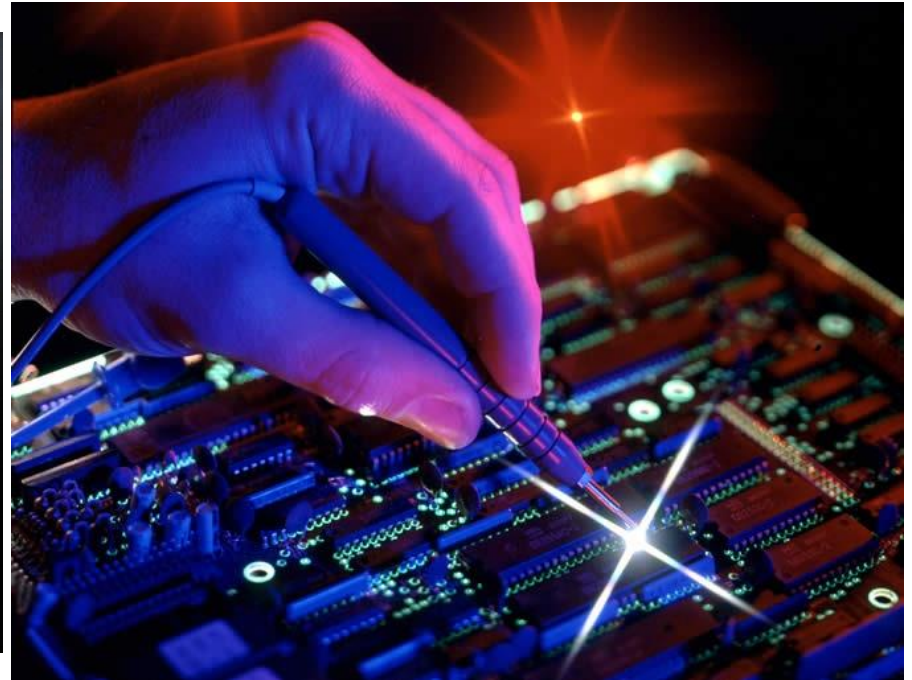
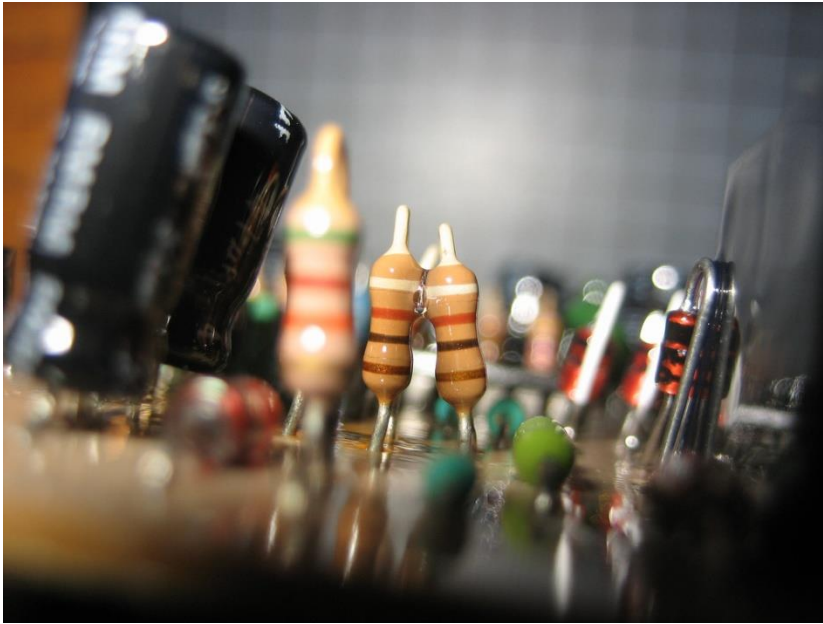


Elektronika (120)

Auditorne vježbe 1

Što je elektronika?



- Elektronika je grana znanosti i tehnologije koja proučava/koristi usmjereno gibanje elektrona kroz neki medij ili vakuum.
- Usmjereno gibanje elektrona → električna struja

Od čega se izrađuju elektronički uređaji?



- Silicij – Si (2. najrasprostranjeniji element u Zemljinoj kori – 27,7%)
- Germanij – Ge

Složeni poluvodiči

- III-V poluvodiči:
 - GaAs, GaN, GaP, GaSb
 - AlAs, AlN, AlP
 - InSb, InAs, InN, InP
 - AlGaAs, InGaAs
 - InGaP, AlGaP
- II-VI poluvodiči:
 - CdS, CdSe, CdTe
 - ZnO, ZnSe, ZnS, ZnTe

itd...



Definicija poluvodiča

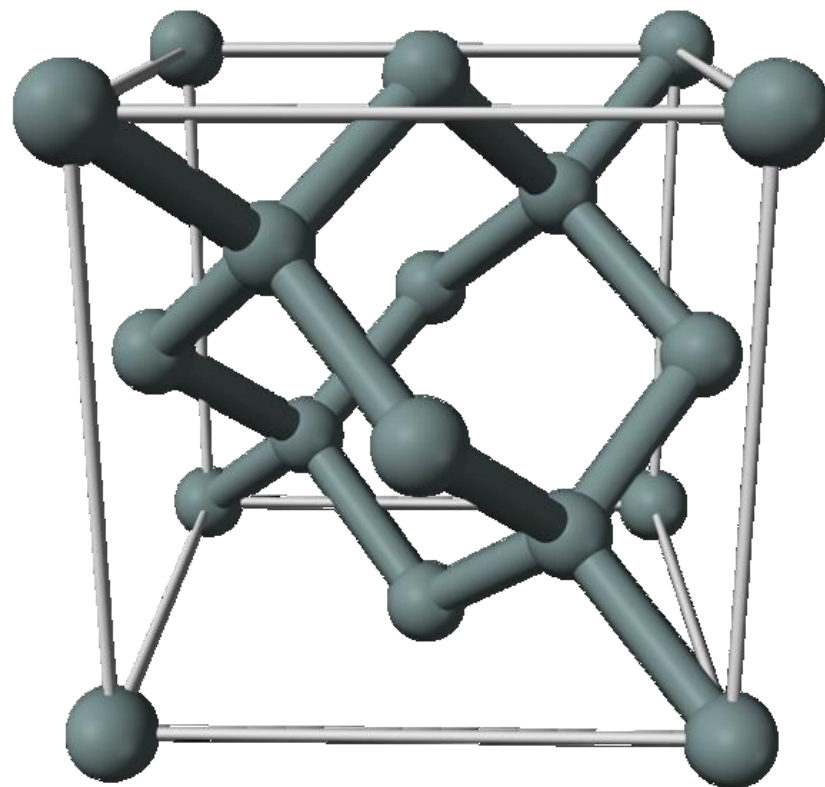
- Materijali čija je električna vodljivost veća od vodljivosti izolatora, a manja od vodiča.

$$10^{-8} \text{ S/cm} < \sigma < 10^3 \text{ S/cm}$$

- Ključni parametar je **električna vodljivost!**
- Vodljivost poluvodiča može se mijenjati u širokom rasponu vrijednosti.
- Kako?
- Pogledati u strukturu silicija!

