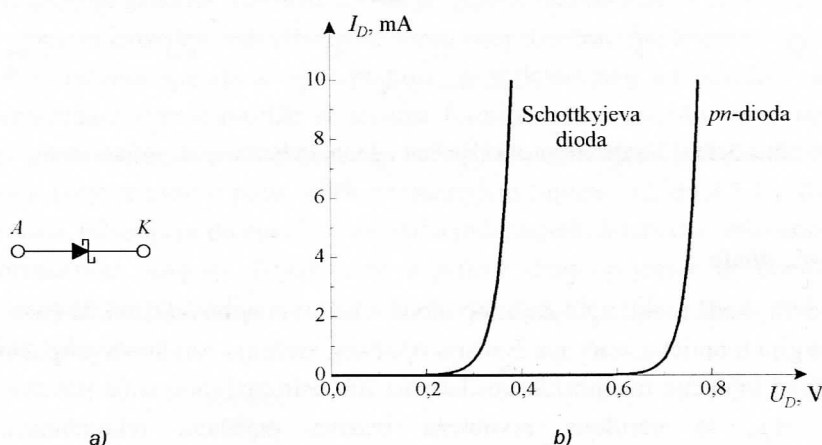


3.9.3 Schottkyjeva dioda

Primjena ispravljačkog spoja metal-poluvodič je poluvodički element koji se naziva Schottkyjeva dioda. Električki simbol Schottkyjeve diode prikazan je na slici 3.40a. Kako se vidi na slici 3.40b strujno-naponska karakteristika Schottkyjeve diode slična je karakteristici *pn*-diode. Razlike je u manjem naponu koljena Schottkyjeve diode. Naponi koljena silicijskih Schottkyjevih dioda su od 0,3 do 0,5 V. Kod galij-arsenidskih Schottkyjevih dioda napon koljena je oko 0,7 V. Schottkyjeve diode imaju veću struju zaporne polarizacije, koja se više mijenja s naponom od struje zaporno polarizirane *pn*-diode.



Slika 3.40 – Schottkyjeva dioda: a) električki simbol, b) usporedba karakteristika *pn*-diode i Schottkyjeve diode Schottkyjeve diode.

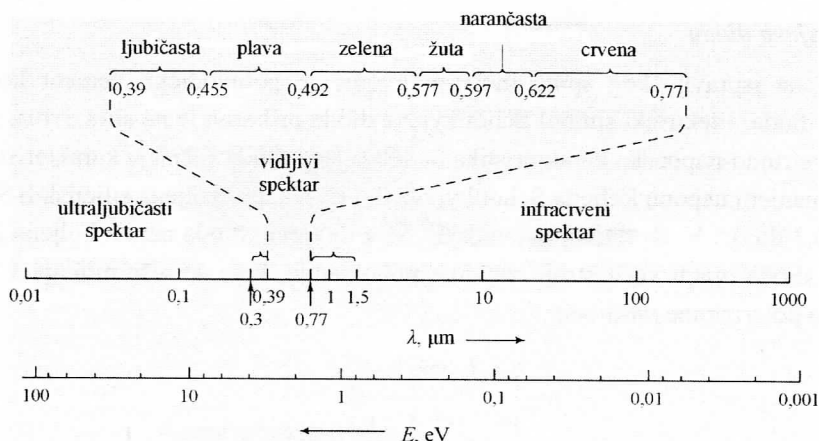
U Schottkyjevoj diodi struju vode većinski nosioci. Osnovna prednost Schottkyjeve diode u odnosu na *pn*-diodu je izostanak nakrcanog naboja manjinskih nosilaca. Zahvaljujući tome Schottkyjeva dioda znatno se brže prebacuje iz propusne u zapornu polarizaciju, te predstavlja bržu sklopku od *pn*-diode.

3.10 Dioda u optoelektronici

Poluvodički optoelektronički elementi temelje svoj rad na pretvorbi optičkog zračenja u električku energiju i obrnuto. Optičko zračenje dio je elektromagnetskog spektra. Veza energije E , frekvencije f i valne duljine λ elektromagnetskog zračenja je

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}, \quad (3.108)$$

gdje je h Planckova konstanta, a c je brzina svjetlosti u vakuumu ($c = 2,998 \cdot 10^8$ m/s). Na slici 3.41 prikazan je dio elektromagnetskog spektra od ultraljubičastog ($\lambda = 10$ nm) do infracrvenog ($\lambda = 1$ mm). Posebno je izdvojen vidljivi dio spektra u kojem su označene valne duljine osnovnih boja od ljubičaste do crvene. U optoelektroničkim elementima od interesa su valne duljine zračenja od bliskog ultraljubičastog (od 0,3 μ m), preko vidljivog, do bliskog infracrvenog (do 1,5 μ m).

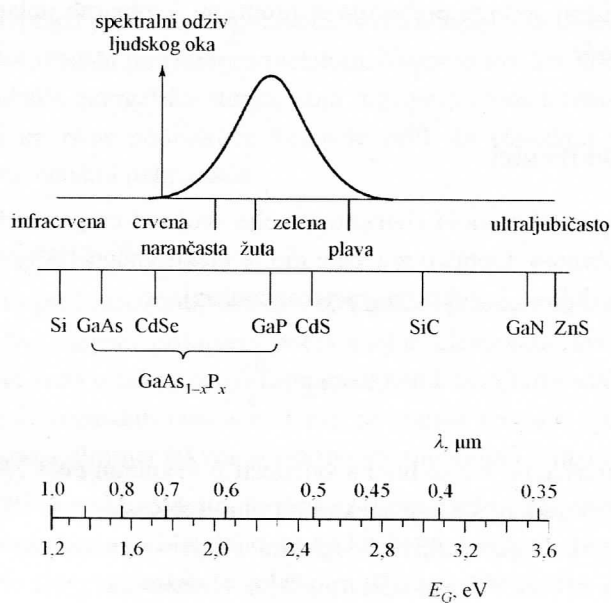


Slika 3.41 – Elektromagnetski spektar od ultraljubičastog do infracrvenog.

