



ELEKTRONIKA

Predavanje 1

OSNOVNA SVOJSTVA POLUVODIČKIH MATERIJALA (1)

O kolegiju

Elektronički elementi	Elektronički sklopovi
<ul style="list-style-type: none">• Poluvodiči• Dioda• Tranzistor	<ul style="list-style-type: none">• Pojačala s bipolarnim tranzistorom• Pojačala s unipolarnim tranzistorom• Operacijsko pojačalo
04.03. – 19.04.	06.05. – 14.06.

- Ocjena: teorija 50%, zadaci 50%
- **Relativno ocjenjivanje**
- Ispiti - ispitna grupa 23: 03.07.2019., 17.07.2019. i 04.09.2019.
- 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

SKUPINA

1

IA

1

1.0079

H

VODIK

2

IIA

3

6.941

Li

LITIJ

4

9.0122

Be

BERILIJ

11

22.990

Na

NATRIJ

12

24.305

Mg

MAGNEZIJ

13

IIIA

5

10.811

B

BOR

14

IVA

15

VA

16

VIA

17

VIIA

18

VIIIA

2

4.0026

He

HELIJ

3

IIIB

4

IVB

5

VB

6

VIB

7

VIIB

8

VIII

9

VIIIB

10

VIII

11

IB

12

IIB

13

IIIA

14

IVA

15

VA

16

VIA

17

VIIA

18

VIIIA

21

IIIB

22

IVB

23

VB

24

VIB

25

VIIB

26

VIII

27

VIIIB

28

VIII

29

IB

30

IIB

31

IIIA

32

IVA

33

VA

34

VIA

35

VIIA

36

VIIIA

37

IIIB

38

IVB

39

VB

40

VIB

41

VIIB

42

VIII

43

VIIIB

44

VIII

45

IB

46

IIB

47

IIIA

48

IVA

49

VA

50

VIA

51

VIIA

52

VIIIA

53

IIIB

54

IVB

55

VB

56

VIB

57

VIIB

58

VIII

59

VIIIB

60

VIII

61

IB

62

IIB

63

IIIA

64

IVA

65

VA

66

VIA

67

VIIA

68

VIIIA

69

IIIB

70

IVB

71

VB

72

VIB

73

VIIB

74

VIII

75

VIIIB

76

VIII

77

IB

78

IIB

79

IIIA

80

IVA

81

VA

82

VIA

83

VIIA

84

VIIIA

85

IIIB

86

IVB

87

VB

88

VIB

89

VIIB

90

VIII

91

VIIIB

92

VIII

93

IB

94

IIB

95

IIIA

96

IVA

97

VA

98

VIA

99

VIIA

100

VIIIA

101

IIIB

102

IVB

103

VB

104

VIB

105

VIIB

106

VIII

107

VIIIB

108

VIII

109

IB

110

IIB

111

IIIA

112

IVA

113

VA

114

VIA

115

VIIA

116

VIIIA

117

IIIB

118

IVB

119

VB

120

VIB

121

VIIB

122

VIII

123

VIIIB

124

VIII

125

IB

126

IIB

127

IIIA

128

IVA

129

VA

130

VIA

131

VIIA

132

VIIIA

133

IIIB

134

IVB

135

VB

136

VIB

137

VIIB

138

VIII

139

VIIIB

140

VIII

141

IB

142

IIB

143

IIIA

144

IVA

145

VA

146

VIA

147

VIIA

148

VIIIA

149

IIIB

150

IVB

151

VB

152

VIB

153

VIIB

154

VIII

155

VIIIB

156

VIII

157

IB

158

IIB

159

IIIA

160

IVA

161

VA

162

VIA

163

VIIA

164

VIIIA

165

IIIB

166

IVB

167

VB

168

VIB

169

VIIB

170

VIII

171

VIIIB

172

VIII

173

IB

174

IIB

175

IIIA

176

IVA

177

VA

178

VIA

179

VIIA

180

VIIIA

181

IIIB

182

IVB

183

VB

184

VIB

185

VIIB

186

VIII

187

VIIIB

188

VIII

189

IB

190

IIB

191

IIIA

192

IVA

193

VA

194

VIA

195

VIIA

196

VIIIA

197

IIIB

198

IVB

199

VB

200

VIB

201

VIIB

202

VIII

203

VIIIB

204

VIII

205

IB

206

IIB

207

