

ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI

Doc. dr Milena Đukanović
milenadj@ac.me

PREDAVANJE V POLUPROVODNICI

OSNOVNE KARAKTERISTIKE POLUPROVODNIKA:

- Kao što je u podjeli materijala navedeno, poluprovodnici su materijali koji imaju:
 - ❖ energetske procjep (širinu zabranjene zone) u granicama od 0 do 3.5 eV,
 - ❖ specifičnu električnu otpornost u granicama od $10^{-6}\Omega\text{m}$ do $10^{10}\Omega\text{m}$.
- Elementarni poluprovodni materijali su bor, ugljenik, silicijum, fosfor, sumpor, germanijum, arsen, selen, kalaj, antimon, telur i jod.

Grupa Perioda	II	III	IV	V	VI	VII	
II	Be	B	C	N	O		
III		Al	Si	P	S	Cl	
IV		Ga	Ge	As	Se	Br	
V		In	Sn	Sb	Te	J	Xe
VI			Pb	Bi	Po	At	

Elementarni poluprovodnici u Periodnom sistemu elemenata

OSNOVNE KARAKTERISTIKE POLUPROVODNIKA:

- Čisti poluprovodnički materijal u kristalnoj rešetki ima samo atome jednog elementa, kao što su Si ili Ge:

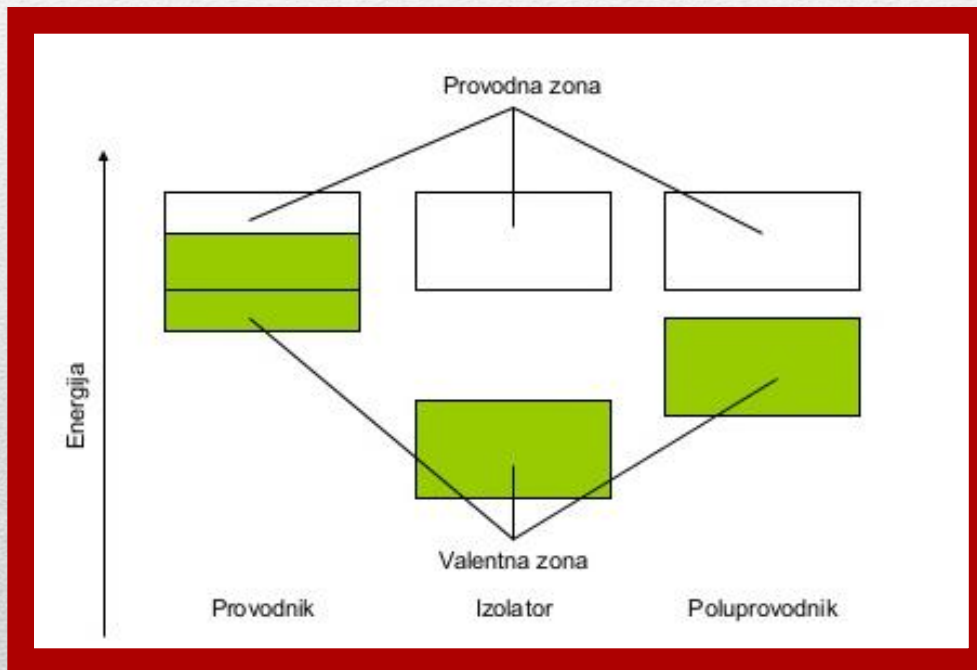
	Silicijum (Si)	Germanijum (Ge)
atomski broj	14	32
atomska težina	28.086	72.59
temperatura topljenja	1410°C	937.4°C
temperatura ključanja	2355°C	2830°C
gustina	2.33g/ml	5323g/cm ³
elektronska konfiguracija	2-8-4	2-8-18-4

Karakteristične veličine materijala Si i Ge

- Elektroni koji se nalaze bliže jezgru atoma su sa manjom energijom, tj. na nižem energetsom nivou, dok su oni dalje od jezgra sa većom energijom, tj. na višem energetsom nivou. Najviši energetski nivo ima poslednja ljuska koja se naziva valentnom ljuskom.

