

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

Robert Perčić

**UPORABA LED U KOMUNIKACIJSKIM
SUSTAVIMA**

DIPLOMSKI RAD

Rijeka, 2013.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET U RIJECI

**UPORABA LED U KOMUNIKACIJSKIM
SUSTAVIMA**

Predmet: Optoelektronički sustavi
Mentor: dr. sc. Irena Jurdana

Student: Robert Perčić
Matični broj: 0112029402
Studij: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

Rijeka, 2013.

1. Uvod

Optički komunikacijski sustav je bilo koji oblik razmjene informacija na daljinu korištenjem svjetlosnog izvora kao medija za prijenos podataka. Ovakav sustav sastoji se od prijemnika, koji informaciju pretvara u svjetlosni signal, kanala, koji svjetlost prenosi na destinaciju, te prijemnika, koji prima i reproducira informaciju. LED (*engl.* LightEmitting Diode), drugog imena svjetleća dioda, u ovakvim sustavima koristi se kao izvor svjetlosnog signala. Zbog svoje jednostavne izrade, ekonomičnosti i dugog radnog vijeka prikladan su izbor za korištenje u optičkim komunikacijskim sustavima.

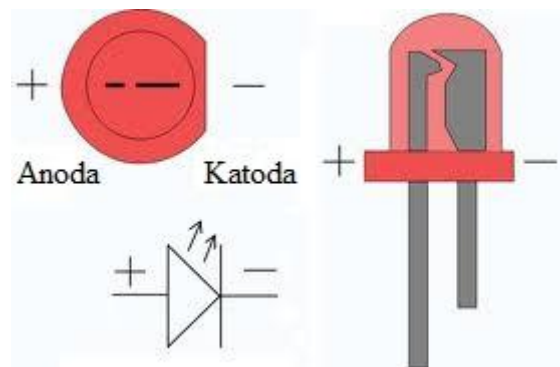
LED je jednostavna elektronička komponenta koja je primjenu našla u mnogim područjima moderne tehnologije. Tako se danas svjetleće diode mogu naći u mobilnim uređajima, računalima, digitalnim znakovima, zaslonima i mnogim drugim elektroničkim uređajima. Raznovrsnoj primjeni pogoduje široki spektar svjetlosti diode i laka upravljivost samim elementom, kao i njegova niska cijena. Ovisno o primijenjenom poluvodičkom materijalu moguće je lako izabrati valnu duljinu izlazne svjetlosti i prilagoditi diodu potrebnim uvjetima primjene.

U ovom radu dan je kratki pregled razvoja svjetleće diode, te je opisan princip rada. Nadalje, opisani su glavni konstrukcijski dijelovi i pojedine boje emitirane svjetlosti, kao i korišteni poluvodički materijali. Za kraj ovog poglavlja, opisana su svojstva svjetleće diode, te njene prednosti i nedostaci.

U nastavku, opisan je jednostavan komunikacijski sustav sa svjetlećom diodom kao izvorom svjetlosti, te su detaljnije razrađeni njegovi glavni dijelovi. Kao praktična primjena LED u komunikacijskom sustavu, izabrao sam IrDA sustav zasnovan na komunikaciji putem infracrvene svjetlosti. Na kraju ću kratko opisati sustav komunikacije vidljivim svjetlom.

2. LED

LED je poluvodička komponenta koja emitira svjetlost kada je propusno polarizirana. Kod rekombinacije elektrona i šupljina, emitira se foton svjetla. Ova pojava naziva se elektroluminiscencija (pretvorba električne energije u svjetlosnu). Kod ovih dioda koriste se poluvodiči kao što su silicijev karbid (SiC), galijevfosfid (GaP) i galijevarsenid (GaAs). LED je našla mnoge primjene, kao indikator u mnogim uređajima, au današnje se vrijeme uvelike koristi u rasvjeti. Prve LED emitirale su crvenu svjetlost niskog intenziteta, dok moderne LED emitiraju svjetlost vidljive, ultraljubičaste i infracrvene valne duljine. Boja emitirane svjetlosti ovisi o energetske razmaku između valentnog i vodljivog pojasa poluvodičkog materijala. LED ima mnoge prednosti u odnosu na standardne izvore svjetlosti, kao što su manja potrošnja energije i duži radni vijek, međutim osvjetljenje prostora svjetlećom diodom ekonomski je neisplativo jer LED zahtjeva precizniji izvor struje i upravljanje toplinom, u odnosu na fluorescentne izvore svjetlosti istog intenziteta zračenja. U ovom poglavlju fokusirati ću se na samu svjetleću diodu, te ću detaljnije objasniti princip rada.



Slika 1: Svjetleća dioda i njezin simbol^[1]

2.1 Povijest

Kratki pregled razvoja LED možemo vidjeti u slijedećim natuknicama^[2]:

- 1927. godine ruski znanstvenik Oleg Losev stvorio je prvu svjetleću diodu i svoje otkriće objavio u ruskim, njemačkim i britanskim znanstvenim časopisima, no njegov izum nije pronašao praktičnu primjenu.
- 1955. godine Ruben Braunstein primijetio je da jednostavne diode napravljene od galijevogantimonida (GaSb), indijfosfida (InP) i silicij germanijuma (SiGe) emitiraju infracrvene zrake pri sobnoj temperaturi.
- 1961. godine američki znanstvenici James R. Biard i Gary Pittman otkrili su da diode napravljene od galijevogarsenida (GaAs) emitiraju infracrveno zračenje dok kroz njih prolazi struja. Ova dva znanstvenika dobila su prvi patent (u Americi) za LED.
- 1962. godine Nick Holonyak Jr razvio je prvu diodu sa vidljivim spektrom zračenja crvene boje. Svoje otkriće objavio je u Applied Physics Letters znanstvenom časopisu 1. 12. 1952 godine. [2]
- 1972. godine Holonyakov bivši učenik imena M. George Craford izumio je prvu žutu LED i 10 puta je povećao intenzitet zračenja crvene LED.
- 1976. godine T.P. Paersall stvorio je prvu visokoefikasnu LED za optičke komunikacije. Visoku sjajnost i intenzitet postigao je izumom novog poluvodičkog materijala posebno prilagođenog valnim duljinama korištenim u optičkim vlaknima.

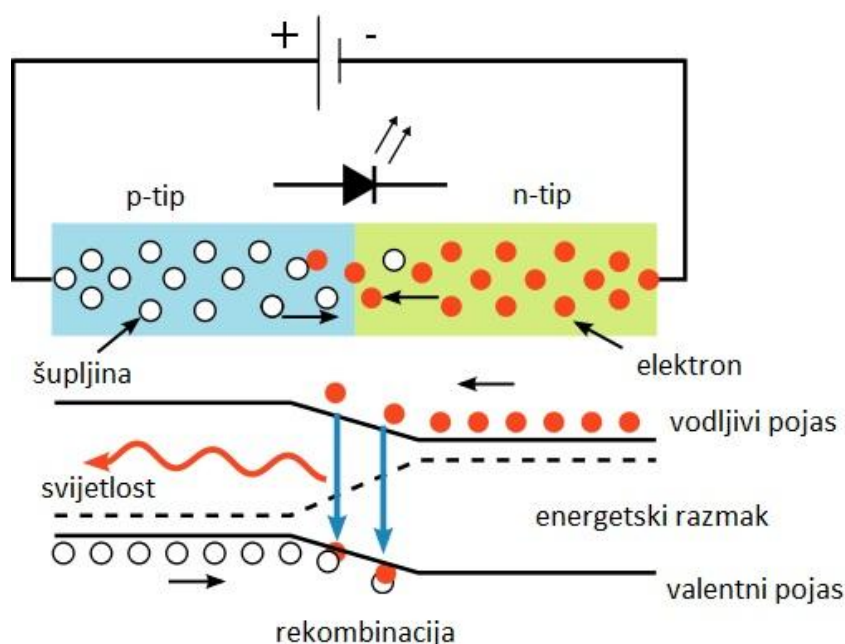
Prve komercijalno proizvedene LED koristile su se kao zamjena za standardne i neonske indikatore, pa čak i u segmentnim zaslonima. LED su široku primjenu našle u uređajima poput televizija, mobilnih uređaja, kalkulatora, pa čak i satova. Do 1968. godine infracrvene i LED vidljive svjetlosti bile su skupe, pa nisu našle veliku praktičnu primjenu. Prvu masovnu proizvodnju LED vidljivog spektra zračenja pokrenula je tvrtka Monsanto korištenjem galijevogfosfida (GaAsP). Ove LED bile su prikladne za korištenje kao indikatori, jer nisu imale dovoljan intenzitet i sjajnost zračenja da se koriste za osvjetljenje. 1970. godine tvrtka Fairchild Optoelectronics počela je proizvoditi jeftine LED korištenjem

posebnih poluvodičkih čipova, tehnologije koji i danas koriste veliki proizvođači LED. Daljnjim razvojem poluvodičkih materijala povećao se intenzitet zračenja, dok je efikasnost i pouzdanost ostala na zadovoljavajućoj razini. Razvojem LED tehnologije, efikasnost i jačina zračenja LED eksponencijalno raste svakih 36 mjeseci duplo, sve od 1960. godine. Bijela LED visoke sjajnosti polako zamjenjuje tradicionalnu i fluorescentnu rasvjetu.

Dvjestisućitih godina razvijeni su novi načini uzgajanja galijevonitrida (GaN) na siliciju, a u siječnju 2012. godine kompanija Osram je predstavila snažnu LED napravljenu od indijgalijnatrida (InGaN) stvorenog na podlozi silicija. Diode konstruirane na ovaj način imaju i do 90% manju proizvodnu cijenu.

2.2 Princip rada

LED se sastoji od poluvodičkog materijala dopiranog nečistoćama kako bi se stvorio takozvani p-n spoj, gdje je sa p označavamo anodu, a sa n katodu. Dopiranjem poluvodičkog materijala u njega u biti unosimo dodatne atome kako bismo u biti dobili slobodne elektrone u materijalu. Dovodjenjem električne energije na diodu izazivamo kretanje elektrona između anode i katode. Kada elektron popuni šupljinu pada na niži energetska razinu što rezultira oslobađanjem energije u obliku fotona. Na slici 2 je prikazano gibanje elektrona u jednom p-n spoju



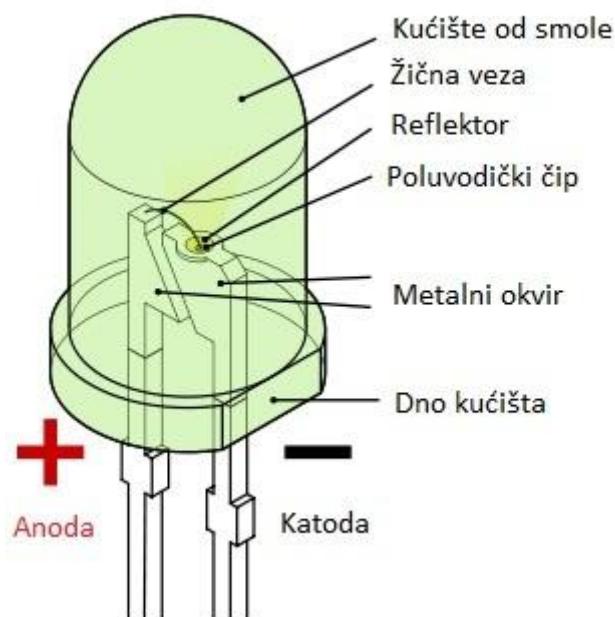
Slika 2: Rekombinacija elektrona i šupljina^[3]

Valna duljina svjetlosti ovisi o energetsom razmaku vodljivog i valentnog pojasa materijala koji tvore p-n spoj. Kod poluvodičkih materijala, postoje dvije vrste eneretskog razmaka: direktni i indirektni. Materijali poput silicija i germanija imaju indirektni energetski razmak, što znači da se elektroni rekombiniraju bez radijacije, i ne dolazi do vodljive emisije svjetla. Zato se kod LED koriste materijali sa direktnim energetskim razmakom. Također, mnogi materijali koji se koriste kod LED imaju visok indeks loma, što rezultira zračenjem velikog dijela svjetlosti natrag u poluvodič. Veliku važnost kod dizajniranja svjetlećih dioda daje se iskorištavanju što većeg dijela svjetlosti.

2.3 Konstrukcija

Glavni dijelovi klasične svjetleće diode su:

- Anoda
- Katoda
- Poluvodički čip
- Žična veza
- Reflektor
- Metalni okvir
- Kućište od smole



Slika 3: Dijelovi LED^[4]

Dioda je u strujni krug spojena putem dva vodiča, anode i katode, gdje je anoda spojena na pozitivnu stranu strujnog kruga, a katodu na negativnu stranu. Promotrimo li dno kućišta, vidi se da je ono sa jedne strane diode ravno, dok je ostatak zaobljen. Ravni dio dna kućišta simbolizira stranu diode na kojoj se nalazi katoda. Ako diodu krivo spojimo u strujni krug, to jest anodu spojimo na negativnu stranu strujnog kruga, a katodu na pozitivnu stranu, dioda neće funkcionirati.

