



# ELEKTRONIKA

## Predavanje 1

### OSNOVNA SVOJSTVA POLUVODIČKIH MATERIJALA (1)

# O kolegiju

Elektronički elementi	Elektronički sklopovi
<ul style="list-style-type: none"><li>• Poluvodiči</li><li>• Dioda</li><li>• Tranzistor</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pojačala s bipolarnim tranzistorom</li><li>• Pojačala s unipolarnim tranzistorom</li><li>• Operacijsko pojačalo</li></ul>
08.03. – 23.04.	10.05. – 18.06.

- Ocjena: teorija 50%, zadaci 50%
- **Relativno ocjenjivanje**
- Ispiti - ispitna grupa 23: 07.07.2021., 21.07.2021. i 01.09.2021.
- Konzultacije:
  - Tihomir Betti, B407, betti@fesb.hr
  - Ivan Marasović, B406, ivan.marasovic@fesb.hr



# Definicija poluvodiča

---

- Materijali čija je **električna vodljivost** veća od vodljivosti izolatora, a manja od vodljivosti vodiča.  
električna vodljivost,  $10^{-8} \text{ S/cm} < \sigma < 10^3 \text{ S/cm}$ .
- Materijali čija se električna vodljivost može **značajno** promijeniti:
  1. Zagrijavanjem
  2. Dodavanjem primjesa (dopiranjem)
  3. Izlaganjem svjetlu

