



Sveučilište u Rijeci
University of Rijeka
<http://www.uniri.hr>

Polytechnica: Journal of Technology Education, Volume 7, Number 1 (2023)
Politehnika: Časopis za tehnički odgoj i obrazovanje, Svezak 7, Broj 1 (2023)



Politehnika
Polytechnica
<http://www.politehnika.hr/journal>
cte@uniri.hr

DOI: <https://doi.org/10.36978/cte.7.1.4>

Stručni članak
Professional paper
UDK: 531.78:681.58

Osnovni optoelektronički elementi

Siniša Antonijević, Andrea Macan

Prirodoslovno-matematički fakultet

Sveučilište u Splitu

Ruđera Boškovića 33, 21000 Split

santon@pmfst.hr, amacan@pmfst.hr

Sažetak

Optoelektronički elementi su klasa elektroničkih elementa koji služe za generiranje svjetla (kao svjetleće diode ili laserske diode) ili za detekciju svjetla (kao fotodiode ili fotootpornici). Ovaj tip elektroničkih elemenata ili kompleksnijih komponenti koje ih koriste (kao npr. LED zasloni) nalaze široku primjenu u gotovo svim područjima elektronike, što je posebno točno za svjetleće diode - od praktičnih projekata u okviru STEM edukacije do komercijalnih elektroničkih uređaja. U ovom radu dan je kratak pregled osnovnih svojstava tipičnih optoelektroničkih elemenata: svjetlećih dioda, fotodiode, fototranzistora i fotootpornika.

Ključne riječi: *elektronika; LED; fotodiode; fototranzistor; fotootpornik.*

1 Uvod

Elektronički elementi općenito mogu se podijeliti prema nizu kriterija, npr. s obzirom na snagu, radnu frekvenciju, polje primjene, funkciju itd. Sa aspekta funkcionalne podjele, klasa elektroničkih elemenata kojima je funkcija neki tip interakcije sa fotonima, odnosno svjetlošću, nazivaju se optoelektronički elementi. Ovaj termin nije striktno definiran (Dakin i Brown, 2006), i često se koristi izmjenjivo s drugim terminima, kao optoelektroničke komponente ili optoelektronički uređaji, što je širi termin koji se može odnositi i na složenije uređaje koji u sebi uključuju osnovne optoelektroničke elemente. U ovom radu fokus će biti postavljen na osnovne elektroničke elemente koji se, uz samostalno korištenje, nerijetko koriste i u složenijim optoelektroničkim uređajima.

Najopćenitije, optoelektroničke se komponente mogu podijeliti na dvije temeljne skupine:

poluvodičke komponente koje stvaraju svjetlost i komponente koje mijenjaju svoja električna svojstva (npr. električni otpor) pod utjecajem svjetlosti, tj. čija je funkcija detekcija svjetlosti.

Komponente iz prve skupine su užem smislu ograničene na svjetleće (LED - *Light Emitting Diode*) diode i laserske diode. U širem smislu, u ovu kategoriju bi se mogli svrstati i razni tipovi zaslona (npr. LED zasloni), no ove komponente se u pravilu oslanjaju na korištenje nekog tipa svjetleće (LED) diode kao izvora svjetlosti. Svjetleće diode predstavljaju tipičan primjer optoelektroničkog elementa, s obzirom da spadaju u jednog od najčešće korištenih, ne samo optoelektroničkih, nego elektroničkih elemenata uopće (Schubert, 2006; Held, 2009). Najčešće se koriste za vizualnu indikaciju stanja uređaja, no nalaze su u upotrebi i za čitav spektar ostalih primjena - od izvora svjetlosnog signala u optičkoj komunikaciji, preko visoko upravljivog izvora svjetlosti u senzorima do efikasnih

zamjena za klasične žarulje sa žarnom niti. U usporedbi sa svjetlećim diodama, koje emitiraju nekoherentnu svjetlost u uskom pojasu valnih duljina, laserske diode (kao i laseri općenito) emitiraju koherentnu svjetlost na jednoj valnoj duljini, te imaju tipično znatno veće snage od LE dioda (Sheng, 2006). Ove karakteristike čine ih posebno pogodnima za ultra-brze komunikacijske sustave (Waynant i Ediger, 2000) koji kao komunikacijski kanalobično koriste optička vlakna, ali mogu biti i bežični (Hranilovic, 2005). Za razliku od svjetlećih dioda, koje, kako je spomenuto, predstavljaju jedan od najčešće korištenih elemenata u vrlo širokom rasponu različitih elektroničkih uređaja, primjena laserskih dioda je neusporedivo uža i najvećim dijelom ograničena na korištenje u optičkim komunikacijama. Ovo područje primjene temelji se upravo na optoelektroničkim komponentama, te se koriste ne samo osnovne optoelektroničke komponente za emisiju i detekciju svjetlosti, već i za usmjerenje (razne vrste optičkih valovoda, npr. optička vlakna) te za oblikovanje svjetlosnog signala (npr. optički modulatori, pojačala, multiplexeri itd.) (Dakin i Brown, 2006; Bates, 2005).

