

# Osnovi analogne elektronike

prof. Dr Nenad Jovičić

nenad@etf.rs

# Osnovi analogne elektronike

- Stranica predmeta:
  - <http://tnt.etf.rs/~19E042OAE/>
- Isti plan i program za Odseke za Signale i sisteme, Telekomunikacije i Fizičku elektroniku.
- Zajedničko polaganje ispita, zajedničke lab. vežbe

# Kako je nastao predmet?

- Evolucijom “starog” predmeta Elementi elektronike (2013)
  - <http://tnt.etf.rs/~of2ee> -> dosta korisnog materijala
- Iz starog predmeta je uklonjena digitalna elektronika i dodati su višestepeni pojačavači, stabilizatori i negativna povratna sprega.
- Po sadržaju predmet je praktično identičan „starom“ predmetu Osnovi elektronike (2013), ali po formi je sličniji predmetu Elementi elektronike.

# Stara (2013) akreditacija i ekvivalencija?

- Studenti koji su upisani po akreditaciji 2013, i birali su predmet Elementi elektronike prate i polažu predmet Osnovi analogne elektronike, iako formalno prijavljuju predmet Elementi elektronike.
- Studenti koji su upisani po akreditaciji 2013 i birali su predmet Osnovi elektronike prate i polažu predmet Osnovi analogne elektronike, iako formalno prijavljuju predmet Osnovi elektronike.

# Laboratorija

- **Uslov za polaganje ispita su** urađene laboratorijske vežbe.
- Laboratorija je prostorija 39, u suterenu fakulteta (od KSTa desno do kraja hodnika, sa leve strane)
- “Urađene vežbe” znači da ste radili **svaku** vežbu i da ste na najviše jednoj ocenjeni negativno (ocene su pozitivno, negativno, i polovično, dva puta polovično je ekvivalentno jednom negativnom)
- Važe urađene vežbe od prethodnih godina.

# Organizacija lab. vežbi

- Vežbe se rade u grupama po dvoje, u terminima od po dva sata
- Studenti mogu da jednokratno ili višekratno zamene termine laboratorije između sebe, bez potrebe da bilo koga unapred obavestavaju.
- Vežbe podeljene u cikluse, a raspored po terminima se pravi za svaki ciklus posebno.
- Sva obavještenja o lab. vežbama na sajtu laboratorije, tamo najpre izlazi spisak onih koji treba da rade vežbe, potražite se na spisku. Tamo izlazi i raspored studenata po grupama i raspored grupa po terminima, najkasnije u četvrtak za vežbe koje se rade naredne nedelje.
- Presek uspešnosti rada u laboratoriji se pravi nakon svakog ciklusa. Na primer, oni koji su u prvom ciklusu izostajali ili dobili dve negativne ocene verovatno ispadaju sa spiska za tekuću godinu.

# Organizacija lab. vežbi

- Nadoknade lab.vežbi nisu planirane. U zavisnosti od zauzetosti laboratorije, nekad se na kraju semestra organizuje nadoknada po jedne lab. vežbe po studentu, ali ne računajte na to.
- Ako ne možete doći u svom terminu, zamenite termin sa kolegom/koleginicom, ili ako vidite u rasporedu da u nekom terminu ima slobodno mesto (ali to mesto dobije ko prvi dođe, ne možete ga rezervisati)
- Laboratorija se administrira nezavisno od nastavnika sa predmeta, na bilo koje tehničko pitanje na tu temu 99% ne znamo odgovor, zato pratite redovno sajt laboratorije, za svako obaveštenje se ostavlja rok od par dana da se javite ako primetite da nešto nije u redu (na primer da niste na spisku za vežbe iako ste prvi put upisali drugu godinu, ili da ste na spisku za vežbe iako ste prošle godine uradili vežbe)

# Ispit

- Jedan kolokvijum u toku semestra (120 minuta)
- Popravni kolokvijum samo u januarskom roku, u terminu ispita (120 minuta) – prijavljujete popravni kolokvijum, ne ispit
- Završni ispit u ispitnom roku (120 minuta). Važi za one koji su položili kolokvijum.
- Integralni ispit u svakom roku (180 minuta).
- Kolokvijum 40 poena, za prolaz se mora imati ukupno više od 20 poena, i više od 4 poena na teoriji.
- Integralni ispit 100 poena, za prolaz barem 51 poen, i više od 10 poena na teoriji.
- Završni ispit 60 poena, za prolaz ukupno barem 51 poen zajedno sa kolokvijumom, i više od 6 poena na teoriji na završnom ispitu.
- Svako polaganje pismeno, 40% teorija, 60% zadaci.



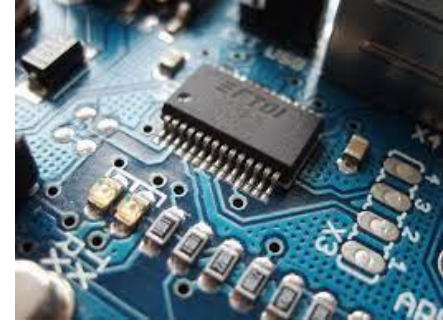
# Literatura

- Za teoretski deo, najefikasnije je da pratite predavanja, i učite iz “beleški”.
  - Postoji i nekoliko udžbenika:
    - 1. Vujo Drndarević, Elementi elektronike - diode, tranzistori i operacioni pojačavači, Drugo izdanje, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Akademska misao, ISBN 978-86-7466-555-8, Beograd, 2015.**
    2. С. Марјановић, "Електроника 1- компоненте и кола", Академска мисао, Београд, 2004.
    3. S. Tešić, D. Vasiljević: Osnovi elektronike, Beograd, 1990.

# Literatura

- Za zadatke, pored beleški, postoji zbirke
  1. **V. Drndarević, N. Jovičić, V. Rajović, "Elementi elektronike - Zbirka zadataka", Akademska misao, 2014.**
  2. P. Ђурић, "Збирка задатака из аналогне електронике", Графос интернационал, Панчево, 2004.
- I za teoriju i za zadatke, na stranici predmeta Elementi elektronike [tnt.etf.rs/~of2ee](http://tnt.etf.rs/~of2ee) svi ispitni rokovi od 2005. godine, sa rešenjima zadataka od 2014.

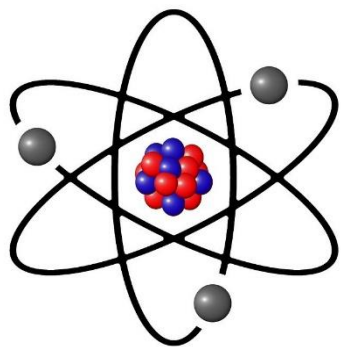
# *Elektronika*



- Savremena elektronska kola se izrađuju od poluprovodnika.
  - Za razumevanje i pravilnu upotrebu el. komponenti neophodno poznavanje osobina pouprovodnika i načina provođenja struje u poloprovodnicima.
  - Ovo omogućava dalju analizu konstrukcije, karakteristika i principa rada aktivnih poluprovodničkih komponenti.

