

SVEUČILIŠTE U SPLITU
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

Optoelektronika

Autorizirana Predavanja

Dr. sc. Predrag Đukić
Lovre Ćakić, mag. phys.

Sadržaj

Popis slika	v
Popis tablica	viii
1 Uvod	1
1.1 Elektromagnetski spektar.....	1
1.2 Radiometrija i fotometrija	3
1.2.1 Radiometrijske fizikalne veličine.....	4
1.2.2 Fotometrijske fizikalne veličine.....	5
1.2.3 Fotometrijske mjerne jedinice	8
1.2.4 Ljudsko oko	9
2 Uvod u modernu fiziku	13
2.1 Zračenje crnog tijela.....	13
2.2 Fotoelektrični efekt.....	17
2.3 Valno-čestična dualnost.....	20
2.4 Bohrov model atoma	22
3 Poluvodiči	27
3.1 Građa poluvodiča	27
3.2 Direktni i indirektni prijelazi.....	30
3.3 Klasifikacija poluvodiča	31
3.4 Poluvodički spojevi.....	31
3.5 Poluvodička dioda.....	33
3.6 Proizvodnja poluvodiča	35
4 Fotodioda i fotootpornik.....	36
4.1 Fotodioda.....	36
4.2 Fotootpornik.....	38
5 Fotonaponska tehnologija	39
5.1 Princip rada fotonaponske čelije	39
5.2 Karakteristike fotonaponske čelije.....	39
5.2.1 IV karakteristika	39
5.2.2 Učinkovitost	42
5.2.3 Koeficijent i dubina apsorpcije.....	45
5.2.4 Stopa generacije i udaljenost difuzije	46
5.2.5 Spektralni odgovor	47
5.2.6 Vjerojatnost kolekcije	48
5.2.7 Kvantna učinkovitost.....	49
5.3 Sunčeve zračenja na Zemljinoj površini	51

5.4	Granice učinkovitosti	53
5.5	Spajanje fotonaponskih ćelija.....	54
5.6	Vrste fotonaponskih ćelija	56
5.7	Tragač točke maksimalne snage.....	57
5.7.1	Hill-climbing algoritmi	59
6	Umjetni izvori svjetlosti.....	60
6.1	Žarulja s žarnom niti.....	60
6.2	Žarulja s plinskim pražnjenjem	60
6.3	LED	63
6.3.1	Struktura i optički gubitci	63
6.3.2	Boja	65
7	Laseri.....	68
7.1	Apsorpcija, spontana i stimulirana emisija.....	68
7.2	Princip rada lasera	70
7.3	Vrste lasera.....	72
7.3.1	Laseri s čvrstom jezgrom	72
7.3.2	Laseri s bojilima	73
7.3.3	Plinski laseri.....	74
7.3.4	Poluvodički laseri	75
8	Zasloni	77
8.1	Katodna cijev	77
8.2	Plazma zaslon	78
8.3	LCD	79
8.4	OLED.....	81
8.5	Elektroluminiscentni zasloni	82
9	Optički prijenos podataka	84
9.1	Princip rada optičkih vlakana	84
9.2	Proizvodnja optičkih vlakana	87
10	Optička pohrana podataka	89
	Literatura.....	92

Popis slika

Slika 1.1. Elektromagnetski spektar.	2
Slika 1.2. Definicija radijana (lijevo) i steradijana (desno).	4
Slika 1.3. Funkcija osjetljivosti ljudskog oka.	8
Slika 1.4. Građa ljudskog oka.	10
Slika 1.5. Luminacijska funkcija (normalizirana na 100) čunjića kratkih (eng. short, S), srednjih (eng. medium, M) i dugih (eng. long, L) valnih duljina i štapića (eng. rods, R).	11
Slika 2.1. Šupljina s malim otvorom.	13
Slika 2.2. Wienov zakon pomaka.	15
Slika 2.3. Zračenje crnog tijela prema Rayleighu, Wenu i Plancku.	16
Slika 2.4. Elektromagnetsko polje.	18
Slika 2.5. Fotoelektrični efekt.	19
Slika 2.6. Youngov eksperiment na dvije pukotine.	21
Slika 2.7. Eksperiment s elektronima na dvije pukotine.	21
Slika 2.8. Uzorak dobiven akumulacijom ispucanih elektrona.	22
Slika 2.9. Thomsonov model atoma.	23
Slika 2.10. Rutherfordov model atoma.	24
Slika 2.11. Bohrov model atoma.	25
Slika 2.12. Energetske razine vodikovog atoma sa serijama.	26
Slika 3.1. Energetski dijagram metala.	27
Slika 3.2. Energetski dijagram poluvodiča.	28
Slika 3.3. Energetski dijagram instrinsičnog poluvodiča.	28
Slika 3.4. a) Kristalna rešetka i b) energetski dijagram poluvodiča N-tipa.	29
Slika 3.5. a) Kristalna rešetka i b) energetski dijagram poluvodiča P-tipa.	29
Slika 3.6. Direktni i indirektni prijelaz.	31
Slika 3.7. PN spoj.	32
Slika 3.8. Propusna (gore) i nepropusna (dolje) polarizacija diode.	33
Slika 3.9. IV karakteristika propusno i nepropusno polarizirane diode.	34
Slika 4.1. Ekvivalentni strujni krug fotodiode u fotonaponskom modu spojene na vanjski otpornik.	36
Slika 4.2. Ekvivalentni strujni krug fotodiode u fotovodljivom modu spojene na vanjski otpornik.	37
Slika 5.1. IV karakteristika fotonaponske čelije u mraku i na svjetlu.	40
Slika 5.2. IV dijagram.	41
Slika 5.3. Ovisnost IV karakteristike idealne silicijeve fotonaponske čelije o iradijaciji (pri 25°C).	41

Slika 5.4. Ovisnost IV karakteristike idealne silicijeve fotonaponske ćelije o temperaturi ćelije (pri iradijaciji od 1000 W/m^2)	42
Slika 5.5. IV krivulja i PV krivulja fotonaponske ćelije.	43
Slika 5.6. Ovisnost PV karakteristike idealne silicijeve fotonaponske ćelije o iradijaciji (pri 25°C).	44
Slika 5.7. Ovisnost PV karakteristike idealne silicijeve fotonaponske ćelije o temperaturi ćelije (pri iradijaciji od 1000 W/m^2).	44
Slika 5.8. Ovisnost iradijacije zračenja o dubini.	45
Slika 5.9. Ovisnost normalizirane stope generacije parova nositelja naboja o dubini silicijeve ćelije, ako je smanjenje iradijacije proporcionalno stopi generacije.	46
Slika 5.10. Ovisnost spektralnog odgovora silicija o valnoj duljini.	47
Slika 5.11. Ovisnost vjerojatnosti kolekcije o dubini.	48
Slika 5.12. Ovisnost stope generacije i vjerojatnosti kolekcije o dubini.	49
Slika 5.13. Ovisnost kvantnih učinkovitosti i refleksije o valnoj duljini za fotonaponsku ćeliju od kristalnog silicija s antirefleksivnim slojem.	50
Slika 5.14. Spektralna iradijacija Sunčevog zračenja.....	51
Slika 5.15. Zenitni kut.....	52
Slika 5.16. Iskoristivi dio Sunčevog zračenja za silicijevu fotonaponsku ćeliju.	54
Slika 5.17. Shockley – Queisser granica.	54
Slika 5.18. Fotonaponski modul od 36 serijski povezanih fotonaponskih ćelija.	55
Slika 5.19. IV karakteristika serijski i paralelno povezanih fotonaponskih ćelija.	56
Slika 5.20. Struktura monokristalne, polikristalne i amorfne fotonaponske ćelije.	57
Slika 5.21. Strujni krug s fotonaponskim modulom, pretvaračem i otpornikom	58
Slika 6.1. Fotoluminiscencija.	62
Slika 6.2. U slučaju pod c) upadni kut je veći od Fresnelovog te je ostvarena totalna refleksija.....	64
Slika 6.3. Ovisnost koeficijenta apsorpcije o valnoj duljini.	64
Slika 6.4. Utjecaj a) ravnog, b) sfernog i c) paraboličnog kućišta na profil zračenja.	65
Slika 6.5. Fosforecentna bijela LED dioda s plavom LED diodom kao izvorom.	67
Slika 6.6. Fosforecentna bijela LED dioda s UV LED diodom kao izvorom.	67
Slika 7.1. Apsorpcija fotona.	68
Slika 7.2. Spontana emisija fotona.	69
Slika 7.3. Stimulirana emisija fotona.	69
Slika 7.4. Energetski dijagram aktivnog medija s 3 stanja.	71
Slika 7.5. Energetski dijagram aktivnog medija s 4 stanja.	72
Slika 7.6. Energetski dijagram He-Ne lasera.	74
Slika 8.1. Katodni zaslon.	78

Slika 8.2. Presjek plazma zaslona.....	79
Slika 8.3. Aktivni sloj s elektrodama: 1) katoda(-), 2) emisijski sloj, 3) emitirani foton, 4) vodljivi sloj, 5) anoda(+).	81
Slika 9.1. Odnos upadnog kuta zrake pri ulazu u vlakno i upadnog kuta na granici jezgre i omotača.....	84
Slika 9.2. Svjetlost u vlaknu s više modova sa strmim i postepenim prijelazom i u vlaknu s jednim modom.	86
Slika 9.3. Skica metode unutarnjeg taloženja pare.....	88
Slika 10.1. Mikroskopski prikaz površine CD-a.....	89
Slika 10.2. Presjek CD-a.	90
Slika 10.3. Presjek CD-RW-a.	91
Slika 10.4. Ovisnost transmisije i valne duljine polikarbonskog sloja.	91

Popis tablica

Tablica 1.1. Elektromagnetski spektar.....	1
Tablica 1.2. Radiometrijske veličine.	3
Tablica 1.3. Fotometrijske veličine.	3
Tablica 5.1 Procjena AM koeficijenta na nadmorskoj visini za različite zenitne kutove.	53

1 Uvod

Optoelektronika proučava optoelektričke uređaje, odnosno električke uređaje koji pretvaraju elektromagnetsko zračenje u električnu energiju i obrnuto. Drugim riječima, optoelektronika proučava specijalnu skupinu električkih uređaja koji interagiraju s elektromagnetskim zračenjem.

1.1 Elektromagnetski spektar

Podjela elektromagnetskog zračenja na intervale frekvencija se naziva elektromagnetskim spektrom. Od manje prema većoj frekvenciji, odnosno od veće prema manjoj valnoj duljini, spektar sadrži: radiovalove, mikrovalove, terahercno zračenje, infracrveno zračenje, vidljivu svjetlost, ultraljubičasto zračenje, x-zrake ili rengensko zračenje i gama zračenje (Tablica 1.1, Slika 1.1).

Tablica 1.1. Elektromagnetski spektar.

	Frekvencija [Hz]	Valna duljina [nm]
Radiovalovi	$< 3 \cdot 10^9$	$> 10^8$
Mikrovalovi	$3 \cdot 10^9 - 1 \cdot 10^{11}$	$10^6 - 10^8$
Terahercno zračenje	$1 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^{13}$	$10^5 - 10^6$
Infracrveno zračenje	$3 \cdot 10^{13} - 4,3 \cdot 10^{14}$	$780 - 10^5$
Vidljiva svjetlost	$4,3 \cdot 10^{14} - 7,5 \cdot 10^{14}$	$380 - 780$
Ultraljubičasto zračenje	$7,5 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$	$10 - 380$
X-zrake ili rengensko zračenje	$3 \cdot 10^{16} - 1 \cdot 10^{17}$	$1 - 10$
Gama zračenje	$> 3 \cdot 10^{17}$	< 1

Maksimalna vrijednost valne duljine je teoretski ograničena samo dimenzijom samog svemira, a minimalna zakonima kvantne fizike, te je usporedljiva s dimenzijama elementarnih čestica.

Radiovalovi su uglavnom našli primjenu u području bežičnog prijenosa podataka (radio, televizija, mobilni telefoni, komunikacijski sateliti, bežična mreža) i u manjoj mjeri u industriji i medicini (magnetska rezonancija).

Mikrovalovi se ponekad klasificiraju i kao radiovalovi visoke frekvencije. Primjenu su našli u području bežičnog prijenosa podataka (komunikacijski sateliti, bežična mreža kao npr. WiFi i bluetooth), radiolokaciji (radar), zagrijavanju u mikrovalnim pećnicama.

Terahercno zračenje poprima svojstva radiovalova i vidljive svjetlosti. Primjenjuje se kod raznih vrsta detekcije, npr. skeniranje putnika u zračnim lukama. S obzirom da ih atmosfera dobro apsorbira ne koriste se za komunikaciju na veće udaljenosti. U vojsci nalaze primjenu u onesposobljavanju električke opreme.

Infracrveno zračenje se primjenjuje za detekciju kretanja, u infracrvenoj komunikaciji, infracrvenom zagrijavanju i sl.

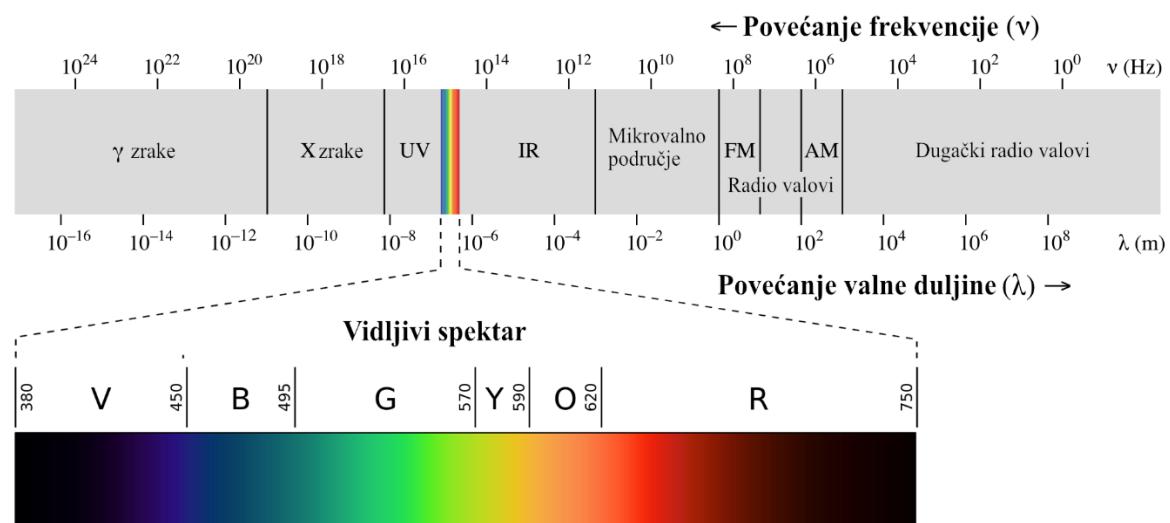
Vidljiva svjetlost je dio elektromagnetskog spektra koji ljudsko oko može detektirati, odnosno dio spektra u intervalu od 380 nm do 780 nm.

Ultraljubičasto zračenje se dijeli na ultraljubičasto A ili dugovalno područje (UVA, 380 – 315 nm), ultraljubičasto B ili srednjevalno područje (UVB, 315 – 280 nm) i ultraljubičasto C ili kratkovalno područje (UVC, 280 – 100 nm), te nadalje duboko, super i ekstremno UV zračenja (100 – 10 nm). Ultraljubičasto zračenje u srednjevalnom području ima dovoljno energije da uzrokuje pucanje kemijskih veza što atome čini reaktivnima. Primjer ove pojave na koži su opekatine od sunca. Zračenje ove i više energije ima dovoljno energije da izazove oštećenje DNA. Ultraljubičasto zračenje u kratkovalnom području ima dovoljno energije da ionizira atom (elektron napusti atom) i izazove kemijsku reakciju pa se zračenja ove i veće frekvencije nazivaju ionizirajućim zračenjem. Koristi se za izazivanje fluorescencije, dezinfekciju, osvjetljavanje fotoosjetljivih lakova u poluprovodničkoj industriji itd.

X-zrake ili rendgenske zračenje nalazi primjenu u medicini (radiografija), industrijskoj dijagnostici. Prodiru kroz materiju u krutom stanju čija gustoća odgovara gustoći tkiva, ali ne i kostiju, zbog čega nalaze primjenu u medicini.

Gama zračenje nastaje u nuklearnim reakcijama. Gama zrake imaju jako visoku energiju zbog čega prodiru kroz materiju. Koriste se za sterilizaciju hrane, u dijagnostičkoj medicini (PET), ali i u liječenju raka. U velikim dozama su smrtonosne.

Zbog svog utjecaja na elektroniku vrijedi spomenuti i kozmičke zrake. Visokoenergetske čestice s masom se nazivaju kozmičkim zrakama, dok visokoenergetsko elektromagnetsko zračenja spada pod x-zrake ili gama zrake. Kozmičke zrake koje nastaju izvan planeta Zemlje su uglavnom protoni visoke energije. Naziv kozmička zraka se zadržao iz vremena kada se smatralo da elektromagnetsko zračenje čini većinu visokoenergetskog zračenja iz svemira.



Slika 1.1. Elektromagnetski spektar.¹

¹ Philip Ronan, Gringer. (2013). Revised diagram with re-aligned spectrum. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_spectrumrevised.png

1.2 Radiometrija i fotometrija

Radiometrija je grana optike koja se bavi mjeranjem svojstava elektromagnetskog zračenja. Fotometrija je grana optike koja se bavi mjeranjem svojstava elektromagnetskog zračenja (konkretno vidljivog dijela spektra, od 380 nm do 780 nm) u kontekstu njegove percepcije od strane ljudskog oka. Cilj fotometrije je uzeti u obzir različitu osjetljivost ljudskog oka na svjetlost različitih valnih duljina uvođenjem faktora koji predstavlja osjetljivost ljudskog oka pri pojedinoj valnoj duljini.

U radiometriji i fotometriji postoji definirano mnoštvo fizikalnih veličina (Tablica 1.2, Tablica 1.3). Kako su to grane znanosti koje se koriste u različitim područjima fizike i inženjerstva, za iste fizikalne veličine se često koriste različiti nazivi, kako na engleskom tako i na hrvatskom jeziku. To nažalost može dodatno otežati razumijevanje gradiva. Od pomoći može biti obraćanje pozornosti na mjerne jedinice. U nastavku su opisane glavne fotometrijske fizikalne veličine i njihovi radiometrijski ekvivalenti.

Tablica 1.2. Radiometrijske veličine.

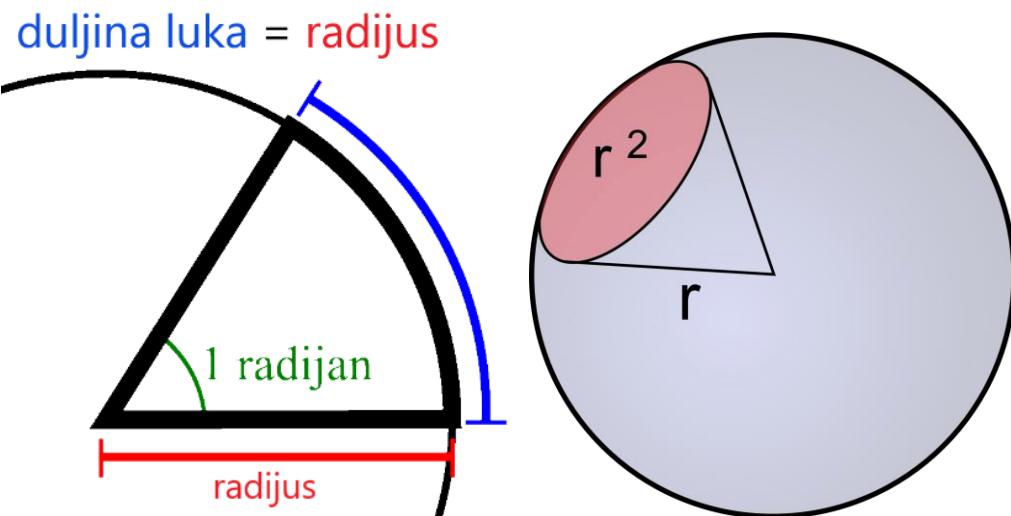
Fizikalne veličine		Mjerne jedinice		
Energija/ količina zračenja	Radiant energy	W s	J	Džul
Tok/ snaga zračenja	Radiant flux	W		Vat
Specifično zračenje	Radiant exitance	W/m ²		
Jakost zračenja, radijacijski intenzitet	Radiant intensity	W/sr		
Gustoća zračenja, radijancija	Radiance	W/(sr m ²)		
Iradijacija, ozračenje	Irradiance	W/m ²		
Ozračenost	Radiant exposure	W s/m ²	J/m ²	

Tablica 1.3. Fotometrijske veličine.

Fizikalne veličine		Mjerne jedinice		
Svetlosna energija, količina svjetlosti	Luminous energy	lm s		
Svetlosni/a tok/ snaga	Luminous flux	lm		Lumen
Specifično svjetlosno zračenje	Luminous exitance	lm/m ²	lx	Luks
Jakost svjetla, luminacijski intenzitet	Luminous intensity	lm/sr	cd	Kandela
Gustoća svjetla, luminacija	Luminance	lm/(sr m ²)	cd/m ²	
Iluminacija, osvjetljenje	Illuminance	lm/m ²	lx	
Osvjetljenost	Luminous exposure	lm s/m ²	lx s	

Radijan (rad = 1) je mjerna jedinica za kut. Jedan radijan je jednak kutu kojeg zatvara kružni luk čija je duljina jednaka njegovom radijusu (Slika 1.2). Središnji kut izražen u radijanima je jednak omjeru duljine kružnog luka nad tim kutom i polumjera kružnice. Radijan je bezdimenzionalna veličina.

Steradijan (sr = 1) je mjerna jedinica za prostorni kut. Jedan steradijan je prostorni kut čiji se vrh nalazi u središtu kugle, a na sferi kugle omeđuje površinu jednaku kvadratu polumjera kugle (Slika 1.2). Steradijan je bezdimenzionalna veličina.



Slika 1.2. Definicija radijana (lijevo)² i steradijana (desno).³

U sljedećim razmatranjima zračenje može biti emitirano, transmitirano, reflektirano i apsorbirano. Odlazno zračenje uključuje emitirano, transmitirano i reflektirano zračenje, a upadno zračenje podrazumijeva apsorbirano zračenje. Pojam intenzitet se često koristi za bilo koju fizikalnu veličinu koja se mjeri u W/m^2 . Kako bismo razlikovali radiometrijske od fotometrijskih veličina uz prve ćemo dodati indeks e kao „energetski“, a uz druge indeks v za „svjetlosni“.

1.2.1 Radiometrijske fizikalne veličine

Energija ili količina zračenja (eng. *radiant energy*) je ukupna energija odlaznog ili upadnog zračenja od početka do kraja trajanja zračenja:

$$Q_e [\text{J}].$$

² User:Stannered. Original image by en:User:Ixphin. (2007). Relationship between angle, radius and arc length. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Radian_cropped_color.svg

³ Jynus. (2006). Steradian graphical definition. Preuzeto s: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Steradian.svg>

Tok zračenja ili snaga zračenja (eng. *radiant flux, radiant power*) je energija odlaznog ili upadnog zračenja po jedinici vremena:

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} [W].$$

Jakost zračenja ili radijacijski intenzitet (eng. *radiant intensity*) je snaga odlaznog ili upadnog zračenja po jedinici prostornog kuta:

$$I_{e,\omega} = \frac{d\Phi_{e,\omega}}{d\omega} \left[\frac{W}{sr} \right].$$

Radijancija ili gustoća zračenja (eng. *radiance*) je jakost odlaznog ili upadnog zračenja po jedinici površine:

$$L_{e,\omega} = \frac{d\Phi_e}{d\omega dA \cos \theta} \left[\frac{W}{sr \cdot m^2} \right].$$

Za radijanciju odlaznog zračenja A se odnosi na površinu izvora, a ω na prostorni kut u koji zračenje odlazi. Za radijanciju upadnog zračenja A se odnosi na površinu detektora, a ω na prostorni kut iz kojeg zračenje dolazi gledano s detektora.

Radiozitet (eng. *radiosity*) je snaga odlaznog zračenja po jedinici površine:

$$J_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \left[\frac{W}{m^2} \right].$$

Specifično zračenje (eng. *radiant exitance, radiant emittance*) je snaga emitiranog zračenja po jedinici površine:

$$M_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \left[\frac{W}{m^2} \right].$$

Iradijacija ili ozračenje (eng. *irradiance*) je snaga upadnog zračenja po jedinici površine:

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \left[\frac{W}{m^2} \right].$$

Ozračenost (eng. *radiant exposure*) je energija upadnog zračenja po jedinici površine ili iradijacija u nekom vremenskom intervalu:

$$H_e = \frac{dQ_e}{dA} = \int_0^T E_e(t) dt \left[\frac{W \cdot s}{m^2} \right].$$

1.2.2 Fotometrijske fizikalne veličine

Svetlosna energija ili količina svjetlosti (eng. *luminous energy*) je ukupna percipirana energija odlazne ili upadne svjetlosti od početka do kraja trajanja zračenja:

$$Q_v [lm \cdot s].$$

Svetlosni tok ili svjetlosna snaga (eng. *luminous flux, luminous power*) je svjetlosna energija odlazne ili upadne svjetlosti po jedinici vremena:

$$\Phi_v = \frac{dQ_v}{dt} [lm].$$

Jakost svjetla ili luminacijski intenzitet (eng. *luminous intensity*) je svjetlosna snaga emitirane ili reflektirane svjetlosti po jedinici prostornog kuta:

$$I_{v,\omega} = \frac{d\Phi_{v,\omega}}{d\omega} \left[cd = \frac{lm}{sr} \right].$$

Luminacija ili gustoća svjetla (eng. *luminance*) je jakost emitirane ili reflektirane svjetlosti po jedinici površine:

$$L_{v,\omega} = \frac{d\Phi_v}{d\omega dA \cos \theta} \left[\frac{cd}{m^2} = \frac{lm}{sr \cdot m^2} \right].$$

Specifično svjetlosno zračenje (eng. *luminous exitance, luminous emittance*) je svjetlosna snaga emitirane svjetlosti po jedinici površine:

$$M_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \left[lx = \frac{lm}{m^2} \right].$$

Iluminacija ili osvjetljenje (eng. *illuminance*) je svjetlosna snaga upadne svjetlosti po jedinici površine:

$$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} \left[lx = \frac{lm}{m^2} \right].$$

Osvijetljenost (eng. *luminous exposure*) je svjetlosna energija upadne svjetlosti po jedinici površine ili iluminacija u nekom vremenskom intervalu:

$$H_v = \frac{dQ_v}{dA} = \int_0^T E_v(t) dt \left[lx \cdot s = \frac{lm \cdot s}{m^2} \right].$$

Svetlosna učinkovitost zračenja ili luminacijska efektnost zračenja (eng. *luminous efficacy of radiation*) je omjer svjetlosne snage i snage zračenja koje emitira izvor, odnosno omjer iluminacije i iradijacije upadnog zračenja. Mjerna jedinica je lumen po vatru. Svetlosna učinkovitost izvora ili luminacijska efektnost izvora (eng. *luminous efficacy of a source*) je omjer svjetlosne snage koju emitira izvor i snage koju izvor konzumira (npr. električna, kemijska ili dr.). Mjerna jedinica je također lumen po vatru.

$$\eta = \frac{\Phi_v}{\Phi_e} \left[\frac{lm}{W} \right].$$

Stupanj iskorištenja zračenja (eng. *luminous efficiency of radiation*) je bezdimenzionalni omjer svjetlosne učinkovitosti zračenja i maksimalne svjetlosne učinkovitosti zračenja koja iznosi 683 lm/W. Drugi naziv za stupanj iskorištenja zračenja je osjetljivost ljudskog oka. Izražava se u postotcima. Stupanj iskorištenja izvora (eng. *luminous efficiency of source*) je bezdimenzionalni omjer svjetlosne učinkovitosti izvora i maksimalne svjetlosne učinkovitosti izvora koja iznosi 683 lm/W. Također se izražava u postotcima.

$$V = \frac{\eta}{683 \text{ lm/W}} \cdot 100 [\%].$$

Svetlosna učinkovitost zračenja i stupanj iskorištenja zračenja mjere koliko dobro se emitirano elektromagnetsko zračenje detektira ljudskim okom, te su svojstvo zračenja.

Svetlosna učinkovitost izvora i stupanj iskorištenja izvora mjere koliko dobro izvor pretvara energiju u elektromagnetsku energiju i koliko dobro se to emitirano elektromagnetsko zračenje detektira ljudskim okom, te su svojstvo izvora. Može se reći da svjetlosna učinkovitost zračenja govori koliko elektromagnetsko zračenje snage jednog vata generira lumena svjetlosne snage, odnosno da svjetlosna učinkovitost izvora govori koliko jedan vat konzumirane snage od strane izvora generira lumena svjetlosne snage.

U uvjetima osvijetljenosti većim od 3 cd/m^2 je osvijetljenost dobra a vid fotopički, odnosno vrijedi tzv. danje gledanje. Od 3 cd/m^2 do 0.001 cd/m^2 osvijetljenost je prigušena a vid mezopički. U uvjetima osvijetljenosti manjim od 0.001 cd/m^2 osvijetljenost je loša a vid skotopički, odnosno vrijedi tzv. noćno gledanje. Prijelazi između režima vida su postepeni pa se tako ni njihove granice ne mogu strogo definirati. Ovisnost režima vida o uvjetima osvijetljenosti je povezana s radom fotoreceptorskih stanica u oku što će biti objašnjeno u nastavku.

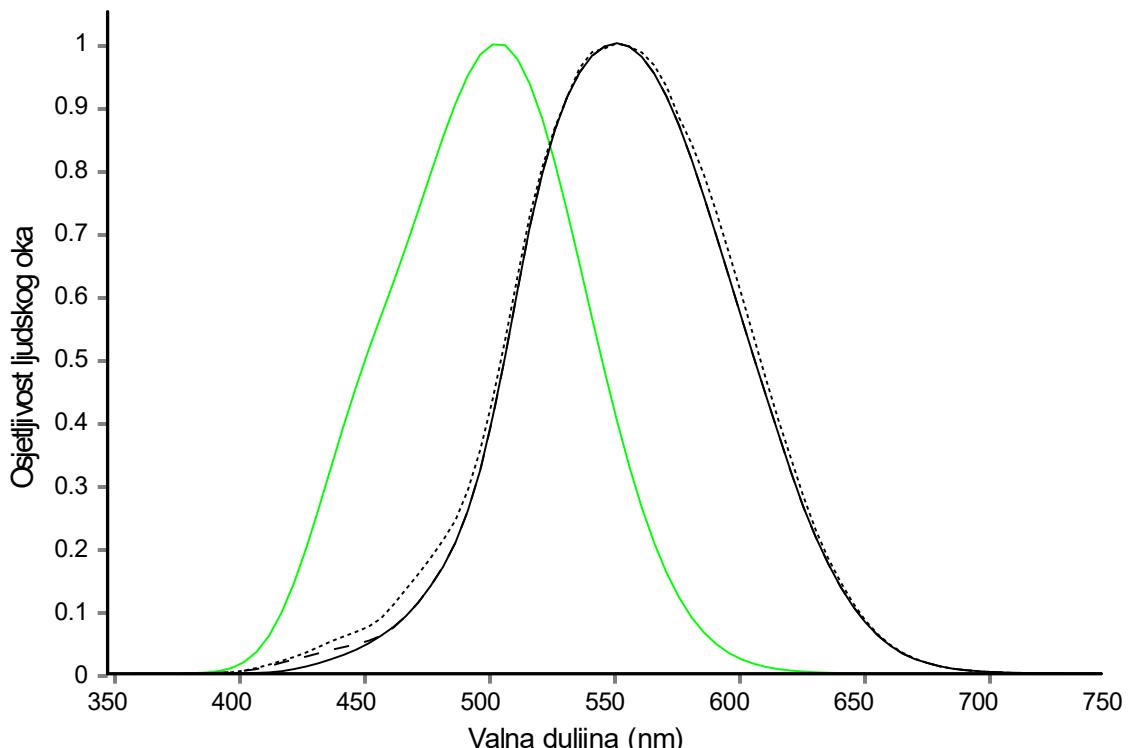
Svetlosna učinkovitost zračenja ovisi o valnoj duljini svjetlosti i o luminacijskim uvjetima. Svjetlosna učinkovitost zračenja za valne duljine izvan vidljivog spektra je jednak nuli, a unutar vidljivog spektra približno prati normalnu raspodjelu te postiže maksimum od 683 lm/W za valnu duljinu od 555 nm (zelena svjetlost) u uvjetima dobre osvijetljenosti, odnosno 1700 lm/W za valnu duljinu od 507 nm u uvjetima loše osvijetljenosti. U uvjetima dobre osvijetljenosti 1 W zelene svjetlosti valne duljine od 555 nm daje 683 lumena. Svjetlosna učinkovitosti zračenja je pri tom jednak teoretskom maksimumu i iznosi 683 lm/W . Za usporedbu 1 W crvene svjetlosti valne duljine od 700 nm daje svega 2.7 lumena. Ako se sva konzumirana energija u izvoru pretvori u energiju elektromagnetskog zračenja znači da nema toplinskih gubitaka i da je svjetlosna učinkovitost izvora jednak svjetlosnoj učinkovitosti zračenja. Slijedi da je teoretski maksimum svjetlosne učinkovitosti izvora jednak kao za zračenje i iznosi 683 lm/W .

Dijeljenjem funkcije ovisnosti svjetlosne učinkovitosti zračenja o valnoj duljini s teoretskim maksimumom svjetlosne učinkovitosti zračenja od 683 lm/W maksimalna vrijednost funkcije postane jednak jedan, a za ostale valne duljine funkcija poprimi vrijednosti koje su pozitivne i manje od 1. Funkcija je time normalizirana na jedan, te je dobivena funkcija ovisnosti stupnja iskorištenja zračenja o valnoj duljini koja se još naziva i luminacijska funkcija ili funkcija osjetljivosti ljudskog oka. Luminacijska funkcija opisuje prosječnu relativnu osjetljivost ljudskog oka na svjetlost različitih valnih duljina (Slika 1.3). Osjetljivost oka se odnosi na percepciju svjetline. Luminacijska funkcija je dobivena mjeranjima na većem broju osoba zdravog vida. Mjeranja su dobivena subjektivnom procjenom ispitanika o tome koja je svjetlost svjetlijia u paru od dvije svjetlosne zrake različite valne duljine. Fotometrijske fizikalne veličine su analogne radiometrijskim fizikalnim veličinama uz razliku što je zračenje za svaku valnu duljinu spektra vrednovano standardiziranom luminacijskom funkcijom.

Osim o valnoj duljini svjetlosti osjetljivost ljudskog oka ovisi i o uvjetima osvijetljenosti. Fotopička luminacijska funkcija, koja opisuje ovisnost osjetljivosti fotopičkog vida o valnoj duljini, postiže vrijednost jedan za svjetlost valne duljine od 555 nm . Za vrijednosti valne duljine koje su manje i veće od 555 nm osjetljivost se smanjuje i konačno pada na nulu izvan granica vidljivog spektra odnosno za vrijednosti valne duljine manje od 380 nm i veće od 770 nm . Skotopička luminacijska funkcija, koja opisuje osjetljivost skotopičkog vida o valnoj duljini, postiže vrijednost jedan za svjetlost valne duljine od 507 nm .

Zelena krivulja na Slici 1.3 označava skotopičku funkciju osjetljivosti. Crna krivulja označava fotopičku funkciju osjetljivosti, a crne isprekidane krivulje njene ispravke, gdje je točkasta krivulja najnovija (2005. god).

U literaturi često nije naglašeno odnosi li se svjetlosna učinkovitost i stupanj iskorištenja na zračenje ili izvor pa to često treba biti shvaćeno iz konteksta. U literaturi na engleskom jeziku pojmovi efficacy i efficiency se ponekad koriste naizmjence pa treba обратити pozornost на mjerne jedinice.



Slika 1.3. Funkcija osjetljivosti ljudskog oka.⁴

1.2.3 Fotometrijske mjerne jedinice

Kandela (eng. *candela*, cd) je mjerna jedinica za jakost svjetlosti. Jedna je od sedam osnovnih mjernih jedinica Međunarodnog sustava mjernih jedinica (SI sustava). Definira se kao jakost svjetlosti u jednom smjeru u kojem izvor zrači monokromatsko zračenje frekvencije 540 THz (555 nm) jakosti zračenja 1/683 W/sr. Valna duljina od 555 nm je odabrana jer je eksperimentalno pokazano da je ljudsko oko najosjetljivije na svjetlost te valne duljine, a broj 1/683 je odabran kako bi kandela (definirana preko svjetlosti valne duljine od 555 nm) bila približno jednaka ranije korištenoj mjerenoj jedinici; standardnoj kandeli.

⁴ Dicklyon. (2006). Graph of photopic luminosity function (black) including CIE 1931 (solid), Judd-Vos modified (dashed), and Sharpe, Stockman, Jagla & Jägle 2005 (dotted); and scotopic luminosity function, CIE 1951 (green). Preuzeto s: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Luminosity.svg>

Lumen (eng. *lumen*, *lm*) je mjerna jedinica za svjetlosnu snagu. 1 lumen je svjetlosna snaga koju daje točkasti izvor svjetlosti svjetlosne jakosti 1 kandela u prostorni kut 1 steradijan. Drugim riječima 1 lumen je svjetlosna snaga koju daje točkasti izvor svjetlosti valne duljine 555 nm i snage zračenja 1/683 vata u prostorni kut 1 steradijan.

Prostorni kut koji pripada površini 1 m^2 je jedinični prostorni kut i zove se steradijan (sr). Površina kugle je dana formulom $4r^2\pi$, pa je površina kugle polumjera 1 m jednaka 4π ili $12,57 \text{ m}^2$, odnosno kugla polumjera 1 m ima 12,57 steradijana. Neka se točkasti izvor nalazi u središtu kugle radijusa 1 m. Ako je jakost svjetlosti točkastog izvora 1 kandela onda je svjetlosna energija koja prođe kroz 1 m^2 površine te kugle jednaka 1 lumen, odnosno onda je svjetlosna snaga tog izvora 1 lm.

Luks (eng. *lux*, *lx*) je mjerna jedinica za osvjetljenje. 1 luks je osvjetljenje površine od 1 m^2 na koju pada svjetlost svjetlosne snage 1 lumen, odnosno svjetlost izvora svjetlosne jakosti 1 kandela koji je od površine udaljen 1 m.

1.2.4 Ljudsko oko

Ljudsko oko je detektor elektromagnetskog zračenja u intervalu od 380 nm do 780 nm. Taj dio spektra se naziva vidljivi dio. Oko se sastoji od tri očne ovojnica.

Vanjsku očnu ovojnicu čini bjeloočnica s rožnicom (Slika 1.4). Rožnica ili kornea je prozirni dio bjeloočnice ili sklere. Rožnica štiti oko od udaraca i isušivanja. Djeluje i kao UV filter, tj. smanjuje prolazak štetnog ultraljubičastog zračenja. Ne sadrži krvne žile. Dodatno je štite i vlaže očni kapci.

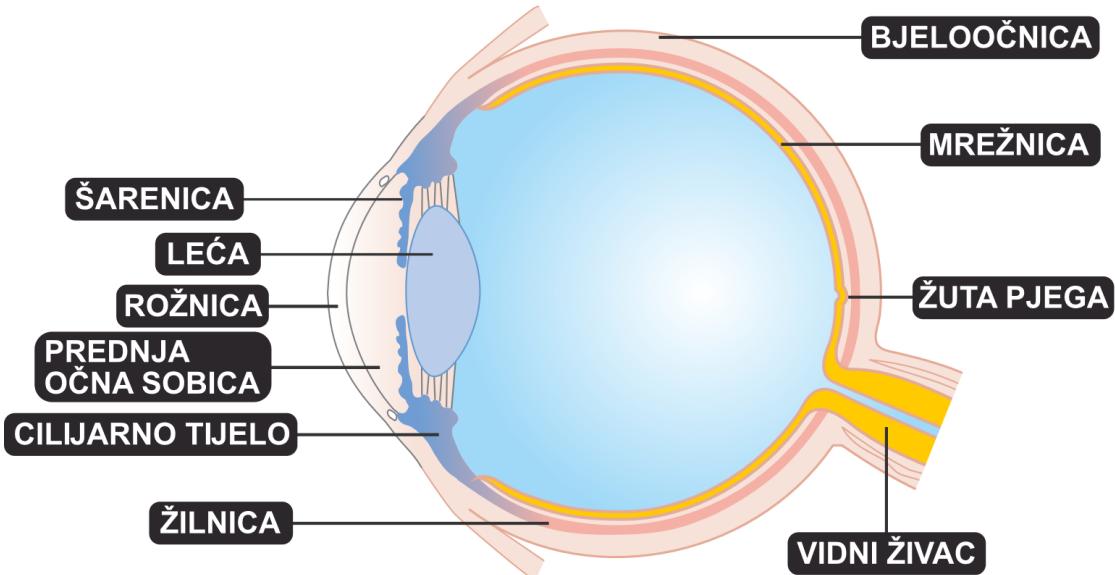
Srednju ovojnicu čine žilnica sa šarenicom i zjenicom (Slika 1.4). Žilnica ili koroidea sadrži pigment zbog čega je tamna. Time drži unutrašnjost oka tamnim te sprječava refleksiju svjetlosti u unutrašnjosti oka. Žilnica je dobro prokrvljena a njena glavna uloga je ishrana oka. Dio žilnice koji je izložen svjetlosti nazivamo šarenica. Šarenica ili iris sadrži pigment koji sprječava ulazak svjetlosti. Zjenica je okrugli otvor u centru šarenice koji propušta svjetlost. Veličina zjenice određuje količinu svjetlosti koja ulazi u oko, a reguliraju je dva mišića od kojih jedan sužava otvor, a drugi ga širi. Šarenica se doima crnom jer se jako malo svjetlosti koji uđe kroz šarenicu reflektira nazad.

