



# ELEKTRONIKA

## Predavanje 2

### OSNOVNA SVOJSTVA POLUVODIČKIH MATERIJALA (2)

# Gibanje nosilaca naboja u poluvodiču

- U poluvodičima su pokretni nosioci naboja elektroni i šupljine. Ionizirane donorske i akceptorske primjese su čvrsto vezane na svojem mjestu u kristalnoj rešetki pa ne doprinose električnoj struji.
- Slobodni nosioci naboja ne miruju već se na nekoj temperaturi  $T$  gibaju prosječnom kinetičkom energijom  $E_k = \frac{3}{2}kT$
- Tada je prosječna termička brzina nosilaca  $v_{th}$ :

$$v_{th} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{ef}}} \quad m_{ef} - \text{efektivna masa elektrona/šupljine}$$

- Iako se nosioci gibaju, njihovo gibanje je kaotično - smjer njihova gibanja stalno se mijenja zbog sudaranja s atomima kristalne rešetke pa je ukupno gibanje nosilaca jednako nuli.
- **Ako na poluvodič ne djeluje vanjska sila, ukupna struja jednaka je nuli.**

# Driftno gibanje

- **Driftno gibanje** uzrokovano je postojanjem **električnog polja** (npr. kad je na poluvodič narinut napon).
- El. polje jakosti  $F$  razdvaja slobodne nosioce: elektroni se gibaju suprotno od smjera polja (prema + kraju izvora napona), a šupljine u smjeru polja (prema – kraju izvora napona).  
Prosječnoj termičkoj brzini  $v_{th}$  superponira se **driftna brzina**  $v_d$ :

$$v_d = \mu \cdot F \quad \mu - \text{pokretljivost nosilaca}$$

- Gustoća driftne struje proporcionalna je jakosti el. polja  $F$  :