Na prošireni dio katode (klin) smješten je tanak sloj poluvodiča, takozvani poluvodički čip. Poluvodički čip sa anodom je povezan putem žičane veze. Metalni okvir sastoji se od nakovnja i klina. Oblik metalnog okvira ispunjava dvije zadaće: osim što pomoću njega možemo također raspoznati koji vodič je anoda, a koji katoda, on također drži okvir na mjestu dok se cijela dioda zatvara u epoksidnu smolu. Povrh poluvodičkog čipa smješten je reflektor koji omogućava bolje isijavanje fotona. Kućište od epoksidne smole, osim što omogućava mehaničku zaštitu komponenti, također omogućava i bolje isijavanje svjetla, tako što je vrh kućišta napravljen u obliku leće. Svjetleće diode proizvode se u raznim veličinama i oblicima, ovisno o primjeni. Kućište od epoksidne smole često je iste boje kao i emitirana svjetlost same diode.

Iz svega napisanoga, možemo zaključiti da je sam dizajn svjetleće diode vrlo dobro osmišljen i izveden. LED je čvrsta i malih dimenzija, a u odnosu na tradicionalne izvore svjetlosti proizvodi puno manje topline i ima znatno dulji vijek trajanja.

2.4 Boje emitirane svjetlosti

Klasične LED napravljene su od raznih poluvodičkih materijala. U tablici 2 je prikazana lista boja emitirane svjetlosti LED sa rasponom valne duljine, korištenim poluvodičkim materijalima te padovima napona.

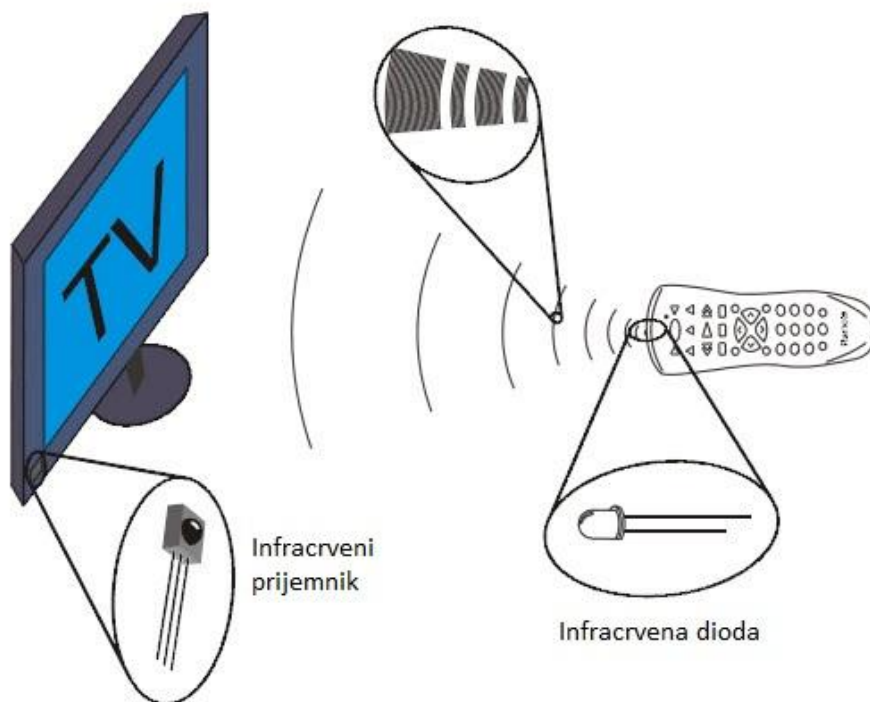
Boja	Valna duljina [nm]	Pad napona	Poluvodički materijali
Infracrvena	$\lambda > 760$	1,63	GaAs, AlGaAs
Crvena	610-760	1,63-2,03	AlGaAs, GaAsP, AlGaInP, GaP
Narančasta	590-610	2,03-2,10	GaAsP, AlGaInP, GaP
Žuta	570-590	2,10-2,18	GaAsP, AlGaInP, GaP
Zelena	500-570	1,9-4,0	GaP, AlGaInP, AlGaP
Plava	450-500	2,48-3,70	ZnSe, InGaN, SiC, Si
Tamnoljubičasta	400-450	2,76-4,0	InGaN
Ljubičasta	više vrsta	2,48-3,7	crvena i plava LED, plavi i crveni fosfor
Ultraljubičasta (UV)	$\lambda < 400$	3,1-4,4	AlN, AlGaN, AlGaInN, Dijamant,
Roza	više tipova	~ 3.3	kombinacija raznih dioda
Bijela	širok spektar	3,5	plave/UV diode sa žutim fosforom

Tablica 1: Boje svjetlećih dioda

2.4.1 Infracrvena svjetlost

Infracrvena svjetleća dioda emitira svjetlost nevidljivu golim okom. Poluvodiči korišteni u ovoj diodi su galijevarsenid i aluminij-galijevarsenid. Infracrvene LED emitiraju svjetlost na valnim diodama između 800 nm i 980 nm uvelike se koriste kao izvori svjetlosti u daljinskim uređajima, optičkim izolatorima i infracrvenim komunikacijskim sustavima poput IrDA (*engl.* Infrared Data Associations). Infracrvene LED visoke snage također se koriste u nadzornim kamerama i čitačima registracijskih tablica automobila, senzorima korištenim u automatizaciji tvornica, detektorima dima i digitalnim kamerama.

Kod komunikacijskih sustava, infracrvena LED koristi se kao transponder koji električnu energiju pretvara u optički signal. LED imaju širok uzorak zračenja pa su pogodne za neusmjerene veze. U odnosu na lasersku diodu, lakše se postižu sigurnosne mjere zaštite očiju od štetnih zračenja, te su uvelike korištene u kratko dometnim komercijalnim komunikacijskim sistemima. Na slici 4 prikazan je primjer komunikacijskog sustava korištenjem infracrvene diode kao izvora svjetlosti.



Slika 4: Jednostavni infracrveni komunikacijski sistem^[5]

Daljinski upravljač odašilje podatke raznim kombinacijama svjetlosnih signala putem infracrvene LED na frekvenciji od 38kHz. Prijemnik prima podatke samo ako su odaslani na istoj frekvenciji, kako ne bi došlo do primanja krivih podataka, iz drugih izvora svjetlosti, kao što su tradicionalna rasvjeta ili sunce. Razne kombinacije

ih signala programirane su za svaku tipku daljinskog upravljača.

2.4.2 Ultraljubičasta svjetlost

Ultraljubičasta svjetlost je elektromagnetski val valne duljine između 10 nm i 400 nm. Elektromagnetski spektar ultraljubičastog svjetla po ISO standardu dijeli se na slijedeći način:

Naziv	Kratica	Valna duljina (nm)	Energija po fotonu (eV)
Ultraljubičasto A ili dugovalno područje	UVA	400 nm–315 nm	3,10–3,94 eV
Blisko UV	NUV	400 nm–300 nm	3,10–4,13 eV
Ultraljubičasto B ili srednjevalno područje	UVB	315 nm–280 nm	3,94–4,43 eV
Srednje UV	MUV	300 nm–200 nm	4,13–6,20 eV
Ultraljubičasto C ili kratkovalno područje	UVC	280 nm–100 nm	4,43–12,4 eV
Daleko UV	FUV	200 nm–122 nm	6,20–10,2 eV
Vakuumsko UV	VUV	200 nm–100 nm	6,20–12,4 eV
Duboko UV	LUV	100 nm–88 nm	12,4–14,1 eV
Super UV	SUV	150 nm–10 nm	8,28–124 eV
Ekstremno UV	EUV	121 nm–10 nm	10,2–124 eV

Tablica 2: Elektromagnetski spektar ultraljubičastog svjetla

Ultraljubičaste LED kao poluvodič koriste aluminijev nitrid, aluminij galijevnitrid, ili dijamant. UV LED radi se sa valnom duljinom većom od 365 nm, pošto je njena efikasnost na

toj valnoj duljini 5-8 %, dok je kod LED sa valnom duljinom 395 nm efikasnost 20%, i izlazna snaga mnogo bolja. UV dioda primjenu je našla u stvrdnjavanju raznih materijala kao što su tinte, premazi i ljepila, raspoznavanju krivotvorenih novčanica i kod digitalnih printera.

Ultraljubičasta dioda može se iskoristiti kao izvor svjetlosti u glasovnom komunikacijskom sistemu. Takav sistem sastoji se od tri djela:

- UV transmiter
 - sklop za procesiranje govora
 - modulacijski sklop
- atmosferski kanal
- prijemnik
 - sklop za obradu svjetlosnog signala
 - sinkroni demodulacijski sklop

Principijelna shema takvog sustava prikazana je na slici 5:



Slika 5: UV komunikacijski sustav

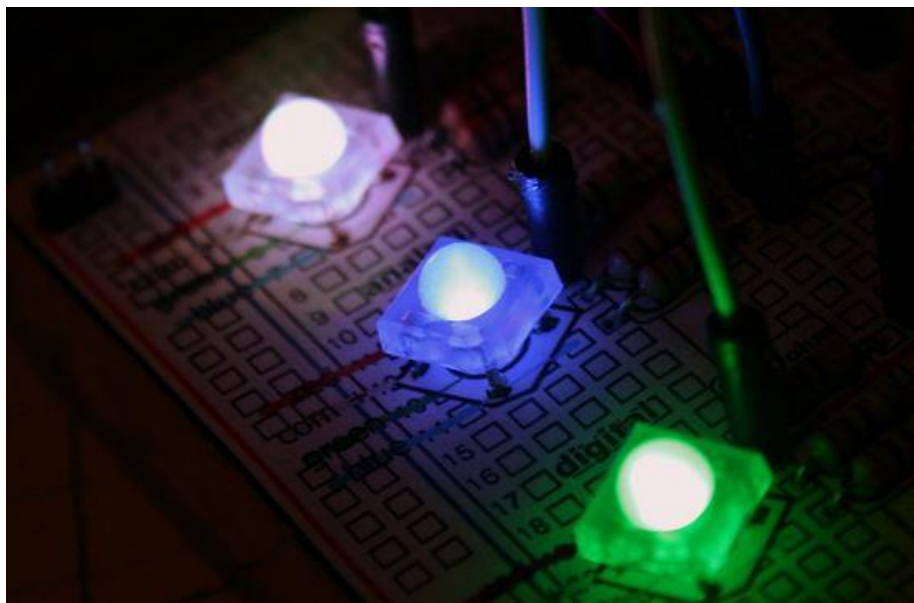
Analogni signal pretvara se u digitalni, i modulira putem modulacijskog sklopa te se šalje u pogonski sklop koji putem ultraljubičaste LED podatke šalje u atmosferski kanal. Detektor UV svjetlosti prima signal i pretvara ga u električni signal. Nakon što je signal obrađen i filtriran, digitalni signali se dekodiraju. Nakon dekodiranja signal se pretvara iz digitalnog u analogni i dobijemo izlazni signal. Ovakav komunikacijski sustav može se koristiti za komunikaciju na kratke udaljenosti, koja se može povećati dovođenjem veće struje na LED.

2.4.3 Bijela svjetlost

Bijela svjetlost pomoću LED primarno se dobiva na dva načina:

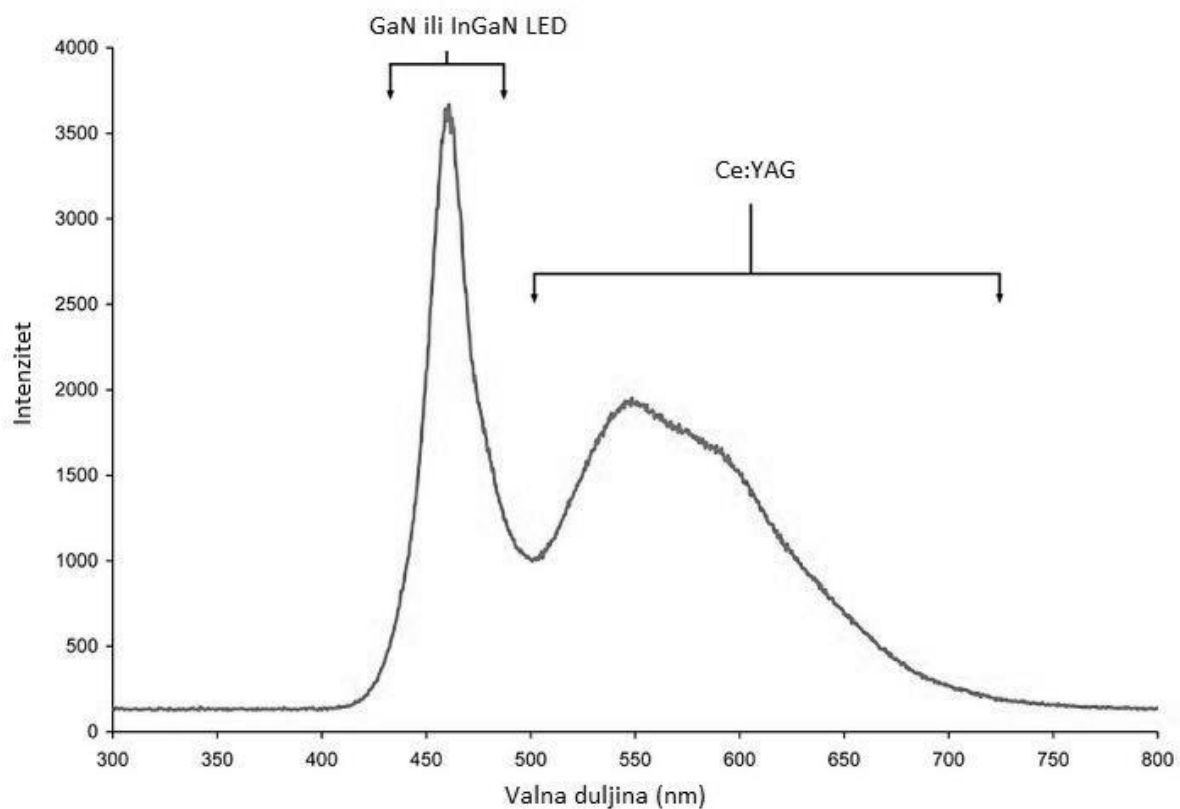
- korištenjem RGB svjetleće diode
- korištenje fosfornog materijala kod plavih ili UV dioda

RGB dioda emitira tri primarne boje: crvenu, plavu i zelenu. Bijela svjetlost formira se kombinacijom te tri boje. Ove diode zahtijevaju elektronički sklop koji kontrolira emisiju raznih boja diode, kako bi se ostvarila bijela boja. Iako se rijetko koriste za dobivanje bijele boje, zbog varijacija u uzorcima zračenja diode, koriste se zbog fleksibilnosti u dobivanju širokog spektra boja. Postoje tri vrste RGB dioda: dikromatska, trikromatska i tetrakromatska bijela dioda. Osnovne razlike pojedine podvrste su stabilnost boje, sposobnost reprodukcije boja te efikasnost isijavanja. Visokoefikasne diode često imaju smanjenu reprodukcije spajanja boja, pa treba vrlo dobro paziti pri izboru diode. Dikromatske diode imaju najbolju efikasnost isijavanja (120 lm/W), a najmanju sposobnost reprodukcije boja, dok tetrakromatske diode imaju odličnu sposobnost reprodukcije boja, a malu efikasnost isijavanja.



