



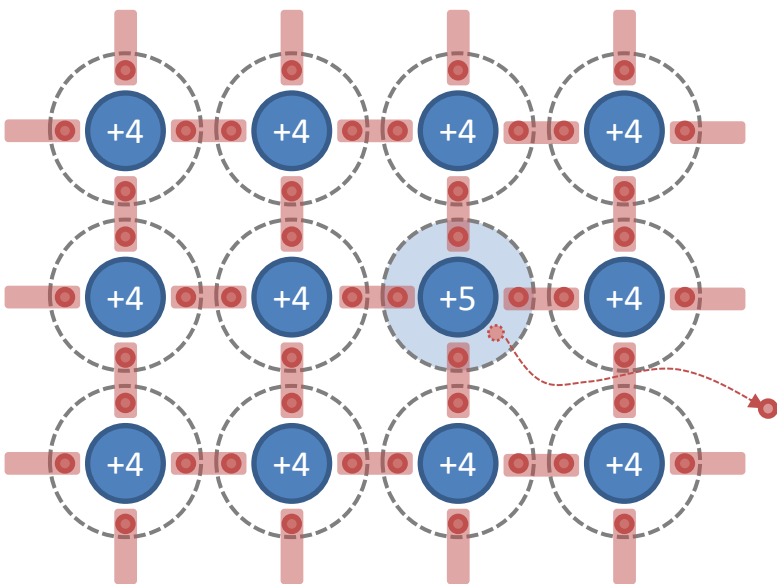
ELEKTRONIKA

Predavanje 2

OSNOVNA SVOJSTVA POLUVODIČKIH MATERIJALA (2)

Poluvodič n-tipa

- Dobije se dodavanjem **donorskih primjesa** – svaki atom donora „daje” jedan elektron u poluvodič i postaje **pozitivan ion**.
- Gustoća elektrona je veća od gustoće šupljina => elektroni su većinski, a šupljine manjinski nosioci naboja.
- Za silicij se kao donori koriste **peterovalentni elementi: N, P, As, Sb**.

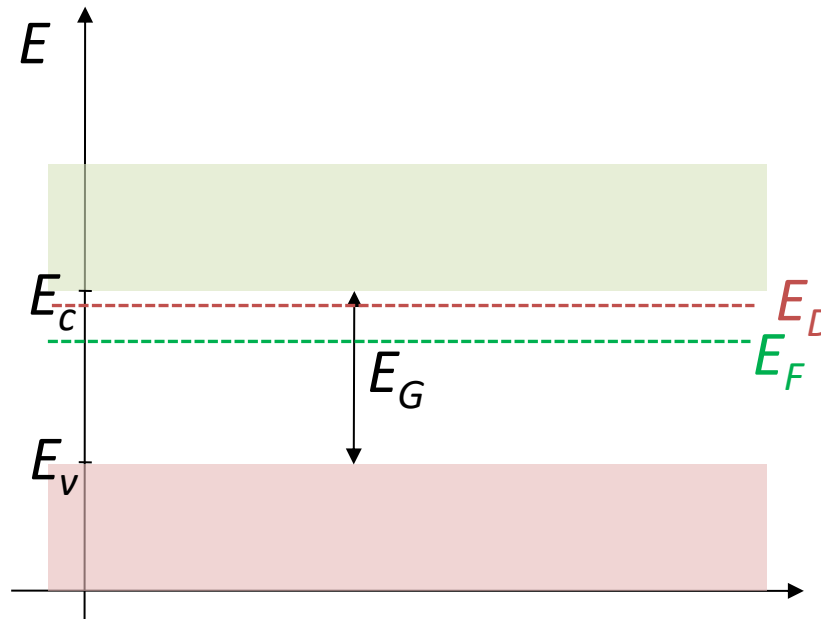


Donorski atom gradi 4 kovalentne veze s okolnim atomima Si, ali njegov 5. valentni elektron ostaje izvan kovalentne veze. Za oslobađanje tog 5. elektrona potrebno je puno manje energije (tzv. energija ionizacije) nego za oslobađanje elektrona iz kovalentne veze. Na $T=300\text{ K}$ praktički se svi 5. elektroni donorskih atoma oslobode i postaju slobodni.