OSNOVNE KARAKTERISTIKE POLUPROVODNIKA:

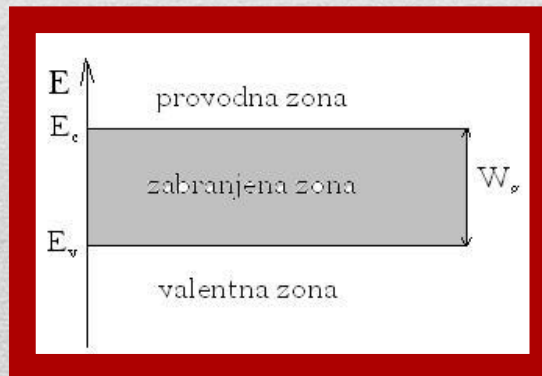
- Kod poluprovodnika nema preklapanja provodne i valentne zone, kao što je to slučaj sa provodnicima, a energetski procjep je znatno manji nego kod izolatora. Ovo znači da malim dodavanjem energije spolja (zagrijavanjem, svjetlošću ili električnim poljem) elektroni u valentnoj zoni dobijaju dovoljno energije da pređu u provodnu zonu.



Rastojanja između provodne i valentne zone kod provodnika, poluprovodnika i izolatora

OSNOVNE KARAKTERISTIKE POLUPROVODNIKA:

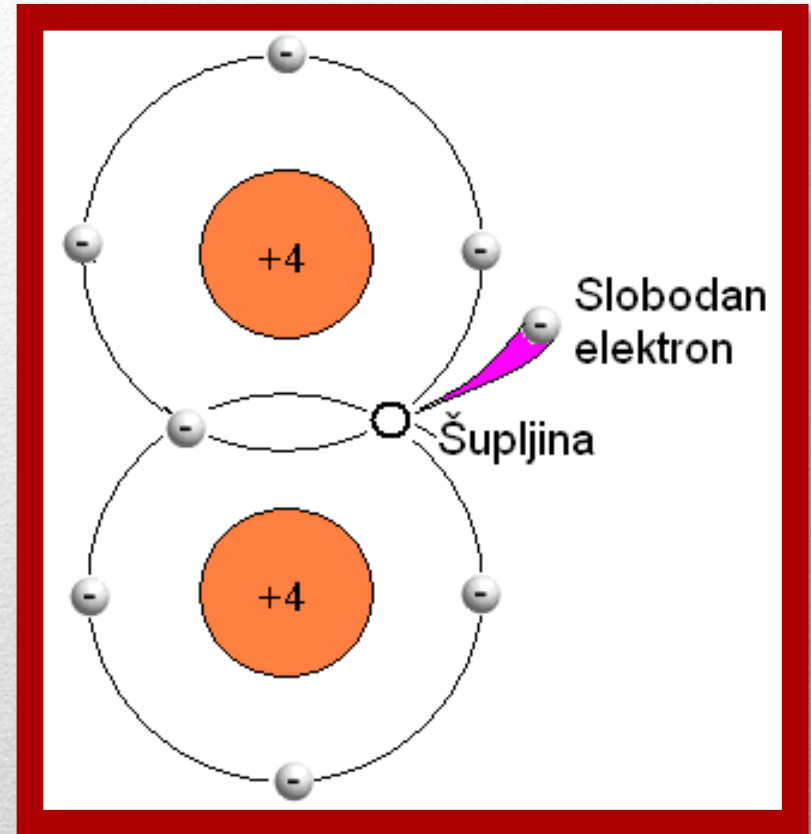
- Na niskim temperaturama valentni elektroni su čvrsto vezani za atom, dok već na sobnim temperaturama izvjestan broj elektrona (slobodni elektroni) ima dovoljno termičke energije da raskine kovalentnu vezu i pređe iz valentne u provodnu zonu, gdje učestvuje u provođenju struje. Mjesta na kojima su bili elektroni nazivaju se **šupljine**.
- Kada elektron napusti svoj položaj, šupljina se ponaša kao pozitivno naelektrisanje. Na upražnjeno mjesto može preskočiti drugi elektron tako da se na njegovom mjestu otvara nova šupljina. Proces se haotično ponavlja, usljed čega se šupljine skokovito premještaju sa atoma na atom unutar kristala. Šupljine se kreću u smjeru polja, a elektroni u suprotnom smjeru.