Slika 6: RGB svjetleće diode u raznim bojama^[6]

Svjetleće diode na bazi fosfora sastoje se od plavih LED, napravljenih od indijgallijumnitrida i fosfornog materijala raznih boja kako bi se dobila bijela boja. Dio plave svjetlosti mijenja valnu duljinu iz kraće u dugu preko Stokesovog pomaka. Ovisno o originalnoj boji svjetleće diode moguće je koristiti razne fosforne materijale. Korištenjem više fosfornih slojeva različitih boja, moguće je efektivno povisiti indeks reprodukcije boja diode. LED na bazi fosfornih materijala na efikasnosti gube zbog zagrijavanja zbog Stokesovog pomaka. U usporedbi s normalnom LED, efikasnost diode ovog tipa ovisi o spektralnoj distribuciji izlazne svjetlosti i valnoj duljini diode. Zbog jednostavnosti izrade fosfornih dioda ovo je najpopularnija metoda izrade bijelih LED visokog intenziteta. Najefikasniji fosfori materijal trenutno u uporabi je žuti YAG fosfor, jer su gubici uslijed Stokesovog pomaka samo 10%.



Slika 7: Spektar zračenja bijele diode

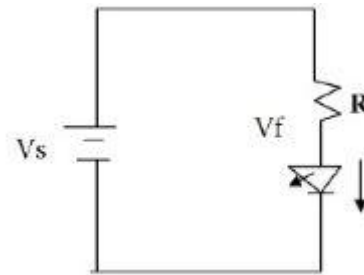
Na slici 7 je prikazan spektar zračenja plave LED sa YAG fosfornim materijalom. Sastoji se od plave svjetlosti maksimalne valne duljine od 465 nm i

širokopojasne, Stokespomaknute svjetlosti emitirane YAG žutim fosforom, na intervalu valne duljine od 500-700 nm.

2.5 Električna i optička svojstva LED

2.5.1 Strujno-naponska karakteristika

Jednostavni strujni krug prikazan na slici sastoji se od istosmjernog izvora napona U_s , otpora R i LED. Struja kruga određena je orijentacijom elemenata strujnog kruga i njihovim parametrima.



Slika 8: Jednostavni strujni krug sa LED

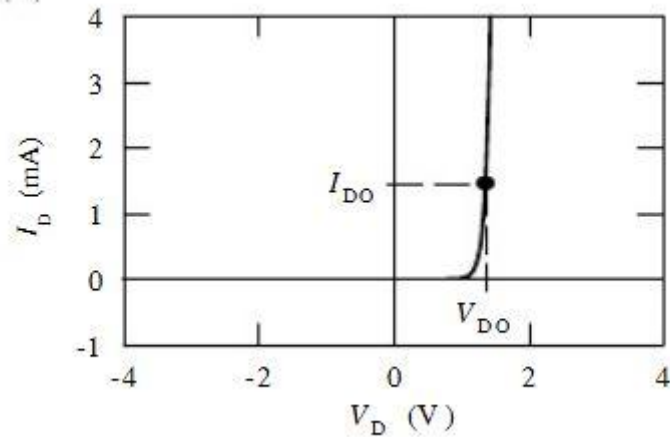
Strujno naponska karakteristika p-n diode opisana je Shockleyevom jednađbom:

$$I = eA \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D}} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n} \frac{n_i^2}{N_P}} \right) (e^{\frac{eV}{kT}} - 1)$$

Kod direktno polarizirane LED, kada je $U \gg kT$ Shockleyeva jednađba može se napisati u obliku:

$$I = eA \left(\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p} \frac{n_i^2}{N_D}} + \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n} \frac{n_i^2}{N_P}} \right) e^{e(V-V_D)/kT}$$

Eksponecijalna funkcija govori nam da kod prelaska praga napona, dolazi do naglog porasta struje kroz diodu. Isti zaključak možemo vidjeti i na strujno-naponskoj karakteristici na slici.

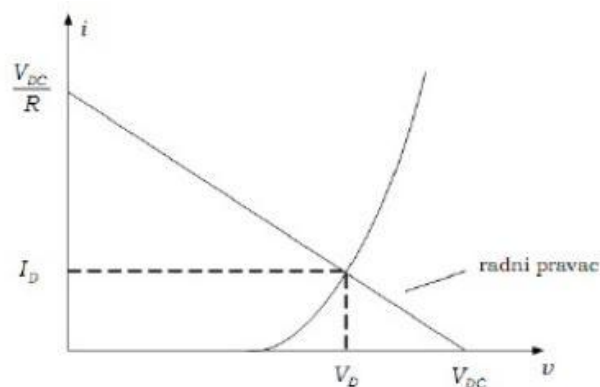


Slika 9: Strujno naponska karakteristika

U slučaju kada je $U_s = U_f + I * R$, na propusno polariziranoj diodi vrijedi pojednostavljena relacija struje:

$$I = I_s * e^{\frac{V}{n * V_t}}$$

Koordinatne radne točke mogu se naći na više raznih načina. Na slijedećem grafu prikazana je radna točka, kao sjecište dvije krivulje.



Slika 10: Radna točka

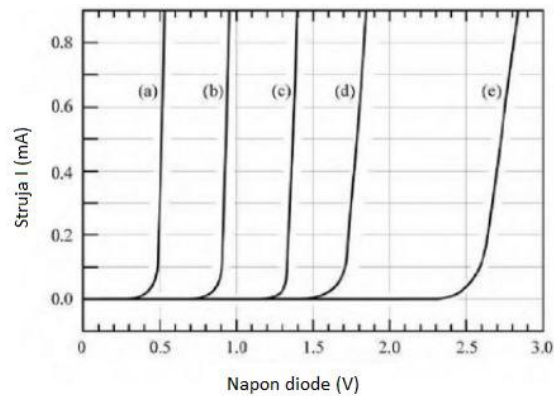
U stanju ravnoteže, kontaktni potencijal može se izraziti jednačbom:

$$U_C = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) \quad (1)$$

Ovaj potencijal ovisi o koncentraciji dopiranih nečistoća, no kako one mogu biti zanemarene, kontaktni potencijal se može izraziti omjerom energetskog procijepa i napona praga:

$$U_C \approx \frac{E_g}{e} \approx V_{th} \quad (2)$$

Slika 11. prikazuje strujno-naponske karakteristike za različite poluvodičke materijale, dok tablica 3 prikazuje veličine njihovih energetskih procjepa.



Slika 11: Strujno naponske karakteristike pojedinih materijala

	Materijal	E_g (eV)
a	Ge	0,7
b	Si	1,1
c	GaAs	1,4
d	GaAsP	2
e	GaInN	2,9

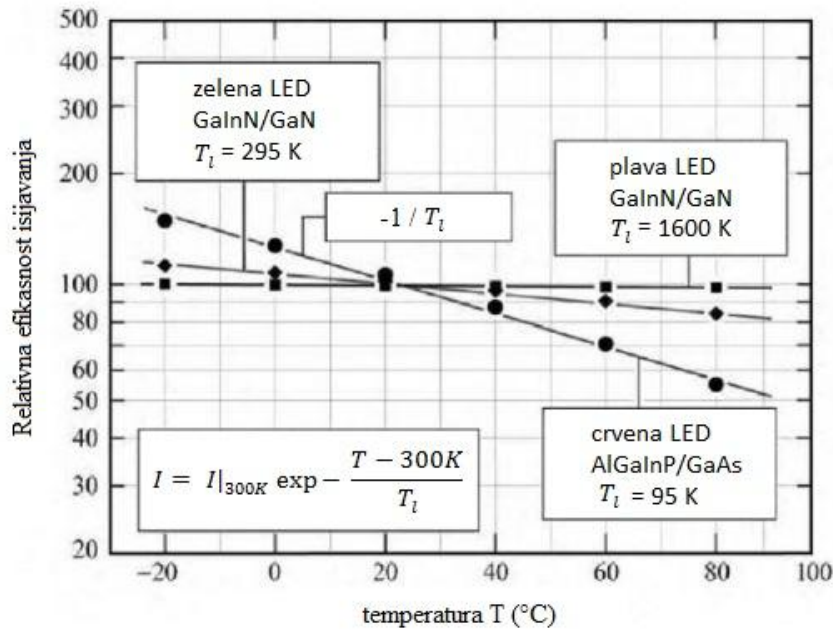
Tablica 3: Tablica materijala

2.5.2 Utjecaj temperature na intenzitet emisije svjetlosti i napon praga

Svjetleća dioda je temperaturno ovisna, pa s toga intenzitet emisije svjetlosti opada s porastom temperature. Također, povećanjem temperature mijenja se i valna duljina izlazne svjetlosti, pa je moguća i promjena boje svjetlosti. Temperatura utječe na rekombinaciju elektrona i na gubitak nosioca u heterostrukturalnim barijerama. Jednadžba 3 opisuje intenzitet emisije na sobnoj temperaturi:

$$I = I|_{300K} \exp - \frac{T-300K}{T_l} \quad (3)$$

gdje je T_l karakteristična temperatura. Višom karakterističnom temperaturom postiže se manja temperaturna ovisnost diode.



Slika 12: Ovisnost intenziteta emisije o temperaturi

Slika 12 prikazuje ovisnost intenziteta emisije pri konstantnoj struji za plavu, zelenu i crvenu svjetleću diodu. Vidimo da plava LED ima najvišu vrijednost T_l , a razlog tome je učinkovitija nitridna struktura same diode.

Ovisnost direktnog napona o temperaturi za poluvodiče u uvjetima direktne polarizacije dana je derivacijskom jednadžbom (4):

$$\frac{dU_f}{dT} = \frac{d}{dT} \left[\frac{n_{ideal} kT}{e} \ln \left(\frac{J_f}{J_s} \right) \right] \quad (4)$$

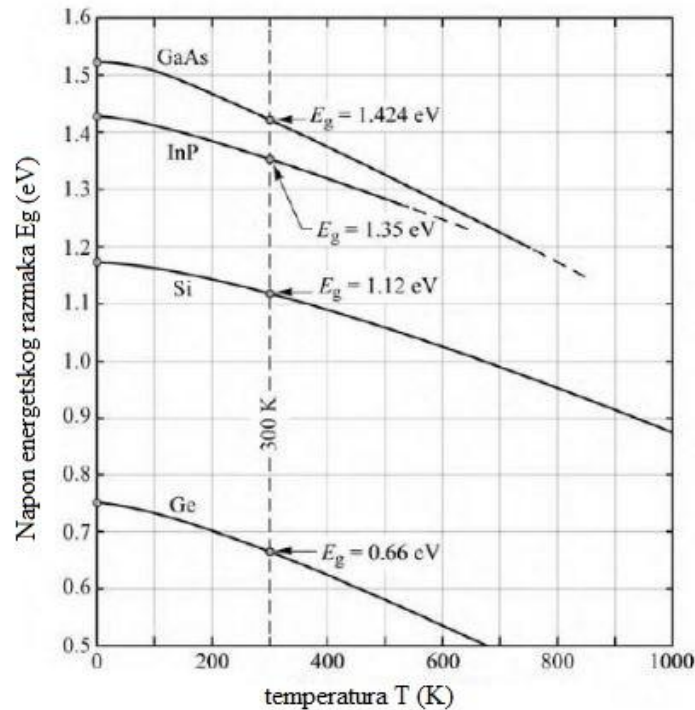
Gustoća struje zasićenja ovisi o difuznoj konstanti elektrona i šupljina, njihovog vremena trajanja, veličine energetskog procjepa te stanja efikasnosti gustoće vodljivog i valentnog pojasa. Ove veličine također su ovisne o temperaturi. Korištenjem ovih temperaturno ovisnih veličina, riješimo li prethodnu derivaciju, dobijemo da je:

$$\frac{dU_f}{dT} = \frac{eU_f - E_g}{eT} + \frac{1}{e} \frac{dE_g}{dT} - \frac{3k}{e} \quad (5)$$

Kako je napon praga ovisan o veličini energetskog pojasa, a utjecaj temperature na veličinu energetskog pojasa opisana je Varshnijevom jednadžbom (6):

$$E_g = E_{g0} - \frac{AT^2}{B+T} \quad (6)$$

Vidimo da je napon praga indirektno ovisan o temperaturi, pošto je energetski pojas ovisan o temperaturi. E_{g0} je napon razmaka među pojasevima pri temperaturi od 0K, a A i B su specifične konstante materijala.



