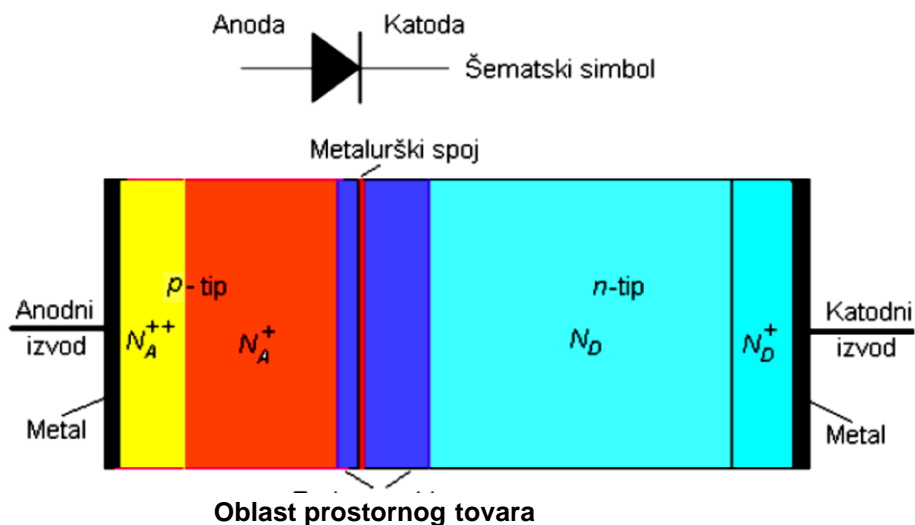


3. PN spoj

PN spoj je jedinstveno poluprovodničko telo sa jedinstvenom kristalnom rešetkom koje u jednom delu zapremine sadrži pretežno akceptorske (P-tip), a u drugom delu donorske (N-tip) primese. PN spoj je električno neutralan, jer su i silicijumska osnova i dodate primese električno neutralni.

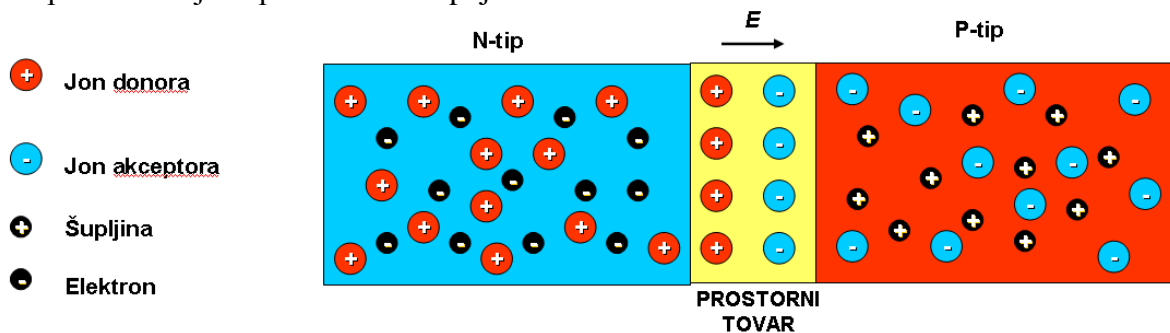
- **Nepolarisani PN spoj**

Pod polarizacijom se podrazumeva dovođenje jednosmernog napona na elektronsku komponentu. PN spoj sa metalnim kontaktima naziva se poluprovodnička dioda.