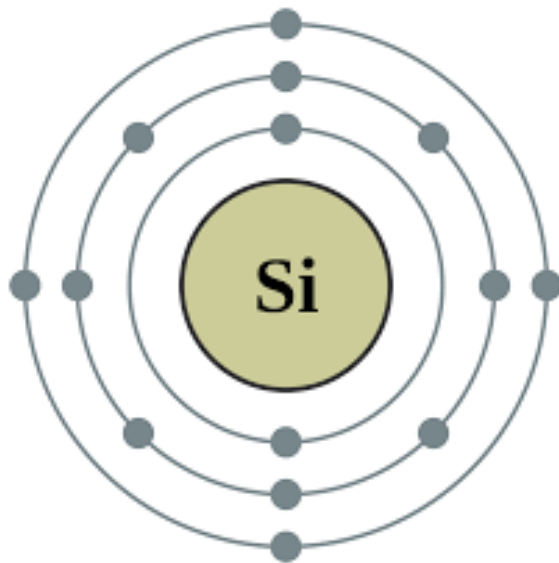
# Električne karakteristike materijala

- Električne osobine materijala određene su strukturom atoma. Elektroni raspoređeni u ljuskama oko jezgra, u zavisnosti od energije koju poseduju. Najudaljeniji elektroni poseduju najveću energiju i oni se nazivaju valentni.



# Električne karakteristike materijala

- Najpoznatiji poluprovodnik je silicijum Si



Atom je električno neutralan jer je broj elektrona jednak broju protona. Najudaljenija (valentna) ljuska određuje da li je neki element provodnik, poluprovodnik, ili izolator.

# Električne karakteristike materijala

- Valentna ljuska može imati najmanje 1, a najviše 8 elektrona
- Specifična električna provodnost  $\sigma$ :
  - Izolatori  $\sigma_i < 10^{-5} (\Omega\text{cm})^{-1}$ , 7-8 valentnih elektrona
  - Provodnici  $\sigma_p > 10^2 (\Omega\text{cm})^{-1}$ , 1-2 valentna elektrona
  - Poluprovodnici  $\sigma_i < \sigma_{pp} < \sigma_p$ , 3-4 valentna elektrona, provodnost se može tehnološki kontrolisati

# Električne karakteristike materijala

še 8

**Periodic table of the elements**

Legend:

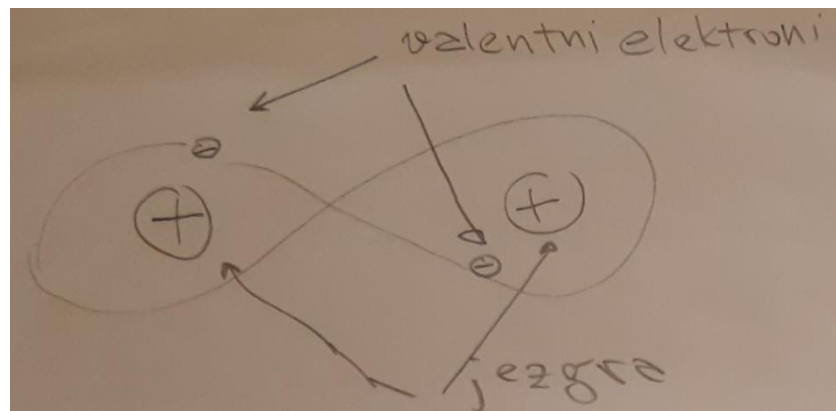
- Alkali metals
- Alkaline-earth metals
- Transition metals
- Other metals
- Other nonmetals
- Halogens
- Noble gases
- Rare-earth elements (21, 39, 57–71) and lanthanoid elements (57–71 only)
- Actinoid elements

group 1*																	group 18															
period 1	1 H																	2 He														
period 2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne														
period 3	11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar														
period 4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr														
period 5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe														
period 6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn														
period 7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og														
lanthanoid series 6	<table border="1"> <tr> <td>58 Ce</td> <td>59 Pr</td> <td>60 Nd</td> <td>61 Pm</td> <td>62 Sm</td> <td>63 Eu</td> <td>64 Gd</td> <td>65 Tb</td> <td>66 Dy</td> <td>67 Ho</td> <td>68 Er</td> <td>69 Tm</td> <td>70 Yb</td> <td>71 Lu</td> </tr> </table>																		58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu																			
actinoid series 7	<table border="1"> <tr> <td>90 Th</td> <td>91 Pa</td> <td>92 U</td> <td>93 Np</td> <td>94 Pu</td> <td>95 Am</td> <td>96 Cm</td> <td>97 Bk</td> <td>98 Cf</td> <td>99 Es</td> <td>100 Fm</td> <td>101 Md</td> <td>102 No</td> <td>103 Lr</td> </tr> </table>																		90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr																			

\*Numbering system adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). © Encyclopædia Britannica, Inc.

# Kovalentna veza

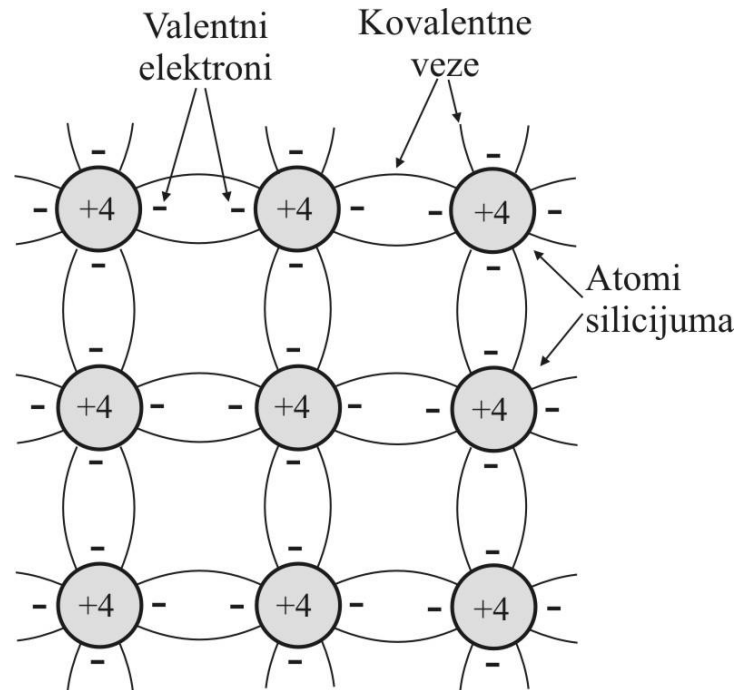
- Veze se ostvaruju tako što dva susedna atoma daju po jedan elektron iz spoljne ljuske, koji kruže oko dva jezgra i tako ih povezuju





# Kristal silicijuma

- Atomi su raspoređeni u obliku kristalne rešetke. Svaki atom Si povezan je sa 4 susedna atoma.

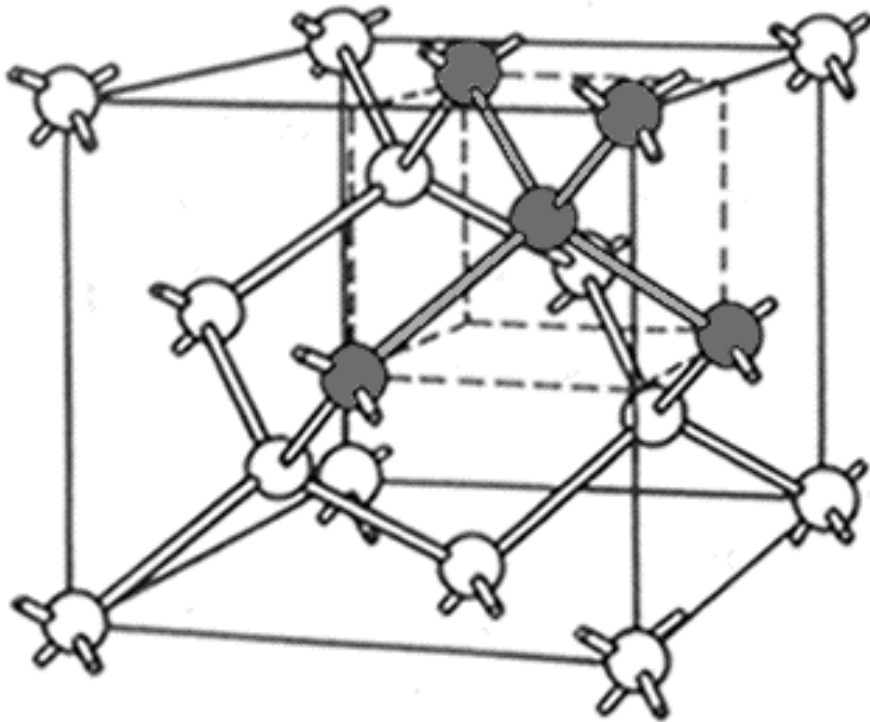


Na 0 K svi elektroni se drže unutar veza

Radi pojednostavljenja, "brojimo" valentne elektrone i njihove "balansirajuće" protone.