Slika 13: Odnos napona energetskog razmaka u ovisnosti o temperaturi

Na slici 13 vidljivo je napon energetskog razmaka pada sa porastom temperature kod prikazanih materijala. Dakle, porastom temperature, smanjuje se napon praga, i dioda postaje vodljiva pri manjem naponu.

2.6 Efikasnost svjetleće diode

Kod idealne svjetleće diode u aktivnom području za svaki rekombinirani elektron emitiran je jedan foton. U praksi aktivno područje diode ima jedinicu unutrašnje količinske efikasnosti dane omjerom

$$\eta_{int} = \frac{\text{broj emitirani h fotona u sekundi}}{\text{broj rekombinirani h elektrona u sekundi}} = \frac{P_{int}/(hv)}{I/e} \quad (7)$$

gdje je P_{int} optička snaga emitirana sa aktivnog sloja diode.

Što se tiče emitiranja fotona u prostor, kod idealne svjetleće diode svi fotoni se emitiraju u slobodni prostor. U praksi, dio fotona se može reflektirati natrag u diodu, zbog mehaničke nesavršenosti, odnosno foton se apsorbira. Iz ovog razloga postoji koeficijent efikasnosti emitiranja. Efikasnost emitiranja fotona dana je formulom (8):

$$\eta_{extra\ ction} = \frac{\text{broj emitirani h fotona uprostor po sekundi}}{\text{broj emitirana fotona u sekundi}} = \frac{P/(hv)}{P_{int}/(hv)} \quad (8)$$

Vanjska efikasnost ograničavajući je faktor za postizanje visokih performansi svjetleće diode. Postizanje visokog stupnja vanjske ekstrakcije vrlo je skup i kompliciran proces.

$$\eta_{ext} = \frac{\text{broj emitirani h fotona uprostor po sekundi}}{\text{broj rekombinirani h elektrona u sekun di}} = \frac{P/(hv)}{I/e} = \eta_{int} * \eta_{extraction} \quad (9)$$

Vanjska efikasnost faktor je koji nam prikazuje odnos korisne svjetlosti i broja emitiranih elektrona.

2.7 Prednosti uporabe LED

LED kao izvor svjetlosti zamjenjuje tradicionalne i fluorescentne izvore svjetlosti koji emitiraju bijelu i obojenu svjetlost. Efikasnost LED izvora iznosi i do 80 lm/W. Velika prednost ovakvih izvora svjetlosti je dug radni vijek te njihova jednostavna, i mehanički čvrsta konstrukcija. Neke od značajnijih prednosti svjetlećih dioda su:

- Emisija željene boje svjetlosti bez potrebe za filterom, što pojednostavljuje i pojeftinjuje instalaciju
- Nema potrebe za ugradnjom posebnih reflektora, kako bi se dobila usmjerena svjetlost
- Čvrsta konstrukcija otporna na mehaničke udarce: izuzetna izdržljivost od fizičkih opterećenja i udaraca
- Veliki radni vijek: 10 godina ili 100000 radnih sati, mnogo duže od tradicionalnih i fluorescentnih izvora svjetlosti
- LED je vodootporan i otporan na niske temperature

- Manja potrošnja: zbog vrlo malih gubitaka zbog zagrijavanja, LED u odnosu na druge izvore svjetlosti, ovisno o primjeni i načinu primjene, potrošnja električne energije može biti i do 80% manja.
- Zračenje: kod LED primijenjenih u rasvjeti nema ultraljubičastih zračenja niti toplinske disipacije kao kod tradicionalnih izvora svjetlosti.
- Napajanje: LED ima relativno niski napon napajanja, 12/24 V istosmjerne struje. Zahvaljujući maloj potrošnji i niskom naponu moguće je napajanje neovisno o električnoj mreži, i također nema promjena u intenzitetu isijavanja uslijed ritma mrežne frekvencije kao kod klasičnih izvora svjetlosti.
- Održavanje: troškovi održavanja LED su minimalni, gotovo nepostojeći, zbog minimalnog zamora materijala
- Dimenzije: u odnosu na tradicionalne izvore svjetlosti, dimenzije LED su osjetno manje i jednostavno ih je prilagoditi traženoj primjeni

2.8 Nedostaci uporabe LED

Jedan od nedostataka LED je njihova cijena zbog prateće elektroničke opreme, i zbog toga je još uvijek skupa za prosječnog kupca. Drugi nedostaci upotrebe dioda su:

- Radne karakteristike svjetleće diode uvelike ovise o temperaturi radne okoline, pa kod velikih temperatura lako može doći do pregrijavanja, a time i do oštećenja. Potrebno je odgovarajuće hlađenje, kako bi se osigurao dug životni vijek i pouzdan rad LED.
- Visoke vrijednosti radnih karakteristika mogu izazvati pojavu difuzije atoma, kod nekih materijala korištenih u elektrodama, u ostale dijelove LED. Indij i srebro posebice izazivaju ovakvu pojavu, pa na katodi dolazi do električnih proboja.
- Kvaliteta svjetlosti: većina dioda koje emitiraju bijelu svjetlost imaju spektar zračenja koji se uvelike razlikuje od tradicionalne rasvjete. Zbog toga je moguće da objekti osvijetljeni LED budu doživljeni drugačije nego kod tradicionalne rasvjete ili sunčeve svjetlosti. U odnosu na fluorescentnu rasvjetu, fluorescentna rasvjeta je inferiornija po ovom pitanju, od modernih LED.

- Polaritet: LED će raditi samo u slučaju pravilne polarizacije, pa kako bi se osigurala automatska polarizacija dioda, moguća je upotreba ispravljača.

2.9 Primjene LED

Dugi period vremena, svjetleće diode su bile jeftini uređaji niske emisije svjetlosti jedne boje i male snage, prikladne za primjenu kod indikatora, manjih znakova ili za slanje podataka. Pojavom visokosjajnih žutih i crvenih dioda i razvojem plave i zelene InGaN diode, pokriven je cijeli spektar boja čime se otvorilo novo široko područje primjene. Danas, svjetleće diode mogu se vidjeti na svakom koraku u jednobojnim i višebojnim znakovima, reklamama i video panelima. Jedan od najvećih panela visoke rezolucije ovog tipa je vanjski panel na NASDAQ zgradi u New Yorku, koji koristi 18 milijuna dioda. Druge primjene LED dioda su:

- LCD(*engl.liquidcrystaldisplay*) pozadinsko osvjetljenje- rastuće tržište mobilnih uređaja također je otvorilo nove mogućnosti za korištenje svjetlećih dioda. LED se koristi za osvjetljenje LCD zaslona i tipkovnice uređaja. 2000. godine prodano je otprilike 400 miliona mobilnih uređaja širom svijeta koji sadržavaju otprilike 10 dioda po uređaju. LED je ovdje našao primjenu ponajviše zbog male veličine i potrošnje energije, što pogoduje produljenju trajanja baterije uređaja.
- Semafori- tipičan primjer za primjenu LED, gdje one kao izvor monokromatske svjetlosti stoje rame uz rame sa tradicionalnim izvorima svjetlosti. Razlog za uporabu LED u ove svrhe je ušteda energije i veći radni vijek.
- Automobilska industrija: LED se koristi za osvjetljenje unutrašnjosti automobila, kao i za vanjsku rasvjetu. U unutrašnjosti, osim za osvjetljenje kontrolne table i kabine, LED se koristi i kod osvjetljenja zaslona navigacijskih uređaja. U prosjeku, broj ugrađenih LED u automobil može doseći broj od par stotina jedinica. Što se tiče vanjske primjene kod automobila, uvelike se koristi kod centralnog stop svjetala, a danas sve češće i kod standardnih stop svjetala. U odnosu na klasične rasvjetne sustave korištene u ove svrhe, LED se brže pali kod pritiska kočnice, i također su manjih dimenzija i pouzdanije.

3. Uporaba LED u komunikacijskim sustavima

U optičkim komunikacijskim sustavima, kao izvori svjetlosti koriste se LED i poluvodički laseri. Kod komunikacije na kratke udaljenosti, LED je zadovoljavajući izbor. U odnosu na poluvodičke lasere, LED su jeftinije, jednostavnije za uporabu i dugotrajnije. No one imaju i svoje velike nedostatke. Iako se čini da je svjetlost emitirana iz svjetleće diode čista, to jest, visoke rezolucije, ona se sastoji od raspona valnih duljina. Razne valne duljine emitirane u jednom pulsu svjetlosti do prijemnika će doći u različita vremena, i time uzrokovati disperziju svjetlosnog pulsa. Ova činjenica nije važna kod malih brzina prijenosa podataka, ali je kritična kod komunikacije na velike udaljenosti.

Optički komunikacijski sustav dizajnira se od slijedećih ključnih komponenti:

- Računalu, izvor podataka
- Predajnik
- Medij
- Prijemnik
- Računalu, primatelj podataka



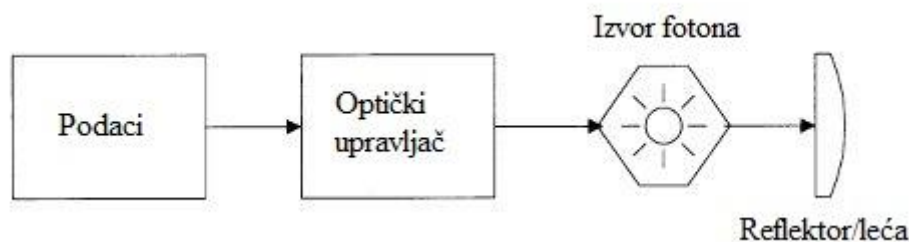
Slika 14: Pojednostavljeni bežični komunikacijski sustav

Računalu šalje podatke u transmitter koji električni signal pretvara u optički signal. Signal se medijem (zrak, voda, optički kabel) prenosi do prijemnika. Prijemnik svjetlosni signal obrađuje u električni signal i šalje na računalo koje prima podatke. Više je načina prijenosa podataka putem svjetlosnog signala. Najjednostavniji način je zasigurno OOK (*engl.* on-offkeying) metoda. Princip rada ove metode je slijedeći: kada izvor svjetlosti emitira svjetlost, on predstavlja binarnu jedinicu, a kada ne emitira svjetlost predstavlja binarnu

nulu. Predajnik mora biti u stanju čitati binarne podatke, te sukladno brzo i precizno mijenjati stanje optičkog izvora svjetlosti. Prijemnik koristi fotodetektor za obradu svjetlosnih signala koje tada analogno pretvara u binarne jedinice i nule. Brzina i pouzdanost sistema određena je frekvencijom optičkog izvora svjetlosti (predajnika), te kojom brzinom i točnošću predajnik može odrediti status svjetlosnog izvora. Svaku od komponenti opisati ću u slijedećem poglavlju.

3.1 Optički predajnik

Optički predajnik pretvara električni signal u optički, te šalje optički signal u transmisijski signal. Sastoji se od izvora fotona, koji se ponaša kao elektro-optički pretvarač, ali kao i pomoćni sustav potreban za upravljanje i nadzor izvora fotona. Standardni optički predajnik također se sastoji od ulaznog signala, optički upravljač i dodatnog reflektora ili leće, po potrebi.



Slika 15: Principijelna shema predajnika

Kod dizajniranja optičkog transmitera, prvi korak je odabir izvora svjetlosti, pošto se ostatak dizajna predajnika temelji na tipu izvora. Kod odabira prikladnog izvora svjetlosti u obzir treba uzeti namjenu samog sustava. Izvor fotona može biti bilo koji tradicionalni izvor svjetlosti, no ograničenja optičkog sustava, poput veličine, snage, i frekvencija paljenja i gašenja izvora, izbor su suzila na LED i laserske diode. Kod izbora svjetlosnog izvora u obzir treba uzeti parametre prikazane u tablici 4:

Parametar	LED	Laserska dioda
Širina optičkog spektra	25-100 nm	0,1-5 nm
Modulacijski raspon	<200 MHz	>1 Ghz
Minimalna divergencija izlazne zrake	Široka (oko 0,5°)	Uska (oko 0,01°)
Ovisnost o temperaturi	Niska	Visoka
Zahtjev za posebnim sklopovljem	Ne	Da
Cijena	Niska	Visoka
Radni vijek	Dug	Srednji
Pouzdanost	Visoka	Srednja
Opasnost za vid	Ne	Da

Tablica 4: Usporedba LED i laserske diode^[7]

Kao što je vidljivo iz tablice, LED i laserske diode imaju svoje prednosti i nedostatke. Laserske diode imaju bržu radnu frekvenciju i višu izlaznu snagu, dok su LED jeftinije, jednostavnije i pouzdanije.