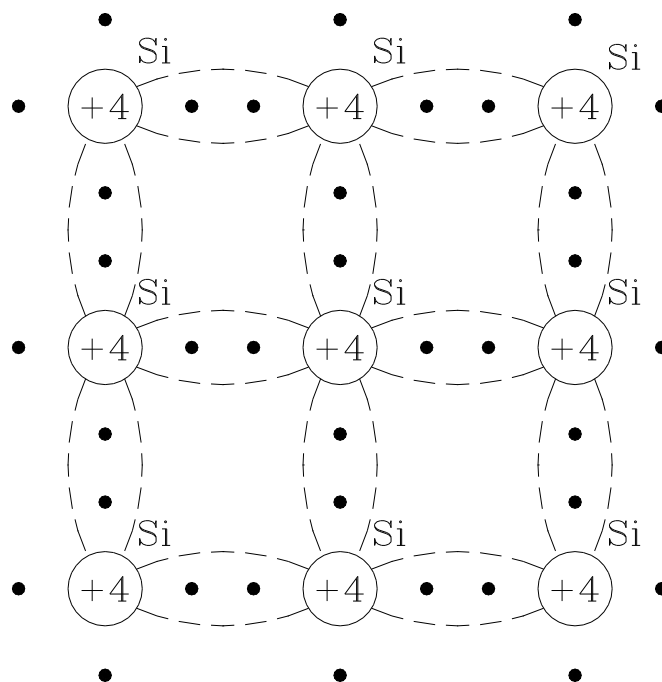
Struktura silicija

- Čvrsto tijelo
- Kristalna struktura
- Kovalentna veza
- Gustoća atoma: $5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$



Kovalentna veza

- Atom:
 - Jezgra
 - Elektroni (smješteni u tzv. ljuskama)
- Ključni su tzv. **valentni elektroni**.



Slobodni elektroni

- Električna vodljivost ovisi o broju **slobodnih** elektrona
- Ali elektroni su u kovalentnim vezama!
- Kako osloboditi elektron iz kovalentne veze???
- Razbiti kovalentnu vezu!

KAKO???

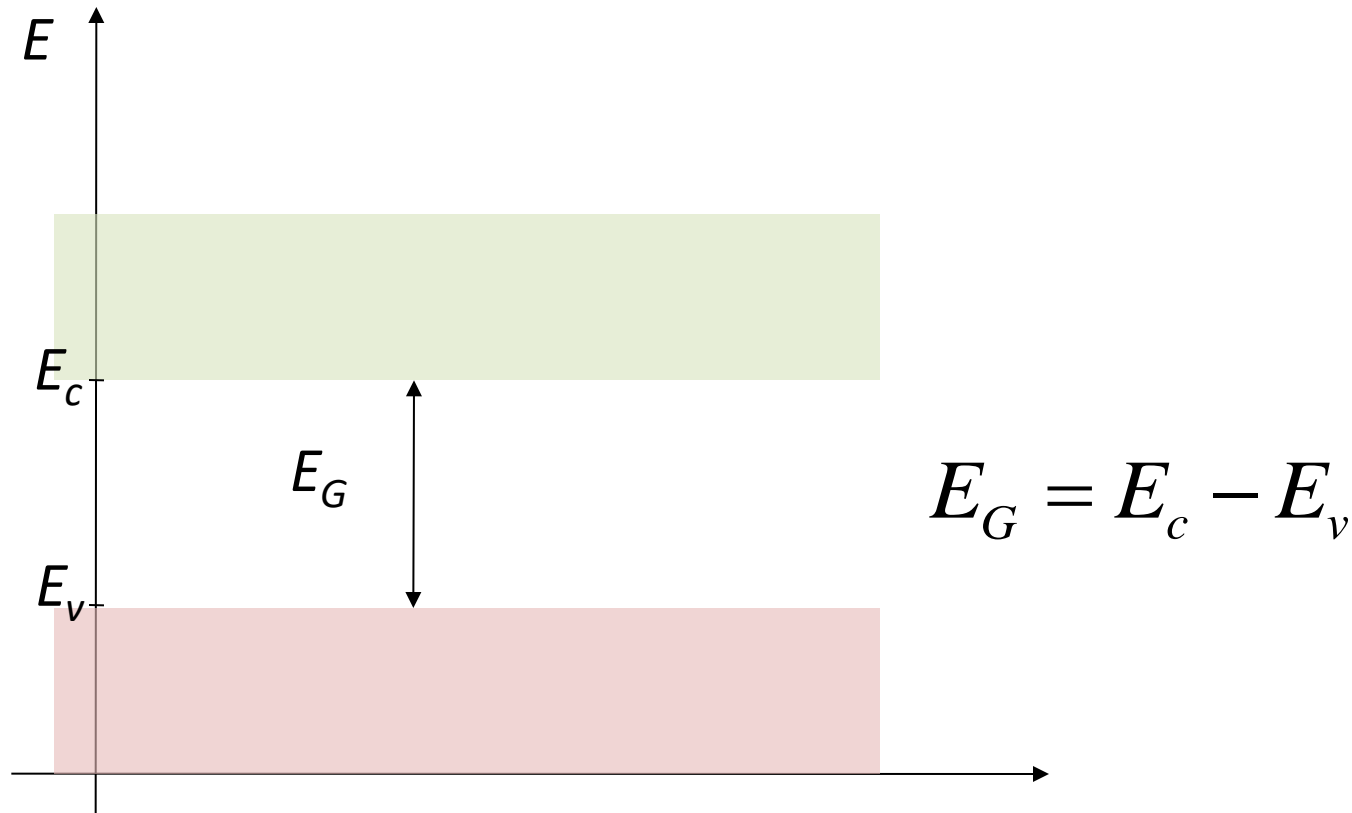
Gustoća slobodnih elektrona

- Gustoća slobodnih elektrona: n [cm⁻³]
- *Broj slobodnih elektrona u jedinici volumena*
- **Ovisi o temperaturi!**
- Elektron se može osloboditi iz kovalentne veze ako mu se dovede energija (zagrijavanjem, djelovanjem svjetla itd.).
- **Oslobađanjem elektrona nastaje šupljina!!!**

Karakteristične energije

- Vrh valentnog pojasa – najveća energija koju elektron može imati, a da je još uvijek vezan uz atom. E_v
- Dno vodljivog pojasa – najmanja energija koju elektron može imati kad je slobodan. E_c
- Širina zabranjenog pojasa – najmanja energija koju treba dovesti da bi se oslobodio elektron iz kovalentne veze. E_G
- Prikaz karakterističnih energija – **energijski dijagram**.

