

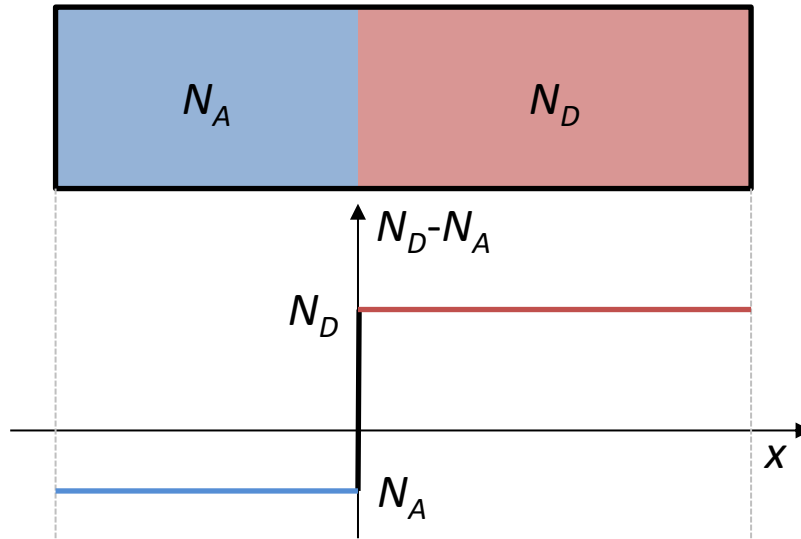


ELEKTRONIKA

Predavanje 3 pn SPOJ (POLUVODIČKA DIODA)

Osnovna svojstva pn spoja

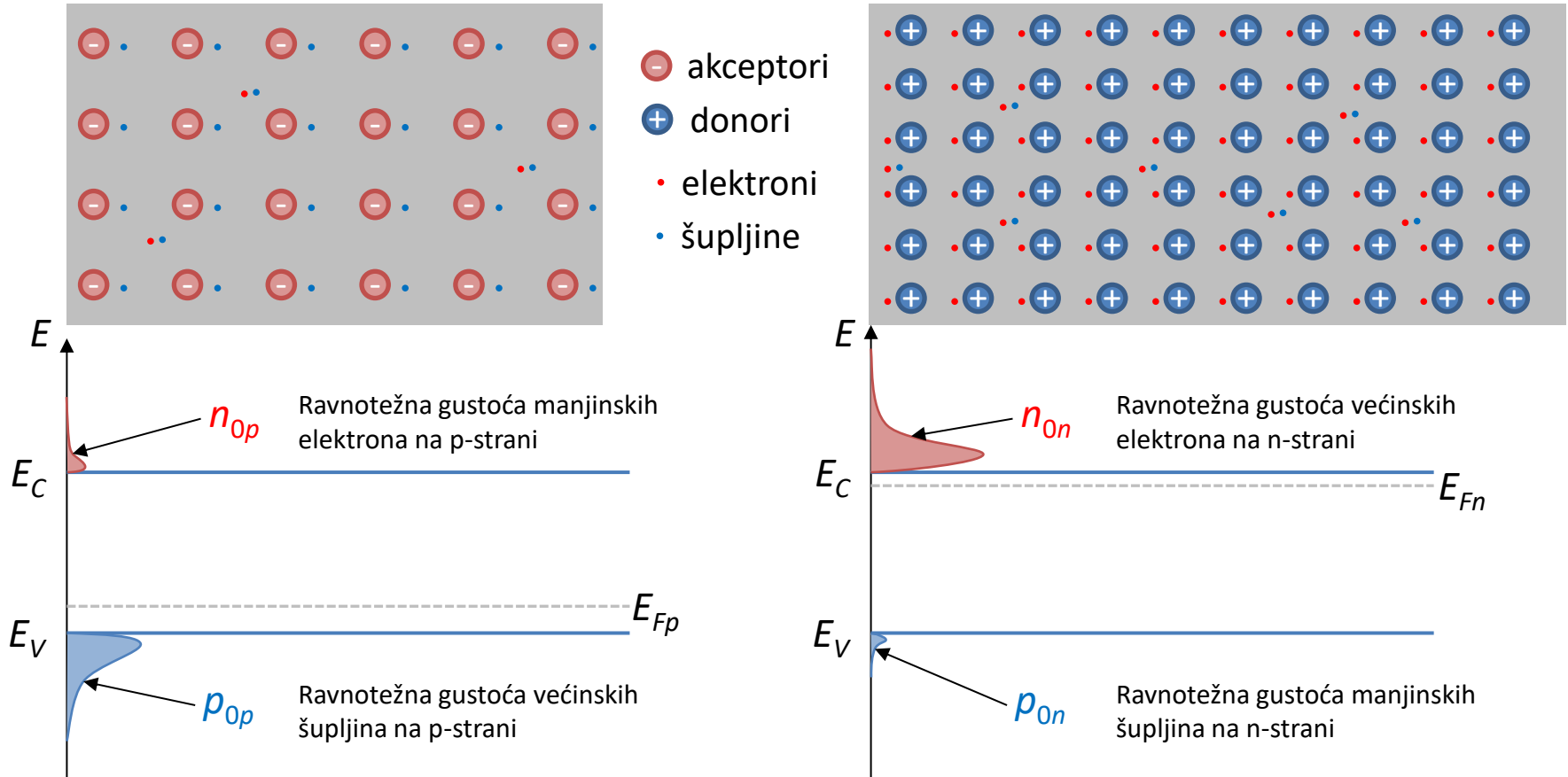
- Dobija se na način da se isti kristal poluvodiča onečisti primjesama tako da su u jednom dijelu akseptori (p-strana), a u drugom donori (n-strana).
- Osnovno svojstvo pn-spoja je **ispravljačko djelovanje**: struja može teći samo u jednom smjeru.
- Na svojstvima pn-spoja temelji se rad osnovnih poluvodičkih elemenata: diode, bipolarnog tranzistora i unipolarnih tranzistora s efektom polja.
- Zbog jednostavnosti razmatranja pretpostavit će se **skokoviti pn-spoj**: gustoće primjesa su na obje strane konstantne do samog spoja.



*Prikaz skokovitog pn-spoja:
p-strana je jednoliko onečišćena
akceptorskim, a n-strana donorskim
primjesama*

pn-spoj u ravnoteži

- Može se razmatrati zamišljeni trenutak prije uspostavljanja pn-spoja: p-strana je poluvodič p-tipa, a n-strana je poluvodič n-tipa.