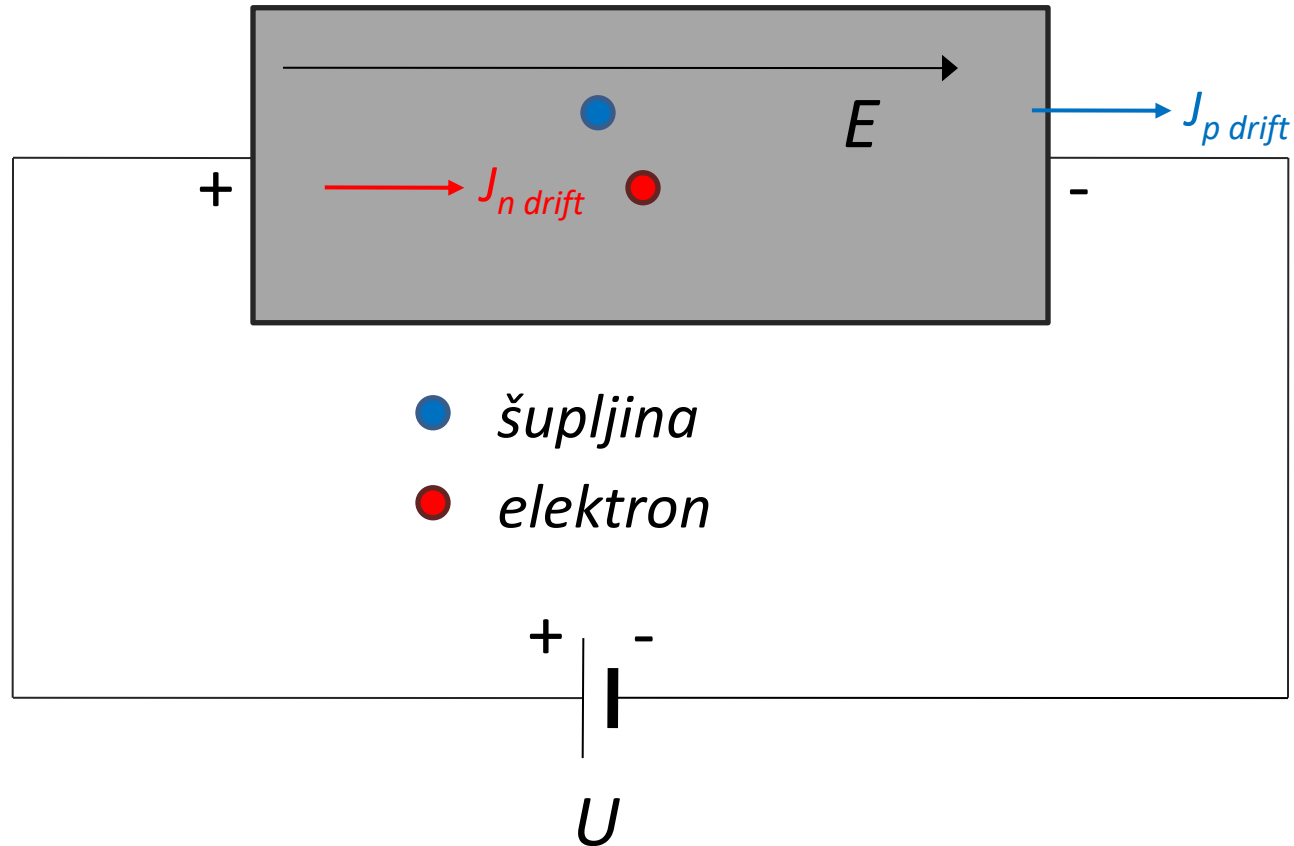
$$J_{drift} = \sigma \cdot F$$

- Konstanta proporcionalnosti  $\sigma$  je **električna provodnost (vodljivost) poluvodiča**.
- Ukupna driftna struja sastoji se od gibanja elektrona i šupljina:

$$J_{drift} = J_{n\,drift} + J_{p\,drift} = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot F + q \cdot p \cdot \mu_p \cdot F$$



# Driftno gibanje (2)



- Električno polje razdvaja suprotne nosioce naboja, ali se obje komponente struja zbrajaju!!!

# Pokretljivost nosilaca u poluvodiču

- **Pokretljivost nosilaca** je veličina koja iskazuje koliko se brzo nosioci mogu gibati u poluvodiču pod djelovanjem el. polja.
- Na iznos pokretljivosti nosilaca utječu:
  - **Raspršenje nosilaca na atomima kristalne rešetke (fononsko raspršenje)**
  - **Raspršenje nosilaca na ioniziranim primjesama (ionsko raspršenje)**
  - Raspršenje zbog međusobnih sudara nosilaca
- Dominantni su mehanizmi fononskog i **ionskog raspršenja**.
- Ako je  $\tau_m$  srednje vrijeme između sudara (raspršenja):

$$\mu_n = \frac{q \tau_{mn}}{m_n} \quad \mu_p = \frac{q \tau_{mp}}{m_p}$$

- Pokretljivost nosilaca može značajno varirati ovisno o temperaturi i gustoći primjesa te o priključenom el. polju.

# Pokretljivost nosilaca u siliciju

- Ako se razmatra samo utjecaj ionskog raspršenja, ovisnost pokretljivosti o ukupnoj gustoći primjesa  $N$  može se aproksimirati izrazom:

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

- U **silicijskom** poluvodiču na  $T=300$  K:

	$\mu_{\min}$ [cm <sup>2</sup> /Vs]	$\mu_{\max}$ [cm <sup>2</sup> /Vs]	$N_{\text{ref}}$ [cm <sup>-3</sup> ]	$\alpha$
elektron	80	1430	$1,12 \cdot 10^{17}$	0,72
šupljina	45	460	$2,23 \cdot 10^{17}$	0,72

# Električna provodnost i otpornost poluvodiča

- Ukupna električna provodnost poluvodiča  $\sigma$  jednaka je zbroju električne provodnosti zbog gibanja elektrona  $\sigma_n$  i električne provodnosti šupljina  $\sigma_p$ :