# Kristal silicijuma

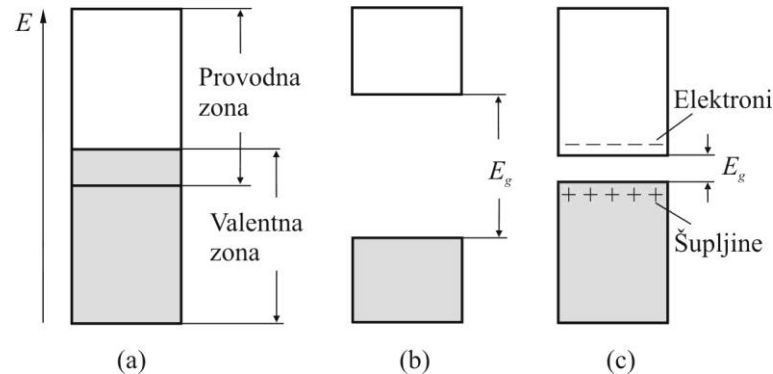
- Kako to “zaista” izgleda u prostoru:



# Električne karakteristike ostalih materijala

- Provodnici imaju mnoštvo slobodnih elektrona na svim temperaturama, nastalih oslobađanjem slabih valentnih veza (1-2 valentna elektrona)
- Izolatorima su valentni elektroni čvrsto vezani za jezgro, tako da praktično nema slobodnih nosilaca (7-8 valentnih elektrona)
- Poluprovodnici su na niskim temperaturama izolatori. Kako temperatura raste, jedan broj elektrona se oslobađa valentnih veza i materijal postaje provodan. Najčešće korišćeni Si, Ge, GaAs.

# Energetski procep



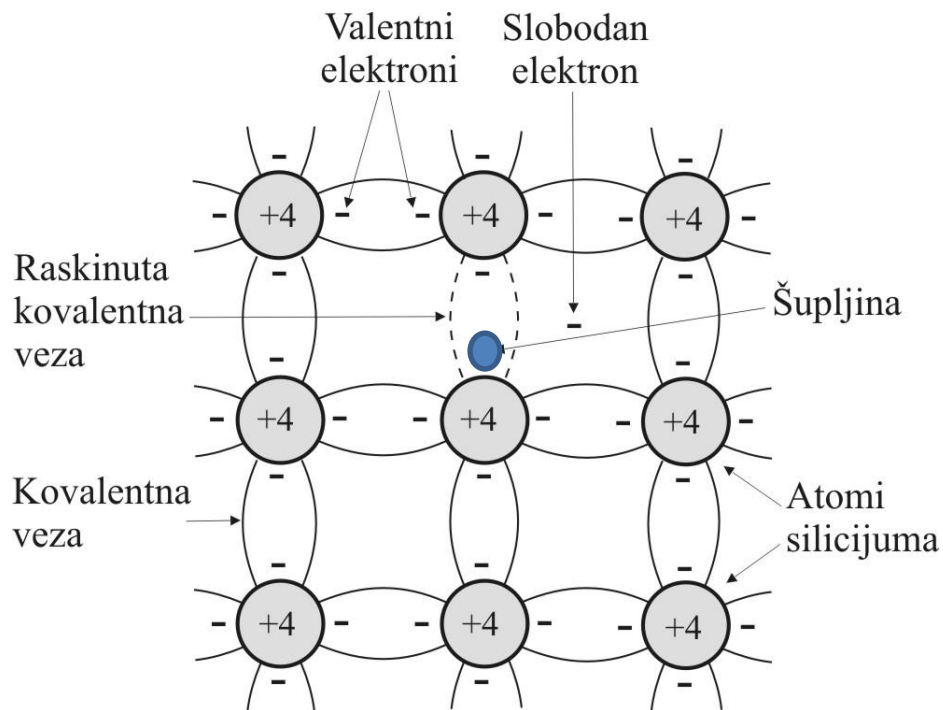
- Energetski procep  $E_g$  je razlika najmanje energije slobodnog elektrona i najveće energije valentnog elektrona, i to je minimalna potrebna energija za raskidanje valentne veze

– Ge	0.7eV
– Si	1.1eV
– GaAs	1.4eV
– SiC	3.3eV
– Diamant	5.4eV

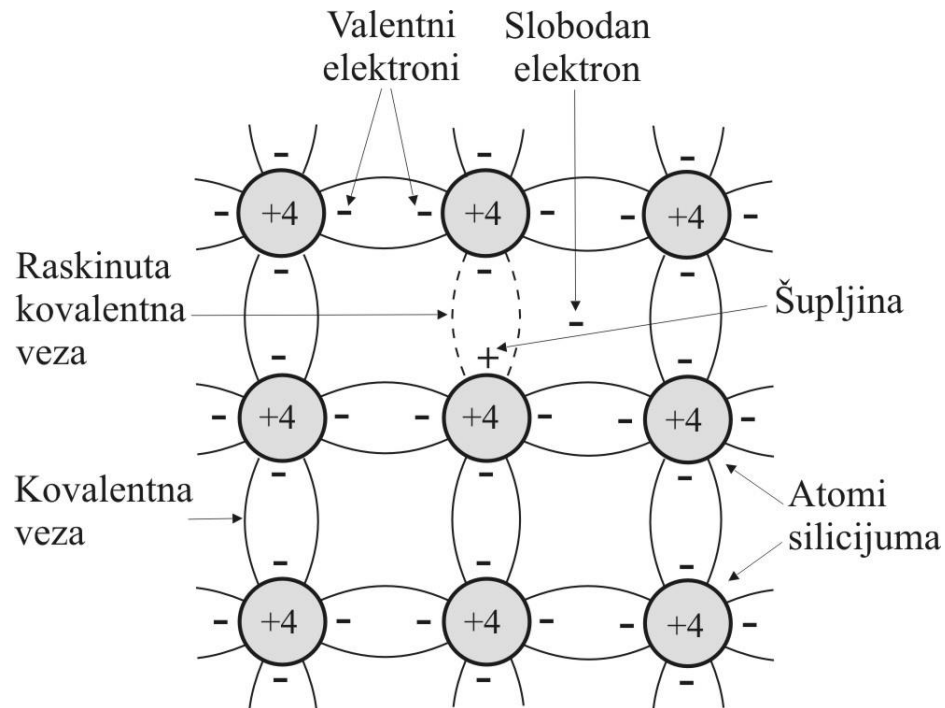
# Generisanje nosioca naelektrisanja

- Elektroni u valentnoj zoni su čvrsto vezani za atom, čist kristal Si je slab provodnik.
- Dovođenjem energije elektroni se mogu osloboditi, pa već na sobnoj temperaturi postoje slobodni elektroni - elektron koji dobije dovoljnu energiju postaje slobodan
- Na mestu gde je bio elektron ostaje šupljina
- Ovaj proces se naziva **generisanje** parova elektron-šupljina