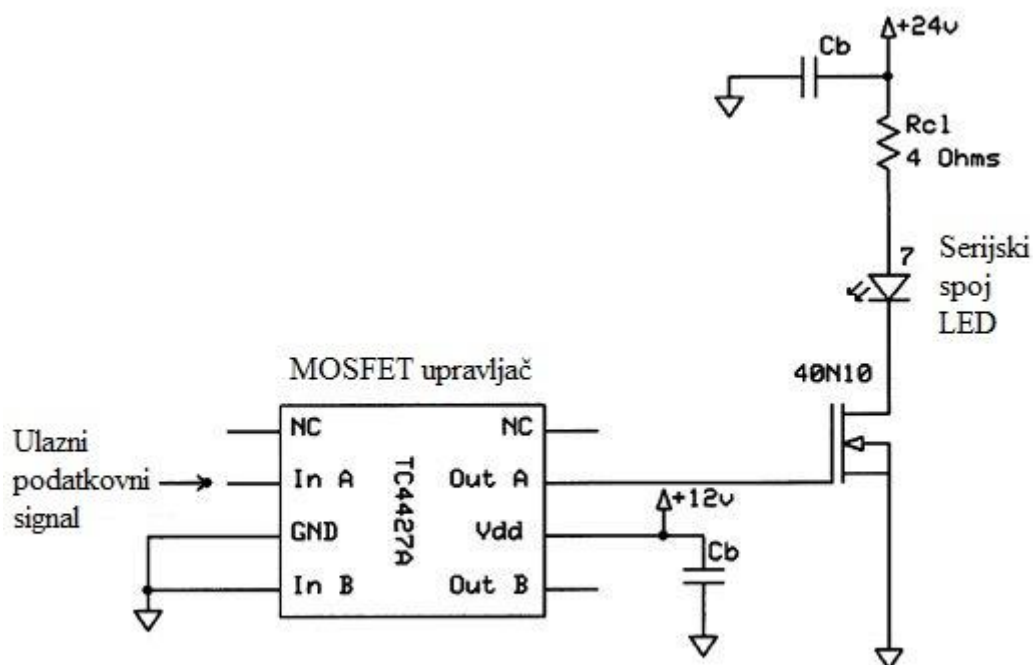
3.1.1 LED optički upravljač

Nakon odabira svjetlosti, važno je odabrati način modulacije svjetlosti u skladu s binarnim podacima. Intenzitet izlazne svjetlosti LED proporcionalan je struji diode, pa bi konstantni komutator struje napajanja bio idealan za maksimiziranje efikasnosti. Relativno ih je komplicirano dizajnirati. Iako postoje komercijalno dostupni strujno konstantni upravljači LED, oni su dizajnirani za spore brzine paljenja/gašenja, pa nisu prikladni za optičke komunikacijske sustave.

Drugi način upravljanja LED izvorima svjetlosti je davanje konstantnog napona i limitiranje struje diode putem otpornika. U ovom slučaju, tranzistor se može koristiti za kontrolu protoka struje kroz LED. MOSFET najbolje odgovara ovoj svrsi. Dok nema razlike potencijala između gate-a i izvora, postoji vrlo visok otpor između draina i izvora, pa kroz MOSFET protječe minimalna struja- MOSFET je ugašen. Ako na gate dovedemo napon, smanjuje se napon i MOSFET se „pali“. U odnosu na bipolarnu tranzistore, MOSFET je

prikladniji ovoj primjeni zbog manjeg pada napona mogu podnijeti veće struje. U odnosu na JFET tranzistore MOSFET ima mnogo veću ulaznu impedanciju gatea, što pogoduje računalima ili integriranim strujnim krugovima koji šalju podatke, koji nemaju visoku izlaznu struju.

Osim visoke impedancije gatea, postoji i kapacitet gatea. Što je viši kapacitet, potrebna je viša struja za nabijanje gatea, prije promjene napona, što znači da kapacitet direktno utječe na brzinu komutacije MOSFET tranzistora. U slučaju kada MOSFET mora komutirati velika opterećenja velikom brzinom, često se koristi MOSFET upravljač koji preuzima podatkovni signal i u mogućnosti je izdvojiti znatno više struje na gate MOSFETA. Primjer predajnika sa MOSFET upravljačem prikazan je na slijedećoj slici:



Slika 16: Predajnik sa MOSFET upravljačem

Ulazni podatkovni signal napona 0 i 5 V ulazi u MOSFET upravljač koji regulira gate MOSFETA. Kada je MOSFET uključen, struja protječe kroz LED i one emitiraju fotone.

3.1.2 Podatkovni signal

Nakon dizajniranja predajnika, potrebno je osigurati način prijenosa podataka od računala do upravljača u određenim iznosima napona. 0 V predstavlja binarnu nulu, a +5 V predstavlja binarnu jedinicu. Korišteni komunikacijski protokol (rukovanje, inicijalizacijski paketi i sl.) nije važan, pošto podaci samo prolaze kroz optički predajnik, i vraćaju se u binarni podatak u prijemniku. Jedini problem je moduliranje podataka u zadane naponske veličine. USB (*engl.* Universal Serial Bus) komunikacijski port može podnijeti potrebnu brzinu prijenosa podataka i prisutan je na svim modernim računalima, pa je jedan od prikladnih izbora za prijenos podataka. Protokol prijenosa podataka, kao što je već spomenuto nije bitan, no naponske razine kojima USB prenosi binarne nule i jedinice. USB je kabel sa upletenom paricom. Binarna jedinica se prenosi kada je napon D+ linije 200mV veći od D- linije, a binarna nula se prenosi kada je napon D+ linije 200 mV manji od D- linije. Stoga je potrebno korištenje konvertera da bi se dobile naponske razine prikladne MOSFET pretvaraču.



Slika 17: USB kabel sa ugrađenim pretvaračem

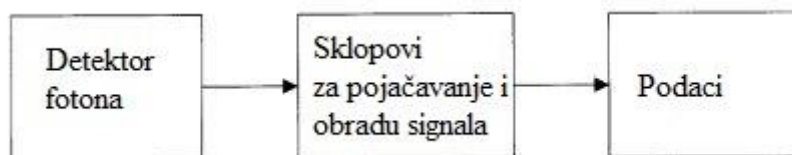
Slika 17 prikazuje FT232R USB kabel, koji unutar USB konektora ima FT2325Q sklop, čija je svrha USB podatke pretvoriti u asinkrone podatke prikladne za MOSFET pretvarač.

3.2 Optički prijemnik

Optički prijemnik detektira fotone i pretvara ih u električni signal. Sastoji se od:

- Detektora fotona
- Sklopova za pojačavanje i procesiranje signala

Kako i predajnik ima optičku komponentu, tako ima i prijemnik. Detektor fotona uvjetuje dizajn ostatka sustava prijemnika, a koristi se za pretvaranje optičke ulazne vrijednosti u korisni električni signal. Sklopovi za procesiranje i pojačavanje signala koriste se za modulaciju električnog signala na željene naponske razine. Slika 18 prikazuje principijelnu shemu predajnika:



Slika 18: Principijelna shema prijemnika

3.2.1 Detektor fotona

Postoji više različitih opto-elektroničkih uređaja koji se mogu koristiti kao detektori fotona. Idealni uređaj je fotodetektor, koji ima brzi odziv detekcije fotona odaslanih iz predajnika, bez dodavanja dodatnih smetnji i šumova. Njegove odlike su male dimenzije, robusnost i energetska učinkovitost. Kod optičkih komunikacija najvažnije odlike ovakvih sklopova su brzina komutacije te svjetlosna osjetljivost. Važniji uvjeti za odabir detektora fotona su snaga i veličina. Neki od korištenih detektora fotona su:

- fotootpornik
- fototiristor
- fototranzistor
- fotomultiplikator
- p-n fotodioda
- lavinskafotodioda

Fotootpornici su elektroničke komponente ovisne o svjetlu, a vodljivost im se mijenja kada su izložene elektromagnetskoj radijaciji, kao što je vidljivo svjetlo. Fotootpornici imaju visok otpor, reda veličine mega ohma. kada ne detektiraju svjetlost. Kada ih se izloži svjetlosti, otpor im se linearno smanjuje do par stotina ohma. Iako imaju visoku osjetljivost na svjetlost, mana im je spor odziv. Njihovo vrijeme odziva je tipično jedna milisekunda, a nakon što prestanu detektirati svjetlo može proći i do dvije sekunde dok se ne vrata u nevodljivo stanje. Stoga ovi detektori fotona nisu prikladni kod brzina komutacije iznad 1 MHz.



Slika 19: Simbol i primjer fotootpornika

Fototiristor još je jedan primjer opto-električkog detektora. Sastoji se od tiristora koji je fotoosjetljiv. Kao i diode, tiristori struji propuštaju kada im je napon anode veći od katode. Putem gatea oni kontroliraju dali tiristor provodi struju. Gate mora biti napajan pozitivnim naponom i prikladnom strujom prije nego tiristor postane vodljiv. Nakon što tiristor postane vodljiv, gate više ne utječe na njegov rad. Drugim riječima, prekinemo li dovod svjetla, tiristor će i dalje voditi struju. Prekidanje dovodne struje, ili dovođenje pozitivnog napona na katodu tiristora, jedini je način za gašenje fototiristira. Iz ovog razloga, nisu pogodni za korištenje u optičkim komunikacijama.

Fototranzistori su poput bipolarnih i FET tranzistora, no samo njihova baza (kod bipolarnih), odnosno gate (kod FET) se izlaže svjetlosti. Kada foton osvjetli bazu ili gate, inducira se struja (bipolarni tranzistor), odnosno napon (FET) i tranzistor se pali. Dok je fototranzistor u mraku, vrlo malo struje teče kroz tranzistor. Fototranzistori su vrlo osjetljivi na svjetlost, na mana im je relativno spora brzina komutacije.

Fotomultiplikatrone cijevi su vakuumske tube koje imaju visoku osjetljivost na svjetlost. Sastoji se od fotokatode, više dinoda i anode. Kada fotokatoda detektira svjetlost izbijaju elektroni. Nastali elektroni množe se u multiplikatoru elektroni do više milijuna puta. Ovakvi detektori fotona dobri su za detektiranje svjetlosti niskog intenziteta, pošto su u

možnosti detektirati i samo jedan foton. Zbog visoke osjetljivosti često detektiraju i svjetlost okoline. Visoko osjetljivi fotomultiplikatori su lomljivi i osjetljivi na okolna elektromagnetska polja. Iako imaju odziv manji od nanosekunde, njihova cijena, snaga i potrošnja čine ih neprivlačnima kod većine optičkih komunikacijskih sustava.



Slika 20: Primjer fotomultiplikatora^[8]

P-n fotodiode, kao i ostali detektori fotona, pretvaraju svjetlost u električnu energiju. Kada fotodiode detektira svjetlost, ona postaje izvor struje koja struju vodi od katode do anode. Svaki foton dolaznog svijetla može pobuditi najviše jedan elektron, pa su ovakvi sklopovi nevjerovatno linearni. Fotodiode su malene, jednostavne i cijenom pristupačne, ali su manje osjetljive na svjetlost od fotomultiplikatora. Lavinskefotodiode su vrlo slične p-n fotodiodama, no one mogu pobuditi više elektrona sa jednim fotonom. One imaju višu osjetljivost na svjetlost od običnih p-n fotodioda, ali time i višu prisutnost šumova i smetnji. Također, lavinske diode su nelinearne komponente, pa su potrebni dodatni sklopovi što povisuje cijenu i smanjuje pouzdanost sklopa.

Kod odabira tipa detektora fotona potrebno je u obzir uzeti mnogo faktora. Slijedeća tablica prikazuje pregled detektora fotona:

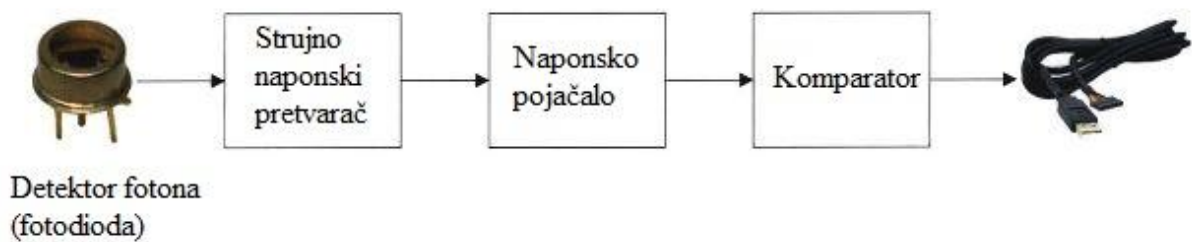
Detektor fotona	Brzina	Linearnost	Rad kod smetnji okolnog prostora	Dimenzije
Fotootpornik	<1Hz	Mala područja	Vrlo dobar	Male
Fototranzistor	<250KHz	Dobre	Izvrstan	Male
P-n fotodioda	10 MHz/GHz	Izvrсна	Vrlodobar	Male
Lavinskafotodioda	100 MHz/GHz	Nelinearna	Zadovoljavajuć	Male
Fotomultiplikator	>1GHz	Dobra	Loš	Velike

Tablica 5: Usporedba detektora fotona

Ovisno o zahtjevima optičkog komunikacijskog sustava potrebno je dobro promisliti prije odabira detektora. Iako su fotomultiplikatori brzi i visoko osjetljivi na svjetlost, skupi su i zahtijevaju veliku količinu energije. Odaberemo li za naš sustav klasičnu p-n fotodiodu, u obzir je potrebno uzeti dodatne faktore kao što su učinkovitost, brzina prijenosa podataka te svjetlosna osjetljivost. Široki je raspon proizvođača i radnih karakteristika fotodioda, pa kod odabira fotodiode treba uzeti što više aspekata u obzir.