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

- U n-tipu poluvodiča je  $\sigma_n \gg \sigma_p$  pa je  $\sigma \approx \sigma_n$ .
- U p-tipu poluvodiča je  $\sigma_p \gg \sigma_n$  pa je  $\sigma \approx \sigma_p$ .
- Električna otpornost  $\rho$  i električna provodnost  $\sigma$  su recipročne veličine:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)}$$

# Difuzijsko gibanje

- **Difuzijsko gibanje** se javlja ako **postoji razlika u gustoći nosilaca (gradijent gustoće)** u volumenu poluvodiča: nosioci se spontano gibaju iz područja veće u područje manje gustoće.
- Gustoća difuzijske struje proporcionalna je gradijentu gustoće.

Za 1D slučaj:

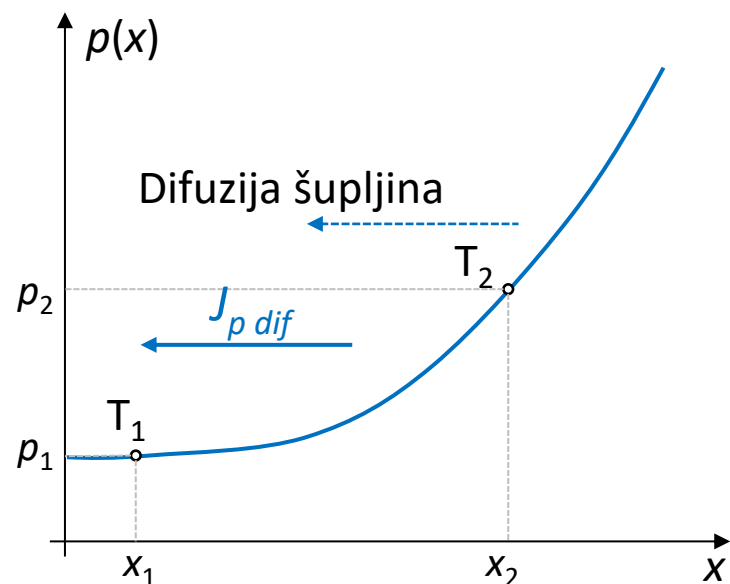
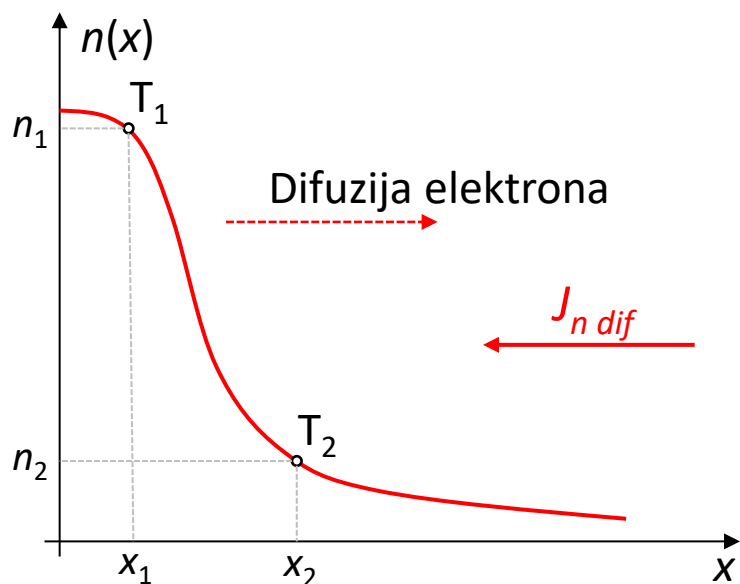
$$J_{n \text{ dif}} = q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx}$$

$$J_{p \text{ dif}} = -q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$$

- Veličine  $D_n$  i  $D_p$  su **difuzijske konstante** nosilaca.
- Nosioci se gibaju u smjeru padajuće gustoće, tj. negativnog gradijenta. S obzirom da je smjer struje suprotan od smjera gibanja elektrona, predznak u izrazu za difuzijsku struju je +.
- Veći iznos difuzijske konstante označava bržu difuziju nosilaca.