VAŽNO: Oslobađanjem 5. valentnog elektrona ne ostaje šupljina!!! Oslobađanjem elektrona iz kovalentne veze nastaju elektron i šupljina!

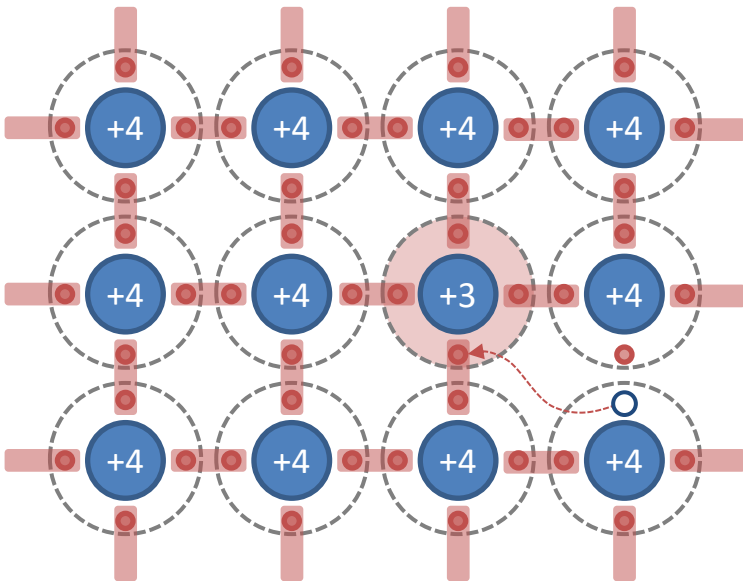
Energijski dijagram poluvodiča n-tipa

- Tipični iznosi energije ionizacije su 10-50 meV pa se prisutnost donorskih primjesa u energijskom dijagramu poluvodiča predočava tzv. **donorskom energijskom razinom** E_D koja se nalazi u zabranjenom pojasu malo ispod dna vodljivog pojasa.
- Kako je $n_0 \gg p_0$, Fermijeva se razina nalazi iznad sredine zabranjenog pojasa.



Poluvodič p-tipa

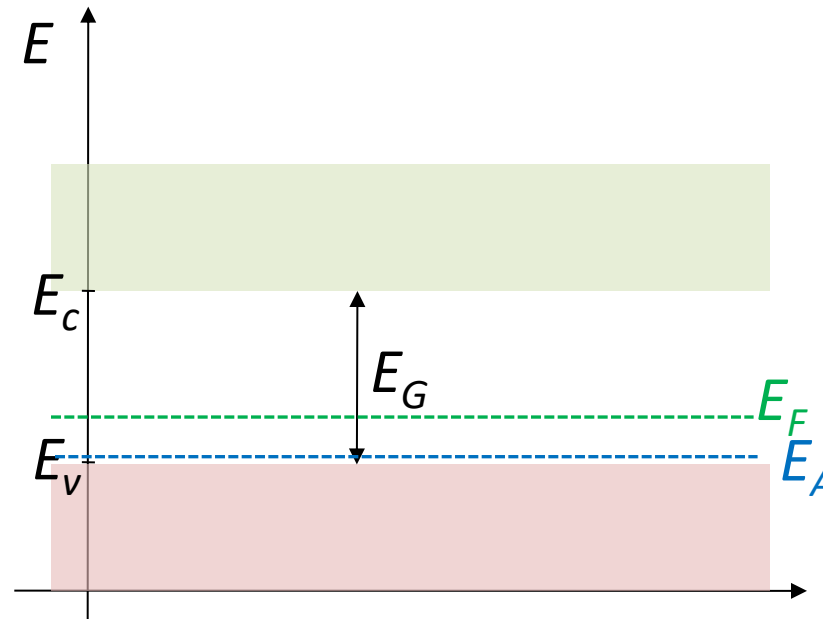
- Dodaju se **akceptorske primjese** – svaki atom akceptora „uzima” jedan elektron iz poluvodiča i postaje **negativan ion**.
- Gustoća šupljina je veća od gustoće elektrona => šupljine su većinski, a elektroni manjinski nosioci naboja.
- Za silicij se kao donori koriste **trovalentni elementi: B, Al, Ga, In**.