# PERIODNI SUSTAV ELEMENATA

<http://www.periodni.com/hr/>

PERIODA

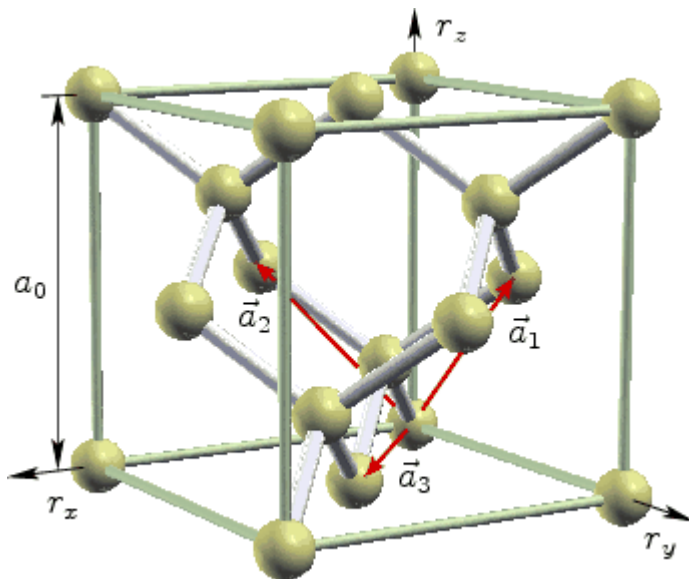
1	IA	1	1.0079	H	VODIK	2	IIA	4	9.0122	Be	BERILIJ	13	IIIA	5	10.811	B	BOR	14	IVA	6	12.011	C	UGLJIK	15	VA	7	14.007	N	DUŠIK	16	VIA	8	15.999	O	KISIK	17	VIIA	9	18.998	F	FLUOR	18	VIIIA	2	4.0026	He	HELIJ
1		3	6.941	Li	LITIJ	4		11	22.990	Na	NATRIJ	12		20	40.078	Ca	KALCIJ	19		37	85.468	Rb	RUBIDIJ	38		55	132.91	Cs	CEZIJ	86	(222)	Rn	RADON														
2		5				6		12	24.305	Mg	MAGNEZIJ	13		21	44.956	Sc	SKANDIJ	22		39	88.906	Y	ITRIJ	40		56	137.33	Ba	BARIJ	87	(223)	Fr	FRANCIJ														
3		7				8		13				14		22	47.867	Ti	TITANIJ	23		41	92.906	Nb	NIABIJ	42		72	178.49	Hf	HAFNIJ	104	(267)	Rf	RUTHERFORDIJ														
4		9				10		14				15		23	50.942	V	VANADIJ	24		42	95.96	Mo	MOLIBDEN	43		73	180.95	Ta	TANTAL	105	(268)	Db	DUBNIJ														
5		11				12		15				16		24	51.996	Cr	KROM	25		43	(98)	Tc	TEHNECIJ	44		74	183.84	W	VOLFRAM	106	(271)	Sg	SEABORGIJ														
6		13				14		17				18		26	55.845	Fe	ŽELJEZO	27		45	102.91	Rh	RODIJ	46		76	190.23	Os	OSMIJ	108	(277)	Hs	HASSIJ														
7		15				16		19				20		28	58.933	Co	KOBALT	29		47	107.87	Ag	SREBRO	48		77	192.22	Ir	IRIDIJ	109	(276)	Mt	MEITNERIJ														
8		17				18		21				22		30	65.38	Zn	CINK	31		49	114.82	In	INDIJ	50		80	200.59	Hg	ŽIVA	112	(285)	Cn	KOPERNICIJ														
9		19				20		25				26		32	72.64	Ge	GERMANIJ	33		51	121.76	Sb	ANTIMON	52		82	207.2	Pb	OLOVO	114	(287)	Fl	FLEROVIJ														
10		21				22		27				28		36	83.798	Kr	KRIPTON	35		53	126.90	I	JOD	54		84	(209)	Po	POLONIJ	116	(291)	Lv	LIVERMORIJ														
11		23				24		29				30		38	88.906	Y	ITRIJ	39		57-71	La-Lu	Lantanoidi	72		83	208.98	Bi	BIZMUT	115	(...)	Uup	UNUNPENTIJ															
12		25				26		31				32		40	79.904	Br	BROM	34		52	127.60	Te	TELURIJ	53		85	(210)	At	ASTAT	117	(...)	Uus	UNUNSEPTIJ														
13		27				28		33				34		42	95.96	Mo	MOLIBDEN	43		51	121.76	Sb	ANTIMON	52		82	207.2	Pb	OLOVO	114	(287)	Fl	FLEROVIJ														
14		29				30		35				36		44	101.07	Ru	RUTENIJ	45		53	126.90	I	JOD	54		84	(209)	Po	POLONIJ	116	(291)	Lv	LIVERMORIJ														
15		31				32		37				38		46	106.42	Pd	PALADIJ	47		55	132.91	Cs	CEZIJ	86		87	(223)	Fr	FRANCIJ	112	(285)	Cn	KOPERNICIJ														
16		33				34		39				40		48	112.41	Cd	KADMIJ	49		63	54.938	Mn	MANGAN	25		55	132.91	Cs	CEZIJ	86		87	(223)	Fr	FRANCIJ												
17		35				36		41				42		50	118.71	Sn	KOSITAR	51		65	63.546	Cu	BAKAR	29		63	54.938	Mn	MANGAN	25		55	132.91	Cs	CEZIJ	86		87	(223)	Fr	FRANCIJ						
18		37				38		43				44		52	127.60	Te	TELURIJ	53		67	164.93	Ho	HOLMIJ	67		83	208.98	Bi	BIZMUT	115	(...)	Uup	UNUNPENTIJ														
19		39				40		45				46		54	136.91	Am	AMERICIJ	95		101	258	Md	MENDELEVIJ	101		107	(272)	Bh	BOHRIJ	107		113	(...)	Uut	UNUNTRIJ												
20		41				42		47				48		56	137.33	Ba	BARIJ	87		89-103	Ac-Lr	Aktinoidi	104		110	(281)	Ds	DARMSTADTIJ	110		116	(291)	Lv	LIVERMORIJ													
21		43				44		49				50		58	138.91	La	LANTAN	57		61	(145)	Pm	PROMETIJ	61		67	164.93	Ho	HOLMIJ	67		83	208.98	Bi	BIZMUT	115	(...)	Uup	UNUNPENTIJ								
22		45				46		51				52		60	144.24	Nd	NEODIMIJ	60		65	158.93	Tb	TERBIJ	65		71	174.97	Lu	LUTECIJ	71		77	(193)	Yb	ITERBIJ												
23		47				48		53				54		62	150.36	Sm	SAMARIJ	62		67	164.93	Ho	HOLMIJ	67		73	176.93	Yb	ITERBIJ	73		79	(197)	Er	ERBIJ												
24		49				50		55				56		64	157.25	Gd	GADOLINIJ	64		69	168.93	Tm	TULIJ	69		75	175.93	Yb	ITERBIJ	75		81	(201)	At	ASTAT	117	(...)	Uus	UNUNSEPTIJ								
25		51				52		57				58		66	162.50	Dy	DISPROZIJ	66		71	174.97	Lu	LUTECIJ	71		77	193.04	Pa	PROTAKTINIJ	91		97	(247)	Bk	BERKELIJ												
26		53				54		59				60		68	167.26	Er	ERBIJ	68		73	176.93	Yb	ITERBIJ	73		79	196.97	Au	ZLATO	111	(280)	Rg	RENDGENIJ														
27		55				56		61				62		70	173.05	Yb	ITERBIJ	70		75	175.93	Er	ERBIJ	68		81	201.07	Ru	RUTENIJ	44		50	118.71	Sn	KOSITAR	50		82	207.2	Pb	OLOVO	114	(287)	Fl	FLEROVIJ		
28		57				58		63				64		72	178.49	Hf	HAFNIJ	72		77	192.22	Ir	IRIDIJ	77		83	208.98	Bi	BIZMUT	115	(...)	Uup	UNUNPENTIJ														
29		59				60		65				66		74	183.84	W	VOLFRAM	74		79	196.97	Au	ZLATO	111		85	(210)	At	ASTAT	117	(...)	Uus	UNUNSEPTIJ														
30		61				62		67				68		76	190.23	Os	OSMIJ	76		81	204.38	Tl	TALIJ	81		87	(223)	Fr	FRANCIJ	112	(285)	Cn	KOPERNICIJ														
31		63				64		69				70		78	195.08	Pt	PLATINA	78		83	208.98	Bi	BIZMUT	115		89	(103)	Ac-Lr	Aktinoidi	104	(267)	Rf	RUTHERFORDIJ														
32		65				66		71				72		80	200.59	Hg	ŽIVA	80		85	(210)	At	ASTAT	117		91	(231.04)	Pa	PROTAKTINIJ	91		97	(247)	Bk	BERKELIJ												
33		67				68		73				74		82	207.2	Pb	OLOVO	82		87	(223)	Fr	FRANCIJ	112		93	(237)	Np	NEPTUNIJ	93		99	(252)	Es	EINSTEINIJ												
34		69				70		75				76		84	(209)	Po	POLONIJ	84		89	(103)	Ac-Lr	Aktinoidi	104		95	(243)	Am	AMERICIJ	95		101	(258)	Md	MENDELEVIJ												
35		71				72		77				78		86	(222)	Rn	RADON	86		91	(231.04)	Pa	PROTAKTINIJ	91		97	(247)	Bk	BERKELIJ	97		103	(262)	Lr	LAWRENCIJ												
36		73				74		79				80		88	(226)	Ra	RADIJ	88		93	(237)	Np	NEPTUNIJ	93		99	(252)	Es	EINSTEINIJ	99		105	(268)	Db	DUBNIJ												
37		75				76		81				82		90	232.04	Th	TORIJ	90		95	(243)	Am	AMERICIJ	95		101	(258)	Md	MENDELEVIJ	101		107	(272)	Bh	BOHRIJ												
38		77				78		83				84		92	238.03	U	URANIJ	92		97	(247)	Bk	BERKELIJ	97		103	(262)	Lr	LAWRENCIJ	103		109	(269)	No	NOBELIJ												
39		79				80		85				86		94	(244)	Pu	PLUTONIJ	94		99	(252)	Es	EINSTEINIJ	99		105	(268)	Db	DUBNIJ	105		111	(280)	Rg	RENDGENIJ												
40		81				82		87				88		96	(247)	Cm	KURIJ	96		101	(258)	Md	MENDELEVIJ	101		107	(272)	Bh	BOHRIJ	107		113	(...)	Uut	UNUNTRIJ												
41		83				84		89				90		98	(251)	Cf	KALIFORNIJ	98		103	(262)	Lr	LAWRENCIJ	103		109	(269)	No	NOBELIJ	109		115	(...)	Uus	UNUNSEPTIJ												
42		85				86		91				92		100	(257)	Fm	FERMIJ	100		105	(268)	Db	DUBNIJ	105		111	(280)	Rg	RENDGENIJ	111		117	(...)	Uus	UNUNSEPTIJ												
43		87				88		93				94		102	(259)	No	NOBELIJ	102		107	(272)	Bh	BOHRIJ	107		113	(...)	Uus	UNUNSEPTIJ	113		119	(...)	Uuo	UNUNOKTIJ												
44		89				90		95				96		104	(260)	Po	POLONIJ	84		89	(103)	Ac-Lr	Aktinoidi	104		110	(281)	Ds	DARMSTADTIJ	110		116	(291)	Lv	LIVERMORIJ												
45		91				92		97				98		106	(271)	Sg	SEABORGIJ	106		101	(258)	Md	MENDELEVIJ	101		107	(272)	Bh	BOHRIJ	107		113	(...)	Uus	UNUNSEPTIJ												
46		93				94		99				100		108	(277)	Hs	HASSIJ	108		103	(262)	Lr	LAWRENCIJ	103		109	(269)	No	NOBELIJ	109		115	(...)	Uus	UNUNSEPTIJ												
47		95				96		101				102		110	(281)	Ds	DARMSTADTIJ	110		105	(268)	Db	DUBNIJ	105		111	(280)	Rg	RENDGENIJ	111		117	(...)	Uus	UNUNSEPTIJ												
48		97				98		103				104		112	(285)	Cn	KOPERNICIJ	112		107	(272)	Bh	BOHRIJ	107		113	(...)	Uus	UNUNSEPTIJ	113		119	(...)	Uuo	UNUNOKTIJ												
49		99				100		105				106		114	(287)	Fl	FLEROVIJ	114		109	(269)	No	NOBELIJ	109		115	(...)	Uus	UNUNSEPTIJ	115		121	(...)	Uuo	UNUNOKTIJ												
50		101				102		107				108		116	(291)	Lv	LIVERMORIJ	116		111	(280)	Rg	RENDGENIJ	111		117	(...)	Uus	UNUNSEPTIJ	117		123	(...)	Uuo	UNUNOKTIJ												
51		103				104		109				110		118	(...)	Uuo	UNUNOKTIJ	118		113	(...)	Uus	UNUNSEPTIJ	113</																							



# Električna vodljivost poluvodiča

- Svojstvo (sposobnost) materijala provoditi električnu struju.
- Električna struja = gibanje elektrona.
- Ovisi o broju elektrona → ovisi o strukturi materijala.
- Većina poluvodičkih materijala su kristalinične strukture.