# Difuzijsko gibanje (2)



- Gradijent gustoće je uvijek negativan jer se nosioci gibaju prema području manje gustoće!!!

# Ukupna struja u poluvodiču

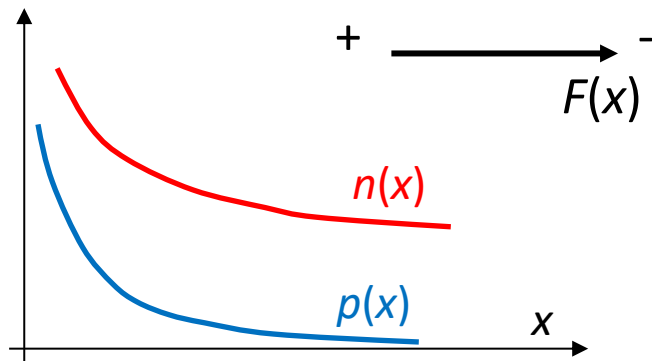
- Ako se na poluvodič u kojem postoji gradijent gustoće primjesa priključi i vanjsko električno polje, nastaje difuzijsko i driftno gibanje nosilaca naboja.

$$J = J_n + J_p$$



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



$$J_p = -q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx} + q \cdot p \cdot \mu_p \cdot F$$

- Npr. poluvodič u kojem se gustoće nosilaca mijenjaju prema slici, uz zadani smjer el. polja:







## Elektroni

Difuzija    $J_{n \text{ dif}}$

Drift    $J_{n \text{ drift}}$

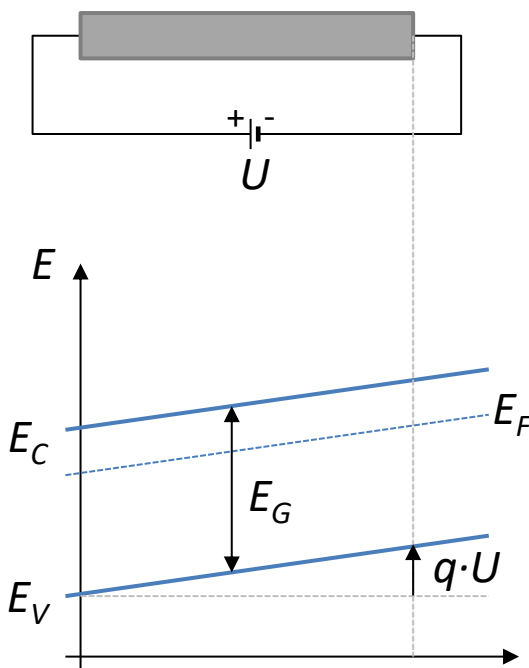
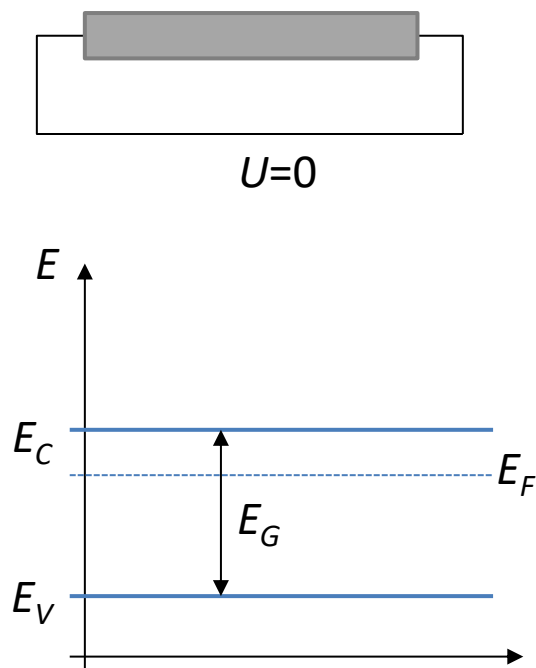
## Šupljine