IIIA

208

IVA

209

VA

210

VIA

211

VIIA

212

VIIIA

213

IIIB

214

IVB

215

VB

216

VIB

217

VIIB

218

VIII

219

VIIIB

220

VIII

221

IB

222

IIB

223

IIIA

224

IVA

225

VA

226

VIA

227

VIIA

228

VIIIA

229

IIIB

230

IVB

231

VB

232

VIB

233

VIIB

234

VIII

235

VIIIB

236

VIII

237

IB

238

IIB

239

IIIA

240

IVA

241

VA

242

VIA

243

VIIA

244

VIIIA

245

IIIB

246

IVB

247

VB

248

VIB

249

VIIB

250

VIII

251

VIIIB

252

VIII

253

IB

254

IIB

255

IIIA

256

IVA

257

VA

258

VIA

259

VIIA

260

VIIIA

261

IIIB

262

IVB

263

VB

264

VIB

265

VIIB

266

VIII

267

VIIIB

268

VIII

269

IB

270

IIB

271

IIIA

272

IVA

273

VA

274

VIA

275

VIIA

276

VIIIA

277

IIIB

278

IVB

279

VB

280

VIB

281

VIIB

282

VIII

283

VIIIB

284

VIII

285

IB

286

IIB

287

IIIA

288

IVA

289

VA

290

VIA

291

VIIA

292

VIIIA

293

IIIB

294

IVB

295

VB

296

VIB

297

VIIB

298

VIII

299

VIIIB

300

VIII

301

IB

302

IIB

303

IIIA

304

IVA

305

VA

306

VIA

307

VIIA

308

VIIIA

309

IIIB

310

IVB

311

VB

312

VIB

313

VIIB

314

VIII

315

VIIIB

316

VIII

317

IB

318

IIB

319

IIIA

320

IVA

321

VA

322

VIA

323

VIIA

324

VIIIA

325

IIIB

326

IVB

327

VB

328

VIB

329

VIIB

330

VIII

331

VIIIB

332

VIII

333

IB

334

IIB

335

IIIA

336

IVA

337

VA

338

VIA

339

VIIA

340

VIIIA

341

IIIB

342

IVB

343

VB

344

VIB

345

VIIB

346

VIII

347

VIIIB

348

VIII

349

IB

350

IIB

351

IIIA

352

IVA

353

VA

354

VIA

355

VIIA

356

VIIIA

357

IIIB

358

IVB

359

VB

360

VIB

361

VIIB

362

VIII

363

VIIIB

364

VIII

365

IB

366

IIB

367

IIIA

368

IVA

369

VA

370

VIA

371

VIIA

372

VIIIA

373

IIIB

374

IVB

375

VB

376

VIB

377

VIIB

378

VIII

379

VIIIB

380

VIII

381

IB

382

IIB

383

IIIA

384

IVA

385

VA

386

VIA

387

VIIA

388

VIIIA

389

IIIB

390

IVB

391

VB

392

VIB

393

VIIB

394

VIII

395

VIIIB

396

VIII

397

IB

398

IIB

399

IIIA

400

IVA

401

VA

402

VIA

403

VIIA

404

VIIIA

405

IIIB

406

IVB

407

VB

408

VIB

409

VIIB

410

VIII

411

VIIIB

412

VIII

413

IB

414

IIB

415

IIIA

416

IVA

417

VA

418

VIA

419

VIIA

420

VIIIA

421

IIIB

422

IVB

423

VB

424

VIB

425

VIIB

426

VIII

427

VIIIB

428

VIII

429

IB

430

IIB

431

IIIA

432

IVA

433

VA

434

VIA

435

VIIA

436

VIIIA

437

IIIB

438

IVB

439

VB

440

VIB

441

VIIB

442

VIII

443

VIIIB

444

VIII

445

IB

446

IIB

447

IIIA

448

IVA

449

VA

450

VIA

451

VIIA

452

VIIIA

453

IIIB

454

IVB

455

VB

456

VIB

457

VIIB

458

VIII

459

VIIIB

460

VIII

461

IB

462

IIB

463

IIIA

464

IVA

465

VA

466

VIA

467

VIIA

468

VIIIA

469

IIIB

470

IVB

471

VB

472

VIB

473

VIIB

474

VIII

475

VIIIB