Unutarnju ovojnicu čini mrežnica (Slika 1.4). Mrežnica ili retina je funkcionalno najvažniji dio oka jer svjetlosne podražaje pretvara u električne impulse koji se dalje prenose prema mozgu. Mrežnica ima optički i slijepi dio. Optički dio sadrži živčane stanice, a dio mrežnice s najvećom gustoćom živčanih stanica se naziva žuta pjega. Pokraj žute pjegе se nalazi početak vidnog živca koji čini dio mrežnice neosjetljiv na svjetlo. Njegova projekcija u vidnom polju se naziva slijepa pjega.

Očna leća je bikonveksna leća, odnosno leća koja je ispušćena prema vani s obje strane. Prozirna je i nema krvnih žila. Nalazi se odmah iza šarenice i zjenice. Mišićima se vrši akomodacija očne leće, odnosno promjena njene dioptrijske jakosti što omogućava da se predmeti koji se nalaze na različitim udaljenostima od oka oštvo vide. Očna vodica je vodenasta tvar koja ispunjava prostor između rožnice i leće. Hrani i vlaži rožnicu i leću koje nemaju svoj krvotok. Staklasto tijelo ili staklovina ispunjava unutrašnjost oka između leće i mrežnice. Staklasto tijelo ima želatinoznu strukturu i u zdravom oku je potpuno prozirno.

Refrakcija ili lom svjetlosti u oku se događa u rožnici, očnoj vodici, leći i staklovini. Stupanj refrakcije je konstantan u svim dijelovima osim u leći. Lom svjetlosti treba biti takav da svjetlosna zraka bude fokusirana na žutu pjegu na mrežnici.

Mrežnica se sastoji od nekoliko neuronskih slojeva koji su uglavnom transparentni, jer se fotoreceptorske stanice nalaze u njenim dubljim slojevima. Fotoreceptorske stanice su fotoosjetljive živčane stanice. Podražene svjetlošću one uzrokuju kemijske procese koji u sljedećim slojevima živčanih stanica uzrokuju generiranje potencijala, odnosno električnog impulsa. Ljudsko oko sadrži dva glavna tipa fotoreceptorskih stanica: čunjiće i štapiće. Čunjići su aktivni u uvjetima dobre osvijetljenosti. U uvjetima prigušene osvijetljenosti njihova aktivnost je umanjena, a u uvjetima loše osvijetljenosti nisu aktivni. Štapići se aktiviraju u uvjetima prigušene osvijetljenosti, dok u uvjetima dobre osvijetljenosti nisu aktivni. Slijedi da su za fotopički vid zaslužni čunjići, za mezopički vid čunjići i štapići (ali nisu u potpunosti aktivni), te za skotopički vid štapići. Postoji i treći tip fotoreceptorskih stanica, a to su fotosenzitivne ganglijske stanice koje su važne za refleksivne reakcije na jarko danje svjetla.

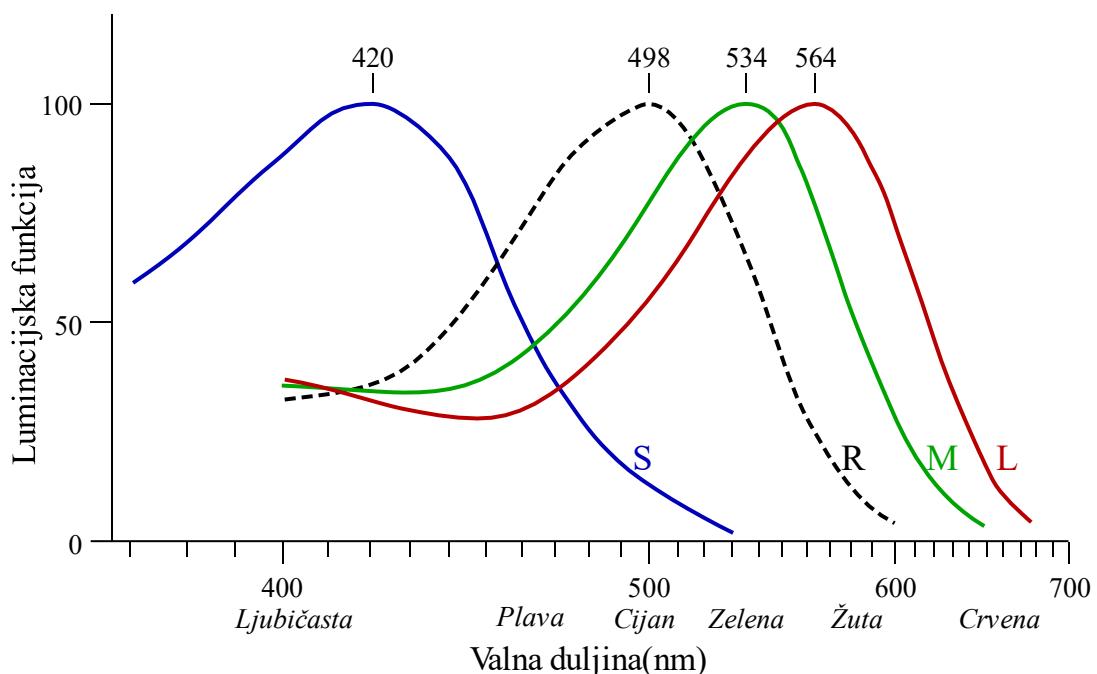


Slika 1.4. Građa ljudskog oka.

Fotopički vid je vid u uvjetima dobre osvijetljenosti. Dopušta percepciju boja i ima dobru čistinu/rezoluciju vida (sposobnost oka da razabire fine detalje i da jasno vidi dvije odvojene točke) i bolju vremensku rezoluciju. Fotopički vid je baziran na radu čunjića. Ljudsko oko koristi tri vrste čunjića od kojih svaka vrsta detektira svjetlost iz određenog intervala valne duljine. Svaki čunjic sadrži pigment koji ima maksimalnu vrijednost apsorpcije (tj. maksimalnu svjetlosnu učinkovitost zračenja, odnosno maksimalan stupanj iskorištenja zračenja, odnosno luminacijska funkcija postiže vrijednost 1) pri valnoj duljini od 420 nm (plavo), 534 nm (plavo-zeleno) ili 564 nm (žuto-zeleno). Luminacijske funkcije pojedinog pigmenta (Slika 1.5) se preklapaju te formiraju luminacijsku funkciju fotopičkog vida koja postiže maksimum pri valnoj duljini od 555 nm (zeleno). Nedostatak čunjića određenog

pigmenta uzrokuje drugačiju resultantnu luminacijsku funkciju, a u slučaju nedostatka žuto-zelenog pigmenta potpunu sljepoću na svjetlost valne duljine veće od 670 nm (što odgovara percepciji boja većine sisavaca ne primata).

Skotopički vid je vid u uvjetima loše osvijetljenosti. Skotopički vid ne razlikuje boje (vidi crno bijelo), ima nižu rezoluciju vida i lošiju vremensku rezoluciju. Ostvaruje se kroz rad štapića kojih postoji samo jedna vrsta. Luminacijska funkcija skotopičkog vida (Slika 1.5), odnosno štapića, postiže maksimum pri valnoj duljini od 507 nm (zeleno-plava) ili 498 u nekoj literaturi, a jednaka je nuli za valne duljine veće od 640 nm (crveno-narančasta). Razlog tomu može biti evolucijska prilagodba tome da su u sunčevom spektru na Zemlji ujutro i navečer, kada je osvijetljenost slabija, zastupljeniji plavi tonovi. Posljedica pomaka luminacijske funkcije skotopičkog vida prema plavom dijelu spektra i neosjetljivost na crveni dio spektra je Purkinjeov efekt. Kako u uvjetima prigušene osvijetljenosti štapići postanu dominantniji u odnosu na čunjiće u formiraju vidi resultantna luminacijska funkcija se pomakne prema plavom dijelu spektra i oko postane slijepo na crvenu boju. Zbog toga u uvjetima prigušene osvijetljenosti okolina dobije plavkastu nijansu, a predmeti crvene boje postanu bezbojni.



Slika 1.5. Luminacijska funkcija (normalizirana na 100) čunjića kratkih (eng. short, S), srednjih (eng. medium, M) i dugih (eng. long, L) valnih duljina i štapića (eng. rods, R).⁵

Jedan štapić je dovoljno osjetljiv da reagira na podražaj jednog fotona, dok je za aktivaciju čunjića potrebno na desetke ili stotine fotona. Nadalje, štapići su međusobno povezani na način da podražaji više štapića generiraju signal čime se postiže svojevrsno pojačanje

⁵ User:Maxim Razin based on work by w:User:DrBob and w:User:Zeimusu. (2007). Spectral absorption curves of the short (S), medium (M) and long (L) wavelength pigments in human cone and rod (R) cells. Preuzeto s: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cone-response-en.svg>

signalima. S druge strane vizualni sustav dobiva informaciju od svakog pojedinačnog čunjića zbog čega skotopički vid ima bolju čistinu/rezoluciju u usporedbi sa skotopičkim. Štapići akumuliraju podražaje koje prime kroz period od 100 milisekundi čime je postignuta veća osjetljivost na svjetlost slabog intenziteta, ali su zato štapići sporiji na promjene u intenzitetu svjetla. Mrežnica sadrži približno 75-150 milijuna štapića i 7 milijuna čunjića.

U uvjetima dobre osvijetljenosti štapići se zasite i ne pružaju nikakve korisne informacije, pa ulogu detekcije kontrasta, odnosno klasifikacije površina iz okoline na svjetlije i tamnije preuzmu čunjići. No s obzirom da fotona ima u izobilju kontrast se više ne dobiva detekcijom apsolutnog broja fotona (kao u slučaju štapića), već iz njihova relativnog broja. Time je čak i u uvjetima jako velike osvijetljenosti očuvana osjetljivost na kontrast.

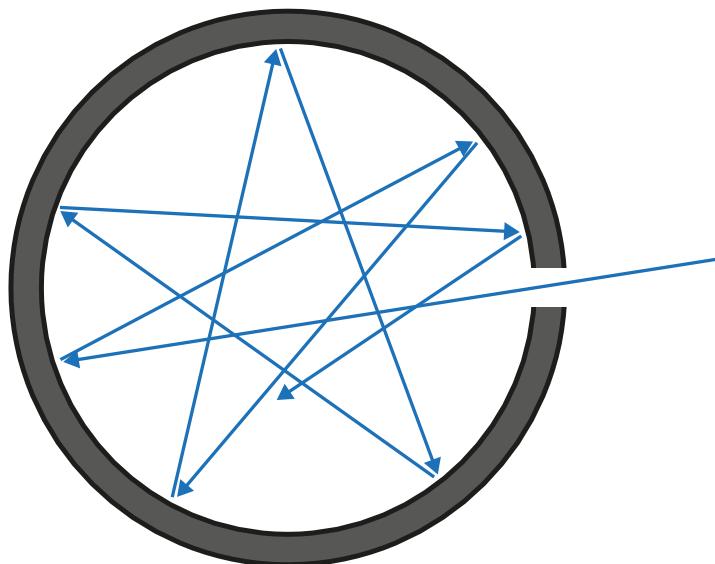
Prilagodba sa skotopičkog na fotopički vid traje približno 5 minuta, dok suprotna prilagodba može trajati i 30 minuta. Područje mrežnice s najvećom koncentracijom čunjića ima žutu pigmentaciju te se naziva žuta pjega. Područje oko žute pjage ima najveću koncentraciju štapića. Mjesto na mrežnici gdje počinje vidni živac ne sadrži čunjiće i štapiće, pa je taj dio mrežnice neosjetljiv na svjetlo. Projekcija tog područja u vidnom polju se naziva slijepa pjega. Iako se u tom segmentu vidnog polja u stvarnosti ništa ne vidi, mozak rekonstruira sliku kao da nema slijepе točke.

2 Uvod u modernu fiziku

2.1 Zračenje crnog tijela

1860-ih godina se u fizici svijet dijelio na materiju i zračenje. Materiju je opisivala Newtonova mehanika i termodinamika, a zračenje Maxwellova teorija elektromagnetizma. Za opisivanje procesa pri kojima materija i zračenje interagiraju postojeće teorije klasične fizike su se pokazale nedostatne. Upravo je opisivanje ovih procesa započelo razvoj nove grane fizike; kvantne fizike. Kako optoelektronika proučava procese pri kojima interagiraju elektromagnetsko zračenje i materija (električni uređaji) potrebno je uvesti određene koncepte iz kvantne mehanike.

Jedan od ovakvih procesa kojeg su fizičari pokušavali objasniti u drugoj polovici 19. st. je toplinsko zračenje krutih tijela. U svakom tijelu postoji određeno termičko gibanje atoma i molekula koje uzrokuje toplinsko, odnosno elektromagnetsko zračenje. Emisijski spektri čvrstih tijela su kontinuirani, odnosno sastoje se od svih valnih duljina između neke minimalne i maksimalne vrijednosti. Kada zračenje pada na površinu neprozirnog tijela dio zračenja se apsorbira, a dio reflektira. Za tijelo koje potpuno apsorbira određene valne duljine se kaže da je crno za taj dio spektra, a za tijelo koje potpuno reflektira određene valne duljine se kaže da je bijelo za taj dio spektra.



Slika 2.1. Šupljina s malim otvorom.⁶

Idealno crno tijelo je idealizirani fizikalni model tijela koje u potpunosti apsorbira cijelo upadno zračenje, a emitira zračenje kontinuiranog spektra čiji maksimum spektralne raspodjele ovisi o njegovoj temperaturi. Kao aproksimacija crnog tijela koristi se izotermna

⁶ AG Caesar. (2018). An approximate realization of a black body: light entering the hole is unlikely to come back out. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Black_body_realization.svg

šupljina (šupljina konstantne temperature) s malim otvorom (Slika 2.1). S obzirom da je gotovo svo zračenje koje padne na otvor šupljine apsorbirano, za otvor šupljine se može reći da se ponaša kao crno tijelo. Nakon ulaska u šupljinu zraka se reflektira veliki broj puta te se potpuno apsorbira. Vjerovatnost da će dio upadnog zračenja izići je vrlo malen. S druge strane iz otvora šupljine ugrijane na neku temperaturu će izlaziti zračenje s kontinuiranom raspodjelom po valnim duljinama (od neke minimalne do maksimalne vrijednosti) što je dobra aproksimacija zračenja crnog tijela. Ugrijana realna tijela se često mogu opisati modelom crnog tijela.

Spektar zračenja crnog tijela je određen eksperimentalno. Ukupna iradijacija zračenja crnog tijela pri nekoj temperaturi je jednaka površini ispod pripadne krivulje. Izraz za ukupnu iradijaciju zračenja crnog tijela je 1879. god. Jožef Stefan odredio iz eksperimentalnih mjerena, a 1884. neovisno o Stefanu ga je teorijski izveo Ludwig Boltzmann. Izraz je nazvan Stefan-Boltzmannovim zakonom:

$$E = \frac{P}{S} = \sigma \cdot T^4, \quad \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4\text{)},$$

gdje je σ Stefan-Boltzmannova konstanta, S površina, a T temperatura tijela. Slijedi da ukupna iradijacija zračenja crnog tijela ne ovisi o obliku ili sastavu tijela već samo o četvrtoj potenciji apsolutne temperature tijela.

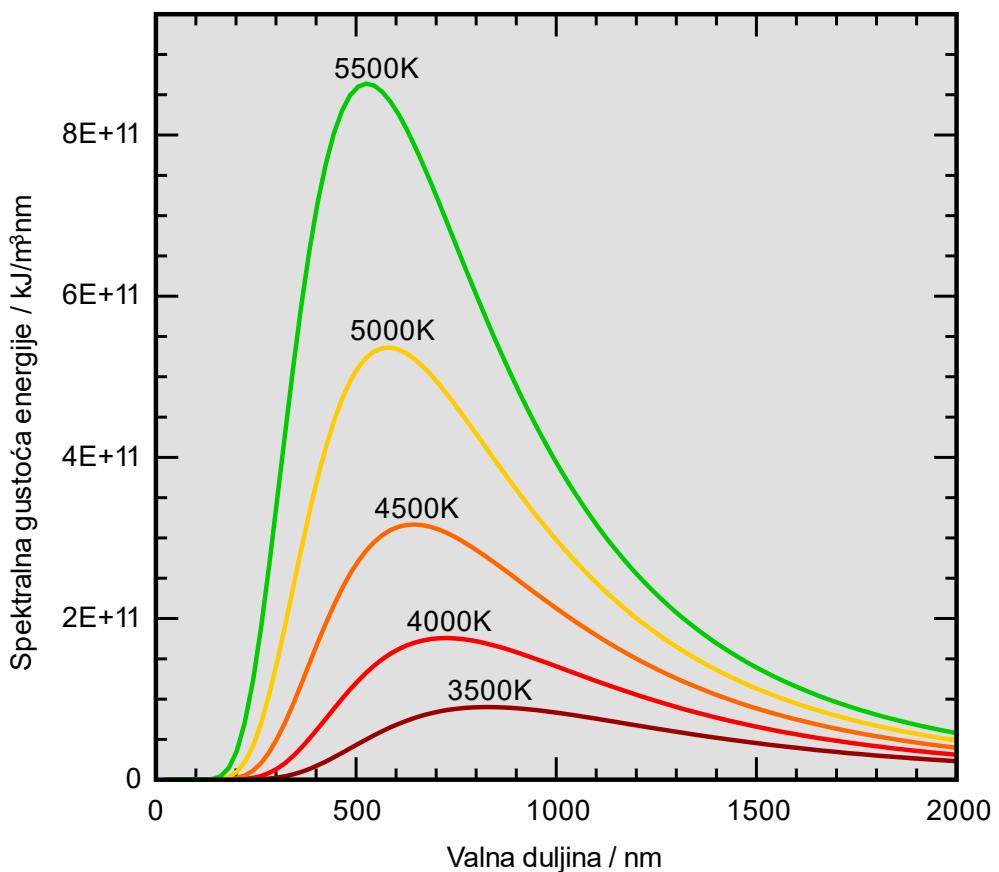
Iradijacija zračenja realnog tijela je pri istoj temperaturi manja nego kod crnog tijela. Odnos snage zračenja realnog i crnog tijela je dano faktorom emisivnosti ε .

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4\text{)}.$$

Iz eksperimentalnih mjerena zračenja također je vidljivo da svaki spektar ima maksimum na određenoj valnoj duljini. Povećanjem temperature maksimum spektra se postiže pri manjoj valnoj duljini (Slika 2.2), pa je tako temperatura plavog usijanog tijela veća od temperaturu crvenog usijanog tijela. Ovisnost valne duljine pri kojoj je iradijacija maksimalna o temperaturi je dana 1893. god. Wienovim zakonom pomaka:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}, \quad b = 2.898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}.$$

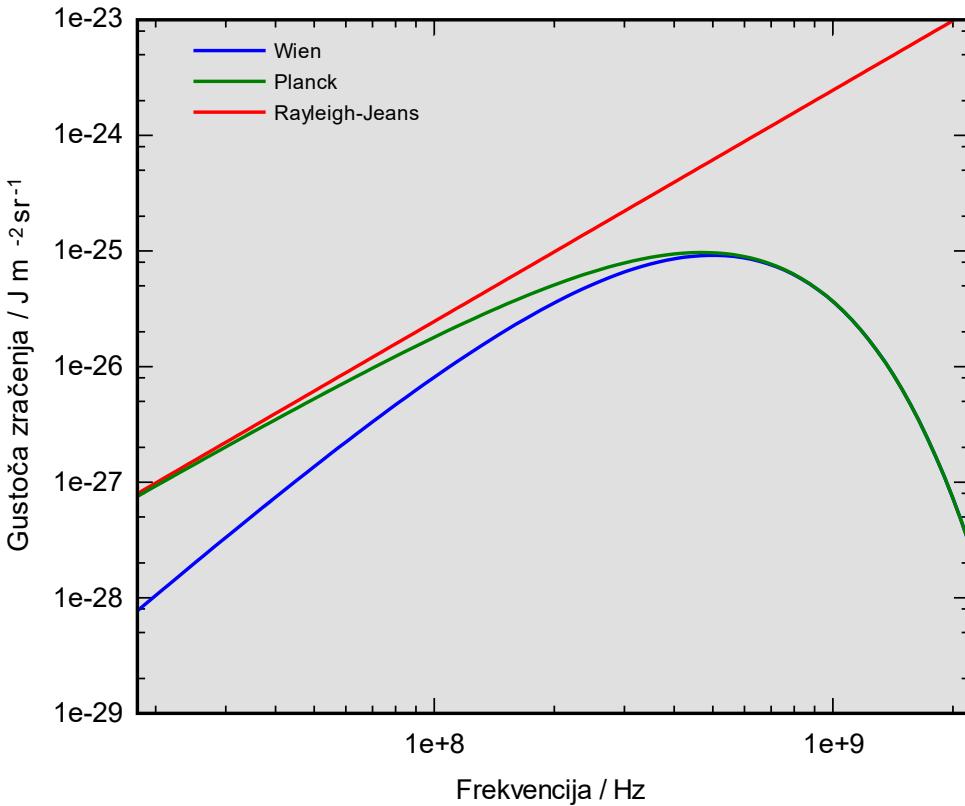
gdje je b Wienova konstanta.



Slika 2.2. Wienov zakon pomaka.⁷

Prema kraju 19. st. je eksperimentalno bio određen spektar zračenja crnog tijela, te su fizičari iz eksperimentalnih podataka pokušavali odrediti relaciju koja opisuje dobiveni spektar kao i njen teoretski izvod. 1900. god. Rayleigh i Jeans su predložili relaciju koja je dobro opisivala zračenje crnog tijela pri većim valnim duljinama (Slika 2.3). Relacija je slijedila iz Maxwellove teorije elektromagnetizma prema kojoj je intenzitet zračenja crnog tijela trebao rasti eksponencijalno s povećanjem frekvencije. To bi značilo da intenzitet zračenja za jako male valne duljine teži u beskonačnost, odnosno da zračenje ima beskonačnu energiju. Ovo predviđanje klasične Maxwellove teorije je naknadno nazvano ultraljubičastom katastrofom. 1896. god. Wilhelm Wien je predložio relaciju koja se danas naziva Wienov zakon, koja je dobro opisivala zračenje crnog tijela pri manjim valnim duljinama ali ne i pri većim (Slika 2.3). Spektralna gustoća zračenja crnog tijela je jedna od prvih pojava koju klasična fizika nije mogla objasniti.

⁷ 4C. (2006). Wien's law of radiation. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wiens_law.svg



Slika 2.3. Zračenje crnog tijela prema Rayleighu, Wienu i Plancku.⁸

Klasična teorija zračenja kreće od pretpostavke da elektromagnetsko zračenje zrače harmonijski oscilatori. Klasični harmonijski oscilator koji titra frekvencijom v može imati bilo koju vrijednost energije od nule do neke maksimalne. Max Planck je 1900. god. odredio izraz za spektar zračenje crnog tijela iz eksperimentalno dobivenih mjerena (Slika 2.3). No njegov pravi uspjeh leži u određivanju teorijskog izvoda tog izraza. Planck je uočio da taj izraz može dobiti samo ako je energija zračenja kvantizirana, odnosno ako harmonijski oscilator može primiti ili emitirati samo određene, kvante, energije ili njegove cjelobrojne višekratnike. Planck je prepostavio da je taj kvant energije proporcionalan s frekvencijom zračenja, a koeficijent proporcionalnosti je konstanta koja je kasnije nazvana Planckova konstanta čija je vrijednost određena eksperimentalno.

$$E_{min} = h\nu,$$

$$E = n \cdot h\nu, \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

Ako je emitirana ili apsorbirana energija kvantizirana, onda je i energija harmonijskog oscilatora kvantizirana, odnosno oscilator može poprimiti samo određene vrijednosti energije. Takav oscilator se naziva kvantni harmonijski oscilator ili Planckov oscilator. Oscilator ovdje može predstavljati atom ili molekulu koja titra ili stojni elektromagnetski val u šupljini. Pretpostavka o kvantizaciji energije se naziva Planckovom hipotezom, a izraz za

⁸ Sfu. (2006). Comparison of historical black body radiation laws: Rayleigh-Jeans, Wien and Planck. Temperature of the body is 8 mK. Preuzeto s: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:RWP-comparison.svg>

spektar zračenja crnog tijela koji je na temelju te hipoteze izведен Planckovim zakonom zračenja crnog tijela. Planckov zakon izražen u ovisnosti o valnoj duljini i temperaturi glasi:

$$L_{e,\lambda}(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi \lambda^5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right) \left[\frac{W}{m^3 sr} \right],$$

gdje je $c_1 = 3.74 \cdot 10^{-16} W/m^2$ i $c_2 = 1.439 \cdot 10^{-2} mK$. Pošto je dan izraz za gustoću zračenja po valnoj duljini nazivnik sadrži jednu potenciju od m više nego što je slučaj samo za gustoću zračenja. Wienov zakon pomaka i Stefan-Boltzmannov zakon se mogu izvesti iz Planckova zakona. Planckova hipoteza se ne može opravdati u kontekstu klasične fizike, ali ona daje izraz za zračenje crnog tijela koji je u skladu s mjeranjima zbog čega se kvantiziranost treba prihvatići kao činjenicu koja postoji u prirodi.

2.2 Fotoelektrični efekt

Prema klasičnoj valnoj teoriji elektromagnetski valovi se šire sinusoidalnim titranjem električnog i magnetskog polja s istom frekvencijom i u fazi. Vrijedi $\vec{E} \perp \vec{B} \perp$ (smjer širenja vala). Ako se val širi u smjeru x osi, \vec{E} oscilira u smjeru y osi, a \vec{B} u smjeru z osi (Slika 2.4). Kada izvor vala harmonički titra riješenje valne jednadžbe za električno i magnetsko polje je oblika:

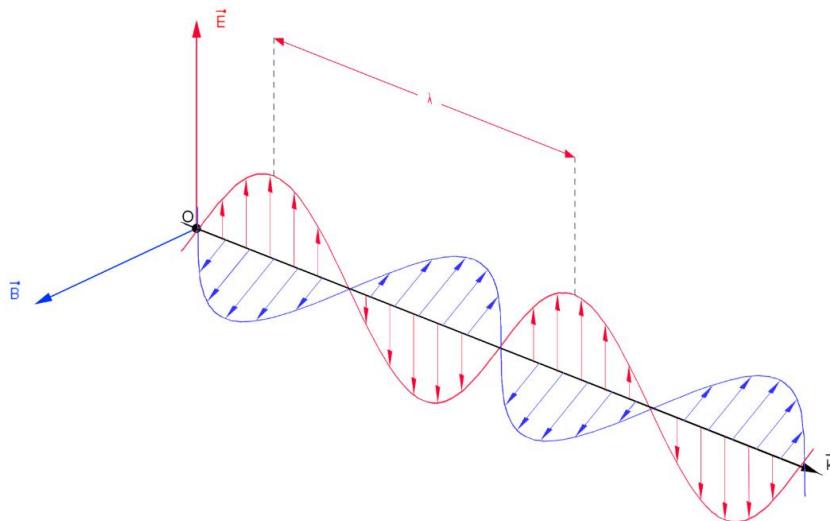
$$E = E_0 \sin(kx - \omega t),$$

$$B = B_0 \sin(kx - \omega t),$$

gdje je $\omega = 2\pi f$ kutna frekvencija, k valni broj, a E_0 i B_0 amplituda električnog, odnosno magnetskog polja. Intenzitet elektromagnetskog vala, energija koju elektromagnetski val prenese kroz jedinicu površine u jedinici vremena, je dan izrazom:

$$I = \frac{P}{E} = \frac{E_0^2}{2c\mu_0} \left[\frac{W}{m^2} \right],$$

gdje je μ_0 permeabilnost vakuuma. Slijedi da je intenzitet elektromagnetskog vala proporcionalan kvadratu amplitude električnog polja tog vala.



Slika 2.4. Elektromagnetsko polje.⁹

U metalima postoje slobodni elektroni koji se mogu slobodno gibati unutar kristalne rešetke metala, ali ne mogu napustiti metal bez ulaganja vanjske energije. Energija potrebna za izbijanje elektrona, za njegovo napuštanje metala, se naziva izlazni rad. Ta se energija elektronu može dovesti izlaganjem metala elektromagnetskim zračenjem. Pojava izbijanja elektrona iz metala pri izlaganju površine metala elektromagnetskom zračenju se naziva fotoelektrični efekt. Prema klasičnoj valnoj teoriji povećanjem intenziteta elektromagnetskog zračenja se povećava energija zračenja. Pojačavanjem intenziteta raste amplituda električnog polja koje titra elektrone sve većom električnom silom te im time daje sve veću energiju. No, eksperiment je pokazao da izbijanje elektrona iz metala ne ovisi o intenzitetu zračenja već o njegovoj frekvenciji. Površina metala može biti obasjana zračenjem neograničenog intenziteta, neograničeno dugo, ali elektroni neće napuštati metal ako frekvencija zračenja nije veća od neke granične frekvencije. Prema klasičnoj valnoj teoriji fotoelektrični efekt bi se trebao dogoditi za bilo koju frekvenciju zračenja ako je intenzitet elektromagnetskog vala dovoljno velik.

Heinrich Hertz je 1887. god. opazio da je intenzitet iskre koja nastaje između elektroda veća ako je negativna elektroda (ona koju napuštaju elektroni) obasjana ultraljubičastom svjetlošću, a godinu dana kasnije je utvrđeno kako iz metala koji je obasjan svjetlošću određene frekvencije izlaze elektroni. Fotoelektrični efekt je u konačnici objasnio Albert Einstein 1905. god. tako što je proširio Planckovu hipotezu na elektromagnetsko zračenje. Pretpostavio je da je elektromagnetsko zračenje kvantizirano, odnosno da ga čine kvatni svjetlosti koje je nazvao fotoni. Energija fotona je tada dana relacijom:

$$E = h\nu,$$

koja se danas naziva Planck-Einsteinova relacija. Količinu gibanja fotona je tada jednaka:

$$p = mc = \frac{E}{c^2}c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

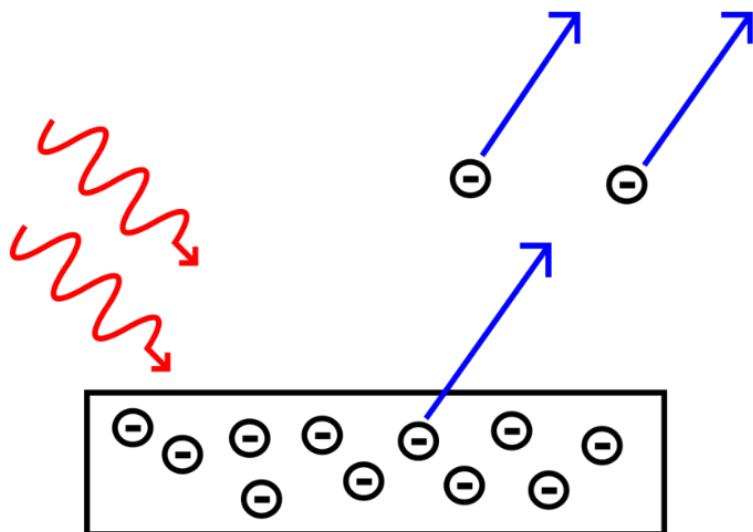
⁹ Ploufandsplash. (2007). Schéma d'une onde électromagnétique. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Onde_electromagn%C3%A9tique.png

Ako se elektromagnetsko zračenje zamisli kao roj fotona fotoelektrični efekt se može opisati na sljedeći način. Kada foton upadne na površinu metala i sudari se s elektronom taj elektron apsorbira foton. Apsorpcijom foton nestaje, odnosno predaje elektronu svu svoju energiju. Elektron koji apsorbira foton se naziva fotoelektron. Einsteinova relacija za fotoelektrični efekt glasi;

$$E_{fotona} = W_{izlazni} + E_{kinetička,maks},$$

$$h\nu = h\nu_0 + \frac{m_e v_{maks}^2}{2},$$

gdje je prvi član energija fotona, drugi član izlazni rad, a treći član maksimalna kinetička energija fotoelektrona. Izlazni rad je energija koju je potrebno uložiti da bi slobodni elektron svladao potencijalnu energiju kojom je vezan u atomu. Ostatak energije apsorbiranog fotona se pretvori u kinetičku energiju fotoelektrona (Slika 2.5). U Einsteinovoj relaciji je trećim članom dana maksimalna kinetička energija koju fotoelektron može imati, no mnogi elektroni iz metala izađu i s manjom kinetičkom energijom jer na svom putu iz metala izgube dio kinetičke energije kroz sudare s atomima kristalne rešetke. Granična frekvencija ν_0 je najmanja frekvencija koju foton mora imati da bi izbio elektron, tj. da bi došlo do fotoelektričnog efekta. Elektron izbijen fotonom granične frekvencije neće imati kinetičku energiju jer je sva energija fotona utrošen na izlazni rad.



Slika 2.5. Fotoelektrični efekt.¹⁰

Fizikalne veličine u valnom i čestičnom opisu elektromagnetskog zračenja se mogu povezati na sljedeći način. Povećanjem frekvencije zračenja se povećava frekvencija, odnosno energija, pojedinačnog fotona, a povećanjem intenziteta zračenja se povećava tok fotona, odnosno broj fotona koji po jedinici površine u jedinci vremena padnu na površinu metala.

¹⁰ Wolfmankurd. (2007). Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photoelectric_effect.svg

Veći broj fotona rezultira većem broju sudara fotona i elektrona, no ti fotoni mogu izbiti elektron, tj. izazvati fotoelektrični efekt, samo ako je njihova frekvencija veća od granične. U suprotnom fotoni, bez obzira koliko ih ima, ne mogu pobuditi elektron.

Fotonaponski efekt je pojava slična fotoelektričnom efektu. U oba slučaja apsorpcijom svjetlosti dolazi do pobuđenja elektrona u pobuđeno stanje. No kod fotoelektričnog efekta pobuđeni elektron napusti tvar, dok kod fotonaponskog efekta pobuđeni elektron ostane u tvari, prijeđe npr. u vodljivu vrpcu. U oba slučaja svjetlost uzrokuje razdvajanje naboja i stvaranje električnog potencijala (napona), a o energiji svjetlosti ovisi do koje mjeru će taj potencijal biti nadvladan.

Fotokondukcija je pojava da materijal postane električki vodljiviji uslijed izlaganja elektromagnetskom zračenju.

2.3 Valno-čestična dualnost

U klasičnoj fizici veličine kao što su masa i količina gibanja se koriste za opisivanje materije, a valna duljina, frekvencija i amplituda za opisivanje valova, odnosno zračenja. Albert Einstein je 1905. god. pretpostavio da elektromagnetsko zračenje ima čestičnu prirodu, pa se postavlja pitanje ima li materija valnu prirodu. Louis de Broglie je 1924. god. postavio hipotezu prema kojoj svaka čestica koja se giba osim čestičnih ima i valna svojstva. Prema De Broglieovoj relaciji čestica mase m koja se giba brzinom v ima De Broglieovu valnu duljinu λ :

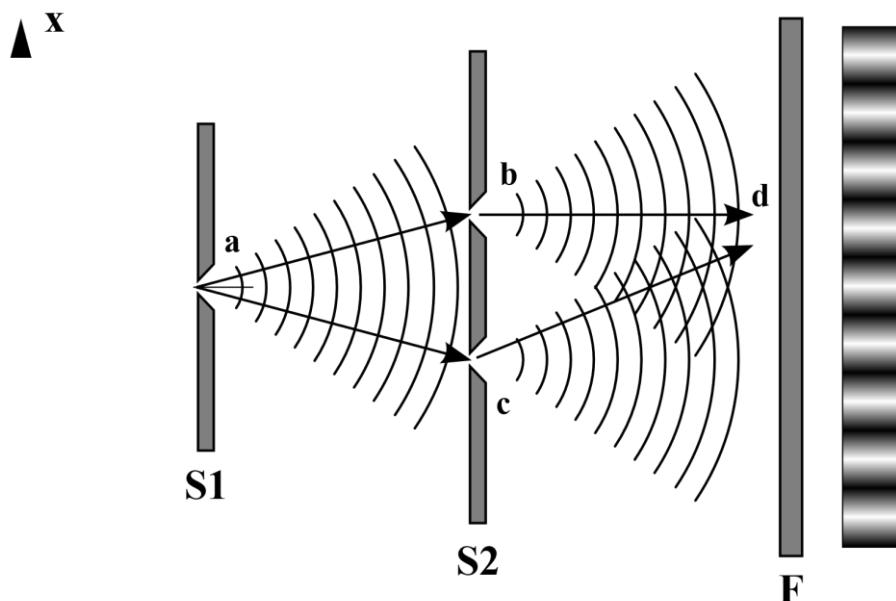
$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$$

Iz prethodne relacije slijedi da je valna duljina čestice obrnuto proporcionalna njegovoj količini gibanja. S obzirom da makroskopski objekti imaju veliku količinu gibanja u usporedbi s količinom gibanja čestice njihova valna duljina će biti toliko mala da se valna svojstva neće manifestirati u makroskopskom svijetu. No u mikroskopskom svijetu količina gibanja čestice je dovoljno mala da njena valna duljina nije zanemariva te se valna priroda čestice ne može zanemariti pri opisivanju procesa.

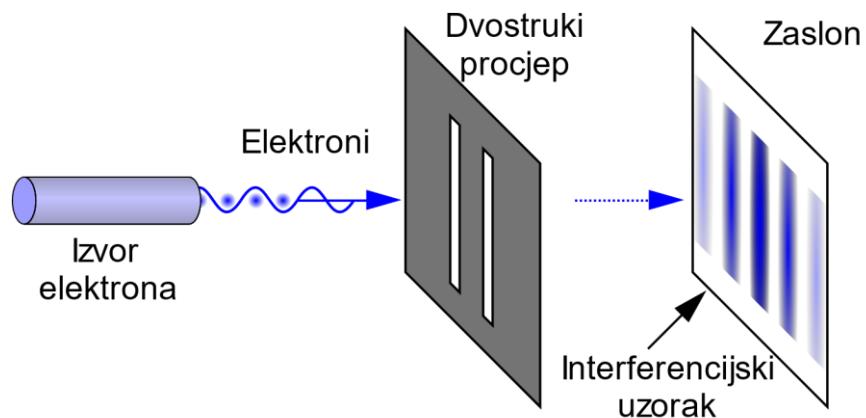
Thomas Young je 1801. god. izveo eksperiment na dvije pukotine sa svjetlosti čime je dokazao njenu valnu prirodu. Monokromatska svjetlost iz izvora pada na zaslon s okruglim otvorom čime se dobije točkasti izvor monokromatske svjetlosti. Svjetlost iz tog izvora dalje pada na drugi zaslon s dvije međusobno razmaknute pukotine čime se dobiju dva točkasta monokromatska koherentna izvora. Dva izvora vala su koherentna ako imaju konstantnu faznu razliku i istu frekvenciju. Svjetlost iz ta dva izvora dalje pada na treći zaslon na kojem se stvara interferencijski uzorak. Interferencijski uzorak se sastoji od svjetlijih i tamnijih pruga koje nastaju kao rezultat konstruktivne i destruktivne interferencije (Slika 2.6). Iako su izvori koherenti dok valovi dođu od drugog do trećeg zaslona između njih će se javiti razlike u fazi o kojoj će ovisiti koliko će interferencija između njih biti konstruktivna, a koliko destruktivna.