Elementarna ćelija kristala silicija



Konstanta kristalne rešetke:  $a_0 = 5,43 \text{ \AA}$   
(1 [Å] =  $10^{-10}$  [m])

Broj atoma: 18

Broj atoma po elementarnoj ćeliji: 8

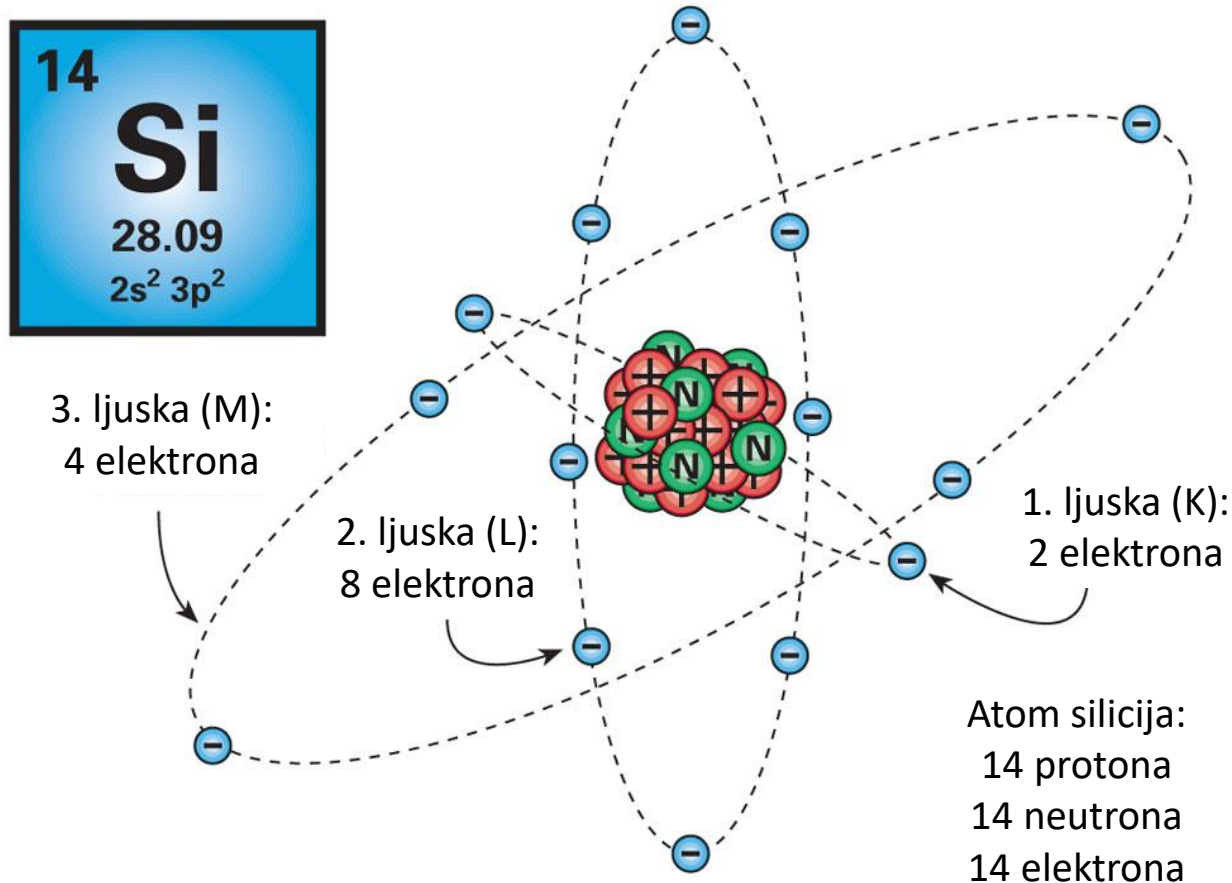
Volumen elementarne ćelije:  $(5,43 \cdot 10^{-10} \text{ m})^3$

Gustoća atoma Si (broj atoma Si u jedinici volumena):

$$N = \frac{8}{(5,43 \cdot 10^{-10} \text{ m})^3} \approx 5 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$



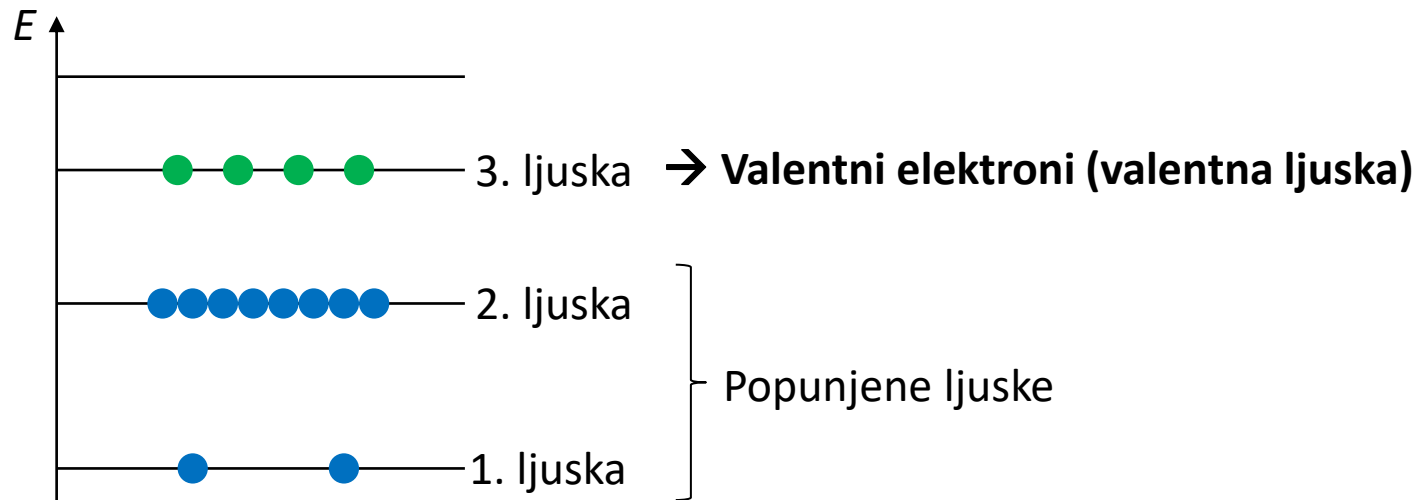
# Atom silicija



- Posljednja (djelomično) popunjena ljuska je **valentna** ljuska, a elektroni u njoj su **valentni elektroni**.

# Energija elektrona u atomu

- U izoliranom atomu elektroni mogu imati samo **diskretne** vrijednosti energija (u načelu svakoj ljusci odgovara određena energija).
- Paulijevo načelo isključivosti iskazuje da u nekom atomu dva elektrona ne mogu zauzeti isto kvantno stanje.