Energijski dijagram poluvodiča

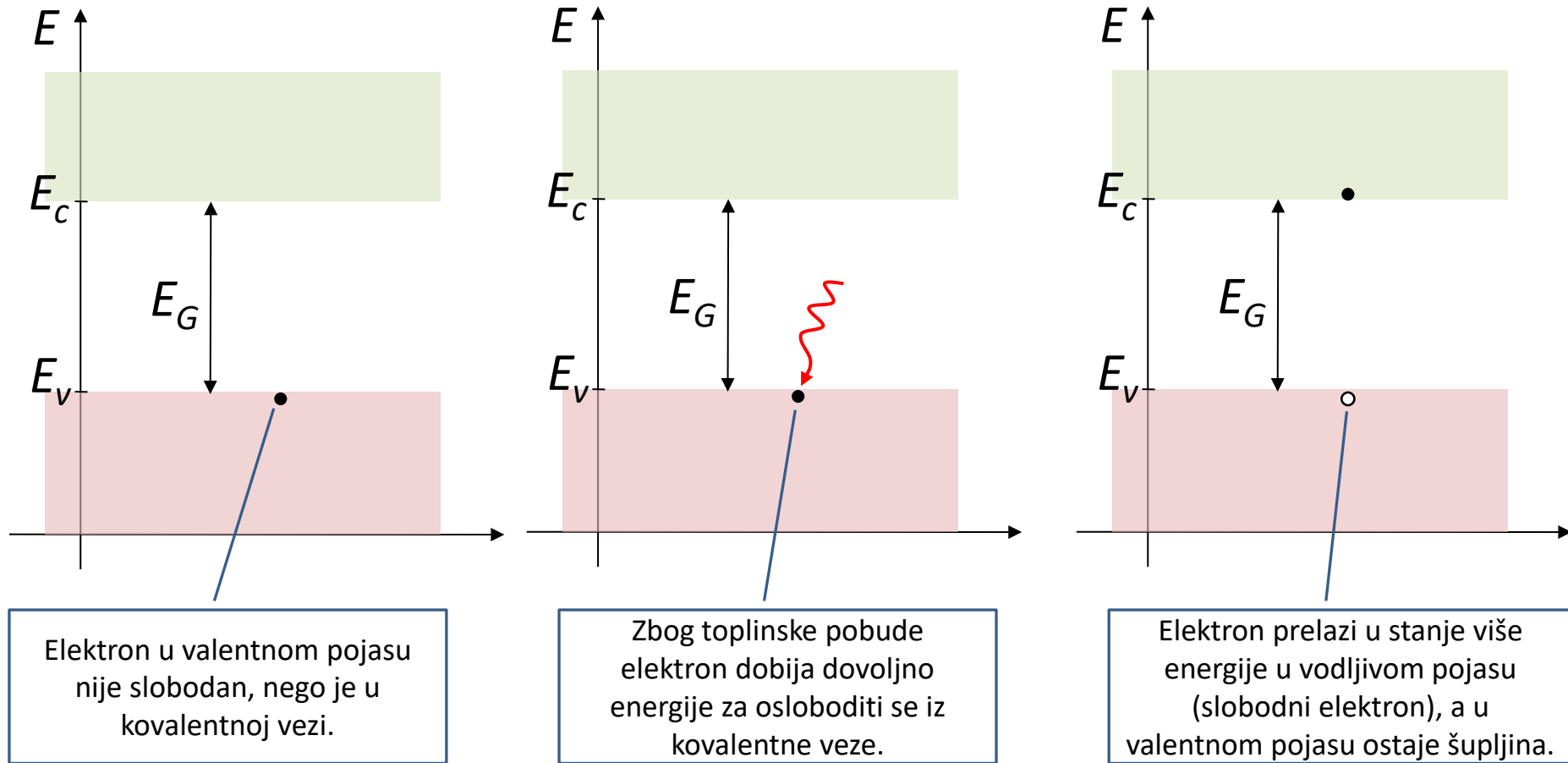


Za silicij na 300 K: $E_G = 1,12$ eV

Za GaAs na 300 K: $E_G = 1,42$ eV

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Oslobađanje elektrona iz kovalentne veze prikazano u energijskom dijagramu



Širina zabranjenog pojasa

- Model za proračun širine zabranjenog pojasa Si u ovisnosti o temperaturi:

$$E_G(T) = 1,17 - 4,73 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{T^2}{T + 636} \quad [eV]$$

- Drugi model:

$$E_G(T) = 1,17 - 1,059 \cdot 10^{-5} \cdot T - 6,05 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \quad [eV] \quad T \leq 170 K$$

$$E_G(T) = 1,1785 - 9,025 \cdot 10^{-5} \cdot T - 3,05 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \quad [eV] \quad T > 170 K$$

Zadatak 1.

Izračunati širinu zabranjenog pojasa silicija na sljedećim temperaturama:

a) $T = 200 \text{ K}$

b) $T = 350 \text{ K}$

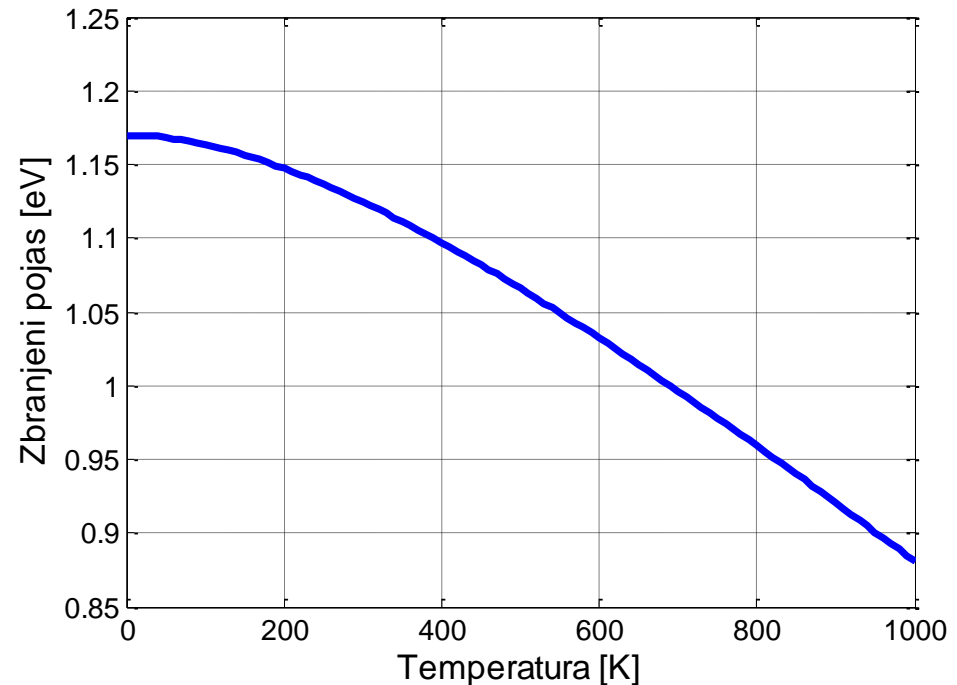
c) $T = 400 \text{ K}$

☑ Rješenje:

a) $E_G = 1,147 \text{ eV}$

b) $E_G = 1,111 \text{ eV}$

c) $E_G = 1,097 \text{ eV}$



Domaći rad: Odrediti širine zabranjenog pojasa pri zadanim temperaturama s drugim modelom i usporediti ih s rezultatima iz zadatka 1.

