0 = N_V \cdot \exp\left(-\frac{E_f - E_v}{k \cdot T}\right)$$

$$E_f - E_v = k \cdot T \cdot \ln\left(\frac{N_V}{p_0}\right)$$

$$n_0 = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_f - E_{fi}}{k \cdot T}\right)$$

$$p_0 = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_{fi} - E_f}{k \cdot T}\right)$$

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2 = N_C \cdot N_V \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{k \cdot T}\right)$$

Zakon električne neutralnosti:

$$N_D + p_0 = N_A + n_0$$

- n-tip:

$$N_A = 0$$

$$n_0 = N_D + p_0$$

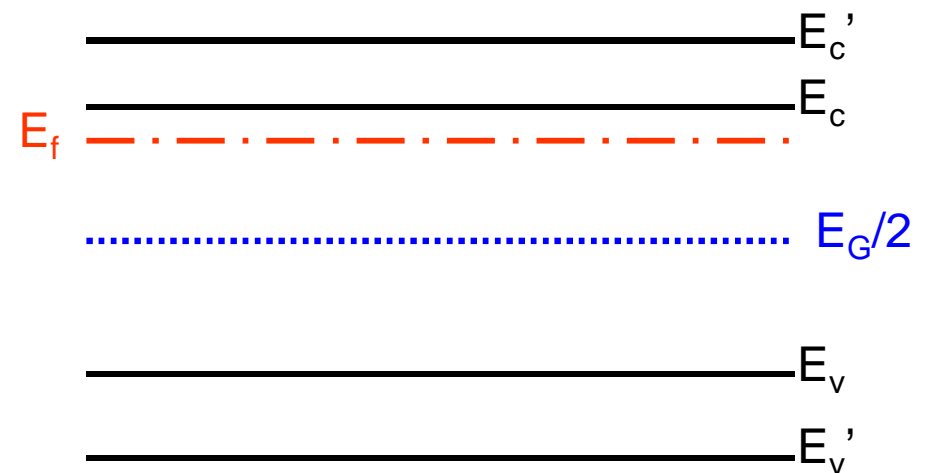
$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$$

$$n_0 = \frac{N_D}{2} + \frac{\sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}}{2}$$

Ako je:

$$N_D^2 \gg 4n_i^2 \Rightarrow n_0 \approx N_D; p_0 \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$E_c - E_f = k \cdot T \cdot \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right)$$



■ p-tip:

$$N_D = 0$$

$$p_0 = N_A + n_0$$

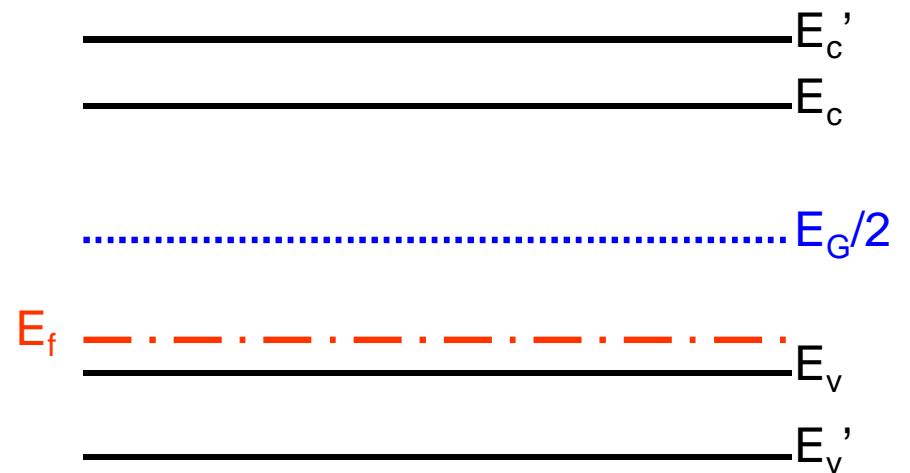
$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2$$

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

Ako je:

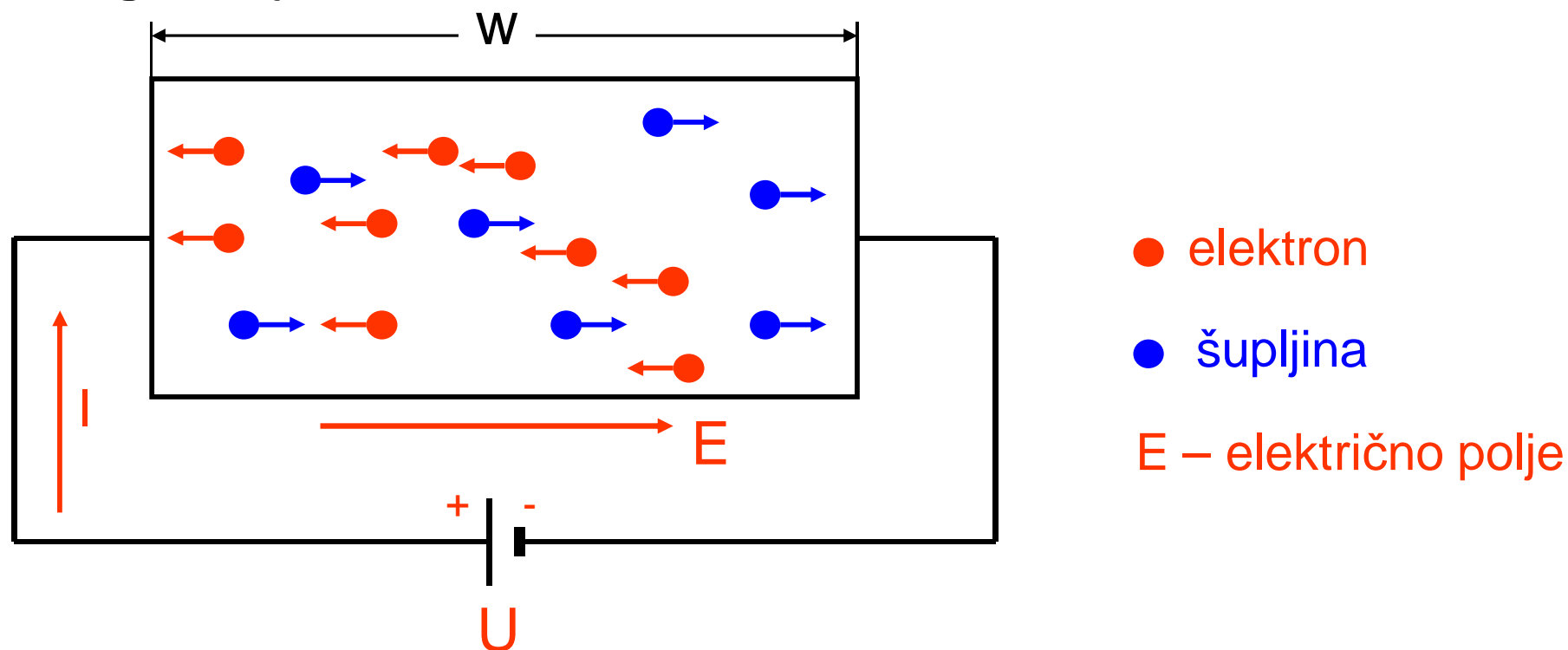
$$N_A^2 \gg 4n_i^2 \Rightarrow p_0 \approx N_A; n_0 \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$E_f - E_v = k \cdot T \cdot \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right)$$



GIBANJE SLOBODNIH NOSILACA NABOJA

■ Driftno gibanje



$$v_d = \mu \cdot E$$

v_d – driftna brzina; μ – pokretljivost nosilaca; E – jakost električnog polja

■ Ohmov zakon:

$$J = \frac{I}{S} = \frac{U}{R \cdot S} = \frac{\sigma \cdot U}{w} = \sigma \cdot E$$

J – gustoća struje

S – površina poprečnog presjeka

R – otpor

σ – električna provodnost

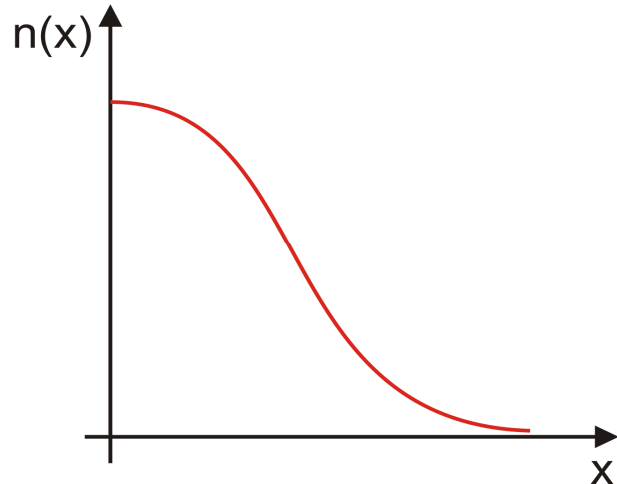
Električna provodnost za poluvodič jednaka je zbroju elektronske i šupljinske provodnosti:

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_p = q \cdot n \cdot \mu_n + q \cdot p \cdot \mu_p$$

Električna provodnost čistog silicija:

$$\sigma_i = q \cdot n_i \cdot (\mu_n + \mu_p)$$

■ Difuzijsko gibanje nosilaca



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

J_n – gustoća difuzijske struje elektrona

D_n – difuzijska konstanta elektrona

$\frac{dn}{dx}$ – gradijent koncentracije elektrona

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

J_p – gustoća difuzijske struje šupljina

D_p – difuzijska konstanta šupljina

$\frac{dp}{dx}$ – gradijent koncentracije šupljina

U navedenim izrazima za **gustoće struja elektrona i šupljina** valja uočiti **suprotan predznak** (zbog suprotnog naboja koji te čestice nose).

■ Difuzijsko i driftno gibanje

Ako se na poluvodič u kojem postoji gradijent koncentracije primjesa priključi i vanjsko električno polje, nastaje difuzijsko i driftno gibanje nosilaca naboja.



$$J_n(x) = q \cdot \mu_n \cdot n(x) \cdot E(x) - q \cdot D_n \cdot \frac{dn(x)}{dx}$$

$$J_p(x) = q \cdot \mu_p \cdot p(x) \cdot E(x) + q \cdot D_p \cdot \frac{dp(x)}{dx}$$

Opći oblik:

$$J_n(x) = q \cdot \mu_n \cdot n(x) \cdot E(x) + q \cdot D_n \cdot \frac{dn(x)}{dx}$$

$$J_p(x) = q \cdot \mu_p \cdot p(x) \cdot E(x) - q \cdot D_p \cdot \frac{dp(x)}{dx}$$



■ Pokretljivost nosilaca

Na pokretljivost nosilaca utječu različiti efekti zbog međusobnog djelovanja nosilaca s ioniziranim atomima primjesa (IONSKO RASPRŠENJE), s kristalnom rešetkom (FONONSKO RASPRŠENJE) te međusobnog sudara samih nosilaca.

Za određivanje pokretljivosti elektrona i šupljina, ako se razmatra samo utjecaj gustoće primjesa, može se primijeniti empirijski izraz:

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

N – ukupna gustoća primjesa

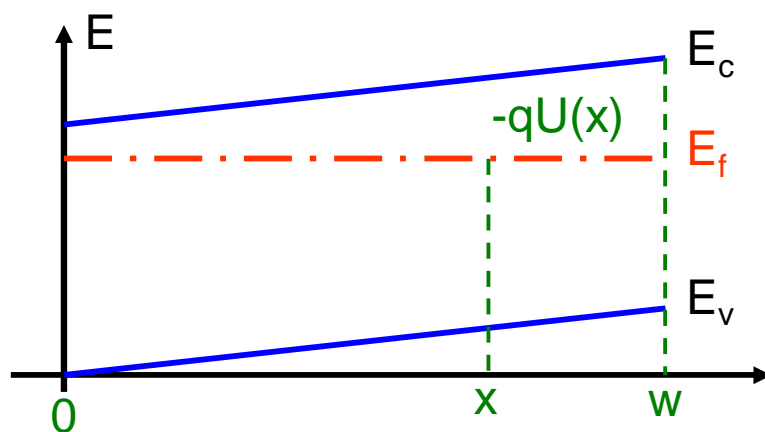
Za **silicij pri T=300 K** parametri su navedeni u tablici:

| nosilac | N_{ref} [cm ⁻³] | μ_{maks} [cm ² V ⁻¹ s ⁻¹] | μ_{min} [cm ² V ⁻¹ s ⁻¹] | α |
|----------|--------------------------------------|--|---|----------|
| elektron | 1,12·10 ¹⁷ | 1430 | 80 | 0,72 |
| šupljina | 2,23·10 ¹⁷ | 460 | 45 | 0,72 |