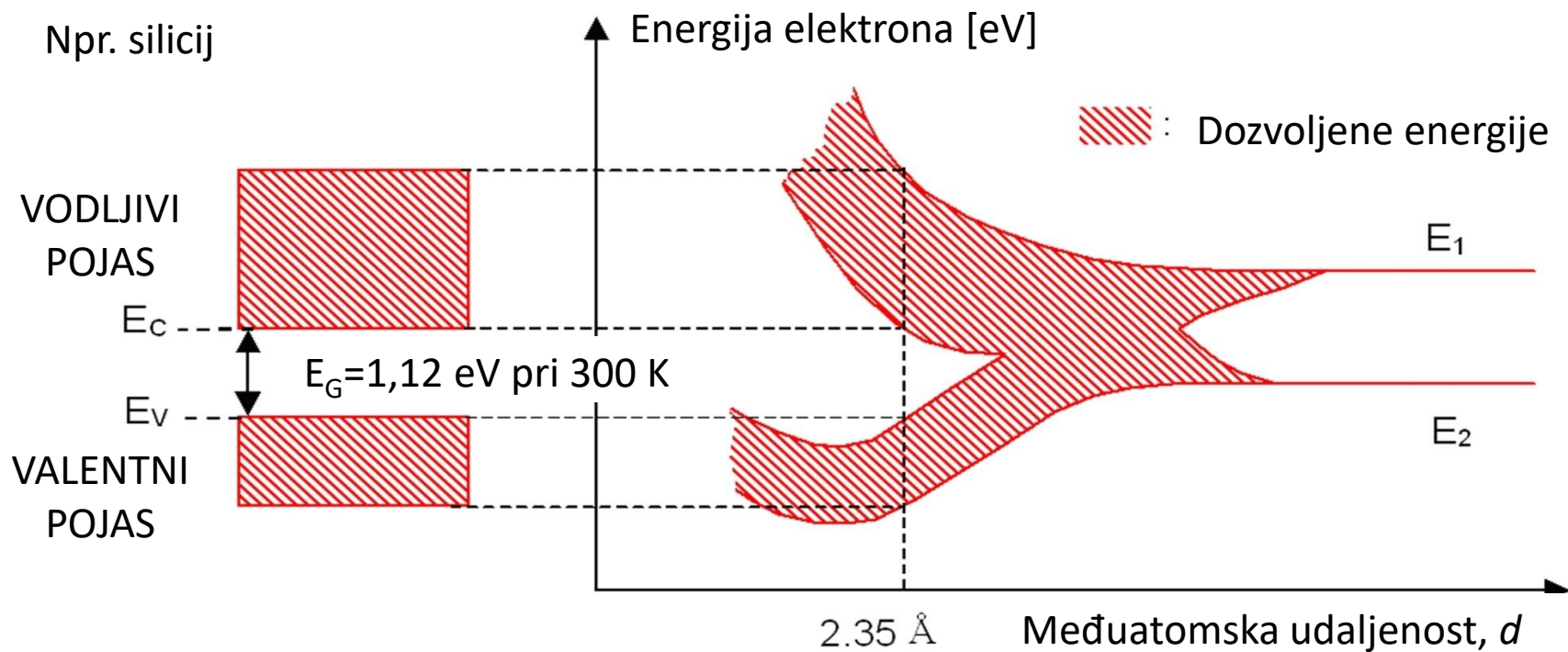


- Približavanjem dvaju atoma svaka se energijska razina razdvaja u dvije bliske energijske razine – jedna malo iznad, a druga malo ispod energijske razine u izoliranom atomu.



# Energija elektrona u kristalu

- Kristali sadrže veliki broj atoma pa se svaka energijska razina razdvaja u veliki broj bliskih diskretnih razina.
- Veliki broj diskretnih energijskih razina predstavlja gotovo kontinuirani niz dozvoljenih energija elektrona u kristalu – **tzv. pojasevi energija**.



# Energijski pojasevi i dijagram

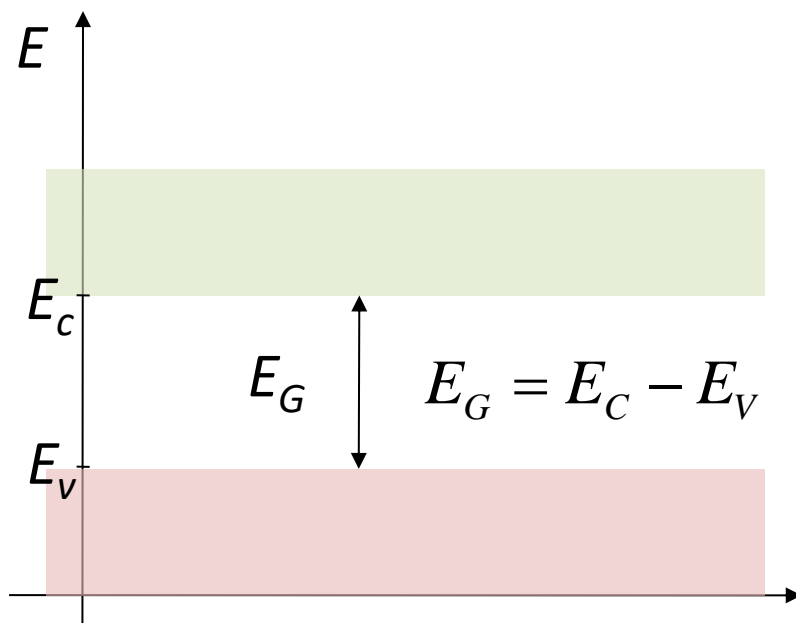
- Elektroni prvo popunjavaju pojaseve nižih energija.
- Najviši energijski pojas koji zauzimaju elektroni naziva se **valentni pojas** – valentni elektroni imaju najveću energiju u atomu.
- Prvi sljedeći pojas dozvoljenih energija je **vodljivi pojas** – elektroni u tom pojasu su **slobodni elektroni** koji mogu sudjelovati u vođenju struje.
- Razmak između valentnog i vodljivog pojasa je tzv. **zabranjeni pojas** čija širina  $E_G$  predstavlja bitno svojstvo materijala.
- Prikaz valentnog, vodljivog i zabranjenog pojasa se naziva **energijski dijagram**.



$E_C$  – dno vodljivog pojasa  
 $E_V$  – vrh valentnog pojasa

*Energijski dijagram poluvodiča,  
izolatora i vodiča*

# Energijski dijagram poluvodiča



Empirijski izraz za određivanje širine zabranjenog pojasa nekog poluvodiča u ovisnosti o temperaturi:

$$E_G(T) = E_{G0} - \alpha \cdot \frac{T^2}{T + \beta} \quad [eV]$$

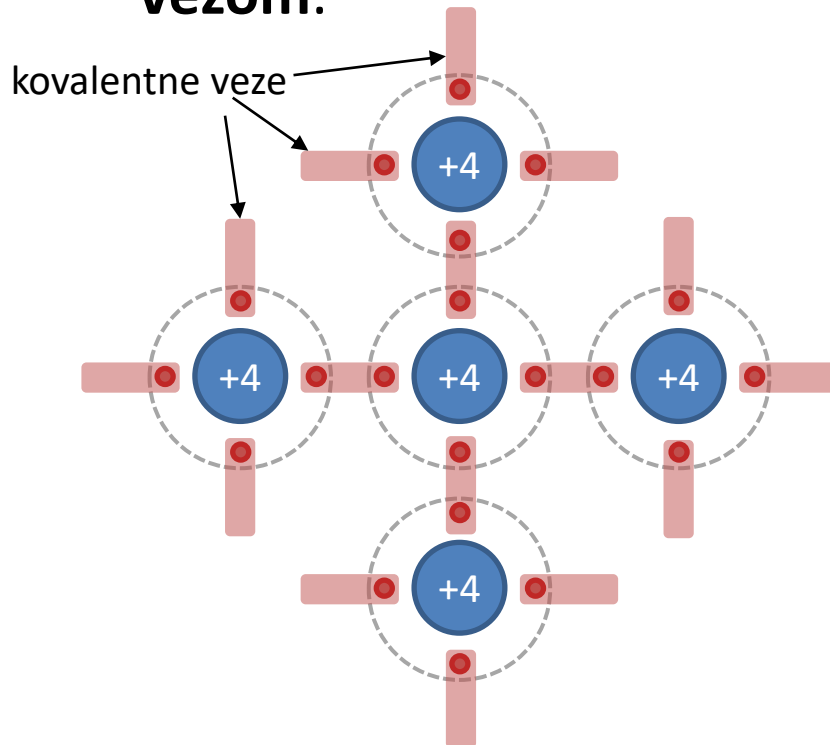
Poluvodič	$E_{G0}$ [eV]	$\alpha$ [eV/K]	$\beta$ [K]
Silicij (Si)	1,17	$4,73 \cdot 10^{-4}$	636
Germanij (Ge)	0,744	$4,77 \cdot 10^{-4}$	235
Galij-arsenid (GaAs)	1,521	$5,58 \cdot 10^{-4}$	220