Rezultati eksperimenta na dvije pukotine sa svjetlosti nisu iznenadujući. No iznenadujuće je to što se isti rezultat dobije u eksperimentu na dvije pukotine s elektronima. Neka elektroni iz točkastog izvora padaju na zastor s dvije pukotine iza kojeg se nalazi fotografска ploča koja registrira svaki elektron koji prođe kroz pukotinu (Slika 2.7). Za svaki elektron koji je prošao

kroz pukotinu na fotografskoj ploči ostane svjetla točka. Elektroni se puštaju iz izvora s dovoljnim vremenskim odmakom da međusobno ne interagiraju. Pri otvorenoj samo lijevoj ili samo desnoj pukotini dobije se uzorak normalne raspodijele. No kada su otvorene obje pukotine ne dobije se raspodjela koja je zbroj raspodjela za pojedinačne pukotine, što je slučaj kod makroskopskih čestica, već se dobije interferencijski uzorak kao kod Youngovog eksperimenta sa svjetlosti (Slika 2.8). Postoje i drugi eksperimenti kojima se može dokazati postojanje valnih svojstava mikroskopskih čestica.



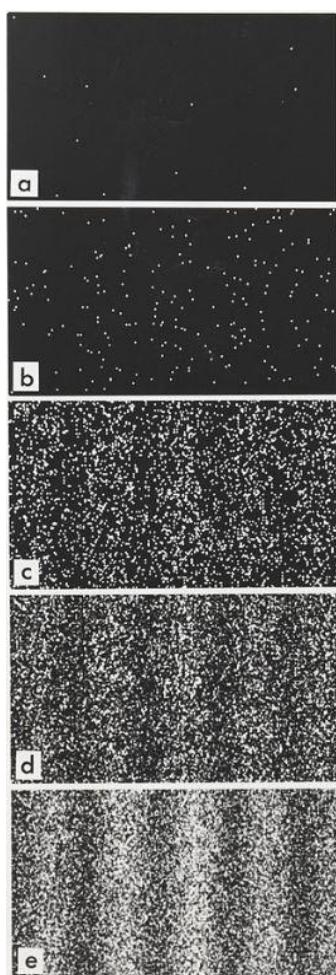
Slika 2.6. Youngov eksperiment na dvije pukotine.¹¹



Slika 2.7. Eksperiment s elektronima na dvije pukotine.¹²

¹¹ en:User:Lacatosias, User:Stannered. (2006), (2008). Diagram of the double-slit experiment. Preuzeto s: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ebohr1.svg>

¹² Original: NekoJaNekoJa. Vector: Johannes Kalliauer. (2017). An illustration of the 'Double-slit experiment' in physics. Preuzeto s: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Double-slit.svg>



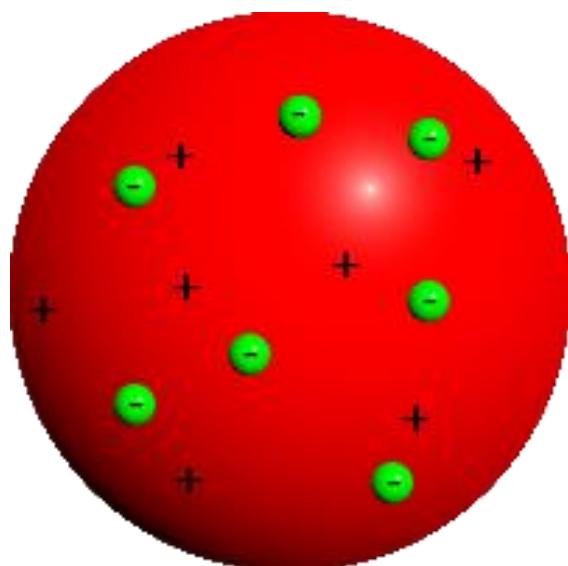
Slika 2.8. Uzorak dobiven akumulacijom ispucanih elektrona.¹³

Valno-čestična priroda materije i zračenja spaja svojstva koja su u klasičnoj fizici nespojiva. Čestica je lokalizirana i prebrojiva, dok se val s druge strane prostire u više točaka u prostoru istovremeno. Postoje procesi pri kojima se manifestiraju čestična svojstva materije, te postoje procesi pri kojima se manifestiraju njena valna svojstva. Isto vrijedi i za zračenje. Pojave koje se događaju u mikroskopskom svijetu su često u suprotnosti s ljudskom intuicijom. No to ne znači da nisu moguće, već samo da se razlikuju od pojava s kojima se ljudska osjetila susreću na makroskopskoj razini.

2.4 Bohrov model atoma

¹³ User:Belsazar. (2012). Results of a double-slit-experiment performed by Dr. Tonomura showing the build-up of an interference pattern of single electrons. Numbers of electrons are 11 (a), 200 (b), 6000 (c), 40000 (d), 140000 (e). Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Double-slit_experiment_results_Tanamura_2.jpg

1897. god. J.J. Thomson je istražujući katodne zrake zaključio: da se katodne zrake sastoje od negativno nabijenih čestica, da je masa tih čestica više od 1000 puta manja od najmanjeg atoma (vodika) i da te čestice proizlaze iz atoma te su njegova građevna jedinica pa je atom djeljiva jedinica. Također je izmjerio omjer električnog naboja i mase elektrona. 1903. god. pretpostavio je da je atom pozitivno nabijena kuglica sfernog oblika, polumjera oko 10^{-10} m, unutar koje su ravnomjerno raspoređeni negativno nabijeni elektroni tako da je atom kao cjelina neutralan (Slika 2.9). Thomsonov model atoma je nazvan model pudinga s šljivama, gdje okrugli puding čini atom u kojem se poput šljiva u pudingu nalaze elektroni.

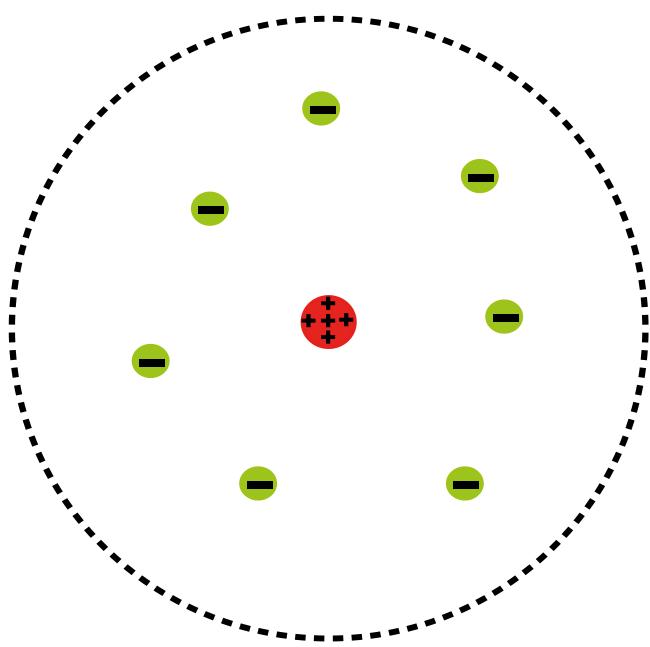


Slika 2.9. Thomsonov model atoma.¹⁴

1909. god. R.A. Millikan je izmjerio naboј elektrona, a iz poznat omjera naboјa i mase je onda određena i njegova masa.

1911. god. Ernest Rutherford je na temelju eksperimenata s raspršenjem alfa-čestica (jezgra atoma helija) na tankim listićima zlata, zaključio: da atom ima jezgru čija je dimenzija mnogo manja od dimenzije atoma, da je gotovo sva masa atoma skoncentrirana u jezgri, da je jezgra pozitivno nabijena i da oko jezgre kruže negativno nabijeni elektroni mase mnogo manje od jezgre. Ovaj model atoma je naknadno nazvan Rutherfordov model atoma (Slika 2.10).

¹⁴ Night Ink. (2004). *Thomsonsches Atommodell*. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Thomsonsches_atommodell.png



Slika 2.10. Rutherfordov model atoma.¹⁵

Prema klasičnoj elektrodinamici nabijena čestica kojoj se mijenja brzina zrači elektromagnetsko zračenje. Prema Rutherfordovom modelu elektroni kruže po putanjama oko jezgre. S obzirom da im se pri tome konstantno mijenja smjer vektora brzine elektroni bi trebali neprestano zračiti elektromagnetske valove. Time bi gubili energiju, te se postepeno po spiralnoj putanji približavali jezgri dok konačno ne padnu u nju. To naravno ne može biti ispravno jer bi se time svi atomi urušili u sebe. Nadalje, kontinuiranim zračenjem elektromagnetskih valova emisijski spektar atoma bi bio kontinuiran, što nije slučaj.

Čvrsta tijela i plinovi pri visokom tlaku i temperaturi emitiraju elektromagnetsko zračenje kontinuiranog spektra. Ovo zračenje je uspješno objašnjeno Planckovim zakonom zračenja crnog tijela. Atomi razrijeđenih plinova i para metala pobuđeni toplinom, električnim poljem ili električnom strujom također emitiraju elektromagnetsko zračenje, no njihov spektar nije kontinuiran već diskretan.

1913. god. Niels Bohr je predložio svoj model atoma, naknadno nazvan Bohrov model atoma, kojim je osigurana stabilnost atoma, te objašnjen diskretan emisijski spektar atoma. Bohr je pretpostavio da se elektron u atomu ne može gibati oko jezgre po bilo kojoj putanji već samo po određenim kvantiziranim kružnim stazama (Slika 2.11). Nadalje, dok se elektron giba po određenoj stazi ne zrači elektromagnetsko zračenje, odnosno ne gubi energiju. Za elektron se kaže da je u stacionarnom stanju. S obzirom da svakom stacionarnom stanju odgovara određena energija za elektron se kaže da se nalazi na određenom energetskom nivou ili energetskoj razini u atomu. Druga Bohrova pretpostavka je da prelaskom s više na nižu energetsku razinu elektron otpušta energiju u obliku elektromagnetskog zračenja, tj. fotona, odnosno da prelaskom s niže na višu energetsku razinu elektron apsorbira foton. Emitirani i apsorbirani foton pri tome mora imati takvu frekvenciju da njegova energija bude jednaka razlici energija dviju energetskih razina.

¹⁵ Bensteele1995. (2012). Basic diagram of the atomic planetary model: electrons in green and nucleus in red. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rutherford_atomic_planetary_model.svg

$$E_{fotona} = h\nu = E_m - E_n,$$

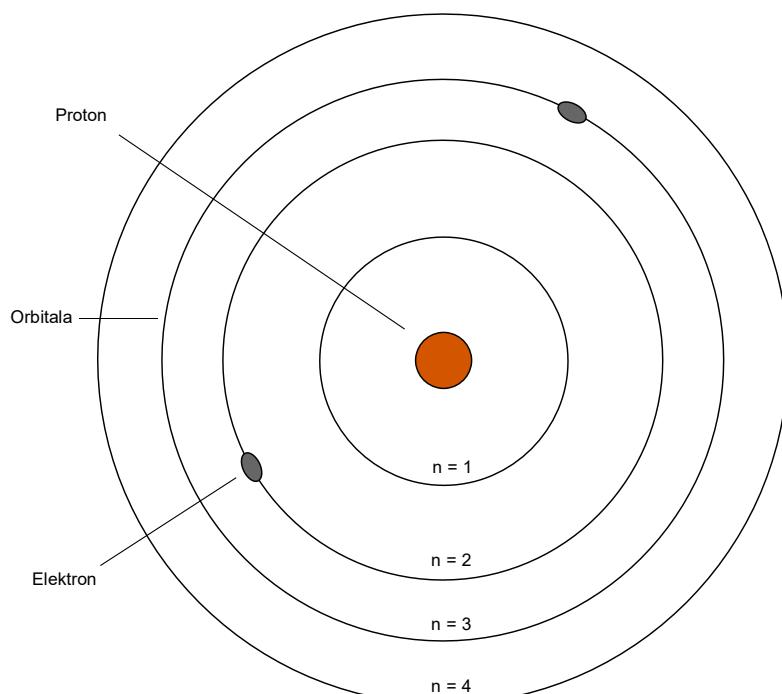
$$\nu = \frac{\Delta E}{h}.$$

Prema Bohrovom modelu atoma energija elektrona na n-toj energetskoj razini je jednaka:

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}, n = 1, 2, 3 \dots$$

gdje je m_e masa elektrona, e naboj elektrona, ϵ_0 permitivnost vakuma, a h Planckova konstanta. Prema Bohrovom modelu između pozitivno nabijene jezgre i negativno nabijenog elektrona djeluje privlačna Coulombova sila, što znači da je potencijalna energija tog sustava negativna. Iz prethodne formule slijedi da je energija vezanja, energija u osnovnom stanju, jednaka $E_1 = -13,6 \text{ eV}$. To je energija koju je potrebno uložiti da bi elektron oslobođio iz atoma vodika, odnosno da bi se atom ionizirao pa se još naziva i energija ionizacije.

Emisijski spektar atoma vodika se sastoji od niza diskretnih spektralnih linija. Svaka linija predstavlja foton određene valne duljine. Spektralne linije koje su rezultat prijelaza elektrona iz svih pobuđenih stanja u određeno stanje će biti slične frekvencije pa ih se može grupirati u seriju (Slika 2.12). Svako stanje u atomu vodika će tako imati svoju seriju spektralnih linija, nazvanu prema osobi koja ju je otkrila.



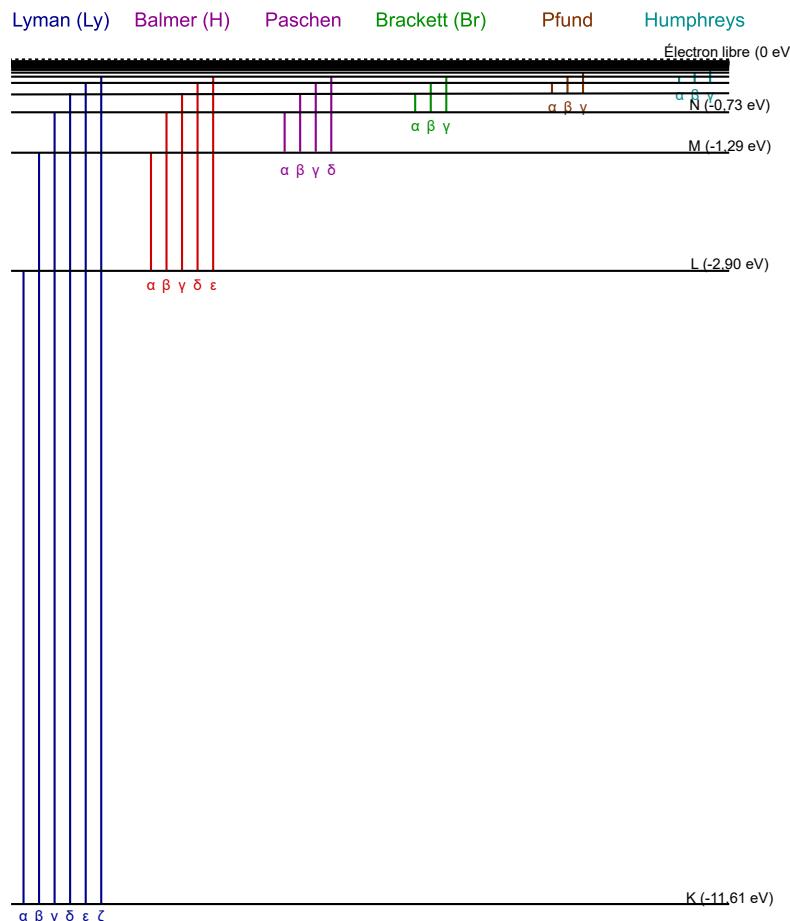
Slika 2.11. Bohrov model atoma.¹⁶

¹⁶ Sharon Bewick (raster); Adrignola (vector). (2010). A schematic illustration of the Bohr model of the atom. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bohr%27s_model.svg

Lymanova serija uključuje one linije za koje elektron završi u osnovnom stanju, a linije su u ultraljubičastom dijelu spektra. Balmerova serija odgovara prvom pobuđenom stanju, a linije su u vidljivom i ultraljubičastom dijelu spektra. Paschenova serija odgovara drugom, Brackettova serija trećem, a Pfundova serija četvrtom pobuđenom stanju, a njihove linije su u infracrvenom dijelu spektra. Valne duljine svih linija su određene poopćenom Balmerovom formulom:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

gdje m odgovara konačnom, a n pobuđenom stanju elektrona. Za Lymanovu seriju $m = 1$, Balmerovu seriju $m = 2$, Paschenovu seriju $m = 3$, Brackettovu seriju $m = 4$ i Pfundovu seriju $m = 5$. n za seriju m poprima cijelobrojne vrijednosti od $m + 1$ do beskonačno. Za velike vrijednosti od n spektralne linije se više ne mogu razlučiti. R je Rydbergova konstanta ($R = 1,097 \cdot 10^7 m^{-1}$).



Slika 2.12. Energetske razine vodikovog atoma sa serijama.¹⁷

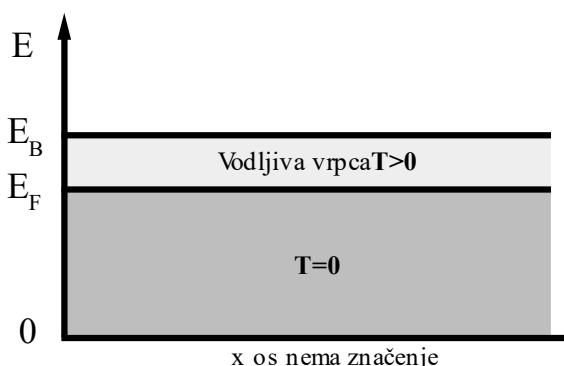
¹⁷ Régis Lachaume. (2007). Spectral lines of the hydrogen atom, sorted by series. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spectral_lines_of_the_hydrogen_atom.svg

3 Poluvodiči

3.1 Građa poluvodiča

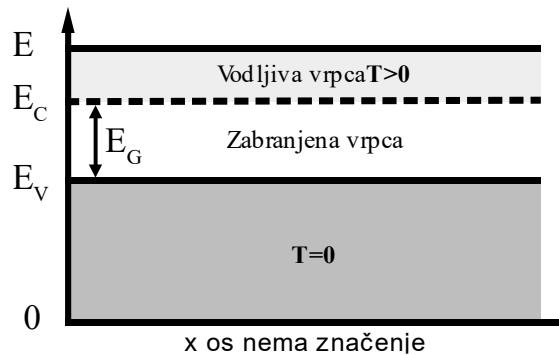
Tvari u krutom agregatnom stanju se prema strukturi, odnosno raspodjeli atoma i molekula, mogu podijeliti na amorfne (nepravilna raspodjela) i kristalne (pravilna raspodjela) tvari. Atomi, ioni ili molekule tvari s kristalnom strukturom su raspoređeni u kristalnu rešetku, te se takva tvar naziva kristal. S obzirom na vrstu kemijske veze kristali se nadalje mogu podijeliti na ionske, metalne i kovalentne kristale. S obzirom na specifični omski otpor čvrste tvari se mogu podijeliti na vodiče, poluvodiče i izolatore. Metalni kristali najčešće čine vodiče, a ionski i kovalentni kristali poluvodiče i izolatore.

Potencijalna energija elektrona u kristalu se može prikazati energetskim dijagramom. U vodiču postoje dvije energetske vrpce; valentna i vodljiva (Slika 3.1). Prelaskom iz valentne u vodljivu vrpcu elektroni postaju slobodni. Stavljanjem vodiča u vanjsko električno polje nasumično gibanje slobodnih elektrona u vodljivoj vrpci postaje usmjereni i to u smjeru suprotnom od vanjskog polja. Kaže se da vodič provodi električnu energiju kada u njemu postoji usmjereni gibanje slobodnih elektrona. Maksimalna energija elektrona na apsolutnoj nuli odgovara Fermijevoj energiji. Da bi elektron prešao u vodljivu vrpcu, da bi postao slobodan, njegova energija mora biti veća od Fermijeve. Energija barijere je minimalna energija potrebna elektronu da napusti metal, a jednaka je zbroju Fermijeve energije i izlaznog rada (energije potrebne slobodnom elektronu da napusti metal).



Slika 3.1. Energetski dijagram metala.

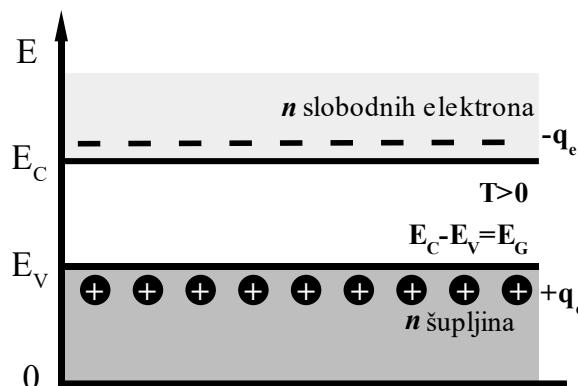
Za razliku od vodiča, kod poluvodiča postoji treća, zabranjena vrpca, pa se energetski dijagram poluvodiča sastoji od valentne, zabranjene i vodljive vrpce (Slika 3.2). Da bi elektron u poluvodiču postao slobodan mora imati dovoljno veliku energiju za svladavanje zabranjene vrpce.



Slika 3.2. Energetski dijagram poluvodiča.

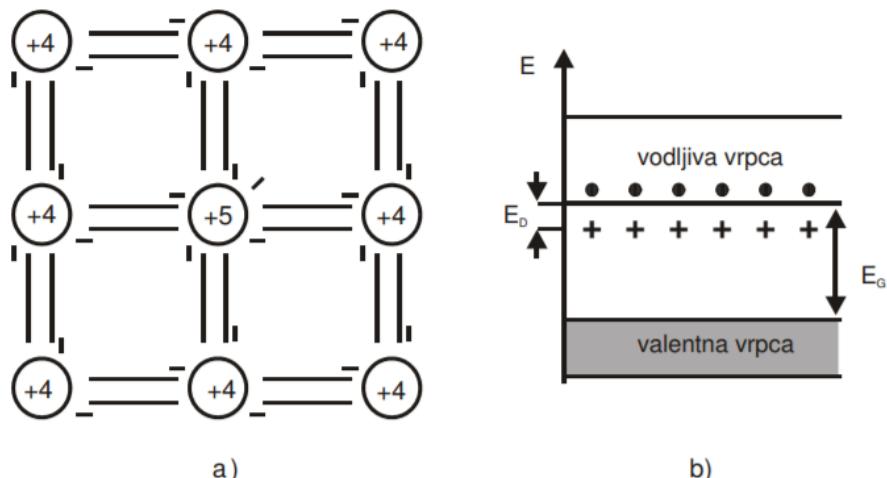
Za razliku od vodiča, poluvodiči na sobnoj temperaturi imaju zanemariv broj slobodnih elektrona (iznad absolutne nule zbog statističke raspodjele će uvjek postojati neki elektroni s dovoljnom energijom da budu slobodni). Dodavanjem primjesa, onečišćenja, u poluvodiče mogu se promjeniti njihova električna svojstva. Poluvodiči bez primjesa se nazivaju intrinsični ili čisti poluvodiči, a poluvodiči gdje primjese bitno utječu na električna svojstva ekstrinsični poluvodiči.

Čisti poluvodič od npr. silicija se sastoji od 4-valentnih atoma silicija međusobno povezanih valentnim vezama u kristalnu rešetku. Ako valentni elektron atoma silicija ima dovoljno veliku energiju da napusti atom doći će do pucanja kovalentne veze i elektron će postati slobodan, tj. ako elektron ima dovoljno veliku energiju da savlada zabranjenu vrpcu prijeći će iz valentne u vodljivu vrpcu. Prelaskom u vodljivu vrpcu elektron iza sebe ostavlja prazno mjesto koje popuni valentni elektron susjednog atoma. Kako time na mjestu elektrona susjednog atoma ostaje prazno mjesto proces se nastavlja. Slijedi da u intrinsičnim poluvodičima postoji gibanje slobodnih elektrona u vodljivoj vrpcu, ali i valentnih elektrona u valentnoj vrpcu. Gibanje valentnih elektrona se opisuje gibanjem pozitivnog naboja, tzv. šupljina, u suprotnom smjeru. U intrinsičnim poluvodičima nositelji naboja nastaju isključivo pucanjem valentnih veza pa oni uvjek dolaze u parovima (Slika 3.3).

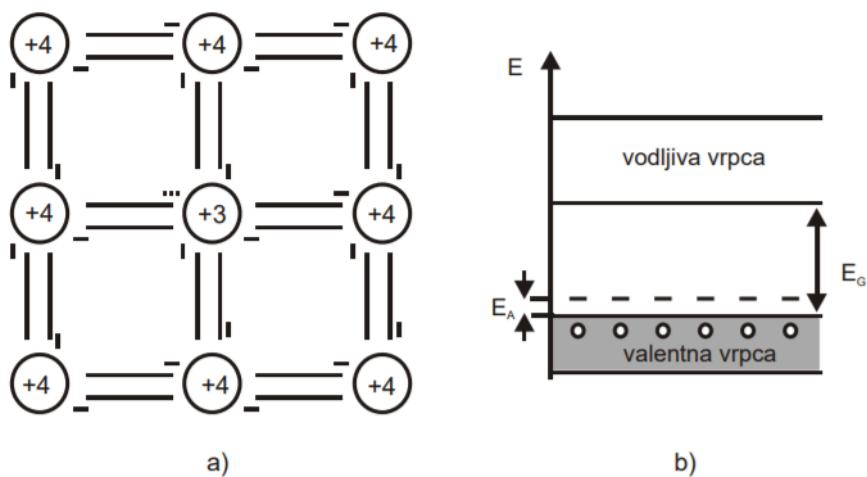


Slika 3.3. Energetski dijagram instrinsičnog poluvodiča.

Prilikom kristalizacije kristalu se mogu dodati primjese. Poluvodiču sačinjenom od atoma iz 4. skupine PSE kao primjese se mogu dodati elementi iz 3. ili 5. skupine, tj. trovalentni (donori) ili peterovalentni (akceptori) atomi. Atomi primjese su fiksni u kristalnoj rešetci. Dodavanjem peterovalentnih primjesa dobiva se poluvodič N-tipa ili donor, a dodavanjem trovalentnih primjesa poluvodič P-tipa ili akceptor. Kristalna rešetka i energetski dijagram poluvodiča N-tipa prikazani su na Slici 3.4, a poluvodiča P-tipa na Slici 3.5.



Slika 3.4. a) Kristalna rešetka i b) energetska vrpca poluvodiča N-tipa.



Slika 3.5. a) Kristalna rešetka i b) energetska vrpca poluvodiča P-tipa.

Donori povećavaju broj slobodnih elektrona, a akceptori broj šupljina. Otpuštanjem jednog valentnog elektrona donor postaje pozitivno nabijen donorski ion, a otpuštanjem šupljine akceptor postaje negativno nabijen akceptorski ion. U ekstrinsičnim poluvodičima izvori nositelja naboja su pucanje kovalentnih veza i primjese. Kako primjese stvaraju samo jedne nositelje naboja, a pucanje kovalentnih veza stvara parove nositelja, slijedi da su ovisno o tipu poluvodiča jedni nositelji naboja zastupljeniji od drugih. U poluvodiču N-tipa većinski

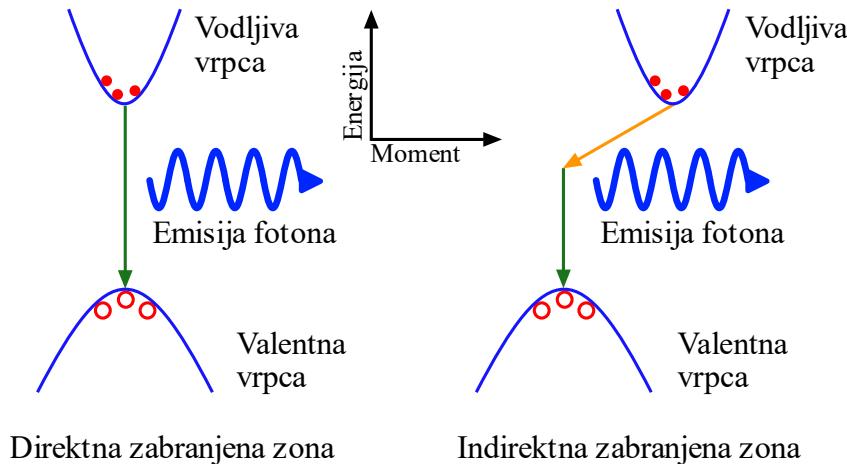
nositelji naboja su slobodni elektroni, a manjinski šupljine. U poluvodiču P-tipa većinski nositelji su šupljine, a manjinski slobodni elektroni. U energetskom dijagramu ekstrinsičnih poluvodiča primjesni nositelji naboja formiraju vrpcu u zabranjenom pojasu.

Dok u poluvodičima valentne veze ne pucaju u značajnijem broju ni pri sobnoj temperaturi, atomi donori i akceptori otpuštaju nositelje naboja već pri temperaturama malo većim od apsolutne nule. Slijedi da su pri sobnoj temperaturi svi donori i akceptori ionizirani, odnosno svi slobodni elektroni koji potječu od donora su u vodljivoj vrpci, a sve šupljine koje potječu od akceptora su u valentnoj vrpci. Nositelji naboja se tijekom vremena generiraju (stvaraju), ali i rekombiniraju (spajaju). U stanju ravnoteže generacija i rekombinacija su izjednačene. Svaki poluvodič koji se ne nalazi u vanjskom električnom polju je električki neutralan.

3.2 Direktni i indirektni prijelazi

Energija elektrona u poluvodiču ovisi i o njegovom valnom vektoru. Pri prijelazu elektrona između vrpci osim zakona očuvanja energije mora biti zadovoljen i zakon očuvanja valnog vektora. U energetskom dijagramu poluvodiča se valni vektor može prikazati tako da vertikalna os označava energiju, a horizontalna os valni vektor elektrona. Ako su u energetskom dijagramu poluvodiča maksimum valentne vrpce i minimum vodljive vrpce pri istoj vrijednosti valnog vektora zakon očuvanja valnog vektora je očuvan, te se za poluvodič kaže da ima direktnu zabranjenu vrpcu, odnosno da je prijelaz elektrona iz jedne u drugu vrpcu direktan. Ako se minimum i maksimum ne javljaju pri istom valnom vektoru kaže se da poluvodič ima indirektnu zabranjenu vrpcu, odnosno da je prijelaz elektrona indirektan (Slika 3.6).

Za slučaj direktnog prijelaza ako je energija fotona manja od energije barijere foton će proći kroz poluvodič, a ako je jednaka ili veća foton će se pri sudaru s elektronom apsorbirati, a elektron pobuditi. Prijelaz iz vodljive u valentnu vrpcu je popraćen emisijom fotona s energijom energije barijere. Za slučaj indirektnog prijelaza da bi došlo do prijelaza elektrona između vrpci osim promjene energije treba doći i do promjene valnog vektora. Za objašnjenje indirektnog prijelaza potrebno je uvesti pojam fonona. Fonon se može shvatiti kao kvant energije vibracije kristalne rešetke. Valni vektor fonona je nekoliko puta veći od valnog vektora fotona vidljive svjetlosti. Pri indirektnom prijelazu treba doći do apsorpcije ili emisije fotona i fonona kako bi oba zakona očuvanja bila zadovoljena. Kod direktnog prijelaza prijelaz iz vodljive u valentnu vrpcu može biti popraćen emisijom fotona, fonona ili oboje. Kod indirektnog prijelaza pri apsorpciji i emisiji fotona fonon se može ili apsorbirati ili emitirati ovisno o energiji fotona.



Slika 3.6. Direktni i indirektni prijelaz.

3.3 Klasifikacija poluvodiča

Poluvodiči tipa IV formiraju četverovalentni elementi 4. skupine kao što su ugljik (C), silicij (Si) i germanij (Ge). Elementi 5. skupine kao što su fosfor (P), arsen (As) i antimон (Sb) su peterovalentni i dodaju se kao donori poluvodičima tipa IV. Elementi 3. skupine kao što su bor (B), aluminij (Al), galij (Ga), indij (In) su trovalentni i dodaju se kao akceptori poluvodičima tipa IV. Binarni poluvodiči su spojevi dva poluvodička elementa. Poluvodiči tipa III-V su spojevi elemenata 3. i 5. skupine (AlAs, AlSb, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs i InSb). Poluvodiči tipa II-VI su spojevi elemenata 2. i 6. skupine (ZnO, ZnSe, ZnTe, CdS, CdSe i CdTe). Poluvodiči tipa IV-VI su spojevi elemenata 4. i 6. skupine (PbS, PbSe i PbTe). Binarni poluvodiči se također mogu dopirati, pa se tako poluvodiči tipa III-V mogu dopirati elementima skupine VI kao donorima, skupine II kao akceptorima i skupine IV ili kao donorima ili kao akceptorima.

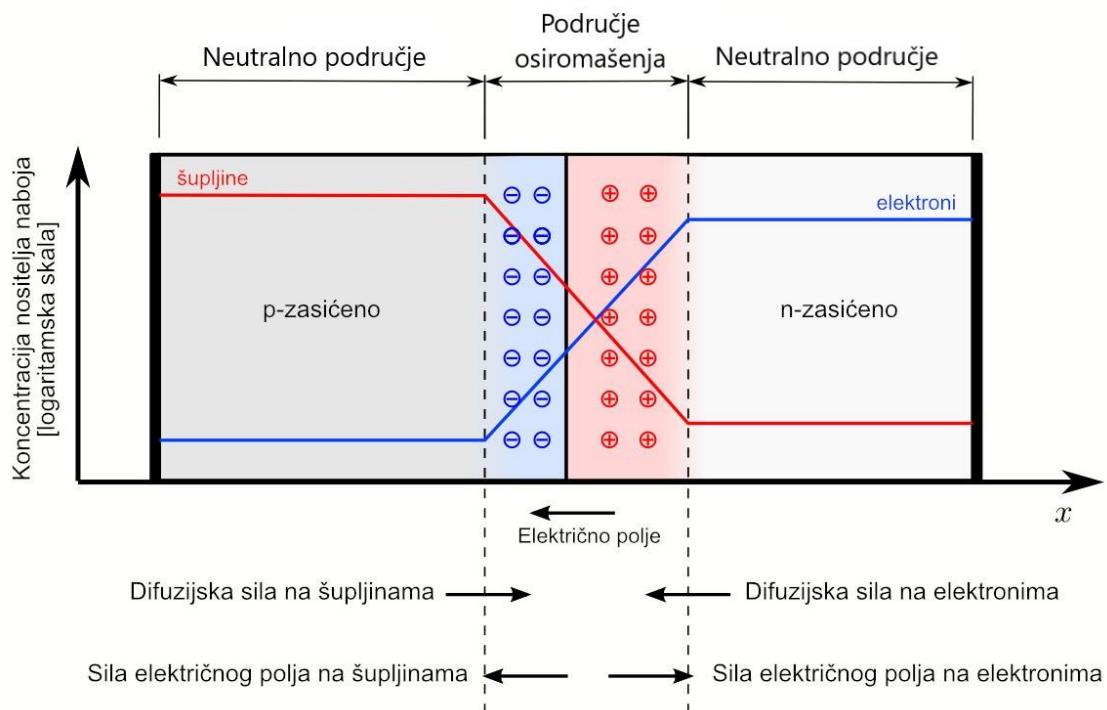
3.4 Poluvodički spojevi

Nositelji naboja se u poluvodiču gibaju nasumično. Ako se poluvodič stavi u vanjsko električno polje postojati će preferirani smjer gibanja nositelja naboja, odnosno pojaviti će se struja. Brzina drifta ili pomaka je brzina kojom se nositelji naboja gibaju u preferiranom smjeru. Osim zbog vanjskog električnog polja, električna struja u poluvodiču može biti uzrokovana i difuzijom, odnosno kretanjem nositelja naboja uslijed razlike u koncentraciji nositelja između dva različita područja poluvodiča. Difuzijom se naboji kreću iz mesta veće koncentracije prema mjestu manje koncentracije u cilju njenog izjednačavanja.

Spajanjem poluvodiča P-tipa i N-tipa nastaje PN spoj, odnosno poluvodič s neravnomjernom raspodjelom primjesa, a time i neravnomjernom raspodjelom nositelja naboja. Razlika u koncentraciji nositelja uzrokuje difuziju. Bilo da nastaju pucanjem kovalentnih veza ili ionizacijom primjesnih atoma slobodni elektroni odlaze na P-stranu, a šupljine na N-stranu. Elektroni koji prijeđu na P-stranu rekombiniraju se sa šupljinama što rezultira smanjenjem broja šupljina na P-strani. Šupljine koje prijeđu na N-stranu rekombiniraju se sa slobodnim elektronima što rezultira smanjenjem broja slobodnih elektrona na N-strani. Do

rekombinacije prvo dolazi uz sam kontakt P i N dijela, te se postepeno širi na ostatak poluvodiča. Područje u kojem su se nositelji naboja rekombinirali se naziva područje osiromašenja. Kako svakom rekombinacijom u PN spoju nestaje par pozitivnih i negativnih nosioca naboja, a ostaju fiksni donorski i akceptorski ioni, u području osiromašenja nastaje električno polje iz smjera N-dijela prema P-dijelu, odnosno iz smjera pozitivnih iona prema negativnim (Slika 3.7). Nastalo polje se protivi difuzijskom gibanju većinskih nosioca naboja. Povećavanjem broja iona u području osiromašenja električno polje jača, što postepeno sprječava difuziju većinskih nosioca. Zbog statističke raspodjele energije postojati će određeni većinski nosioci naboja s dovoljno velikom energijom da prijeđu s jedne strane PN spoja na drugu, unatoč električnom polju.

Unutarnje električno polje sprječava prijelaz samo većinskih nosioca naboja, no ne i manjinskih. Manjinske nositelje, koji se nađu u području osiromašenja, električno polje pomiciće iz dijela poluvodiča gdje čine manjinske nositelje u dio gdje čine većinske nositelje. Manjinski nosioci naboja nastaju samo pucanjem kovalentnih veza, a u području osiromašenja mogu biti generirani ili doći iz neosiromašenog dijela poluvodiča. Ukupna struja kroz barijeru u stanju ravnoteže mora iščezavati, posebno za slobodne elektrone i posebno za šupljine. Slijedi da struja difuzije (struja većinskih nositelja) u ravnoteži, uzrokovana statističkom raspodjelom energije, mora biti kompenzirana strujom drifta/saturacije (strujom manjinskih nositelja) jednakog iznosa ali suprotnog smjera.



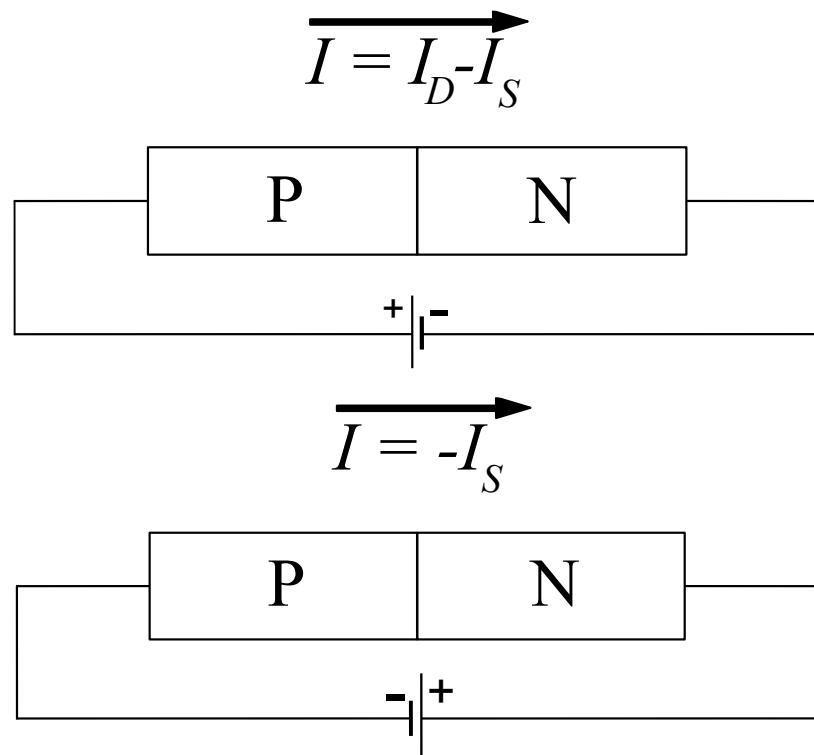
Slika 3.7. PN spoj.¹⁸

¹⁸ TheNoise. (2007). A p-n junction in thermal equilibrium with zero bias voltage applied. Preuzeto s: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pn-junction-equilibrium.png>

Poluvodičke spojeve se može podijeliti na homospojeve i heterospojeve. Ako materijali u poluvodičkom spoju imaju približno jednaku energiju barijere za taj spoj kažemo da je homospoj. Npr. spajanjem P-tipa i N-tipa istog poluvodiča u PN spoj nastaje homogeni spoj. Ako materijali poluvodičkog spoja imaju različitu energetsku barijeru za spoj se kaže da je heterospoj.