Einsteinove relacije

- Povezuju pokretljivost nosilaca i difuzijsku konstantu
- **Nehomogeni poluvodič n-tipa**



$$J_n = q \cdot n_0 \cdot \mu_n \cdot E + q \cdot D_n \cdot \frac{dn_0}{dx} = 0$$

$$J_p = q \cdot p_0 \cdot \mu_p \cdot E - q \cdot D_p \cdot \frac{dp_0}{dx} = 0$$

$$n_0 = N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{k \cdot T}\right)$$

$$E_c - E_f = -q \cdot U(x)$$

$$E = -\frac{dU}{dx}$$

$$\frac{k \cdot T}{q} \cdot \mu_n = D_n$$

$$\frac{k \cdot T}{q} \cdot \mu_p = D_p$$

**EINSTEINOVE
RELACIJE**



Raspodjela potencijala u nehomogenom poluvodiču

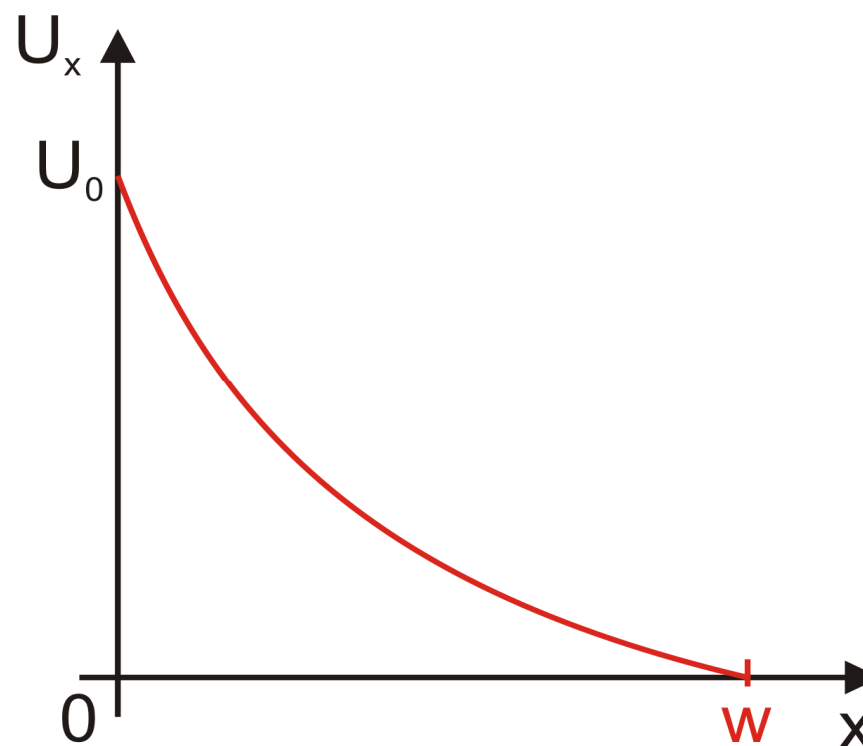
$$\frac{dn_0}{dx} = \frac{q}{k \cdot T} \cdot N_c \cdot \exp\left(\frac{q \cdot U(x)}{k \cdot T}\right) \cdot \frac{dU(x)}{dx}$$

$$\frac{dn_0}{dx} = n_0 \cdot \frac{q}{k \cdot T} \cdot \frac{dU(x)}{dx}$$

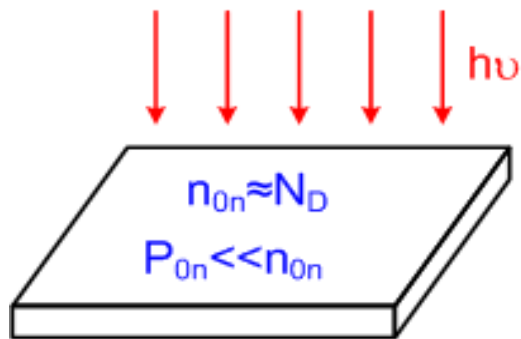
$$\frac{k \cdot T}{q} \int_{n_{00}}^{n_{0w}} \frac{dn_0}{n_0} = \int_{U_0}^0 dU(x)$$

$$U_k = \frac{k \cdot T}{q} \ln\left(\frac{n_{00}}{n_{0w}}\right) = \frac{D_n}{\mu_n} \ln\left(\frac{n_{00}}{n_{0w}}\right)$$