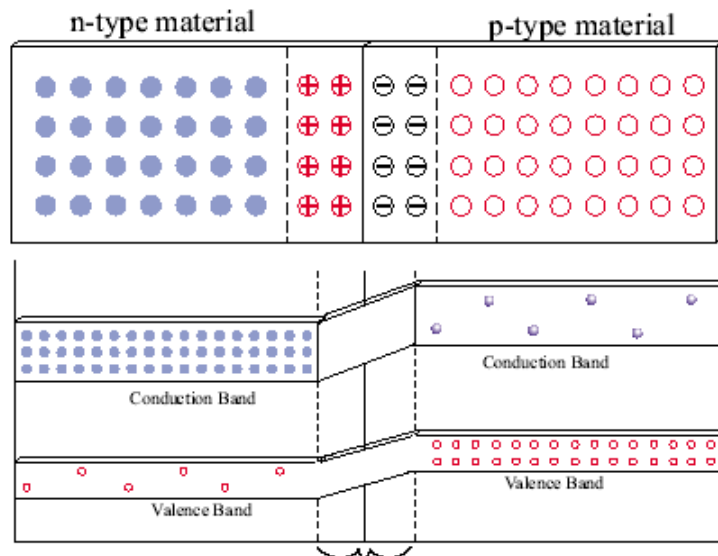
Zbog velike razlike u koncentracijama primesa na N i P strani spoja dolazi do spontanog kretanja, difuzije elektrona iz N dela u P deo i difuzije šupljina iz P dela u N deo. Elektroni prispeli iz N dela rekombinuju se sa šupljinama u P delu, a šupljine ubačene iz P dela sa elektronima u N delu. Elektroni za sobom ostavljaju nekompenzovane pozitivne donorske jone u N delu, a šupljine nekompenzovane negativne akceptorske jone u P delu.

Oblast prostornog tovara (OPT) formira se neposredno uz fizički spoj od nekompenzovanih pozitivnih donorskih jona iz N dela i nekompenzovanih negativnih akceptorskih jona iz P dela. Uslov električne neutralnosti PN spoja nalaže $N_d \cdot l_n = N_a \cdot l_p$, gde su l_n i l_p širine oblasti prostornog tovara na N i P strani spoja, respektivno Oblast prostornog tovara više se širi prema slabije dopiranom delu spoja.

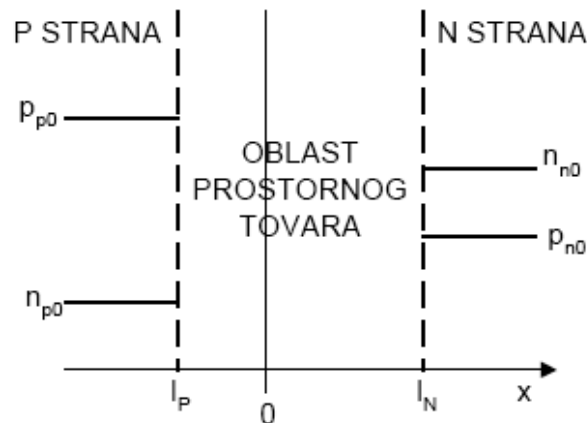


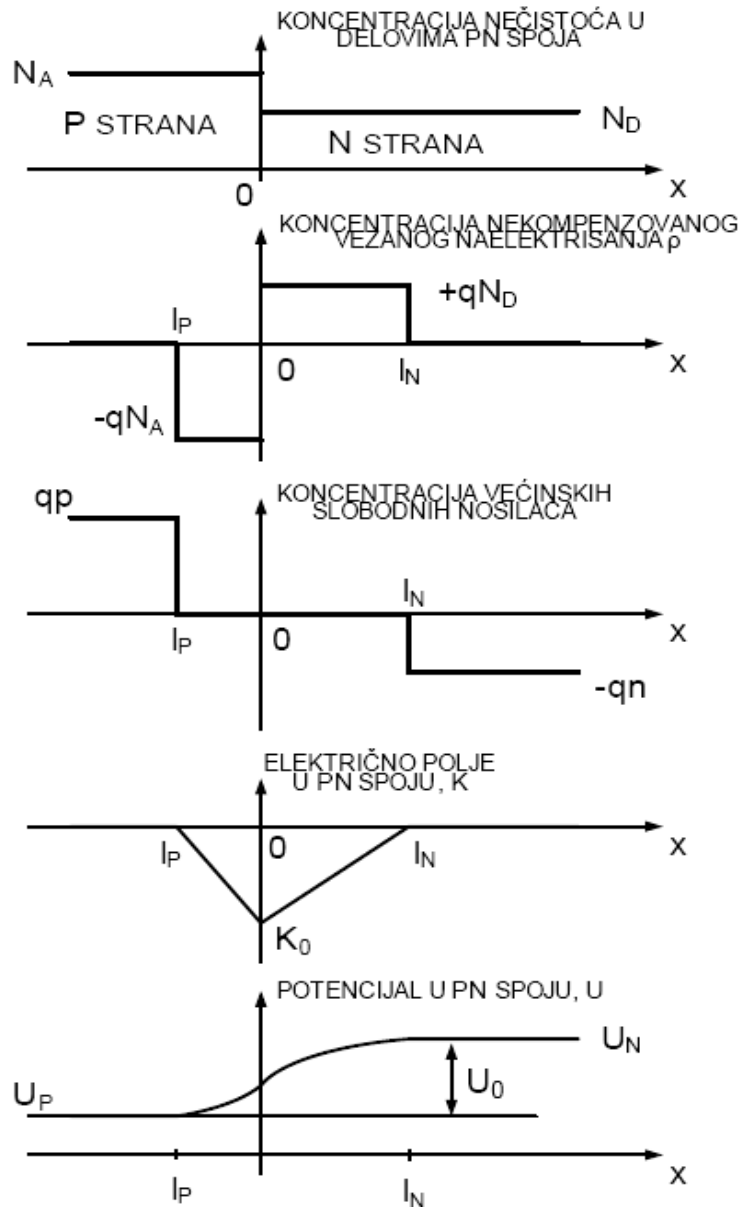
Dakle, u oblasti prostornog tovara nema slobodnih nosilaca naelektrisanja jer ih ugrađeno zaprečno polje izbacuje iz svoje "zone delovanja". U OPT ima električnog polja koje potiče od nekompenzovanog vezanog naelektrisanja i to pozitivnih jona na N i negativnih jona na P strani spoja. Ovo vezano naelektrisanje se ne može međusobno poništiti ("rekombinovati") jer ga čine joni koji se nalaze u čvorištima kristalne rešetke i ne mogu se pomerati. Izvan oblasti prostornog tovara ima slobodnih nosilaca naelektrisanja, ali nema nekompenzovanih jona kao ni električnog polja.