3.5 Poluvodička dioda

Poluvodička dioda, ili kraće dioda, je PN spoj koji ima izvode na N-strani i P-strani pa se može uključiti u električni krug kao elektronički element. Strujno-naponska karakteristika diode daje odnos između struje koja protječe diodom i napona na koji je dioda priključena. Dioda može biti propusno i nepropusno polarizirana (Slika 3.8).



Slika 3.8. Propusna (gore) i nepropusna (dolje) polarizacija diode.

Struja kroz PN spoj je jednaka razlici struje manjinskih i većinskih nositelja, te je dana Shockley – ovom jednadžbom diode:

$$i = i_D - i_S = i_S e^{\frac{qV}{nkT}} - i_S = i_S \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right),$$

gdje je i_D struja difuzije (struja većinskih nositelja naboja), i_S struja saturacije ili drifta (struja manjinskih nositelja naboja), q naboј elektrona, V napon na krajevima diode, n faktor idealnosti koji je za idealnu diodu jednak 1, k Boltzmannova konstanta, a T temperatura diode.

Unutarnje električno polje sprječava prolaz većinskih, a potiče prijenos manjinskih nositelja kroz zonu osiromašenja. Kod propusno polarizirane diode vanjsko električno polje ima suprotan smjer od unutarnjeg polja. Povećanjem napona izvora slabi unutarnje polje što rezultira jačanjem struje difuzije i slabljenjem struje saturacije, odnosno jačanjem ukupne struje kroz PN spoj iz smjera N u P. Kako je i za male napone eksponencijalni član relativno velik, jedinica se u Shockley – ovoj jednadžbi za propusno polariziranu diodu može zanemariti:

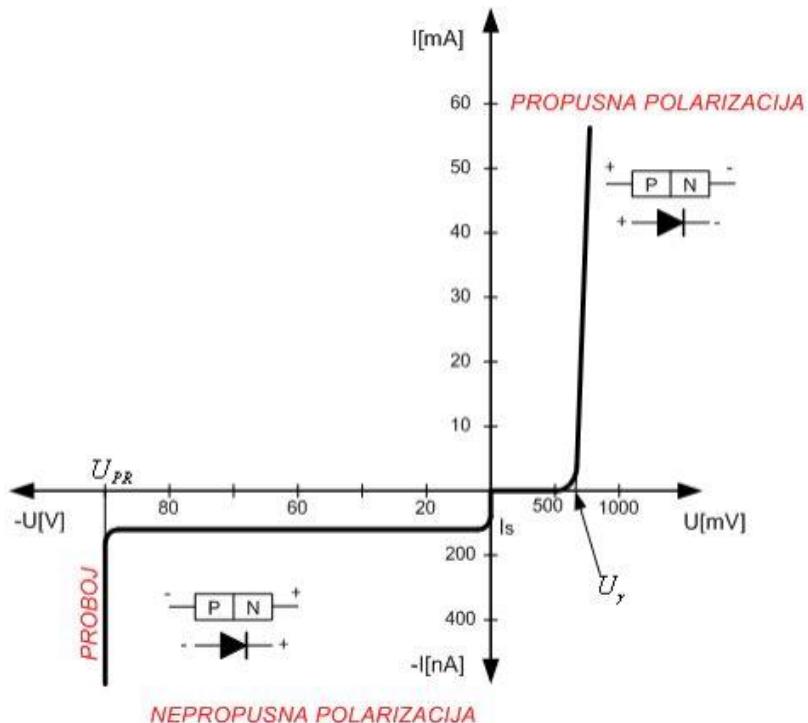
$$i = i_S e^{\frac{qV}{nkT}}$$

Povećanjem napona struja raste polako, do tzv. napona koljena poslije čega struja naglo raste (Slika 3.9).

Kod nepropusno polarizirane diode vanjsko električno polje ima isti smjer kao i unutarnje polje. Povećavanjem napona izvora unutarnje polje jača što sprječava protok većinskih nositelja, a povećava brzinu manjinskih nositelja. Eksponencijalni član je približno jednak nuli pa je ukupna struja kroz PN spoj kod nepropusne polarizacije jednaka negativnoj struci saturacije, iz smjera P-dijela prema N-dijelu, suprotno smjeru ukupne struje kod propusne polarizacije:

$$i = -i_S.$$

Povećanjem napona struja raste polako do tzv. napona probaja poslije čega struja naglo raste, što nije opisano posljednjom jednadžbom (Slika 3.9).



Slika 3.9. IV karakteristika propusno i nepropusno polarizirane diode.

3.6 Proizvodnja poluvodiča

Monokristal ili jedan kristal je volumen čvrste tvari građen od konstantne, neprekinute kristalne rešetke. Metodom J.Czochralskog se kristalizacijom iz taline može dobiti monokristal mase više kilograma. Polirana kristalna ploha malog kristalnog zrna dodiruje talinu osnovnog materijala iz koje treba dobiti monokristal. Polaganim jednolikim podizanjem zrna, brzinom i manjom od 1 mm na sat, postiže se kontinuirani rast monokristala iste orientacije kristalnih ravnina kao i u početnom zrnu. Osim za kristalizaciju većine metala i slitina ova metoda se koristi i za dobivanje kristala poluvodičkih materijala. Dobiveni monokristal je valjkastog oblika i naziva se kristalna šipka ili ignot duljine i više od 2 m. Ingot se dalje oblikuje i poprečno reže na tanke kriške ili wafere. Iz wafera se izrežu pločice debljine oko 0.5 mm koje se nazivaju supstrat. Supstrat je najčešće silicij.

Epitaksija je postupak rasta kristala kojom se na supstrat takoži kristalni sloj koji se naziva epitaksijalni sloj, epitaksijalni film ili aktivni sloj. Orientacija kristalnih ploha epitaksijalnog sloja odgovara orientaciji ploha supstrata. Može se razlikovati homoepitaksija i heteroepitaksija. Homoepitaksijom se na supstratu takoži sloj poluvodiča iste vrste, ali koji je npr. čišći (s boljim svojstvima) ili s drugačijom razinom dopiranja. Heteroepitaksijom se na supstratu takoži sloj poluvodiča koji nije iste vrste kao supstrat. Metoda se koristi kada je potrebno dobiti poluvodič s kristalnim slojevima različitih materijala ili kada se aktivni poluvodič ne može proizvesti metodom J.Czochralskog. Na primjer ako je kemijski spoj na višim temperaturama nestabilan, odnosno ako se ne tali.

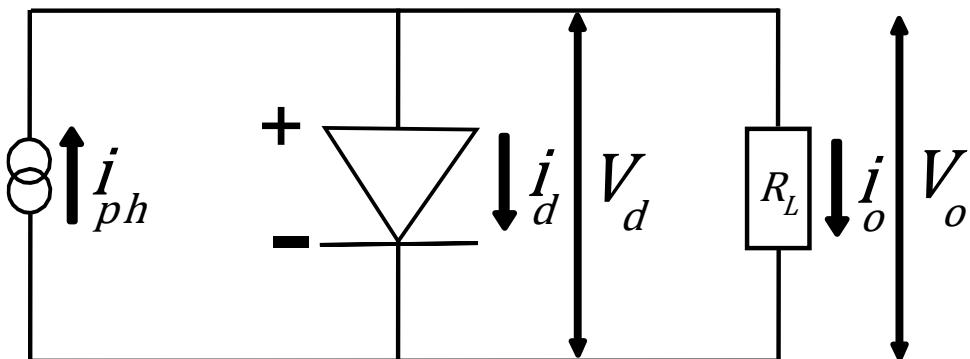
4 Fotodioda i fotootpornik

4.1 Fotodioda

Fotodioda je optoelektronički uređaj koji fotonaponskim efektom elektromagnetsko zračenja pretvara direktno u električnu energiju. Fotodioda mora biti izrađena od materijala koje karakterizira fotonaponski efekt. Kao najboljim materijalom su se pokazali poluvodiči u obliku PN spoja. Izlaganjem područja osiromašenja PN spoja svjetlosti dolazi do pucanja kovalentnih veza i generacije parova elektrona i šupljina. Pod utjecajem unutarnjeg električnog polja u području osiromašenja elektroni odlaze na N-stranu, a šupljine na P-stranu čime se spriječi njihova rekombinacija. Nositelji naboja se akumuliraju na krajevima PN spoja između kojih se generira napon.

Kao i obična dioda, fotodiода može biti nepolarizirana, propusno polarizirana i nepropusno polarizirana. Stanje kada je fotodioda nepolarizirana ili propusno polarizirana se naziva fotonaponski mod (anoda pozitivna, katoda negativna), a stanje kada je nepropusno polarizirana se naziva fotovodljivi mod (anoda negativna, katoda pozitivna).

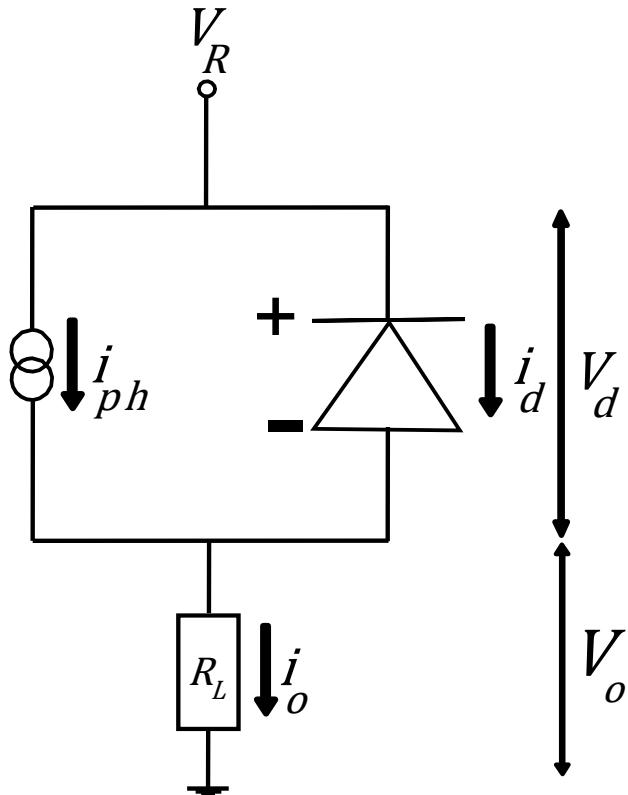
Ekvivalentni strujni krug idealne fotodiode u fotonaponskom modu (Slika 4.1) sadrži paralelno spojen idealan izvor struje i diodu. Idealnim izvorom struje je reprezentirano stvaranje fotostruje i_{ph} uslijed izlaganja fotodiode svjetlošću, a običnom diodom je reprezentirano stvaranje tamne struje i_d uslijed propusne polarizacije fotodiode. Fotodioda je spojena na vanjski otpornik R_L kroz koji protječe izlazna struja i_o . Na vanjskom otporniku dolazi do pada napona pa dolazi do uspostave napona na krajevima diode. Napon diode V_d je jednak izlaznom naponu V_o . U fotodiidi u fotonaponskom modu dioda je propusno polarizirana te fotostruju i struju diode imaju suprotan smjer.



Slika 4.1. Ekvivalentni strujni krug fotodiode u fotonaponskom modu spojene na vanjski otpornik.

Ekvivalentni strujni krug idealne fotodiode u fotovodljivom modu (slika 4.2) sadrži paralelno spojen idealan izvor struje i diodu. Idealnim izvorom struje je reprezentirano stvaranje fotostruje i_{ph} uslijed izlaganja fotodiode svjetlošću, a običnom diodom je reprezentirano stvaranje tamne struje i_d uslijed nepropusne polarizacije fotodiode. Izlazna struja i_o je struja

koja protjeće kroz vanjski otpornik R_L . U fotodiidi u fotovodljivom modu dioda je nepropusno polarizirana te fotostruja i struja diode imaju isti smjer, pa je izlazna struja i_o jednaka njihovom zbroju. Fotodioda je nepropusno polarizirana reverznim naponom V_R koji je jednak zbroju pada napona na diodi i vanjskom otporniku, odnosno napona diode V_d i izlaznog napona V_o .



Slika 4.2. Ekvivalentni strujni krug fotodiode u fotovodljivom modu spojene na vanjski otpornik.

Na slikama 4.1 i 4.2 i_{ph} je fotostruja (eng. *photocurrent*), i_d je struja diode ili tamna struja (eng. *diode current*, *dark current*, *forward current*), i_o je izlazna struja (eng. *output current*), i_s je struja saturacije (eng. *saturation current*), R_L je vanjski otpor (eng. *load resistance*), V_d je napon diode (eng. *forward voltage*), V_o je izlazni napon (eng. *output voltage*).

Fotodioda je napravljena tako da zračenje može doći do njenih osjetljivih dijelova (područje osiromašenja) kroz prozor ili putem optičkog vlakna ili osjetljivo područje može biti direktno izloženo zračenju. Naziv fotodioda se u pravilu koristi za senzore koji pretvaraju elektromagnetsko zračenje u električni signal gdje je naglasak na osjetljivosti i brzini, dok se fotodiode čiji je cilj učinkovita pretvorba elektromagnetskog zračenja u električnu energiju nazivaju fotonaponske čelije.

4.2 Fotootpornik

Fotootpornik (eng. *photoresistor*, *light-dependent resistor*, *LDR*, *photoconductor*) je optoelektrički uređaj čija električna vodljivost ovisi o iradijaciji i valnoj duljini upadnog elektromagnetskog zračenja. U fotootporniku se događa pojava fotovodljivosti, odnosno pojava povećanja električne vodljivosti materijala uslijed apsorpcije fotona. Apsorpcijom fotona dovoljne energije elektron će prijeći iz valentne u vodljivu vrpcu poluvodiča što će rezultirati poluvodičem s većim brojem slobodnih elektrona, odnosno poluvodičem s većom vodljivošću. Materijali koji imaju svojstvo fotovodljivosti se nazivaju fotovodljivim materijalima (eng. *photoconductive materials*). Fotootpornik se sastoji od samo jednog tipa poluvodiča, te nema strukturu PN spoja. Fotootpornici se mogu podijeliti na one od intrinsičnog ili ekstrinsičnog poluvodičkog materijala. Povećanjem intenziteta upadne svjetlosti otpor fotootpornika se smanjuje logaritamski. Materijal izrade je najčešće Kadmijev sulfid CdS.

5 Fotonaponska tehnologija

5.1 Princip rada fotonaponske ćelije

Fotonaponska ili solarna ćelija je optoelektronički uređaj koji fotonaponskim efektom elektromagnetsko zračenja pretvara direktno u električnu energiju. Fotonaponska ćelija je fotodioda u fotonaponskom modu, no za razliku od fotodiode ima relativno veliku površinu.

Fotoni koji padaju na površinu fotonaponske ćelije mogu biti reflektirani, transmitirani ili apsorbirani. Bez obzira na svoju energiju neki fotoni će se reflektirati od površine ćelije. Fotoni s energijom manjom od energije zabranjene vrpce, zračenje većih valnih duljina, će biti transmitirani. Fotoni s energijom jednakom ili većom od energije zabranjene vrpce će biti u velikoj mjeri apsorbirani. Kada fotonaponska ćelija apsorbira foton energija fotona je apsorbirana od strane valentnog elektrona nekog atoma kristalne rešetke tvari koja čini ćeliju. Apsorpcijom fotona dolazi do pucanja kovalentne veze, odnosno elektron prelazi u pobuđeno stanje. U tom stanju elektron postaje slobodan, te se može slobodno kretati unutar poluvodiča. U energetskom dijagramu apsorpcijom fotona elektron prelazi iz valentne u vodljivu vrpcu, a iza sebe ostavlja šupljinu. Ako je energija apsorbiranog fotona veća od energije zabranjene vrpce elektron se ubrzo nakon prelaska u vodljivu vrpcu termalizira na energiju donje granice vodljive vrpce, odnosno energiju veću od energije pobuđenja otpusti u obliku topline. Otpuštena energija se apsorbira od strane atoma fotonaponske ćelije koji sada titraju brže oko svojih ravnotežnih položaja u kristalnoj rešetki, tj. temperatura ćelije poraste.

Generirani par pobuđenih nositelja naboja u poluvodiču se relativno brzo vrati u nepobuđeno stanje i rekombinira. Razlika u energiji pobuđenog i nepobuđenog stanja se pri tome oslobodi u obliku termalne energije koju apsorbira poluvodič. Ako je cilj proizvesti struju dobivene nositelje naboja je potrebno udaljiti jedne od drugih prije njihove rekombinacije. Električno polje PN spoja može poslužiti za razdvajanje generiranih nositelja naboja, sprječavanje njihove rekombinacije, te njihovo akumuliranje na različitim stranama PN spoja. Preko izvoda na P i N strani ćelije nagomilani nosioci naboja se na jednoj strani PN spoja mogu odvesti izvan ćelije, gdje se iskoristi njihova energija pobuđenog stanja, nakon čega ih se u nepobuđenom stanju vrati na drugi kraj PN spoja gdje se rekombiniraju. Dodavanjem otpornika u strujni krug pobuđeni nosioci će u njemu otpustit energiju i rekombinirati se u fotonaponskoj ćeliji u nepobuđenom stanju.

5.2 Karakteristike fotonaponske ćelije

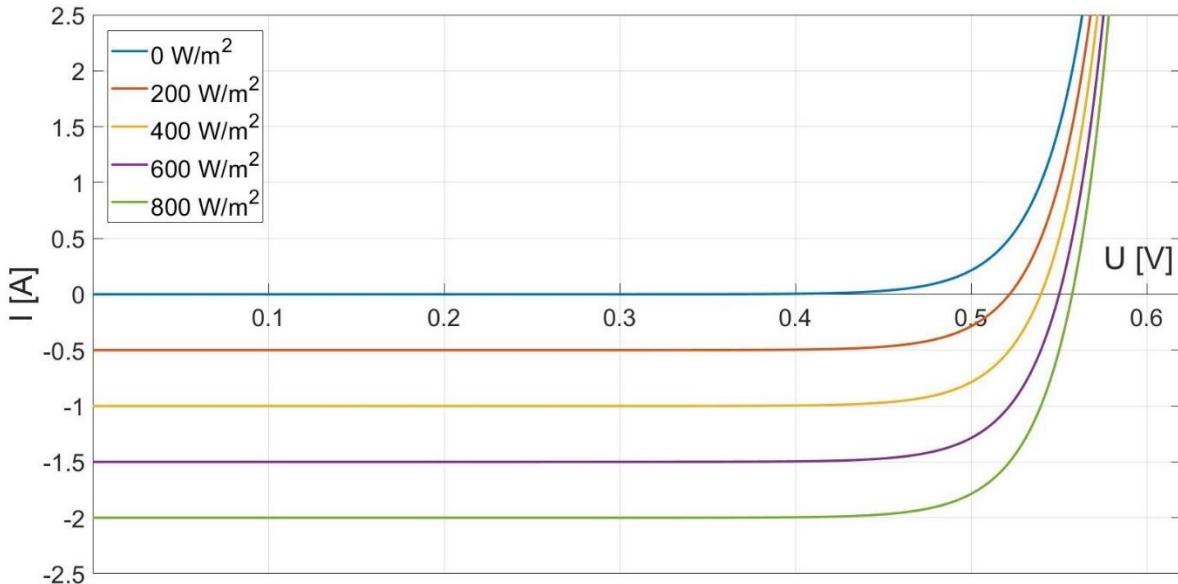
5.2.1 IV karakteristika

Fotonaponska ćelija u mraku ima istu IV karakteristiku kao i obična poluvodička dioda u fotonaponskom modu (Slika 5.1). Ukupna struja je jednaka razlici struje difuzije i struje saturacije. Fotonaponska ćelija obasjana svjetlošću generira dodatne nositelje naboja koji

čine struju generiranu svjetlošću i_L . Ukupna struja čelije je jednaka razlici struje čelije u mraku i_{Dark} (struja diode) i struje generirane svjetlošću:

$$i = i_{Dark} - i_L = i_D - i_S - i_L = i_S \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) - i_L.$$

Kako je struja generirana svjetlošću veća od struje čelije u mraku ukupna struja obasjane fotonaponske čelije je negativna. Porastom iradijacije raste struja generirana svjetlošću, odnosno ukupna struja postaje sve negativnija (Slika 5.1).



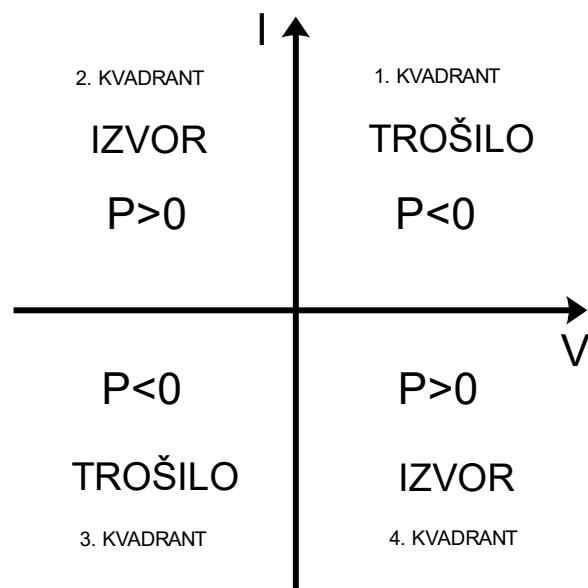
Slika 5.1. IV karakteristika fotonaponske čelije u mraku i na svjetlu.

Ako tehnički smjer struje kroz elektronički element ima isti smjer kao i pad napona na tom elementu struja ima pozitivan predznak, u suprotnom ima negativan predznak. Snaga elektroničkih elemenata čija je IV krivulja u prvom ili trećem kvadrantu ima pozitivan predznak, što znači da oni konzumiraju električnu energiju (npr. otpornik). Snaga elektroničkih elemenata čija je IV krivulja u drugom ili četvrtom kvadrantu ima negativan predznak, što znači da su oni izvori električne energije (npr. baterija, solarna čelija).

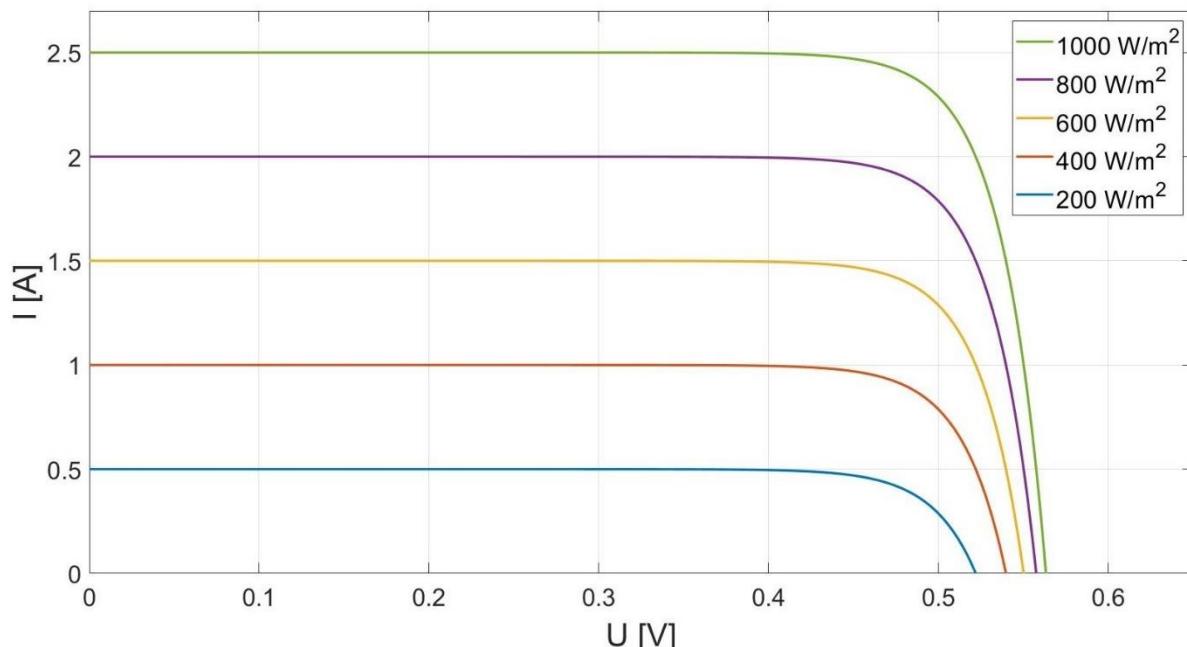
Fotonaponska čelija je izvor električne energije, što je i vidljivo iz njene IV krivulje (Slika 5.2). Po konvenciji ukupna struja koja izlazi iz čelije ima negativan predznak. Iako se glavni dio IV krivulje čelije nalazi u četvrtom kvadrantu, radi jednostavnosti se može promijeniti predznak ukupne struje, pa je predznak struje i IV krivulje fotonaponske čelije pozitivan (Slika 5.3), te vrijedi:

$$i = i_L - i_{Dark} = i_L - i_D - i_S = i_L - i_S \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \approx i_L - i_S e^{\frac{qV}{nkT}}.$$

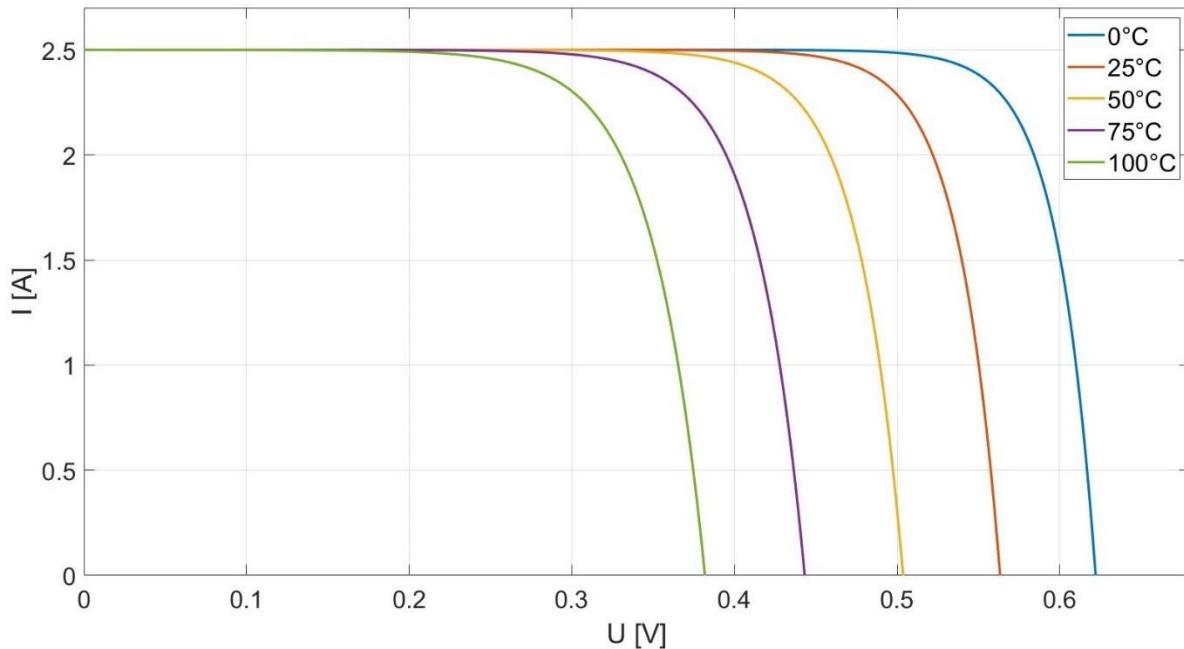
IV karakteristika fotonaponske čelije ovisi o iradijaciji zračenja i temperaturi čelije. Porastom intenziteta izlazna struja raste linearno, dok je napon približno konstantan (Slika 5.3). Porastom temperature napon opada linearno, dok je struja približno konstantna (Slika 5.4).



Slika 5.2. IV dijagram.



Slika 5.3. Ovisnost IV karakteristike idealne silicijeve fotonaponske ćelije o iradijaciji (pri 25°C).



Slika 5.4. Ovisnost IV karakteristike idealne silicijeve fotonaponske čelije o temperaturi čelije (pri iradijaciji od 1000 W/m^2).

5.2.2 Učinkovitost

Učinkovitost fotonaponske čelije je jednaka omjeru snage proizvedene električne energije (izlazna snaga) i snage upadnog zračenja (ulazna snaga):

$$\eta = \frac{P_i}{P_u}.$$

Ulazna snaga je jednaka umnošku iradijacije upadnog zračenja i površine čelije:

$$P_u = E \cdot A_{sc}.$$

Izlazna snaga je jednaka umnošku struje i napona čelije:

$$P_i = i \cdot U.$$

Učinkovitost čelije u pravilu podrazumijeva maksimalnu učinkovitost čelije definiranu kao omjer maksimalne izlazne snage za danu IV karakteristiku i pripadne ulazne snage:

$$\eta_{max} = \frac{P_{i,max}}{P_u}.$$

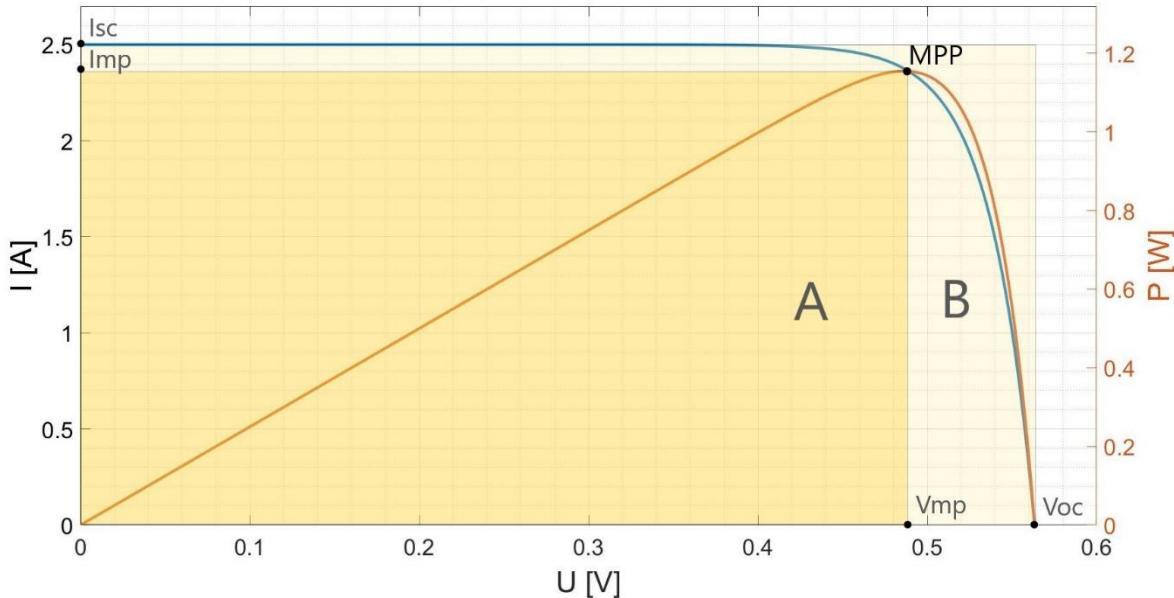
Napon maksimalne snage V_{mp} i struja maksimalne snage i_{mp} su vrijednosti struje i napona pri kojima čelija proizvodi maksimalnu izlaznu snagu $P_{i,max}$:

$$P_{i,max} = i_{mp} \cdot V_{mp} = FF \cdot i_{sc} \cdot V_{oc}.$$

Točka na IV grafu za napon i struju maksimalne snage se naziva točka maksimalne snage (eng. *maximum power point - MPP*). Struja kratkog spoja i_{sc} (eng. *short circuit current*) i napon otvorenog kruga V_{oc} (eng. *open circuit voltage*) odgovaraju teoretskom maksimumu

struje i napona ćelije. Pri bilo kojoj od ove dvije vrijednosti generirana snaga ćelije je jednaka nuli. Maksimalna površina pravokutnika koji može stati unutar dane IV krivulje (Slika 5.5) odgovara maksimalnoj izlaznoj snazi modula. FF je faktor punjenja (eng. *Fill Factor*) koji se definira kao omjer površina A i B označenih na Slici 5.5, odnosno kao produkta maksimalne struje i maksimalnog napona i produkta struje kratkog spoja i napona otvorenog kruga:

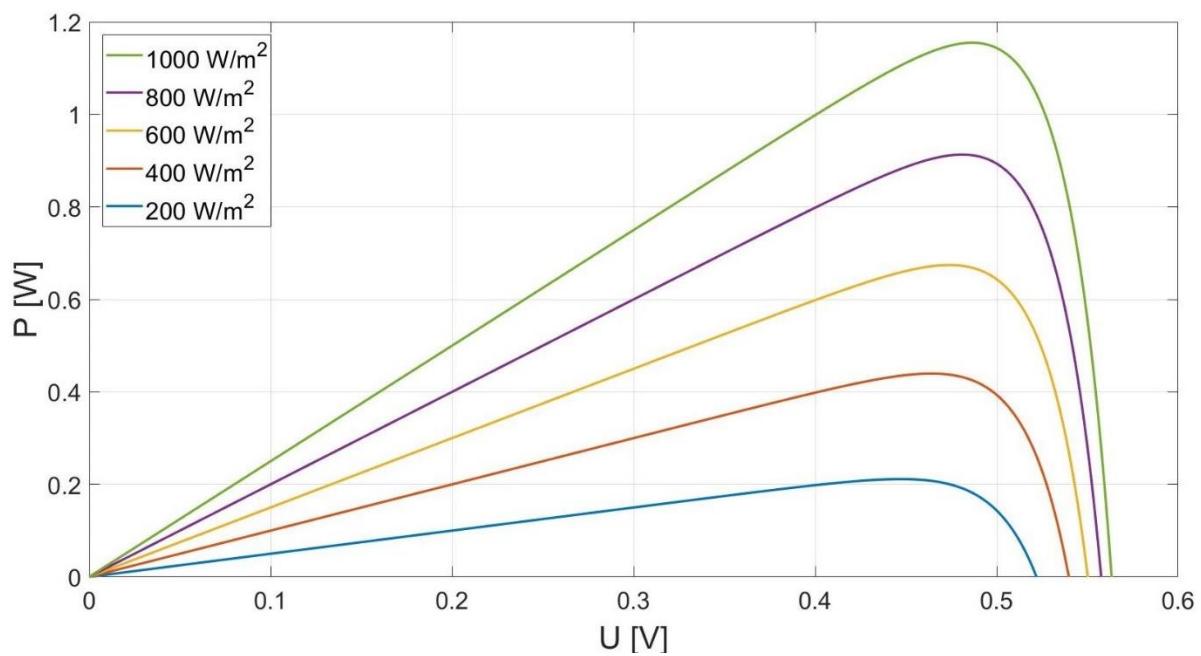
$$FF = \frac{A}{B} = \frac{i_{mp} \cdot V_{mp}}{i_{sc} \cdot V_{oc}}.$$



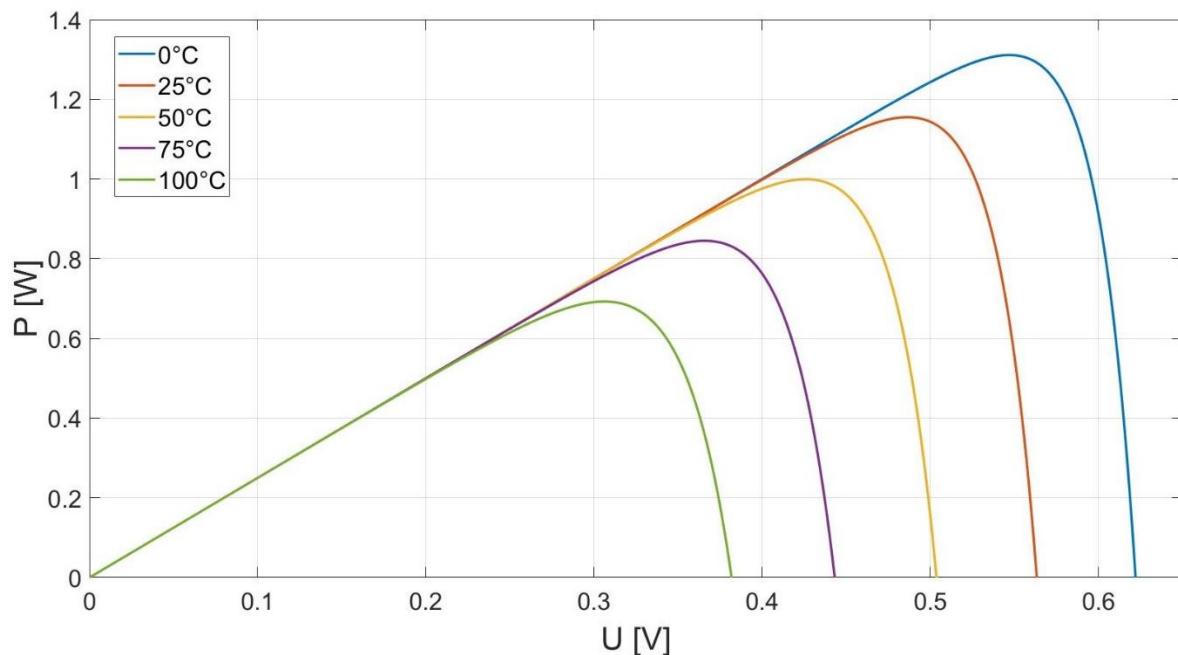
Slika 5.5. IV krivulja i PV krivulja fotonaponske ćelije.

Izlazna snaga fotonaponske ćelije ovisi o iradijaciji upadnog zračenja, spektru zračenja, temperaturi ćelije i otporu na koji je ćelija spojena. Maksimalna izlazna snaga raste proporcionalno s povećanjem iradijacije (Slika 5.6), a smanjuje se povećanjem temperature ćelije (Slika 5.7).

Svojstva fotonaponskih ćelija kao što su koeficijent apsorpcije, spektralni odgovor, vjerojatnost kolekcije, kvantna učinkovitost, IV karakteristika, PV karakteristika, struja kratkog spoja, napon otvorenog kruga, struja i napon točke maksimalne snage, FF i učinkovitost se u pravilu testiraju i određuju pri standardnim testnim uvjetima (eng. *Standard Test Conditions - STC*). Standardni testni uvjeti podrazumijevaju iradijaciju zračenja od 1000 W/m^2 , spektralna iradijacija slična Sunčevom, temperaturu ćelije od 25°C i koeficijent zračne mase (AM) vrijednosti 1.5. STC približno odgovaraju uvjetima solarnog podneva, trenutak kada je Sunce u najvišoj točki iznad horizonta, proljetnog i jesenskog ekvinocija kontinentalnog SAD-a za ćeliju okomitu na sunčevu zračenje.



Slika 5.6. Ovisnost PV karakteristike idealne silicijeve fotonaponske čelije o iradijaciji (pri 25°C).



Slika 5.7. Ovisnost PV karakteristike idealne silicijeve fotonaponske čelije o temperaturi čelije (pri iradijaciji od 1000 W/m²).

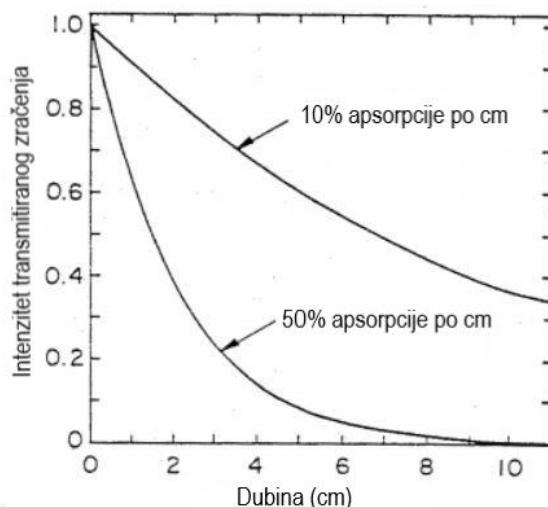
5.2.3 Koeficijent i dubina apsorpcije

Dubina apsorpcije je udaljenost koju svjetlost mora prijeći kroz neki materijal da bi njena iradijacija pala za faktor $1/e$, odnosno na 36% iradijacije na njegovoj površini. Ako je dubina apsorpcije veća od debljine materijala onda je materijal za tu svjetlost transparentan.

Koeficijent apsorpcije je obrnuto proporcionalan dubini apsorpcije. Koeficijent apsorpcije svjetlosti koja prijeđe put između dvije točke u materijalu je jednak udjelu smanjenja iradijacije svjetlosti konačne točke u iradijaciji početne točke. Drugim riječima, koeficijent apsorpcije daje udio iradijacije apsorbiranog zračenja po jedinici dubine u iradijaciji početnog zračenja, te može poprimiti vrijednosti od 0 do 1 (Slika 5.8). Koeficijent apsorpcije ovisi o materijalu i frekvenciji svjetlosti. Veći koeficijent znači da će veći dio iradijacije ulaznog zračenja biti apsorbiran na istoj udaljenosti, pa će dubina apsorpcije biti manja. Iradijacija zračenja u materijalu u ovisnosti o dubini je jednak:

$$E = E_0 e^{-\alpha x},$$

gdje je E_0 je iradijacija ne reflektirane svjetlosti na površini materijala, α je koeficijent apsorpcije [L^{-1}], a x dubina materijala.