3.2.2 Obrada signala

Po odabiru detektora fotona potrebno je dizajnirati elektroničke sklopove za održavanje i procesiranje strujnog signala fotodiode. Prvo je potrebno strujni signal pretvoriti u naponski, i tada pojačati i prilagoditi traženim naponskim razinama.

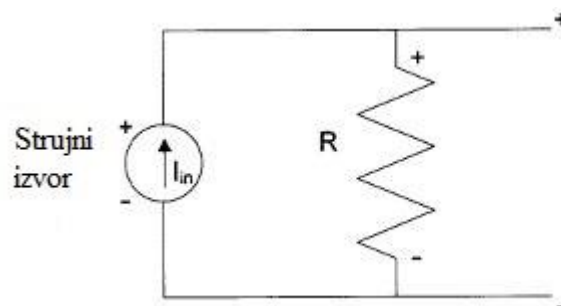


Slika 21: Primjer prijemnika

Većina elektroničkih uređaja radi na principu promjene napona, pa je strujni signal diode potrebno pretvoriti u naponski signal. Ova pretvorba može se vršiti na više načina načine:

- Pasivni strujno naponski pretvarač
- Transimpedantno pojačalo

Pasivni strujno naponski pretvarač radi na principu Ohmovog zakona. Paralelno strujnom izvoru spojen je otpornik koji uzrokuje pad napona. Pad napona proporcionalan je struji i skaliran vrijednošću otpora, pa stoga uspješno strujni signal pretvara u proporcionalni naponski signal.



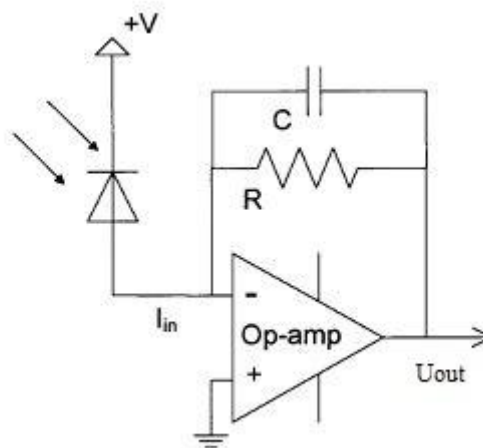
Slika 22: Shema osnovnog pasivnog strujno naponskog pretvarača

U praksi se ovo rješenje ne susreće često, jer ovakav pretvarač pretpostavlja da je na njegovom izlazu spojen teret beskonačnog otpora. Kako je postizanje beskonačnog otpora nemoguće, dio struje će uvijek teći kroz teret. Zbog toga je struja koja protječe kroz otpornik smanjena, a time su smanjeni i padovi napona. Dodatni problemi javljaju se ako je vrijednost otpornika previsoka, javlja se velika struja zasićenja, i tada može doći do zasićenja fotodiode, a tada fotodioda neće detektirati moduliranog signala. Do zasićenja dolazi kada je napon na fotiodi sličan padovima napona na otporniku. Prevelika vrijednost otpora otpornika također

usporava odziv, zbog kapaciteta fotodiode. Odziv je proporcionalan umnošku otpora i kapaciteta fotodiode.

$$t = R * C_p$$

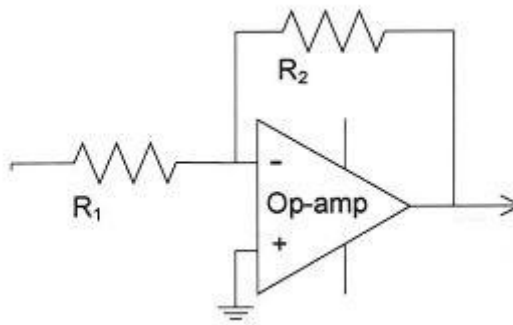
Poboljšana verzija strujno naponskog ispravljača je transimpedancijsko pojačalo koje se sastoji od otpornika i operacijskog pojačala. Po potrebi spaja se kondenzator u paralelu sa pojačalom. Na ovaj način fotodiode je uzemljena, pa se rješava problem kapaciteta fotodiode i dobiva se puno brže vrijeme odziva.



Slika 23: Transimpedantno pojačalo

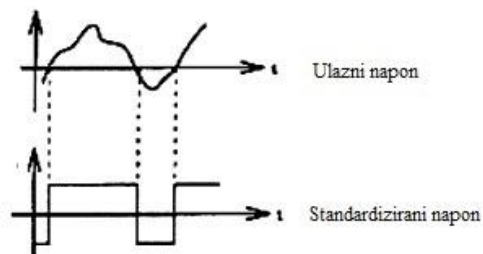
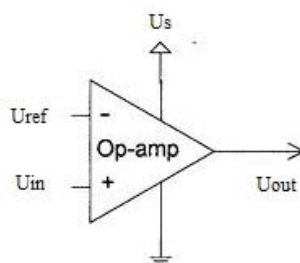
Vrijednost otpora R utječe na izlazni napon, dok se kondenzator C koristi za stabilizaciju strujnog kruga. Idealna vrijednost kondenzatora ovisi o primjeni. Kod odabira komponenti za transimpedantno pojačalo, treba paziti da izlazne vrijednosti poput brzine prijenosa podataka budu visoke.

Nakon odabira pretvarača, slijedi dodavanje naponskog pojačala u strujni krug. Naponsko pojačalo koristi se za pretvaranje negativnog naponskog signala u pozitivni i pojačavanje istog signala, tako da se mogu detektirati i skroz mali signali. Tipično invertirano naponsko pojačalo pokazano je na slici 24.



Slika 24: Inverzno naponsko pojačalo

Zadnja komponenta prijemnika je komparator. Njegov zadatak je pretvaranje naponskih signala na prihvatljive naponske razine- 0 i +5V. Komparator uzima dva naponska signala, uspoređuje ih i govori koji napon ima veću naponsku vrijednost. Ako je ulazni signal veći od referentnog signala, povećava se izlaz komparatora, a ako je ulazni signal manji od referentne vrijednosti, smanjuje se izlaz. Komparator se često gradi na bazi operacijskog pojačala.



Slika 25: Primjer komparatora i krivulje napona

Slika 25. prikazuje jednostavan komparator i krivulje ulaznog napona, i standardiziranog, referentnog napona.

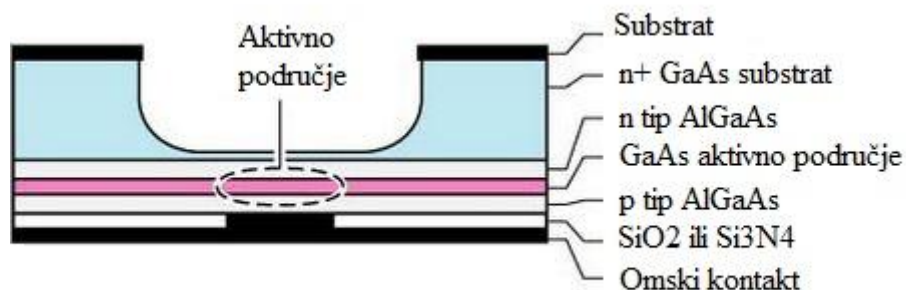
3.3 Vrste LED korištenih u optičkim komunikacijskim sustavima

U optičkim komunikacijskim sustavima najčešće se koriste slijedeće svjetleće diode:

- Burrus LED
- GaInPAs/InP LED
- AlGaInP/GaAs LED
- RCLED

3.3.1 Burrus LED

Kod svjetlećih dioda ovog tipa, aktivno područje ograničeno je na malo kružno područje promjera između 20 i 50 μm . Dioda ovog tipa prikazana je na slici 26:

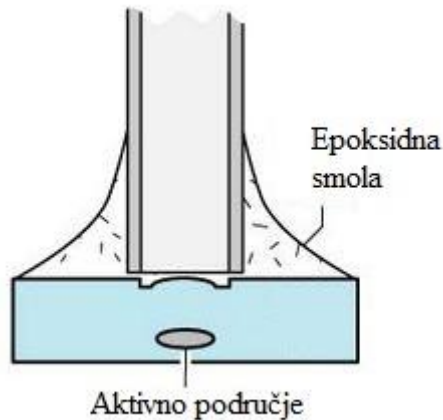


Slika 26: Burrus LED^[9]

Optički kabel spaja se u udubinu i cijeli spoj prekriva se epoksidnom smolom. Koriste se za komunikacijske sisteme brzine prijenosa podataka do 250 Mb/s. Korištenjem GaAs i AlGaAs poluvodičkih materijala postižu se valne duljine od 850nm.

3.3.2 GaInPAs/InP LED

Korištenjem GaInPAs i InP poluvodičkih materijala za izradu svjetlećih dioda postižu se valne duljine od 1300 nm i 1550 nm. Aktivno područje izrađeno od GaInPAs ovakve diode je svega 20 μm .

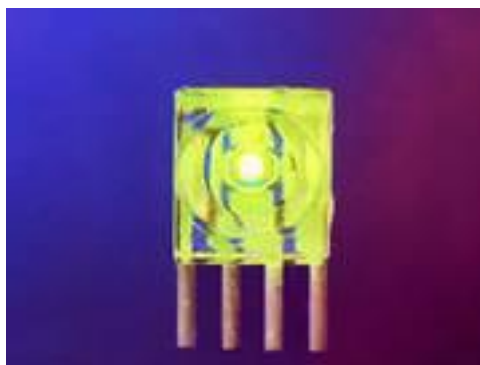


Slika 27: GaInPAs/InP LED^[10]

3.3.3 AlGaInP/GaAs LED i RCLED

LED napravljene od AlGaInP/GaAs poluvodičkih materijala emitiraju svjetlost valne duljine 650 nm. Svjetleće diode ove vrste koriste se u komunikacijskim sustavima sa plastičnim optičkim kabelima. Svjetlost se emitira iz centra aktivne regije kako bi se ostvarila nesmetana emisija svjetlosti zbog kontakata na vrhu diode.

RCLED dioda napravljena je od GaInP/AlGaInP poluvodičkih materijala. Svjetlost emitirana iz ovakve diode je valne duljine 650 nm. Na vrhu ovakve diode nalaze se dva Bragg reflektora i tvore šupljinu ove diode. Ovim svjetlećim diodama postižu se brzine prijenosa podataka do 205 Mb/s.



Slika 28: RCLED

4. Bežični prijenos podataka uporabom infracrvene LED (IrDA)

Infracrvena komunikacija je čest, jeftin i jednostavan način prijenosa podataka. Kako je infracrvena svjetlost nevidljiva ljudskom oku, pogodna je za bežičnu komunikaciju. Prijenos podataka infracrvenom svjetlosti moguć je na kratke udaljenosti, uz uvjet da je osigurana optička vidljivost uređaja koji komuniciraju (nema zapreka). Nekada vrlo popularan način prijenosa podataka, danas je relativno zastario u odnosu na druge tehnologije, zbog malog dometa i spore brzine prijenosa podataka.

Kako bi se osigurala kompatibilnost uređaja u komunikaciji razvijen je skup standarda od strane IrDA (*engl.* Infrared Data Association) udruženja.

4.1 IrDA

IrDA je skup standarda kojem je zadatak osigurati kompatibilnost uređaja različitih proizvođača, te da definiše minimalne performanse uređaja. Ovim protokolima definiše se široki aspekt karakteristika infracrvene zrake, valne duljine, snage, kut zrake i mnoge druge. IrDA se koristi kod računala, printera, mobilnih uređaja, tipkovnica, digitalnih kamera, igračaka, i mnogih drugih uređaja.

IrDA koristi infracrvenu svjetlost valne duljine između 850 i 900 nm. Ista valna duljina koristi se i kod daljinskih uređaja, bežičnih slušalica, nadzornih kamera i uređaja za daljinsko otključavanje automobila. Razlog tome je što su LED i detektori fotona koji rade na

ovoj valnoj duljini jeftini i široko dostupni. IrDA uređaji komuniciraju emitiranjem moduliranih svjetlosnih impulsa velikom frekvencijom. Kako bi se osigurala kompatibilnost uređaja, IrDA propisuje minimalne i maksimalne razine snage, širine svjetlosnih impulse, te mehaničke karakteristike optičkih komponenti kako bi se osigurao predvidljivi radni domet, od otprilike jednog metra. IrDA je standard jednosmjernе komunikacije (half-duplex) što znači da uređaj ili emitira, ili prima podatke. Dvosmjernu komunikaciju bilo bi vrlo teško implementirati u optičkoj komunikaciji gdje bi se slabi dolazni svjetlosni signal mogao uništiti reflektiranom svijetlošću koju uređaj u isto vrijeme emitira. Standardizirani IrDA uređaji dostupni su od velikog broja proizvođača. Takvi uređaji sastoje se od LED, detektora fotona i optičkog upravljača, pod uvjetom da su usklađene naponske razine.