476

VIII

477

IB

478

IIB

479

IIIA

480

IVA

481

VA

482

VIA

483

VIIA

484

VIIIA

485

IIIB

486

IVB

487

VB

488

VIB

489

VIIB

490

VIII

491

VIIIB

492

VIII

493

IB

494

IIB

495

IIIA

496

IVA

497

VA

498

VIA

499

VIIA

500

VIIIA

501

IIIB

502

IVB

503

VB

504

VIB

505

VIIB

506

VIII

507

VIIIB

508

VIII

509

IB

510

IIB

511

IIIA

512

IVA

513

VA

514

VIA

515

VIIA

516

VIIIA

517

IIIB

518

IVB

519

VB

520

VIB

521

VIIB

522

VIII

523

VIIIB

524

VIII

525

IB

526

IIB

527

IIIA

528

IVA

529

VA

530

VIA

531

VIIA

532

VIIIA

533

IIIB

534

IVB

535

VB

536

VIB

537

VIIB

538

VIII

539

VIIIB

540

VIII

541

IB

542

IIB

543

IIIA

544

IVA

545

VA

546

VIA

547

VIIA

548

VIIIA

549

IIIB

550

IVB

551

VB

552

VIB

553

VIIB

554

VIII

555

VIIIB

556

VIII

557

IB

558

IIB

559

IIIA

560

IVA

561

VA

562

VIA

563

VIIA

564

VIIIA

565

IIIB

566

IVB

567

VB

568

VIB

569

VIIB

570

VIII

571

VIIIB

572

VIII

573

IB

574

IIB

575

IIIA

576

IVA

577

VA

578

VIA

579

VIIA

580

VIIIA

581

IIIB

582

IVB

583

VB

584

VIB

585

VIIB

586

VIII

587

VIIIB

588

VIII

589

IB

590

IIB

591

IIIA

592

IVA

593

VA

594

VIA

595

VIIA

596

VIIIA

597

IIIB

598

IVB

599

VB

600

VIB

601

VIIB

602

VIII

603

VIIIB

604

VIII

605

IB

606

IIB

607

IIIA

608

IVA

609

VA

610

VIA

611

VIIA

612

VIIIA

613

IIIB

614

IVB

615

VB

616

VIB

617

VIIB

618

VIII

619

VIIIB

620

VIII

621

IB

622

IIB

623

IIIA

624

IVA

625

VA

626

VIA

627

VIIA

628

VIIIA

629

IIIB

630

IVB

631

VB

632

VIB

633

VIIB

634

VIII

635

VIIIB

636

VIII

637

IB

638

IIB

639

IIIA

640

IVA

641

VA

642

VIA

643

VIIA

644

VIIIA

645

IIIB

646

IVB

647

VB

648

VIB

649

VIIB

650

VIII

651

VIIIB

652

VIII

653

IB

654

IIB

655

IIIA

656

IVA

657

VA

658

VIA

659

VIIA

660

VIIIA

LANTANOIDI

57	138.91	58	140.12	59	140.91	60	144.24	61	(145)	62	150.36	63	151.96	64	157.25	65	158.93	66	162.50	67	164.93	68	167.26	69	168.93	70	173.05	71	174.97
La		Ce		Pr		Nd		Pm		Sm		Eu		Gd		Tb		Dy		Ho		Er		Tm		Yb		Lu	
LANTAN		CERIJ		PRASEODIMIJ		NEODIMIJ		PROMETIJ		SAMARIJ		EUROPIJ		GADOLINIJ		TERBIJ		DISPROZIJ		HOLMIJ		ERBIJ		TULIJ		ITERBIJ		LUTECIJ	

AKTINOIDI

89	(227)	90	232.04	91	231.04	92	238.03	93	(237)	94	(244)	95	(243)	96	(247)	97	(247)	98	(251)	99	(252)	100	(257)	101	(258)	102	(259)	103	(262)
Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm		Bk		Cf		Es		Fm		Md		No		Lr	
AKTINIJ		TORIJ		PROTAKTINIJ		URANIJ		NEPTUNIJ		PLUTONIJ		AMERICIJ		KURIJ		BERKELIJ		KALIFORNIJ		EINSTEINIJ		FERMIJ		MENDELEVIJ		NOBELIJ		LAWRENCIJ	

Copyright © 2012 Eni Generalić

(1) Hrvatska nomenklatura anorganske kemije, ed. V. Simeon, Školska knjiga, Zagreb, 1996.