Čisti (intrinzični) silicij

- Bez primjesa (nečistoća).
- Broj slobodnih elektrona = broj razbijenih kovalentnih veza.
- Razbijena kovalentna veza = slobodno mjesto za drugi elektron → šupljina.
- Gustoća šupljina p [cm⁻³].
- U intrinzičnom poluvodiču:

$$n = p = n_i$$

Gustoće nosilaca naboja u poluvodiču

- Gustoća elektrona u poluvodiču dana je izrazom:

$$n_0 = N_C \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_C}{E_T}\right) \quad N_C = 2 \cdot \left(\frac{m_n kT}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2}$$

- Analogno, gustoća šupljina je:

$$p_0 = N_V \cdot \exp\left(\frac{E_V - E_F}{E_T}\right) \quad N_V = 2 \cdot \left(\frac{m_p kT}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2}$$

- Efektivne mase elektrona/šupljina:

Normirane efektivne mase	Si	Ge	GaAs
m_n/m_0	1,18	0,56	0,067
m_p/m_0	0,81	0,29	0,47

Određivanje intrinzične gustoće

- Model za određivanje intrinzične gustoće u ovisnosti o temperaturi za silicij:

$$n_i = (N_c \cdot N_v)^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_G}{2E_T}\right) \quad [cm^{-3}]$$

- Ako se uvrste vrijednosti efektivnih masa nosilaca za silicijski poluvodič:

$$N_c = 6,2 \cdot 10^{15} \cdot T^{3/2} \quad [cm^{-3}]$$

$$N_v = 3,5 \cdot 10^{15} \cdot T^{3/2} \quad [cm^{-3}]$$

$$E_T = k \cdot T = \frac{T}{11605} \quad [eV]$$

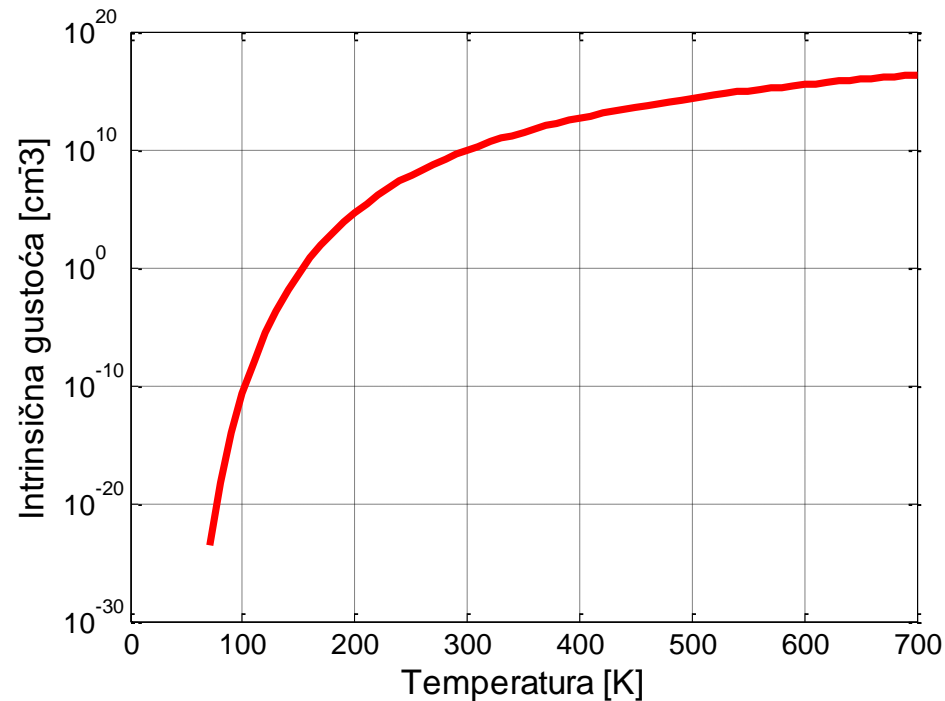
Zadatak 2.

Izračunati intrinzičnu gustoću u silicijskom poluvodiču na temperaturama:

- a) $T = 100 \text{ K}$
- b) $T = 200 \text{ K}$
- c) $T = 350 \text{ K}$
- d) $T = 400 \text{ K}$

☑ **Rješenje:**

- a) $n_i = 2,23 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^{-3}$
- b) $n_i = 4,61 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$
- c) $n_i = 3,05 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$
- d) $n_i = 4,58 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$



Domaći rad: Izračunati intrinzičnu gustoću u silicijskom poluvodiču na zadanim temperaturama koristeći širine zabranjenog pojasa izračunate u prethodnom zadatku domaćeg rada. Dobivene rezultate usporediti s rezultatima iz zadatka 2.

Zadatak 3.

- Izračunati relativnu promjenu intrinzične gustoće u silicijskom poluvodiču ako se temperatura s 300 K povisi za 10%.

☑ Rješenje:

Proračun:

$$T_1=300 \text{ K} \rightarrow n_{i1} = 8,68 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$$

$$T_2=330 \text{ K} \rightarrow n_{i2} = 8,3 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

$$\frac{\Delta n_i}{n_{i1}} = \frac{n_{i2} - n_{i1}}{n_{i1}} = 856\%$$

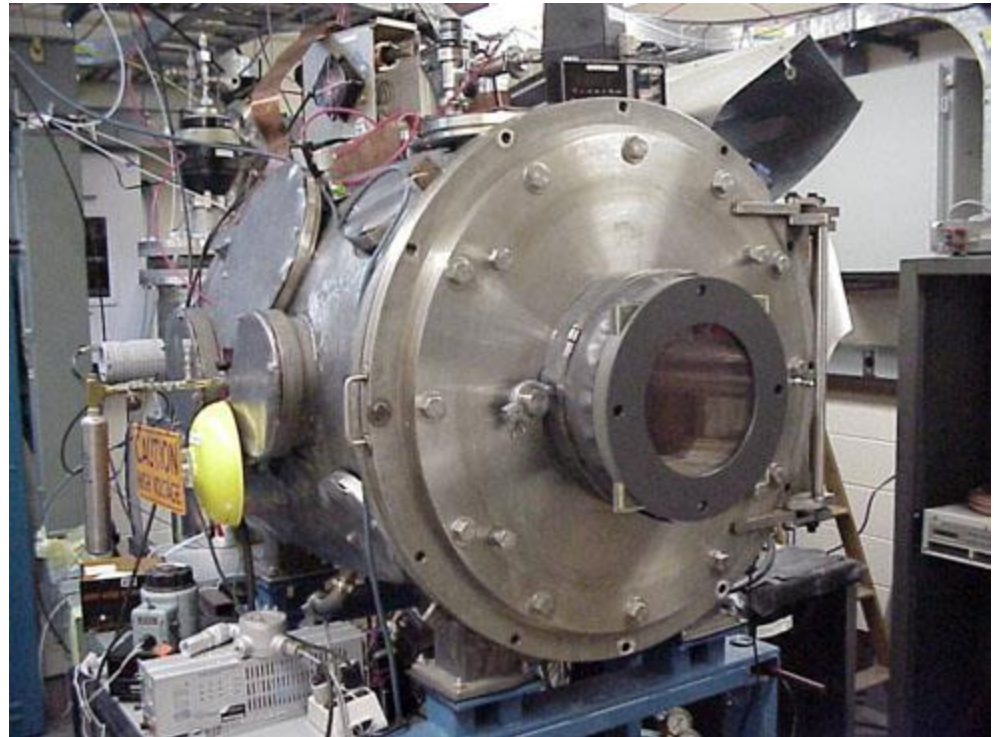
Onečišćeni (ekstrinzični) poluvodič

- Poluvodič s primjesama (**namjerno** unesene)
- Gustoća primjesa određuje električna svojstva (vodljivost)
- primjesa = nečistoća = dopant
- unošenje nečistoća = dopiranje

Tipovi ekstrinzičnih poluvodiča

- Prevladavaju elektroni – **n-tip**
- Prevladavaju šupljine – **p-tip**
- Primjese se unose posebnim tehnološkim postupcima