- Na  $T=300$  K:
  - Za Si,  $E_G=1,12$  eV
  - Za GaAs,  $E_G=1,42$  eV
- Napomena:  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$



# Kovalentna veza

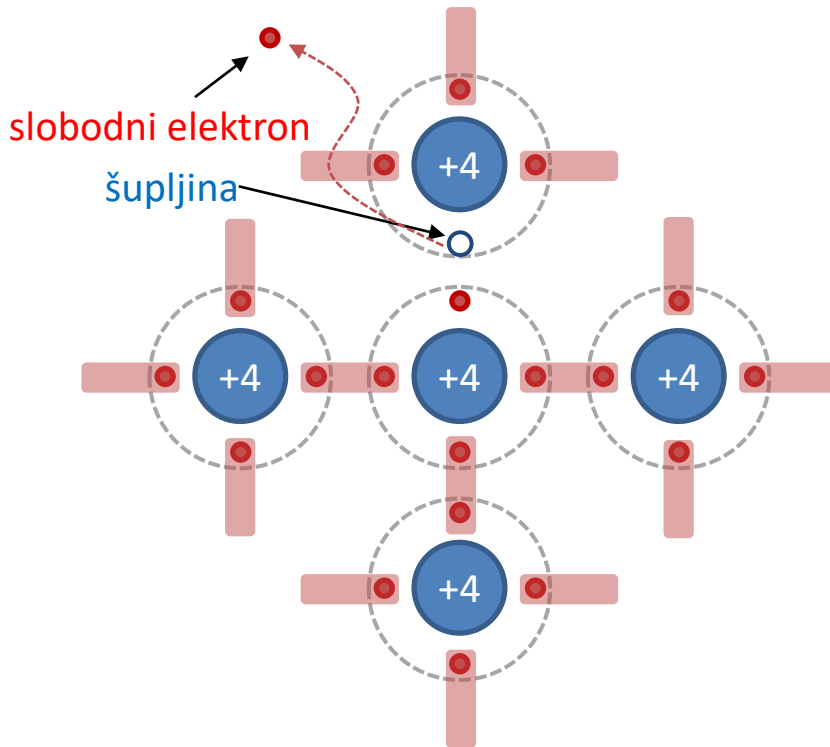
- Svaki atom silicija povezuje se s četiri susjedna atoma dijeleći sa svakim po jedan valentni elektron u **zajednički elektronski par**.
- Takva se veza među atomima silicija naziva **kovalentnom vezom**.



- U kristalu silicija svi atomi postižu stabilno stanje popunjavajući 8 mjesta u valentnoj ljusci (4 vlastita i 4 susjedna valentna elektrona).
- Elektroni u kovalentnim vezama nalaze se na energijskim razinama u valentnom pojasu.
- Elektroni u kovalentnim vezama ne mogu sudjelovati u vođenju struje.
- Na  $T=0$  K svi su valentni elektroni u kovalentnim vezama pa se poluvodič ponaša kao izolator.

# Slobodni nosioci naboja: elektroni i šupljine

- Na  $T > 0$  K, poluvodič dobija toplinsku energiju ( $E_T = kT$ ) koja uzrokuje oslobađanje određenog broja valentnih elektrona iz kovalentne veze. Ti elektroni postaju **slobodni elektroni** i oni sudjeluju u vođenju struje.
- Oslobađanjem elektrona iz kovalentne veze otvara se slobodno mjesto za neki drugi valentni elektron. To slobodno mjesto naziva se **šupljinom**.



- Oslobađanjem elektrona iz kovalentne veze nastaje **par nosilaca elektron-šupljina**.
- Proces nastanka parova elektron-šupljina naziva se **generacija slobodnih nosilaca**.
- Slobodni elektroni i šupljine sudjeluju u vođenju struje.
- Oslobađanje elektrona iz kovalentne veze odgovara prelasku elektrona iz valentnog u vodljivi pojas u energijskom dijagramu.
- Pojam šupljine isključivo je vezan uz energijske razine u valentnom pojasu.

# Gustoća slobodnih nosilaca naboja

- Gustoća nosilaca: broj nosilaca u jedinici volumena (tipično  $1 \text{ cm}^3$ ).
- Gustoća slobodnih elektrona:  $n$  [ $\text{cm}^{-3}$ ] – negativan naboj
- Gustoća šupljina:  $p$  [ $\text{cm}^{-3}$ ] – manjak negativnog, tj. pozitivan naboj
- Generiranje nosilaca u parovima  $\Rightarrow n = p$ !

Npr. u siliciju na sobnoj temperaturi (300 K)

Najmanja energija koju valentni elektron mora dobiti da bi se oslobodio iz kovalentne veze jednaka je širini zabranjenog pojasa:

$$E_G = 1,12 \text{ eV}$$

Gustoća valentnih elektrona:

$$2 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$$

(svaki atom Si ima 4 valentna elektrona)

Prosječna termička energija koju elektron može dobiti na 300 K:

$$E_T = kT \approx 26 \text{ meV}$$

Gustoća slobodnih nosilaca:

$$10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

Napomena:

$k$  je Boltzmannova konstanta  
 $k = 1,38065 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$

$\Rightarrow$  Praktičan izraz za računanje  $E_T$ :  $E_T [\text{eV}] = k \cdot T \approx \frac{T}{11605}$



# Raspodjela nosilaca po energijama

- Energijski pojasevi sadrže niz diskretnih, bliskih energijskih stanja.
- Raspodjela gustoće nosilaca po energijama ovisi o:

## 1. Gustoći stanja $\rho(E)$

## 2. Vjerojatnosti zaposjednuća stanja $f_{FD}(E)$

**1. Funkcije gustoće stanja** iskazuju broj dozvoljenih stanja u vodljivom/valentnom pojasu po jedinici volumena i jedinici energije:

$$\rho_c(E) = 4\pi \cdot \left( \frac{2 \cdot m_n}{h^2} \right)^{3/2} \cdot (E - E_C)^{1/2}$$

Gustoća stanja u vodljivom pojasu ( $E \geq E_C$ )

$$\rho_v(E) = 4\pi \cdot \left( \frac{2 \cdot m_p}{h^2} \right)^{3/2} \cdot (E_V - E)^{1/2}$$

Gustoća stanja u valentnom pojasu ( $E \leq E_V$ )

2. Vjerojatnost da je neko dozvoljeno stanje na energiji  $E$  popunjeno elektronom dana je **Fermijevom funkcijom**:

$$f_{FD}(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{E_T}\right)}$$

Fermijeva funkcija se još naziva i **Fermi-Diracovom raspodjelom**, a  $E_F$  je tzv. **Fermijeva energija**.