Atom akceptora gradi 3 kovalentne veze s okolnim atomima Si, ali za vezu s 4. susjednim atomom Si nedostaje mu jedan elektron. Taj se elektron uzima iz kovalentne veze od nekog Si atoma u blizini pa tako nastaje šupljina, a akceptor postaje negativan ion. Energija ionizacije akceptora je mala pa su na $T=300\text{ K}$ praktički svi akceptorski atomi ionizirani (prime elektron) stvarajući po jednu šupljinu.

Energijski dijagram poluvodiča p-tipa

- Tipični iznosi energije ionizacije su 10-50 meV pa se prisutnost akceptorskih primjesa u energijskom dijagramu poluvodiča predočava tzv. **akceptorskom energijskom razinom** E_A koja se nalazi u zabranjenom pojasu malo iznad vrha valentnog pojasa.
- Kako je $p_0 \gg n_0$, Fermijeva se razina nalazi ispod sredine zabranjenog pojasa.



Zakon termodinamičke ravnoteže

- Umnožak ravnotežnih gustoća elektrona i šupljina na nekoj temperaturi je stalan i jednak kvadratu intrinzične gustoće:

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

$$n_0 \cdot p_0 = N_C N_V \cdot \exp\left(-\frac{E_G}{E_T}\right)$$

- Zakon termodinamičke ravnoteže može se izvesti iz razmatranja intrinzičnog poluvodiča kod kojega je $n_0 = p_0$. Ako se uvrste izrazi za $n_0 = p_0$ i nađe njihov umnožak, uočava se da on **ne ovisi o položaju Fermijeve energije, tj. ne ovisi o tipu poluvodiča**.
- Zakon termodinamičke ravnoteže može se formulirati i na sljedeći način:
Brzina poništavanja parova elektron-šupljina, proporcionalna umnošku gustoće elektrona i šupljina, jednaka je brzini stvaranja parova elektron-šupljina, koja je određena širinom zabranjenog pojasa i temperaturom.

Zakon električne neutralnosti

- U nekom poluvodiču ukupna gustoća negativnog naboja jednaka je ukupnoj gustoći pozitivnog naboja:

$$n_0 + N_A = p_0 + N_D$$

- Općenito, negativni naboji u poluvodiču su **pokretljivi** slobodni elektroni i **nepokretni** ionizirani akseptori. Pozitivni naboji u poluvodiču su **pokretljive** šupljine i **nepokretni** ionizirani donori.
- **VAŽNO!** Ionizirani donori i akseptori imaju naboj, ali su lokalizirani u kristalnoj rešetki i ne mogu se gibati, tj. ne sudjeluju u vođenju struje. Njihov doprinos u vođenju struje najznačajniji je kroz povećanje gustoće slobodnih nosilaca, premda utječu i na iznos određenih parametara slobodnih elektrona i šupljina.