Električno polje u oblasti prostornog tovara (ugrađeno, zaprečno polje) uvek je usmereno od N ka P strani spoja i otežava odnosno praktično u potpunosti sprečava dalje difuziono kretanje većinskih nosilaca naelektrisanja, elektrona iz N ka P strani i šupljina iz P ka N strani spoja. Kažemo da je PN spoj u ravnoteži, a gustina struje spoja $J=0$.



- Dijagram koncentracije pokretnih nosilaca naelektrisanja na nepolarisanom asimetrično dopiranom P^+N spoju u ravnoteži je na narednoj slici. Obratiti pažnju: P^+ tip je sa leve a N tip sa desne strane od koordinatnog početka (metalurškog spoja), a x osa je usmerena od P ka N strani spoja.





Prostorna raspodela nekih parametara nepolarisanog, otvorenog P⁺N spoja.

➤ Napon potencijalne barijere nepolarisanog otvorenog PN spoja

Ukupna gustina struje kroz otvoren PN spoj (prekinuto kolo) mora biti nula ($J=0$) iz čega sledi da su i pojedinačne komponente, struje elektrona i šupljina, takođe jednake nuli ($J_n=0$ i $J_p=0$), jer teku u istom smeru (smer struje elektrona suprotan je smeru kretanja elektrona!).

Iz $J_n = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx} = 0$, nakon zamene $E = -dU/dx$ i integracije po OPT dobija se:

$$U_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2} = V_T \ln \frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2}.$$

Tipična vrednost napona potencijalne barijere je između 0.6 i 0.8V na normalnoj temperaturi za Si PN spojeve. Izvođenje izraza za napon potencijalne barijere:

$$J=0 \Rightarrow J_n=0 \text{ i } J_p=0. \text{ Iz } J_n=0 \text{ sledi } J_n = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx} = 0 \text{ tj. } E = -\frac{D_n}{\mu_n} \frac{dn}{n} \frac{1}{dx}.$$

$$\text{Zamenom } E = -\frac{dU}{dx} \text{ dobijamo } -\frac{dU}{dx} = -\frac{D_n}{\mu_n} \frac{dn}{n} \frac{1}{dx}, \text{ odnosno}$$

$$dU = \frac{D_n}{\mu_n} \frac{dn}{n} = \frac{kT}{q} \frac{dn}{n}, \text{ gde je iskorišćeno } \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} \text{ (Ajnštajnovе relacije).}$$

$$U_0 = V_N - V_P = \int_{N \text{ deo}}^{P \text{ deo}} \vec{E} \cdot d\vec{x} = - \int_{N \text{ deo}}^{P \text{ deo}} E \cdot dx = \int_{P \text{ deo}}^{N \text{ deo}} E \cdot dx, \text{ jer su vektori } \mathbf{E} \text{ i } d\mathbf{x} \text{ suprotnog smera.}$$

Električno polje je usmereno u suprotnom smeru od x ose! (videti prethodne dijagrame, posebno dijagram jačine električnog polja).