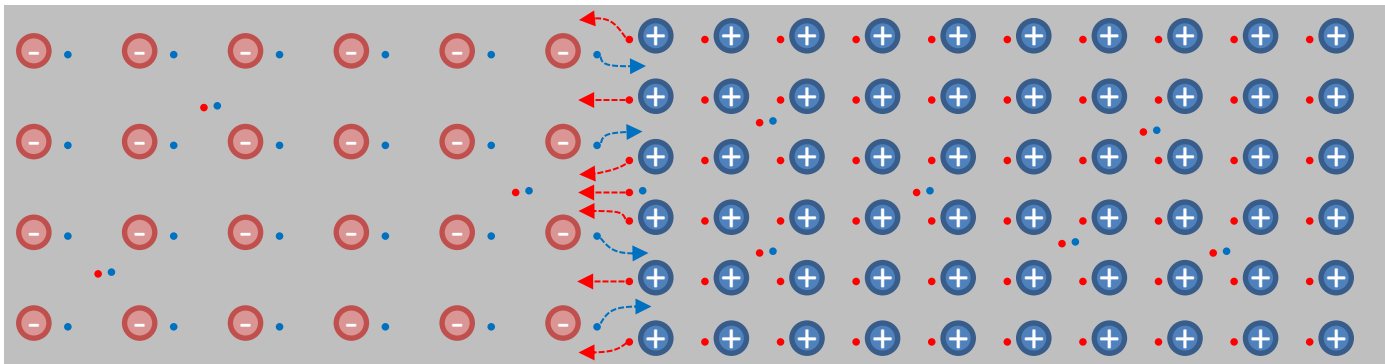


- Velika razlika u gustoći istovrsnih pokretnih nosilaca na p i n-strani!!!

pn-spoj u ravnoteži (2)

- U trenutku nastanka pn-spoja postoji **veliki gradijent gustoće** slobodnih nosilaca: gustoća elektrona je velika na n-strani, a mala na p-strani; gustoća šupljina je velika na p-strani, a mala na n-strani.
- Nosioци **difuzijom** prelaze na stranu gdje su u manjini (elektroni iz n-strane u p-stranu, šupljine iz p-strane u n-stranu).

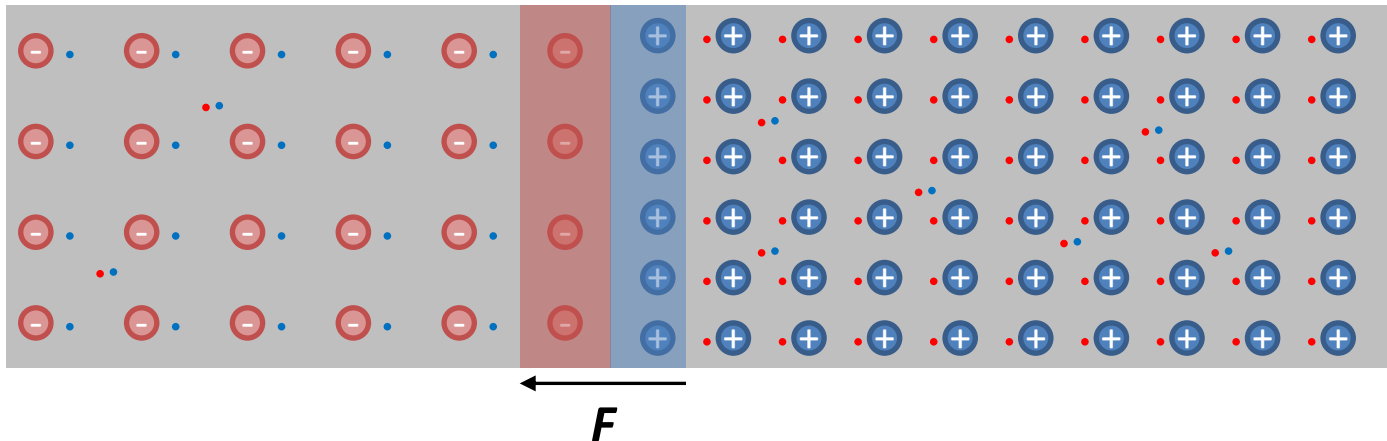
$$\begin{aligned} p_{0p} &>> p_{0n} \\ n_{0p} &<< n_{0n} \end{aligned}$$



- Prelaskom nosilaca difuzija postaje sve slabija jer n-strana gubi elektrone, a p-strana gubi šupljine.

pn-spoj u ravnoteži (3)

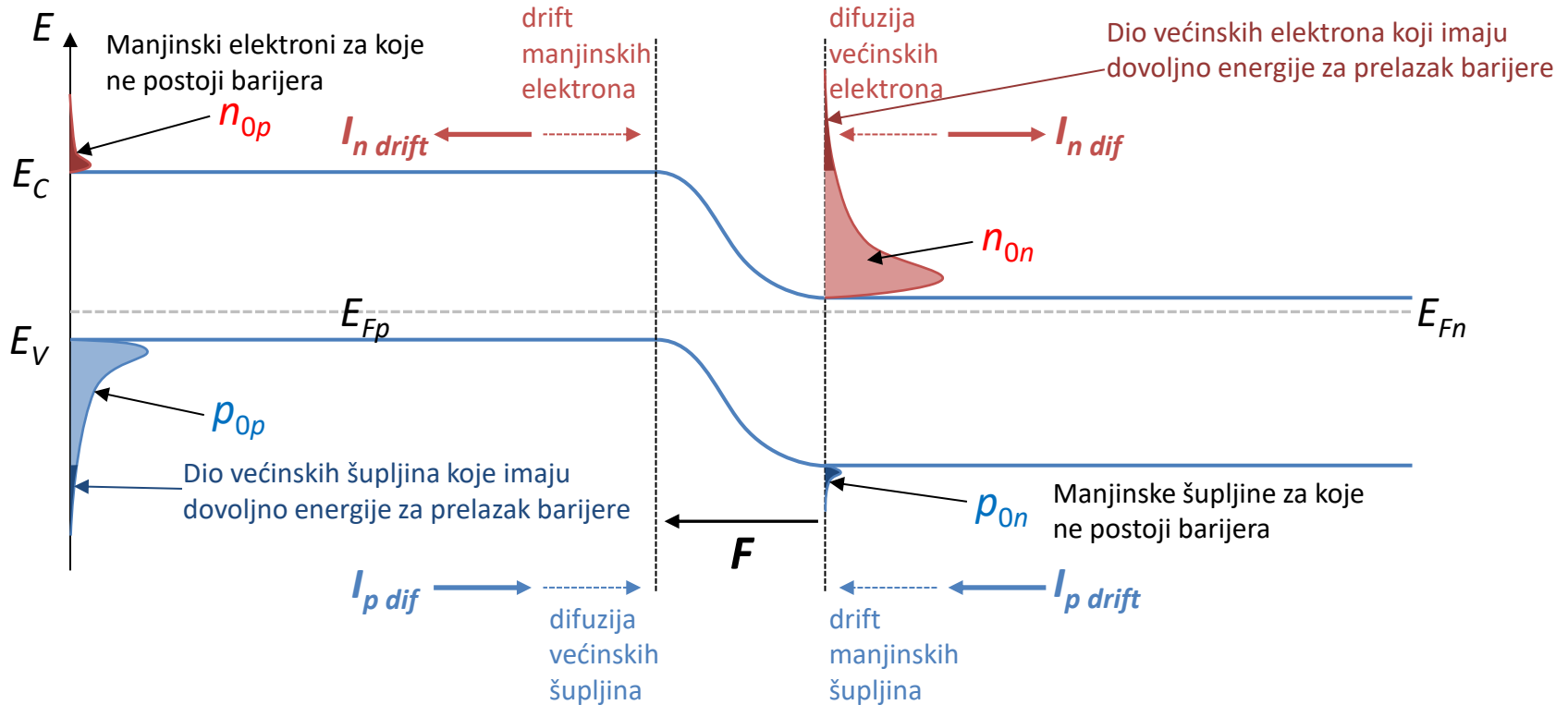
- U okolišu spoja nastaje područje koje zbog rekombinacije elektrona i šupljina oskudijeva slobodnim nosiocima – **osiromašeno područje**.
- U osiromašenom području s p-strane ostaju samo negativni akceptorski ioni, a s n-strane pozitivni donorski ioni. Naboj ioniziranih primjеса, koji u osiromašenom području nije kompenziran nabojem slobodnih nosilaca, uzrokuje **električno polje F** unutar barijere koje zaustavlja difuziju većinskih nosilaca.