Slika 5.8. Ovisnost iradijacije zračenja o dubini.

U energetskom dijagramu se nepobuđeni elektroni nalaze u valentnoj vrpci. Njihova energija je u intervalu od energije bliske nuli do energije valentne vrpce, maksimalne energije elektrona u valentnoj vrpci. Što je energija elektrona u valentnoj vrpci manja to je energija fotona potrebna za njegovo pobuđenje veća. Koeficijent apsorpcije materijala je funkcija valne duljine (Slika 6.5). Ako je valna duljina fotona takva da je njegova energija manja od izlaznog rada foton ne može pobuditi niti jedan elektron pa je za njega materijal transparentan. Koeficijent apsorpcije takve svjetlosti je jednak nuli, a dubina apsorpcije jednaka beskonačnosti. U ovom slučaju će svi ne reflektirani fotoni svjetlosti biti transmitirani. Ako je valna duljina fotona takva da je njegova energija veća ili jednaka izlaznom radu koeficijent apsorpcije je različit od nule, a dubina apsorpcije različita od

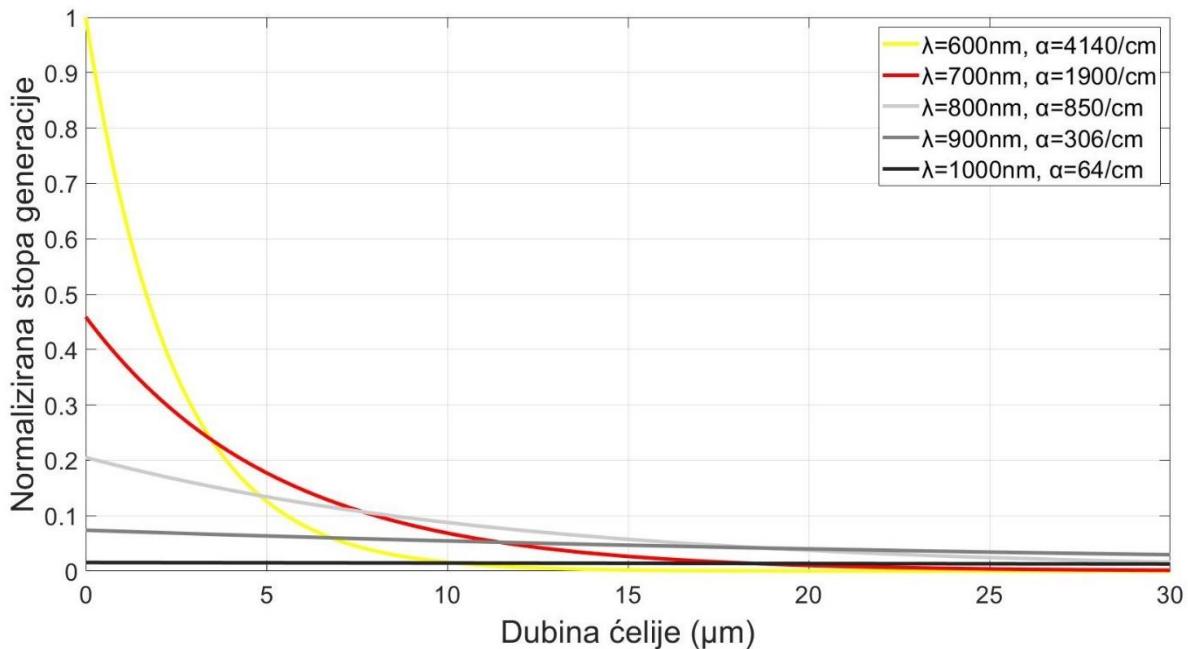
beskonačnosti. Omjer ne reflektirane svjetlosti koja je apsorbirana ili transmitirana ovisi o koeficijentu apsorpcije, iradijaciji zračenja i dubini materijala. Fotone s energijom jednakom izlaznom radu mogu apsorbirati samo elektroni čija je energija bliska energiji valentne vrpce. Fotoni s energijom većom od izlaznog rada mogu pobuditi i one elektrone u valentnoj vrpci čija je energija manja od valentne. Povećanje energije fotona iznad energije jednake zbroju izlaznog rada i energije valentne vrpce ne uzrokuje daljnje povećanje broja pobuđenih elektrona već samo povećanje njihove energije u pobuđenom stanju.

5.2.4 Stopa generacije i udaljenost difuzije

Stopa generacije je broj nositelja naboja koji se generira u jedinici vremena po jedinici površine. Ovisi o iradijaciji, odnosno o toku i valnoj duljini fotona. Za valne duljine pri kojima je energija fotona manja od izlaznog rada je jednaka nuli. Ako svaka apsorpcija fotona rezultira generiranjem para nositelja naboja vrijednost iradijacije s dubinom će biti proporcionalno stopi generacije nositelja naboja, odnosno vrijedit će relacija:

$$G = \alpha N_0 e^{-\alpha x} \left[\frac{1}{m^3 \cdot s} \right],$$

gdje je N_0 broj generiranih parova nositelja naboja na površini po jedinici površine, po jedinici vremena, α koeficijent apsorpcije, a x dubina ćelije (Slika 5.9).



Slika 5.9. Ovisnost normalizirane stope generacije parova nositelja naboja o dubini silicijeve ćelije, ako je smanjenje iradijacije proporcionalno stopi generacije.

Životni vijek manjinskog nositelja naboja je prosječno vrijeme koje manjinski nositelj provede u pobuđenom stanju između generacije i rekombinacije. Udaljenost difuzije manjinskih

nositelja naboja je prosječna udaljenost koju manjinski nositelj prijeđe između generacije i rekombinacije. S obzirom da u dopiranim poluvodičima generacija parova nositelja naboja svjetlošću ne mijenja značajno koncentraciju većinskih nositelja, jer je njihov broj zbog dopiranja već visok, za rekombinaciju se promatraju samo manjinski nositelji:

$$L = \sqrt{D \cdot \tau} \text{ [m]},$$

gdje je L je udaljenost difuzije, D je difuzivnost, a τ životni vijek.

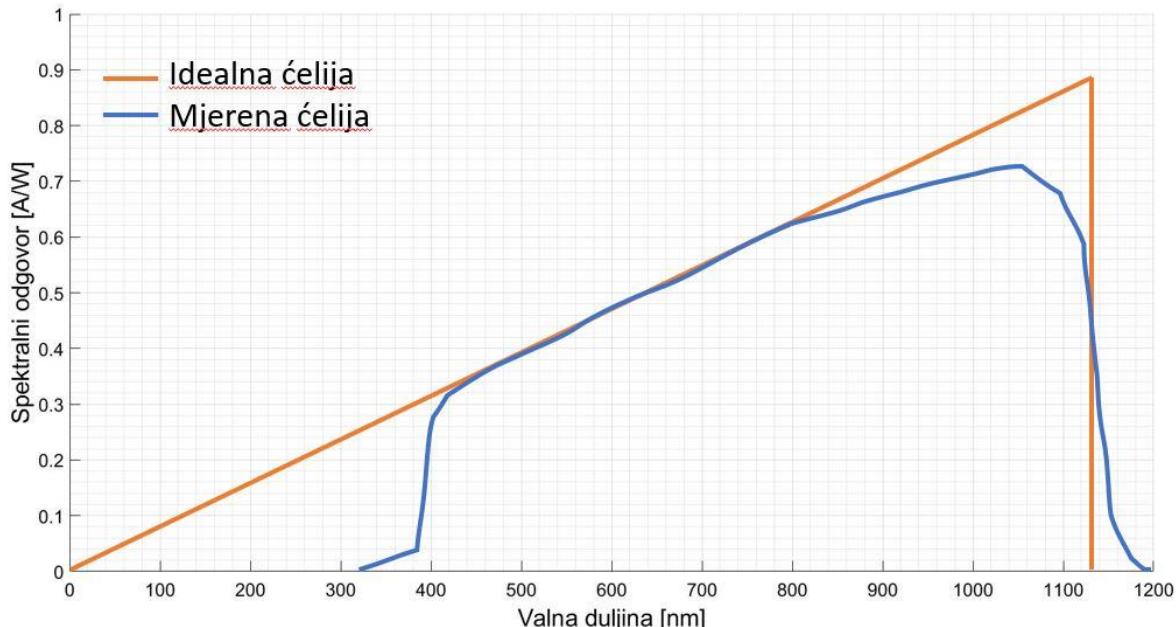
Svaka nesavršenost u kristalnoj strukturi poluvodiča povećava stopu rekombinacije. Površina poluvodiča predstavlja ozbiljan poremećaj u strukturi pa je stopa rekombinacije na površini fotonaponske ćelije posebno visoka, odnosno koncentracija manjinskih nositelja je niska. Metode smanjivanja slobodnih kovalentnih veza na površini poluvodiča se naziva površinska pasivizacija.

5.2.5 Spektralni odgovor

Spektralni odgovor (eng. *Spectral response – SR*) je omjer generirane struje i snage upadnog zračenja pri određenoj valnoj duljini:

$$SR = \frac{i}{P_u} \left[\frac{A}{W} \right].$$

Smanjenjem valne duljine se smanjuje spektralni odgovor (Slika 5.10) jer snaga upadnog zračenja raste (fotoni manje valne duljine imaju veću energiju), a generirana struja ostaje ista (nosiocu je za pobuđenje potrebna samo energija barijere). Spektralni odgovor se možemo shvatiti kao učinkovitost proizvodnje struje upadnim zračenjem.



Slika 5.10. Ovisnost spektralnog odgovora silicija o valnoj duljini.

5.2.6 Vjerovatnost kolekcije

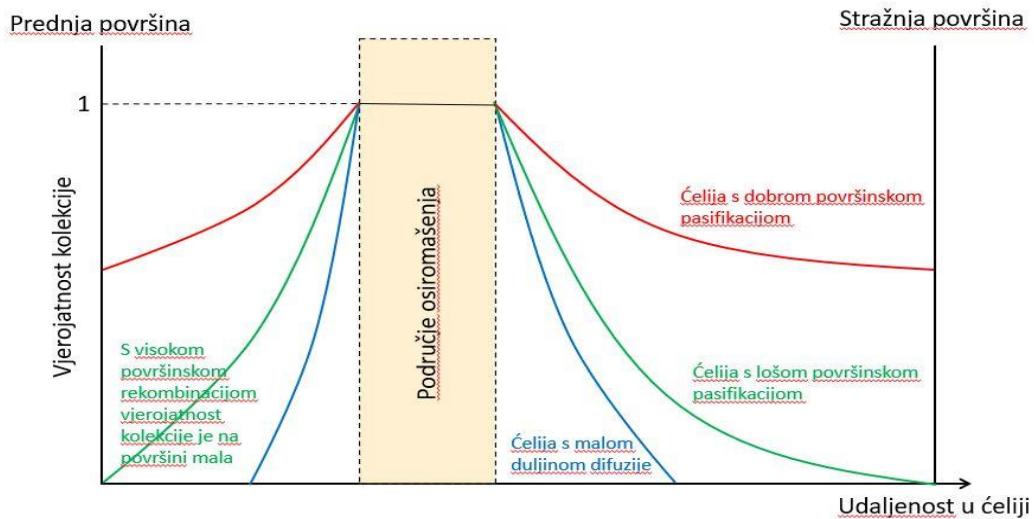
Vjerovatnost kolekcije (eng. *Collection probability – CP*) je vjerovatnost da će nositelj naboja generiran apsorpcijom svjetlosti u određenoj regiji fotonaponske ćelije biti sakupljen električnim poljem područja osiromašenja te time doprinijeti struji iz ćelije. Vjerovatnost kolekcije ovisi o odnosu udaljenosti koju nositelj naboja mora prijeći do zone osiromašenja i udaljenosti difuzije. Vjerovatnost kolekcije nositelja generiranih u zoni osiromašenja je jednaka 1, a udaljavanjem od zone osiromašenja se smanjuje (Slika 5.11). Generacija nositelja u području s većom stopom rekombinacije, npr. blizu površine, također smanjuje vjerovatnost kolekcije.

Gustoća struje fotonaponske ćelije je jednaka jakosti struje koju generira ćelija po jedinici svoje površine. Vjerovatnosti kolekcije, $CP(x)$, i stopa generacije, $G(x)$, su funkcije dubine (Slika 5.12). Integral njihova produkta po dubini ćelije daje broj sakupljenih nositelja naboja po jedinici vremena i površine, koji pomnožen s nabojem daje gustoću struje:

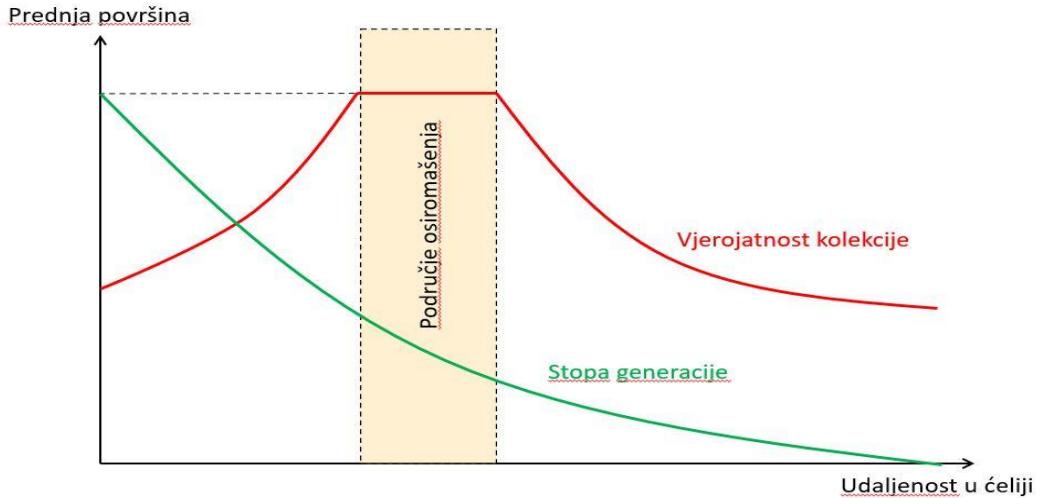
$$J = q \int_0^w CP(x)G(x) dx \left[\frac{A}{m^2} \right],$$

gdje je q električni naboј, a w debljina ćelije.

U idealnoj situaciji fotonaponska ćelija je izrađena od takvog materijala i ozračena takvim zračenjem da fotoni čija je energija veća od izlaznog rada, ali manja od zbroja energije zabranjene i valentne vrpce u tom materijalu imaju takav koeficijent apsorpcije da u što većem broju dođu do područja s što većom vjerovatnosti kolekcije, odnosno do područja osiromašenja.



Slika 5.11. Ovisnost vjerovatnosti kolekcije o dubini.



Slika 5.12. Ovisnost stope generacije i vjerojatnosti kolekcije o dubini.

5.2.7 Kvantna učinkovitost

Može se razlikovati vanjska i unutarnja kvantna učinkovitost. Obe dvije su funkcija valne duljine. Vanjska kvantna učinkovitost (eng. *External quantum efficiency – EQE*) je jednaka omjeru broja sakupljenih nosioca naboja i broja upadnih fotona određene valne duljine:

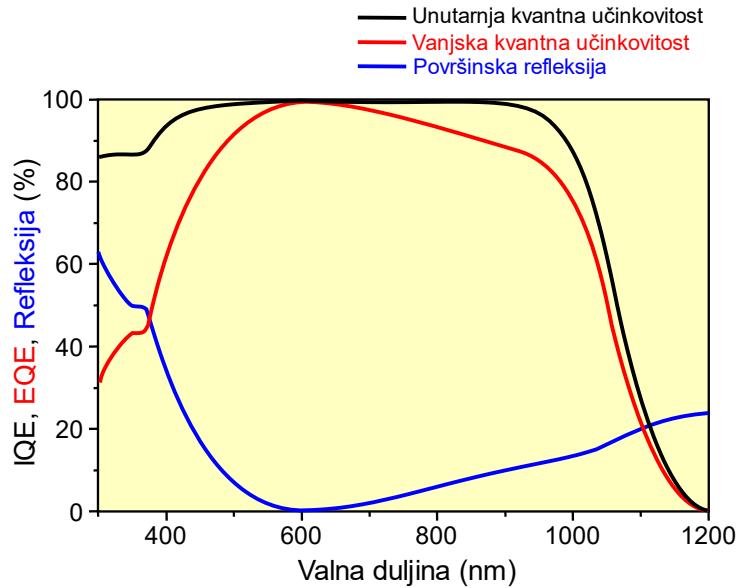
$$EQE(\lambda) = \frac{\frac{\text{broj elektrona}}{t}}{\frac{\text{broj fotona}}{t}} = \frac{\frac{\text{broj elektrona} \cdot q}{t \cdot q}}{\frac{\text{broj fotona} \cdot E_F}{t \cdot E_F}} = \frac{i}{q} \cdot \frac{q}{E_F} = \frac{i}{P}.$$

Upadni fotoni uključuju reflektirane, apsorbirane i transmitirane fotone. Ako su svi upadni fotoni apsorbirani i svi generirani nosioci sakupljeni vanjska kvantna učinkovitost je jednaka jedan. Svjetlost manjih valnih duljina se apsorbira bliže površini gdje je stopa rekombinacije povećana uslijed prekida kristalne rešetke. To rezultira umanjenjem vanjske kvantne učinkovitosti pri manjim valnim duljinama. Povećanjem valne duljine vanjska kvantna učinkovitost postepeno opada zbog smanjenja udaljenosti difuzije. Daljnjim povećanjem valne duljine smanjuje se apsorpcija fotona i duljina difuzije, a fotoni prodiru do stražnjeg kraja ćelije gdje se zbog prekida kristalne rešetke povećana stopa rekombinacije. To rezultira umanjenjem vanjske kvantne učinkovitosti pri većim valnim duljinama. Vanjska kvantna učinkovitost elektromagnetskog zračenja s energijom manjom od energije barijere pada na nulu (Slika 5.13).

Unutarnja kvantna učinkovitost (eng. *Internal quantum efficiency – IQE*) je jednaka omjeru broja sakupljenih nosioca naboja i broja apsorbiranih fotona određene valne duljine:

$$IQE(\lambda) = \frac{EQE}{1 - \text{koeficijent refleksije}}.$$

Za razliku od vanjske, kod unutarnje kvantne učinkovitosti se uzimaju u obzir samo apsorbiranih ulazni fotoni, ne reflektirani i transmitirani. Unutarnja kvantna učinkovitost je uvijek veća od vanjske (Slika 5.13).



Slika 5.13. Ovisnost kvantnih učinkovitosti i refleksije o valnoj duljini za fotonaponsku ćeliju od kristalnog silicija s antirefleksivnim slojem.¹⁹

Kvantna učinkovitost se računa preko spektralnog odgovora, prema relaciji:

$$SR(\lambda) = \frac{q\lambda}{hc} QE(\lambda) \left[\frac{C \cdot m}{\frac{J}{s} \cdot \frac{m}{s}} = \frac{A}{W} \right],$$

$$QE(\lambda) = \frac{hc}{q\lambda} SR(\lambda).$$

Vanjska kvantna učinkovitost je definirana kao omjer broja sakupljenih nosioca naboja i broja ulaznih fotona, pa produkt vanjske kvantne učinkovitosti i toka fotona po valnoj duljini daje spektralnu gustoću struje:

$$J(\lambda) = q \cdot QE(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \left[C \cdot \frac{1}{s \cdot m^2 \cdot nm} = \frac{A}{m^2 \cdot nm} \right].$$

Integral spektralne gustoće struje po cijelom spektru daje gustoću struje fotonaponske ćelije:

$$J = \int J(\lambda) d\lambda \left[\frac{A}{m^2} \right].$$

Struja fotonaponske ćelije se dobije integriranjem gustoće struje po cijeloj površini ćelije:

$$i = \int J ds [A].$$

¹⁹ Qdr. (27 June 2010). Solarcellige-en.svg. Preuzeto s: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solarcellige-en.svg>

5.3 Sunčeve zračenja na Zemljinoj površini

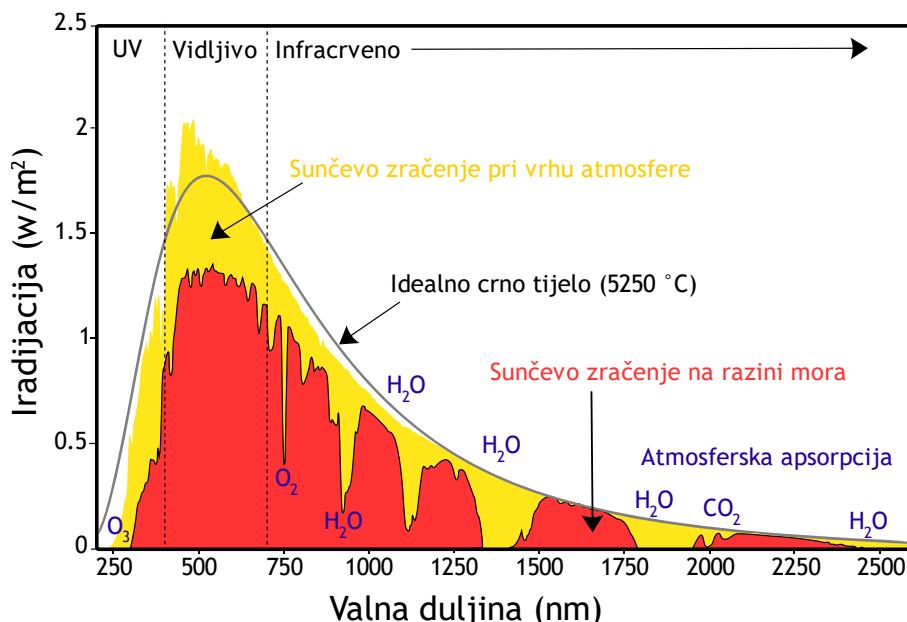
Iradijacija elektromagnetskog zračenja ovisi o toku fotona (broj fotona po jedinici površine) i energiji pojedinačnog fotona. Energija fotona je određena njegovom frekvencijom prema Planck-Einsteinovoj relaciji. Spektralna iradijacija (eng. *Spectral irradiance*) opisuje distribuciju iradijacije zračenja po spektru, tj. po valnim duljinama:

$$I(\lambda) = \frac{P(\lambda)}{S} \left[\frac{W}{m^2 \cdot nm} \right].$$

Spektralni tok fotona opisuje distribuciju toka fotona zračenja po valnim duljinama:

$$\phi(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{E_F(\lambda)} \left[\frac{1}{s \cdot m^2 \cdot nm} \right].$$

Sunčev zračenje se može opisati Planckovim zakonom zračenja crnog tijela za tijelo temperature 6000 K. Sunčev zračenje na Zemljinoj površini ovisi o sastavu atmosfere i njegovo putanji kroz atmosferu. Prolaskom kroz atmosferu svjetlost se apsorbira i raspršuje. Za apsorpciju su posebno zaslužni vodena para i ozon (Slika 5.14). Raspršenje je izraženje za svjetlost viših frekvencija pa se prolaskom kroz atmosferu iz svjetlosti uklanja više svjetlosti viših frekvencija, a u svjetlosti koja direktno dolazi do promatrača ostaje veći udio svjetlosti nižih frekvencija. Tako se prolaskom kroz atmosferu raspršuje više plave svjetlosti, što nebu daje plavu boju, čime u svjetlosti koja direktno dolazi do promatrača ostaje više žute svjetlosti, što Suncu daje žutu boju. Što je Sunce niže na horizontu svjetlost će do promatrača proći veći put kroz atmosferu pa će efekt raspršenja biti izraženiji, što će pri zalasku Sunca nebu dati ljubičastu boju, a Suncu crvenu.



Slika 5.14. Spektralna iradijacija Sunčevog zračenja.²⁰

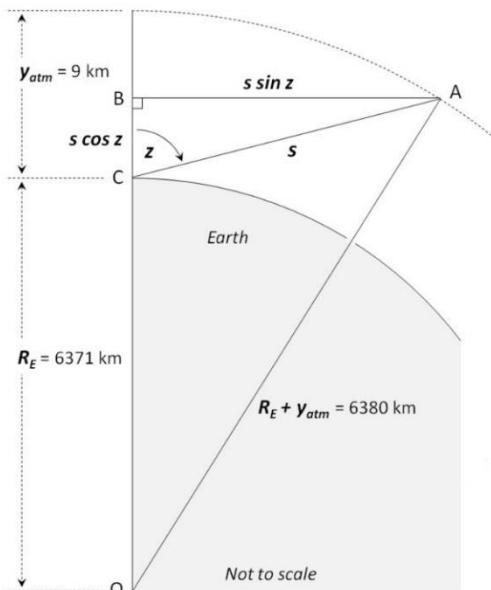
²⁰ Nick84. (14 February 2013). Solar spectrum ita.svg. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solar_spectrum_ita.svg

Koeficijent Broj mase zraka (eng. *Air mass number – AM*) može poslužiti za karakteriziranje Sunčevog zračenja na Zemlji. Za promatrača u točki C na Slici 5.15 zenit je zamišljena točka okomito iznad promatrača, odnosno u smjeru suprotnom od smjera djelovanja gravitacije, koja djeluje prema točki O. Za promatrača u točki C je zenitni kut točke A. Koeficijent AM je omjer puta kojeg svjetlost prijeđe od ulaska u atmosferu do promatrača na Zemljinoj površini (udaljenost AC) i udaljenosti od vrha atmosfere u zenithu do promatrača (Y_{atm}):

$$AM = \frac{AC}{Y_{atm}} \approx \frac{AC}{BC} = \frac{1}{\cos z}.$$

S obzirom da su gotovo svi atmosferski utjecaji na Sunčeve zračenje uzrokovani atmosferskom masom u donjoj polovici atmosfere uzet je model atmosfere debljine 9 km. Uz određene ispravke ovog modela koeficijent postaje jednak:

$$AM = \sqrt{(r \cos z)^2 + 2r + 1} - r \cos z.$$



Slika 5.15. Zenitni kut.²¹

Vrijednost AM koeficijenta izvan atmosfere je 0, te se pri takvima uvjetima testiraju ćelije za upotrebu u svemiru. Atmosferski utjecaj na svjetlost na nadmorskoj visini za zenitni kut 0° , za najkraći put kroz atmosferu, je opisan AM koeficijentom vrijednosti 1. Za ekvatorijalna i tropska područja se koristi koeficijent vrijednosti od 1.0 do 1.1. Zenitni kut se mijenja tokom dana i godine no njegov godišnji prosjek za srednje geografske širine, u kojem živi značajni dio populacije, iznosi 48.2° čemu odgovara AM koeficijent vrijednosti 1.5. Za opisivanje uvjeta npr. na sjeveru Europe se koristi AM koeficijent vrijednosti od 2 do 3 (Tablica 5.1).

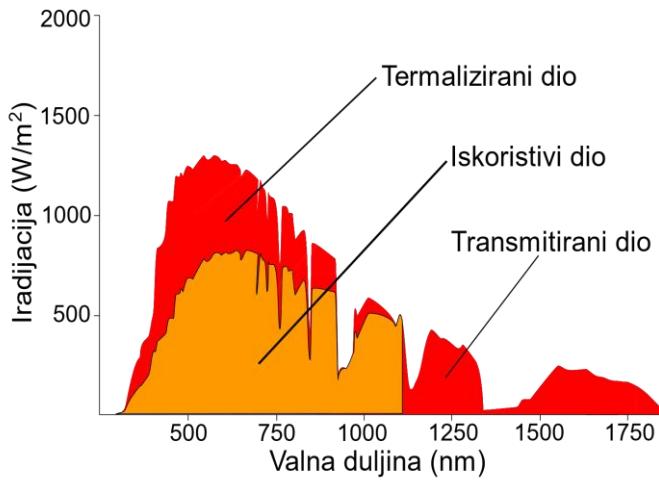
²¹ Neil Clarke. (15 May 2011). Airmass geometry. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Airmass_geometry.png

Tablica 5.1 Procjena AM koeficijenta na nadmorskoj visini za različite zenitne kutove.

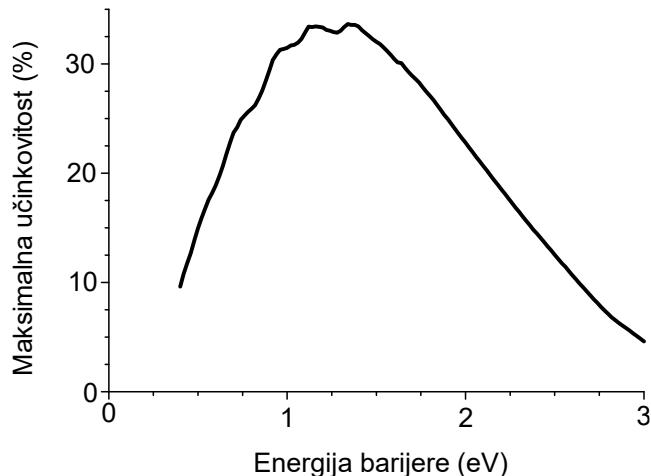
z	AM
0°	1.0
25°	1.1
48.2°	1.5
60°	2.0
70°	2.9
75°	3.8
80°	5.6
85°	10.6
88°	20.3
90°	37.6

5.4 Granice učinkovitosti

Većina energije Sunčevog zračenja je sadržana u ultraljubičastom, vidljivom i infracrvenom dijelu spektra. Izlazni rad silicija iznosi 1.11 eV ($1.78 \cdot 10^{-19} \text{ J}$), što odgovara fotonu valne duljine od 1130 nm. Pri STC fotoni s valnom duljinom većom od 1130 nm čine 19% snage zračenja te tu snagu silicijeva solarna ćelija ne može pretvoriti u električnu energiju. Ti fotoni su transmitirani, odnosno prođu kroz solarnu ćeliju. Za silicijevu solarnu ćeliju fotoni s valnom duljinom manjom od 1130 nm mogu uzrokovati fotonaponski efekt, no samo je onaj dio njihove energije koji je jednak izlaznom radu iskoristiv za proizvodnju električne energije. Ostatak, što pri STC iznosi 33%, se pretvori u toplinsku energiju koju apsorbira ćelija (Slika 5.16). Slijedi da silicijeva ćelija pri STC ne može iskoristiti 52% snage Sunčevog zračenja. Kada se uzmu u obzir ostali gubitci slijedi da je minimalni gubitak ulazne snage silicijeve solarne ćelije 68%, odnosno da je maksimalna teoretska učinkovitost silicijeve solarne ćelije s jednim PN spojem 32%. Shockley – Queisser granica daje maksimalnu teoretsku učinkovitost solarne ćelije s jednim PN spojem pri STC za poluvodič s izlaznim radom od 1.34 eV od 33.7% (Slika 5.17).



Slika 5.16. Iskoristivi dio Sunčevog zračenja za silicijevu fotonaponsku ćeliju.²²



Slika 5.17. Shockley – Queisser granica.

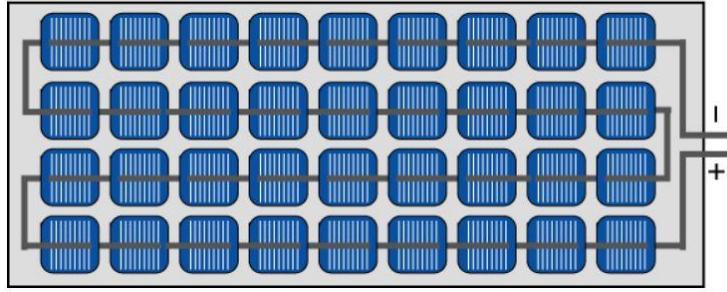
Bolje iskorištenje snage sunčeva spektra, kao i iskorištenje snage šireg dijela spektra je postignuto višeslojnim solarnim ćelijama koje se sastoje od više PN spojeva građenih od poluvodiča s različitim izlaznim radom. Teoretski maksimum učinkovitosti pri STC dvoslojnih ćelija je 42%, troslojnih 49%, a teoretske ćelije s beskonačno slojeva 68%. Solarne ćelije koje koncentriraju svjetlost mogu postići veću učinkovitost, a teoretski maksimum ćelije s beskonačno slojeva koja koncentrira svjetlost iznosi 86.6%. Višeslojne ćelije, kao i ćelije koje koncentriraju svjetlost, su skuplje pa tradicionalne ćelije i dalje dominiraju na tržištu.

5.5 Spajanje fotonaponskih ćelija

Izlazni napon prosječne fotonaponske ćelije je 0.6 V. S obzirom da je to relativno malen napon ćelije se međusobno serijski povezuju. Kako bi se ćelije zaštitele od mehaničkog oštećenja, metalnu mrežu koja ih povezuje od korozije zbog izloženosti vodi i vodenoj pari i

²² Degreen. (22 November 2006). Solar cell SiSpektrum.svg. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solarzelle_SiSpektrum.svg

Ijude od ozljede električnim udarom, povezane ćelije su zatvorene u samostalne jedinice koja se naziva fotonaponski modul, fotonaponska ploča ili solarni panel. Tipični modul sadrži 36 serijski povezanih fotonaponskih ćelija (Slika 5.18) i ima izlazni napon otvorenog strujnog kruga od 21 V odnosno radni napon od 17 V do 18 V pri maksimalnoj snazi, pri standardnim testnim uvjetima. Fotonaponski moduli se mogu sastojati i od paralelno spojenih serija fotonaponskih ćelija. Fotonaponski moduli se međusobno mogu povezati serijski, paralelno ili kombinirano.

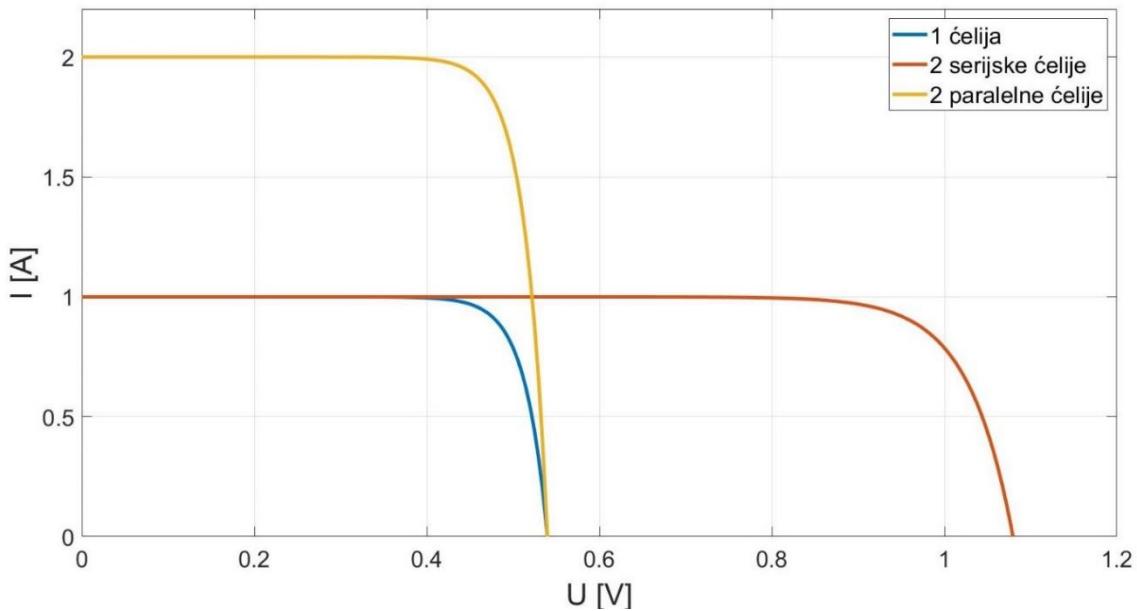


Slika 5.18. Fotonaponski modul od 36 serijski povezanih fotonaponskih ćelija.

Strujno-naponska karakteristika fotonaponskog modula:

$$i = M \cdot i_L - M \cdot i_{Dark} = M \cdot i_L - M \cdot i_S \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \approx M \cdot i_L - M \cdot i_S e^{\frac{qV}{nkT}},$$

gdje je M broj paralelno spojenih ćelija, a N broj serijski spojenih ćelija. Serijskim povezivanjem ćelija se povećava ukupni izlazni napon, a paralelnim povezivanjem ukupna izlazna struja modula (Slika 5.19). Ukupna struja modula je jednak struji pojedinačne ćelije pomnoženoj s brojem paralelno spojenih ćelija. Ukupni izlazni napon serijski spojenih ćelija je jednak zbroju napona pojedinačnih ćelija. Ukupna izlazna struja serijski spojenih ćelija, kao i struja kroz pojedinačnu ćeliju su jednak struji one fotonaponske ćelije koja proizvodi najmanju struju.



Slika 5.19. IV karakteristika serijski i paralelno povezanih fotonaponskih čelija.

Prekrivanjem fotonaponske čelije izlazna struja opada proporcionalno s površinom prekrivenog dijela čelije. Ako je 1 od 36 serijski spojenih čelija fotonaponskog modula zasjenjena (npr. zbog oblaka, snijega, lišća, pijeska, obližnjeg stabla) ukupna izlazna struja će biti smanjena na struju zasjenjene čelije. Potpunim prekrivanjem samo jedne čelije serijski spojenog niza čelija proizvedena električna energiju niza pada na nulu.

Prekrivanjem fotonaponske čelije preostale serijski spojene osvijetljene čelije uzrokuju nepropusnu polarizaciju prekrivene čelije. Kada napon dosegne vrijednost napona proboga struja kroz nepropusno polariziranu čeliju naglo poraste što može rezultirati njenim uništenjem. Paralelnim dodavanjem suprotno polarizirane bypass diode uništenje prekrivenih fotonaponskih čelija se može spriječiti. Osvijetljena čelija je propusno polarizirana, pa je njena bypass dioda nepropusno polarizirana. Prekrivanjem čelije ona postane nepropusno polarizirana pa njena bypass dioda postane propusna te provodi struju koja time zaobilazi prekrivenu čeliju. Zbog isplativosti se paralelno dodaje jedna bypass dioda na oko 15 čelija jer je njihova energija maksimalna energija koju prekrivena čelija može raspršiti bez oštećenja.

5.6 Vrste fotonaponskih čelija

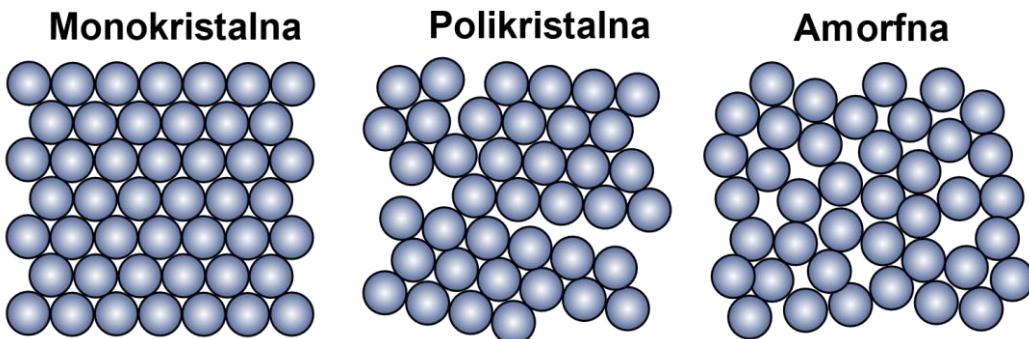
Većina fotonaponskih čelija je na bazi kristalnog silicija, među kojima se razlikuju one na bazi monokristalnog i polikristalnog silicija, i u manjoj mjeri amorfognog silicija (Slika 5.20). U upotrebi su fotonaponske čelije i od drugih materijala, no one na bazi silicija prevladavaju zbog njegove dostupnosti i ne toksičnosti za okoliš.

Fotonaponske čelije od monokristalnog silicija su nazučinkovitije (16-18%). Površina potrebna za proizvodnju 1 kW električne snage pri STC iznosi oko 7 m^2 . Izrađuju se rezanjem četiriju strana cilindrične silicijeve monokristalne poluge čime se dobije čelija s zaobljenim rubovima s izrazito uniformnom kristalnom strukturom. Proizvodnja ove vrste

ćelija je najsuklja zbog potrebe za dobivanjem monokristalne poluge. Pri rezanju rubnih zakrivenih ploha dio silicija se odbacuje ili reciklira kroz izradu novih poluga što podiže cijenu proizvodnje.