Integracijom po oblasti prostornog tovara, jer električno polje postoji samo u OPT, dobija se:

$$U_0 = V_N - V_P = \frac{kT}{q} \int_{n(l_p)}^{n(l_N)} \frac{dn}{n} = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_{n0}}{n_{p0}},$$

gde su $n_{n0} = n(l_N)$ i $n_{p0} = n(l_P)$ ravnotežne koncentracije slobodnih elektrona na ivicama OPT na N i P strani spoja, respektivno. Kako je $n_{n0} = N_d + n_i \approx N_d$, jer je uvek $N_d \gg n_i$ i

$$n_{p0} \cdot p_{p0} = n_i^2 \text{ (zakon dejstva masa) dobija se } n_{p0} = \frac{n_i^2}{p_{p0}} = \frac{n_i^2}{N_a}, \text{ jer je } p_{p0} = N_a + p_i \approx N_a,$$

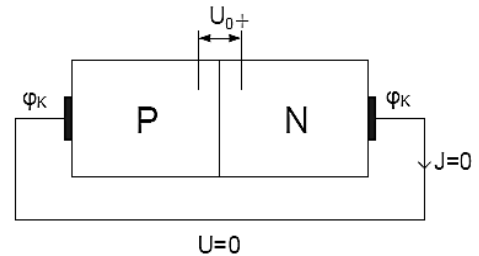
zbog $N_a \gg p_i$. Konačno, zamenom navedenih izraza dobija se

$$U_0 = V_N - V_P = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_{n0}}{n_{p0}} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_d}{n_i^2 / N_a} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_d \cdot N_a}{n_i^2}.$$

➤ Sa porastom temperature opada napon potencijalne barijere: $T \uparrow \Rightarrow U_0 \downarrow$ zbog porasta intrinzične (sopstvene) koncentracije n_i , $n_i^2 = A_0 T^3 e^{-\frac{E_{go}}{kT}}$.

• PN spoj u kratkom spoju

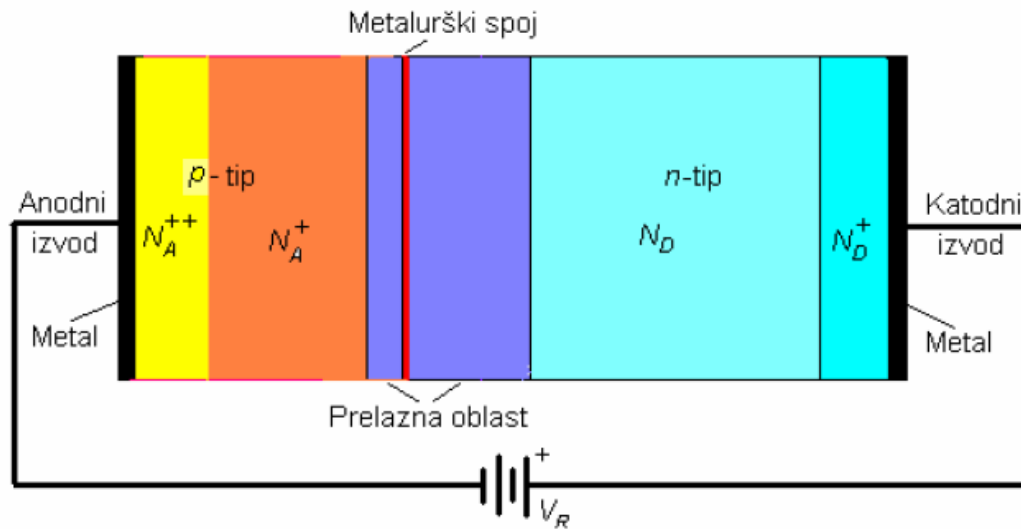
Gustina struje spoja je ponovo $J=0$, jer se javlja kontaktni potencijal između metalnih priključaka i poluprovodnika, tako da važi $U_0 + \varphi_{KN} + \varphi_{KP} = 0$, tj. padovima napona na kontaktima metal-poluprovodnik u potpunosti se kompenzuje napon potencijalne barijere.