Od optoelektroničkih elemenata koji se koriste za detekciju svjetlosti (fotodetektora) najčešće su korištene fotodiode i fototranzistori. Ovo su poluvodički elementi koji su prema principu rada i fizičkom izgledu slični običnim diodama i tranzistorima, no konstruirani na način da upadni fotoni imaju što veći utjecaj na njihove strujno naponske karakteristike, što se iskorištava za detekciju upadnog svjetla. Za područje analogne elektronike često se, zahvaljujući vrlo jednostavnom korištenju, niskoj cijeni i robusnoj konstrukciji, koristi i fotootpornik (Fraden, 2005) ili LDR (*Light Dependent Resistor*), ukoliko vrijeme odziva na promjene svjetlosti nije kritično (red veličine ms ili više). Za specijalne aplikacije koje zahtijevaju vrlo veliku osjetljivost (mogućnost detekcije individualnog fotona), kao i vrlo kratka vremena odziva (reda veličine ns) koriste se fotomultiplikatori.

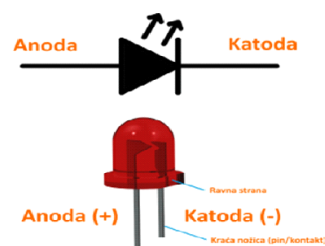
Uz dvije temeljne skupine optoelektroničkih elemenata, postoji široka skupina optoelektroničkih komponenti koji se konstruiraju korištenjem jednog ili više temeljnih optoelektroničkih elemenata. Naime, s obzirom da su optoelektronički elementi u pravilu izgrađeni od poluvodiča, relativno ih je jednostavno realizirati u integriranoj tehnici, što osigurava jeftino i pouzdano kombiniranje optoelektroničkih elemenata u istom kućištu. Tipičan primjer ovakvog tipa komponenti su optoizolatori (*optoisolators, optocouplers*), koji predstavljaju male integrirane krugove sa ulazom koji je spojen na LED diodu, i izlazom spojenim na neki fotodetektor (fototranzistor ili fotodiodu). Par LE dioda-fotodetektor je izveden u istom kućištu na način da

svjetlost koju stvara LE dioda direktno upravlja fotodetektorom, čime se osigurava galvanska izolacija upravljačkog od upravljanog strujnog kruga (Bass i sur., 1995). Fizičkom izvedbom para LE dioda-fotodetektor na način da se iz vanjskog svijeta može utjecati na tok svjetlosti mogu se realizirati razni tipovi senzora (Righini, Tajani i Cutolo, 2005). Npr. fotopreki dač (*photointerrupter*) se koristi za detekciju položaja objekta koji, kada se nalazi na ciljanom položaju, prekida tok svjetla fotopreki dača. Na sličan način fotoreflektor (*photorelector*) detektira blizinu objekta preko svjetlosti reflektirane od površine objekta koji se nalazi na dovoljno maloj udaljenosti od fotoreflektora.

U ovom radu će se kroz sljedećih nekoliko poglavlja prikazati osnovni optoelektronički elementi, najčešće korišteni u općoj elektronici.

2 Svjetleće diode (LED)

Svjetleće diode (LED) su elektronički elementi sa najčešće dva izvoda, koji su po svojoj građi jako slični standardnim ispravljačkim poluvodičkim diodama koje su izvedene na temelju PN-spoja. Za razliku od standardnih ispravljačkih dioda, svjetleće diode u propusnoj polarizaciji emitiraju ultraljubičastu, infracrvenu ili vidljivu svjetlost. Dakle, svjetleće diode imaju dva izvoda: anodu i katodu (katoda je negativnija od anode u propusnoj polarizaciji od 1.6V do 4.4V). Minimalni i maksimalni naponi propusne polarizacije ovise o boji LE diode, pa tako za crvene LE diode iznose 1.6V do 2V; za zelene LE diode su nešto viši i iznose 1.9V do 4V; za žute LE diode je napon propusne polarizacije od 2.1V do 2.2V; za plave LE diode od 2.5V do 3.7V; za ljubičaste od 2.8V do 4V, a za ultraljubičaste od 3.1V do 4.4V (Crowell, 2019). Dakle, kada diodu propusno polariziramo kroz nju će poteći struja od anode prema katodi, fotoni će se emitirati, tj. svjetleća dioda će zasvijetliti. Ako diodu polariziramo nepropusno (anoda negativnija od katode ili anoda pozitivnija od katode za potencijal manji od napona propusne polarizacije), struja neće poteći i svjetleća dioda neće zasvijetliti. Simbol i primjer kućišta svjetleće diode je prikazan na slici 1.



Slika 1. Simbol i primjer fizičkog izgleda svjetleće diode

Svjetleće diode imaju široku primjenu, od osvjjetljenja raznih prostorija, zaslona i natpisa, preko signalnih svjetala za bicikl, pa do općenite svjetlosne indikacije u sklopovima. Infracrvene LE diode se koriste u većini daljinskih upravljača, kao elementi koji daju signal, a fototranzistor najčešće prihvaća taj signal te reagira i na najmanje promjene jačine LED svjetla.