- U ravnoteži je ukupna struja elektrona, odnosno šupljina, jednaka ničiti pa električno polje propušta onoliku difuzijsku struju većinskih nosilaca koja poništava driftnu struju manjinskih nosilaca (za koje ne postoji barijera).

pn-spoj u ravnoteži (4)

- Ravnotežni uvjeti – ukupna struja elektrona/šupljina jednaka je ničiti – **Fermijeva razina je konstantna u cijelom pn-spoju!** $\rightarrow E_{Fp} = E_{Fn} = E_F$



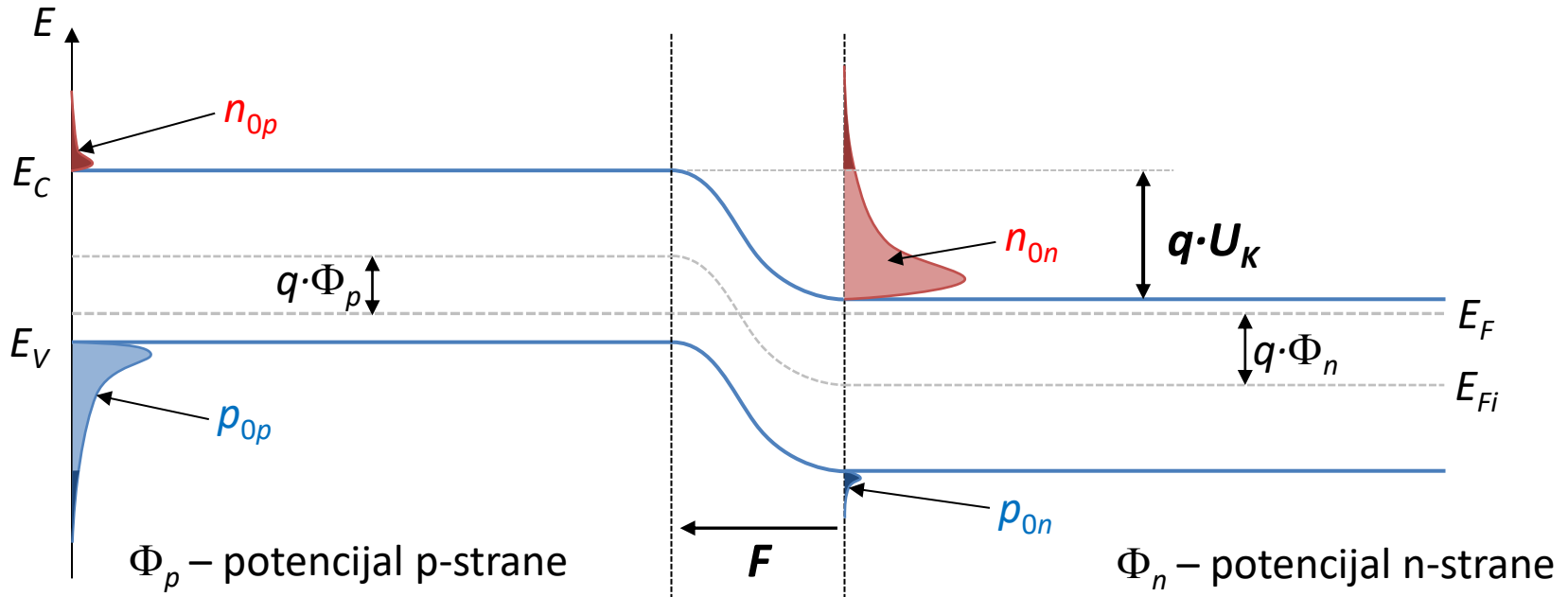
- U ravnoteži se poništavaju driftna i difuzijska komponenta struje elektrona, odnosno šupljina:

$$I_{n\ drift} + I_{n\ dif} = 0$$

$$I_{p\ drift} + I_{p\ dif} = 0$$

Kontaktni potencijal

- Postojanje el. polja u barijeri znači da u ravnotežnim uvjetima na rubovima barijere postoji potencijalna razlika – tzv. **kontaktni potencijal**, U_K .



- Potencijalna energija na barijeri može se izraziti kao: $E_K = q \cdot U_K$

NAPOMENA: Energijski dijagram prikazuje energije elektrona – što je potencijal negativniji, energija elektrona je veća!

Kontaktни potencijal (2)

- Kontaktни potencijal je razlika potencijala p i n-strane u ravnotežnim uvjetima. Može se odrediti iz uvjeta ravnoteže: $J_n = 0$, odnosno $J_p = 0$.

$$J_n = 0$$

$$q \cdot n \cdot \mu_n \cdot F + q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx} = 0 \quad \Longrightarrow \quad -F = \frac{D_n}{n \cdot \mu_n} \cdot \frac{dn}{dx}$$

$$-F = \frac{d\Phi}{dx} \quad \text{El. polje } F \text{ je negativan gradijent potencijala } \Phi$$

$$\frac{d\Phi}{dx} = \frac{D_n}{n \cdot \mu_n} \cdot \frac{dn}{dx}$$

- Integriranjem u granicama područja barijere (od $-x_p$ do $+x_n$):

$$\Phi|_1^2 = \Phi(x_n) - \Phi(-x_p) = U_T \cdot \ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad U_K = \Phi(x_n) - \Phi(-x_p) = U_T \cdot \ln\left(\frac{n_{0n}}{n_{0p}}\right)$$

- Ako je $p_{0p} \approx N_A$ i $n_{0n} \approx N_D$ (u praksi obično ispunjeno):

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

NAPOMENA: Isti se izraz može izvesti iz uvjeta da je $J_p = 0$.