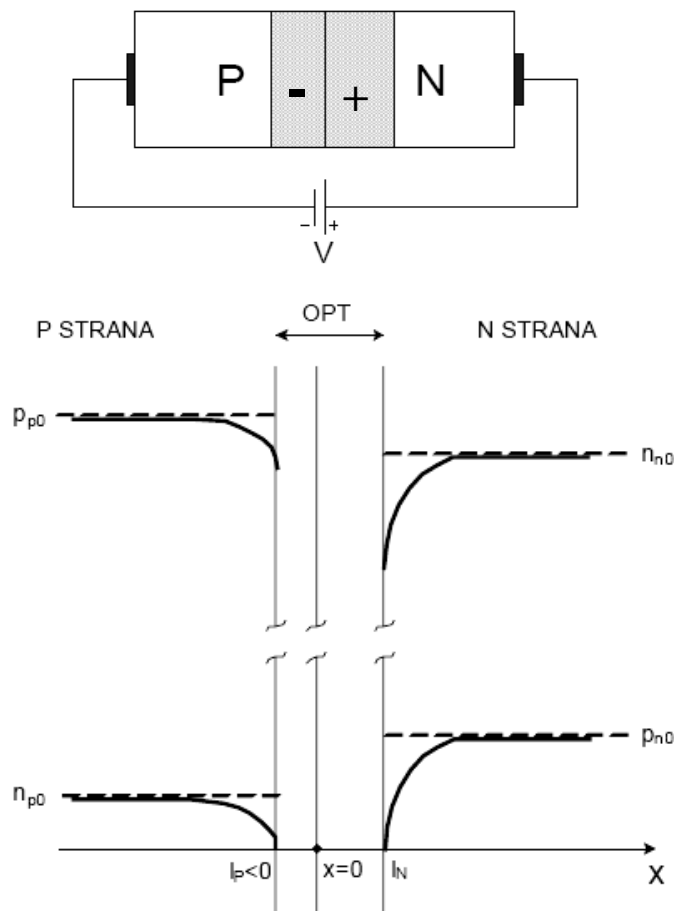
Slobodni elektroni koji su na višem energetskom nivou u poluprovodniku N tipa (provodna zona) nego u metalu (valentna zona) spontano prelaze iz N oblasti u metal, dok obrnuto ne mogu. Kao posledica, N oblast uz kontakt se naelektriše pozitivno, a metalni kontakt negativno. Na spoju metal - P oblast elektroni spontano prelaze iz metala u P oblast, pa je ovde metal pozitivno a P oblast uz kontakt negativno naelektrisan.

U svakom slučaju PN spoj ne može raditi kao izvor elektromotorne sile, jer nema utroška energije!!

- Inverzno (nepropusno) polarisani PN spoj



Inverznom polarizacijom povećava se napon potencijalne barijere, širi oblast prostornog tovara i dodatno otežava kretanje glavnih nosilaca naelektrisanja kroz spoj, ali se istovremeno podstiče kretanje sporednih (manjinskih) nosilaca kroz spoj.