# Generisanje nosioca naelektrisanja



# Generisanje nosioca naelektrisanja



Šupljina se ipak crta kao +

# Rekombinacija nosilaca naelektrisanja

- Koncentracije elektrona i šupljina su jednake

$$n_i = p_i$$

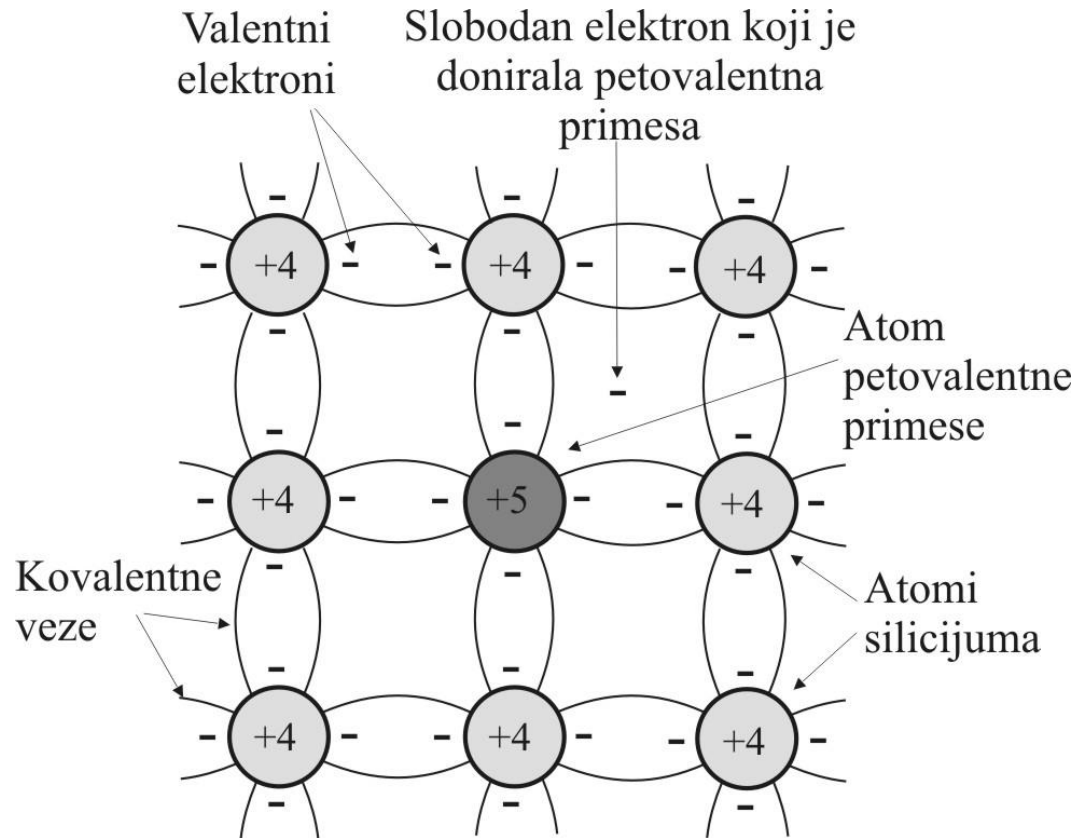
$$n_i^2 = BT^3 e^{-E_g/kT}$$

- Ove veličine u čistom poluprovodniku zovemo **sopstvene koncentracije**, i one zavise od temperature.
- Pored razgrađivanja valentnih veza, kada energija slobodnog elektrona dovoljno padne, dolazi do popunjavanja prazne valentne veze, kada slobodni elektron popuni šupljinu.
- Ovaj proces naziva se **rekombinacija**



# Poluprovodnici sa primesama

## Petovalentna primesa -> N tip



# Poluprovodnici sa primesama

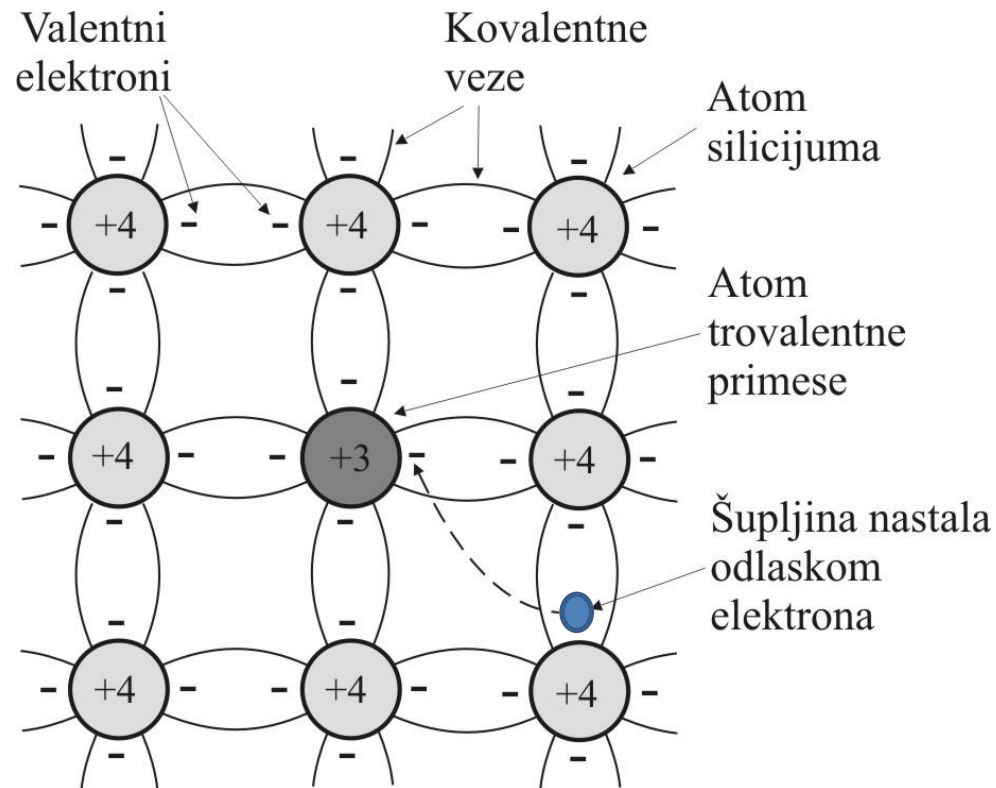
## Petovalentna primesa -> N tip

- U poluprovodnik se tehnološkim procesom mogu uneti **primese** – trovalentni In ili B, petovalentni Sb ili P
- Kada se ubaci 5-valentna primesa, peti valentni elektron se ne koristi za valentne veze u rešetci, pa se oslobađa kao **slobodni elektron**. Kako je primesa proizvela slobodni elektron, ona se naziva **donor**. Poluprovodnik je **n** tipa, i u njemu su elektroni većinski, a šupljine manjinski nosioci.
- Naelektrisanja u N poluprovodniku su:
  - Elektroni i šupljine nastali razgrađivanjem val. veza
  - Elektroni dobijeni dodavanjem primese
  - Pozitivni joni nastali kada se oslobodi elektron
- Materijal ukupno električno neutralan!