Raspodjela električnog polja i potencijala u barijeri

- Ako se u području barijere zanemare gustoće slobodnih nosilaca u odnosu na gustoće primjesa, Poissonova jednadžba u 1D ima oblik:

$$-\frac{d^2\Phi}{dx^2} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon} \quad \rho(x) \text{ je gustoća naboja u barijeri, a } \varepsilon \text{ je dielektričnost materijala}$$

- Za skokoviti pn-spoj, uz rubni uvjet da električno polje iščezava izvan barijere ($F=0$), a funkcija raspodjele potencijala je kontinuirana, rješenje Poissonove jednadžbe daje raspodjelu el. polja i potencijala unutar barijere:

Za $-x_p \leq x \leq 0$ (p-strana barijere):

$$F(x) = -\frac{q \cdot N_A}{\varepsilon} (x + x_p)$$

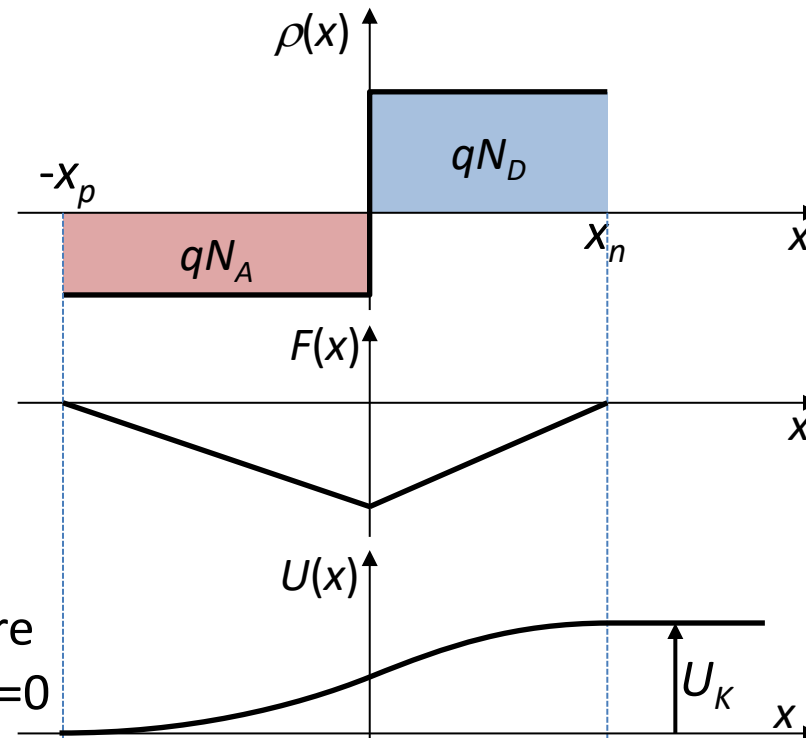
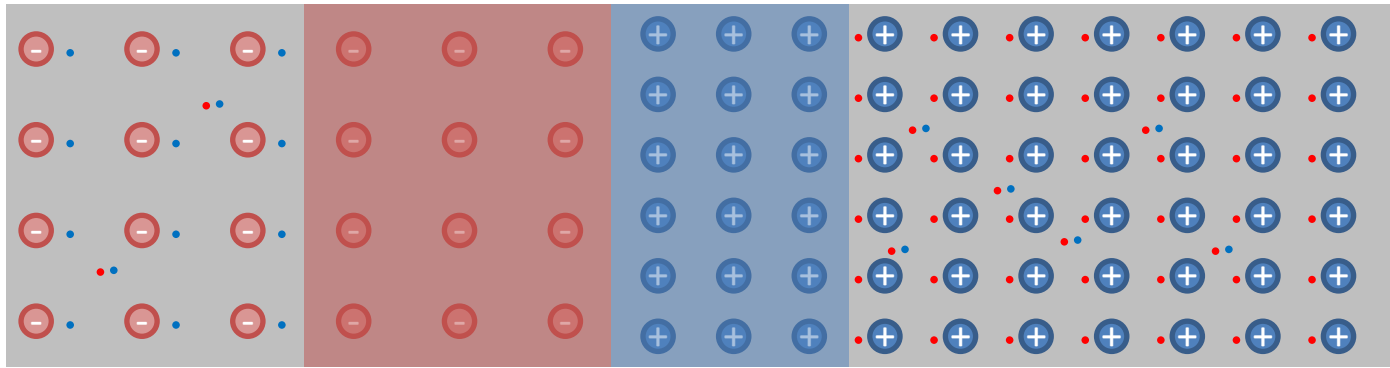
$$\Phi(x) = \frac{q \cdot N_A}{\varepsilon} \left(\frac{x^2}{2} + x_p \cdot x + \frac{x_p^2}{2} \right)$$

Za $0 \leq x \leq x_n$ (n-strana barijere):

$$F(x) = \frac{q \cdot N_D}{\varepsilon} (x - x_n)$$

$$\Phi(x) = -\frac{q \cdot N_D}{\varepsilon} \left(\frac{x^2}{2} - x_n \cdot x - \frac{x_n^2}{2} \cdot \frac{N_A}{N_D} \right)$$

Raspodjela električnog polja i potencijala u barijeri (2)



$$F(x) = \frac{1}{\varepsilon} \int \rho(x) dx$$

$$\Phi(x) = - \int F(x) dx$$

$$U(x) = \Phi(x) - \Phi(-x_p)$$

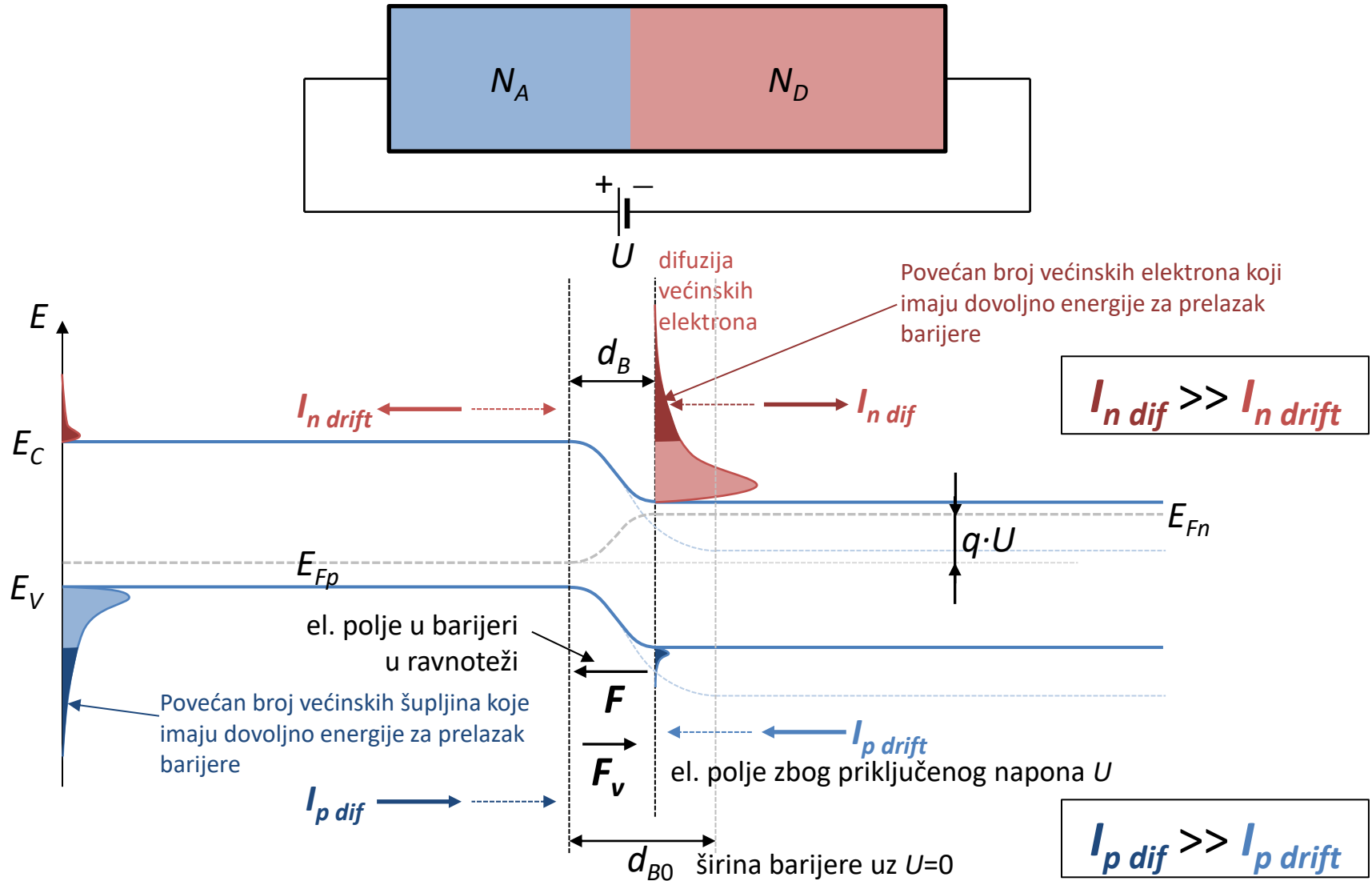
Ako se p-strana odabere kao referentna, $\Phi(-x_p)=0$