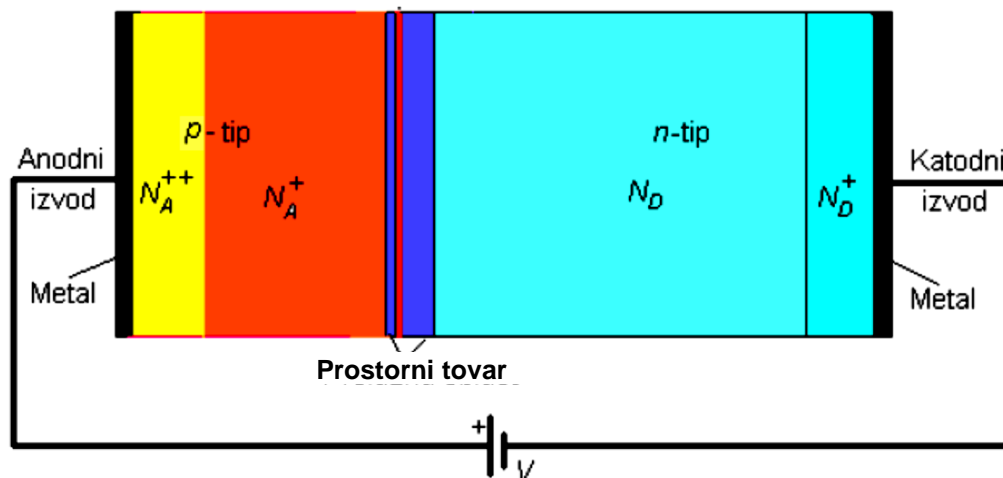


Koncentracija slobodnih nosilaca u inverzno polarisanom P⁺N spoju

Koncentracije pokretnih nosilaca uz ivice oblasti prostornog tovara su manje nego kod nepolarisanog PN spoja. Svi sporedni nosioci koji dospeju do ivice oblasti prostornog tovara bivaju prebačeni na drugu stranu spoja delovanjem zaprečnog polja. Koncentracija manjinskih nosilaca naelektrisanja na ivicama oblasti prostornog tovara je nula, a zbog elektroneutralnosti oba dela spoja dolazi do odgovarajućeg pada koncentracije i većinskih nosilaca naelektrisanja.

Kroz PN spoj protiče tzv. inverzna struja zasićenja J_S koju čine protok elektrona iz P dela prema N delu i protok šupljina iz N dela prema P delu spoja kroz oblast prostornog tovara pod dejstvom ugrađenog električnog polja E . Kako je koncentracija manjinskih nosilaca vrlo mala to je inverzna struja zasićenja u većini praktičnih primena zanemarljivo mala. Inverzna struja zasićenja zavisi od parametara i temperature spoja a usmerena je od N dela (katoda) prema P delu (anoda) spoja. Inverzno polarisani PN spoj se ponaša kao otvorena veza – otvoreni prekidač, jer kroz njega ne protiče značajna struja.