	13	14	15	16	17
5	B	C	N	O	F
13	Al	Si	P	S	Cl
31	Ga	Ge	As	Se	Br
49	In	Sn	Sb	Te	I
81	Tl	Pb	Bi	Po	At

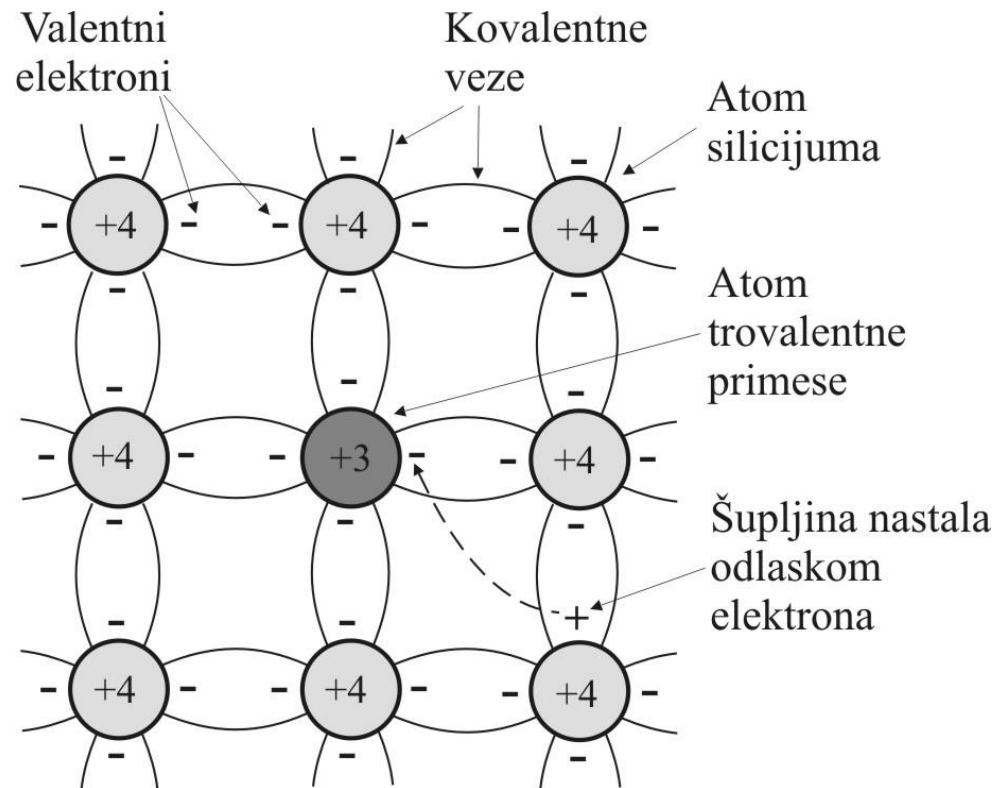
# Poluprovodnici sa primesama

## Trovalentna primesa -> P tip



# Poluprovodnici sa primesama

## Trovalentna primesa -> P tip



Šupljina se ipak crta kao +

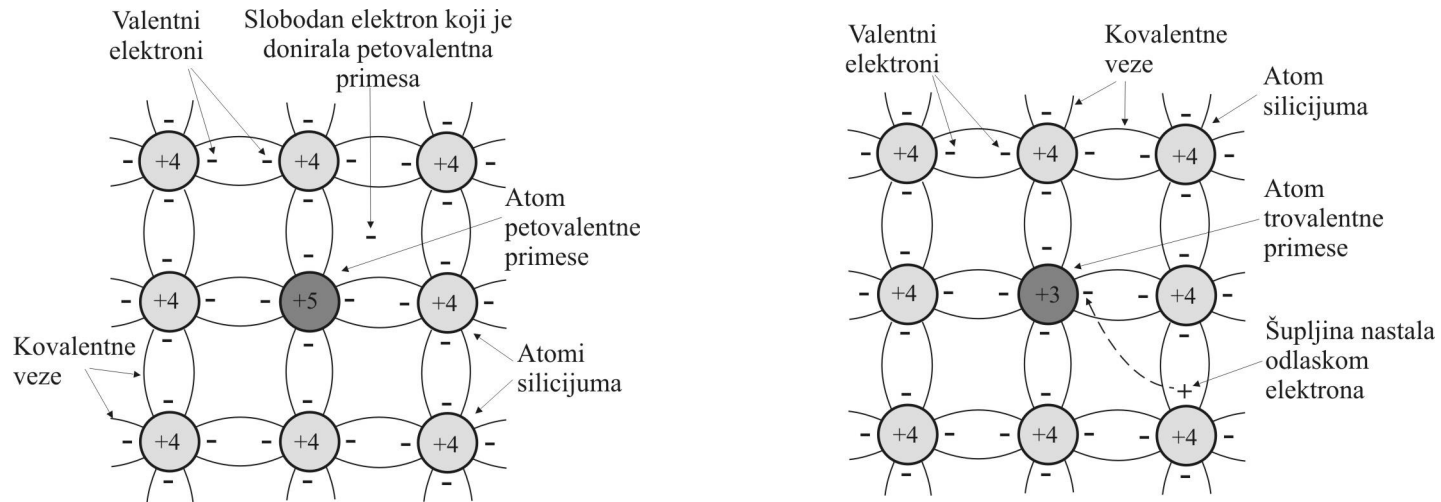
# Poluprovodnici sa primesama

## Trovalentna primesa -> P tip

- Ako se unese 3-valentna primesa, nastaju 3 valentne veze. Četvrta nastaje pozajmljivanjem jednog elektrona od susednih atoma
- Tamo gde je bio elektron ostaje šupljina.
- Poluprovodnik je **p** tipa, a primesa **akceptor**. U njemu su elektroni manjiski, a šupljine većinski nosioci
- Naelektrisanja u P poluprovodniku su:
  - Elektroni i šupljine nastali razgrađivanjem val. veza
  - Šupljine dobijene dodavanjem primese
  - Negativni joni nastali kada se “pozajmi” elektron

	13	14	15	16	17
5	B	C	N	O	F
13	Al	Si	P	S	Cl
31	Ga	Ge	As	Se	Br
49	In	Sn	Sb	Te	I
81	Tl	Pb	Bi	Po	A

# Koncentracije nosilaca

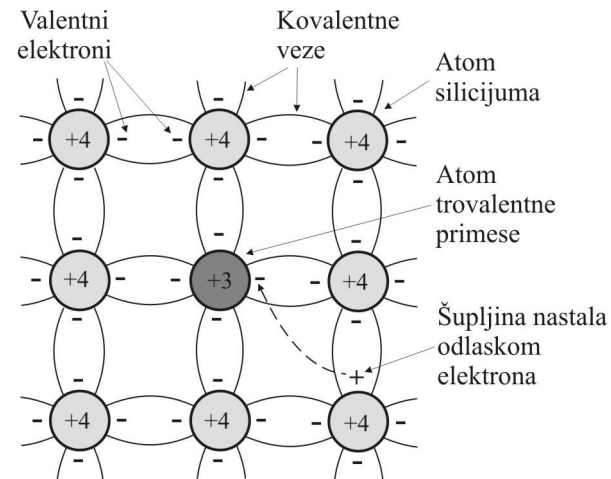
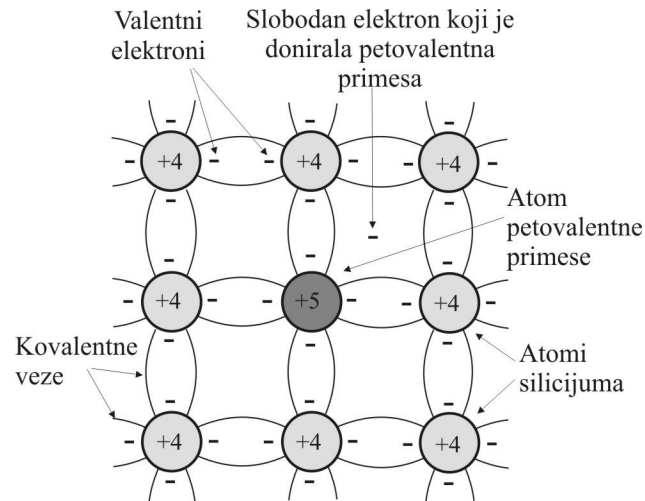