Zone kod poluprovodnika

BESPRIMJESNI POLUPROVODNICI :

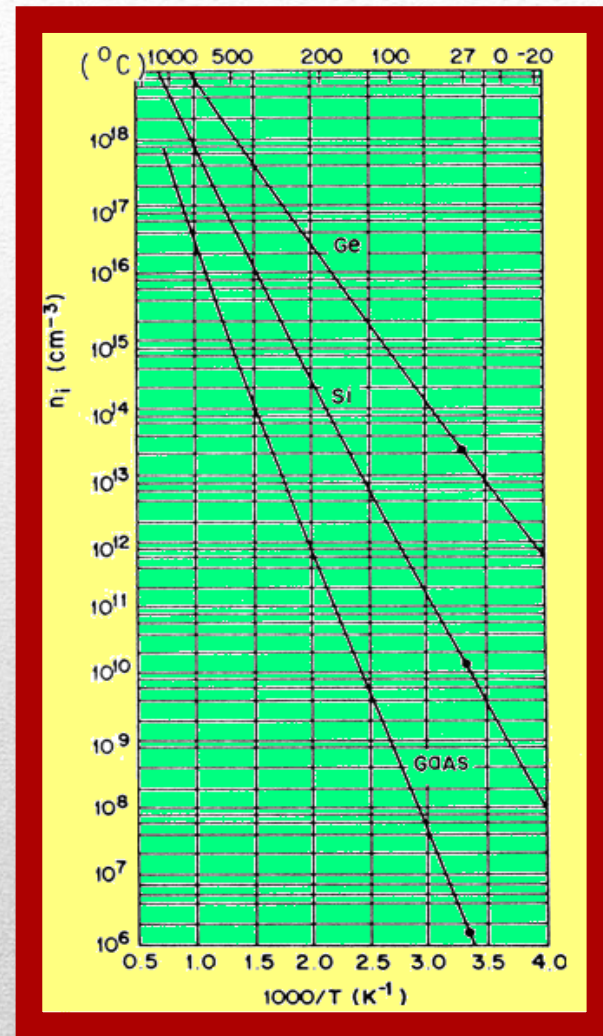
- U savršenom silicijumu 4 elektrona iz posljednje orbite su povezana sa elektronima susjednih atoma (kovalentna veza).
- Si se ponaša kao izolator – nema “slobodnih” nosilaca naelektrisanja.
- Na sobnoj temperaturi, usljed termičkih vibracija kristalne rešetke neki elektroni povećavaju svoju energiju, raskidaju kovalentnu vezu i postaju slobodni elektroni. U valentnoj zoni ostaju šupljine nastale njihovim prelaskom u provodnu zonu. Atom Si koji izgubi jedan elektron postaje električno pozitivan.



Silicijum i kretanje elektrona

BESPRIMJESNI POLUPROVODNICI :

- Kod besprimjesnog (intrinzičnog, čistog) poluprovodnika koncentracije elektrona n i šupljina p su jednake koncentraciji sopstvenih nosilaca $n_0 = p_0 = n_i$, tj. $n_0 \cdot p_0 = n_i^2$
- Kod idealnog poluprovodnog materijala na niskim temperaturama valentna zona je potpuno popunjena, dok je provodna potpuno prazna. Između provodne i valentne energetske zone kod poluprovodnih materijala nalazi se zabranjena energetska zona.
- Postojanje ovih zona na vrlo niskim temperaturama ima za posljedicu da je specifična električna na provodnost svih idealnih poluprovodnika jednaka nuli.
- Kod čistog Si $n_i = 1.13 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-3}$ na $T=300\text{K}$.