pn spoj s priključenim naponom

- **Propusna polarizacija** – vanjski napon je priključen + polom na p-stranu, a – polom na n-stranu. Napon na barijeri umanjen je za iznos priključenog napona. Električno polje zbog priključenog vanjskog napona suprotstavlja se električnom polju u osiromašenom području pa se smanjuje barijera i povećava broj većinskih nosilaca koji difuzijom prelaze na drugu stranu spoja.
- **Nepropusna polarizacija** – vanjski napon priključen je + polom na n-stranu, a – polom na p-stranu. Napon na barijeri uvećan je za iznos priključenog napona. Električno polje zbog priključenog vanjskog napona potpomaže električno polje u osiromašenom području pa se barijera povećava i praktički potpuno onemogućuje difuziju većinskih nosilaca. Preko pn-spoja prelaze samo manjinski nosioci jer za njih barijera ne postoji.
- **VAŽNO!** Potencijalna barijera se nikada ne može u potpunosti eliminirati jer kod propusne polarizacije postoji pad napona i izvan barijere (tj. nije sav priključeni napon prenesen isključivo na područje barijere)!

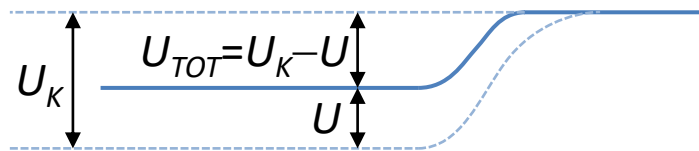


Propusna polarizacija



Propusna polarizacija (2)

- Difuzijska struja većinskih nosilaca je znatno veća od driftne struje manjinskih nosilaca.
- Difuzija nosilaca efektivno smanjuje gustoću nekompenziranih donorskih i akceptorskih iona u osiromašenom području pa se **širina osiromašenog područja smanjuje**.
- Ukupni napon na barijeri, U_{TOT} , jednak je kontaktnom naponu umanjenom za priključeni napon:

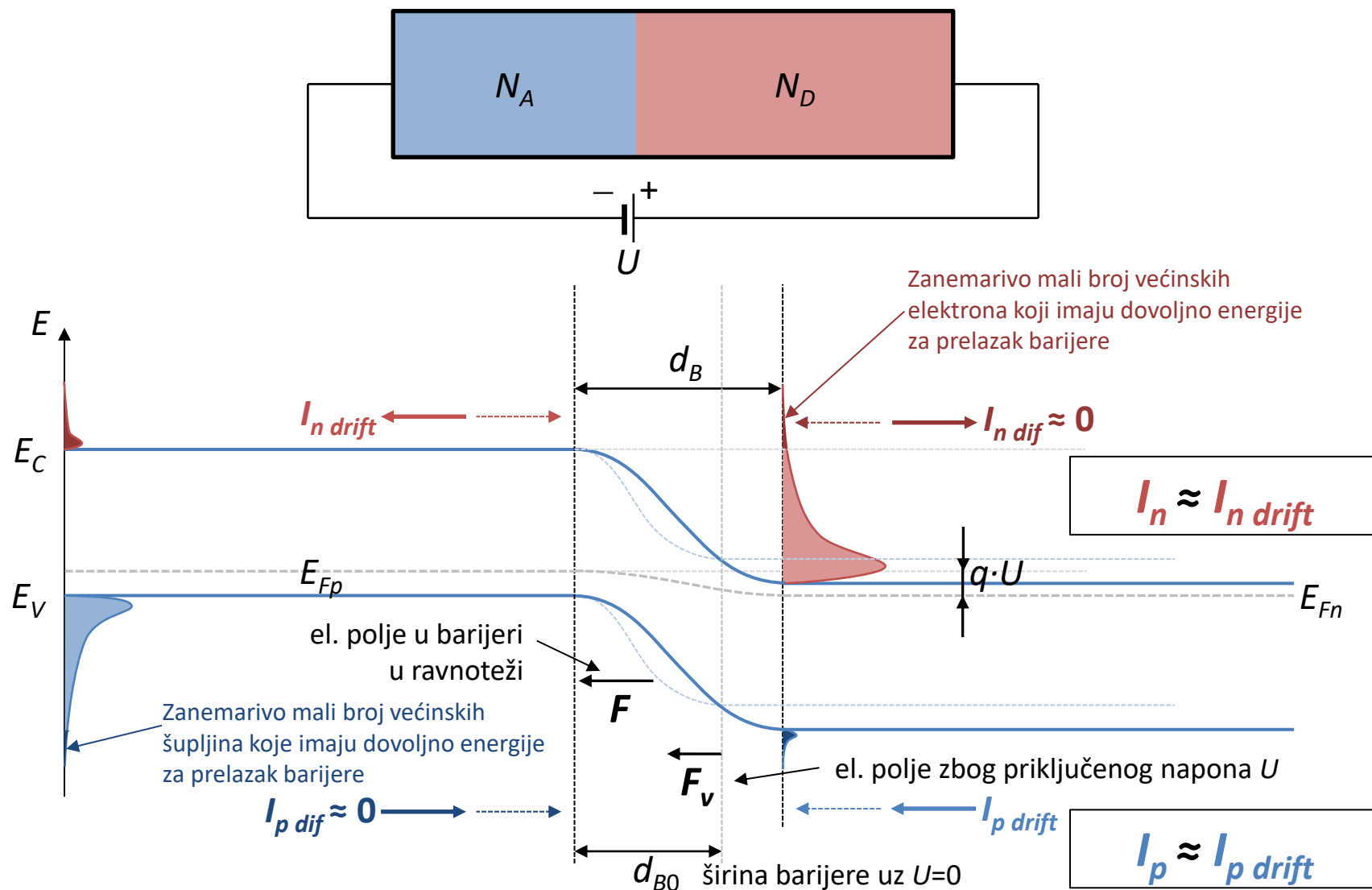


$$U_{TOT} = U_K - U;$$
$$U > 0$$

- Što je veći iznos priključenog napona propusne polarizacije U to je barijera manja pa će struja kroz pn-spoj biti veća.
- Ukupna struja kroz pn-spoj je:

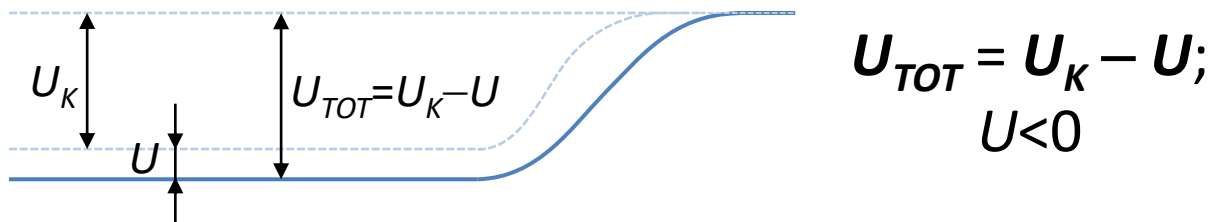
$$I = I_{dif} - I_{drift} = I_{n dif} + I_{p dif} - I_{n drift} - I_{p drift} > 0$$

Nepropusna polarizacija



Nepropusna polarizacija (2)

- Difuzijska struja je praktički onemogućena zbog povećanja barijere – teče samo driftna struja manjinskih nosilaca.
- Priklučeni vanjski napon „odvlači” većinske nosioce iz područja uz barijeru čime se povećava gustoća nekompensiranih donorskih i akceptorskih iona u osiromašenom području pa se **širina osiromašenog područja povećava**.
- Ukupni napon na barijeri, U_{TOT} , jednak je kontaktnom naponu umanjenom za priklučeni napon i on se povećava:

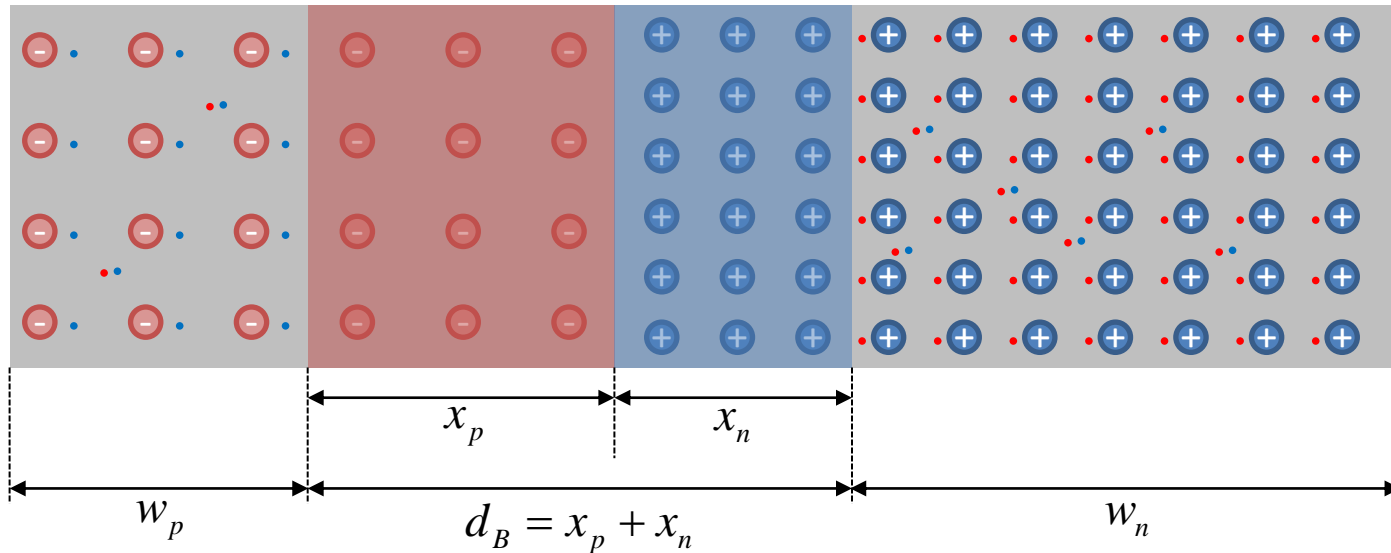


- Ukupna struja kroz pn-spoj je vrlo malog iznosa:

$$I = I_{dif} - I_{drift} \approx -I_{n\ drift} - I_{p\ drift} < 0$$

Širina osiromašenog područja

- Širina osiromašenog područja d_B sastoji se od dijela barijere na p-strani (x_p) i dijela barijere na n-strani (x_n):



- Za osiromašeno područje vrijedi uvjet el. neutralnosti: $N_A \cdot x_p = N_D \cdot x_n$
- Iz izraza za ukupni napon na barijeri dobije se izraz za širinu osiromašenog područja:

$$d_B = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \cdot \frac{(N_A + N_D)}{N_A \cdot N_D} \cdot U_{TOT}}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$$

$$\varepsilon_r(\text{Si}) = 11,7$$

Širina osiromašenog područja (2)

- Iz izraza za širine barijere na pojedinoj strani:

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

može se uočiti da se **barijera više širi na manje onečišćenu stranu.**

- Ako je jedna strana pn-spoja puno više onečišćena (tzv. **jednostrani pn-spoj**):

$$N_A \gg N_D \Rightarrow d_B \approx x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \cdot \frac{1}{N_D} \cdot U_{TOT}}$$

$$N_D \gg N_A \Rightarrow d_B \approx x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \cdot \frac{1}{N_A} \cdot U_{TOT}}$$

Barijerni kapacitet

- U području barijere dominiraju **nepokretni ioni primjesa** (negativni akseptori na p-strani barijere, pozitivni donori na n-strani barijere) pa taj prostor ima **karakteristike dielektrika**.
- **Barijerni (tranzitni) kapacitet C_T** je posljedica postojanja naboja ioniziranih primjesa u barijeri:

$$C_T = \varepsilon \cdot \frac{S}{d_B} \quad S \text{ je površina pn-spoja}$$

- Izraz za barijerni kapacitet izveden je uz pretpostavke koje vrijede u uvjetima **nepropusne polarizacije**:
 - sav napon je isključivo na području barijere (pad napona u neutralnim područjima je zanemarivo malog iznosa);
 - u osiromašenom području nema slobodnih nosilaca.
- U uvjetima propusne polarizacije izraz vrijedi približno, uz male iznose napona propusne polarizacije (uz $U=U_K$ bilo bi $d_B=0$ pa bi $C_T \rightarrow \infty$, što je opovrgnuto mjerenjima).