Fotonaponske ćelije od polikristalnog ili multikristalnog silicija su manje učinkovite (11-16%). Površina potrebna za proizvodnju 1kW električne energije pri STC iznosi oko 8 m^2 . Ovaj tip ćelije se ne dobiva rezanjem monokristala, već hlađenjem rastopljenog silicija u četvrtastom kalupu. Hlađenjem nastaje neuniformna kristalna struktura koja se sastoji od nasumično raspoređenih kristala različite veličine, oblika i orientacije. Kako nema potrebe za dobivanjem velike monokristalne poluge, a i pri izradi se odbacuje minimalno silicija ovaj tip ćelije je jeftiniji.

Fotonaponske ćelije tankog filma od amorfognog silicija nemaju kristalnu strukturu. Imaju nižu učinkovitost (6-8%) i kraći životni vijek. Ovaj tip fotonaponske ćelije se dobiva polaganjem jednog ili više tankih slojeva (tankog filma) amorfognog silicija na podlogu. U proizvodnji nije potrebna visoka temperatura što proizvodnju čini jednostavnijom i jeftinijom. Iako ima manju učinkovitost amorfni kristal bolje apsorbira svjetlost. Negativni utjecaj više temperature i sjene je manje izražen nego kod ćelija od kristalnog silicija. Ćelije izrađene tehnologijom tankog filma su fleksibilne i lagane. Glavna prednost ovog tipa ćelija je cijena proizvodnje, a glavni nedostatak niža učinkovitost.



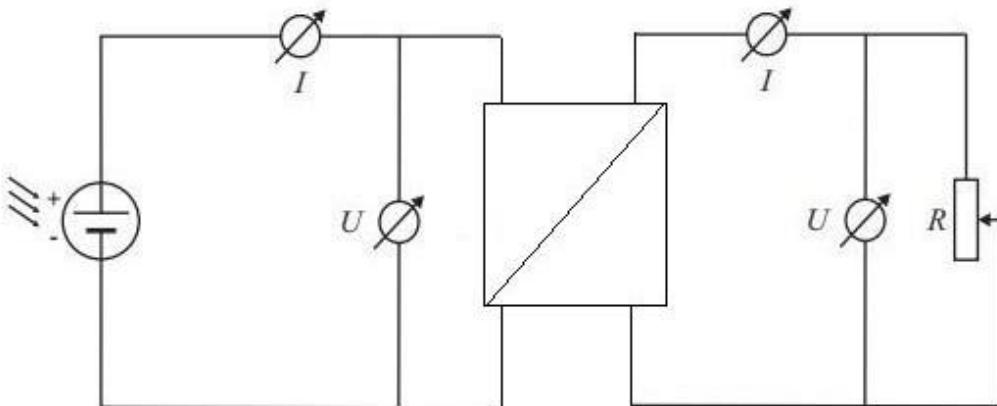
Slika 5.20. Struktura monokristalne, polikristalne i amorfne fotonaponske ćelije.²³

5.7 Tragač točke maksimalne snage

Točka maksimalne snage se mijenja s iradijacijom upadnog zračenja i temperaturom ćelije. Upadno zračenje i temperatura se mijenjanu tokom dana s promjenom položaja sunca i lokalnih meteoroloških uvjeta. Za održavanje fotonaponskog sustava u točki maksimalne snage se koristi Algoritam tragača točke maksimalne snage (eng. *Maximum power point tracking algorithm - MPPT algorithm*) koji se implementira putem pretvarača. Za danu iradijaciju zračenja i temperaturu izlazna snaga modula je određena otporom na koji je modul povezan u strujni krug, odnosno izlazna snaga fotonaponskog modula je određena

²³ Rfassbind. (5 August 2015). Schematic of atomic arrangements of allotropic forms of silicon. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic_of_allotropic_forms_of_silicon_horizontal_plain.svg

točkom u kojoj se sijeku PV krivulja modula i PV krivulja otpornika. Kako bi za danu iradijaciju i temperaturu PV krivulja otpornika prolazila kroz maksimum PV krivulje modula, odnosno kroz točku maksimalne snage IV krivulje, uvodi se pretvarač čija je zadaća mijenjati otpor otpornika, odnosno pomicati PV krivulju otpornika prema točki maksimalne snage (Slika 5.21). Pretvarač uz pomoć MPPT algoritma pronađazi napon i struju pri kojima je izlazna snaga modula maksimalna, te prilagođava napon i struju kroz otpornik tako da snaga koju otpornik apsorbira bude jednaka maksimalnoj izlaznoj snazi modula. Tragač točke maksimalne snage se koristi i za upravljanje sustava s fotonaponskim modulima za praćenje kretanja sunca.



Slika 5.21. Strujni krug s fotonaponskim modulom, pretvaračem i otpornikom

Učinkovitost fotonaponskog sustava ovisi o učinkovitosti fotonaponske ćelije (8-20%), učinkovitosti energetskog pretvarača (95-98%) i učinkovitosti MPPT algoritma (98%). Razvijeni su mnogi MPPT algoritmi koji se razlikuju po složenosti implementacije, potrebnim senzorima, rasponu efikasnosti, cijeni, reakciji na brze promjene temperature i iradijacije zračenja itd. Najpopularniji MPPT algoritmi koriste tzv. *hill-climbing* princip, na kojem su bazirani sljedeći algoritmi:

- Perturb and Observe – P&O (Algoritam Pomak i Promatranje)
- Incremental Conductance – InCond (Inkrementalni algoritam)
- Ripple correlation control – RCC
- dP/dV ili dP/di Feedback control
- Slide control

Ostali često korišteni MPPT algoritmi:

- Fuzzy Logic Control - FLC (Upravljanje neizrazitom logikom)
- Neural Networks - NN (Neuronske mreže)
- Fractional open circuit voltage (Djelomični napon praznog hoda)
- Fractional short circuit current (Djelomična struja kratkog spoja)
- Current Sweep (Strujni zamah)

5.7.1 Hill-climbing algoritmi

Algoritmi bazirani na tzv. *hill-climbing* principu se nazivaju *hill-climbing* algoritmi. Za primjer je opisan princip rada dP/dV *Feedback control* algoritma. Algoritam u diskretnim koracima mijenja napon istosmjerne struje između fotonaponskog sustava i energetskog pretvarača, tako da odnos predznaka promjene snage i predznaka promjene struje u jednom koraku određuje hoće li se napon u sljedećem koraku povećati ili smanjiti. Dok je ispunjen uvjet:

$$\frac{dP}{dU} > 0,$$

promjena napona zadržava isti predznak. Ako povećanjem napona u jednom koraku poraste i snaga, napon će se u sljedećem koraku povećati. Povećanjem napona nakon što je snaga dosegnula maksimalnu vrijednost rezultira smanjenju snage čime navedeni uvjet više nije ispunjen i napon se u sljedećem koraku smanji. Dobiveni napon i njemu odgovarajuća struja daju točku maksimalne snage. Analogno vrijedi ako se kreće od napona otvorenog strujnog kruga prema manjim vrijednostima napona.

Hill-climbing algoritmi zahtijevaju malu računalnu snagu i efikasni su pri konstantnoj iradijaciji zračenja, no imaju dva glavna nedostatka. Ako se sunčeve zračenje mijenja brzo i kontinuirano ne mogu odrediti mijenja li se snaga uslijed promjene napona ili promjene iradijacije zračenja. Npr. pad iradijacije zračenja može rezultirati smanjenjem snage između dva koraka iako se maksimum snage još uvijek nalazi u istom smjeru. Drugi problem je osciliranje oko točke maksimalne snage. Zbog diskretnе promjene napona napon i struja gotovo nikada točno ne pogode točku maksimalne snage već osciliraju oko nje. Što je veći korak u promjeni napona algoritam će brže doći do točke maksimalne snage, što je posebno važno u slučaju brzih promjena zračenja, no biti će veća i oscilacija. Veće oscilacije rezultiraju manjoj proizvodnji električne energije, pa je potrebno pronaći optimalan korak u promjeni napona pri kojem su gubitci minimalni. Ovaj problem se može umanjiti uvođenjem promjenjivog koraka promjene napona u algoritam.

PV krivulja zasjenjenog fotonaponskog modula ima više maksimuma. Opisani algoritam ne može odrediti globalni maksimum već se zaustavi na najbližem lokalnom maksimumu koji ovisi o polazišnoj točki algoritma. Učinkovitost algoritama sposobnih za pronađenje globalnog maksimuma je oko 97%, no oni se mogu koristiti u kombinaciji s tradicionalnim algoritmima čija je učinkovitost 99%, gdje navedeni algoritam periodički provjerava globalni maksimum.

6 Umjetni izvori svjetlosti

Usijanje, luminiscencija i električno pražnjenje su neki od procesa kojima se u umjetnim izvorima dobiva svjetlost. Umjetni izvori svjetlosti se mogu podijeliti na žarulje s žarnom niti, žarulje s plinskim pražnjenjem i optoelektronički izvori kao što su LED diode i laseri. Neki izvori za dobivanje svjetlosti koriste kombinaciju navedenih procesa.

6.1 Žarulja s žarnom niti

Inkandescencija, usijanje ili žarenje je pojava emisije vidljive svjetlosti tijela kao rezultat njegova zagrijavanja. Kruto tijelo ili tekućina na temperaturi iznad apsolutne nule zrači elektromagnetsko zračenje. Ovisnost valne duljine pri kojoj je iradijacija maksimalna o temperaturi je dana Wienovim zakonom pomaka. Povećanjem temperature tijela se smanjuje valna duljina maksimuma (Slika 2.2). Za većinu krutih tijela i tekućina iradijacija u vidljivom dijelu spektra postane dovoljna jaka da je ljudsko oko može detektirati pri temperaturi od oko 800 K. Dalnjim povećanjem temperature tijela raste iradijacija sukladno Stefan-Boltzmannovom zakonu, te se smanjuje valna duljina maksimalne iradijacije sukladno Wienovom zakonu pomaka.

Inkandescentni umjetni svjetlosni izvori sadrže filament kroz koji protječe električna struja koja filament zagrijava do usijanja. To su npr. inkandescentna žarulja i halogena žarulja.

Inkandescentna žarulja ili klasična žarulja (eng. *incandescent light bulb, incandescent lamp*) sadrži filament od volframa koji se nalazi u vakuumu unutar staklenog tijela kako bi se spriječila oksidacija užarene volframove niti. Uglavnom se koristi volfram zbog njegova visokog tališta i relativne dostupnosti.

Halogena žarulja ili volfram halogena žarulja (eng. *halogen lamp, tungsten halogen lamp*) sadrži filament od volframa koji se nalazi unutar staklenog tijela koje je ispunjeno inertnim plinovima i malom količinom halogenih elemenata kao što su jod i brom. Usljed zagrijavanja volfram postepeno isparava. Prisutnost halogenih elemenata u okolini filimenta uzrokuje taloženje isparenog volframa nazad na filament čime se produljuje njegov životni vijek kao i transparentnost staklenog tijela.

6.2 Žarulja s plinskim pražnjenjem

Za opis rada mnogih umjetnih svjetlosnih izvora, pa tako i nekih žarulja s plinskim pražnjenjem, potrebno je razumjeti pojavu luminiscencije.

Luminiscencija je pojava emisije vidljive svjetlosti iz tvari koja nije uzrokovana njenim zagrijavanjem. U procesu luminiscencije elektroni se u atomu pobude, a zatim relaksiraju pri čemu emitiraju foton vidljive svjetlosti. Za tvar koja pokazuje svojstvo luminiscencije se koristi naziv „fosfor“, što je ujedno i naziv za kemijski element. U engleskom jeziku je

situacija nešto jasnija jer se takva tvar naziva *phosphor*, a kemijski element *phosphorus*. S obzirom na prirodu pobuđenja mogu se razlikovati sljedeće vrste luminiscencije:

- fotoluminiscencija (emisija svjetlosti uslijed optičke pobude, specijalni slučajevi: fluorescencija, fosorescencija)
- elektroluminiscencija (emisija svjetlosti uslijed električne pobude, specijalan slučaj: katodoluminiscencija)
- kemoluminiscencija (emisija svjetlosti uslijed kemijske reakcije)
- kristaloluminiscencija (emisija svjetlosti uslijed kristalizacije)
- radioluminiscencija (emisija svjetlosti uslijed bombardiranja gama zračenjem)
- mehanoluminiscencija (emisija uslijed mehaničkog djelovanja nad čvrstom tvari)
- termoluminiscencija (emisija prethodno apsorbirane elektromagnetske energije u obliku svjetlosti uslijed zagrijavanja)

Fotoluminiscencija je pojava emisije vidljive svjetlosti iz tvari uslijed apsorpcije fotona koji ne mora pripadati vidljivom djelu spektra. Apsorbirani foton pobudi elektron iz osnovnog stanja u pobuđeno stanje. Nakon nekog vremenskog intervala elektron se iz pobuđenog stanja relaksira nazad u stanje niže energije i pri tome emitira foton vidljive svjetlosti (Slika 6.1).

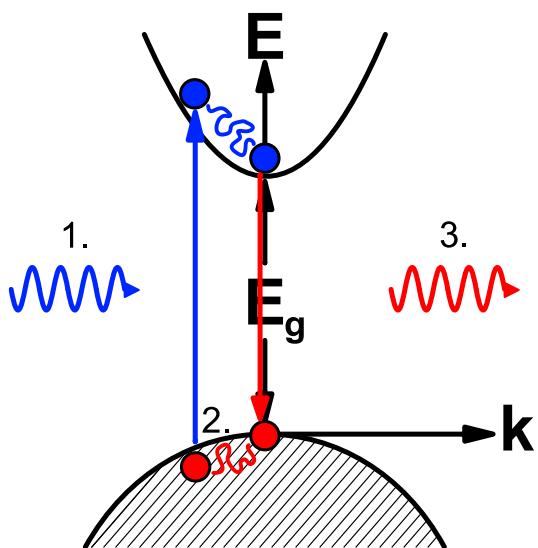
Kod fotoluminiscencije u intrinsičnom poluvodiču apsorpcijom fotona dolazi do pucanja kovalentne veze, nastanka para elektron-šupljina i pobuđenja elektrona iz valentne u vodljivu vrpcu. Pobuđeni elektron se ubrzo relaksira na najnižu energiju vodljive vrpce, nakon čega prijeđe nazad u valentnu vrpcu, rekombinira se s šupljinom, i otpusti foton. Valna duljina apsorbiranog i emitiranog fotona ovisi o energiji barijere, odnosno razlici energije valentne i vodljive vrpce.

Kod fotoluminiscencije u ekstrinsičnom poluvodiču apsorpcijom fotona može doći do pobuđenja elektrona uslijed pucanja kovalentne veze ili pobuđenjem elektrona primjesnih atoma. U ekstrinsičnim poluvodičima primjesni nositelji naboja formiraju vrpcu u zabranjenom pojasu. Pobuđeni elektroni relaksacijom mogu prijeći iz vodljive vrpce u svoju vrpcu u zabranjenom pojasu ili u valentnu vrpcu, pa energija emitiranog fotona može biti manja od energije barijere.

Životni vijek pobuđenog stanja fluorescentnih tvari se mjeri u nanosekundama, a fosorescentnih tvari u intervalu od milisekundi do sati. Primjer umjetnog svjetlosnog izvora baziranog na pojavi fluorescencije je fluorescentna žarulja.

Elektroluminiscencija je pojava emisije vidljive svjetlosti iz tvari uslijed njenog izlaganja električnoj struji ili električnom polju. Pobuđenje elektrona je uzrokovano električnom strujom ili električnim poljem, a ostatak procesa je isti kao kod fotoluminiscencije. Elektroluminiscencija je pojava karakteristična za poluvodiče.

Žarulja s plinskim pražnjenjem, elektrolučna lampa ili lučna lampa (eng. *gas-discharge lamp*, *arc lamp*) se temelji na pojavi električnog proboga plina, odnosno električnog luka. Žarulja se sastoji od staklenog tijela koji na svojim krajevima ima dvije elektrode; anodu (pozitivna elektroda) i katodu (negativna elektroda). Stakleno tijelo je ispunjeno najčešće plemenitim plinom (argon, neon, kripton, ksenon) ili njihovom mješavinom. U smjesu s plinom može biti dodana živa, natrij ili metalni halid (kemijski spoj metala i halogenog elementa; npr. fluoridi, kloridi, bromidi, jodidi) koji prilikom paljenja lampe uslijed porasta temperature ispare i postanu dio plinske smjese.



Slika 6.1. Fotoluminiscencija.

Paljenjem žarulje se između elektroda uspostavi visoki napon, odnosno električno polje. Polje ionizira atome plina (izbije elektrone iz atoma plina) u blizini anode čime oni postanu kationi (pozitivni ioni). Pod utjecajem električnog polja oslobođeni elektroni (-) se počnu gibati prema anodi (+), a kationi (+) prema katodi (-). Ubrzani kationi se na svom putu sudare s neutralnim atomima plina pri čemu može doći do njihove ionizacije, odnosno do stvaranja slobodnog elektrona, i neutralizacije kationa, odnosno do apsorpcije slobodnog elektrona. Apsorpcijom slobodni elektron prijeđe u niže energetsko stanje pri čemu emitira foton. Novonastali kationi se sada pod utjecajem električnog polja krenu gibati prema katodi, te se cijeli proces ponavlja. Elektroni se na ovaj način prenose kroz plin od katode prema anodi. Valna duljina emitirane svjetlosti ovisi o emisijskom spektru atoma plina, ali i o tlaku plina, gustoći struje itd.

Žarulje s plinskim pražnjenjem se mogu podijeliti na niskotlačne, visokotlačne i visoko-intenzivne.

Niskotlačne žarulje s plinskim pražnjenjem (eng. *low pressure discharge lamps*) rade pri tlaku koji je mnogo manji od atmosferskog. Primjer ovakve žarulje je fluorescentna žarulja, neonska žarulja i niskotlačna natrijeva žarulja. Fluorescentna žarulja (eng. *fluorescent lamp, FL*) podrazumijeva niskotlačnu živinu žarulju s plinskim pražnjenjem. Stakleno tijelo je ispunjeno plemenitim plinom i atomima živih para. Unutarnja strana staklenog tijela lampe je prekrivena fluorescentnim slojem. Pod utjecajem napona atomi plemenitog plina se ioniziraju. Ioni se nadalje sudaraju s atomima žive koji se ioniziraju, a zatim pri neutralizaciji atomi žive emitiraju UV zračenje. Fluorescentni sloj uslijed apsorpcije UV zračenja emitira vidljivu svjetlost. Tlak u uobičajenoj fluorescentnoj žarulji je svega 0.3% atmosferskog. Osim cjevaste fluorescentne žarulje postoji i kompaktna fluorescentna žarulja (eng. *compact fluorescent lamp, CFL*) ili štedna žarulja. To je fluorescentna žarulja oblikovana na način da se može koristiti u rasvjetnim tijelima predviđenim za žarulje s žarnom niti.

Visokotlačne žarulje s plinskim pražnjenjem (eng. *high pressure discharge lamps*) rade pri tlakovima koji su manji od atmosferskog do tlakova koji su nekoliko desetaka puta veći od

atmosferskog. Primjer ovakve žarulje je metal-halid ili metalhalogena žarulja, živina žarulja i visokotlačna natrijeva žarulja.

Visoko-intenzivne žarulje s plinskim pražnjenjem (eng. *high-intensity discharge lamps*) su slične ostalim žaruljama s plinskim pražnjenjem, no neke su komponente drugačije izvedene kako bi se postigle određene karakteristike. Žarulje ovakve vrste se također nazivaju metal-halid žarulje, živine žarulje, natrijeve žarulje, ksenonske žarulje i sl.

6.3 LED

Svetleća dioda ili LED dioda (eng. *light emitting diode, LED*) je propusno polarizirana dioda koja procesom elektroluminiscencije emitira nekoherentno svjetlo. Potencijalna barijera propusno polarizirane diode je umanjena vanjskim električnim poljem što jača struju difuzije, odnosno olakšava prijelaz većinskih nosioca naboja na drugu stranu poluvodičkog spoja gdje oni postaju manjinski nosioci. Porastom koncentracije manjinskih nosioca raste učestalost rekombinacije. Rekombinacijom elektron prelazi iz vodljive u valentnu vrpcu što može rezultirati emisijom fotona.

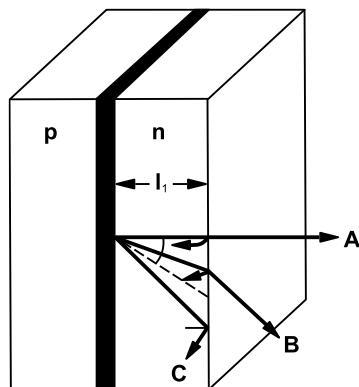
6.3.1 Struktura i optički gubitci

Osnovna struktura LED diode se svodi na aktivni sloj između dva sloja omotača na koje se nastavlja sloj supstrata na jednom, odnosno kontakti sloj na drugom. U aktivnom sloju elektroluminiscencijom nastaje svjetlost. Aktivni sloj je poluvodički materijal s energijom barijere koja rezultira fotonima željene valne duljine. Slojevi omotača su poluvodiči s širom energetskom barijerom kako nositelji naboja difuzijom ne bi napustili aktivni sloj. Supstrat pruža mehaničku potporu, disipaciju topline i električni kontakt, a kontakti sloj pruža električni kontakt. Radi minimiziranja neželjene apsorpcije na spojevima slojevi moraju imati usklađene kristalne rešetke.

Prema Snellovom zakonu pri prijelazu svjetlosti između dva optička sredstva dolazi do loma ili refrakcije svjetlosti prema relaciji:

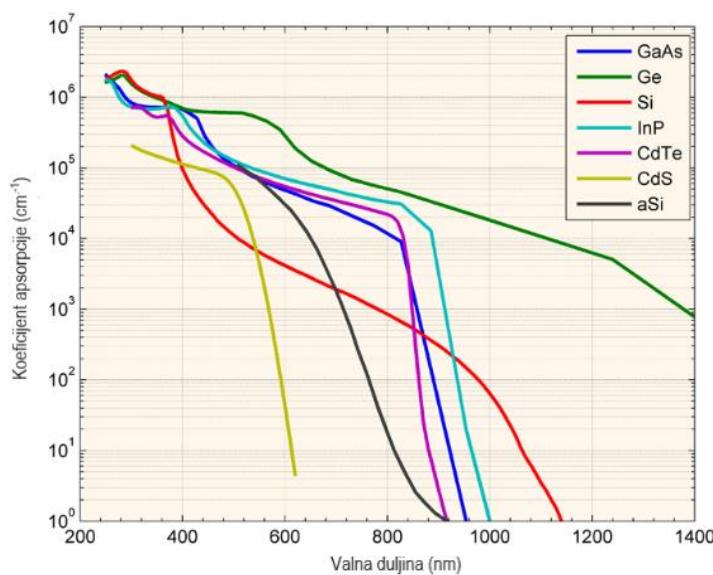
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

gdje je θ_1 kut upadne zrake, θ_2 kut loma, a n_1 i n_2 indeksi loma ili optičke gustoće sredstva iz kojeg zraka dolazi i sredstva u koje zraka ulazi. Kut se mjeri s obzirom na okomicu na granicu sredstava. Indeks loma je omjer brzine svjetlosti u vakuumu i pripadnom sredstvu. Indeks loma za vakuum poprima minimalnu vrijednost, odnosno jednak je jedan, a za svako drugo sredstvo indeks je veći od jedan jer je brzina svjetlosti manja nego u vakuumu. Sredstvo s većim indeksom loma je optički gušće, odnosno s manjim indeksom optički rjeđe. Kada je pri prijelazu zrake iz optički gušćeg u optički rjeđe sredstvo kut loma jednak 90° kut upadne zrake se naziva Fresnelov, granični ili kritični kut. Ako je upadni kut veći od graničnog, kut loma će biti veći od 90° , odnosno upadna zraka će se reflektirati od granice nazad u isto sredstvo. Pojava kada je upadni kut jednak ili veći od graničnog kuta se naziva totalna refleksija (Slika 6.2).



Slika 6.2. U slučaju pod c) upadni kut je veći od Fresnelovog te je ostvarena totalna refleksija.

Ovisnost apsorpcijskog koeficijenta pri različitim valnim duljinama raznih poluvodičkih materijala koji se koriste u izradi LED dioda je dana na Slici 6.3. Vidljivo je kako su apsorpcijski koeficijenti manji pri većim valnim duljinama. Zbog toga su se prve LED diode proizvodile za infracrveno područje. Na ordinati je prikazan koeficijent apsorpcije za udaljenost od jednog centimetra, pa tako koeficijent od $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-1}$, odnosno 99,99999 zvuči kao mnogo, ali realni slojevi su jako tanki, ponekad manje od jednog mikrona, pa to gušenje u ovom kontekstu nije značajno.



Slika 6.3. Ovisnost koeficijenta apsorpcije o valnoj duljini.²⁴

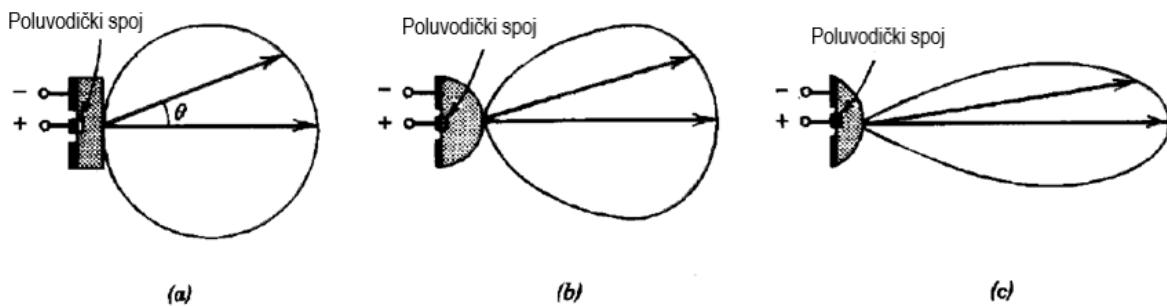
²⁴ Christiana Honsberg, Stuart Bowden. (2018). Het absorptiespectrum van verschillende halfgeleiders afgezet tegen de golflengte. Preuzeto s: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Absorpt.png>

Mogu se razlikovati LED diode s površinskom i rubnom emisijom. U LED diodi s površinskom emisijom gornji sloj omotača i metalni kontakti su transparentni za emitirane valne duljine kako bi svjetlost emitirana u aktivnom sloju mogla napustiti diodu. U LED diodi s rubnom emisijom veća optička gustoća aktivnog sloja od okolnih slojeva omotača uzrokuje totalnu refleksiju emitirane svjetlosti na granici slojeva i zadržava svjetlost u aktivnom sloju u kojem se svjetlost giba cik-cak do izlaza iz LED diode.

Apsorpcija emitirane svjetlosti unutar diode uzrokuje optičke gubitke. Poluvodički slojevi LED diode, uključujući aktivni sloj, nisu u potpunosti transparentni za emitiranu svjetlost. Zbog toga pri prolasku svjetlosti kroz slojeve postoje određeni gubitci proporcionalni s koeficijentom apsorpcije tih slojeva. U LED diodama s površinskom emisijom dio svjetlosti u aktivnom sloju koji se emitira prema unutrašnjosti LED diode se apsorbira. Svjetlost emitirana prema vanjskom dijelu LED diode nailazi na granice između slojeva, a na kraju i na granicu poluvodič-zrak gdje je razlika u optičkoj gustoći najveća. Na granicama slojeva svjetlost se lomi i reflektira. Lomom svjetlosti između slojeva raste put koji svjetlost prijeđe prije nego izade iz LED diode što povećava njenu apsorpciju. Reflektirana svjetlost se vrati u poluvodič gdje se ponovno reflektira ili se apsorbira.

Unutarnja kvantna učinkovitost LED diode je jednaka omjeru broja generiranih fotona u aktivnom sloju po rekombiniranom paru elektron-šupljina, a vanjska kvantna učinkovitost omjeru broja fotona koji napuste poluvodičku diodu po rekombiniranom paru elektron-šupljina.

Oblik vanjskog prozirnog kućišta koji štiti kristal LED diode od kratkog spoja, oštećenja i vlage se najčešće izrađuje od optički transparentne epoksi smole. Zahvaljujući njenim optičkim svojstvima pogodna je za oblikovanje u razne oblike, pa tako i u leće različitih fokusnih udaljenosti. Kućište tako može biti ravna ploha, sferna ili parabolična leća. Time se mogu postići različiti profili zračenja LED diode, od difuznih do jako usmjerenih (Slika 6.4). Profil zračenja LED diode s rubnom emisijom je eliptičan.



Slika 6.4. Utjecaj a) ravnog, b) sfernog i c) paraboličnog kućišta na profil zračenja.

6.3.2 Boja

Valna duljina, odnosno boja, emitirane svjetlosti je određena energijom fotona, odnosno razlikom u energiji pobuđenog i nepobuđenog stanja elektrona. LED diode proizvode svjetlo relativno uskog spektra, odnosno proizvode gotovo monokromatsku svjetlost. 1961. god. je

proizvedena prva praktična LED dioda, koja je emitirala infracrveno zračenje. 1962. god. je proizvedena prva LED dioda u vidljivom spektru (crvena LED dioda), a 1972. god. prva žuta LED dioda. 1976. god je proizvedena prva plava LED dioda, a 1994. god. prva plava LED dioda visokog intenziteta što je omogućilo proizvodnju bijele LED diode. LED diode su u počeku bile slabog intenziteta, odnosno preslabe za osvjetljavanje. Primjenu su uglavnom nalazile kao indikatori ili npr. u sedam-segmentnim zaslonima.

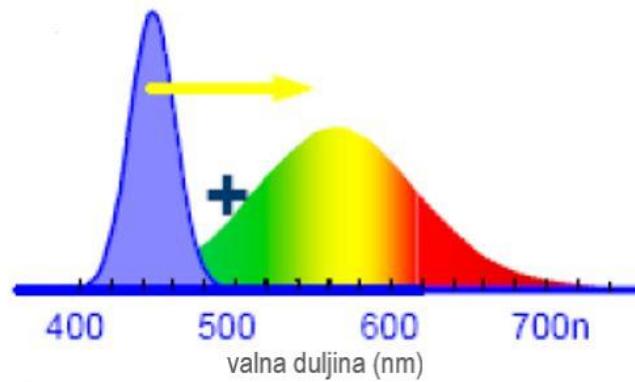
Dva su osnovna načina izvedbe bijele LED diode. Mogu se koristiti individualne LED diode koje emitiraju primarne boje (crvena, zelena i plava) pa se njihovim miješanjem u određenom omjeru dobije bijela svjetlost. Spektar ove svjetlosti nije kontinuiran pa ima niži indeks renderiranja boja. Drugi način je korištenje plave LED diode ili UV LED diode za osvjetljavanje „fosfornog“ sloja. S plavom LED diodom se koristi „fosforni“ sloj koji fotoluminiscencijom daje bijelu svjetlost širokog i kontinuiranog spektra (Slika 6.5). Dobiveni spektar ima viši indeks renderiranja boja, ali nižu učinkovitost. S UV LED diodom se koristi više slojeva „fosfora“ koji zajedno emitiraju plavu, zelenu i crvenu svjetlost (Slika 6.6). S njima se može postići svjetlost s najboljim indeksom renderiranja boja, ali je nedostatak manja učinkovitost kao i opasnost od potencijalnog izlaganja UV zračenju.

Kada „fosforni“ sloj apsorbira foton elektron se u danom atomu sloja pobudi, a zatim termalizacijom relaksira na najnižu energetsku razinu pobuđenog stanja. Zatim se nadalje relaksira u nepobuđeno stanje pri čemu se emitira foton. Termalizacijom se u „fosfornom“ sloju otpusti fonon, odnosno poraste prosječna kinetička energija atoma sloja, tj. temperatura sloja poraste. S obzirom da je energija apsorbiranog fotona jednaka zbroju energije fonona i emitiranog fotona, energija emitiranog fotona će biti manja, odnosno valna duljina veća, od apsorbiranog fotona. Povećanje valne duljine rezultira pomicanjem spektra emitirane svjetlosti prema većim valnim duljinama. Povećanje valne duljine maksimuma intenziteta emitirane svjetlosti u odnosu na apsorbiranu svjetlost se naziva Stokesov pomak. Ono je uzrok manje učinkovitosti fosforecentnih bijelih LED dioda s plavom LED diodom kao izvorom u usporedbi s onima s UV LED diodom kao izvorom jer se u prvom slučaju veći dio emitiranog zračenja pomakne u infracrveni dio spektra. Za fotoluminiscenciju se najčešće koristi „fosfor“ koji je žute boje pa bijeloj LED diodi daje žutu boju kada je ugašena.

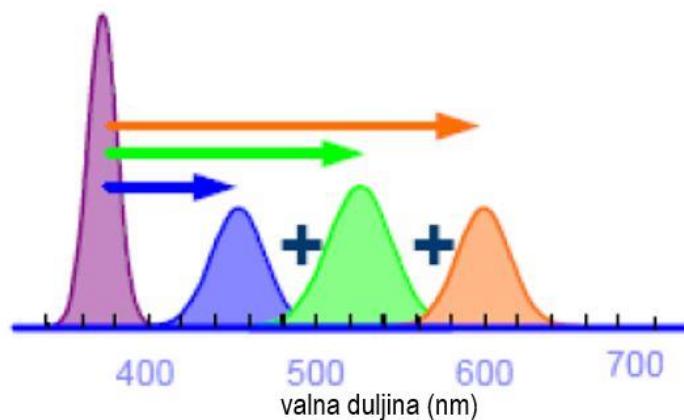
Boja predmeta koji nije zagrijan do usijanja ovisi o tome koje valne duljine predmet apsorbira, a koje reflektira. Pa će tako predmet crvene boje uglavnom reflektirati crveni dio spektra, a apsorbirati ostatak. Crni predmet će apsorbirati, a bijeli reflektirati cijeli vidljivi spektar. Osim o interakciji svjetlosti i tvari od koje je predmet sačinjen, boja predmeta ovisi i o spektru upadne svjetlosti. Predmet ispod upadne svjetlosti kojoj nedostaju neke valne duljine ili su slabijeg intenziteta u usporedbi s prirodnom svjetlosti možda neće biti iste boje kao pod prirodnim svjetлом. Indeks renderiranja boja mjeri sposobnost izvora svjetlosti da predmeti osvjetljeni tim svjetлом imaju istu boju kada su osvjetljeni prirodnim svjetлом.

Još jedan parametar koji se koristi u određivanju kvalitete umjetnog izvora svjetlosti je temperatura boje. Temperatura boje umjetnog izvora je temperatura idealnog crnog tijela koje emitira svjetlost koja je usporedljiva sa svjetlošću tog izvora. Temperatura boje ima smisla samo za svjetlosne izvore čiji je spektar usporedljiv sa spektrom idealnog crnog tijela, odnosno spektar izvora mora približno pokrivati vidljivi spektar kao u slučaju crnog tijela. Temperatura boje se izražava u kelvinima (K). Temperature boje iznad 5000 K se nazivaju hladne boje (plavkaste), dok se one od 2700 do 3000 K nazivaju tople boje (žućkaste). Korelirana temperatura boje (eng. *correlated colour temperature*, CCT) svjetlosti umjetnog

izvora je temperatura crnog tijela koje zrači svjetlost koja se prema percepciji ljudskog oka najviše slaže sa svjetlosti izvora. Ovaj parametar se može koristiti i kada spektar zračenja nije usporedljiv sa spektrom crnog tijela.



Slika 6.5. Fosforecentna bijela LED dioda s plavom LED diodom kao izvorom.



Slika 6.6. Fosforecentna bijela LED dioda s UV LED diodom kao izvorom.

7 Laseri

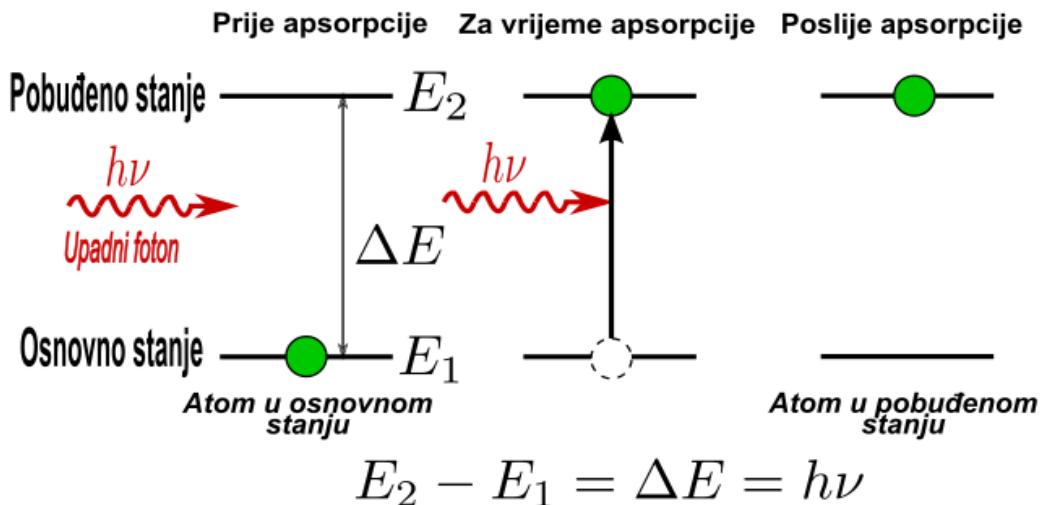
7.1 Apsorpcija, spontana i stimulirana emisija

Bohrov model atoma je pokazao da se interakcija jezgre i elektrona u atomu može opisati uvođenjem diskretnih energetskih razina u elektronskom omotaču atoma, te elektroniapsorpcijom i emisijom točno određene energije mogu prelaziti između tih energetskih razina. Prelazak elektrona u više energetsko stanje se naziva pobuđenje, za elektron ili atom se kaže da se pobudio, odnosno da je elektron ili atom u pobuđenom stanju. Prelazak elektrona u niže energetsko stanje se naziva relaksacija, za elektron ili atom se kaže da se relaksirao, odnosno da je elektron ili atom u nepobuđenom stanju.

Elektron u atomu se može pobuditi izlaganjem elektromagnetskom zračenju, odnosno elektron u posljednjoj ljesci elektronskog omotača može apsorbirati foton i prijeći iz nepobuđenog u pobuđeno stanje (Slika 7.1). Foton se može apsorbirati samo ako je njegova energija jednaka razlici energije pobuđenog i nepobuđenog stanja. Energija fotona je dana izrazom:

$$E_f = h\nu,$$

gdje je h Planckova konstanta, a ν frekvencija.

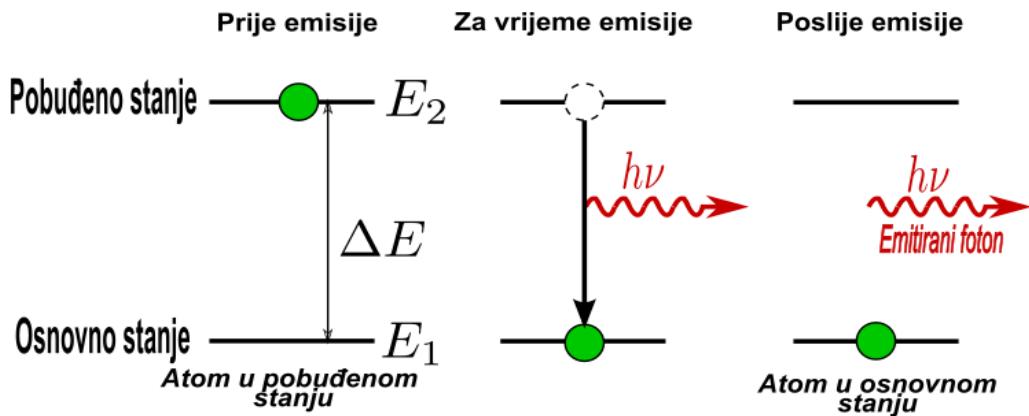


Slika 7.1. Apsorpcija fotona.²⁵

Elektron iz pobuđenog u nepobuđeno stanje može prijeći spontanom ili prisilnom emisijom. U oba slučaja elektron emitira foton čija je energija jednaka razlici energije pobuđenog i nepobuđenog stanja. Spontana emisija se dogodi sama od sebe, a koliko će vremena

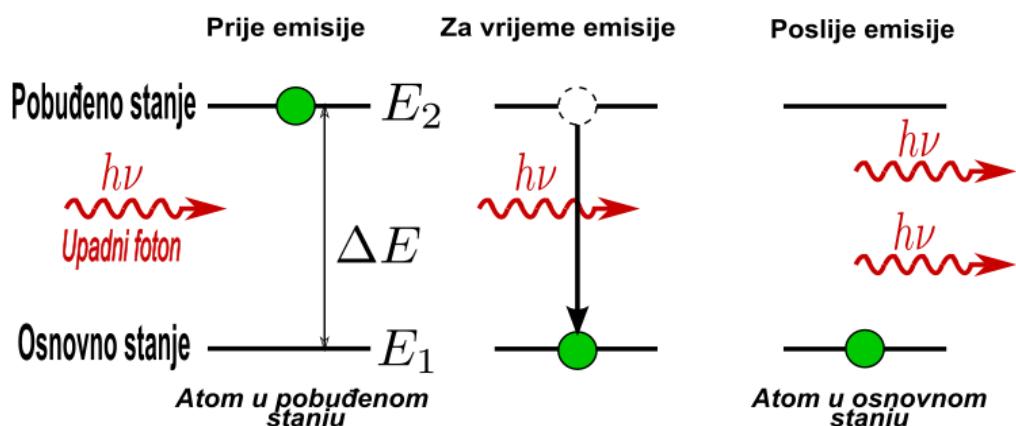
²⁵ V1adis1av. (2008). Absorption of a photon by atom. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Absorption_of_Photon_ru.svg

elektron provesti u pobuđenom stanju prije nego dođe do spontane emisije ovisi o srednjem trajanju života pobuđenog stanja. Spontanom emisijom se emitira nekoherentna svjetlost koja se širi podjednako u svim smjerovima (Slika 7.2). Dva vala su koherentna ako imaju konstantnu faznu razliku i istu frekvenciju. Prisilna ili stimulirana emisija se može postići izlaganjem već pobuđenog elektrona vanjskom elektromagnetskom zračenju. Elektron pri prijelazu iz pobuđenog u nepobuđeno stanje pri tom emitira dodatni foton koherentan s fotonom vanjskog zračenja, odnosno foton iste frekvencije, energije, smjera i faze (Slika 7.3).