2.1 Kako rade svjetleće diode?

Da bi se rad svjetleće diode mogao što bolje razumjeti, prvo se treba razjasniti što je to PN-spoj?, što su poluvodiči?, te kakvi poluvodiči postoje i zašto? Poluvodiči se dijele na čiste (intrinzične) poluvodiče i na ekstrinzične poluvodiče kojima je dodana peterovalentna ili trovalentna primjesa, tj. onečišćenje.

Ekstrinzični poluvodiči se, s obzirom na tip nečistoće, dijele na N-tip i P-tip poluvodiča.

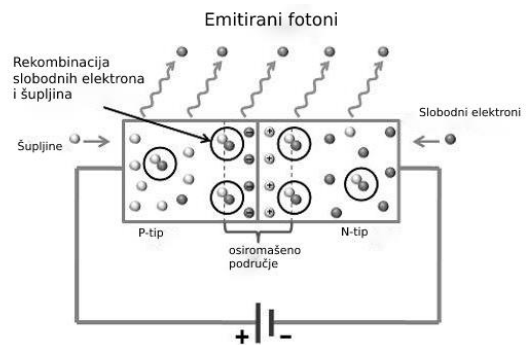
P-tip: Kada poluvodič onečistimo sa trovalentnim nečistoćama dobijemo poluvodič P-tipa ili akceptorski tip jer se javlja višak pozitivnih šupljina u valentnoj vrpci. Prema tome pozitivne šupljine kod P-tipa poluvodiča su većinski nositelji naboja, a slobodni negativni elektroni manjinski.

N-tip: Logika kod N-tipa poluvodiča ili donorskog tipa je suprotna, dakle poluvodič se onečisti sa peterovalentnim nečistoćama i kao rezultat imamo jedan elektron viška na svaki atom onečišćenja ili primjese. Prema tome kod N-tipa poluvodiča većinski nositelji naboja su slobodni negativni elektroni, a manjinski pozitivne šupljine.

Kako je svjetleća dioda temeljno PN-spoj koji emitira svjetlost, prvo treba razumjeti način rada PN-spoja. Kako samo ime kaže, PN-spoj je građen od P-tipa i N-tipa poluvodiča. Kada ta dva poluvodiča spojimo dolazi do ogromne razlike u koncentracijama većinskih nositelja (šupljina s P-strane i elektrona s N-strane). Većinski nositelji imaju tendenciju da se "premjeste" s mjesta veće na mjesto manje koncentracije (difuzija) i zbog toga dolazi do velike struje difuzije elektrona s N na P-stranu i šupljina sa P na N-stranu. Kada elektron s N strane dođe u P-stranu, unutar vrlo kratkog puta (tzv. difuzijske duljine) postoji velika mogućnost da će naići na šupljinu i rekombinirati se s njom. Tako će nestati jedna šupljina koju će elektron popuniti. Prema tome, na P-strani pada koncentracija šupljina koje su se rekombinirale. Isto vrijedi i za N-stranu, šupljina iz P-strane se rekombinira s elektronom i pada koncentracija elektrona. Što je difuzija veća više elektrona i šupljina se rekombinira i osiromašeno područje, u kojem nema pokretnih nositelja naboja, se širi. Kako osiromašeno područje raste, rezultat je jačanje polja kontakta koje zaustavlja difuziju, dok se na kraju difuzija potpuno ne zaustavi i uspostavi se

ravnoteža. Naravno, u obzir se mora uzeti i mala struja manjinskih nositelja, tzv. struja drifta koja postoji i u ravnoteži. Npr. ako šupljina u N strani upadne u polje kontakta, to polje će prebaciti šupljinu u P strani. Prolaskom te šupljine koncentracija šupljina se malo povećala na P-strani i ponovno se javlja struja difuzije koja vrati tu šupljinu u N-stranu gdje se ona rekombinira. Dakle, nakon uspostavljanja ravnoteže, iako postoji driftna struja, postoji i difuzna struja koja će ju poništiti, pa je ukupna struja kroz PN-spoj jednaka nuli. Ako se ovakav PN spoj priključi na napon, preko osiromašenog područja se stvara električno polje koje će poremetiti ravnotežno stanje u zavisnosti o polarizaciji anode i katode. Ako je anoda negativnija od katode, vanjsko polje ima istu orijentaciju kao polje kontakta, osiromašeno područje se proširi i difuzija većinskih nositelja naboja je potpuno onemogućena - nepropusna polarizacija. Suprotno, ako je vanjski napon tako spojen da je anoda pozitivnija od katode, vanjsko polje smanjuje djelovanje polja kontakta i omogućava se difuzija većinskih nositelja naboja, što rezultira vrlo brzim rastom struje s vanjskim naponom - propusna polarizacija.

Jako slično funkcioniraju i svjetleće diode. Kada LE diodu polariziramo propusno (pozitivni pol na P-stranu, negativni pol na N-stranu), dolazi do spontane rekombinacije manjinskih nositelja, kako ilustrira slika 2.