Gustoće nosilaca u poluvodičima

- Intrinzični poluvodič: $n_0 = p_0 = n_i$
- Ekstrinzični poluvodič

n-tip

$$N_A = 0$$

$$n_0 = p_0 + N_D$$

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

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

Ako je ispunjen uvjet $N_D^2 \gg 4n_i^2$

$$\begin{aligned} n_0 &\approx N_D \\ p_0 &\approx \frac{n_i^2}{N_D} \end{aligned}$$

p-tip

$$N_D = 0$$

$$p_0 = n_0 + N_A$$

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

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

Ako je ispunjen uvjet $N_A^2 \gg 4n_i^2$

$$\begin{aligned} p_0 &\approx N_A \\ n_0 &\approx \frac{n_i^2}{N_A} \end{aligned}$$



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 :

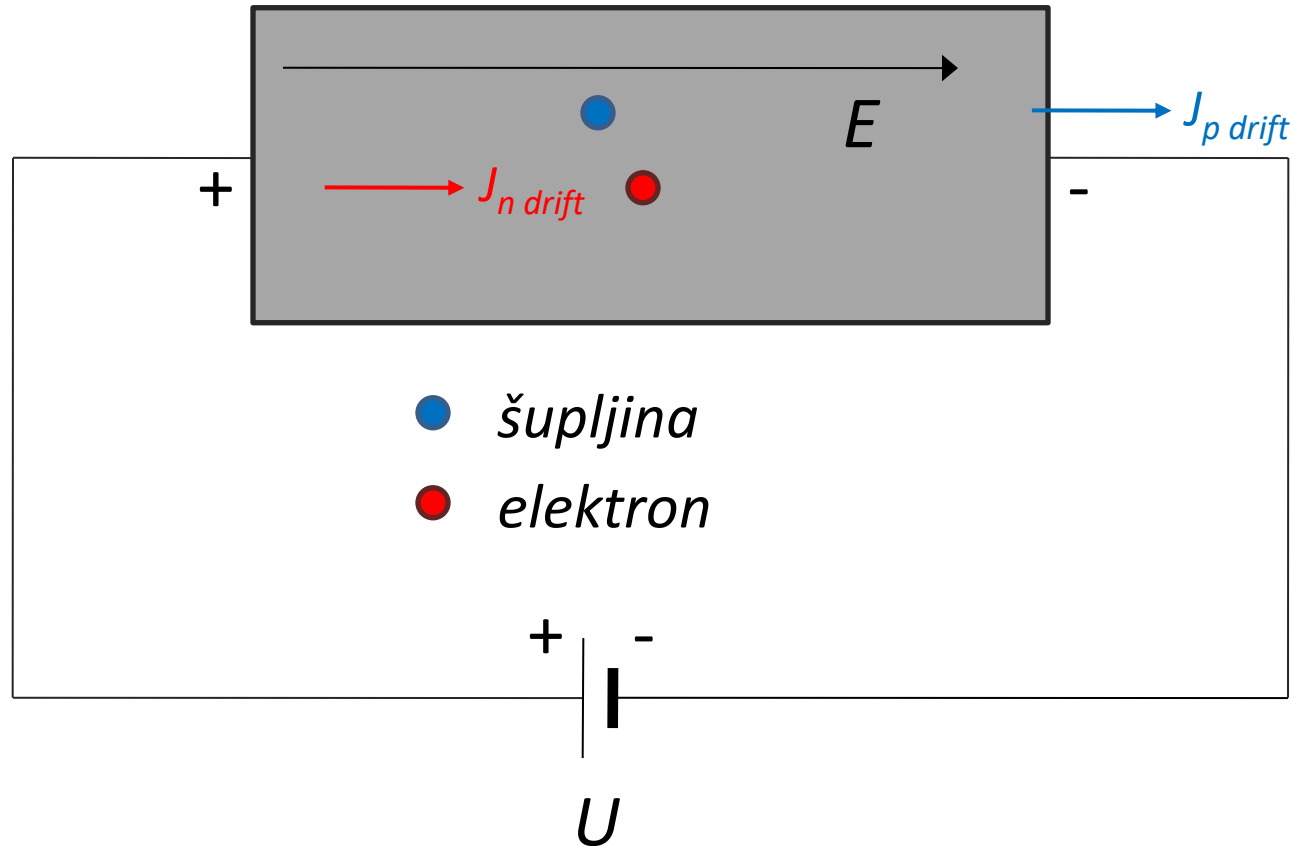
$$J_{drift} = \sigma \cdot F$$

- Konstanta proporcionalnosti σ 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 τ_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:

	μ_{\min} [cm ² /Vs]	μ_{\max} [cm ² /Vs]	N_{ref} [cm ⁻³]	α
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 σ jednaka je zbroju električne provodnosti zbog gibanja elektrona σ_n i električne provodnosti šupljina σ_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 ρ i električna provodnost σ su recipročne veličine:

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

Difuzijsko gibanje

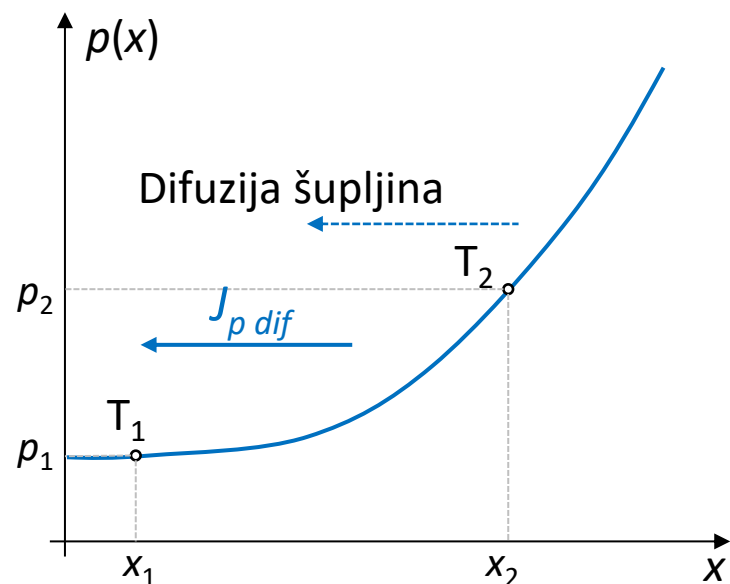
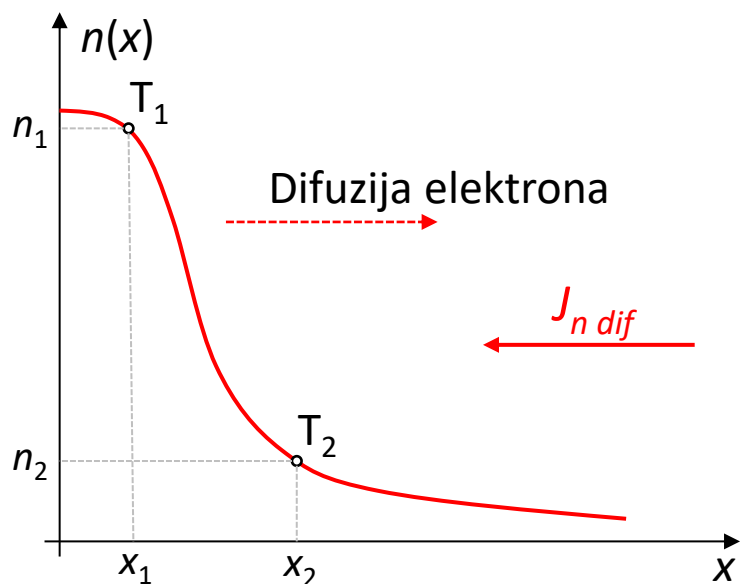
- **Difuzijsko gibanje** se javlja ako **postoji razlika u gustoći nosilaca (gradijent gustoće)** u volumenu poluvodiča: nosioci se spontano gibaju iz područja veće u područje manje gustoće.
- Gustoća difuzijske struje proporcionalna je gradijentu gustoće. Za 1D slučaj:

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

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

- 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

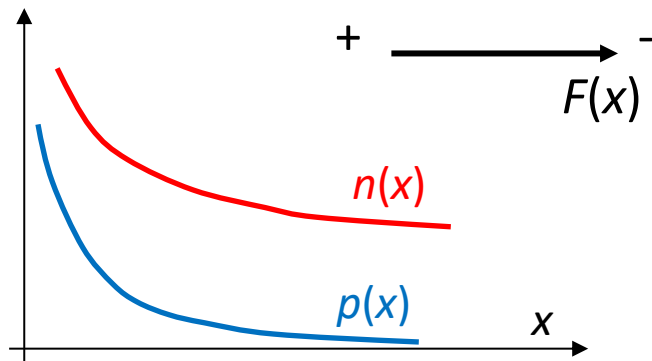
- Ako se na poluvodič u kojem postoji gradijent gustoće primjesa priključi i vanjsko električno polje, nastaje difuzijsko i driftno gibanje nosilaca naboja.

$$J = J_n + J_p$$



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



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

- 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

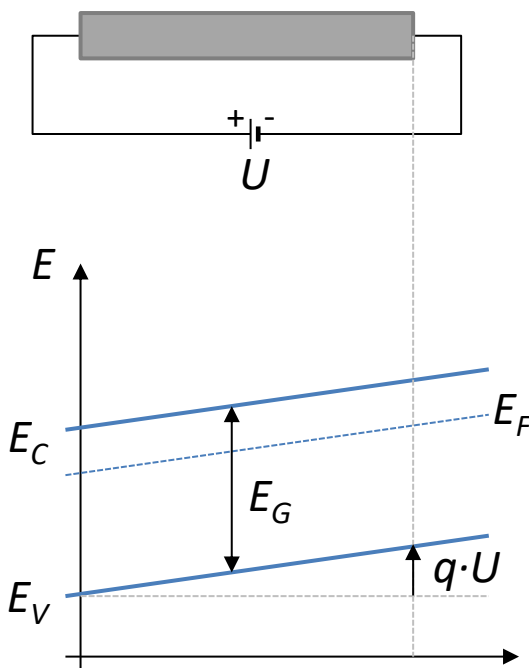
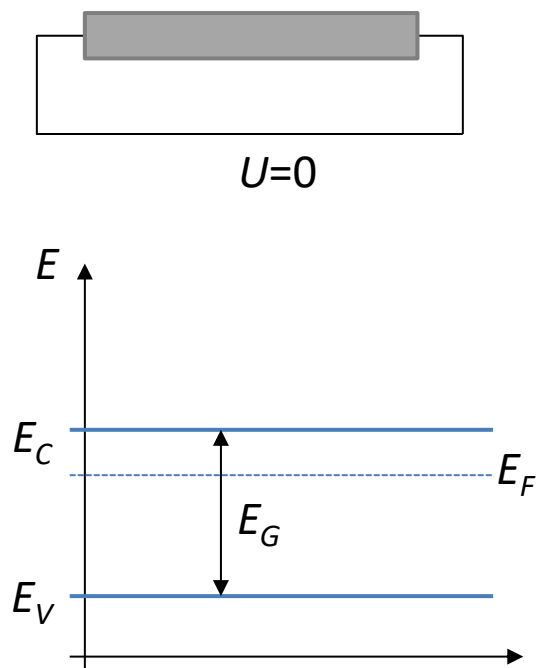
Difuzija   $J_{p \text{ dif}}$

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:

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

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

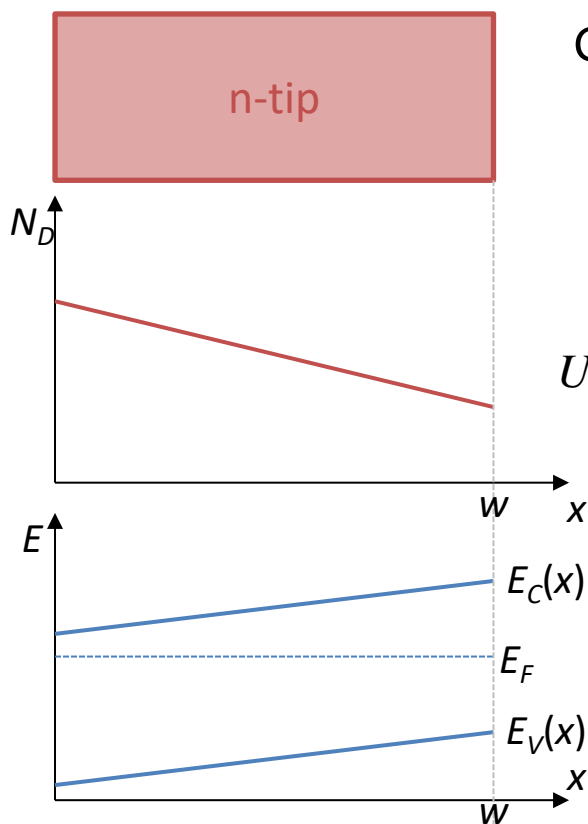
Einsteinove relacije

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



Nehomogeni poluvodič

- U nehomogeno dopiranim poluvodičima gustoća primjese 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):

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

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

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

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.

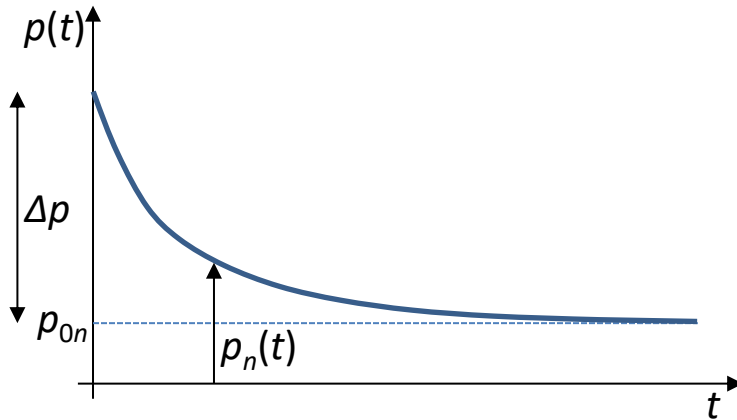
Vrijeme života i rekombinacija nosilaca (2)

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 τ_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:

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

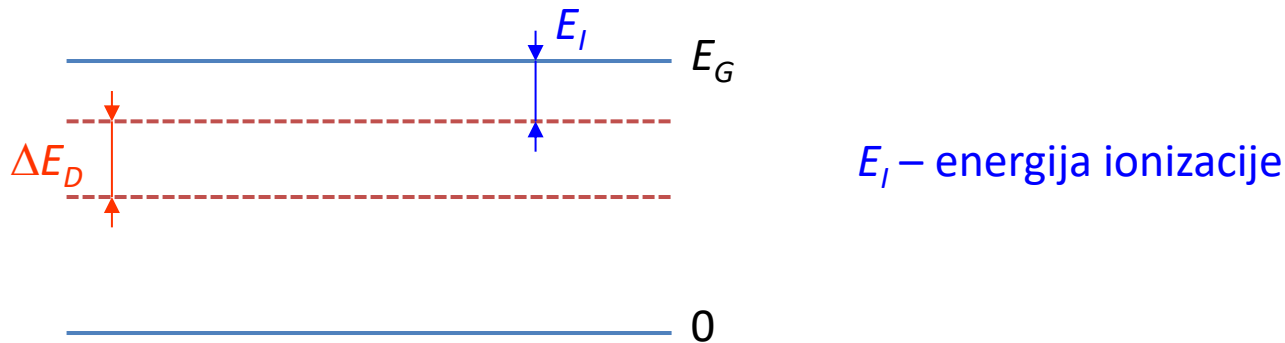
- Jednađba kontinuiteta** u 1D slučaju:

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



Degenerirani poluvodič

- To je poluvodič s velikom gustoćom primjesa. Pri gustoćama primjesa iznad 10^{17} 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 ΔE_G može se odrediti iz izraza:

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