IrDA standard u grubo se dijeli u dvije glavne skupine protokola: IrDA Data i IrDAControl (Irda-C). IrDA Data protokoli koriste se za definiranje načina komunikacije dva uređaja koji razmjenjuju podatke. IrDAControl protokoli koriste se ponajviše kod računalnih bežičnih perifernih uređaja poput tipkovnica i miševa. Ova dva protokola nisu kompatibilna. Razlike ova dva protokola prikazane su u slijedećoj tablici:

	IrDA Data	IrDA Control
Brzina prijenosa podataka	SIR-Asinkrono, 9600-115200 bps FIR- Sinkrono, do 4 Mb/s VFIR- Sinkrono, do 16 Mb/s	75 kbps/ broj uređaja
Svojstva	Dvosmjerna (ne istovremena) komunikacija pri raznim brzinama prijenosa podataka, korekcija pogrešaka, automatsko otkrivanje uređaja u dometu	Omogućava uređaju komunikaciju sa 8 perifernih uređaja istovremeno, brz odziv te nisku latenciju
Modulacija signala	SIR, FIR- Kratki impuls za binarnu Nulu VFIR- „jedna od četiri“ pozicije pulsa po ulaznom paru bitova	16 pulsni niz pomnožen sa pomoćnim signalom od 1.5 MHz

Korišteni protokoli	PHY, IrLAP, IrLMP, TinyTP, IrCOMM, IrOBEX, IrTran-P, IrMC, IrLAN	PHY, MAC, LLC
Primjena	Računala , mobilni uređaji, dlanovnici, kamere, igračke	Periferni uređaji za računala ili televizije

Tablica 6: IrDA Data i Irda-C usporedba

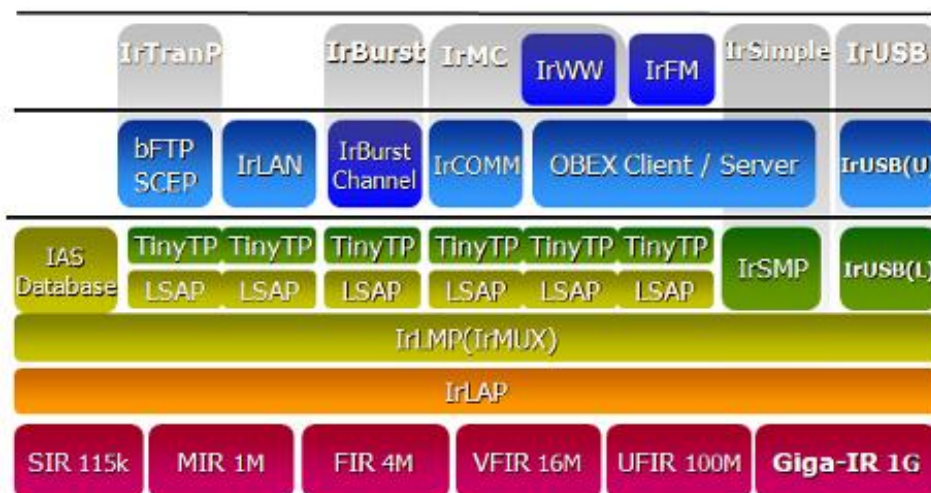
4.1.1 IrDAControl

IrDA-C koristi tri jednostavna protokola. Korištena modulacijska tehnika pretvara podatkovne blokove od četiri bita u osam simbola korištenjem „dva od osam“ ili „četiri od osam“ koda. Signali se tada moduliraju sa valom nosiocem frekvencije 1,5 MHz i šalju u LED što sve skupa daje brzinu prijenosa podataka od 75 Kb/s. Ova modulacijska tehnika razvijena je kako bi se smanjile smetnje sa drugim sistemima koji rade na frekvenciji od 40 KHz.

IrDA Data skup protokola je prikladniji za prijenos podataka pa ću njega detaljnije objasniti u ovom radu.

4.1.2 IrDA Data

IrDA Data protokol sadrži puno više protokola od IrDAControl protokola, iz razloga što mora osigurati razne tipove komunikacije kao što su „Point to point“ komunikacija, prijenos datoteka i pristup lokalnoj mreži. Slijedeća slika prikazuje sve protokole IrDA Data:



Slika 29: IrDA Data

4.1.2.1 IrPHY obavezni protokol

IrPHY^[11] (*engl. Infrared Physical Layer Specification*) protokol specificira karakteristike podataka emitiranih putem fizičkog medija- zraka. Kako je infracrveno svjetlo u zraku podložno smetnjama, moguće je da u IrPHY dođe do korupcije podataka. Svaka pogreška ispravlja se u višim protokolima. IrPHY definira slijedeće parametre:

- Fizički parametri
- Format znakova
- Format okvira
- Brzinemodulacije simbola

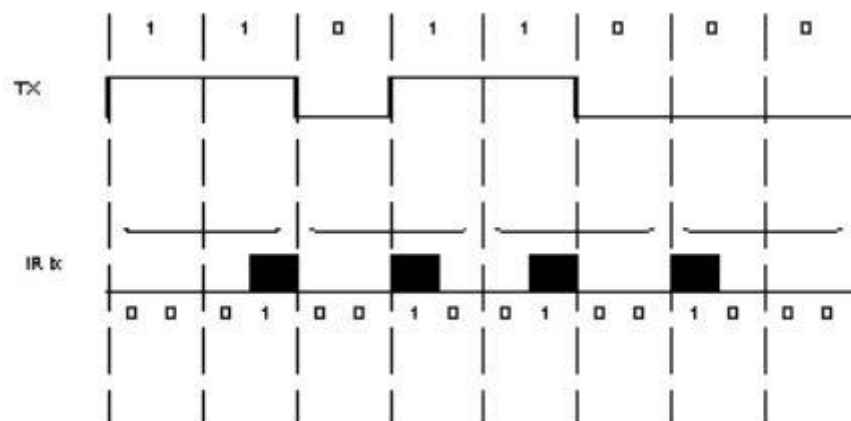
Kako bi uređaj zadovolji IrPHY protokol mora zadovoljiti slijedeće uvjete: valna duljina infracrvene svjetlosti mora biti što bliža 880 nm, sa uzorkom zračenja koji pokriva kut od 30° na udaljenosti od jednog metra od uređaja.

Blokovi podataka, koji se sastoje od osam bitova, uokviruju se tako da se svaki IrPHY znak sastoji od: početnog bita (0), bloka podataka, i završnog bita (1).

Brzinemodulacije simbola koje propisuje IrPHY protokol su:

- Serial Infrared (SIR) - 9,6-115,2 kbit/s
- Medium Infrared (MIR) - 0,576-1,152 Mbit/s
- Fast Infrared (FIR) - 4 Mbit/s
- Veryfast Infrared (VFIR) - 16 Mbit/s
- Ultrafast Infrared (UFIR) - 96- Mbit/s
- GigaIR - 512 Mbit/s - 1 Gbit/s

SIR asinkroni format simbole počinje modulirati najsporijom mogućom brzinom, i nakon početka slanja program ispituje do koje brzine može ići. Binarna nula modulira se kao skup kratkih simbola, a binarna jedinica ne generira izlaznu vrijednost. FIR sinkroni format dva podatkovna bita kodira na blok od 4 simbola. Takav blok radi na principu jedan od četiri, gdje se uspoređuje pozicija jednog simbola u odnosu na ulazne bitove. Ovim načinom emitiranje svjetlosti LED je 25% od emitiranja običnog bita.



Slika 30: FIR sinkrono kodiranje

4.1.2.2 IrLAP obavezni protokol

IrLAP^[12] (engl. Infrared Link Access Protocol) drugi je obavezni protokol i on osigurava funkcionalna i proceduralna sredstva za prijenos podataka između dva komunikacijska uređaja. Njegove osnovne zadaće su:

- Kontrola pristupa
- Otkrivanje potencijalnih uređaja za komunikaciju

- Ostvarivanje pouzdane dvosmjerne veze
- Dodjeljivanje uloga uređajima (primarna/sekundarna)
- Dogovaranje QoS (*engl.* qualityofservice) parametara

U protokolu je propisano da svaki uređaj koji trenutno ne sudjeluje u komunikaciji mora slušati komunikacijski kanal najmanje 500 milisekundi kako bi se potvrdilo da je kanal slobodan prije nego počne slati podatke. Isto tako, svaki uređaj koji je u komunikaciji, mora unutar 500 milisekundi poslati podatkovni okvir. Procedura otkrivanja uređaja definira pouzdan način za razmjenu identifikatora među uređajima. Procedura dogovaranja parametara koristi se za ostvarivanje komunikacije sa optimalnim parametrima po oba uređaja, kao što su brzina prijenosa podataka i maksimalna veličina podataka. Brzina prijenosa podataka mora biti ista kod oba uređaja, pa se uzima najveća zajednička vrijednost, dok veličina podatka može limitirati samo jedan uređaj, pa se drugi uređaj mora prilagoditi.

4.1.2.3 IrLMP obavezni protokol i Tiny TP neobavezni protokol

IrLMP^[13] (*engl.* Infrared Link Management Protocol) i Tiny TP^[14] (*engl.* Tiny Transport Protocol) protokoli pružaju podršku za više istovremenih veza. U teoriji, oni omogućavaju istovremenu komunikaciju sa više uređaja istovremeno. Često je samo jedna aplikacija aktivna i ovi protokoli se koriste za ostvarivanje dvostrukog pristupa jednom uređaju. Kod računala, ovaj protokol omogućava korisniku korištenje standardnih čitaj i piši naredbi za razmjenu velikih blokova podataka uz rad na optimalnoj brzini. IrLMP definira slijedeće servise:

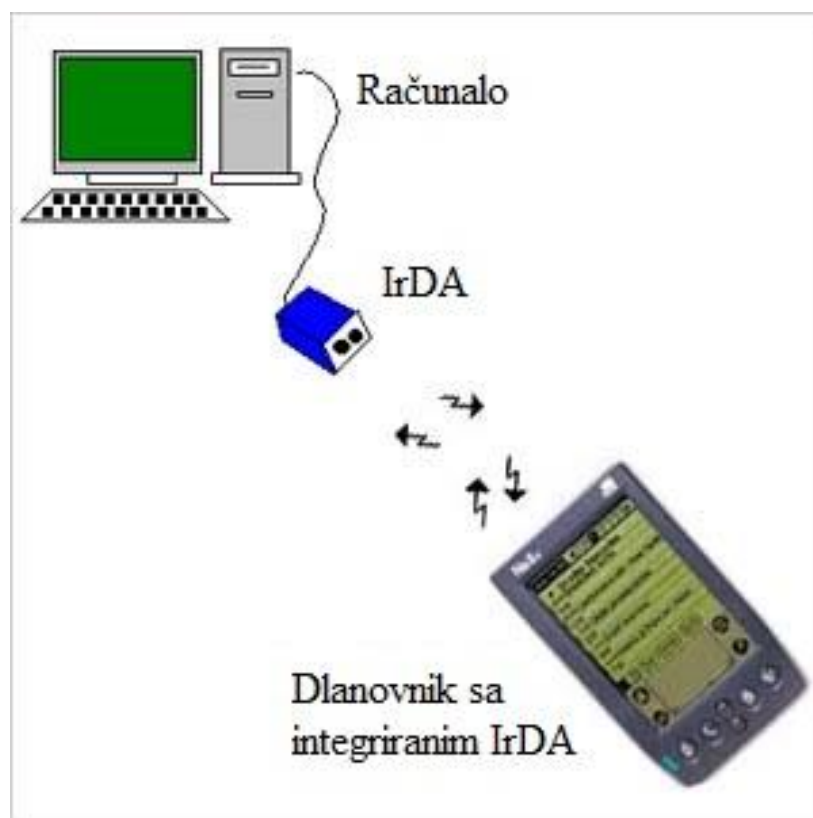
- Konekcija
- Servis pristupa informaciji
- Servis prijenosa podataka
- Prekid konekcije

4.1.2.4 Ostali, neobavezni protokoli

- IrMC (*engl.* Infrared Mobile Communication) – protokol koji definira razmjenu podataka između mobitela i računala.
- IrLAN- protokol koji omogućava povezivanje uređaja u lokalne bežične mreže putem infracrvene veze.
- IrTran-P(*engl.* Infrared Transfer Picture Protocol)– protokol koji se koristi kod prijenosa slika sa digitalnih kamera
- IrSimple- protokol koji omogućava 4-10 puta brži prijenos podataka^[15]

4.2 Primjer IrDA

Prikaz jednostavnog komunikacijskog sustava baziranog na infracrvenoj svjetlosti možemo vidjeti na slici



Slika 31: IrDA komunikacijski sustav

Komunikacijski sustav sastoji se od računala i dlanovnika koji razmjenjuju podatke. Računalo za komunikaciju koristi prijenosni IrDA priključak, dok dlanovnik ima integrirano IrDA sklopovlje. Svaki IrDA sklop sastoji se od prijemnika i predajnika kako bi komunikacija bila dvosmjerna.