Slika 2. Princip rada svjetleće diode

Elektroni se nalaze u vodljivom pojasu energija, a šupljine u valentnom, a ako se usporede energije, energetska razina šupljina je niža od energetske razine elektrona. Kako energija u prirodi ne može samo nestati ona se mora pretvoriti u neki drugi oblik energije, pa kada dođe do rekombinacije elektron može izgubiti energiju emitiranjem fotona odgovarajuće energije (elektromagnetskog zračenja određene frekvencije, tj. valne duljine). Dakle, nakon što se elektroni rekombiniraju sa šupljinama dolazi do emitiranja svjetlosti. Boja svjetlosti koju LE dioda emitira ovisi o materijalu od kojeg je građena, pa

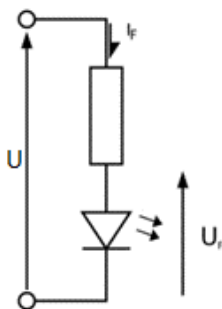
tako ako je LED dioda građena od aluminij galij arsenida emitira crvenu svjetlost. Također, o materijalu ovise i svojstva svjetlećih dioda, primjerice obične diode ne emitiraju svjetlost jer su građene od drugih poluvodičkih materijala, ali se zagriju, odnosno otpuštaju toplinu. PN-spoj svjetleće diode se obično nalazi umotan u epoksi ljusku, tipično onečišćene česticama koje raspršuju svjetlost, zbog čega izgleda da dioda jače svijetli. Ispod PN-spoja se nalazi reflektor koji svjetlost usmjerava.

2.2 Korištenje svjetlećih dioda

Strujno naponska karakteristika bilo kojeg elektroničkog elementa je jako važna jer nam govori kako se element ponaša za neku određenu promjenu struje i napona. Strujno-naponska karakteristika dioda, a samim tim i svjetlećih dioda je nelinearna jer u određenoj točki dođe do eksponencijalnog rasta struje za malu promjenu napona. Taj napon, za koji struja krene eksponencijalno rasti, naziva se napon koljena ili napon propusne polarizacije U_F . Nakon što je jednom dosegnut, daljnje povećanje pada napona na diodi je vrlo malo, pa se u praktičnim sklopovima najčešće zanemaruje, tj. uzima se da je napon propusno polarizirane diode približno konstantnih U_F . Naravno, kako se mijenja poluvodički materijal za svaku boju svjetleće diode, tako se mijenjaju strujno-naponske karakteristike za svaku boju i tip diode.

Ako se želi kontrolirati jakost svjetlosti svjetleće diode, podešavamo struju propusne polarizacije I_F . Osim ovoga imamo i maksimalni napon nepropusne polarizacije tj. napon proboja U_P koji se nikad ne smije prijeći. Napon proboja kod svjetlećih dioda je znatno niži nego kod običnih ispravljačkih dioda i kreće se u rasponu od nekoliko V do nekoliko desetaka V, pa je kod ovakvih dioda bitno paziti da se u nepropusnoj polarizaciji ne prijeđe ova vrijednost.

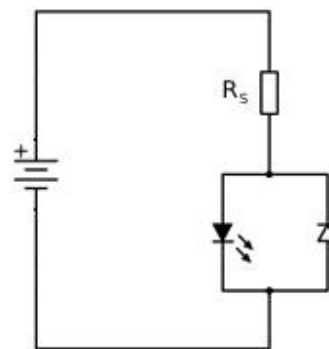
Maksimalna struja koju tipična svjetleća dioda može izdržati bez oštećenja je oko 100mA. Prema tome struja se treba ograničiti da ne dođe do oštećenja. Diodu je najjednostavnije zaštititi od prevelike struje dodavanjem otpornika u seriju sa svjetlećom diodom, kako je prikazano na slici 3.



Slika 3. Spoj svjetleće diode s predotpornikom

Otpornik se može spojiti i na anodu i na katodu, bitno je samo da bude serijski spojen sa svjetlećom diodom. Vrijednost otpora R ovisi o naponu U izvora, naponu propusne polarizacije U_F i željenoj struji I_F . Vrijednost potrebnog predotpornika za željenu vrijednost I_F se računa jednostavno preko 2. Kirchhoffovog i Ohmovog zakona: $R = (U - U_F) / I_F$.

U slučaju da postoji mogućnost promjene polariteta napona U (tako da LED dioda ne emitira svjetlost, tj. da je u nepropusnoj polarizaciji), u slučaju svjetlećih dioda posebno moramo paziti da vrijednost napona nepropusne polarizacije ne prijeđe maksimalno dopuštenu vrijednost, odnosno napon proboja. Kod običnih ispravljačkih dioda o ovome tipično moramo puno manje brinuti s obzirom da se za ovaj tip dioda probojni napon može mjeriti u stotinama, a ponekad i tisućama V, što su vrijednosti koje se u uobičajenim elektroničkim sklopovima teško postižu. Međutim, kako je već spomenuto, probojni napon svjetlećih dioda mjeri se u desetcima V ili čak niže, što su iznosi koji se lako mogu pojaviti na nepropusno polariziranoj svjetlećoj diodi. Jedan jednostavan način zaštite svjetleće diode od prevelikog probojnog napona je da se sa svjetlećom diodom antiparalelno spoji obična ispravljačka dioda, što je prikazano na slici 4.