Difuzija    $J_{p \text{ dif}}$

Drift    $J_{p \text{ drift}}$

# Utjecaj priključenog napona na energijski dijagram

- Kad je na poluvodič priključen napon, mijenja se energijski dijagram. S obzirom da energijski dijagram prikazuje energije negativno nabijenih elektrona, **pozitivni napon smanjuje njihovu potencijalnu energiju  $E$** .
- Npr.



# Einsteinove relacije

- Povezuju pokretljivost nosilaca i difuzijsku konstantu.
- Mogu se izvesti za slučaj **nehomogenog poluvodiča**: gustoća primjese nije jednoliko raspodijeljena. U ravnotežnom stanju Fermijeva razina je konstantna, a ukupna struja jednaka je ničici, što vrijedi kako za elektrone, tako i za šupljine:

$$J_n = J_{n \text{ dif}} + J_{n \text{ drift}} = q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} + q \cdot n \cdot \mu_n \cdot F = 0$$

$$n = N_C \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_C}{E_T}\right) \Rightarrow \frac{dn}{dx} = -\frac{1}{E_T} N_C \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_C}{E_T}\right) \cdot \frac{dE_C}{dx} = -\frac{n}{E_T} \cdot \frac{dE_C}{dx}$$

- Nadalje, energija i potencijal su povezani izrazom:  $E = -q \cdot U$
- Jakost el. polja je negativni gradijent potencijala:  $F = -\frac{dU}{dx}$
- Konačno, uvrštavajući u početnu jednadžbu:

$$-q \cdot D_n \cdot \frac{n \cdot q}{E_T} \cdot F + q \cdot n \cdot \mu_n \cdot F = 0 \Rightarrow -D_n \frac{q}{E_T} + \mu_n = 0$$

$$\begin{aligned} D_n &= \mu_n \cdot U_T \\ D_p &= \mu_p \cdot U_T \end{aligned}$$

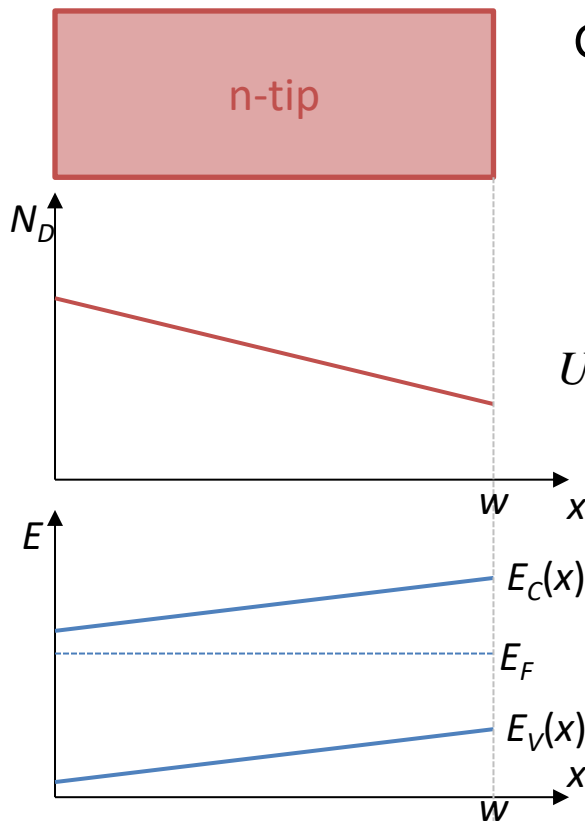
**Einsteinove relacije**

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



# Nehomogeni poluvodič

- U nehomogeno dopiranim poluvodičima gustoća primjesa se mijenja s prostornim koordinatama pa se tako mijenjaju i gustoće većinskih i manjinskih nosilaca jer u ravnotežnim uvjetima u svakoj točki moraju vrijediti zakon termodinamičke ravnoteže i zakon električne neutralnosti.