- **Direktno (propusno) polarisani PN spoj**

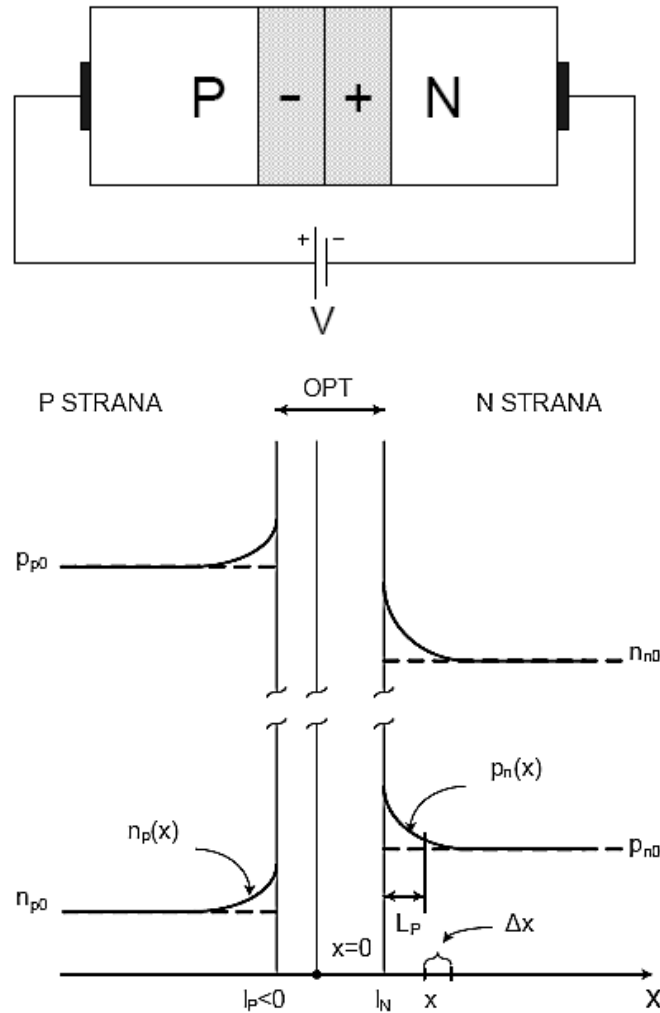


Pri direktnoj polarizaciji smanjuje se potencijalna barijera, skuplja oblast prostornog tovara i omogućava prolazak većinskih nosilaca kroz spoj. Ako napon baterije za direktnu polarizaciju premaši napon potencijalne barijere nepolarisanog PN spoja ($V > U_0$) praktično nestaje zaprečno polje u oblasti prostornog tovara. Elektroni se difuzijom neometano kreću iz N dela prema P delu spoja, a šupljine iz P dela prema N delu. Značajna struja počinje da teče kroz PN spoj, a na neutralnim područjima spoja (izvan OPT) javlja se značajan pad napona.

Kada većinski nosioci u P delu (šupljine) pređu u N deo spoja, tamo postaju manjinski nosioci i brzo nestaju u procesu rekombinacije sa većinskim elektronima. Elektroni, većinski nosioci u N delu, prelaskom u P deo postaju manjinski nosioci i rekombinuju se sa većinskim šupljinama. Na ivicama oblasti prostornog tovara stvara se višak koncentracije manjinskih (a zbog elektroneutralnosti) i većinskih nosilaca u odnosu na nepolarisani spoj. Manjinski nosioci, elektroni u P delu i šupljine u N delu, podležu intenzivnoj rekombinaciji.

Struja kroz spoljašnje priključke spoja je zapravo struja kojom se nadoknađuju izgubljeni - rekombinovani nosioci u oba dela spoja.

- Do proticanja značajne struje kroz PN spoj dolazi kada spoljašnji napon direktne polarizacije dostigne i premaši napon potencijalne barijere, tj. kada spoljašnje polje po intenzitetu nadvlada zaprečno polje u oblasti prostornog tovara.



Koncentracija pokretnih nosilaca u direktno polarisanom *PN* spoju

Ukupna gustina struje kroz spoj je zbir elektronske i šupljinske struje $J = J_n + J_p$.

Složenim razmatranjem pokazuje se da je gustina struje direktno polarisanog PN spoja:

$$J = J_s \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right), \text{ gde je}$$

J_s - inverzna struja zasićenja PN spoja (zavisi od parametara spoja i temperature),

V - napon direktne polarizacije na spoju,

$$V_T = \frac{kT}{q} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = 26[\text{mV}] \text{ na sobnoj temperaturi (Ajnštajnovе relacije).}$$

Može se pokazati da gustina inverzne struje saturacije zavisi od tehnoloških parametara PN spoja na sledeći način:

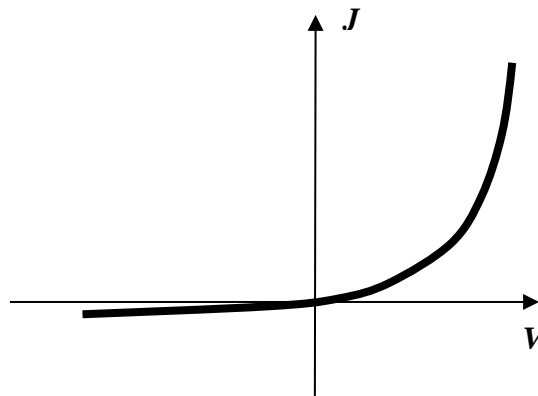
$$J_s = qn_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_d} + \frac{D_n}{L_n N_a} \right), \text{ gde su}$$

$$q = |e| = 1.602 \cdot 10^{-19} [\text{C}] - \text{apsolutno naelektrisanje elektrona,}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p} - \text{difuziona dužina šupljina na N strani spoja,}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} - \text{difuziona dužina elektrona na P strani spoja,}$$

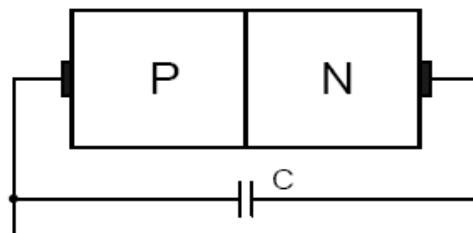
τ_n i τ_p vremena preleta elektrona i šupljina, respektivno.