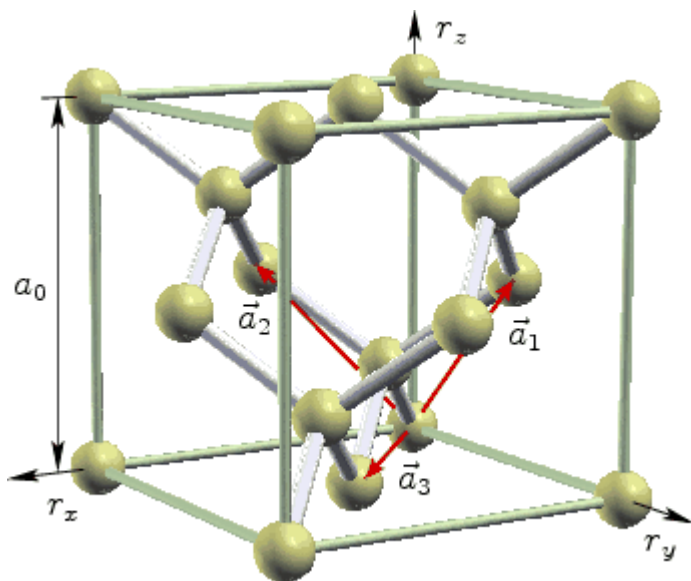
(2) Pure Appl. Chem., 81, No. 11, 2131-2156 (2009)
 Relativne atomske mase izražene su s pet značajnih znamenki. Za elemente koji nemaju stabilnih nuklida u zagrada je dan maseni broj najstabilnijeg izotopa. Izuzetak su torij, protaktinij i uranij koji imaju karakterističan izotopski sastav na Zemlji.