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

Slika 7.2. Spontana emisija fotona.²⁶



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

Slika 7.3. Stimulirana emisija fotona.²⁷

²⁶ V1adis1av. (2008). Spontaneous emission of photon by atom. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Spontaneous_Emission_ru.svg

Svjetlost konvencionalnih izvora nastaje spontanom emisijom pa je ona inkoherentna. Laserska svjetlost nastaje stimuliranoj emisijom pa je ona koherentna. Svjetlost konvencionalnih izvora je obično polikromatska (sadrži više valnih duljina), dok je laserska svjetlost monokromatska (sadrži jednu valnu duljinu). Laserska zraka je usmjerena i visokog intenziteta, odnosno ima malu površinu poprečnog presjeka pa je energija koncentrirana.

7.2 Princip rada lasera

Na engleskom jeziku LASER je akronim za *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Laserski uređaj se sastoji od mehanizma za optičko pumpanje, aktivnog medija i optičke šupljine ili optičkog rezonatora. Za realizaciju lasera je potreban aktivni medij s tri ili četiri energetske razine, tj. stanja.

Aktivni medij s tri stanja se sastoji od osnovnog, metastabilnog i pobuđenog stanja. Energije stanja su redom E_1, E_2, E_3 te vrijedi $E_1 < E_2 < E_3$. Gustoće naseljenosti stanja su redom N_1, N_2, N_3 te u uvjetima termičke ravnoteže vrijedi $N_1 > N_2 > N_3$ (Slika 7.4). Gustoća naseljenosti pojedine energetske razine daje broj elektrona/molekula na toj energetskoj razini po jedinici volumena.

Optičkim pumpanjem se aktivni medij izloži svjetlosti iz vanjskog izvora kako bi se u njemu pobudili elektroni ili molekule, ovisno o tipu lasera. Svjetlost iz vanjskog izvora može biti polikromatska i inkoherentna ili monokromatska i koherentna. Da bi se elektron pobudio iz osnovnog u pobuđeno stanje mora apsorbirati foton čija je energija jednaka razlici energije pobuđenog i osnovnog stanja, odnosno foton frekvencije:

$$\nu_{31} = \frac{E_3 - E_1}{h}$$

Energija pobuđenog stanja može biti određeni interval energija. U slučaju pobuđenja polikromatskom svjetlosti apsorpcija će biti učinkovitija za energiju pobuđenog stanja šireg intervala. Vanjski izvor svjetlosti za pumpanje se obično postiže bljeskalicom ili električnim izbojem.

Elektroni se iz pobuđenog stanja relativno brzo relaksiraju u metastabilno stanje, najčešće uz emisiju fonona a ne fotona, a zatim dalje u osovo stanje uz emisiju fotona. Životni vijek pobuđenog stanja je reda veličine 10^{-8} s, a metastabilnog reda veličine od 10^{-3} do 10^{-4} s. Kako je životni vijek pobuđenog stanja kraći od metastabilnog uslijed optičkog pumpanja dođe do nakupljanja elektrona u metastabilnom stanju. Ako je pumpanje dovoljno jako gustoća naseljenosti međustanja N_2 postane veća od gustoće naseljenosti osnovnog stanja N_1 , te se ta pojava naziva inverzija naseljenosti. Za medij u kojem postoji inverzija naseljenosti se kaže da je postao aktivan ili amplificirajući. Inverziju naseljenosti nije moguće postići u sustavima sa dvije energetske razine već su potrebne minimalno tri.

Relaksacijom elektrona spontanom emisijom iz međustanja u osnovno stanje se emitiraju fotoni inkoherentne svjetlosti. Među spontano emitiranim fotonima fotoni frekvencije:

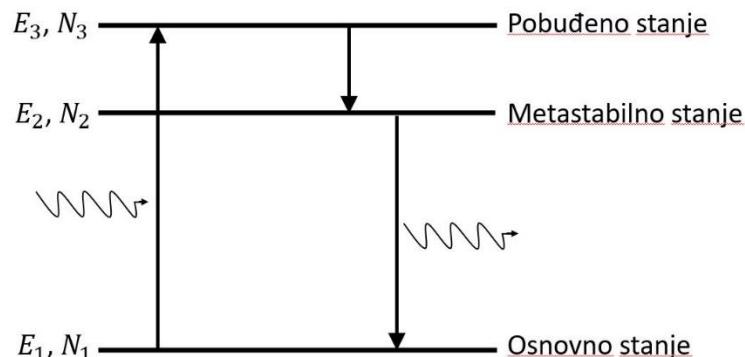
²⁷ V1adis1av. (2008). A diagram of stimulated emission. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stimulated_Emission.svg

$$v_{21} = \frac{E_2 - E_1}{h}.$$

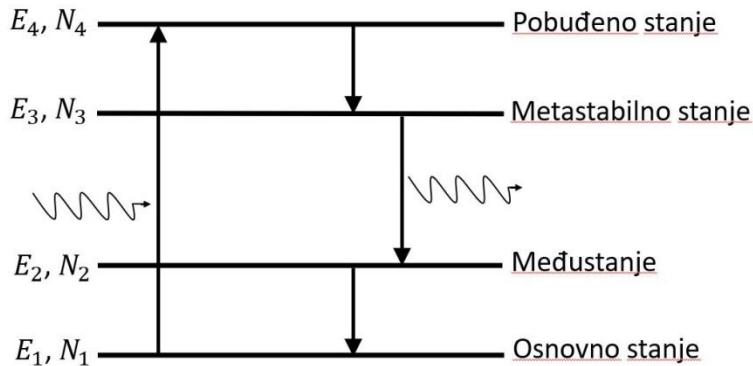
dalje uzrokuju relaksaciju elektrona stimuliranim emisijom iz međustanju u osnovno stanje pri čemu se emitira foton iste frekvencije i fazne razlike. Aktivni medij se nalazi unutar optičke šupljine ili optičkog rezonatora. U najjednostavnijem slučaju optičku šupljinu čine dva paralelna zrcala između kojih se nalazi aktivni medij. Fotoni emitirani stimuliranim emisijom koji se gibaju duž osi dvaju zrcala se reflektiraju od zrcala te ostanu u optičkoj šupljini gdje u aktivnom mediju mogu ponovno uzrokovati stimuliranu emisiju. Time se dobije sve veći broj fotona iste frekvencije i vremenske faze koji se gibaju u istom smjeru, odnosno dobije se amplificirajući efekt ili efekt pojačanja i to u samo jednom smjeru (smjer se odnosi na os gibanja fotona, a ne orijentaciju). Optička šupljina je izvedena tako da jedno zrcalo reflektira svu svjetlost, a drugo propušta oko 1% intenziteta svjetlosti, dok ostatak reflektira. Propuštena svjetlost čini lasersku zraku. Za val valne duljine λ razmak l između zrcala mora biti takav da je ispunjen uvjet za nastajanje stojnog vala između zrcala:

$$n\lambda = 2l, \quad n \in N.$$

Aktivni medij s četiri stanja se sastoji od osnovnog stanja, metastabilnog stanja, međustanja i pobuđenog stanja čije su energije redom E_1, E_2, E_3, E_4 za koje vrijedi $E_1 < E_2 < E_3 < E_4$, a gustoće naseljenosti N_1, N_2, N_3, N_4 . Dok se kod laserskog medija s tri stanja stimulirana emisija koherentnih fotona događa pri prijelazu elektrona iz metastabilnog u osnovno stanje, kod laserskog medija s četiri stanja stimulirana emisija se događa pri prijelazu iz međustanja u metastabilno stanje (Slika 7.5).



Slika 7.4. Energetski dijagram aktivnog medija s 3 stanja.



Slika 7.5. Energetski dijagram aktivnog medija s 4 stanja.

7.3 Vrste lasera

S obzirom na vrstu aktivnog medija laseri se mogu podijeliti na lasere s čvrstom jezgrom (eng. *solid-state lasers*), lasere s bojilima (eng. *dye lasers*), plinske lasere (eng. *gas lasers*), poluvodičke lasere (eng. *semiconductor lasers*) i druge. Valna duljina emitirane laserske zrake je kod lasera s čvrstom jezgrom određena energetskim razinama atoma ili iona, kod plinskih lasera energetskim razinama atoma, iona ili molekula, kod lasera s bojilima vibracijskim i rotacijskim energetskim razinama molekula, a kod poluvodičkih lasera razlikom u energiji vodljive i valentne vrpce poluvodičkog kristala.

7.3.1 Laseri s čvrstom jezgrom

Aktivni medij lasera s čvrstom jezgrom je kristalna ili amorfna tvar obogaćena (dopirani) dopantima kao što su krom, titan ili neki rijetki zemni metal (npr. skandij; Sc, itrij; Y, neodimij; Nd, erbij; Er, iterbij; Yb, tulij; Tm, itd.). Stimulirana emisija se događa pri prijelazu iona dopanata između energetskih razina. U nastavku je opisan rad rubinskog lasera, Nd:YAG lasera i Ti:Safirnog lasera.

Aktivni medij rubinskog lasera je kristal sintetičkog rubina, odnosno aluminijev oksid (Al_2O_3) dopiran trostrukim ioniziranim ionima kroma (Cr^{+3}). Rubinski laser je laser s tri stanja. Za optičko pumpanje je potrebno zračenje u intervalu od 400 nm do 550 nm za što se obično koristi ksenonska bljeskalica. Rubinski laser emitira crvenu svjetlost valne duljine 694.3 nm širine 0.53 nm. Radi u pulsnom modu. Rubinski laser je bio prvi funkcionalni laser proizведен 1960. god. U početku se koristio za uklanjanje tetovaža i dlaka.

Aktivni medij Nd:YAG lasera je kristal itrij-aluminijevog granata (YAG: $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) dopiran trostrukim ioniziranim ionima neodimija (Nd^{+3}). Nd:YAG je laser s četiri stanja. Za optičko pumpanje je potrebno zračenje u intervalu oko 750 nm i 800 nm za što se obično koristi kriptonska bljeskalica ili laserska dioda. Nd:YAG laser emitira infracrveno zračenje valne duljine 1064 nm, no može se prilagoditi na nekoliko drugih valnih duljina. Usmjeravanjem zrake Nd:YAG lasera kroz kristal s nelinearnim optičkim osobinama (ovisnost gustoće polarizacije i električnog polja je nelinearna) može se dobiti laserska zraka s fotonima dvostruko veće energije, odnosno valne duljine 532 nm (zelena svjetlost). Radi u pulsnom ili

kontinuiranom modu, gdje je za kontinuirani mod dopiranje mnogo slabije nego za pulsnii mod.

Aktivni medij Ti:Safirnog lasera je kristal aluminijevog oksida (Al_2O_3) dopiran trostruko ioniziranim ionima titana (Ti^{+3}). Za optičko pumpanje je potrebno zračenje u intervalu od 514 nm do 532 nm za što se obično koriste drugi laseri s čvrstom jezgrom. Ti:Sapphire laser emitira crvenu svjetlost i infracrveno zračenje, odnosno zračenje u intervalu od 650 nm do 1100 nm. Radi u pulsnom i kontinuiranom modu. Prvi Ti:Sapphire laser je proizведен 1982. god.

7.3.2 Laseri s bojilima

Aktivni medij lasera s bojilima je najčešće tekuća otopina organskih boja. Otapanjem različitih organskih boja je dobiveno više stotina različitih aktivnih medija kojima su dobiveni laseri u spektralnom rasponu od 400 nm do 1000 nm, odnosno u infracrvenom i vidljivom dijelu spektra. Nelinearnim optičkim procesima je raspon proširen i na ultraljubičasti dio spektra. Kao otapalo se koriste tekućine poput vode, etanola, antifriza, toulena i drugi.

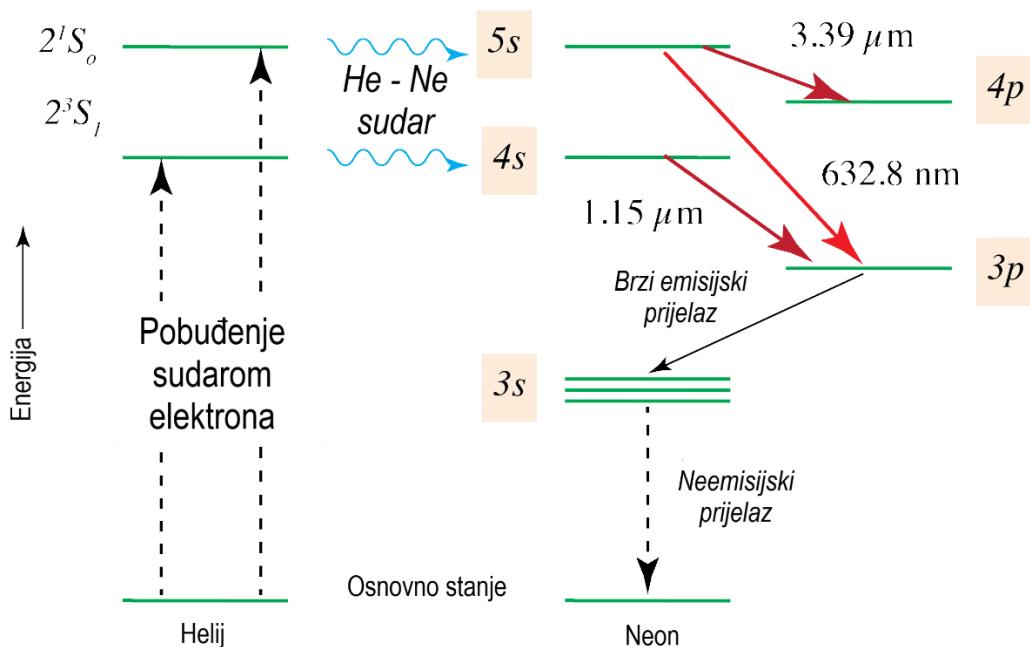
Molekule organskih bojila imaju složenu strukturu s više vibracijskih i rotacijskih stupnjeva slobode. U energetskom dijagramu deblje linije predstavljaju energetske razine vibracijskih stupnjeva slobode, a tanje linije energetske razine rotacijskih stupnjeva slobode. S obzirom da su razlike u energiji između energetskih razina rotacijskih stupnjeva slobode male, linije su u dijagramu blizu jedna druge. Može se reći da se dijagram umjesto od diskretnih razina sastoji od vrpci. Molekula se iz osnovnog stanja može pobuditi na bilo koji energetski nivo u pobuđenom stanju, pa time pri pumpanju može biti apsorbirano vanjsko zračenje iz spektra frekvencija. Nakon pobuđenja molekula se relativno brzo bez emisije zračenja spusti na najnižu energetsku razinu vrpce koja čini pobuđeno stanje. Stimulirana emisija se događa pri prijelazu s najniže energetske razine pobuđenog stanja na neku od viših energetskih razina osnovnog stanja. Molekula se zatim relativno brzo bez emisije zračenja spusti na najnižu energetsku razinu osnovnog stanja. S obzirom da se optičko pumpanje može postići sa svjetlosti valne duljine iz nekog intervala, kao izvor pumpanja se mogu koristiti nekoherentni izvori svjetlosti širokog spektra, ali i koherentni izvori određene valne duljine kao što su drugi laseri.

Pri stimuliranom prijelazu molekule iz pobuđenog u osnovno stanje energetska razina osnovnog stanja na koju će molekula sići ovisi o valnoj duljini fotona u optičkoj šupljini koji uzrokuje stimulirani prijelaz. Valna duljina tog fotona je određena konstrukcijom optičke šupljine. Dodavanjem prizme ili optičke rešetke u optičku šupljinu valna duljina fotona koji stimulira prijelaz može biti precizno određena, te se time može dobiti laserska zraka određene valne duljine iz nekog intervala valnih duljina. Taj interval je određen razlikom u energiji najnižeg energetske razine pobuđenog stanja i energetskih razina u osnovnom stanju na koje molekula može sići pri stimuliranom prijelazu.

7.3.3 Plinski laseri

Aktivni medij plinskih lasera je plin. Plin mogu činiti neutralni atomi, ionizirani atomi ili molekule pa se plinske lasere može podijeliti na neutralne, ionizirane ili ionske i molekulske plinske lasere. Optičko pumpanje u plinskim laserima se obično postiže električnim pražnjenjem. Prvi kontinuirani laser je bio plinski laser.

Koherentna emisija je postignuta s neutralnim atomima 29 kemijskih elemenata, odnosno s plemenitim plinovima, mješavinama plemenitih plinova, metalnim i halogenim parama. Najpoznatiji neutralni plinski laser je He-Ne (helij-neon) laser. Omjer komponenata plinske smjese helija i neona je 10:1. Smjesa atoma helija i neona se izloži istosmjernom električnom pražnjenju čime se pobude atomi helija. Neki atomi helija se relaksiraju u metastabilno stanje koje je relativno dugog životnog vijeka pa u tom stanju dolazi do gomilanja. S obzirom da je energija pobuđenog stanja neona slična energiji metastabilnog stanja helija između helija i neona lako dođe do neelastičnog sudara. Pri sudaru pobuđeni atom helija prenese energiju na nepobuđeni atom neon-a pri čemu atom helija prijeđe u osnovno stanje, a atom neon-a u pobuđeno stanje. U He-Ne laseru se za atome neon-a kaže da su aktivna laserska komponenta, jer se stimulirana emisija događa između energetskih razina atoma neon-a. Atomi neon-a pobuđeno stanje mogu napustiti u više od 100 različitih stimuliranih prijelaza od kojih je 5 dovoljno jako da se koriste za dobivanje lasera. Najveća snaga He-Ne lasera se postiže za svjetlost valne duljine od 632,8 nm (Slika 7.6). Između ostalog, koristili su se u bar-kod čitačima prije pojave poluvodičkih lasera.



Slika 7.6. Energetski dijagram He-Ne lasera.²⁸

²⁸ XuPanda. 2017. Energy levels in a He-Ne Laser. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HeNe_Laser_Levels.png

Svega nekoliko neutralnih i molekulskih plinskih lasera emitira zračenje u vidljivom i ultraljubičastom dijelu spektra, a ni jedan neutralni plinski laser ne emitira svjetlost valne duljine manje od 543 nm. U ionskim plinskim laserima je zračenje u vidljivom i ultraljubičastom dijelu spektra mnogo češće.

Kod molekulskih plinskih lasera se stimulirana emisija događa pri prijelazu između vibracijskih i rotacijskih energetskih razina molekula plina. Molekule mogu biti dvoatomne, troatomne i poliatomne. Spektralni raspon molekulskih lasera je od 150 nm do 773 nm. Najpoznatiji molekulski plinski laser je CO₂ laser. Stimulirana emisija se u ionskim laserima događa pri prijelazu između energetskih razina iona. Ionske plinske lasere se može podijeliti na metalne ionske lasere i ionske lasere plemenitih plinova, gdje se kod metalnih ionskih lasera koriste metalne pare.

7.3.4 Poluvodički laseri

Poluvodički laser ili laserska dioda (eng. *laser diode, LD, injection laser diode, ILD*) je kao i svjetlosna dioda propusno polarizirana poluvodička dioda, no za razliku od svjetlosne diode koja emitira nekoherentnu svjetlost, laserska dioda emitira koherentnu svjetlost.

U najjednostavnijem obliku aktivni sloj laserske diode čini PN-spoj. S obzirom da je dioda propusno polarizirana pojačana je struja difuzije, odnosno prijelaz većinskih nositelja naboja kroz područje osiromašenja na suprotni kraj PN spoja. Kaže se da se slobodni elektroni injektiraju iz N-dijela u P-dio, odnosno šupljine iz P-dijela u N-dio PN-spoja. Nakon određenog vremenskog intervala se nositelji naboja rekombiniraju i spontanom emisijom emitiraju foton.

U energetskom dijagramu se slobodni elektroni nalaze u vodljivoj vrpci, a šupljine u valentnoj vrpci. Prelaskom većinskih nositelja naboja na suprotni kraj PN-spoja raste gustoća naseljenosti vodljive vrpcе P-dijela, odnosno valentne vrpcе N-dijela. Ovaj proces se naziva električno pumpanje. Pošto nakon injekcije treba proći neki vremenski interval prije rekombinacije (vrijeme rekombinacije), uz dovoljno intenzivnu injekciju je moguće postići inverziju naseljenosti valentne i vodljive vrpcе čime PN-spoj postane aktivni medij. Foton emitiran spontanom emisijom može izazvati novu rekombinaciju, odnosno stimuliranu emisiju fotona koji je koherentan s fotonom koji je izazvao rekombinaciju. Aktivni medij se nalazi unutar optičke šupljine unutar koje se fotoni emitirani stimuliranom emisijom odbijaju i ponovno izazivaju stimuliranu emisiju. Time se dobije sve veći broj fotona iste frekvencije, fazne razlike i polarizacije koji se gibaju u istom smjeru, odnosno dobije se amplificirajući efekt ili efekt pojačanja. Optička šupljina se postigne kombinacijom poluvodiča različitog indeksa loma i dodavanjem reflektirajućih premaza. Dok je jedan kraj optičke šupljine potpuno reflektirajući, drugi propušta dio svjetlosti koji rezultira laserskom zrakom.

Laserske diode se izrađuju od direktnih poluvodiča. U direktnim poluvodičima je prijelaz iz vodljive u valentnu vrpcu popraćen emisijom fotona, fonona ili oboje. U indirektnim poluvodičima elektron da bi prešao iz vodljive u valentnu vrpcu osim emitiranja fotona mora apsorbirati ili emitirati fonon.

Valna duljina emitirane svjetlosti je određena odabirom vrste poluvodiča. Poluvodičkim laserima se može generirati svjetlost infracrvenog, vidljivog i UV dijela spektra. Prethodno je

opisan osnovni princip rada najjednostavnijeg poluvodičkog lasera, no postoje mnogo složenije izvedbe poluvodičkih lasera koji se koriste za dobivanje laserske svjetlosti različitih svojstava.

Poluvodički laseri su najčešća vrsta lasera. Prvi je proizведен 1962. god. Koriste se u prijenosu podataka optičkim vlaknima, čitaćima barkoda, CD/DVD/*Blue-ray* čitaćima i snimačima, laserskim printerima, laserskim skenerima, rasvjetnim laserskim zrakama, a u kombinaciji s fotoluminiscentnom tvari se može koristiti i u općoj rasvjeti.

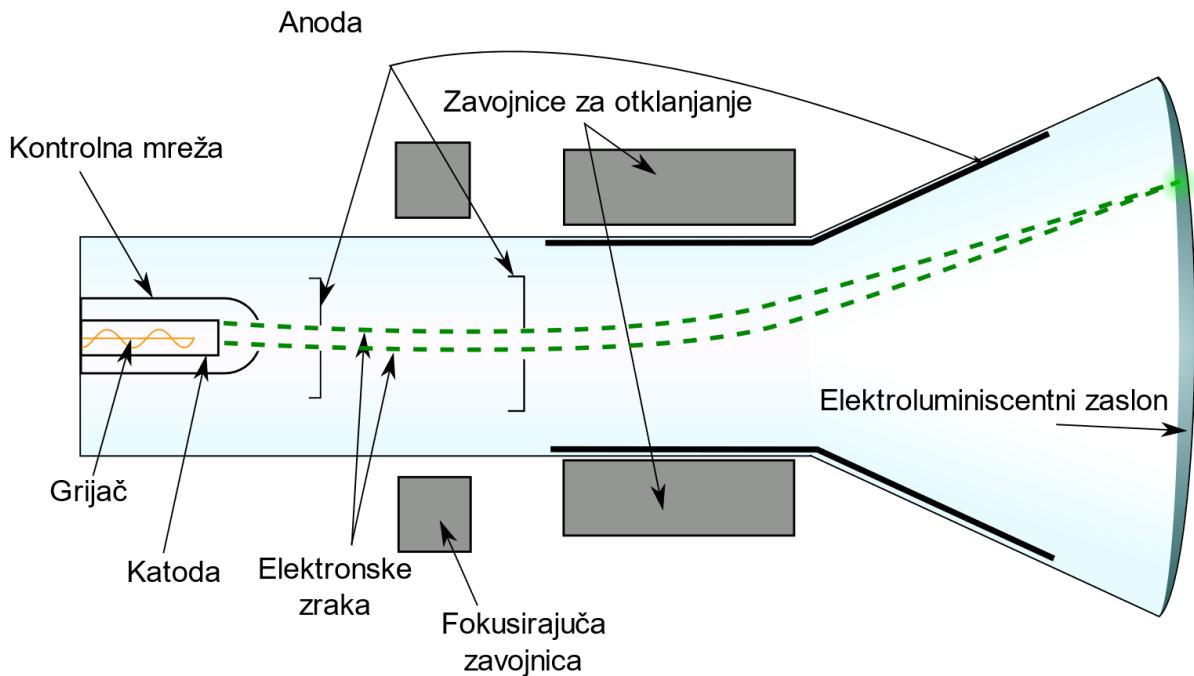
8 Zasloni

8.1 Katodna cijev

Katodna cijev ili CRT zaslon (eng. *cathode ray tube, CRT*) se sastoji od elektronskog topa, sustava za usmjeravanje katodne zrake i elektroluminiscentnog sloja (Slika 8.1). Elektronski top generira, ubrzava i fokusira snop elektrona. Sastoje se od katode (negativne elektrode) i anode (pozitivne elektrode) koje su povezane na izvor napona. Može se razlikovati vruća i hladna katoda. Emisija elektrona u vrućoj katodi se postiže termionskom emisijom, odnosno zagrijavanjem katode. U blizini katode se nalazi filament (npr. volframova nit) koji se zagrijava protjecanjem električne struje, čime se zagrijava i obližnja katoda. Broj elektrona emitiranih iz katode se regulira temperaturom katode, odnosno temperaturom filimenta koja se regulira jakosti struje kroz filament. Emisija elektrona u hladnoj katodi se može postići emisijom uslijed električnog polja ili kombinacijom emisije uslijed električnog polja ili termionske emisije s sekundarnom emisijom. Anoda sadrži otvor kroz koji elektroni mogu proći čime im se odredi smjer kretanja. Naponom na elektrodama se regulira ubrzanje elektrona od katode do anode čime se na izlazu iz anode dobije umjereni snop elektrona točno određene kinetičke energije. Snop usmjerenih elektrona u gibanju se naziva katodna zraka. Osim veličinom otvora na anodi promjer katodne zrake se dodatno regulira magnetskim poljem kojeg stvara par zavojnica. Katodna zraka zatim prolazi kroz sustav za usmjeravanje koji se sastoji od dva para ploča kondenzatora koja stvaraju dva okomita električna polja ili dva para zavojnica koje stvaraju dva okomita magnetska polja. Električna ili magnetska polja otklanjaju katodnu zraku u dva međusobno okomita smjera, oba okomita na smjer gibanja zrake. Naponom na pločama kondenzatora se regulira jakost električnog polja, odnosno strujom kroz zavojnice jakost magnetskog polja čime se postiže željeni otklon katodne zrake u dvije dimenzije tako da elektroni padnu na točno određeno mjesto na zaslonu. Zaslon je prekriven s tvari koju karakterizira svojstvo elektroluminiscencije, odnosno emitira fotone kada je izložena snopu elektrona. Reguliranjem broja elektrona koji pada na točku na zaslonu se regulira svjetlina te točke. Cijela katodna cijev je ispunjena vakuumom.

Katodna cijev za stvaranje slike u boji sadrži tri elektronska topa od kojih svaki stvara svoju katodnu zraku koja ima svoj sustav za usmjeravanje. Unutarnja strana zaslona je prekrivena s tri različite elektroluminiscentne tvari od kojih svaka emitira svjetlost jedne primarne boje (crvena, zelena i plava). Pojedina katodna zraka pada na elektroluminiscentni materijal koji emitira svjetlost određene boje, a reguliranjem intenziteta svake od njih se dobije željena zastupljenost primarnih boja u emitiranoj svjetlosti.

Katodne zrake su otkrivene 1890. god. Prvu katodnu cijev je konstruirao Karl Ferdinand Braun 1897. god., a 1925. god. je konstruiran prvi televizijski prijemnik s katodnom cijevi. Katodna cijev je osnova osciloskopa (uređaj za vizualizaciju i analizu električnog signala), televizijskih i kompjuterskih monitora, radarskih zaslona i dr. Katodne cijevi su našle upotrebu i u pohranjivanju podataka gdje uzorak na zaslonu predstavlja kriptički pohranjen podatak. Sustav za usmjeravanje u osciloskopima se bazira na kondenzatorskim pločama, a u televizijskim i drugim sličnim zaslonima uglavnom na zavojnicama. Upotreba katodnih cijevi u zaslonima je početkom 2000-ih u velikoj mjeri zamijenjena novim tehnologijama.



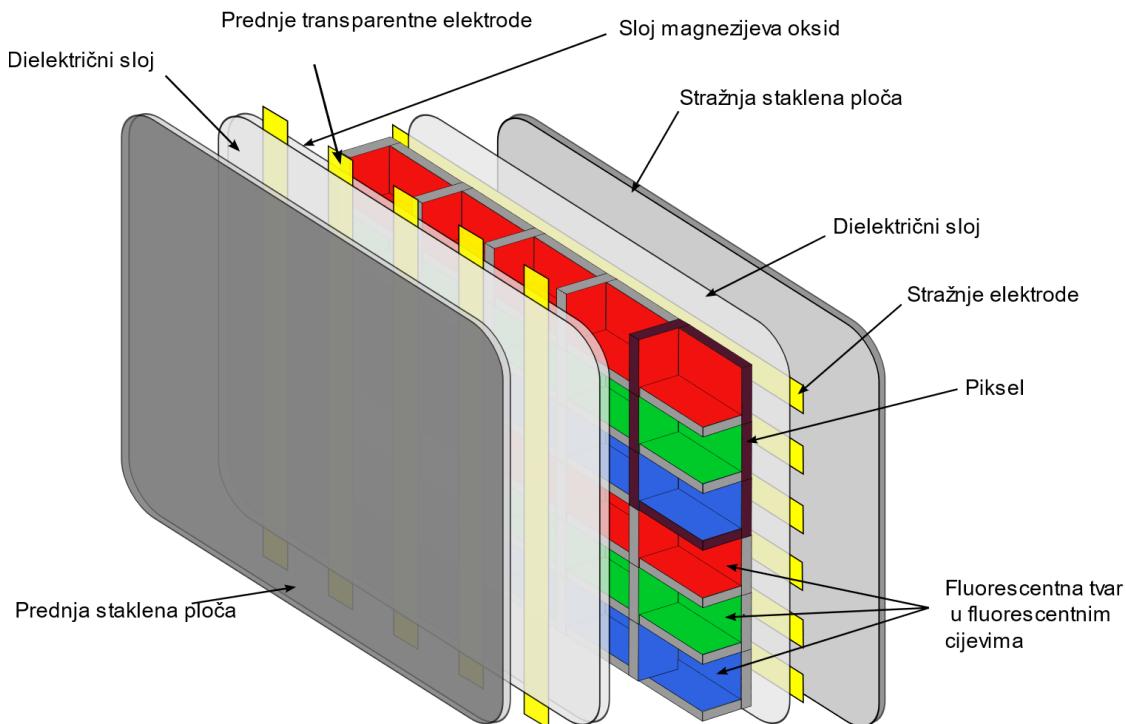
Slika 8.1. Katodni zaslon.²⁹

8.2 Plazma zaslon

Plazma zaslon (eng. *plasma display panel, PDP*) je u osnovi mreža više milijuna malih fluorescentnih cijevi smještenih između dvije staklene ploče. Svaka od tih fluorescentnih cijevi sadrži mješavinu plemenitih plinova i malu količinu još nekog elementa (npr. živine pare). S unutarnjih strana prednje i stražnje staklene ploče se nalaze električki vodljive trake, odnosno elektrode. Elektrode su odvojene od stakla s izolirajućim zaštitnim slojem. Elektrode na prednjem staklu su transparentne. Između prednjih i stražnjih elektroda se uspostavi napon koji ionizira smjesu plinova u fluorescentnim cijevima, odnosno stvori plazmu. Sudarom iona s atomima živinih para se atomi žive pobude, a pri njihovoj relaksaciji se emitira UV zračenje. Fluorescentni sloj uslijed apsorpcije UV zračenja emitira svjetlost. Svaki se piksel plazma zaslona sastoji od tri fluorescentne cijevi, gdje svaka cijev sadrži fluorescentnu tvar koja emitira svjetlost određene primarne boje. Mijenjanjem napona na cijevima regulira se zastupljenost pojedine primarne boje i dobije piksel određene boje (Slika 8.2).

Prvi monokromatski plazma zaslon je konstruiran 1964. god. U početku su se najviše koristili monokromatski narančasti plazma zasloni s neonom. 1992. god. je konstruiran prvi plazma zaslon u boji. Uslijed razvoja LCD i OLED zaslona proizvodnja plazma zaslona je do 2014. god. gotovo potpuno obustavljena.

²⁹ Vector:Interiot, Raster:Theresa Knott. Diagram of a CRT tube. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cathode_ray_tube_diagram-en.svg



Slika 8.2. Presjek plazma zaslona.³⁰

8.3 LCD

LCD zaslon (eng. *liquid crystal display*, *LCD*) se sastoji od tekućeg kristalnog sloja, dvije transparentne mreže elektroda, prednjeg i stražnjeg stakla i dva linearna polarizacijska filtera. S stražnje strane zaslona se nalazi izvor svjetlosti.

Tekući kristalni sloj se sastoji od molekula tekućeg kristala (pokazuje svojstva tekućina i kristala). Stakla dodiruju tekući kristalni sloj, te su sa svoje unutarnje strane tretirana tako da orientiraju molekule kristala u međusobno okomite orientacije između dijelova kristalnog sloja uz stakla. Slijedi da se orientacija molekula između rubova tekućeg sloja razlikuje za 90° , a molekule po sredini kristalnog sloja leže pod kutom od 45° u odnosu na rubne dijelove. Molekule formiraju svojevrsnu spiralnu strukturu između stakala. Elektrode su postavljene s unutarnje strane stakala tako da su okomite na orientaciju molekula rubnog tekućeg kristalnog sloja. Polarizacijski filteri su postavljeni na stakla na način da je njihova os transmisije iste orientacije kao molekule rubnog tekućeg kristalnog sloja. Ako su stakla tretirana na način da se molekule uz stražnje staklo orientiraju horizontalno, a uz prednje staklo vertikalno, os transmisije polarizatora će uz stražnje staklo biti horizontalna a uz prednje staklo vertikalna, a orientacija elektroda uz stražnje staklo vertikalna, a uz prednje staklo horizontalna.

³⁰ Jari Laamanen. (2007). Simple composition of the alternating current plasma display panel with matrix electrode design. Preuzeto s: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plasma-display-composition.svg>

Kada ne bi bilo tekućeg kristalnog sloja svjetlost iz izvora bi padala na stražnji polarizator, horizontalno se polarizirala, a zatim bila potpuno apsorbirana prednjim polarizatorom s vertikalnom osi transmisije. Do zastora ne bi stizala svjetlost pa bi zaslon bio crn.

Uz prisutnost tekućeg kristalnog sloja kada nema napona na elektrodama svjetlost iz izvora, koja pada na stražnji polarizator i horizontalno se polarizira, se prolaskom kroz tekući kristalni sloj rotira iz horizontalne u vertikalnu os polarizacije, te prolazi kroz prednji polarizator s vertikalnom osi transmisije. Prisutnost molekula tekućeg kristala orijentiranih u spiralnu strukturu inducira rotaciju osi polarizacije svjetlosti za 90°. Svjetlost dolazi do zaslona pa je zaslon bijel.

Uspostavljanjem dovoljno jakog napona na elektrodama između elektroda se uspostavi električno polje koje prisiljava molekule tekućih kristala na rotaciju prema orijentaciji elektroda, uz stražnje staklo vertikalno, a uz prednje horizontalno. S obzirom da unutarnje strane stakala, unatoč električnom polju, zadržavanju orijentaciju molekula u rubnim dijelovima tekućeg kristalnog sloja kao u slučaju bez električnog polja zarotira molekule tekućeg kristalnog sloja po sredini sloja. Svjetlost iz izvora pada na stražnji polarizator i polarizira se horizontalno. Prolaskom kroz tekući kristal svjetlost prati orijentaciju molekula koje su po sredini sloja sada zakrenute, pa do drugog polarizatora stiže manje vertikalno polarizirane svjetlosti. To znači da polarizator transmitira manje svjetlosti, odnosno da zastor poprima nijansu sive.

Kontroliranjem jakosti električnog polja za svaki piksel tekućeg kristalnog sloja se regulira količina svjetlosti koja dopire do svakog piksela zaslona, odnosno regulira se svjetlina ili nijansa sive svakog piksela zaslona. Kod LCD-ova u boji svaki piksel se sastoji od tri podpiksela koji sadrže optičke filtere tako da propuštaju samo crvenu, zelenu ili plavu svjetlost. Svakim podpikselom se upravlja zasebno te se njihovim kombiniranjem na zaslonu dobije željena boja piksela.

Ranije su se kao izvor svjetlosti koristile fluorescentne žarulje, dok se danas koriste bijele LED žarulje ili kombinacija crvenih, zelenih i plavih žarulja.

Postoje tri glavna tipa LCD s aktivnom matricom; TN LCD (eng. *twisted nematic LCD*), VA LCD (eng. *vertical align LCD*), IPS LCD (eng. *in-plane switching LCD*). Rad TN LCD je baziran na uplenjenom nematičkom efektu (eng. *twisted nematic effect, TN - effect*) i princip njegova rada je prethodno opisan. Princip rada VA LCD i IPS LCD je sličan, no s drugačijom kombinacijom orijentacija molekula, elektroda i polarizatora. U TN LCD kada elektrode nisu pod naponom svjetlost dopire do zaslona (zaslon je bijel), a napon utječe na molekule na način da blokiraju prolazak svjetlosti do zaslona. Kod VA LCD i IPS LCD kada elektrode nisu pod naponom svjetlost ne dopire do zaslona (zaslon je crn), a napon utječe na molekule na način da omogućuju prolazak svjetlosti do zaslona.

Zasloni s manjim brojem fiksnih simbola kao kod digitalnih satova i džepnih kalkulatora imaju zasebne elektrode za svaki segment zaslona. Zasloni s varijabilnim grafičkim sadržajem imaju veći broj matrično posloženih piksela koji se nalaze na sjecištu horizontalnih elektroda s jedne i vertikalnih elektroda s druge strane tekućeg kristalnog sloja.

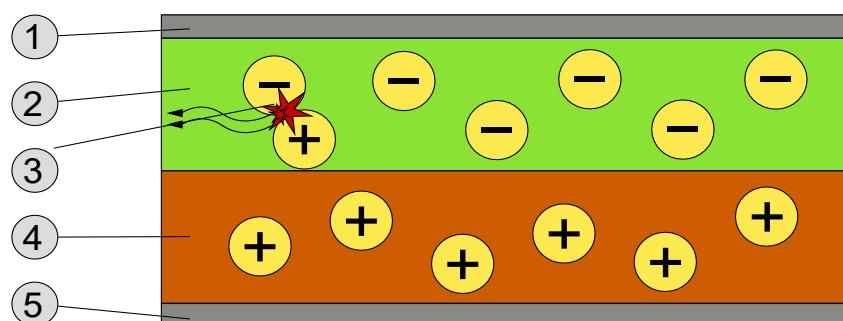
1964. god. je konstruiran prvi LCD zaslon u kojem primjenom napona transparentni tekući kristal postane reflektivan. 1970. god. je konstruiran prvi TN LCD. 1982. god. je konstruiran prvi LCD televizor u boji. 2007. god. je prodaja LCD televizora nadmašila prodaju CRT televizora. LCD zasloni većih i manjih dimenzija imaju široku primjenu. Koriste se u

televizijskim prijemnicima, kompjuterskim monitorima, kontrolnim pločama, različitim oblicima signalizacije itd. Manji LCD zasloni se koriste u satovima, kalkulatorima, digitalnim kamerama, mobilnim telefonima itd. LCD zaslone postepeno zamjenjuju OLED zasloni.