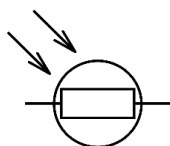
Slika 4. Zaštita u nepropusnoj polarizaciji

U slučaju propusne polarizacije (slika 4.), svjetleća dioda radi kao da ispravljačka dioda nije niti spojena paralelno s njom. Razlog tome je što je ispravljačka dioda spojena antiparalelno, pa je u ovom slučaju nepropusno polarizirana (kroz nju teče zanemarivo mala struja zasićenja). No, ako se polaritet baterije okrene, svjetleća dioda postaje polarizirana nepropusno, ali ispravljačka dioda je sada polarizirana propusno, što znači da će napon na njoj (i samim tim na svjetlećoj diodi) biti konstantnih oko 0.7V. Na ovaj način se osigurava da, bez obzira na iznos i polaritet napona narinut na kombinaciju otpornik-svjetleća dioda, napon na samoj svjetlećoj diodi nikad ne može porasti iznad probojnog napona.

3 Fotootpornici

Fotootpornici (LDR, *Light dependent resistor*) su vrsta otpornika koja mijenja otpor u ovisnosti o jakosti i valnoj duljini svjetla koje ih osvjetljava. Kada su više osvjetljeni njihov je otpor manji, a kada su manje osvjetljeni njihov je otpor veći, dakle fotootpornici imaju promjenjivi otpor kojim se upravlja svjetlom. Otpor u mraku se obično mjeri u megaohmima. Kada je LDR osvjetljen, otpor ovisi o intenzitetu svjetlosti i obično iznosi nekoliko stotina ohma. Za razliku od fotodioda, fotootpornici su bipolarni elementi, tj. kao i svaki drugi otpornik, strujnonaponska karakteristika im je nezavisna o polaritetu napona kojem su podvrgnuti.

Simbol fotootpornika prikazuje slika 5., dok su neki primjeri fizičke izvedbe fotootpornika ilustrirani slikom 6.



Slika 5. Simbol fotootpornika



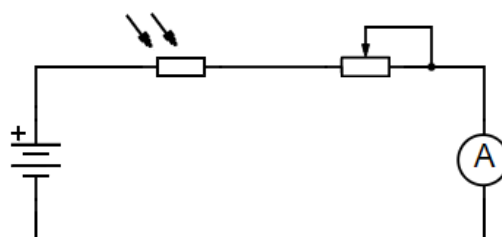
Slika 6. Primjeri fizičkih izvedbi fotootpornika

Za izradu fotootpornika se koriste posebni poluvodiči - ako fotootpornik reagira na vidljivu svjetlost koristi se kadmij sulfid, a ako reagira na infracrvenu svjetlost koristi se olovo sulfid. Kada svjetlost pada na fotootpornik energiju fotona apsorbiraju elektroni. Kada elektroni steknu dovoljno energije da se odvoje od atoma (prijeđu iz valentnog u vodljivi pojas) povećava se koncentracija slobodnih nositelja naboja, što smanjuje otpor fotootpornika. S druge strane, kada se fotootpornik nalazi u mračnom okruženju, kada na njega ne upada nikakva svjetlost, elektroni u poluvodiču su čvrsto vezani za atome, koncentracija slobodnih nositelja naboja je vrlo mala, pa je otpor jako velik.

Prednosti fotootpornika su jednostavna konstrukcija, jednostavno korištenje i robusnost, dok

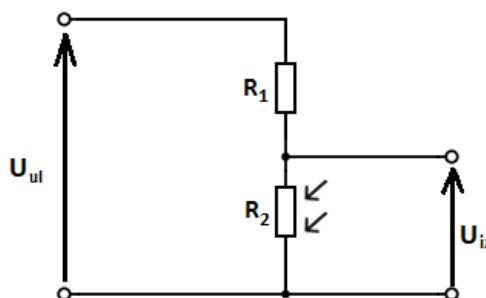
je glavna mana ovog tipa optoelektroničkog elementa vrijeme odziva. Naime, od svih različitih fotodetektora, fotootpornici imaju najduže vrijeme odziva koje se mjeri u milisekundama ili čak desetcima milisekundi. Po prestanku djelovanja svjetla, fotootporniku može trebati i nekoliko sekundi da mu se otpor vrati na početnu visoku vrijednost (Scherz, Monk, 2019).

Fotootpornik se može iskoristiti za mjerenje jakosti svjetlosti na dva temeljna načina - mjerenjem struje ili mjerenjem napona. Slika 7. prikazuje shemu kojom se mjerenjem struje preko osjetljivog ampermetra, te poznavanjem karakteristika fotootpornika, može izračunati jakost svjetla. Serijski se sa otpornikom može spojiti promjenjivi otpornik kojim se početna vrijednost struje (kada je fotootpornik u mraku) može spustiti na vrijednost koja nam odgovara kao početna. Osvjetljavanjem fotootpornika struja raste nelinearno sa rastom jakosti svjetla.