Gradijent gustoće elektrona je (za 1D slučaj):

$$\frac{dn}{dx} = \frac{n}{U_T} \cdot \frac{dU(x)}{dx} \quad \Rightarrow \quad U_T \frac{dn}{n} = dU(x)$$

$$U_T \frac{dn}{n} = dU(x)$$

$$U_T \int_0^w \frac{dn}{n} = \int_0^w dU(x) \Rightarrow U(x=w) - U(x=0) = U_T \cdot \ln \left( \frac{n(x=w)}{n(x=0)} \right)$$

S obzirom da je  $n(x=w) < n(x=0)$ , desni je kraj poluvodiča na nižem potencijalu (-) od lijevog (+).

**VAŽNO!!!** Zbog razlike u gustoći nosilaca uspostavlja se električno polje koje poništava difuzijsku komponentu struje!!!

# Vrijeme života i rekombinacija nosilaca

---

- U uvjetima termodinamičke ravnoteže broj generiranih parova nosilaca jednak je broju rekombiniranih parova. Ako se poluvodič ne nalazi u stanju termodinamičke ravnoteže, procesi generacije, odnosno rekombinacije nastoje vratiti sustav u ravnotežu:
  - Ako je  $p \cdot n < n_i^2$  generacija prevladava nad rekombinacijom.
  - Ako je  $p \cdot n > n_i^2$  rekombinacija prevladava nad generacijom.
- **Vrijeme života manjinskih nosilaca** jest prosječno vrijeme od generacije nosioca do njegove rekombinacije. Vrijeme života proporcionalno je vremenu potrebnom da se nakon poremećaja gustoća manjinskih nosilaca vrati na ravnotežnu vrijednost.

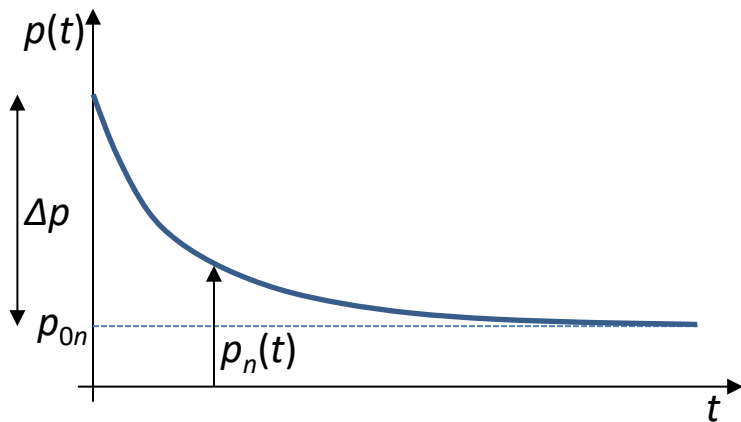
# Vrijeme života i rekombinacija nosilaca (2)

Npr. Si poluvodič n-tipa:  $n_{0n} \approx N_D$ ;  $p_{0n} \ll n_{0n}$

Ako se poluvodič izloži djelovanju svjetla, stvaraju se dodatni nosioci u parovima pa je  $\Delta n = \Delta p$ . Sve dok je poluvodič osvijetljen, gustoće nosilaca su:

$$n = n_{0n} + \Delta n, \quad p = p_{0n} + \Delta p.$$

Nakon isključenja svjetla, gustoće nosilaca opadaju prema ravnotežnim vrijednostima. Gustoća manjinskih šupljina smanjuje se prema ravnotežnoj vrijednosti po eksponencijalnom zakonu s vremenskom konstantom  $\tau_p$ :



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

Brzina promjene gustoće šupljina može se odrediti deriviranjem po vremenu:

$$\frac{dp_n(t)}{dt} = -\frac{p_n(t) - p_{0n}}{\tau_p}$$

Analogno vrijedi i za manjinske elektrone u poluvodiču p-tipa.