Jakost el. polja u barijeri

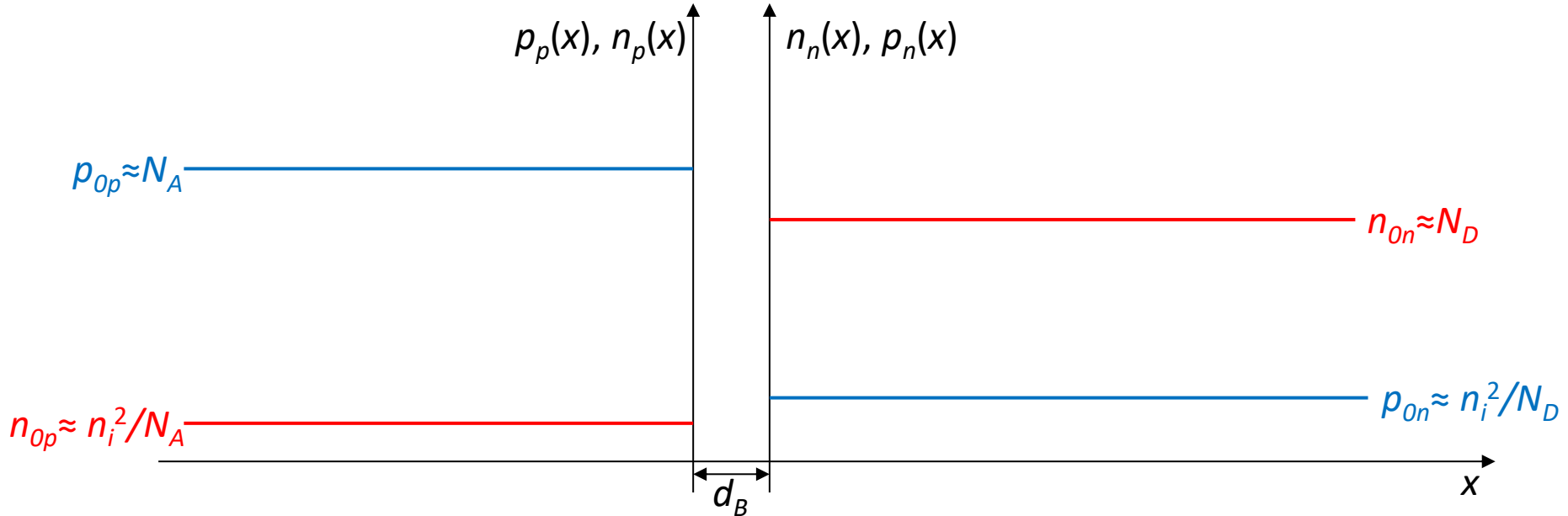
- Električno polje u barijeri ima najveći iznos na mjestu pn-spoja:

$$F_{\max} = -\frac{2 \cdot U_{TOT}}{d_B}$$

- Maksimalna jakost el. polja ovisi o gustoći primjesa, temperaturi i narinutom naponu.
- Za određeni pn-spoj (definirane gustoće primjesa) na nekoj temperaturi, maksimalna jakost el. polja u barijeri bit će veća u slučaju nepropusne polarizacije.

Gustoća nosilaca u ravnotežnim uvjetima

- U ravnotežnim uvjetima ($U=0$), gustoće nosilaca određene su gustoćom primjеса i temperaturom.



- Uz uvjete

$$N_A^2 \gg 4n_i^2 \Rightarrow p_{0p} \approx N_A$$
$$n_{0p} \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$N_D^2 \gg 4n_i^2 \Rightarrow n_{0n} \approx N_D$$
$$p_{0n} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

Gustoća nosilaca uz propusnu polarizaciju

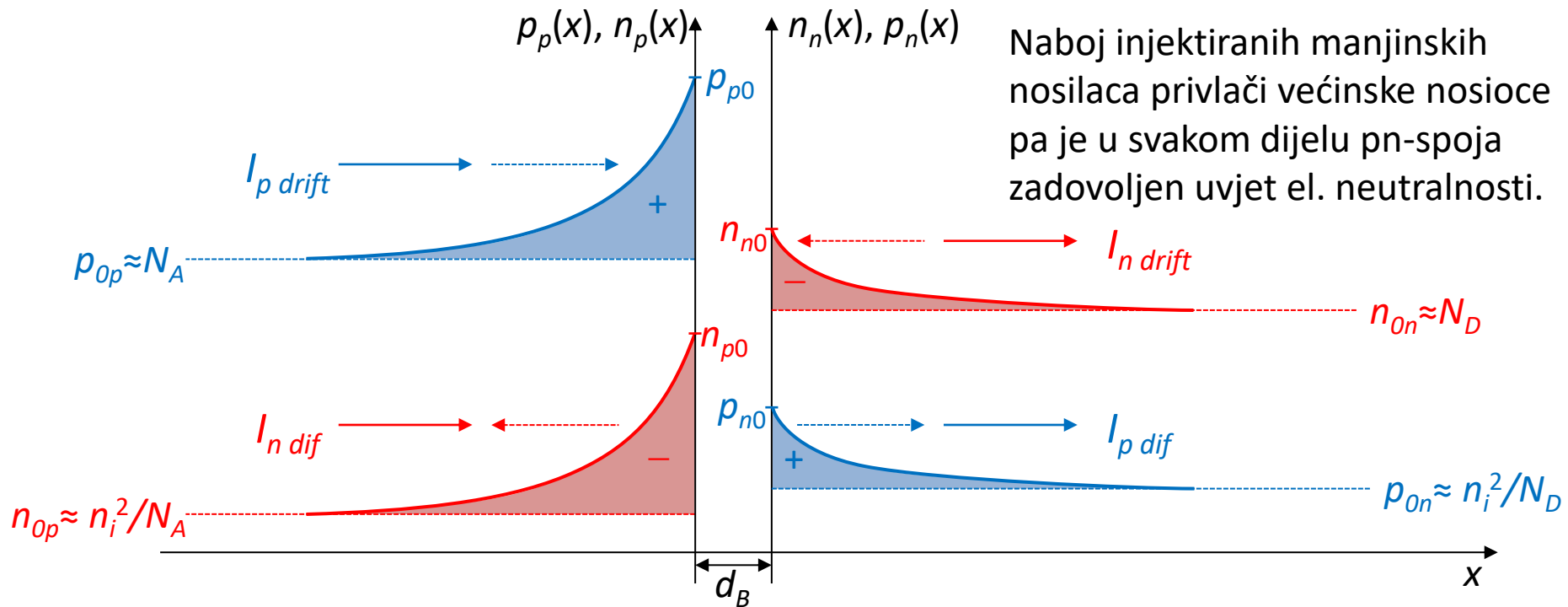
Uz propusnu polarizaciju ($U > 0$), smanjenje barijere rezultirat će povećanjem broja većinskih nosilaca koji difuzijom prelaze barijeru. Nosioци koji prijeđu barijeru, na drugoj strani spoja čine manjinske nosioce pa se to naziva **injekcija manjinskih nosilaca**. Injektirani nosioци povećavaju gustoću manjinskih nosilaca uz rub barijere iznad ravnotežne gustoće (n_{p0} , odnosno p_{n0}) te dolazi do difuzije nosilaca od barijere prema dubini te strane. Tijekom difuzije manjinski nosioци se rekombiniraju s većinskim pa gustoća manjinskih nosilaca opada udaljavanjem od barijere. Zbog uvjeta električne neutralnosti i gustoća se većinskih nosilaca mijenja na način da je u svakoj točki dodatni naboj injektiranih manjinskih nosilaca kompenziran nabojem većinskih nosilaca (površine ispod krivulja gustoća manjinskih i većinskih nosilaca su jednake).