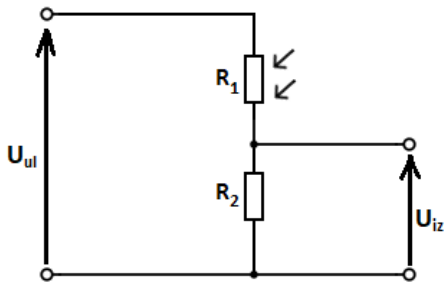
Slika 7. Jednostavno mjerenje jakosti svjetla preko struje

Češće korišten način na koji se može izmjeriti jakost svjetla je mjerenjem napona.



Slika 8. Mjerenje jakosti svjetla preko napona (napon pada)

Ako se fotootpornik spoji serijski sa otpornikom poznate vrijednosti, te ovakva kombinacija spoji na poznati napon U_{ul} , kako prikazuje slika 8., mjerenjem napona na fotootporniku U_{iz} može se jednostavno izračunati vrijednost fotootpornika, vodeći računa da dva otpornika formiraju jednostavno naponsko djelilo: $R_2 = (R_1 U_{iz}) / (U_{ul} - U_{iz})$. Uz poznavanje karakteristike fotootpornika, može se pronaći jakost svjetla.



Slika 9. Mjerenje jakosti svjetla preko napona (napon pada)

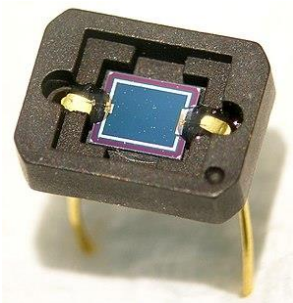
U ovom slučaju, sa rastom jakosti svjetla mjereni napon će padati. Ako se želi da sa rastom jakosti svjetla mjereni napon raste, dovoljno je mjeriti napon sa konstantnog poznatog otpornika, umjesto fotootpornika, kako je prikazano na slici 9. Na isti način se i ovdje može jednostavno izračunati vrijednost fotootpora: $R_1 = R_2(U_{UL} - U_{IZ}) / U_{IZ}$.

4 Fotodiode

Fotodiode, kao i svjetleće (LED) diode imaju dva izvoda: anodu i katodu, samo što obavljaju suprotnu funkciju. Dok svjetleće diode pretvaraju električnu energiju u svjetlosnu, fotodiode svjetlosnu energiju (energiju fotona) pretvaraju izravno u električnu. Na slici 5.1 je prikazan simbol fotodiode, a na slici 5.2 primjer fizičkog izgleda fotodiode.



Slika 10. Simbol fotodiode



Slika 11. Primjer fizičke izvedbe fotodiode

Za razliku od fotootpornika, fotodiode imaju vrlo kratko vrijeme odziva (vrijeme koje proteče od trenutka promjene svjetlosti do promjene struje kroz diodu), pa se koriste i za primjene gdje je potrebno kratko vrijeme reakcije na promjenu svjetla. U pravilu su jedini izbor za ultra-brzu optičku komunikaciju.

Osim toga, imaju vrlo linearnu zavisnost struje o svjetlu, što ih čini dobrim izborom za mjerenje svjetla.

Fotodiode je izvedena od PN-spoja koji se sastoji od vrlo tankog poluvodiča N-tipa i debljeg poluvodiča P-tipa. Kada svjetlost upadne na fotodiode, fotoni prolaze kroz N-tip poluvodiča u P-tip poluvodiča gdje pri sudaraju sa atomima kristalne rešetke izazivaju pojačano pucanje kovalentnih veza. Ovo izaziva dodatno generiranje parova elektron-šupljina u osiromašenom području, pri čemu ih polje kontakta prebacuje na suprotne strane - šupljine se prebacuju prema P-strani, a elektroni prema N strani. Ovo gomilanje naboja na suprotnim stranama PN spoja uzrokuje stvaranje napona između anode i katode. Taj se mehanizam zove fotoelektrični efekt. Ako se anoda i katoda prespoje trošilom, struja teče od anode (P-strane) prema katodi (N-strani). Fotodiode se tipično montiraju u plastičnom ili metalnom kućištu s malim prozorom na koji upada svjetlost. Postoje različite izvedbe fotodiode, pa kod nekih prozor može imati filter za svjetlost, za propuštanje samo određenih valnih duljina svjetlosti.

Fotodiode može raditi u dva načina rada: fotonaponski i fotovodljivi način rada (mod).

U fotonaponskom načinu rada diode se ponaša kao strujni izvor, čija struja ovisi o upadnoj svjetlosti, a napon o priključenom trošilu. Ovakav način rada je temelj rada fotonaponskih solarnih ćelija. U ovom načinu rada, fotodiode ima veću osjetljivost, no veće vrijeme odziva, pa se koristi za primjene sa niskim osvjetljenjem ili malim promjenama jakosti svjetla, gdje brzina rada nije kritična.