$$n \cdot p = n_i^2 = p_i^2 = f(T) = \text{Const}$$

$$\begin{aligned} n_n \cdot p_n &= \text{Const} , \\ N_D \cdot p_n &= \text{Const} \\ n_n &\approx N_D \\ p_n &\approx \text{Const} / N_D \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_p \cdot p_p &= \text{Const} , \\ n_p \cdot N_A &= \text{Const} \\ p_p &\approx N_A \\ n_p &\approx \text{Const} / N_A \end{aligned}$$

# Koncentracije nosilaca – ovako se zapisuje u literaturi



$$n \cdot p = n_i^2 = p_i^2$$

$$\begin{aligned} n_n \cdot p_n &= n_i^2 = p_i^2, \\ N_D \cdot p_n &= n_i^2 = p_i^2 \\ n_n &\approx N_D \\ p_n &\approx n_i^2 / N_D \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_p \cdot p_p &= n_i^2 = p_i^2, \\ n_p \cdot N_A &= n_i^2 = p_i^2 \\ p_p &\approx N_A \\ n_p &\approx n_i^2 / N_A \end{aligned}$$

# Koncentracije nosilaca

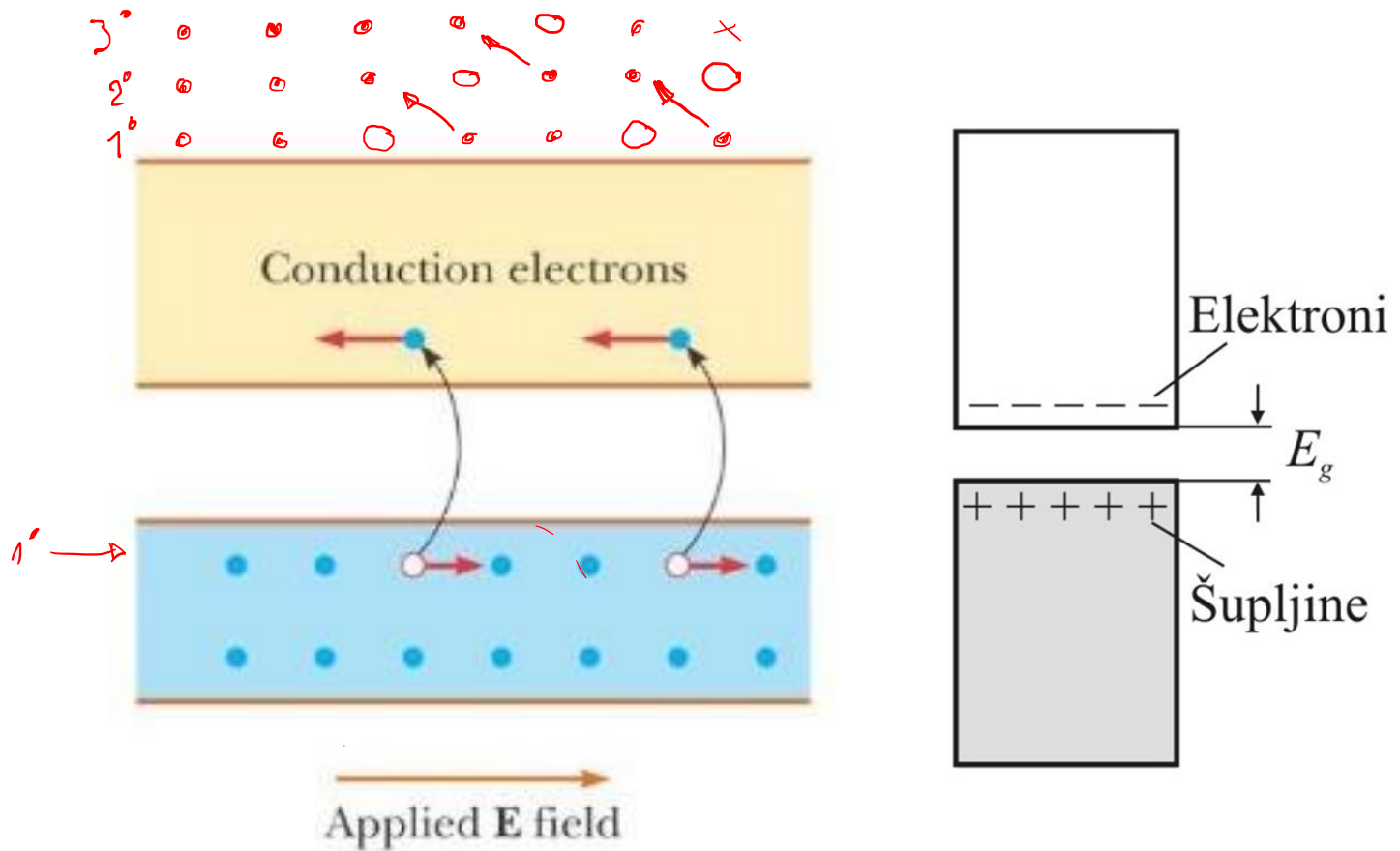


## Konkretan primer:

- Koncentracija atoma u čistom Si je oko  $5 \cdot 10^{22}$
- Da je čist Si bilo bi  $n_i \cdot p_i = n_i^2 = 10^{20}$
- Sada zamišljamo da dopiramo taj čisti Si
- Za dopirani poluprovodnik je takođe  $n_n \cdot p_n = 10^{20}$
- Tipična koncentracija donora je  $N_D = 10^{17}$
- Svaki atom donora nosi jedan elektron, pa je zbog toga  $n_n \approx N_D$
- A pošto i dalje važi  $N_D \cdot p_n = 10^{20}$
- Odatle sledi da je  $p_n \approx 10^{20} / N_D = 10^3$



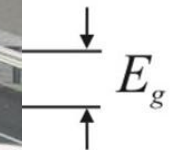
# Provođenje struje kod poluprovodnika?