# Gustoća stanja

- Gustoća stanja omogućuje proračun broja dozvoljenih energijskih stanja u intervalu energija  $dE$  oko neke energije  $E$ , u jedinici volumena:

$\rho_c(E)dE$  je broj dozvoljenih energijskih stanja u vodljivom pojasu između  $E$  i  $E+dE$  u jedinici volumena poluvodiča

$\rho_v(E)dE$  je broj dozvoljenih energijskih stanja u valentnom pojasu između  $E$  i  $E+dE$  u jedinici volumena poluvodiča

- U izrazima za gustoću stanja  $m_n$  i  $m_p$  su tzv. **efektivne mase elektrona u vodljivom**, odnosno **šupljina u valentnom pojasu**:

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

$m_0$  je masa elektrona u mirovanju;  $m_0=9,11\cdot 10^{-31}$  kg



# Fermi-Diracova vjerojatnost

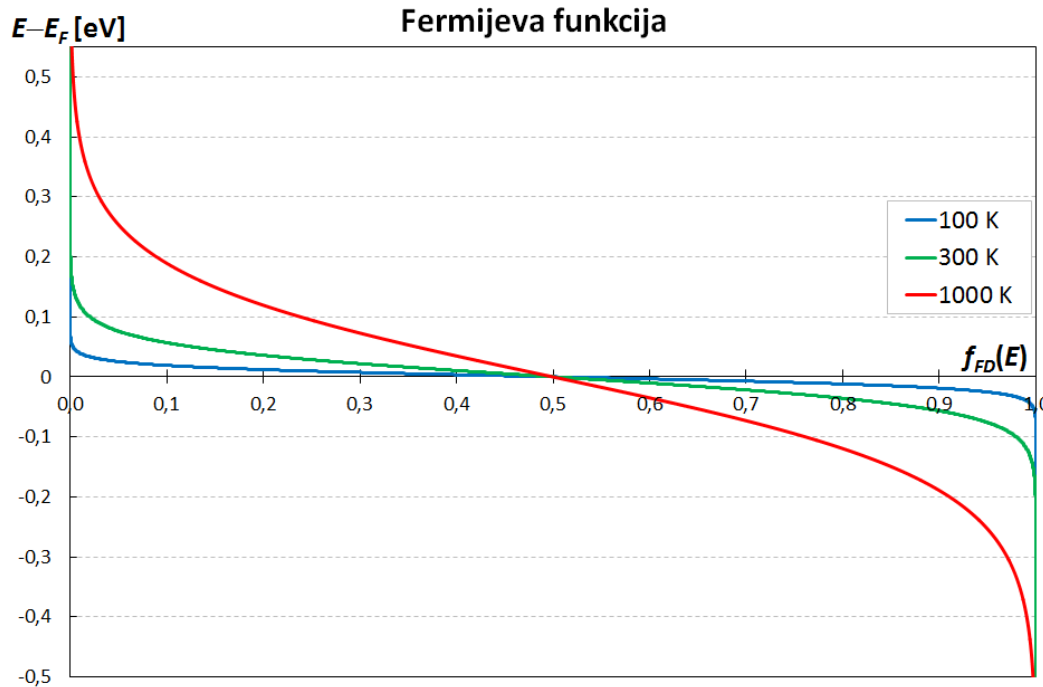
- Prema Fermi-Diracovoj raspodjeli, Fermijeva energija jest najveća energija koju elektron može imati na  $T=0$  K. Na  $T>0$  K vjerojatnost da elektron ima energiju jednaku Fermijevoj je 0,5.

$$f_{FD}(E)$$

Vjerojatnost da se elektron nalazi na energijskoj razini  $E$

$$1-f_{FD}(E)$$

Vjerojatnost da se šupljina nalazi na energijskoj razini  $E$



- Vjerojatnost zaposjednuća stanja koja su puno iznad Fermijeve razine ( $E \gg E_F$ ) je vrlo mala!
- Tada se  $f_{FD}(E)$  može zapisati kao:

$$f_{FD}(E) \approx \exp\left(\frac{E_F - E}{E_T}\right)$$

To je tzv. **Boltzmannova aproksimacija** (u praksi vrijedi već za  $E-E_F > 3E_T$ ).

# Termodinamička ravnoteža

---

- Pod pojmom **termodinamičke ravnoteže** podrazumijeva se ravnoteža između brzine kojom na nekoj temperaturi nosioci naboja nastaju (**generacija**) i brzine kojom se nosioci poništavaju (**rekombinacija**).

$$\text{brzina generacije} = \text{brzina rekombinacije}$$

- **VAŽNO:** U sustavu koji je u stanju termodinamičke ravnoteže postoji samo jedna Fermijeva energijska razina konstantnog iznosa!!!

# Određivanje ravnotežnih gustoća nosilaca

- Gustoća slobodnih elektrona u vodljivom pojasu,  $n_0$ , može se izračunati kao umnožak gustoće stanja i vjerojatnosti zaposjednuća pojedinog stanja, integriran preko svih energija u vodljivom pojasu (od dna  $E_C$  do vrha  $E_C'$ ):

$$n_0 = \int_{E_C}^{E_C'} \rho_c(E) f_{FD}(E) dE$$

- S obzirom da funkcija  $f_{FD}(E)$  vrlo brzo teži u nulu iznad  $E_C$ , može se za gornju granicu integracije uzeti energija  $E \rightarrow \infty$ . **U uvjetima Boltzmannove aproksimacije ( $E_C - E_F \geq 3E_T$ ), rješenje je:**

$$n_0 = N_C \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_C}{E_T}\right) \quad N_C = 2 \cdot \left(\frac{m_n kT}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2} \quad \text{Efektivna gustoća kvantnih stanja u vodljivom pojasu}$$

- Analogno, gustoća šupljina u valentnom pojasu je:

$$p_0 = N_V \cdot \exp\left(\frac{E_V - E_F}{E_T}\right) \quad N_V = 2 \cdot \left(\frac{m_p kT}{2\pi\hbar^2}\right)^{3/2} \quad \text{Efektivna gustoća kvantnih stanja u valentnom pojasu}$$

# Položaj Fermijeve razine

- Položaj Fermijeve razine može se odrediti iz izraza za ravnotežne gustoće nosilaca:

$$E_F = E_C - E_T \ln\left(\frac{N_C}{n_0}\right), \text{ odnosno } E_F = E_V + E_T \ln\left(\frac{N_V}{p_0}\right)$$

- **VAŽNO!** Što je veća gustoća elektrona, Fermijeva će razina biti bliže dnu vodljivog pojasa. Što je veća gustoća šupljina, Fermijeva će razina biti bliže vrhu valentnog pojasa. U ravnotežnim uvjetima nije moguće istovremeno imati i veliku gustoću elektrona i veliku gustoću šupljina!!!

# Vrste poluvodiča

---

## 1. Čisti (intrinzični) poluvodič

- Poluvodič bez primjesa

## 2. Onečišćeni (ekstrinzični) poluvodič

- Poluvodič n-tipa
- Poluvodič p-tipa

# Intrinsični poluvodič

- U intrinzičnom poluvodiču gustoća slobodnih elektrona u vodljivom pojasu jednaka je gustoći šupljina u valentnom pojasu:

$$n_0 = p_0 = n_i$$

- Iz izraza za ravnotežne gustoće nosilaca može se odrediti iznos intrinzične gustoće:

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

$$E_T = k \cdot T = \frac{T}{11605} \quad [eV] \quad \text{- Energijski temperaturni ekvivalent}$$

- Ravnotežne gustoće nosilaca u intrinzičnom poluvodiču ovise o temperaturi (toplinskoj energiji) i širini zabranjenog pojasa.