U fotovodljivom načinu rada fotodiode se nepropusno polariziraju vanjskim naponskim izvorom, pa se uslijed djelovanja svjetlosti struja diode povećava. Ako se fotodiode nalazi u mraku, uvijek postoji vrlo mala struja manjinskih nositelja tzv. tamna struja, a kada je fotodiode polarizirana nepropusno, struja diode se pod djelovanjem svjetlosti znatno povećava, relativno u odnosu na tamnu struju. Do sličnog apsolutnog povećanja struje bi došlo i da je diode bila propusno polarizirana, no u tom slučaju je relativno povećanje struje znatno manje (jer je struja propusne polarizacije znatno veća od struje nepropusne polarizacije). U ovom načinu rada, vrijeme odziva, ali i osjetljivost fotodiode se smanje, pa se ovaj mod rada koristi za primjene koje zahtijevaju veće brzine rada, poput komunikacija.

Postoji mnogo vrsta fotodiode u različitim veličinama, oblicima i sa raznim karakteristikama. Bitna karakteristika svake fotodiode je svjetlosni spektar za kojeg je namijenjena. Svaka diode će imati najveću osjetljivost za one valne duljine za koje je proizvedena.



Slika 12. Infracrvena (lijevo) i obična fotodioda (desno)

U najširem smislu postoje diode predviđene za utraljubičasti (UV) spektar, infracrveni (IR) spektar i obične fotodiode diode predviđene za vidljivi dio svjetlosnog spektra. Npr. slika 12. prikazuje infracrvenu i običnu fotodiodu.

Kao što je već spomenuto, neke fotodiode imaju ugrađene leće dok druge imaju filtre. Ako fotodiode imaju veću površinu PN spoja onda imaju visoku osjetljivost, ali i veće vrijeme odziva. U suprotnom slučaju, ako fotodiode imaju male površine tada im je i osjetljivost manja, ali se zato dobije i manje vrijeme odziva, odnosno mogućnost rada sa bržim promjenama svjetlosti. Slika 13. ilustrira izvedbe fotodioda sa različitim površinama PN spoja.



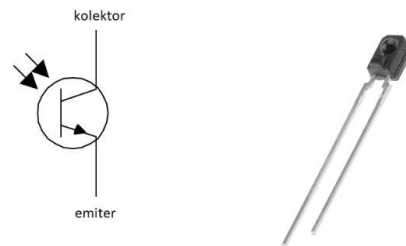
Slika 13. Izvedbe fotodioda sa različitim površinama

Osnovna mjera osjetljivosti fotodiode je ekvivalentna snaga šuma, NEP (*Noise-equivalent power*). Definirana je kao minimalna snaga optičkog signala pri kojoj je omjer električnog signala i šuma na (SNR) diodi 1. Drugim riječima, to je vrijednost najslabijeg optičkog signala (svjetlosti) koji fotodioda može detektirati tj. razlučiti od šuma. Poželjno je da NEP bude što manji, jer će takva dioda reagirati na slabije optičke signale.

5 Fototranzistori

Fototranzistori su slični bipolarnim tranzistorima; razlika je što kod fototranzistora u području baze

postoji "prozorić" kroz koji mogu prolaziti fotoni koji će imati direktan utjecaj na rad tranzistora.

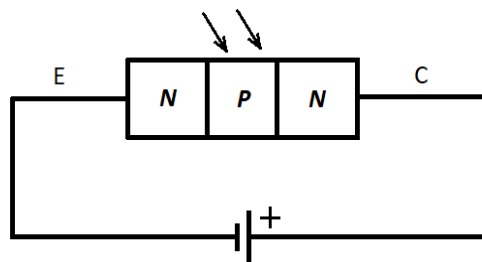


Slika 14. Simbol i primjer fizičke izvedbe fototranzistora

Promjenom intenziteta svjetlosti kojoj je izložen, mijenja se struja koja teče između emitera i kolektora. Ako je dovoljno osvijetljen, stvara se mala struja koja upravlja sa puno većom strujom između kolektora i emitera. Dok u suprotnom slučaju, ako fototranzistor nije osvijetljen, ne teče nikakva struja od kolektora do emitera - fototranzistor je isključen. Simbol i primjer fizičke izvedbe fototranzistora je prikazan na slici 14. Kako se može vidjeti, fototranzistor tipično ima samo dvije elektrode (kolektor i emiter), dok se elektroda spoja na bazu obično izostavlja. S obzirom na ovo, način korištenja fototranzistora je sličan načinu kako se fotodioda spaja u krug - kolektor se spaja na pozitivan pol napajanja, a emiter na negativan.

Fototranzistor se može promatrati kao bipolarni tranzistor koji između kolektora i baze ima fotodiodu umjesto standardnog PN spoja. Fotostruja nastala u području baze efektivno zamjenjuje baznu struju standardnog bipolarnog tranzistora. Jače svjetlo (veći broj fotona u jedinici vremena) izaziva veću struju baze, koja, uslijed tranzistorskog efekta izaziva cca. dva reda veličine veću struju između kolektora i emitera.