# Provođenje struje kod poluprovodnika?



Elektroni



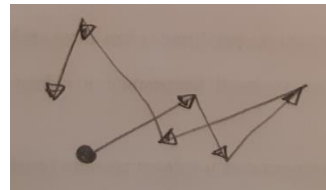
Šupljine

# Provođenje struje kod poluprovodnika

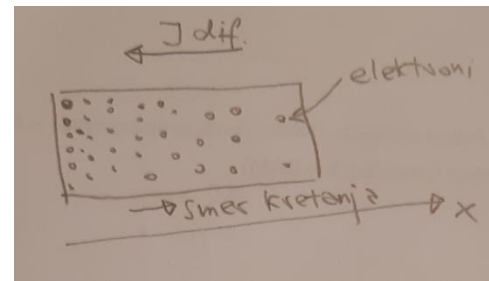
- U metalu struju provode slobodni elektroni, u poluprovodniku elektroni i šupljine.
  - Ukupna struja u poluprovodniku je zbir struje šupljina i struje elektrona.
- Dva mehanizma provođenja u poluprovodniku
  - Provođenje pod dejstvom električnog polja (drift)
  - Provođenje difuzijom (kretanje nosilaca sa mesta više na mesto niže koncentracije)

# Provođenje struje kod poluprovodnika

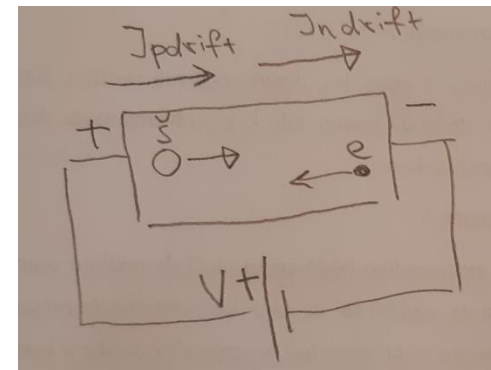
- Provođenje struje kod poluprovodnika
  - Haotično kretanje slobodnih elektrona (nema provođenja)



- Usmereno difuzno kretanje

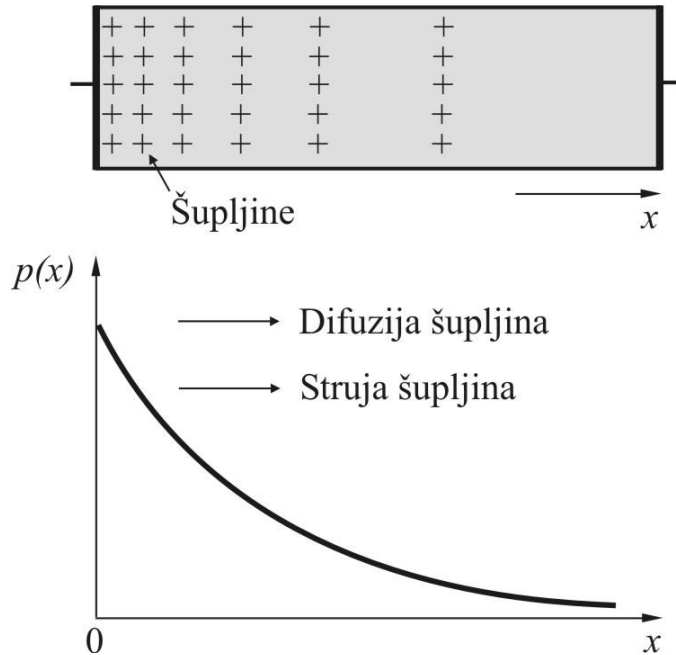


- Usmereno kretanje nosilaca pod dejstvom električnog polja (drift)



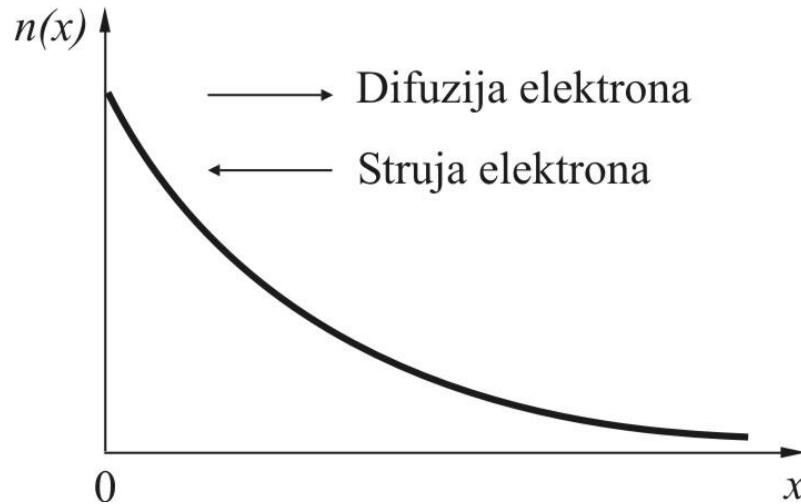
# Provođenje difuzijom

- Kretanje nosilaca naelektrisanja sa mesta više na mesto niže koncentracije, i kao posledica toga struja difuzije.
- Struja difuzije proporcionalna gradientu koncentracije nosilaca.



$$J_{p dif} = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

# Difuzija elektrona



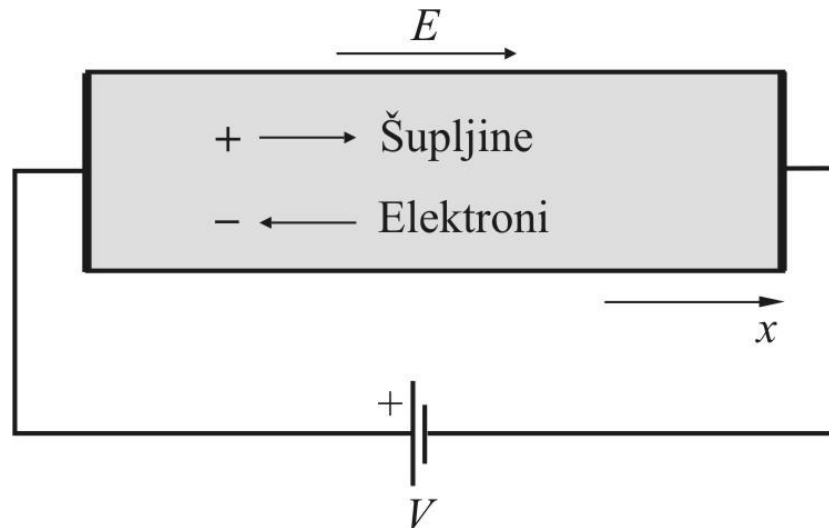
$$J_{ndif} = +qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_{dif} = qD_n \frac{dn}{dx} - qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} = V_T$$

# Provođenje driftom

- Pod dejstvom električnog polja  $E$  slobodni elektroni i šupljine se kreću u suprotnim smerovima (elektroni suprotno od smeru polja, šupljine u smeru polja)



# Provođenje driftom

- Pošto su naelektrisanja suprotnog znaka, struje teku u istom smeru
- Ovako nastala struja se naziva struja drifta, i njena gustina je

$$J_{drift} = J_{ndrift} + J_{pdrift} = q\mu_n nE + q\mu_p pE$$

- $q$  naelektrisanje elektrona
- $n, p$  koncentracije elektrona i šupljina
- $\mu_n, \mu_p$  [cm<sup>2</sup>/Vs] pokretljivosti elektrona i šupljina, elektroni imaju veću (1350 prema 500)
- Brzina kretanja nosilaca je  $\mu E$ , a specifična električna provodnost  $\sigma = q\mu_n n + q\mu_p p$



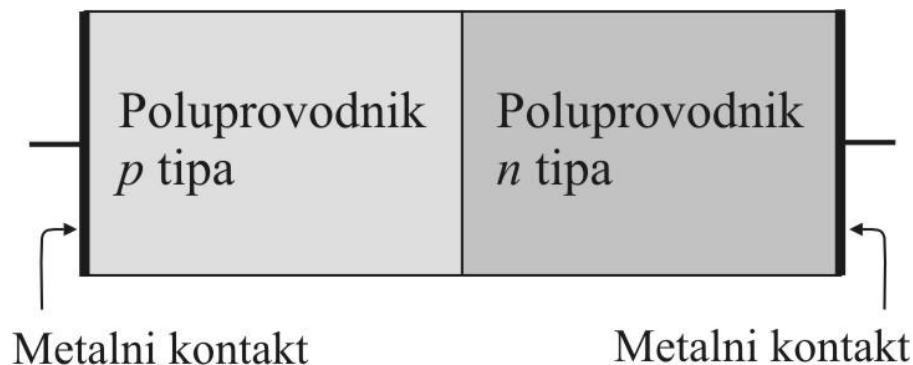
# Provođenje struje kod poluprovodnika

- U poluprovodniku u kome postoje i difuzija i delovanje električnog polja, ukupna struja je zbir struja drifta i difuzije