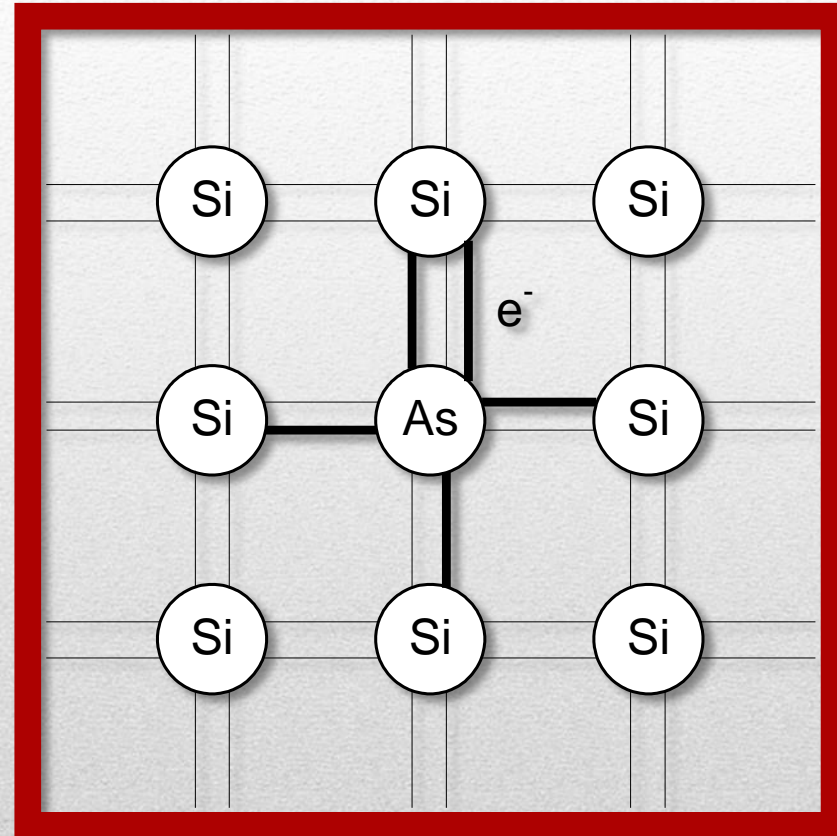
Sopstvena koncentracija poluprovodnika

PRIMJESNI POLUPROVODNICI :

- Tehnološkim postupkom nazvanim dopiranje moguće je dobiti poluprovodnike kod kojih koncentracije slobodnih elektrona i šupljina nisu jednake, tj. kod kojih je provodnost pretežno elektronske ili šupljinske prirode.
- Postupak dopiranja sastoji se u dodavanju stranih atoma, tzv. primjesa, zato se i zovu primjesnim poluprovodnicima.
- Poluprovodnici se uspješno dopiraju donorskim (najčešće petovalentnim) ili akceptorskim (najčešće trovalentnim) primjesama, pri čemu poluprovodnik stiče elektronsku, tj. šupljinsku provodnost.
- Poluprovodnici dopirani donorima nazivaju se poluprovodnicima **n-tipa**, a oni dopirani akceptorima nazivaju se poluprovodnicima **p-tipa**.

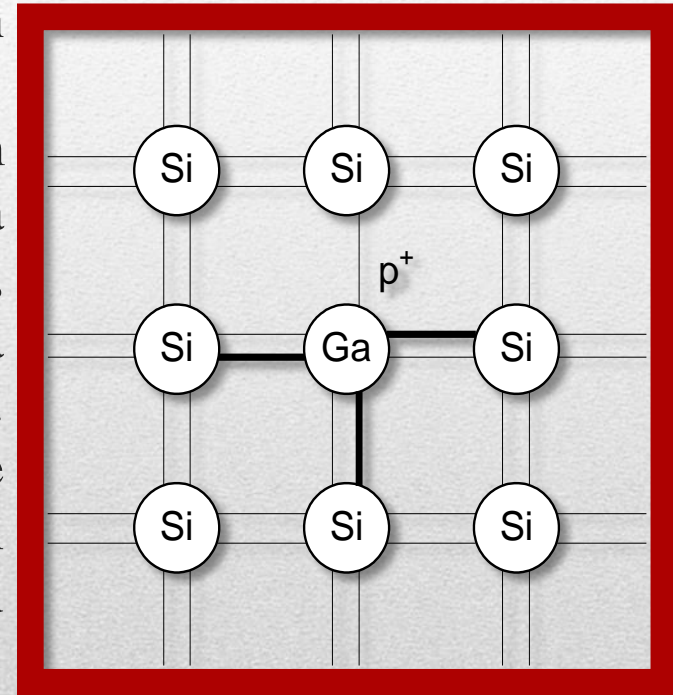
PRIMJESNI POLUPROVODNIK n-tipa :

- Nastaje kada se poluprovodnik dopira petovalentnim primjesama, npr. fosforom (P), arsenom (As) ili antimonom (Sb).
- Atom primjese, npr. (As) ima jedan elektron više u valentnoj zoni od atoma silicijuma.
- To ima za posljedicu da u kristalnoj rešetki, atom primjese koji je zauzeo mjesto atoma silicijuma sa okolnim atomima može da ostvari četiri valentne veze, dok jedan elektron ostaje nepovezan jer nema sa kim da ostvari valentnu vezu. Nepovezani elektron sa malim dodatkom energije prelazi u provodnu zonu.
- Kod ovako dopiranih poluprovodnika narušena je dinamička ravnoteža između broja elektrona i šupljina u provodnoj zoni, jer je $n_0 > p_0$.