*Uređaj za ionsku
implantaciju i nanošenje
poluvodičkih filmova*

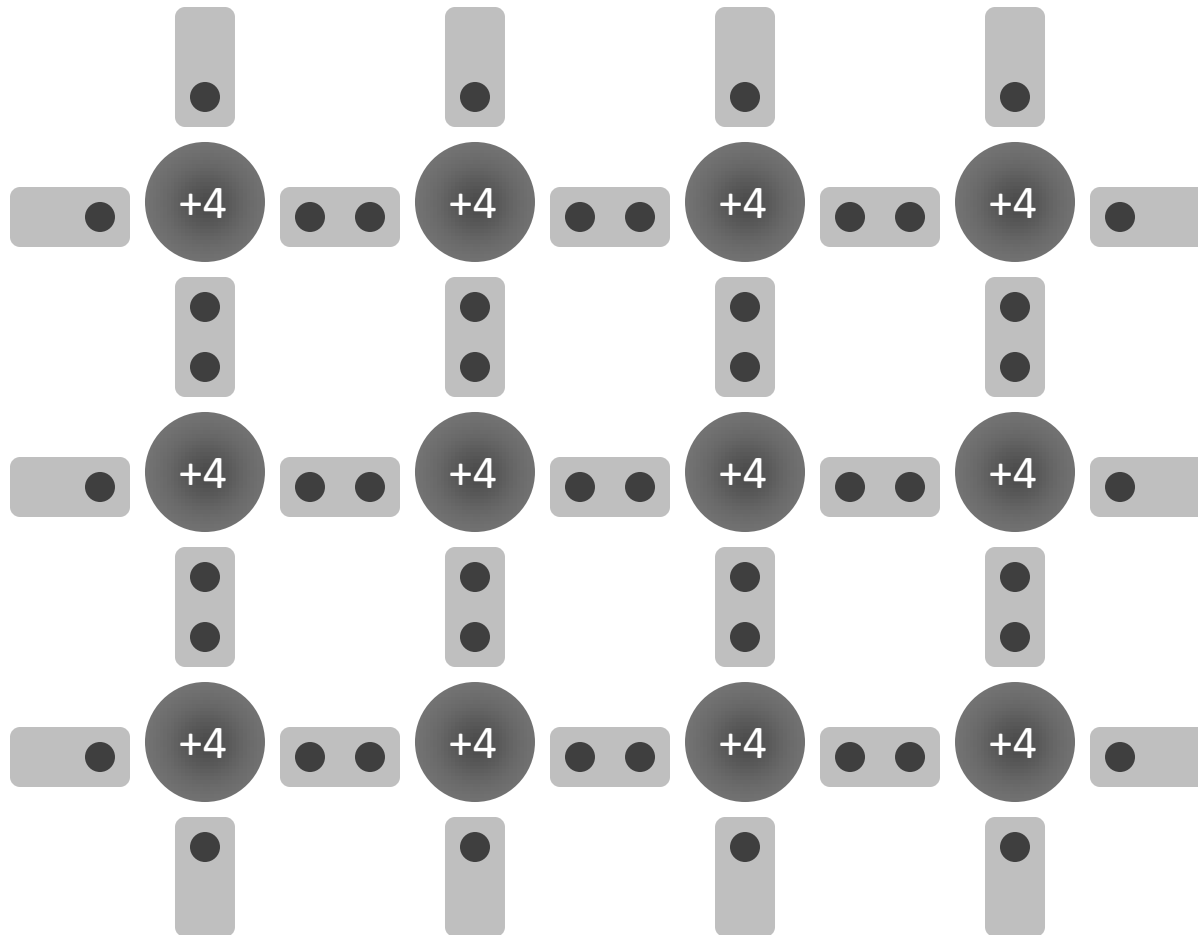


Poluvodič **n**-tipa

- Primjese: 5-valentni atomi:
 - FOSFOR (P)
 - ARSEN (As)
 - ANTIMON (Sb)
- Imaju 5 valentnih elektrona:
 - 4 u kovalentnoj vezi (čvrsto vezani)
 - 1 vezan uz jezgru (puno slabije vezan)

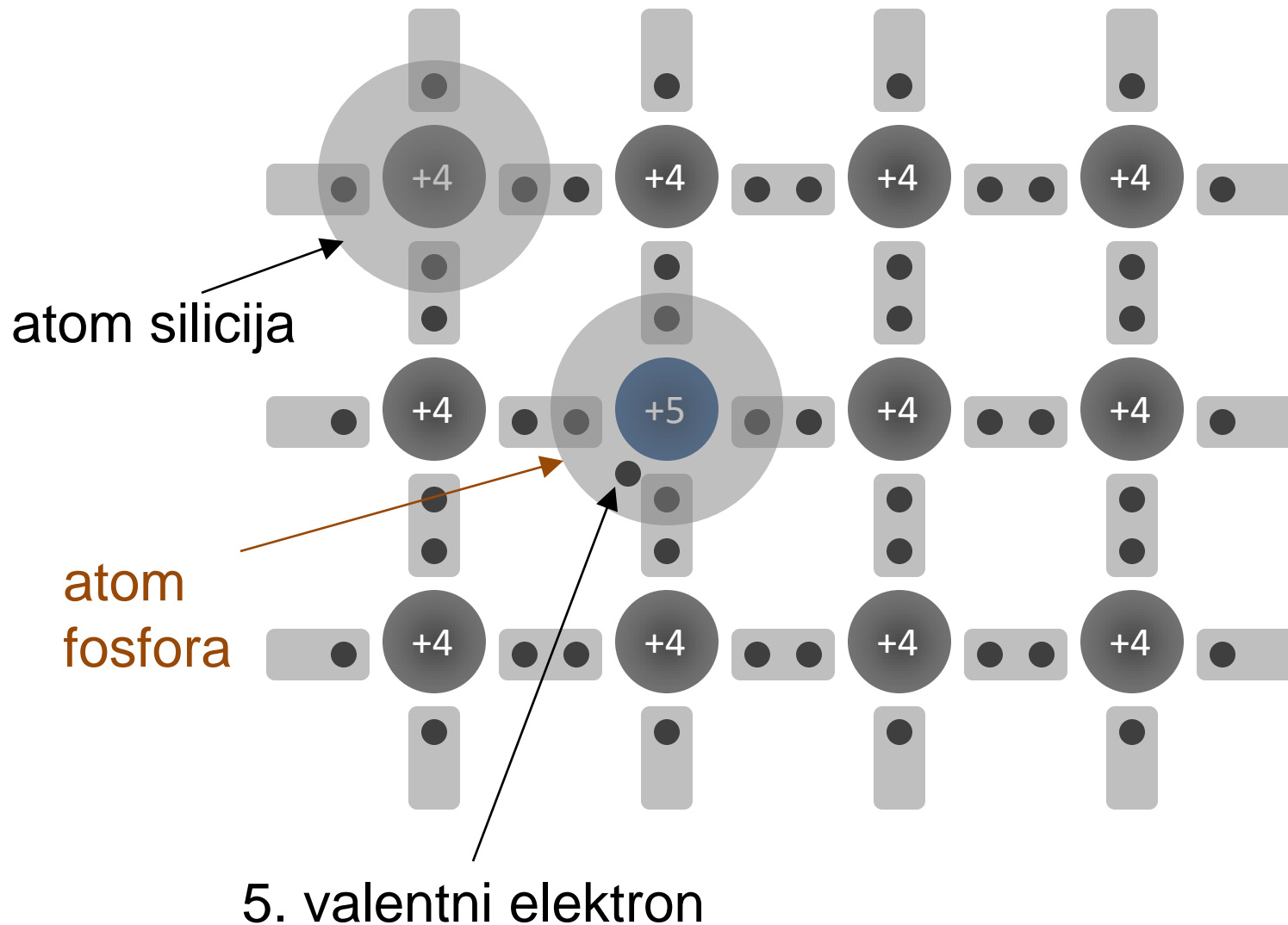
					2 He Helium 4.003
5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.0107	7 N Nitrogen 14.00674	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.9984032	10 Ne Neon 20.1797
13 Al Aluminum 26.981538	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973761	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.4527	18 Ar Argon 39.948
31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92160	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80
49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.29
81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98038	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)
113	114				