Strujno – naponska karakteristika PN spoja

• Kapacitivnost PN spoja

Napon na realnom PN spoju ne može se trenutno promeniti. Razgradnja i stvaranje viškova koncentracije nosilaca naelektrisanja na ivicama oblasti prostornog tovara pri promeni napona polarizacije spoja se ne odigravaju trenutno. Realni PN spoj se modeluje kao paralelna veza idealnog PN spoja i kondenzatora:



Razlikujemo kapacitivnost oblasti prostornog tovara i difuzionu kapacitivnost.

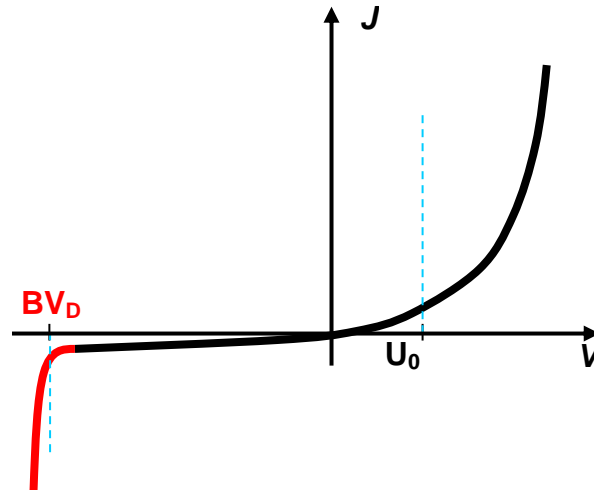
Kapacitivnost oblasti prostornog tovara je analogna kapacitetu (ravnog) pločastog kondenzatora. Tipična vrednost je reda pF. Dominantna je pri inverznoj polarizaciji spoja.

Difuziona kapacitivnost je dominantna pri direktnoj polarizaciji PN spoja i proporcionalna je jačini struje kroz direktno polarisani spoj.

- **Proboj PN spoja**

Naponski proboj nastupa pri inverznoj polarizaciji PN spoja velikim naponom. Ogleda se u naglom porastu inverzne struje zasićenja kroz spoj. Može biti destruktivan i nedestruktivan.

Pri propusnoj polarizaciji PN spoja velikim naponom ne može nastupiti proboj, ali dolazi do uništavanja komponente zbog prevelike termičke disipacije uzrokovane velikom strujom.



Strujno naponska karakteristika PN spoja. Crvenom bojom označen je deo u oblasti proboja.

Dva osnovna tipa proboja PN spoja su:

1. Proboj skroz. Povećanjem napona inverzne polarizacije oblast prostornog tovara se širi od spoja prema kontaktima. Ako je napon polarizacije dovoljno veliki oblast prostornog tovara može dodirnuti same kontakte, i tako ih praktično spojiti preko male otpornosti.
2. Lavinski proboj. Pod dejstvom jakog električnog polja u oblasti prostornog tovara elektroni se ubrzavaju i stiču dovoljno energije da pri sudaru sa kristalnom rešetkom generišu nove parove elektron-šupljina, izazivajući tako lavinski efekat. Jače dopiran PN spoj ima manji probojni napon.

Kao posledica proboja PN spoj najčešće trajno strada zbog pregrevanja koje prouzrokuje naglo narasla inverzna struja saturacije u režimu proboja.

➤ Posebna vrsta nedestruktivnog proboja je Zenerov proboj.

Zenerov proboj se sreće kod PN spojeva sa izuzetno velikom koncentracijom primesa. Jako ugrađeno polje unutar PN spoja i pri malim naponima inverzne polarizacije može raskidati kovalentne veze i generisati nove parove elektron-šupljina. Vrednosti Zenerovog probojnog napona se kreću od 2 do 20 V. Ovaj proboj nije destruktivan i ovakvi PN spojevi, tzv. Zener diode, mogu trajno raditi u režimu proboja bez štetnih posledica. Interesantno je da je Zenerov probojni napon praktično nezavisan od temperature, pa se ove diode tipično koriste kao vrlo jednostavni izvori stabilnog napona.