$$U_x = \frac{D_n}{\mu_n} \ln\left(\frac{n_{0x}}{n_{0w}}\right)$$



Vrijeme života i poništavanje (rekombinacija) nosilaca



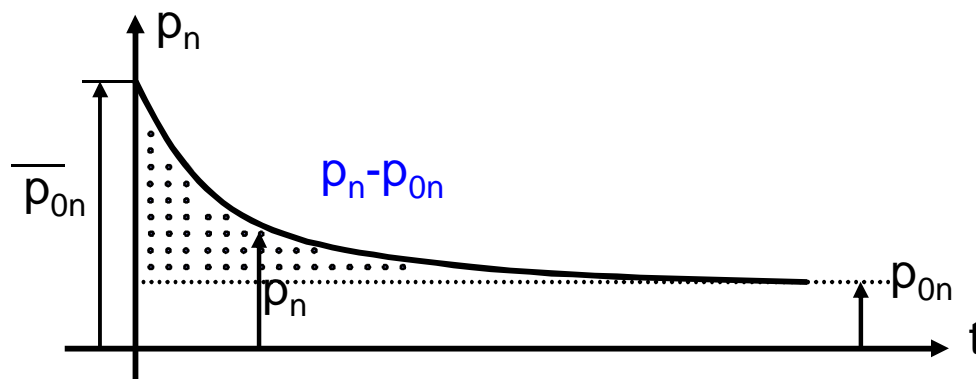
— $\bar{n}_{0n} = n_{0n}$ – broj fotogeneriranih elektrona

— $\bar{p}_{0n} = p_{0n}$ – broj fotogeneriranih šupljina

Nakon prestanka djelovanja svjetla:

$$p_n - p_{0n} = (\bar{p}_{0n} - p_{0n}) \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right)$$

τ_p – vrijeme života šupljina



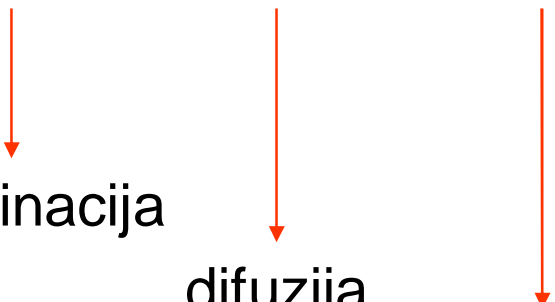
$$n_0 - n_{0n} = (\bar{n}_{0n} - n_{0n}) \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right)$$

τ_n – vrijeme života elektrona

$$\frac{dp_n}{dt} = -\frac{\bar{p}_{0n} - p_{0n}}{\tau_p} \exp\left(-\frac{t}{\tau_p}\right) = -\frac{p_n - p_{0n}}{\tau_p}$$

Jednadžba kontinuiteta:

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = -\frac{p_n - p_{0n}}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - E \cdot \mu_p \cdot \frac{\partial p_n}{\partial x}$$



 rekombinacija difuzija drift

- Uz uvjete:

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = 0 \quad E = 0 \quad \frac{d^2 p_n}{dx^2} = \frac{p_n - p_{0n}}{D_p \cdot \tau_p}$$

Opće rješenje ove jednačbe je:

$$p_n - p_{0n} = A_1 \exp\left(\frac{x}{L_p}\right) + A_2 \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right)$$

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} \quad \text{– difuzijska dužina šupljina}$$

Za elektrone u poluvodiču p-tipa:

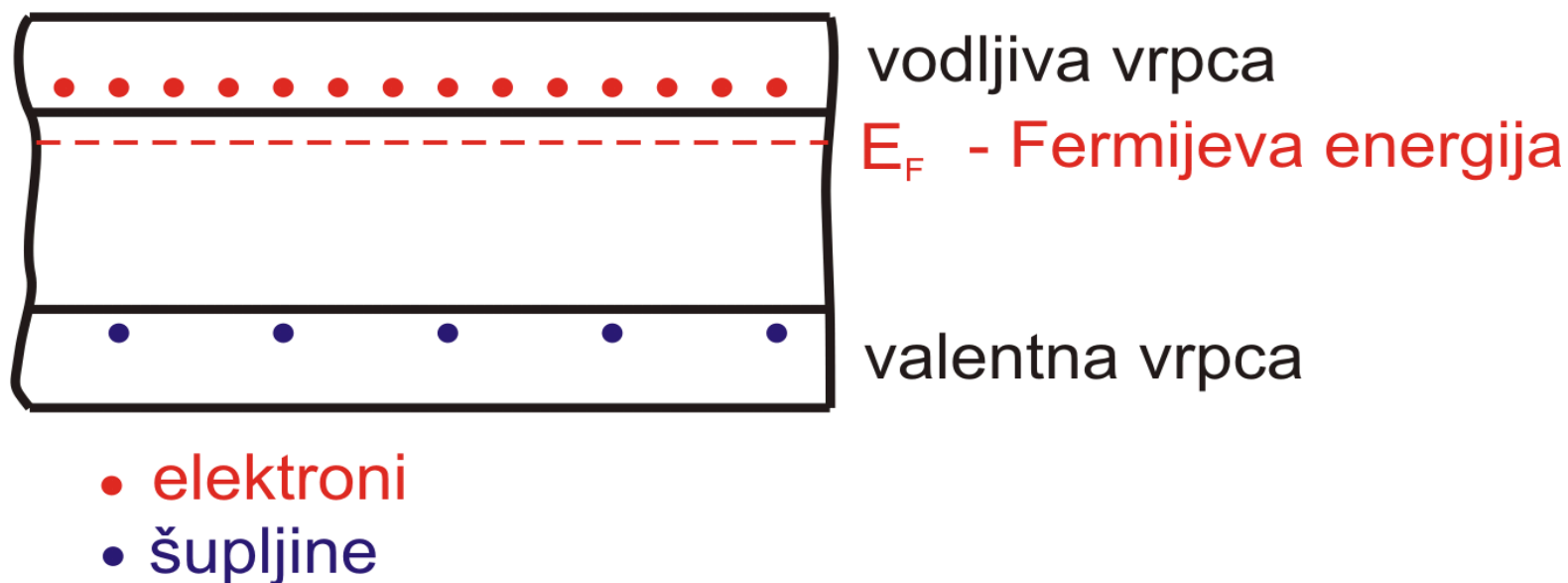
$$n_p - n_{0p} = B_1 \exp\left(\frac{x}{L_n}\right) + B_2 \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right)$$

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} \quad \text{– difuzijska dužina elektrona}$$

Konstante A_1 , A_2 , B_1 , B_2 definirane su rubnim uvjetima za dotični poluvodič

Sažetak

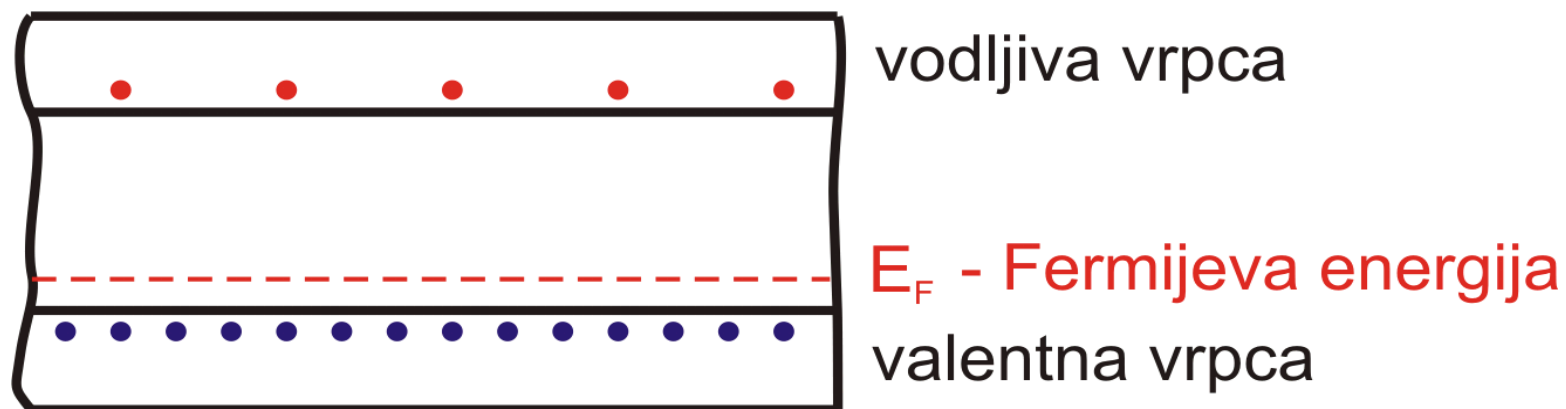
■ n-poluvodič



$$n \gg p$$

$$n \approx N_D \quad p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

■ p-poluvodič



- elektroni
- šupljine

$$p \gg n$$

$$p \approx N_A \quad n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$