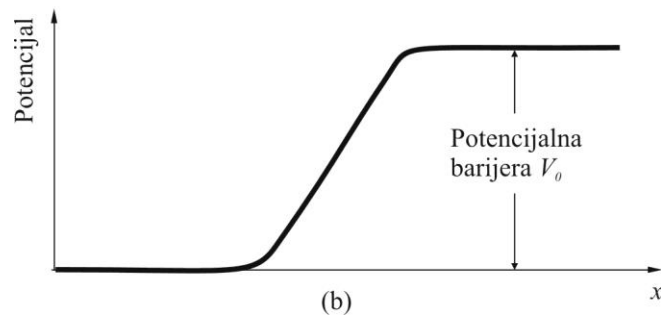
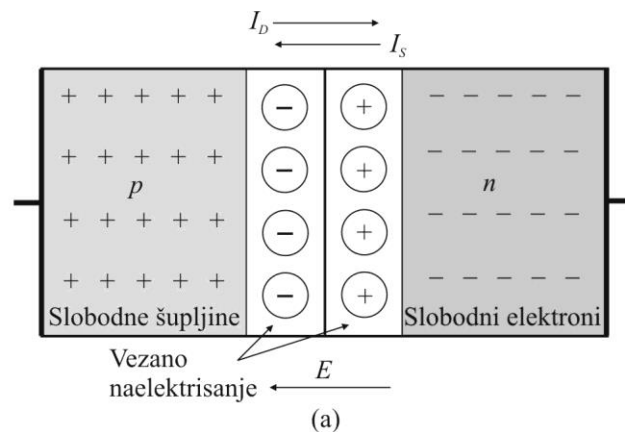
$$J = J_{drift} + J_{dif}$$

# PN spoj u otvorenom kolu (nepolarisani PN spoj)

- PN spoj se dobija kada se u komad čistog poluprovodnika ubace sa jedne akceptorske a sa druge strane donorske primese
- To je osnovni element poluprovodničke tehnologije
- Poluprovodničke komponente mogu posedovati jedan ili više PN spojeva

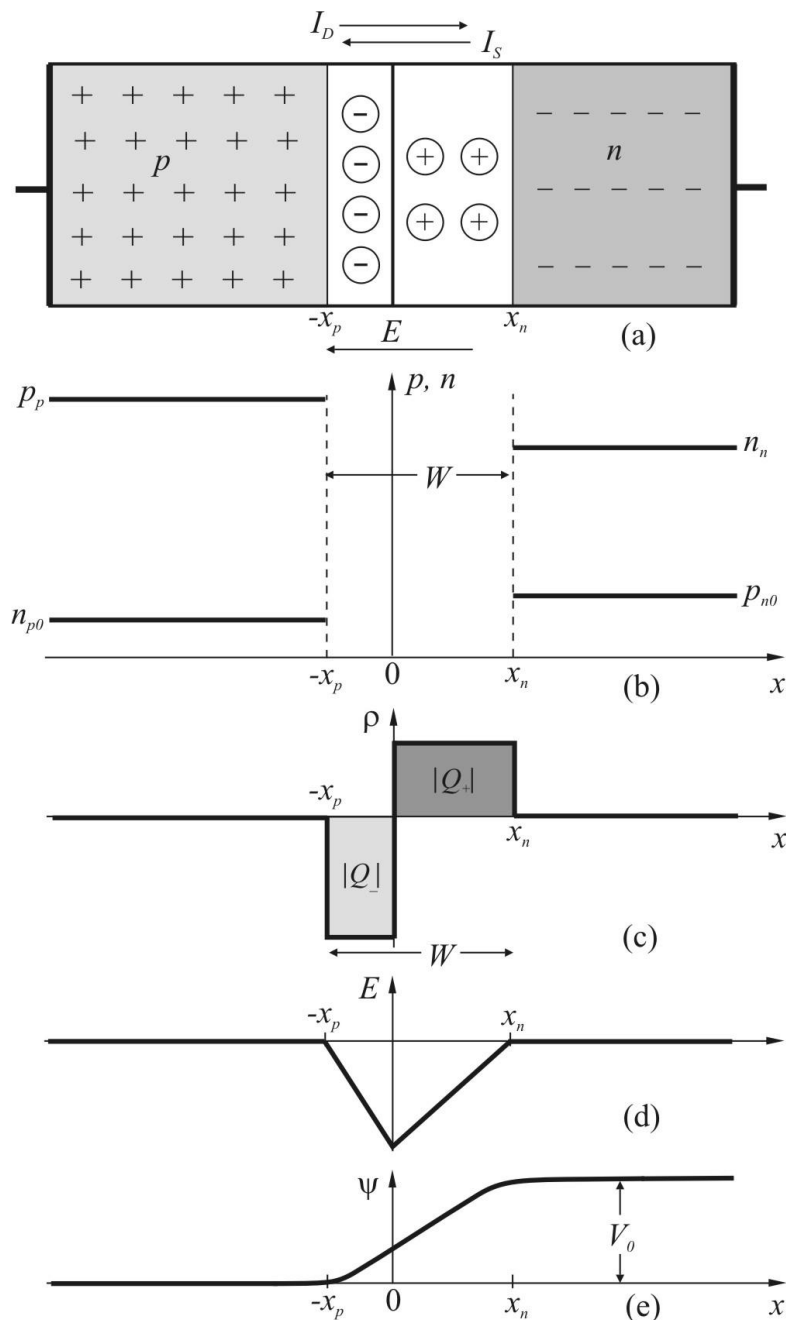


# PN spoj u otvorenom kolu (nepolarisani PN spoj)



# PN spoj u otvorenom kolu (nepolarisani PN spoj)

- Presek PN spoja
- Šupljine iz p prelaze u n difuzijom i rekombinuju se sa elektronima.
- Elektroni iz n prelaze u p difuzijom i rekombinuju se sa šupljinama
- Zbog toga u p i n neposredno uz spoj nema slobodnih nosilaca i tu se nalaze nekompensovani joni, pozitivni i negativni



# PN spoj u otvorenom kolu (nepolarisani PN spoj)

- Uspostavljena pot. barijera sprečava prelazak nosioca naelektrisanja difuzijom sa jedne na drugu stranu spoja
- $I_D$  je struja difuzije nosioca koji preskoče barijeru
- $I_S$  je struja drifta manjinskih nosilaca (termički generisanih), usled el. polja
- $Q^+$ ,  $Q^-$  višak vezanog (poz. i neg.) naelektrisanja uz PN spoj
- $V^+$ ,  $V^-$  potencijali pridruženi  $Q^+$ ,  $Q^-$
- $V_0 = V^+ - V^-$  potencijalna barijera
- U ravnoteži  $I_D = I_S$  (ukupna struja je nula)
- Napon  $V_0$  se ne može izmeriti; ako se spoj spolja kratko spoji, dolazi do kontaktnog potencijala između metala i poluprovodnika