4.3 Prednosti i nedostaci IrDA

Prednosti bežične komunikacije putem IrDA su:

- „Point to point“ komunikacija
- Siguran prijenos podataka
- Mala potrošnja električne energije
- Mala cijena
- Visoko efikasan prijenos podataka

IrDA se pokazao kao siguran i pouzdan sustav komunikacije na male udaljenosti. Potrebna oprema za ostvarivanje ovakvog tipa komunikacije jeftina je i malih dimenzija. Nedostaci Bežične komunikacije putem IrDA su:

- Brzina prijenosa podataka do 4Mb/s
- Mali domet
- Potrebno držati uređaje mirnima pri komunikaciji
- Komunikacija moguća kada nema optičkih prepreka
- Najviše dva uređaja od jednom

Mali domet jedan je od najvećih nedostataka ovog oblika komunikacije. Zbog fizičkih svojstava LED, maksimalna brzina prijenosa podataka je 4MB/s što je relativno spora brzina u odnosu na druge, popularnije oblike bežične komunikacije.

5. Komunikacijski sustav uporabom LED koja emitira vidljivo svjetlo

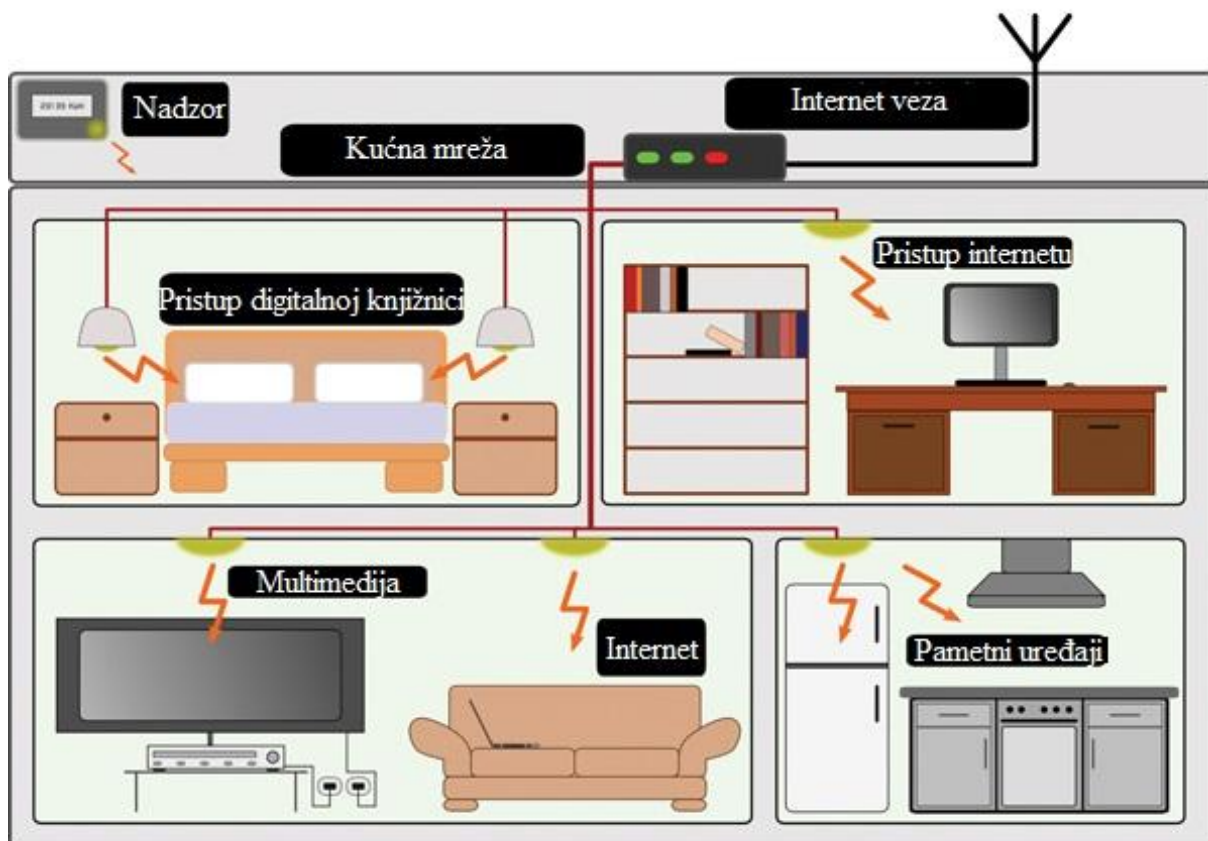
5.1 Komunikacija vidljivim svjetlom

Komunikacija vidljivim svjetlom je slanje podataka putem vidljivog svjetla koje se koristi kao medij. U ove svrhe koristi se svjetlo valne duljine između 780 nm (400 THz) i 375 nm (800 THz). Tehnologija koristi fluorescentne i LED izvore svjetlosti za prijenos podataka. Fluorescentnim izvorom svjetlosti razvija se brzina od 10 kbit/s, dok se kod LED razvija brzina od 500 Mbit/s. Kao detektor fotona koriste se posebno dizajnirani elektronički sklopovi koj sadrže fotodiode. Kao detektor može poslužiti i kamera mobilnog uređaja ili digitalna kamera, pošto one mogu sadržavati mrežu fotodioda.

Razvoj ove tehnologije započeo je 1880. godine u Washingtonu kada je Alexander Graham Bell izumio fototelefon, koji je govor prenosio putem modulirane sunčane svjetlosti na udaljenosti od par stotina metara. U novijoj prošlosti, 2003 godine na japanskom Keio sveučilištu počela su istraživanja sa LED kao izvorom svjetlosti za prijenos podataka putem vidljive svjetlosti. 2010 godine znanstvenici iz Siemens i Fraunhofer instituta demonstrirali su prijenos podataka brzinom od 500 MBit/s na udaljenosti od jednog metra, i 100 MBit/s na duže udaljenosti korištenjem 5 LED koje emitiraju bijelu svjetlost. IEEE organizacija trenutno provodi proces standardizacije nad ovom tehnologijom.

5.2 Konceptualni prikaz uporabe LED u komunikacijskom sustavu vidljivim svjetlom.

Pošto je ova tehnologija relativno slabo razvijena, možemo dati samo teoretski primjer primjene. Uporaba komunikacije putem vidljive svjetlosti prikazana je u jednom osnovnom kućnom sistemu na slici 32:



Slika 32: Prijenos podataka vidljivim svjetlom^[16]

U ovom primjeru, podaci se putem svjetlosnih izvora prenose u sve uređaje koji imaju neki oblik detektora fotona. Kako izvori svjetlosnog signala, ujedno služe i za osvjetljenje prostora, potrebno je postići komunikaciju vidljive promjene amplitude svjetlosnog signala, to jest ne smije doći do promjene u osvjetljenju prostora. To se postiže novim načinom modulacije signala nazvanim SIM OFDM. Ova tehnologija još je relativno nerazvijena, ali daje zanimljiv koncept prijenosa podataka. Ovakav komunikacijski sustav mogao bi se primijeniti u bolnicama, u automobilima (komunikacija automobil – ulična rasvjeta), a u budućnosti i u običnim kućanstvima.

6. Zaključak

Komunikacija vidljivim svjetlom noviji je pristup komunikacijskim mrežama koje se temelje na široko pristupnoj potrošačkoj elektronici. Ovakav sustav ima dvostruku funkciju: koristi se i kao rasvjeta, i kao sustav za prijenos podataka. Pruža veliku sigurnost, iz razloga što se komunikacija odvija u prostoru gdje je izvor svjetlosti. Također, moguća je primjena u opasnim zonama, gdje radijske frekvencije korištene za većinu modernih komunikacijskih sustava mogu biti opasne.

IrDA komunikacijski sustav danas je zastarjela i rijetko korištena tehnologija u komunikacijskim sustavima. Razvojem sustava poput Bluetootha i bežičnih računalnih lokalnih mreža, ova tehnologija izgubila je tržišnu bitku. IrDA udruženje razvija novi protokol koji bi trebao omogućiti komunikacijske brzine od 5 i 10 Gb/s.

Svjetleće diode pokazale se kao pouzdan izvor svjetlosti u komunikacijskim sustavima. Razvojem poluvodičkih materijala možemo očekivati komunikacijske sustave velikog stupnja efikasnosti i brzine prijenosa podataka. Moderno društvo zahtjeva komunikacijske sustave velikih brzina prijenosa podataka, i na velike udaljenosti, pa po mojem mišljenju, LED trenutno nisu konkurentne kao izvori svjetlosti u komunikacijskim sustavima. U budućnosti možemo očekivati daljnji razvoj LED jer je područje njihove moguće primjene zaista veliko.

7. Literatura

- [1] http://www.societyofrobots.com/images/electronics_led_diagram.png
- [2] Nikolay Zheludev (2007), *The life and times of the LED — a 100-year history*,
- [3] <http://www.todayifoundout.com/index.php/2010/03/how-an-led-works/>
- [4] <http://www.grepinc.com/sites/default/files/site-images/led-parts.png>
- [5] http://learn.parallax.com/sites/default/files/content/shield/robo_ch7/TV.jpg
- [6] <http://www.instructables.com/files/deriv/F33/7G9N/FWS6JUT3/F337G9NFWS6JUT3.LARGE.jpg>
- [7] <http://users.ece.gatech.edu/~alan/ECE3080/Lectures/ECE3080-L-11d-LEDs%20and%20Lasers.pdf>
- [8] http://www.teralab.co.uk/Museum/Valves/Museum_Valves_Page2.htm
- [9] <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap23/F23-01%20Burrus-type%20GaAs%20LED.jpg>
- [10] <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap23/F23-02%201300%20nm%20Commun-device.jpg>
- [11] <http://www.irdalite.com/bk-chap2.html>
- [12] <http://www.irdalite.com/bk-chap3.html>
- [13] <http://www.irdalite.com/bk-chap4.html>
- [14] <http://www.irdalite.com/bk-chap5.html>
- [15] *IrDA interfacing to PCs* (2002), Eddie Insam
- [16] <http://www.see.ed.ac.uk/news/Archive/news151.html>
- [17] *The Communications Handbook, second edition* (2002), Jerry D. Gibson
- [18] *Handbook of Optoelectronics, volume 1* (2006)

Popis slika

Slika 1: Svjetleća dioda i njezin simbol	2
Slika 2: Rekombinacija elektrona i šupljina.....	4
Slika 3: Dijelovi LED.....	6
Slika 4: Jednostavni infracrveni komunikacijski sistem	8
Slika 5: UV komunikacijski sustav	10
Slika 6: RGB svjetleće diode u raznim bojama.....	11
Slika 7: Spektar zračenja bijele diode	12
Slika 8: Jednostavni strujni krug sa LED	13
Slika 9: Strujno naponska karakteristika	14
Slika 10: Radna točka.....	14
Slika 11: Strujno naponske karakteristike pojedinih materijala.....	15
Slika 12: Ovisnost intenziteta emisije o temperaturi.....	17
Slika 13: Odnos napona energetskog razmaka u ovisnosti o temperaturi.....	18
Slika 14: Pojednostavljeni bežični komunikacijski sustav.....	22
Slika 15: Principijelna shema predajnika	23
Slika 16: Predajnik sa MOSFET upravljačem	25
Slika 17: USB kabel sa ugrađenim pretvaračem	26
Slika 18: Principijelna shema prijemnika.....	27
Slika 19: Simbol i primjer fotootpornika	28
Slika 20: Primjer fotomultiplikatora	29
Slika 21: Primjer prijemnika	31
Slika 22: Shema osnovnog pasivnog strujno naponskog pretvarača.....	31
Slika 23: Transimpedantno pojačalo	32
Slika 24: Inverzno naponsko pojačalo	33
Slika 25: Primjer komparatora i krivulje napona	33
Slika 26: Burrus LED	34
Slika 27: GaInP/InP LED	35
Slika 28: RCLED	36
Slika 29: IrDA Data.....	39
Slika 30: FIR sinkrono kodiranje	40
Slika 31: IrDA komunikacijski sustav	42

Slika 32: Prijenos podataka vidljivim svjetlom 45

Prilog 1

Poluvodički materijal	$U_f@20ma$	Intenzitet 5mm LED	Valna duljina
GaAlAs/GaAs	1,5	16mW@50mA	940
GaAlAs/GaAs	1,7	18mW@50mA	880
GaAlAs/GaAs	1,7	26mW@50mA	850
GaAlAs/GaAs	1,8	2000mcd@50mA	660
GaAsP/GaP	2	200mcd@50mA	635
InGaAlP	2,2	3500mcd@20mA	633
InGaAlP	2,2	4500mcd@20mA	620
InGaAlP	2,2	6500mcd@20mA	612
GaAsP/GaP	2,1	160mcd@20mA	605
InGaAlP	2,2	5500mcd@20mA	595
InGaAlP	2,1	7000mcd@20mA	592
GaAsP/GaP	2,1	100mcd@20mA	585
InGaAlP	2,4	1000mcd@20mA	574
InGaAlP	2	1000mcd@20mA	570
GaP/GaP	2,1	200mcd@20mA	565
InGaAlP	2,1	350mcd@20mA	560
GaP/GaP	2,1	80mcd@20mA	555
Sic/GaN	3,5	10000mcd@20mA	525
Sic/GaN	3,5	2000mcd@20mA	505
Sic/GaN	3,6	3000mcd@20mA	470
Sic/GaN	3,8	100mcd@20mA	430

Tablica 7: Poluvodički materijali