Intrinsični poluvodič

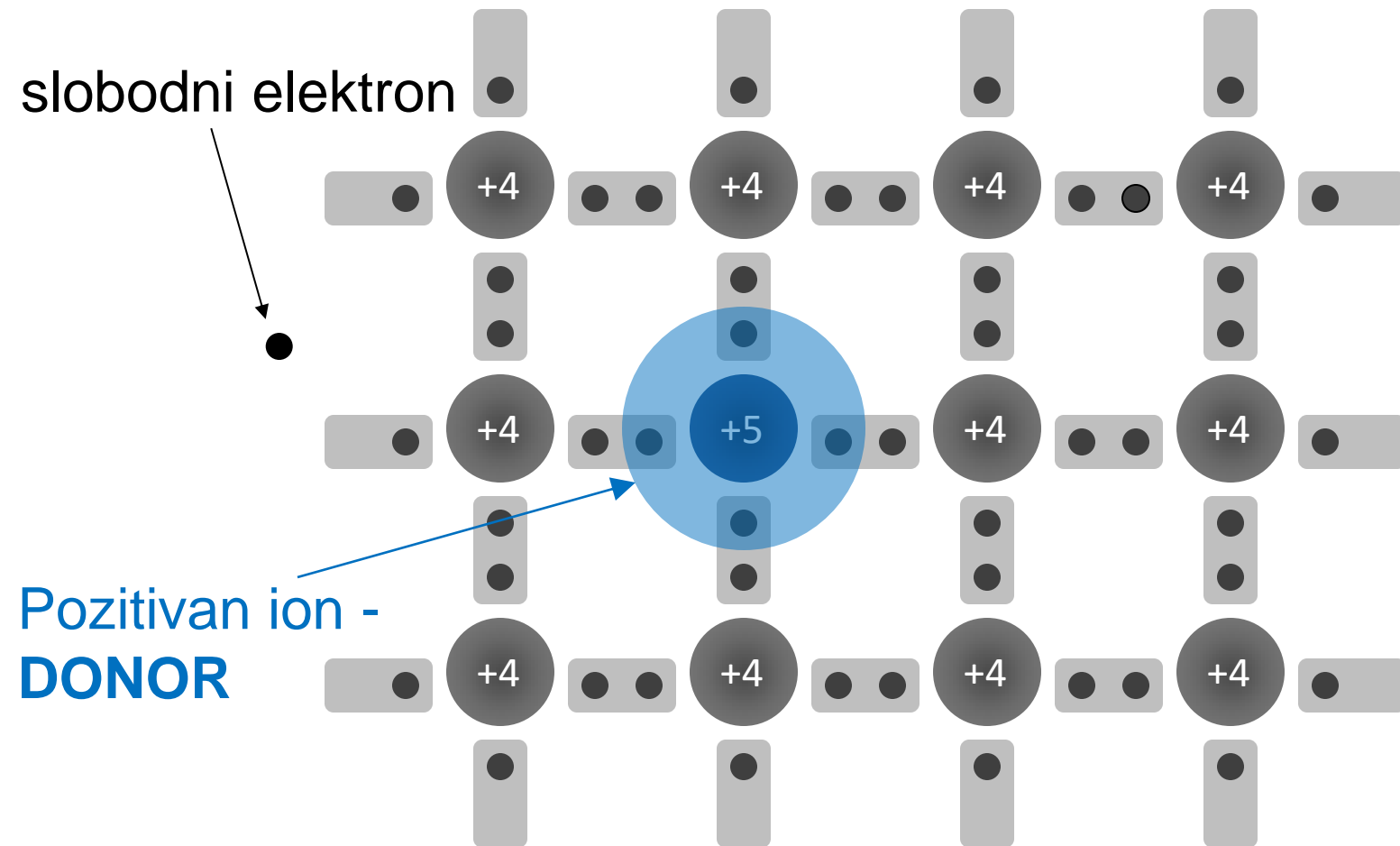


- Atomi Si su električki neutralni!