# Intrinsična gustoća u nekim poluvodičima

Širina zabranjenog pojasa i intrinsična gustoća na 300 K			
	Si	Ge	GaAs
$E_G$ [eV]	1,12	0,661	1,424
$n_i$ [cm <sup>-3</sup> ]	10 <sup>10</sup>	2·10 <sup>13</sup>	2,1·10 <sup>6</sup>

- Efektivne gustoće stanja u intrinzičnom siliciju:

$$N_c = 6,2 \cdot 10^{15} \cdot T^{3/2} \quad [\text{cm}^{-3}] \qquad N_v = 3,5 \cdot 10^{15} \cdot T^{3/2} \quad [\text{cm}^{-3}]$$

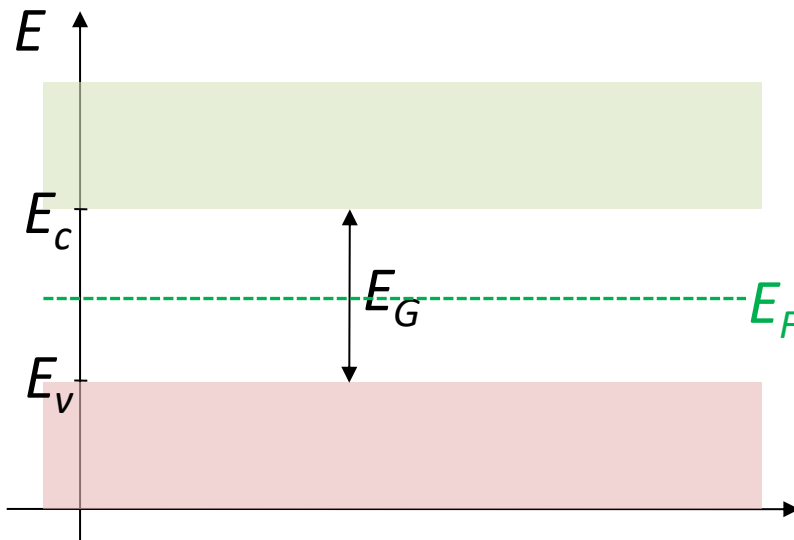
- Na sobnoj temperaturi ( $T=300$  K) izmjerena vrijednost intrinzične gustoće u siliciju je **10<sup>10</sup> cm<sup>-3</sup>**.

# Energijski dijagram intrinzičnog poluvodiča

- Iz uvjeta  $n_0=p_0$  može se odrediti položaj Fermijeve razine u intrinzičnom poluvodiču,  $E_{Fi}$ :

$$N_C \cdot \exp\left(\frac{E_{Fi} - E_C}{E_T}\right) = N_V \cdot \exp\left(\frac{E_{Fi} - E_V}{E_T}\right)$$

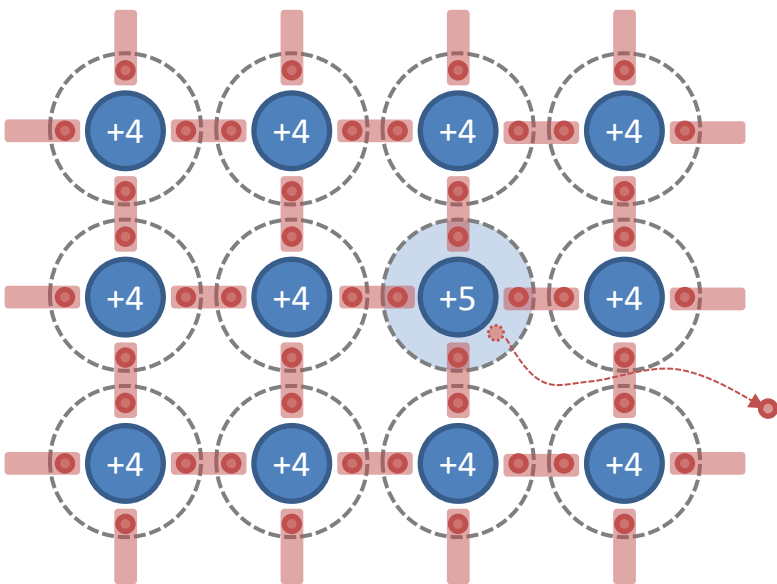
$$E_{Fi} = \frac{E_C + E_V}{2} - \frac{3}{4} E_T \cdot \ln\left(\frac{m_n}{m_p}\right)$$



Omjer efektivnih masa elektrona i šupljine se praktički ne mijenja s temperaturom. Na  $T=300$  K, drugi pribrojnik iznosi 7,28 meV pa je **u intrinzičnom poluvodiču Fermijeva razina približno na sredini zabranjenog pojasa.**

# Poluvodič n-tipa

- Dobije se dodavanjem **donorskih primjesa** – svaki atom donora „daje” jedan elektron u poluvodič i postaje **pozitivan ion**.
- Gustoća elektrona je veća od gustoće šupljina => elektroni su većinski, a šupljine manjinski nosioci naboja.
- Za silicij se kao donori koriste **peterovalentni elementi: N, P, As, Sb**.

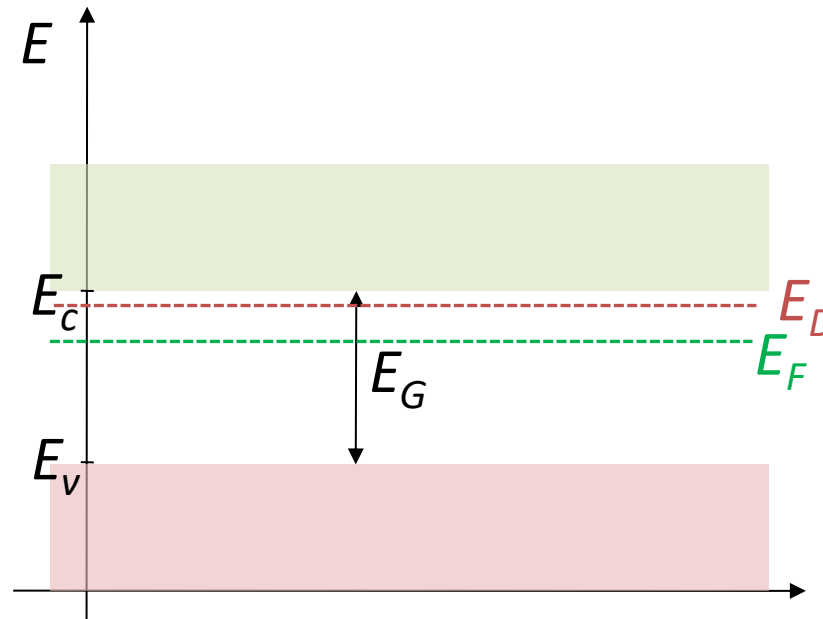


Donorski atom gradi 4 kovalentne veze s okolnim atomima Si, ali njegov 5. valentni elektron ostaje izvan kovalentne veze. Za oslobađanje tog 5. elektrona potrebno je puno manje energije (tzv. energija ionizacije) nego za oslobađanje elektrona iz kovalentne veze. Na  $T=300\text{ K}$  praktički se svi 5. elektroni donorskih atoma oslobode i postaju slobodni.

**VAŽNO:** Oslobađanjem 5. valentnog elektrona ne ostaje šupljina!!! Oslobađanjem elektrona iz kovalentne veze nastaju elektron i šupljina!