U uvjetima **niske injekcije** (gustoća injektiranih manjinskih nosilaca je puno manja od ravnotežne gustoće većinskih nosilaca), gustoća manjinskih nosilaca uz rub barijere povezana je s ravnotežnom gustoćom manjinskih nosilaca tzv. **eksponencijalnim zakonom**.

Režim niske injekcije podrazumijeva:

$$\frac{n_{p0}}{p_{0p}} \ll 1 \qquad \frac{p_{n0}}{n_{0n}} \ll 1$$

Gustoća nosilaca uz propusnu polarizaciju



- Gustoće nosilaca uz rub barijere veće su od ravnotežnih. Za gustoće manjinskih nosilaca vrijedi **eksponencijalni zakon**:

$$n_{p0} \approx n_{0p} \cdot \exp\left(\frac{U}{U_T}\right)$$

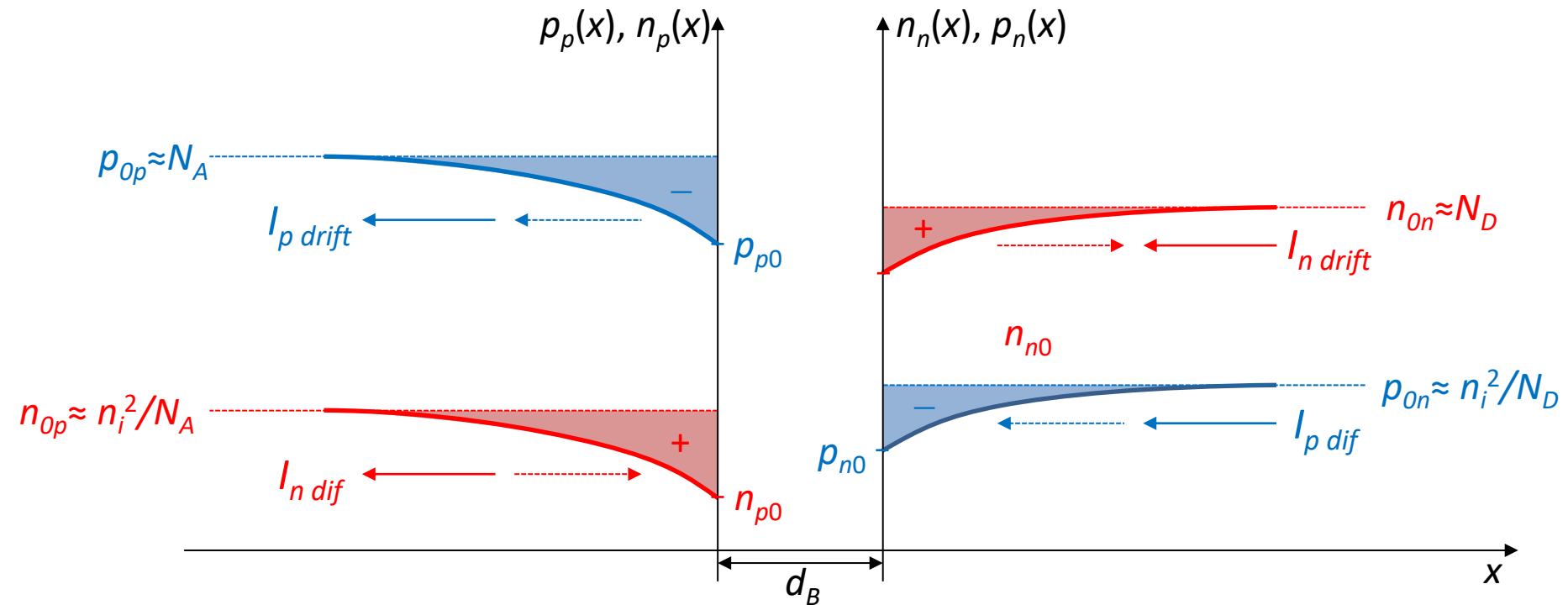
$$p_{n0} \approx p_{0n} \cdot \exp\left(\frac{U}{U_T}\right)$$

Gustoća nosilaca uz nepropusnu polarizaciju

U uvjetima nepropusne polarizacije ($U < 0$), povećava se barijera pa većinski nosioci ne mogu prelaziti barijeru, a teče samo struja manjinskih nosilaca. Električno polje u barijeri izvlači manjinske nosioce iz p i n-strane pa je gustoća manjinskih nosilaca uz rubove barijere (n_{p0} , odnosno p_{n0}) smanjena ispod ravnotežne gustoće. Taj manjak nastoji se nadoknaditi difuzijom iz volumena odgovarajućih strana, gdje je gustoća manjinskih nosilaca jednaka ravnotežnoj gustoći, kao i pojačanom generacijom parova nosilaca. Zbog uvjeta električne neutralnosti i gustoća se većinskih nosilaca mijenja na način da je u svakoj točki dodatni naboj injektiranih manjinskih nosilaca kompenziran nabojem većinskih nosilaca (površine ispod krivulja gustoća manjinskih i većinskih nosilaca su jednake).

U režimu niske injekcije vrijedi eksponencijalni zakon, ali je zbog negativne vrijednosti priključenog napona, gustoća manjinskih nosilaca uz rub barijere manja od ravnotežne gustoće.

Gustoća nosilaca uz nepropusnu polarizaciju



El. polje izvlači elektrone u blizini barijere pa je uz barijeru njihova gustoća najmanja. Zbog gradijenta gustoće elektroni se gibaju prema barijeri difuzijom. Istovremeno, manjak elektrona uz barijeru znači višak pozitivnog naboja pa se većinske šupljine driftom gibaju prema dubini p-strane.

El. polje izvlači šupljine u blizini barijere pa je uz barijeru njihova gustoća najmanja. Zbog gradijenta gustoće šupljine se gibaju prema barijeri difuzijom. Istovremeno, manjak šupljina uz barijeru znači višak negativnog naboja pa se većinski elektroni driftom gibaju prema dubini n-strane.