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

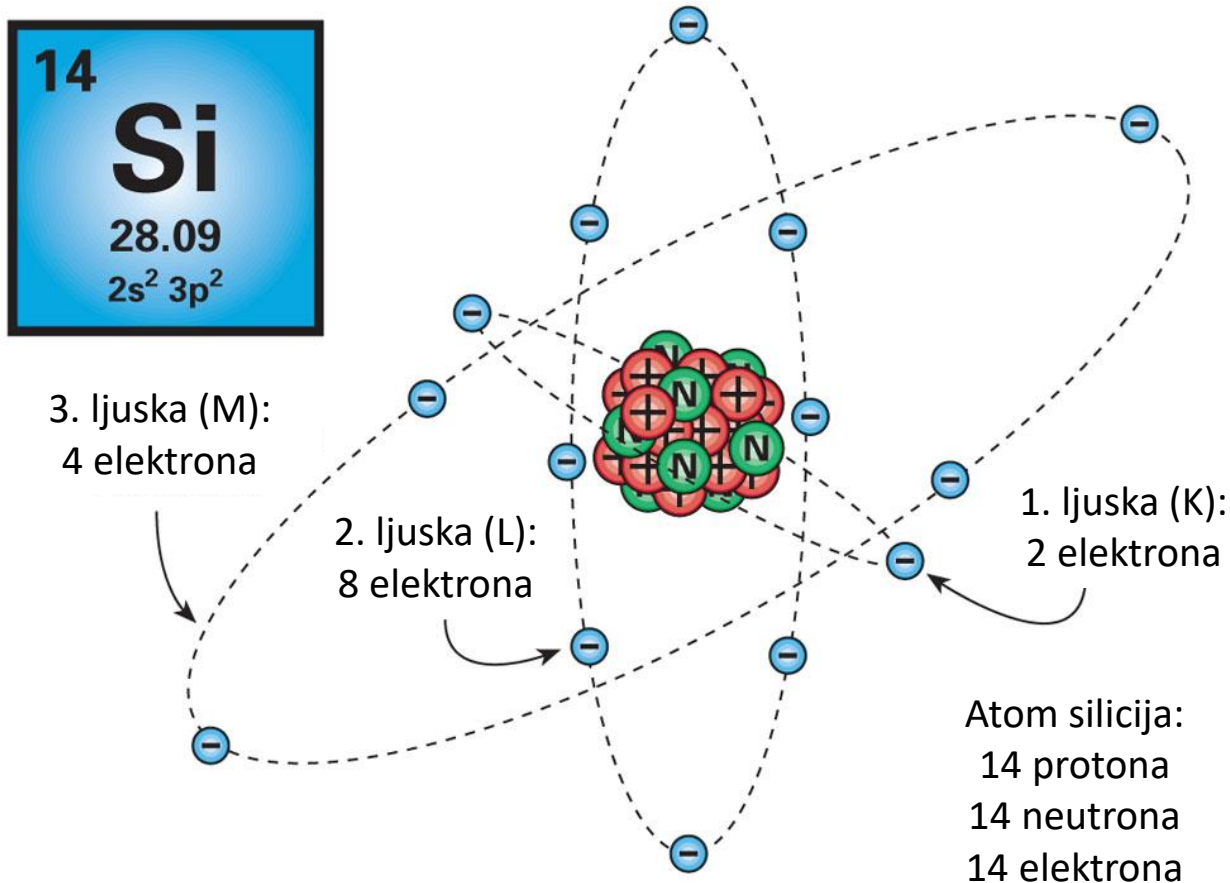
Broj atoma po elementarnoj ćeliji: 8

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

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

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

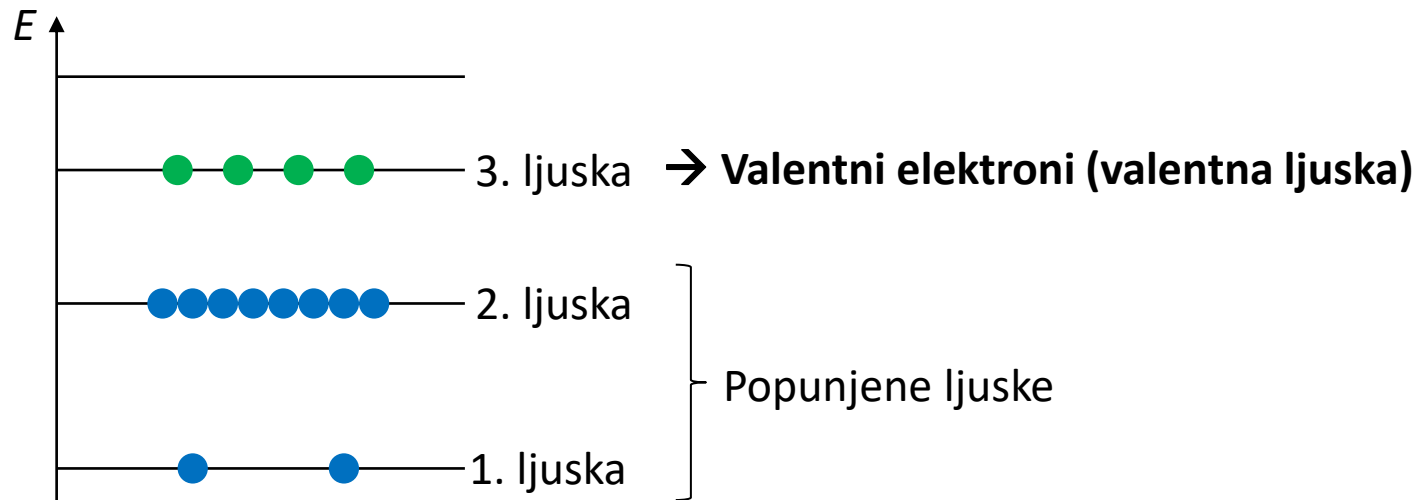
Atom silicija



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

Energija elektrona u atomu

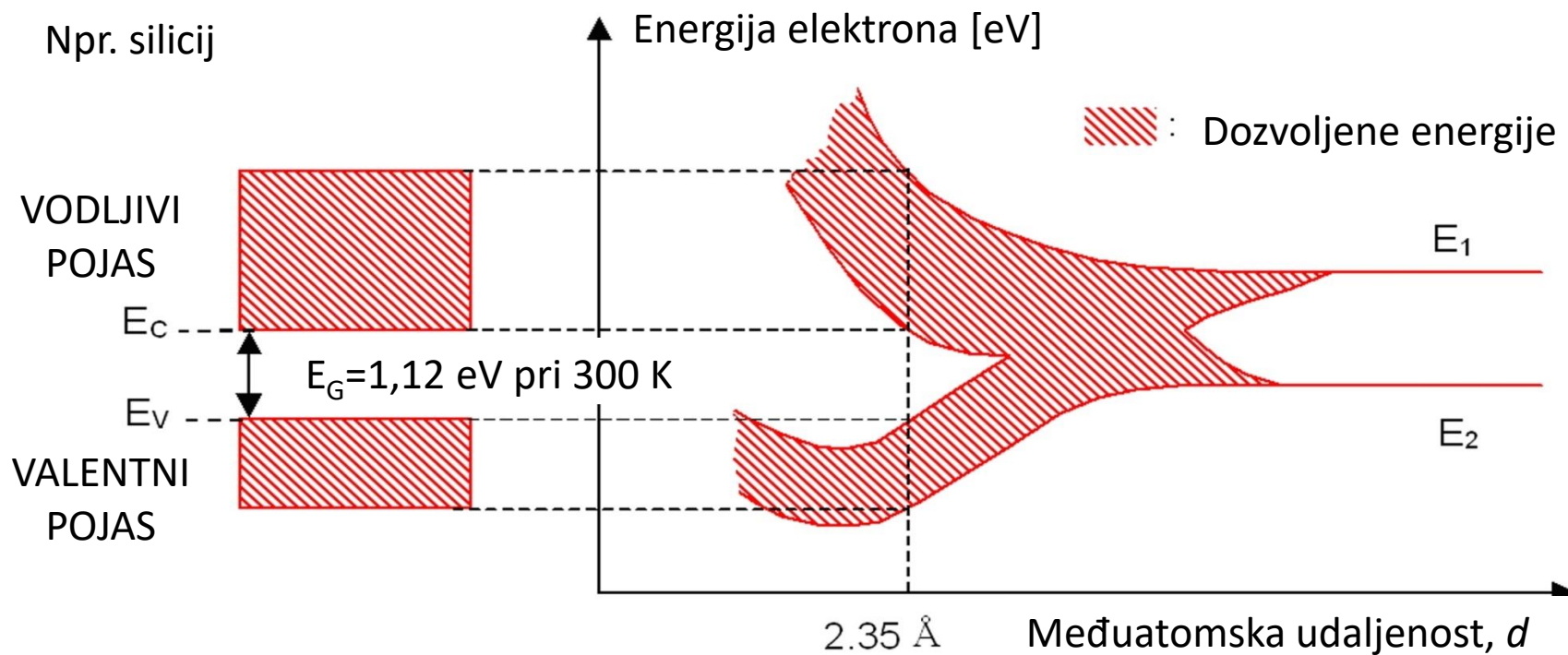
- U izoliranom atomu elektroni mogu imati samo **diskretne** vrijednosti energija (u načelu svakoj ljusci odgovara određena energija).