# Difuzijska duljina nosilaca

- Za manjinske nosioce u Si poluvodiču na 300 K:

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

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

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

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

- **Difuzijska duljina  $L$**  je prosječna udaljenost koju nosioc može prijeći u vremenu od generacije do rekombinacije.

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n}$$



# Temeljne jednađbe u poluvodičima

- Opisuju statičke i dinamičke uvjete u kojima se nalaze nosioci naboja u poluvodičima pod utjecajem vanjskog polja koje uzrokuje odstupanje od stanja termodinamičke ravnoteže.
- Poissonova jednađba** u 1D slučaju:

$$\varepsilon \cdot \frac{dF}{dx} = \rho(x) \quad \text{Ukupni izlazni tok vektora električnog polja iz nekog volumena proporcionalan je naboju sadržanom u tom volumenu.}$$

$$\rho(x) = q \cdot (p - n + N_D - N_A)$$

- Transportne jednađbe** u 1D slučaju:

$$J_n = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot F + q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} \quad J_p = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot F - q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$$

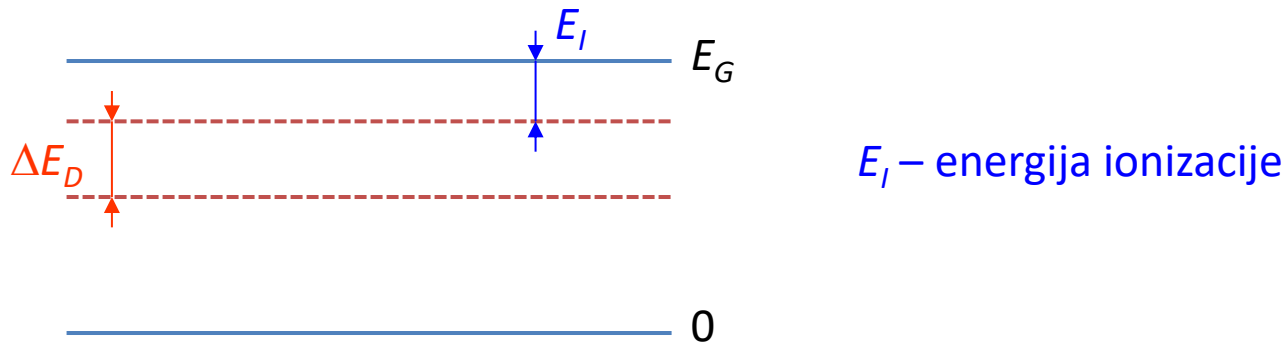
- Jednađba kontinuiteta** u 1D slučaju:

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = -\frac{n_p - n_{0p}}{\tau_n} + D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} + F \cdot \mu_n \cdot \frac{\partial n_p}{\partial x} \quad \frac{\partial p_n}{\partial t} = -\frac{p_n - p_{0n}}{\tau_p} + D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - F \cdot \mu_p \cdot \frac{\partial p_n}{\partial x}$$



# Degenerirani poluvodič

- To je poluvodič s velikom gustoćom primjesa. Pri gustoćama primjesa iznad  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , diskretne energijske razine donora, odnosno akceptora se cijepaju u pojasove energija.



- Energija ionizacije smanjena je u odnosu na nedegenerirani poluvodič, a pri gustoćama donora iznad  $1,8 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  energija ionizacije u potpunosti nestaje.
- Suženje zabranjenog pojasa  $\Delta E_G$  može se odrediti iz izraza:

$$\Delta E_G = \frac{3 \cdot q^3}{16 \cdot \pi \cdot \varepsilon} \sqrt{\frac{N}{\varepsilon \cdot k \cdot T}} \quad (\text{Lanyon i Tuft})$$