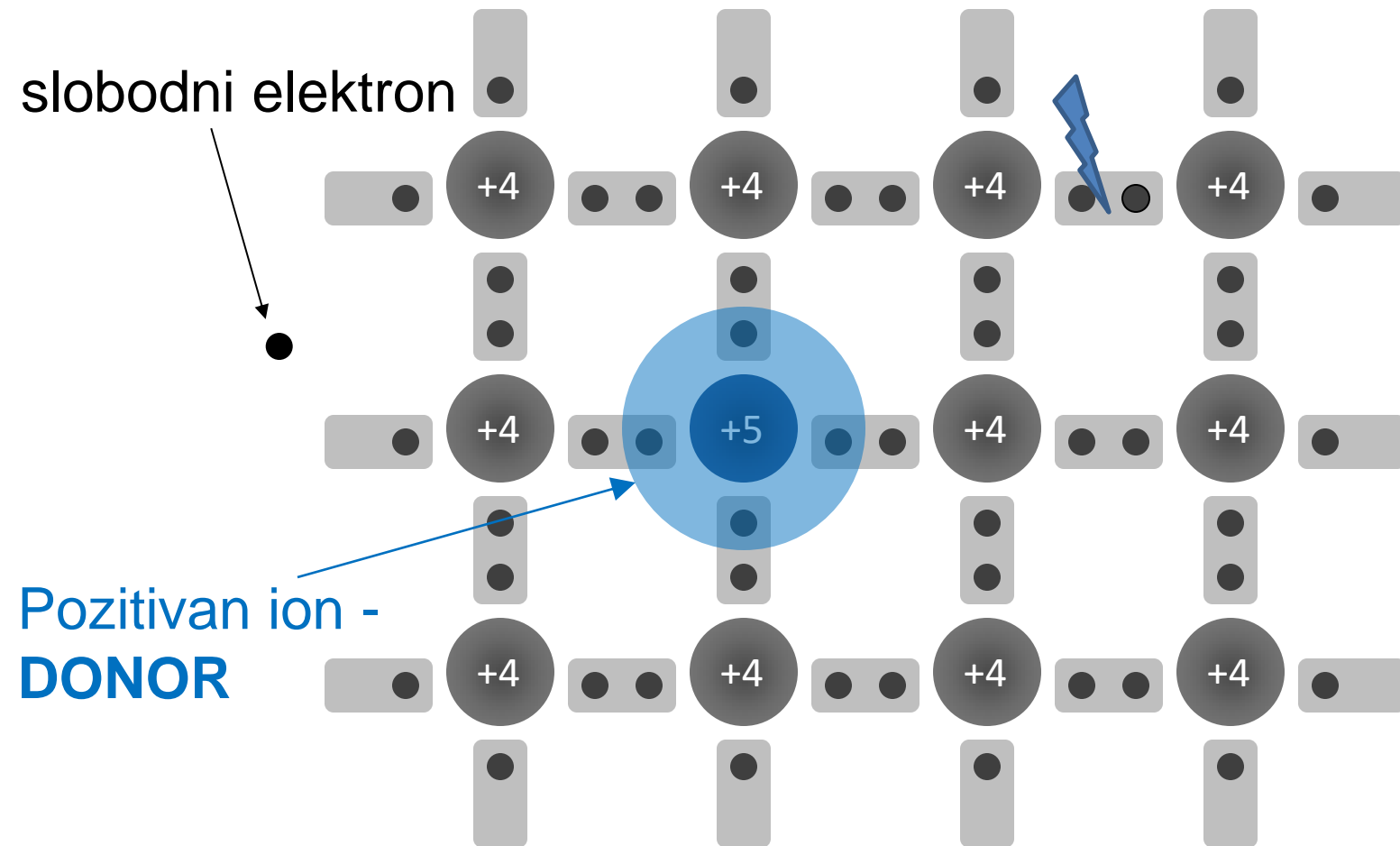
Poluvodič **n**-tipa



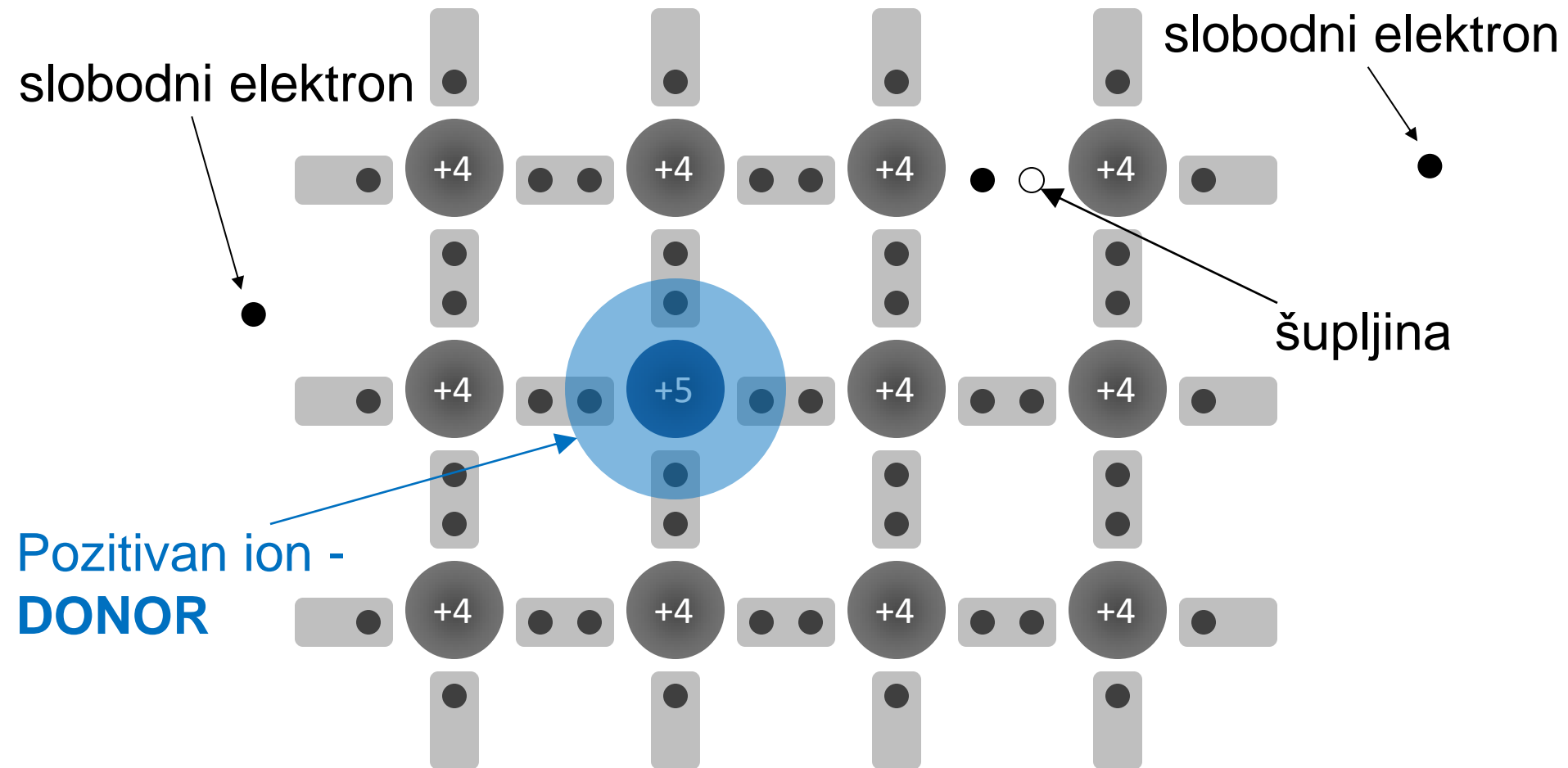
Poluvodič **n**-tipa



Poluvodič **n**-tipa



Poluvodič **n**-tipa



Poluvodič **n**-tipa

- Naboji u poluvodiču n-tipa:
 - Slobodni **elektroni**
 - Slobodne **šupljine**
 - Lokalizirani **donori**
- Ravnotežno stanje:
 - Gustoća elektrona n_0
 - Gustoća šupljina p_0
 - Gustoća donora N_D
- *Elektroni su većinski nosioci naboja*
- *Šupljine su manjinski nosioci naboja*