- Paulijevo načelo isključivosti iskazuje da u nekom atomu dva elektrona ne mogu zauzeti isto kvantno stanje.



- 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

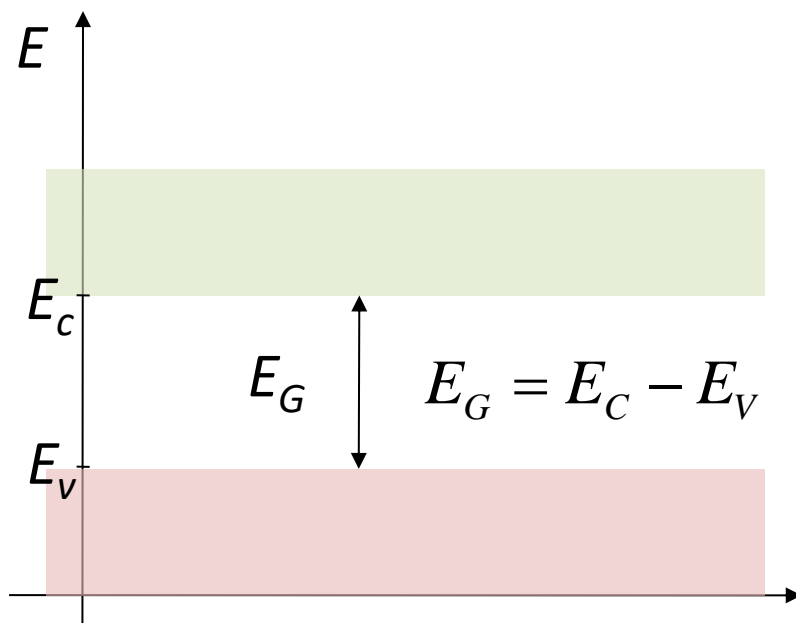
- Elektroni prvo popunjavaju pojaseve nižih energija.
- Najviši energijski pojas koji zauzimaju elektroni naziva se **valentni pojas** – valentni elektroni imaju najveću energiju u atomu.
- Prvi sljedeći pojas dozvoljenih energija je **vodljivi pojas** – elektroni u tom pojasu su **slobodni elektroni** 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:

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

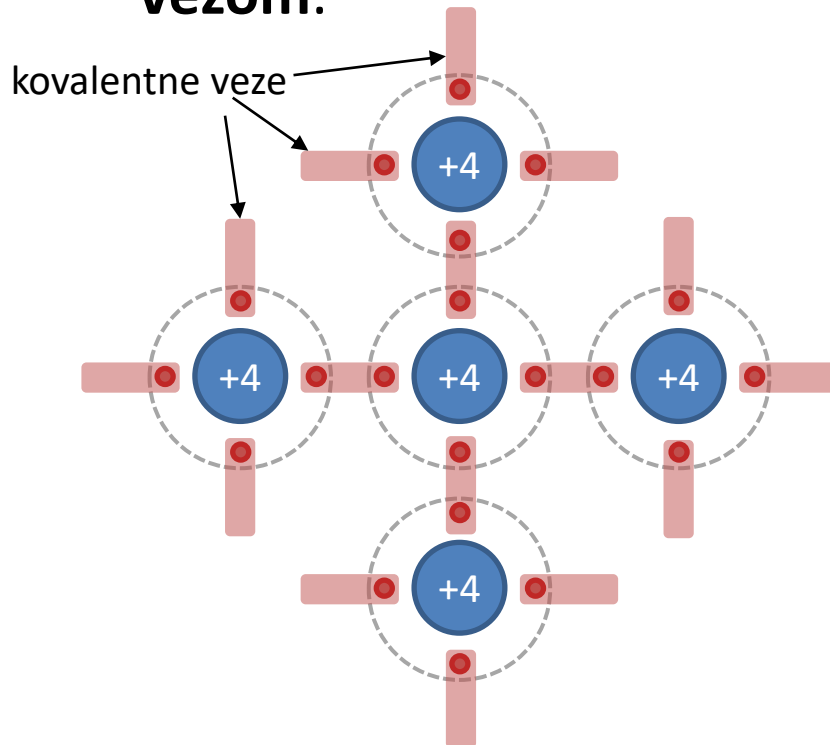
Poluvodič	E_{G0} [eV]	α [eV/K]	β [K]
Silicij (Si)	1,17	$4,73 \cdot 10^{-4}$	636
Germanij (Ge)	0,744	$4,77 \cdot 10^{-4}$	235
Galij-arsenid (GaAs)	1,521	$5,58 \cdot 10^{-4}$	220