8.4 OLED

Organska svjetleća dioda (eng. *organic light-emitting diode, OLED*) je svjetleća dioda (*light-emitting diode, LED*) u kojoj aktivni sloj sadrži organske spojeve koji elektroluminiscencijom emitiraju svjetlost. Aktivni sloj se nalazi između dvije elektrode od kojih je barem jedna transparentna. Aktivni sloj s elektrodama se nalazi na supstratu. Organske tvari aktivnog sloja su prema električnoj vodljivosti između izolatora i vodiča pa ih se svrstava u poluvodiče.

Najviše okupirana energetsko stanje molekule se naziva HOMO (eng. *highest occupied molecular orbital*) i analogno je valentnoj vrpcji anorganskog poluvodiča, a najniže neokupirano stanje se naziva LUMO (eng. *lowest unoccupied molecular orbital*) i analogno je vodljivoj vrpcji. Razlika u energiji između LUMO i HOMO stanja se naziva energija barijere. Aktivni sloj se najčešće sastoji od dva organska sloja, vodljivog i emisijskog. Ako na elektrodama nema napona emisijski i vodljivi sloj su neutralni. Neka uspostavom napona elektroda uz emisijski sloj postane negativno nabijena katoda, a elektroda uz vodljivi sloj pozitivno nabijena anoda. Pod utjecajem napona elektroni napuštaju HOMO vodljivog sloja i odlaze prema anodi. Time se dobiju molekule s viškom elektrona u emisijskom sloju i manjkom elektrona (viškom šupljina) u vodljivom sloju, odnosno PN spoj dva organska sloja. Kako su pozitivno nabijene molekule vodljivog sloja pokretnije od negativno nabijenih molekula emisijskog sloja dio molekula vodljivog sloja prijeđe u emisijski sloj gdje se rekombiniraju. Rekombinacijom elektron iz LUMO prijelazi u HOMO pri čemu se emitira foton energije pripadne energije barijere, odnosno foton frekvencije u vidljivom dijelu spektra (Slika 8.3).



Slika 8.3. Aktivni sloj s elektrodama: 1) katoda(-), 2) emisijski sloj, 3) emitirani foton, 4) vodljivi sloj, 5) anoda(+).³¹

³¹ Rafał Konieczny. (2007). OLED schematic - 1. Cathode (-), 2. Emissive Layer, 3. Emission of radiation, 4 . Conductive Layer, 5. Anode (+). Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:OLED_schematic.svg

OLED zaslon se sastoji od velikog broja organskih svjetlećih dioda; piksela. Mogu se razlikovati OLED zasloni s pasivnom matricom (eng. *passive-matrix OLED, PMOLED*) i aktivnom matricom (eng. *active-matrix OLED, AMOLED*). U PMOLED zaslonu svakim redom i stupcem piksela u zaslonu se upravlja zasebno, a u AMOLED zaslonu svakim pojedinačnim pikselom se upravlja zasebno.

Prema metodi dobivanja boje OLED zaslone se može podijeliti na RGB zaslone (eng. *shadow mask patterning method*) i bijeli OLED ili WOLED zaslone (eng. *colour filter method*). Svaki piksel RGB zaslona se sastoji od tri podpiksela, po jedan za crvenu, zelenu i plavu boju. WOLED zasloni koriste bijeli OLED izvor svjetlosti, dobiven kombinacijom organskih molekula, ispred kojeg su smješteni optički filteri za crvenu, zelenu, plavu i bijelu boju. S obzirom da filteri apsorbiraju dio spektra bijele svjetlosti potrošnja energije kod ove metode je veća. Prednost prve u odnosu na drugu metodu su bolja čistoća boja, bolji kontrast i manja potrošnja energije, no s obzirom da se za svaku od tri boje koristi drugi organski sloj promjene pojedine boje s vremenom nisu iste pa se mijenja odnos između boja.

U usporedbi s LCD zaslonima OLED zasloni imaju bolji kontrast, veću paletu boja i širi kut gledanja (do 90° bez gubitka kvalitete) jer sami pikseli emitiraju svjetlost, i to sve uz istu potrošnju energije. Može se postići veća dubina crne boje s obzirom da crni pikseli ne emitiraju svjetlost, što također štedi i energiju. OLED se mogu izraditi na savitljivim i fleksibilnim supstratima što omogućava izradu izrazito tankih zakrivljenih i savitljivih zaslona, kao i ugradnju OLED u odjeću i slično. Zbog promjena u organskom sloju OLED zasloni trenutno imaju kraći životni vijek od LCD zaslona. Cilj je razvoj konkurentne bijele OLED tehnologije za upotrebu u rasvjeti.

8.5 Elektroluminiscentni zasloni

Elektroluminiscentni uređaji (eng. *electroluminescent devices, EL devices*) se mogu podijeliti na elektroluminiscentne ploče i elektroluminiscentne folije. Elektroluminiscentni uređaji su relativno jeftini, jednostavniji za proizvesti, troše malo energije, te su uniformno osvjetljene čak i ako su veće površine.

Elektroluminiscentna ploča (eng. *electroluminescent panels, EL panels, thick dielectric EL panels, TDEL panels, light-emitting capacitor, LEC*) je kondenzator između čijih ploča se nalazi dielektrična (izolator) elektroluminiscentna tvar. Ploče spojene na izmjenični napon stvaraju električno polje uslijed kojeg se iz dielektrika elektroluminiscencijom emitira svjetlost. Jedna ploča je transparentna i kroz nju prolazi svjetlost, dok je druga obično prekrivena slojem reflektirajućeg metala. Koriste se kao noćne svjetiljke, znakovi za izlaz, sigurnosni znakovi, a koristile su se i kao izvor svjetlosti za kontrolne ploče i u LCD zaslonima.

Elektroluminiscentne folije (eng. *thin film electroluminescent devices, TFEL devices*) se sastoje od elektroluminiscentnog poluvodiča s nizom paralelnih elektrodnih traka sa svake strane na način da su trake s jedne strane okomite na trake s druge strane. Između poluvodiča i elektroda se nalazi sloj izolatora. Mjesto gdje se dvije trake sijeku čini piksel kojim se može manipulirati. Svjetlina površine folije je neovisna o kutu gledanja (lambertov emiter). Elektroluminiscentne folije su tanke i relativno jeftine.

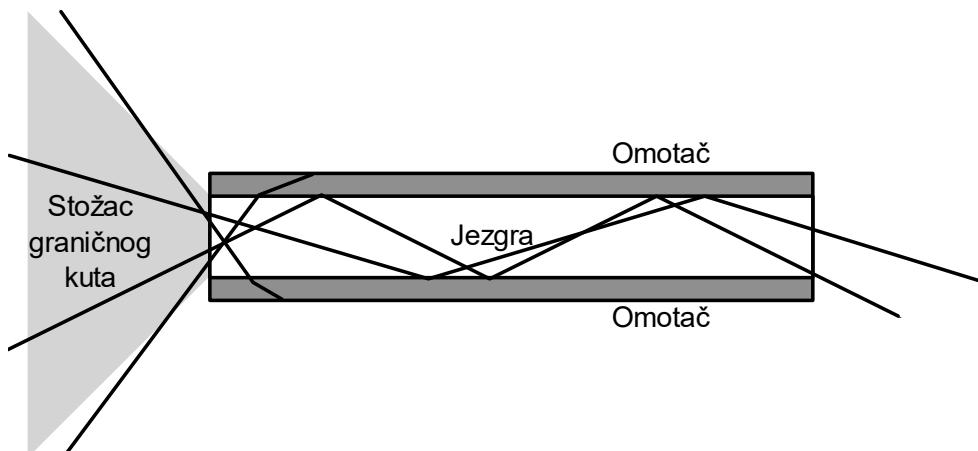
Elektroluminiscentne ploče i folije se mogu iskoristiti za izradu zaslona, no za to se prvenstveno koriste folije. Zaslon u boji se može dobiti filtriranjem bijele svjetlosti ili proizvodnjom primarnih boja pojedinačno. Glavna prepreka u prvom pristupu je učinkovito stvaranje bijele svjetlosti, a u drugom stvaranje dovoljno jake plave svjetlosti.

9 Optički prijenos podataka

Optičko vlakno ili svjetlovod (eng. *optical fiber*) je transparentni dielektrik (izolator) cilindričnog oblika koji prenosi svjetlost duž svoje osi. Optičkim vlaknima se putem svjetlosti prenose podaci između krajeva vlakana. Optički kabel (eng. *fiber-optic cable*) sadrži jedno ili više optičkih vlakana povezanih u zaštitni omotač.

9.1 Princip rada optičkih vlakana

Optičko vlakno je građeno od jezgre okružene omotačem koji je presvučen zaštitnim slojem. Jezgra i omotač su građeni od transparentnog dielektričnog materijala. Jezgra ima veći indeks loma od omotača. Optički signal se prenosi kroz optičko vlakno totalnom refleksijom svjetlosti na prijelazu između jezgre i omotača. Kada je upadni kut zrake svjetlosti na granicu jezgre i omotača veći od graničnog kuta za tu granicu, svjetlost se potpuno reflektira nazad u jezgru i nastavi gibati kroz jezgru odbijajući se od njenih granica. Ako je upadni kut manji od graničnog kuta omotač apsorbira svjetlost. Kako upadni kut na granicu mora biti veći od nekog graničnog kuta da bi došlo do totalne refleksije, postoji neki maksimalni kut s obzirom na os cilindričnog vlakna pod kojim svjetlost može ući u vlakno, a da nastavi putovati kroz njega. Taj maksimalni kut je funkcija razlike indeksa loma jezgre i omotača. Povećanjem kuta upada zrake s obzirom na os cilindričnog vlakna se smanjuje upadni kut na granicu jezgre i omotača. Sinus maksimalnog kuta se naziva numerički otvor (eng. *numerical aperture, NA*) vlakna (Slika 9.1).

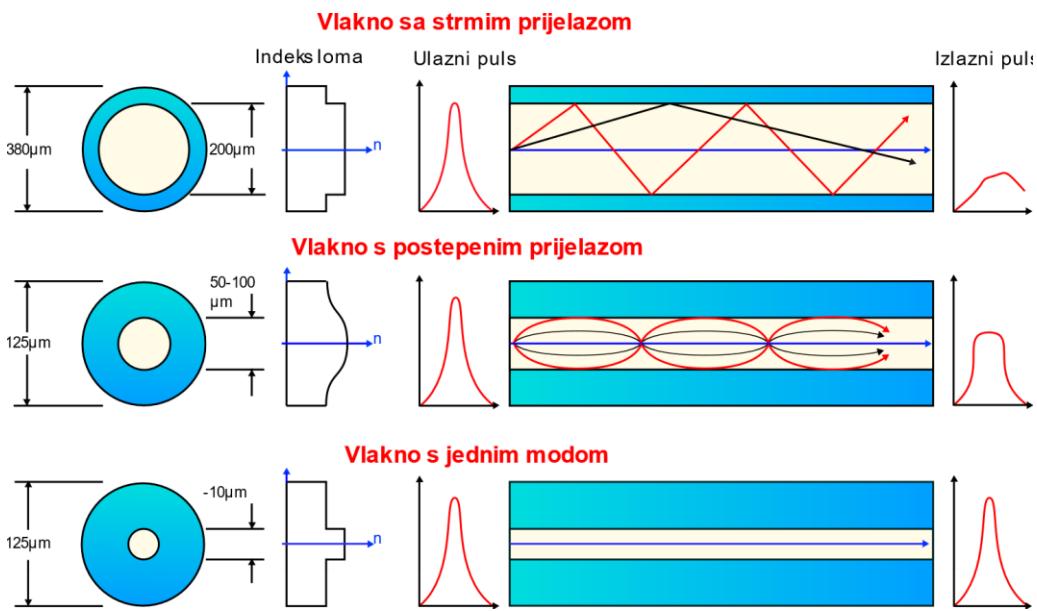


Slika 9.1. Odnos upadnog kuta zrake pri ulazu u vlakno i upadnog kuta na granici jezgre i omotača.³²

³² Gringer. (2008). Preuzeto s: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Optical-fibre.svg>

Optička vlakna se mogu podijeliti na vlakna s jednim modom (eng. *single-mode fibers*, *SMF*) i vlakna s više modova (eng. *multi-mode fiber*, *MMF*). U vlaknu s jednim modom postoji jedan dopušteni upadni kut pod kojim se zraka mora lomiti da ne bi bila apsorbirana u omotaču (Slika 9.2). Promjer jezgre vlakana s jednim modom je najčešće 8-10 μm (mikrometara), te kroz njih putuje infracrveno zračenje u graničnom dijelu s vidljivim spektrom. Vlakna s više modova imaju veći numerički otvor od vlakana s jednim modom pa imaju veći interval kutova pod kojima svjetlost može ući i lomiti se kroz njih (Slika 9.2). No pošto zrake s drugačijim upadnim kutom imaju drugačije putanje kroz vlakno kroz to vlakno propuštuju u različitim vremenskim intervalima što povećava disperziju. Promjer jezgre optičkih vlakana s više modova je od 10 μm do više stotina mikrometara.

Vlakna se također mogu podijeliti na ona sa strmim i postepenim ili gradijentnim prijelazom indeksa loma između jezgre i omotača. U optičkim vlaknima sa strmim prijelazom vrijednost indeksa loma kroz jezgru je uniforma. Prijelazom iz jezgre u omotač vrijednost indeksa se naglo smanji, a onda je unutar omotača ponovno uniformna. U optičkim vlaknima s postepenim prijelazom vrijednost indeksa loma kroz jezgru se smanjuje postepeno s porastom radijalne udaljenosti od središnje osi jezgre. Zbog toga se svjetlosne zrake glatko lome približavajući se granici s omotačem pa im je putanja kroz jezgru zakrivljena, a ne izlomljena. Konačni rezultat su manji upadni kutovi i manja razlika u vremenu propagacije zraka s različitim upadnim kutovima što rezultira manjom disperzijom. Profil indeksa loma je funkcija ovisnosti indeksa loma o udaljenosti od središnje osi. Optička vlakna s postepenim prijelazom imaju profil najbliži idealnom koji je paraboličnog oblika (Slika 9.2). Prednosti vlakana s jednim modom s postepenim prijelazom nisu značajne u odnosu na one s strmim prijelazom, dok su vlakna s više modova s postepenim prijelazom u pravilu superiornija onima sa strmim prijelazom.



Slika 9.2. Svjetlost u vlaknu s više modova sa strmim i postepenim prijelazom i u vlaknu s jednim modom.³³

Iako su optička vlakna izrazito transparentna prolaskom kroz njih svjetlost gubi na intenzitetu. Ova pojava se naziva gušenje ili transmisijski gubitak. Koeficijentom gušenja je izraženo gušenje svjetlosti po jedinici duljine optičkog vlakna. Izražava se u decibelima po kilometru (dB/km). Bel je brojčana jedinica razine određene fizikalne veličine prema odabranoj usporedbenoj vrijednosti, kada je ta razina određena dekadskim logaritmom omjera vrijednosti tih veličina.

$$\alpha = 10 \log_{10} \frac{\left(\frac{P_{ul}}{P_{iz}} \right)}{l} \left[\frac{dB}{km} \right].$$

Glavni uzroci gubitaka u optičkim vlaknima su raspršenje i apsorpcija. Pri raspršenju ili difuznoj refleksiji dolazi do refleksije svjetlosnih zraka pod različitim nasumičnim kutovima uslijed nesavršenosti u strukturi vlakna. Nesavršenosti uključuju fluktuacije u optičkoj gustoći samog vlakna, kao i prisutnost nečistoća u njegovoј strukturi. Nesavršenosti na kojima dolazi do raspršenja su veličinom usporedljive s valnom duljinom svjetlosti. Da su nepravilnosti manjih dimenzija raspršenje bi bilo zanemarivo. Do apsorpcije može doći na atomskoj i molekularnoj razini. Apsorpcija se događa pri određenim valnim duljinama, a apsorpciju može vršiti osnovna tvar od koje je građeno vlakno, nečistoće prisutne u vlaknu i nečistoće dodane dopiranjem radi modifikacije indeksa loma. Na atomskoj razini dolazi do pobuđenja elektrona uslijed apsorpcije fotona valne duljine u UV i vidljivom dijelu spektra, a do apsorpcije na molekularnoj razini pobuđenjem molekula (npr. po vibracijskim ili rotacijskim stupnjevima slobode molekula) apsorpcijom infracrvenog zračenja i zračenja većih valnih duljina. Do gubitaka će doći i uslijed savijanja optičkog vlakna ako je radijus zakrivljenosti manji od nekog minimalnog dopuštenog radijusa. U usporedbi s gubitcima duž optičkog vlakna izraženiji su gubitci u spojevima i konektorima optičkih vlakana.

³³ Mrzeon. (2007). Optical fiber types. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Optical_fiber_types.svg

Glavna upotreba optičkih vlakana je u području prijenosa podataka koji se događa u nekoliko koraka. Najčešće se električni signal transmiterom pretvara u svjetlosni koji se onda prenosi optičkim kabelom do prijemnika koji ga opet pretvara u električni signal. Za transmitere se najčešće koriste poluvodički uređaji kao što su LED diode ili laserske diode, dok je glavna komponenta prijemnika najčešće poluvodička fotodioda. Zbog gušenja svjetlosnog signala pri njegovom prolasku kroz optičko vlakno signal na svom putu najčešće prolazi kroz različite pojačivače signala. Pojačivači signala mogu biti optoelektronički uređaji koji prime svjetlosni signal, pretvore ga u električni i retransmitiraju svjetlosni signal većeg intenziteta. Alternativa su optički pojačivači koji imaju istu funkciju, ali to rade direktno bez pretvorbe u električni signal. U usporedbi s metalnim vodičima prijenos signala u optičkom vlaknu se može postići s manjim gubitcima, te su za razliku od metalnih vodiča vlakna otporna na elektromagnetsku interferenciju. Elektromagnetski val koji se šalje kroz optička vlakna je modificiran (moduliran) da prenosi informaciju. Informacije koje se prenose su najčešće digitalna. U telekomunikaciji se optička vlakna koriste za prijenos telefonskih signala, televizijskih signala, u internet komunikaciji itd.

9.2 Proizvodnja optičkih vlakana

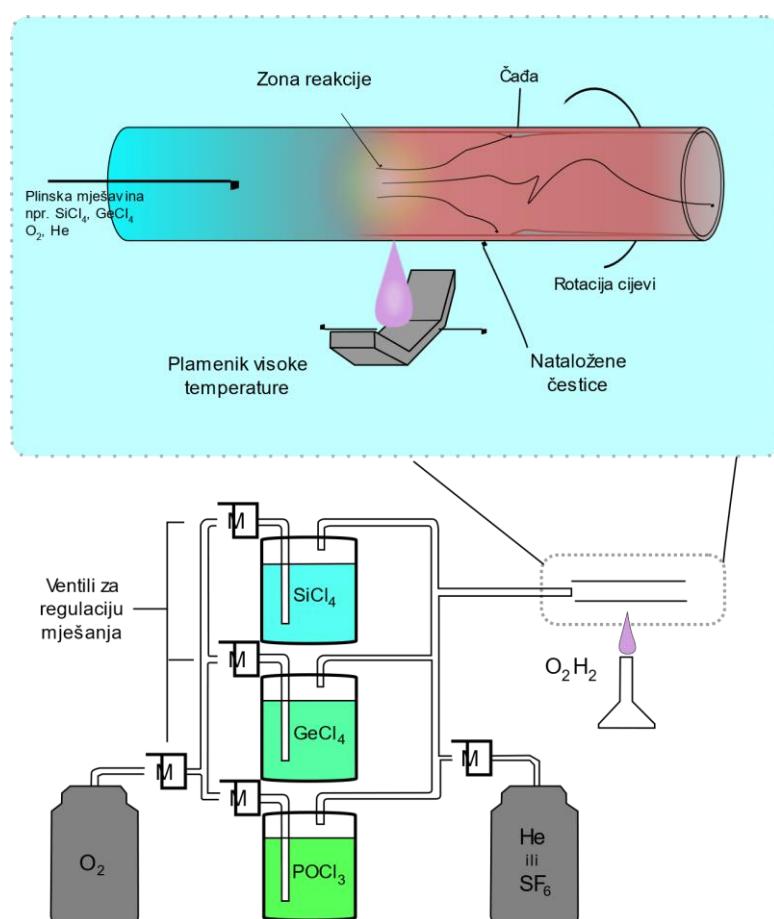
Optička vlakna se mogu podijeliti na staklena i plastična. Naziv staklo se koristi za bilo koju amorfnu (ne kristalnu) čvrstu tvar koja pokazuje određena svojstva kao što su transparentnost. Staklena optička vlakna od silicijevog dioksida (SiO_2 , eng. *silica*) su najzastupljenija vrsta optičkih vlakana. Između ostalog silicijev dioksid ima dobra optička svojstva za široki spektar valnih duljina, ima ga u izobilju, kemijski je relativno inertan (npr. ne apsorbira vodu). Vlakna od silicijevog dioksida su relativno otporna na povlačenje i savijanje, te se mogu efektivno fizički spajati. Rezanjem se jednostavno dobiju krajevi s ravnom površinom prihvatljivih optičkih svojstava. Silicijev dioksid se može dopirati kako bi mu se povećao ili smanjio indeks loma, pa su tako i jezgra i omotač optičkih vlakana najčešće dopirani. Plastična optička vlakna imaju veći indeks gušenja od staklenih, a koriste se u komunikaciji na kraće udaljenosti.

Prvi korak pri izradi optičkih vlakana je izrada predoblika (eng. *preform*) koji se zatim razvlači u duga vlakna. Tri glavne metode dobivanja predoblika su: unutarnje taloženje pare (Slika 9.3), vanjsko taloženje pare i osovinsko taloženje pare. Metoda unutarnjeg taloženja pare uključuje šuplju horizontalnu cijev dugu 40-ak centimetara koja se rotira. Ovisno o vrsti vlakna koja se želi dobiti u cijev se ubrizgavaju plinovi kao što su silicijev tetraklorid (SiCl_4), germanijev tetraklorid (GeCl_4), fosforil klorid (POCl_3), itd. s kisikom. Ubrizgani plinovi se zatim zagrijavaju na oko $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ čime nastaje silicijev dioksid, germanijev dioksid itd. Nastali spojevi kisika nadalje formiraju lančane molekule koje se talože na stijenkama cijevi zbog razlike u temperaturi između plina i stijenke. Nastali talog se naziva čađa (eng. *soot*). Dalnjim zagrijavanjem se nataložene čestice rastope čime se dobije čvrsti sloj (staklo). Ovaj proces se ponavlja dok se ne nataloži dovoljno tvari. Sastav svakog novog sloja se može modificirati čime se može dobiti vlakno s promjenjivim optičkim svojstvima duž radikalne udaljenosti od osi. Slojevi se formiraju od vani prema unutra. Kod metode vanjskog i osovinskog taloženja pare staklo se formira oksidacijom u reakciji s vodom u plamenu mješavine vodika i kisika. Kod metode vanjskog taloženja staklo se taloži na čvrstu šipku

koja se tokom procesa ukloni, a kod metode osovinskog taloženja staklo se taloži na šipku koja zagrijavanjem naponsjetku postane dio predoblika.

Dobiveni predoblik se nadalje zagrijava i razvlači čime se dobije vlakno željene debljine. U procesu razvlačenja omotač vlakna se presvlači zaštitnim slojem čija je funkcija zaštita vlakana od vlage i mehaničkog oštećenja (npr. pri izradi optičkih kabela, instalacije i sl.). Zaštitni sloj se kemijski poveže s omotačem UV lijepljenjem, odnosno izlaganjem vlakna UV zračenju koje inicira potrebne kemijske reakcije između njih. Optička vlakna obično sadrže više različitih zaštitnih slojeva.

Za kvalitetno izvođenje spoja dvaju optičkim vlakna krajevi vlakana moraju biti precizno okomito prerezani, a optičke jezgre moraju biti precizno poravnate. Spajanje vlakana se može izvesti na više načina. Fuzijsko spajanje je trajno, a izvodi se otapanjem krajeva vlakana prije nego se spoje. Kod mehaničkog spajanja se krajevi vlakana drže spojenima mehaničkom silom. Privremeni spojevi se izvode pomoću posebnih konektora optičkih vlakana. Vlakna s manjim numeričkim otvorom zahtijevaju veću preciznost pri spajaju.



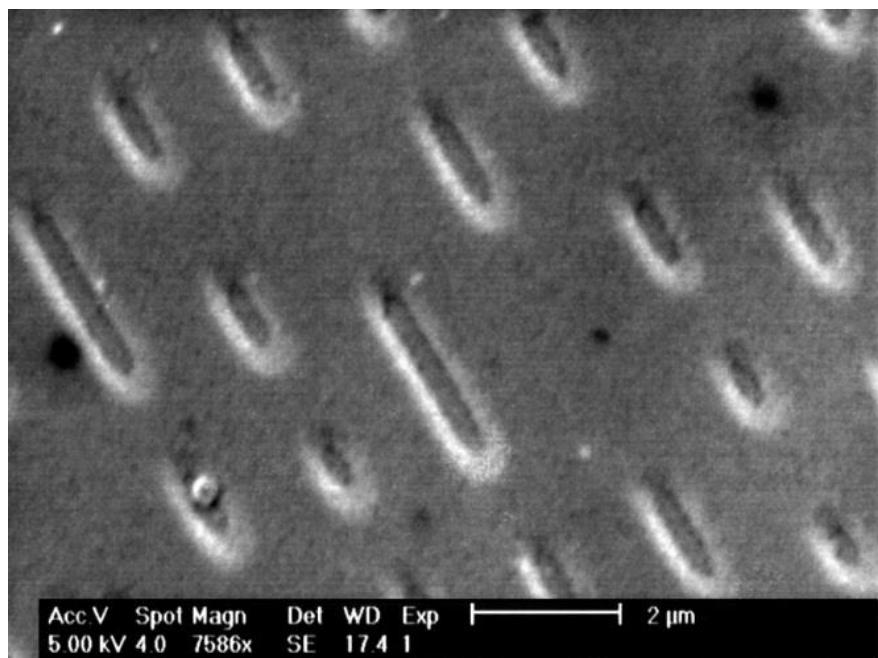
Slika 9.3. Skica metode unutarnjeg taloženja pare.³⁴

³⁴ User:User_A1. (2009). Modified Chemical Vapour Deposition Fibre process. Preuzeto s: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:OF-MCVD.svg>

10 Optička pohrana podataka

Optička pohrana se odnosi na pohranjivanje podataka optičkim putem na optički medij. Primjeri optičkog medija su kompaktni disk (eng. *compact disc, CD*), digitalni video disk (eng. *digital video disk, digital versatile disc, DVD*) i *blue-ray disk*.

Princip rada CD-a i DVD-a je gotovo isti. CD je debljine 1.2 mm i promjera 12 cm. Sastoje se od sloja polikarbonske plastike, sloja aluminija, zaštitnog sloja polikarbonske plastike i sloja laka (Slika 10.2). Podatci na CD-u su reprezentirani nizom udubina (eng. *pit*) ugraviranih u površinski sloj polikarbonskog sloja (Slika 10.1). Udubine su 100 nm duboke, 500 nm široke i između 850 nm i 3500 nm duge. Engleski naziv za ravni dio između udubina je *land*. Strana plastike na kojoj su ugravirane udubine je prekrivena reflektivnim slojem izrazito čistog aluminija na čiji su površinski sloj prenesene udubine polikarbonskog sloja. Sloj aluminija je dodatno prekriven zaštitnim slojem polikarbonskog sloja koji je nadalje prekriven tankim zaštitnim slojem laka. CD se u čitaču vrti konstantnom kuthnom brzinom.



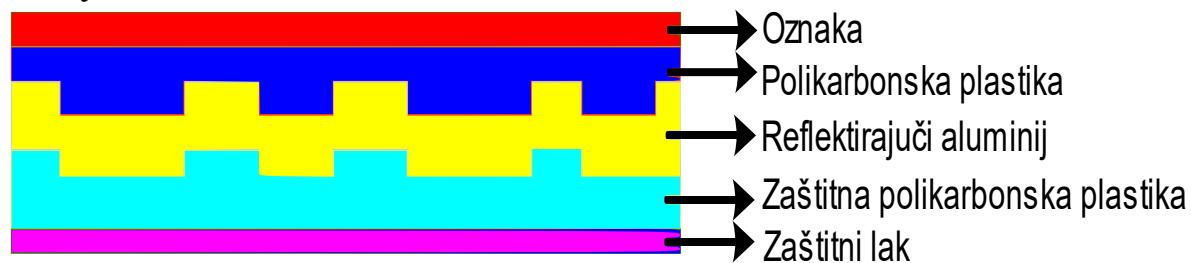
Slika 10.1. Mikroskopski prikaz površine CD-a.³⁵

CD se čita uz pomoć poluvodičkog lasera valne duljine od 780 nm fokusiranog na njegovu reflektirajuću stranu. Očitavanje podataka na CD-u počinje od unutrašnjosti diska prema njegovom vanjskom rubu. Programibilna spirala je približno duga 5.5 km za disk memorije 650 MB, što se gušćom spiralom može povećati na 700 MB i 800 MB. Da bi laserska zraka došla do alumininskog sloja mora proći kroz zaštitni polikarbonski sloj i sloj laka koji zbog toga moraju biti transparentni. Razlika između udubina i ravnog dijela dovodi do promjene između faze svjetla reflektiranog od udubine i ravnog dijela. Podatci se očitaju mjeranjem

³⁵ Akroti. (2007). SEM micrograph of compact disc. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:REM_CD_GEPRESST.jpg

intenziteta reflektiranog svjetla fotodiodom. Same udubine i ravni dijelovi ne predstavljaju jedinice i nule. Prijelaz iz udubine na ravnim dijelovima u udubinu predstavlja jedinicu, a nedostatak bilo kakve promjene predstavlja nulu. Između dvije jedinice može biti minimalno dvije a maksimalno deset nula što je određeno duljinom udubine. Promjer poprečnog presjeka laserske zrake iznosi oko 1 mm. Ako je ogrebotina na CD-u manja od približno 50% promjera zrake neće doći do gubitka informacije, odnosno zraka će se reflektirati kao da ogrebotine nema.

Gornja strana

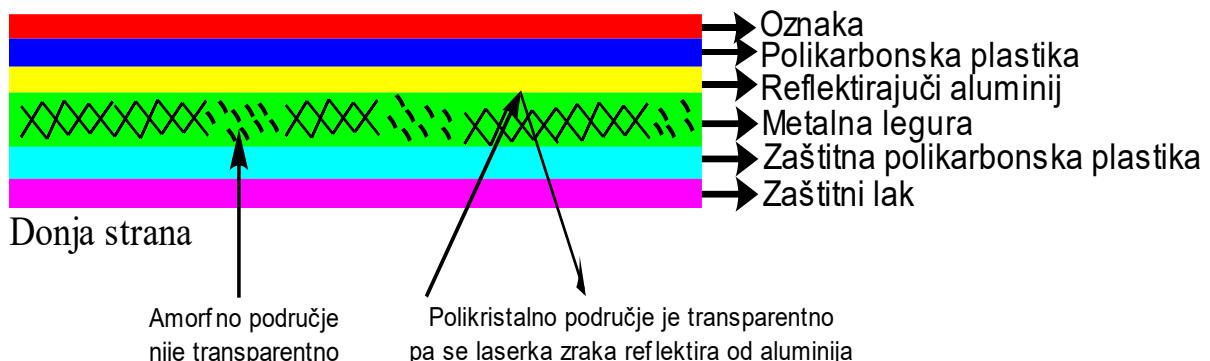


Donja strana

Slika 10.2. Presjek CD-a.

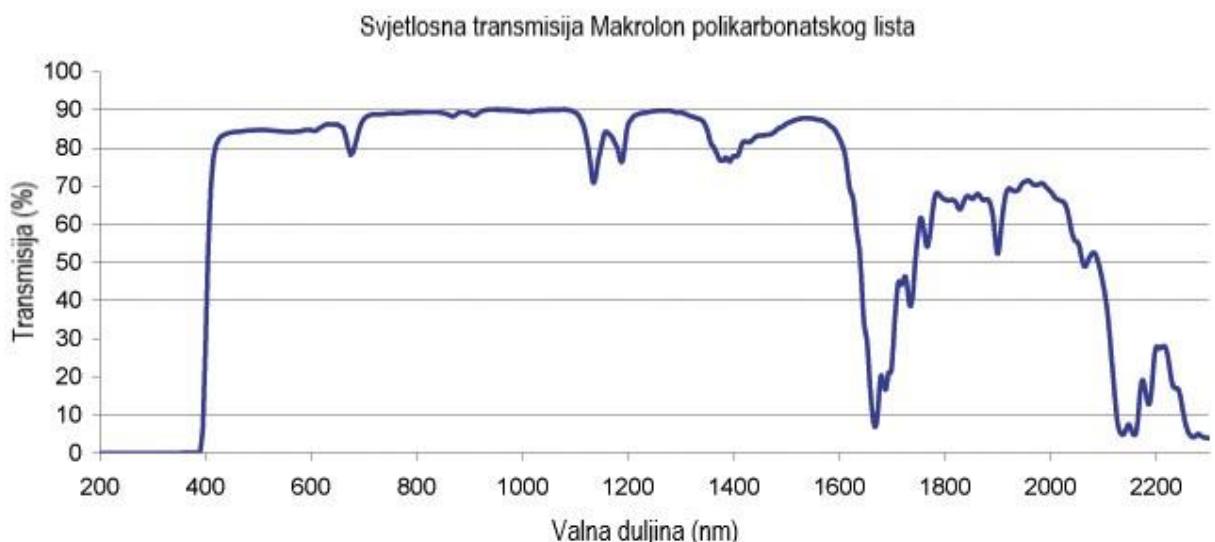
CD-RW (eng. *re-writable compact disc*) je CD čiji se sadržaj može zapisati, očitati, izbrisati i presnimiti. S jedne strane polikarbonske plastike je nanesen reflektivni aluminijski sloj, zatim sloj metalne legure (AgInSbTe) i opet polikarbonski sloj. Gornji polikarbonski sloj nema ugravirane udubine već samo ima strukturalnu funkciju. Sloj metalne legure može poprimiti polikristalnu i amorfnu strukturu. U originalnom stanju legura je polikristalna te je tada transparentna. Laserska zraka koja pada na leguru u polikristalnom stanju prolazi kroz nju do metalnog sloja od kojeg se reflektira. Pri zapisivanju podataka laserska zraka zagrije leguru na 500-700 °C što uzrokuje topljenje legure koja gubi kristalnu i poprima amorfnu strukturu. U amorfnom stanju legura nije transparentna nego apsorbira upadnu svjetlost. Signal se dobije zbog razlike u reflektivnosti laserske zrake od polikristalnog i amorfognog područja legure (Slika 10.3). Kombiniranjem polikristalnih i amorfnih područja dobije se kriptirani zapis ekvivalentan zapisu preko udubina i ravnih dijelova aluminijskog sloja kod običnog CD-a. Sadržaj diska se briše zagrijavanjem amorfnih područja laserom do 200 °C, čime se vraća u polikristalno stanje. Donji zaštitni polikarbonski sloj mora biti transparentan za lasersku zraku.

Gornja strana



Slika 10.3. Presjek CD-RW-a.

Veličina točke u koju se zraka svjetlosti može fokusirati ovisi o valnoj duljini, odnosno minimalni promjer točke je približno jednak jednoj valnoj duljini. Zato se kod optičke pohrane podataka s povećanjem gustoće podataka (bit/m^2) mora koristiti svjetlost sve manje valne duljine. No pri tome se javlja problem jer polikarbonski sloj nije transparentan za UV zračenje i zračenje manji valnih duljina (Slika 10.4). DVD koristi lasersku zraku od 650 nm, a blue-ray disk od 405 nm (granica UV zračenja i vidljivog spektra). Transparentnost polikarbonata pri 405 nm iznosi 60% a već pri 395 nm pada na 20%. Kako bi se umanjila apsorpcija koristi se tanji zaštitni sloj (0.1 mm za blue-ray disk). 405 nm je donja moguća granica valne duljine ako je zaštitni sloj napravljen od polikarbonata.



Slika 10.4. Ovisnost transmisije i valne duljine polikarbonskog sloja.³⁶

³⁶ Michael Sebastian. (2011). Transmission spectrum for polycarbonate sheet. Preuzeto s: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Makrolon-Sheet_transmission.jpg

Literatura

- [1] V. Papić. *Predavanja iz osnova elektronike*. Sveučilište u Splitu, 2005.
- [2] C.L. Chen. *Elements of optoelectronics and fiber optics*. Richard D. Irwin, 1996.
- [3] V. Henč-Bartolić, P. Kulišić. *Valovi i optika, 2. dopunjeno izdanje*. Školska knjiga, 1991.
- [4] E.F. Schubert. *Light-Emitting Diodes, second edition*. Cambridge University Press. 2006.
- [5] *Handbook of Optoelectronics Volume 1*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.
- [6] *Handbook of Optoelectronics Volume 2*. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006.
- [7] S.M. Sze. *Physics of Semiconductor Devices, second edition*. A Wiley-Interscience publication. 1981.
- [8] Radiant energy. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Radiant_energy
- [9] Radiant flux. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Radiant_flux
- [10] Radiant intensity. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Radiant_intensity
- [11] Radiance. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Radiance>
- [12] Radiosity. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Radiosity_\(radiometry\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Radiosity_(radiometry))
- [13] Radiant exitance. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Radiant_exitance
- [14] Irradiance. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Irradiance>
- [15] Radiant exposure. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Radiant_exposure
- [16] Luminous energy. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Luminous_energy
- [17] Luminous flux. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Luminous_flux
- [18] Luminous intensity. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Luminous_intensity
- [19] Luminance. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Luminance>
- [20] Luminous exposure. URL:
[https://en.wikipedia.org/wiki/Exposure_\(photography\)#Photometric_and_radiometric_exposure](https://en.wikipedia.org/wiki/Exposure_(photography)#Photometric_and_radiometric_exposure)
- [21] Illuminance. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Illuminance>
- [22] Exposure. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Exposure_\(photography\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Exposure_(photography))
- [23] Luminous efficacy. Luminous efficiency. URL:
https://en.wikipedia.org/wiki/Luminous_efficiency
- [24] Luminosity function. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Luminosity_function
- [25] Laser types and operation. URL: <http://www.cemarelectro.com/laser-safety/laser-types-and-operation/>
- [26] Candela. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Candela>
- [27] Lumen. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Lumen_\(unit\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Lumen_(unit))

- [28] Lux. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lux>
- [29] The human eye. URL: <https://www.britannica.com/science/human-eye#ref64860>
- [30] Mrežnica. URL: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Mre%C5%BEnica_\(oko\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Mre%C5%BEnica_(oko))
- [31] Photoreceptor cell. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Photoreceptor_cell
- [32] PVEducation. URL: <https://www.pveducation.org/>
- [33] Incandescent light bulb. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Incandescent_light_bulb
- [34] Halogen lamp. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Halogen_lamp
- [35] Luminescence. ULR: <https://en.wikipedia.org/wiki/Luminescence>
- [36] Gas-discharge lamp. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Gas-discharge_lamp
- [37] Elektrolučna svjetiljka. URL:
https://hr.wikipedia.org/wiki/Elektrolu%C4%8Dna_svjetiljka
- [38] HID Lights for Beginners. URL: <https://www.ledwatcher.com/high-intensity-discharge-lamps-explained/>
- [39] Light-emitting diode. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode
- [40] Stokesov pomak. URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Stokesov_pomak
- [41] Colour rendering index. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Color_rendering_index
- [42] Colour temperature. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Color_temperature
- [43] Laser. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [44] Laser diode. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_diode
- [45] Cathode-ray tube. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Cathode-ray_tube
- [46] Plasma display. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Plasma_display
- [47] Liquid-crystal display. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Liquid-crystal_display
- [48] OLED. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/OLED>
- [49] Electroluminescent lamps. URL: <https://edisontechcenter.org/electroluminescent.html>
- [50] Optical fiber. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_fiber
- [51] Fiber-optic cable. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber-optic_cable
- [52] Compact disc. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Compact_disc
- [53] CD-RW. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/CD-RW>