PRIMJESNI POLUPROVODNIK p-tipa :

- Nastaje kada se poluprovodnik dopira trovalentnim primjesama, među koje spadaju bor (B), aluminijum (Al), galijum (Ga) i indijum (In).
- Atom primjese, npr. (galijum Ga) ima jedan elektron manje u valentnoj zoni od atoma silicijuma.
- To ima za posljedicu da u kristalnoj rešetki, atom primjese koji je zauzeo mesto atoma silicijuma sa okolnim atomima može da ostvari tri valentne veze, dok jedan elektron iz valentne zone nekog od atoma silicijuma iz okruženja ostaje nepovezan. Nepovezani elektron iz atoma silicijuma koji se nalazi u okruženju akceptorskog atoma privlači jedan elektron iz provodne zone, ostavljajući u provodnoj zoni šupljinu.
- Kod ovako dopiranih poluprovodnika narušena je dinamička ravnoteža između broja elektrona i šupljina u provodnoj zoni, jer je $p_0 > n_0$.



SPECIFIČNA PROVODNOST POLUPROVODNIKA:

- Ako se u poluprovodniku uspostavi električno polje, slobodni elektroni se kreću u smjeru suprotnom od smjera polja i oni čine jednu komponentu struje. Prisutnost šupljina dovodi do pojave druge komponente struje tako što vezani elektroni "preskaču" sa susjednih popunjenih međuatomskih veza na upražnjena mjesta (tj. šupljine) i pomjeraju se u istom smjeru kao i slobodni elektroni. To znači da se šupljine pomjeraju u smjeru polja, i ponašaju se kao pozitivno naelektrisane čestice.
- Na taj način, nastala električna struja sastoji se od dvije, međusobno nezavisne komponente, a čiji su efekti aditivni.
- Specifična električna provodnost poluprovodnika može se predstaviti kao zbir elektronske σ_n i šupljinske σ_p provodnosti:

$$\diamond \sigma = \sigma_n + \sigma_p = qn\mu_n + qp\mu_p = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

gdje je q – naelektrisanje elektrona, n – koncentracija slobodnih elektrona u posmatranom uzorku i μ_n njihova pokretljivost, p – koncentracija šupljina u posmatranom uzorku i μ_p njihova pokretljivost.

EFEKTIVNA MASA ELEKTRONA:

- Efektivna masa nosioca naelektrisanja omogućava da se usmjereno kretanje slobodnih elektrona i šupljina pod dejstvom električnog polja između dva sudara može posmatrati kao kretanje elektrona u električnom polju kristalnog čvrstog stanja.
- Masa elektrona je (*pokazati kako se dolazi do ove jednakosti*):

$$m^* = \frac{1}{\frac{1}{h^2} \frac{d^2 E(k)}{dk^2}}$$

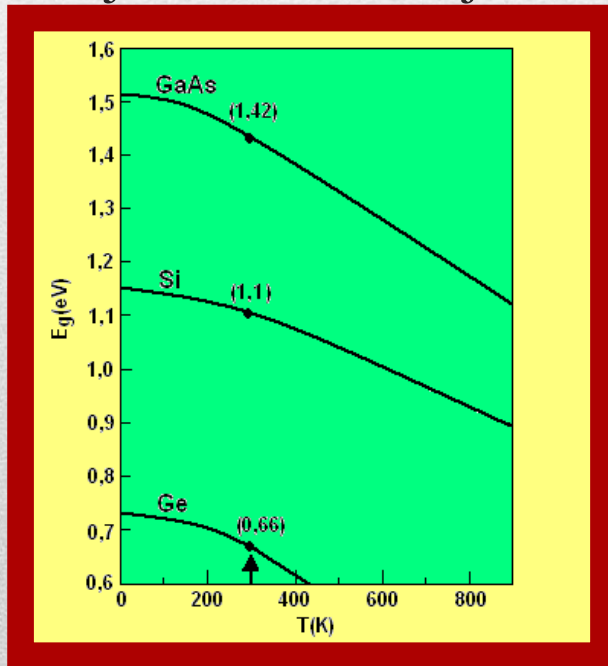
- Ova veličina naziva se efektivna masa elektrona i može se odrediti eksperimentalnim putem, a zavisi od energetske zone u kojoj se elektron nalazi. Efektivna masa slobodnih elektrona m_n koji se kreću u provodnoj zoni različita je od efektivne mase šupljina m_p unutar valentne zone.