- 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

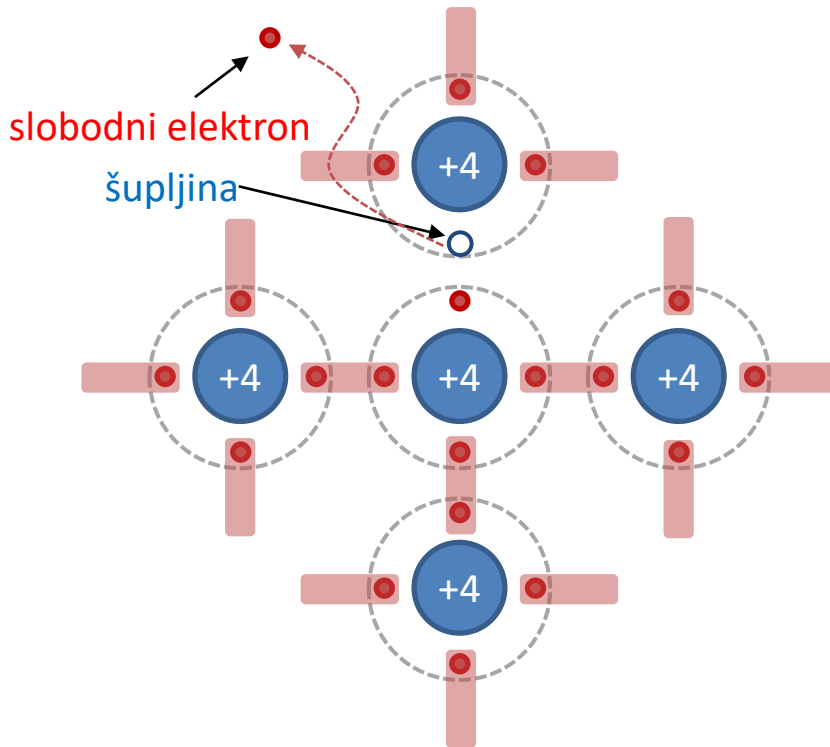
- Svaki atom silicija povezuje se s četiri susjedna atoma dijeleći sa svakim po jedan valentni elektron u **zajednički elektronski par**.
- Takva se veza među atomima silicija naziva **kovalentnom vezom**.



- 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 cm^3).
- Gustoća slobodnih elektrona: n [cm^{-3}] – negativan naboj
- Gustoća šupljina: p [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
 $k = 1,38065 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$



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

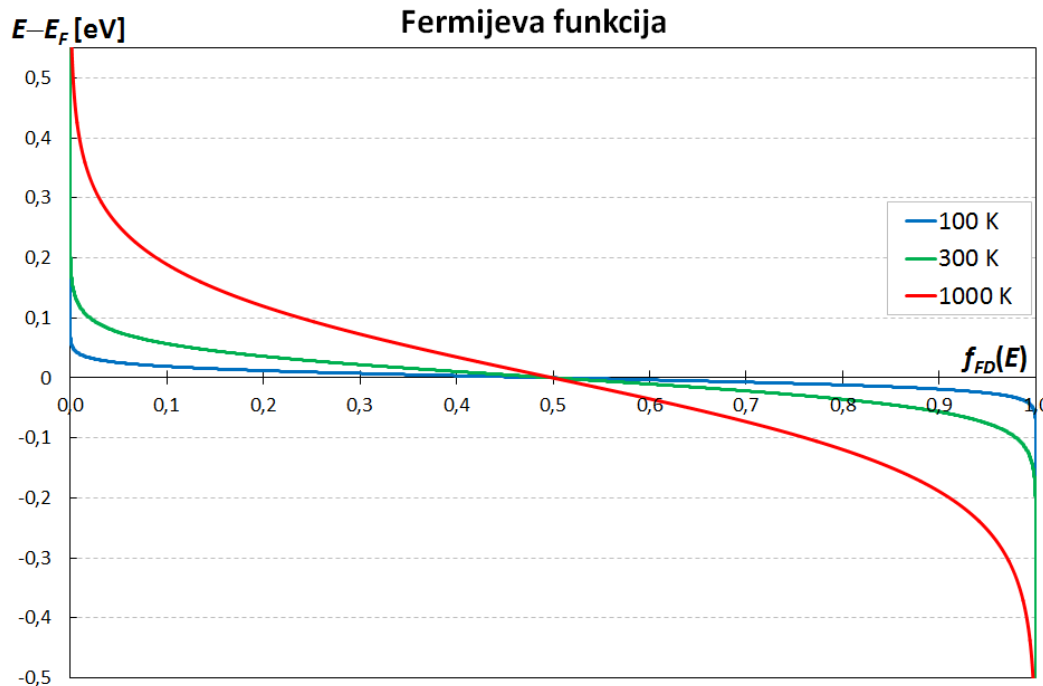
- Prema Fermi-Diracovoj raspodjeli, Fermijeva energija jest najveća energija koju elektron može imati na $T=0$ K. Na $T>0$ K vjerojatnost da elektron ima energiju jednaku Fermijevoj je 0,5.

$$f_{FD}(E)$$

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 ⁻³]	10 ¹⁰	2·10 ¹³	2,1·10 ⁶

- 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 **10¹⁰ cm⁻³**.

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.