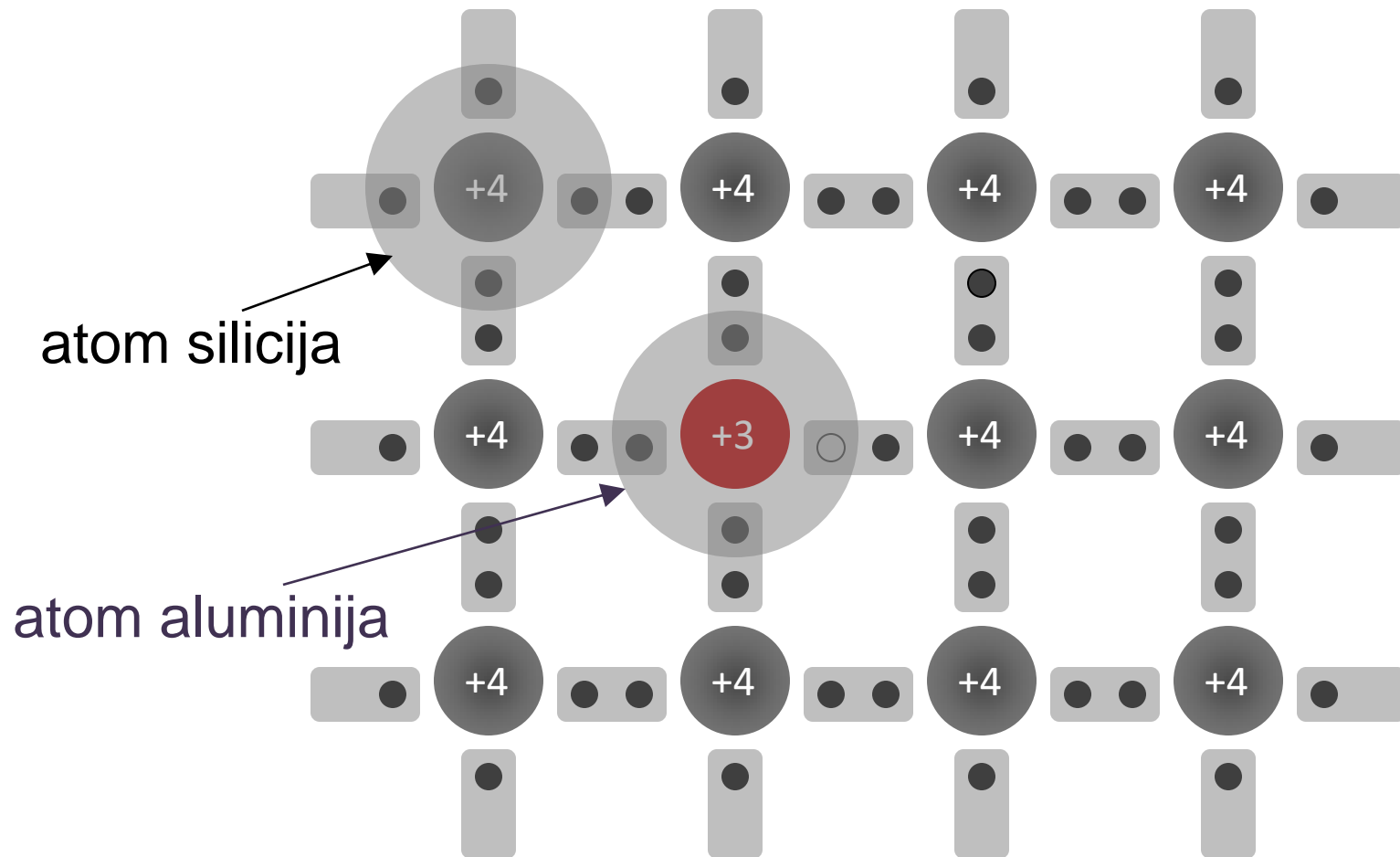
$$n_0 > p_0$$

Poluvodič p-tipa

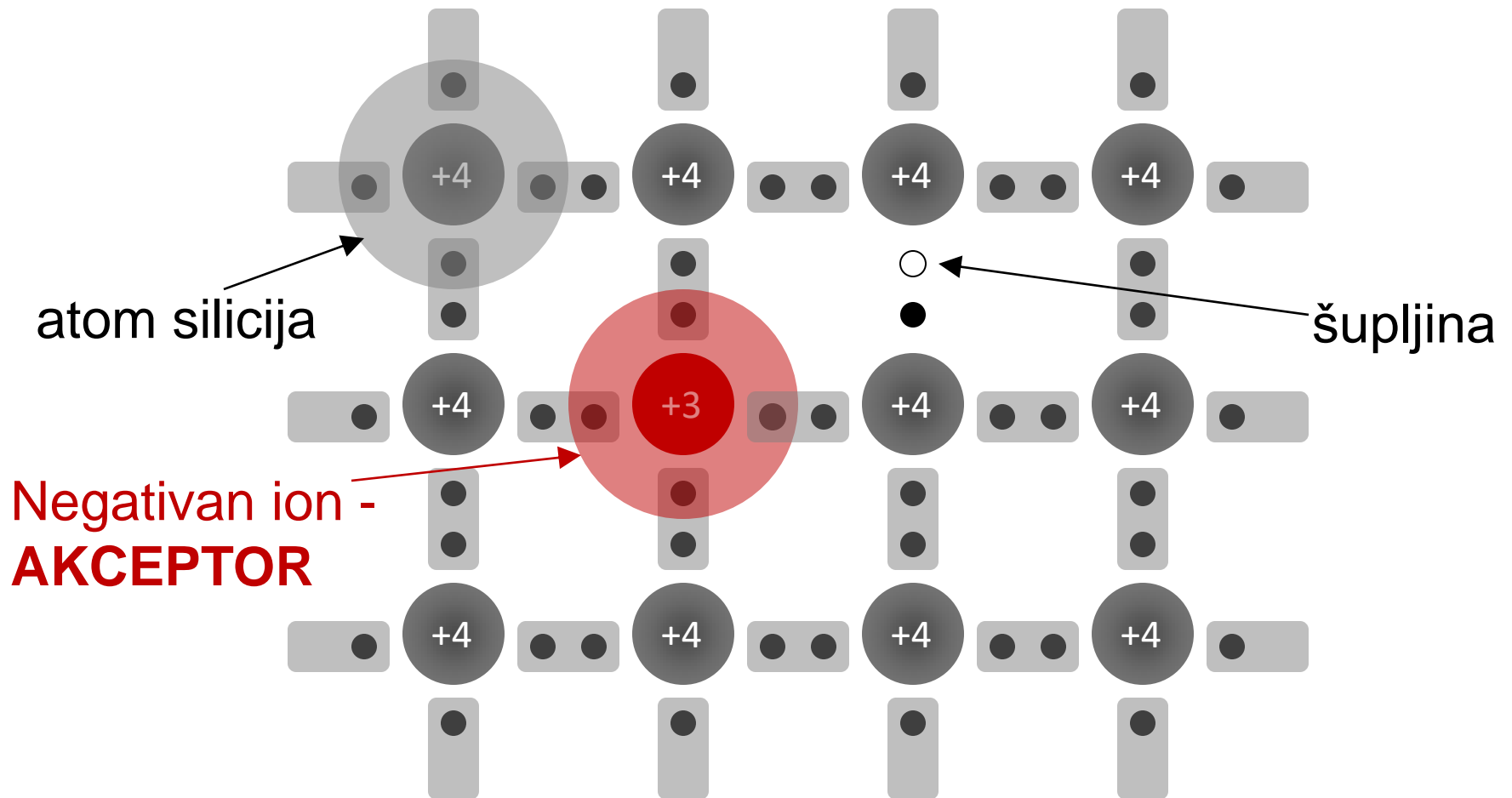
- Primjese: 3-valentni atomi:
 - BOR (B)
 - ALUMINIJ (Al)
 - GALIJ (Ga)
- Imaju 3 valentna elektrona:
 - 3 u kovalentnoj vezi (čvrsto vezani)
 - 1 nedostaje uz jezgru (slobodno mjesto za elektron - šupljina)

					2 He Helium 4.003
5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.0107	7 N Nitrogen 14.00674	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.9984032	10 Ne Neon 20.1797
13 Al Aluminum 26.981538	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973761	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.4527	18 Ar Argon 39.948
31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.92160	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80
49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.29
81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98038	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)
113	114				

Poluvodič p-tipa



Poluvodič p-tipa



Poluvodič p-tipa

- Naboji u poluvodiču p-tipa:
 - Slobodni **elektroni**
 - Slobodne **šupljine**
 - Lokalizirani **akceptori**
- Ravnotežno stanje:
 - Gustoća elektrona n_0
 - Gustoća šupljina p_0
 - Gustoća akceptora N_A
- *Šupljine su većinski nosioci naboja*
- *Elektroni su manjinski nosioci naboja*

$$p_0 > n_0$$

Osnovni zakoni u poluvodičima

1) Zakon električne neutralnosti:

$$n_0 + N_A = p_0 + N_D$$

2) Zakon termodinamičke ravnoteže:

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