ENERGETSKE ZONE:

- Elektroni koji su imali iste energetske nivoe u različitim atomima, zbog efekata koji se objašnjavaju u kvantnoj mehanici, ne mogu zadržati iste vrijednosti energija, već se svaki energetski nivo cijepa na više, veoma bliskih energetskih podnivoa, formirajući tzv. **energetske zone**.
- Ukupni energetski opseg jedne zone je manji od termičke energije koju elektron ima na sobnoj temperaturi, pa se elektron lako kreće unutar zone.
- Razlika energije između dvije susjedne zone naziva se **energetski procjep (ili zabranjena zona)**. U ovoj zoni ne mogu da se nalaze elektroni.
- Energetski procjep $E_g = \Delta E_o$ (širina zabranjene zone) predstavlja razliku između valentne i provodne zone. Kod poluprovodnika energetski procjep je manji od 3.5 eV.
- Širina energetskog procjepa zavisi od temperature i opisuje se matematičkim modelima.

ENERGETSKE ZONE:

- Širina zabranjene zone kod poluprovodnika relativno je mala i na sobnoj temperaturi (300K) iznosi 0.66 eV za germanijum, 1.12 eV za silicijum i 1.42 eV za galijum-arsenid.
- Ove vrijednosti predstavljaju najmanje iznose energije koje je potrebno dovesti elektronu u valentnoj zoni da bi mogao da "pređe" u provodnu zonu i učestvuje u provođenju električne struje kroz poluprovodnik.



Širina zabranjene zone germanijuma, silicijuma i galijum-arsenida u funkciji temperature

ENERGETSKE ZONE:

Materijal	Energ. procjep (eV) za T=0K	Energ. procjep (eV) za T=300K
Si	1.21	1.12
Ge	0.785	0.66
InSb	0.23	0.17
InAs	0.43	0.36
InP	1.42	1.27
GaP	2.32	2.25
GaAs	1.51	1.42
GaSb	0.81	0.68
CdSe	1.84	1.74
CdTe	1.61	1.44
ZnO	3.44	3.2
ZnS	3.91	3.6

ENERGETSKE ZONE:

- Linearni model temperaturne zavisnosti energetskeg procjepa dat je sa:

- $E_g(T) = E_g(0) - \alpha T$

- Kod silicijumskog poluprovodnika $E_g(0)=1.21$ eV, $E_g(300K) = 1.12$ eV, iz toga proizilazi da je $\alpha = 3 \cdot \frac{10^{-4} \text{ eV}}{\text{K}}$.

- U praksi se primjenjuju i drugi matematički modeli zavisnosti energetskeg procjepa od temperature, kao što je:

- $E_g(T) = E_{g0} * - \frac{\alpha T^2}{T+\beta}$

FERMI-DIRAKOVA FUNKCIJA VJEROVATNOĆE:

- Funkcija raspodjele za elektrone f_{Fn} određuje vjerovatnoću sa kojom će elementarna fazna ćelija biti popunjena elektronima na energetskom nivou E i ima oblik:

- $$f_{Fn}(E) = \frac{1}{1+e^{(E-E_F)/kT}} \approx e^{-(E-E_F)/kT}$$

- gdje je k Bolcmanova konstanta, a E_F je Fermijeva energija. Veličina f_{Fn} daje vjerovatnoću da će energetski nivo energije E na temperaturi T biti zaposjednut elektronom.
- Fermijeva funkcija za šupljine je data sa $f_{Fp}(E) = 1 - f_{Fn}(E)$:

- $$f_{Fp}(E) = 1 - f_{Fn}(E) = \frac{e^{(E-E_F)/kT}}{1+e^{(E-E_F)/kT}} \approx e^{-(E_F-E)/kT}$$

ENERGIJA FERMIFEVOG NIVOVA KOD SOPSTVENOG POLUPROVODNIKA:

- Kada je energija Fermijevoq nivoa $E = E_F$ funkcija vjerovatnoće iznosi $f_{Fn}(E) = \frac{1}{1+e^{(E-E_F)/kT}} = 0.5 = 50\%$.