Za detaljnije promatranje principa rada fototranzistora, uzmimo NPN fototranzistor: emiter i kolektor su N-tip poluvodiča, a baza je P-tip poluvodiča koji se može osvijetliti (slika 15.). Spoj emiter-baza je polariziran propusno, a spoj kolektor-baza nepropusno.



Slika 15. Struktura NPN fototranzistora

Ako je spoj baza-kolektor osvijetljen, zahvaljujući fotoelektričnom efektu, kao i kod standardne fotodiode, generiraju se parovi elektron-šupljina, koji se uslijed djelovanja polja kontakta razdvajaju na način da se elektroni šalju u kolektor a šupljine u bazu. Ove dodatne šupljine se u bazi rekombiniraju sa elektronima koje se u bazu difuzno injektiraju iz emitera. Međutim, kako je baza znatno uža od difuzijske duljine elektrona, velika većina elektrona koje emiter injektira se ne uspije rekombinirati sa šupljinama prije nego ih "pokupi" kolektor. Stoga se iz emitera injektira znatno veća struja elektrona nego što je struja šupljina nastala kao posljedica svjetlosti. Na ovaj način se, kombinacijom fotoelektričnog i tranzistorskog efekta, postiže da ista razina jakosti svjetla izaziva znatno veće struje između emitera i kolektora nego bi bio slučaj da se umjesto fototranzistora koristila obična fotodiode.

Iz opisanog principa rada očita je i najveća prednost fototranzistora u odnosu na standardnu fotodiodu - znatno veća osjetljivost i mogućnost znatno većih struja. Međutim, ovo je opet plaćeno i znatno dužim vremenom odziva, koje se nalazi negdje između fotodiode i fotootpornika.

Konačno, treba napomenuti da postoje i modifikacije na standardni fototranzistor kojima se mogu postići neka dodatna svojstva. Npr. Darlingtonov fototranzistor ima još veću osjetljivost i još veće vrijeme odziva, a trožični fototranzistor ima dodano i treću (baznu) elektrodu kojom se, uz fotostruju, u bazu fototranzistora može dovesti i mala predstruja, kako bi se povećala linearnost promjene kolektorske (izlazne) struje sa promjenom jakosti svjetla.

6 Zaključak

U ovom radu dan je kratak pregled funkcije i područja primjene optoelektroničkih elemenata općenito. Osnovni optoelektronički elementi koji se najčešće koriste u općoj elektronici (svjetleće diode, fotodiode i fototranzistori te fotootpornici) su nešto detaljnije obrađeni kroz 4 poglavlja. Za svaki od obrađenih elemenata pokazan je temeljni princip rada i osnovna svojstva, a sadržaj je razrađen tako da bude koristan edukatorima u području tehnike, tehnologije i STEM područja obrazovanja.

Literatura

Bass, M., Stryland, E.W., Williams, D.R., Wolfe, W.L. (1995). *Handbook of Optics, Volume I: Fundamentals, Techniques and Design, Second Edition*. McGraw-Hill Professional.

Bates, R.J. (2001). *Optical Switching and Networking Handbook*. New York: McGraw-Hill.

Crowell, G. (2019). The Forward Voltages of Different LEDs. Retrieved from <https://www.circuitbread.com/ee-faq/the-forward-voltages-of-different-leds>

Dakin, J.P., Brown, R.G.W. (2006). *Handbook of Optoelectronics, Volumes I & II*. CRC Press.

Fraden, J. (2004). *Handbook of Modern Sensors - Physics, Designs, and Applications, Third Second Edition*. Springer International Publishing.

Held, G. (2009). *Introduction to Light Emitting Diode Technology and Applications*. Taylor & Francis Group, LLC.

Hranilovic, S. (2005). *Wireless Optical Communication Systems*. New York: Springer-Verlag.

Righini, G.C., Tajani, A., Cutolo A. (2009). *An Introduction to Optoelectronic Sensors, Series in Optics and Photonics - Vol. 7*. World Scientific Publishing Co Pte Ltd.

Scherz, P., Monk, S. (2019). *Practical Electronics for Inventors*. New York: McGraw Hill.

Schubert, E.F. (2006). *Light-Emitting Diodes, Second Edition*. Cambridge University Press.

Sheng S.L. (2006). *Semiconductor Physical Electronics, Second Edition*. New York: Springer.

Waynant, R.W., Ediger, M.N. (2000). *Electro-Optics Handbook, Second Edition*. New York: McGraw Hill.

Basic optoelectronic elements

Abstract

Optoelectronic elements are class of electronic elements used to generate light (such as LED or laser diode) or detect light (such as photodiode or phototransistor). This type of electronic elements, or more complex components based on these elements (for example, LED displays) are widely used in almost all areas of electronics, which is especially true for LEDs - from practical projects in STEM education to commercial electronic devices. In this paper, a short overview of basic properties of typical optoelectronic elements (LEDs, photodiodes, phototransistors and photoresistors) is given.

Keywords: electronics; LED; photodiode; phototransistor; photoresistor.