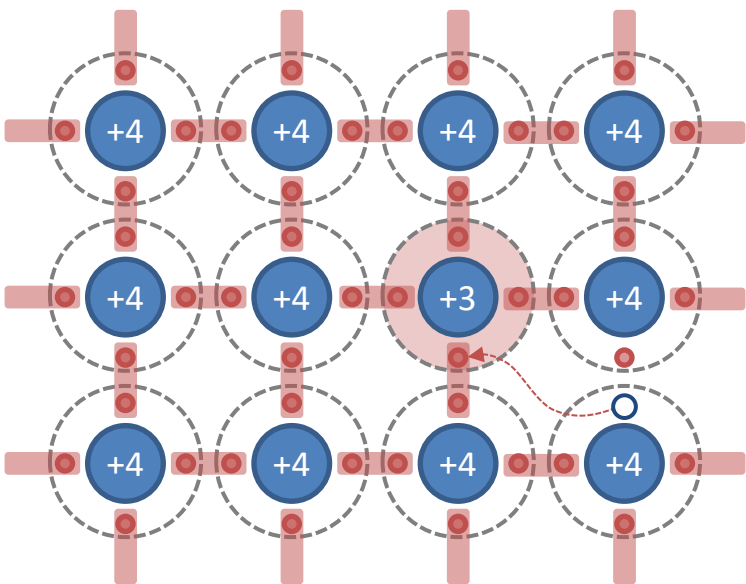
# Energijski dijagram poluvodiča n-tipa

- Tipični iznosi energije ionizacije su 10-50 meV pa se prisutnost donorskih primjesa u energijskom dijagramu poluvodiča predočava tzv. **donorskom energijskom razinom**  $E_D$  koja se nalazi u zabranjenom pojasu malo ispod dna vodljivog pojasa.
- Kako je  $n_0 \gg p_0$ , Fermijeva se razina nalazi iznad sredine zabranjenog pojasa.



# Poluvodič p-tipa

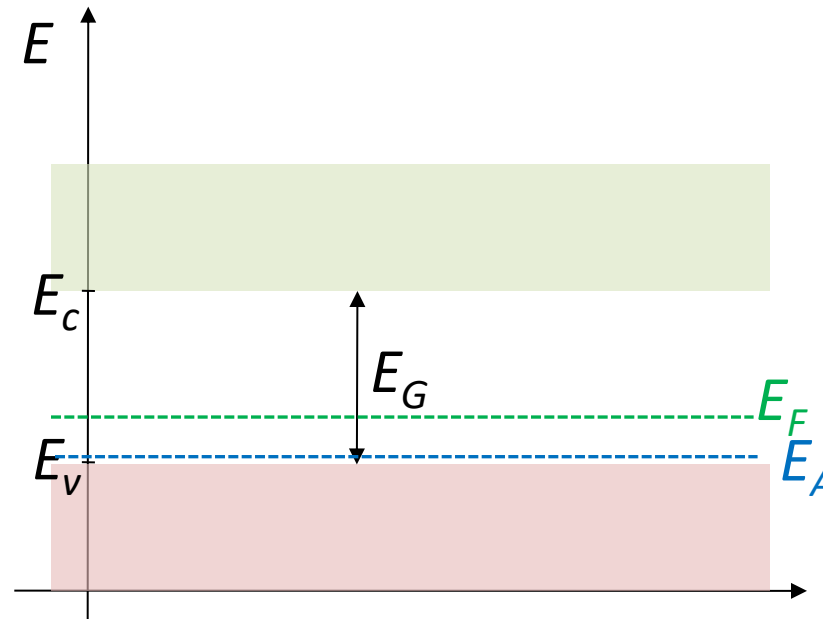
- Dodaju se **akceptorske primjese** – svaki atom akceptora „uzima” jedan elektron iz poluvodiča i postaje **negativan ion**.
- Gustoća šupljina je veća od gustoće elektrona => šupljine su većinski, a elektroni manjinski nosioci naboja.
- Za silicij se kao donori koriste **trovalentni elementi: B, Al, Ga, In**.



Atom akceptora gradi 3 kovalentne veze s okolnim atomima Si, ali za vezu s 4. susjednim atomom Si nedostaje mu jedan elektron. Taj se elektron uzima iz kovalentne veze od nekog Si atoma u blizini pa tako nastaje šupljina, a akceptor postaje negativan ion. Energija ionizacije akceptora je mala pa su na  $T=300\text{ K}$  praktički svi akceptorski atomi ionizirani (prime elektron) stvarajući po jednu šupljinu.

# Energijski dijagram poluvodiča p-tipa

- Tipični iznosi energije ionizacije su 10-50 meV pa se prisutnost akceptorskih primjesa u energijskom dijagramu poluvodiča predočava tzv. **akceptorskom energijskom razinom**  $E_A$  koja se nalazi u zabranjenom pojasu malo iznad vrha valentnog pojasa.
- Kako je  $p_0 \gg n_0$ , Fermijeva se razina nalazi ispod sredine zabranjenog pojasa.



# Zakon termodinamičke ravnoteže

- Umnožak ravnotežnih gustoća elektrona i šupljina na nekoj temperaturi je stalan i jednak kvadratu intrinzične gustoće:

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

$$n_0 \cdot p_0 = N_C N_V \cdot \exp\left(-\frac{E_G}{E_T}\right)$$

- Zakon termodinamičke ravnoteže može se izvesti iz razmatranja intrinzičnog poluvodiča kod kojega je  $n_0=p_0$ . Ako se uvrste izrazi za  $n_0=p_0$  i nađe njihov umnožak, uočava se da on **ne ovisi o položaju Fermijeve energije, tj. ne ovisi o tipu poluvodiča**.
- Zakon termodinamičke ravnoteže može se formulirati i na sljedeći način:  
Brzina poništavanja parova elektron-šupljina, proporcionalna umnošku gustoće elektrona i šupljina, jednaka je brzini stvaranja parova elektron-šupljina, koja je određena širinom zabranjenog pojasa i temperaturom.



# Zakon električne neutralnosti

- U nekom poluvodiču ukupna gustoća negativnog naboja jednaka je ukupnoj gustoći pozitivnog naboja:

$$n_0 + N_A = p_0 + N_D$$

- Općenito, negativni naboji u poluvodiču su **pokretljivi** slobodni elektroni i **nepokretni** ionizirani akseptori. Pozitivni naboji u poluvodiču su **pokretljive** šupljine i **nepokretni** ionizirani donori.
- VAŽNO!** Ionizirani donori i akseptori imaju naboj, ali su lokalizirani u kristalnoj rešetki i ne mogu se gibati, tj. ne sudjeluju u vođenju struje. Njihov doprinos u vođenju struje najznačajniji je kroz povećanje gustoće slobodnih nosilaca, premda utječu i na iznos određenih parametara slobodnih elektrona i šupljina.



# Gustoće nosilaca u poluvodičima

- Intrinzični poluvodič:  $n_0 = p_0 = n_i$
- Ekstrinzični poluvodič

## n-tip

$$N_A = 0$$

$$n_0 = p_0 + N_D$$

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

$$n_0 = \frac{N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}}{2}$$

Ako je ispunjen uvjet  $N_D^2 \gg 4n_i^2$

$$\begin{aligned} n_0 &\approx N_D \\ p_0 &\approx \frac{n_i^2}{N_D} \end{aligned}$$

## p-tip

$$N_D = 0$$

$$p_0 = n_0 + N_A$$

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

$$p_0 = \frac{N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2}}{2}$$

Ako je ispunjen uvjet  $N_A^2 \gg 4n_i^2$

$$\begin{aligned} p_0 &\approx N_A \\ n_0 &\approx \frac{n_i^2}{N_A} \end{aligned}$$