3.10.1 Svjetleća dioda

Svjetleća dioda (engl. light emitting diode – LED) je *optoelektronički izvor* koji pretvara električku energiju u optičko zračenje. Emisiju optičkog zračenja osigurava propusna polarizacija *pn*-diode. Uslijed injekcije manjinskih nosilaca uz rub osiromašenog sloja povećava se produkt koncentracija *np*, te narušena ravnoteža izaziva pojačanu rekombinaciju nosilaca. Rekombinacijom elektron prelazi iz vodljivog u valentni pojas, oslobađajući energiju širine zabranjenog pojasa E_G . Dio te energije pretvara se u zračenje svjetlosti valne duljine

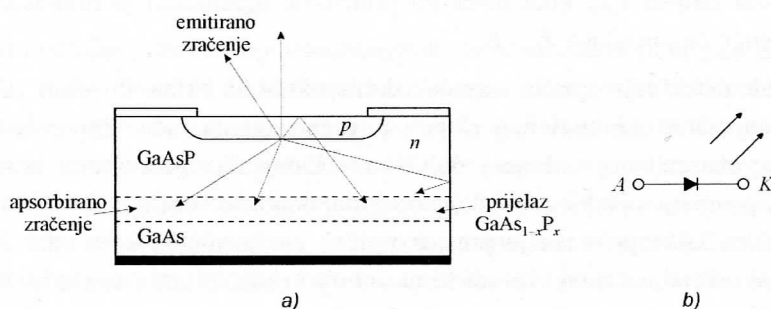
$$\lambda = \frac{hc}{E_G} = \frac{1,24}{E_G(\text{eV})} \mu\text{m} . \quad (3.109)$$



Slika 3.42 – Poluvodiči i spektar svjetlećih dioda.

Valna duljinu λ odnosno boja emitiranog zračenja određuje se, preko širine zabranjenog pojasa E_G , odabirom poluvodičkog materijala od kojeg se svijetleća dioda izrađuje. Na slici 3.42 prikazane su spektralne raspodjele svijetlećih dioda. Uz svaku raspodjelu naznačena je pripadna boja, te poluvodički materijal od kojeg se dioda izvodi. Krivuljom je prikazan spektralni odziv ljudskog oka. Veći dio vidljivog spektra pokriva složeni poluvodički materijal galij-arsen-fosfid ($\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$) u kojem se variranjem omjera x fosfora i arsena mijenja širina zabranjenog pojasa E_G , a s njome i emitirana valna duljina λ .

Osnovna konstrukcija svijetleće diode prikazana je na slici 3.43a, a električki simbol na slici 3.43b. Svijetlo se generira u okolišu pn -spoja, gdje je rekombinacija prevladavajuća, a zatim se emitira u svim smjerovima. Iskorištava se samo onaj dio zračenja koji prolazi kroz otvor na površini, a dio zračenja apsorbiranog u podlozi, te reflektiranog od površine se gubi. Bolje usmjerenje emitiranog svjetla postiže se lećama formiranim u kućištu iznad površine diode. Propusna strujno-naponska karakteristika svijetleće diode uobičajena je karakteristika pn -dioda, pri čemu napon koljena ovisi o poluvodičkom materijalu (tipično 1,5 do 3,5 V). Radne struje su najčešće nekoliko miliampera do nekoliko desetaka miliampera. Intenzitet emitiranog svjetla raste linearno s propusnom strujom. Pojedinačne svijetleće diode najčešće se upotrebljavaju kao pokazne svjetiljke (engl. indicator lamps). Kombinacijom više dioda rade se moduli alfanumeričkih pokazivača.

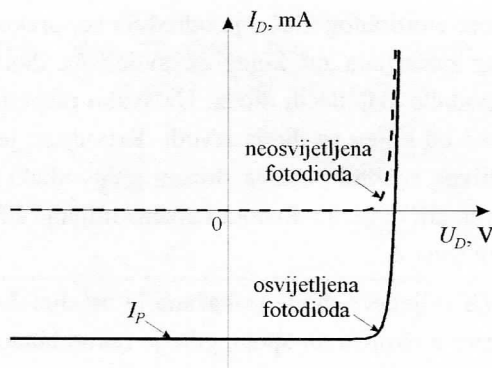


Slika 3.43 – Svijetleća dioda: a) tehnološki presjek; b) električki simbol.

Kao optoelektronički izvori koriste se i **laserske diode**, specijalno projektirane pn -dioda koje pri propusnoj polarizaciji generiraju koherentno svjetlo vrlo uske širine spektra. Laserske diode koriste se u sustavima optičkih komunikacija, u CD čitačima i drugim primjenama.

3.10.2 Fotodioda

Fotodioda je **optoelektronički detektor** u kojem energija upadnog optičkog zračenja generira električki signal. Uz zapornu polarizaciju fotodiode, bez prisustva optičkog zračenja, kroz diodu teče mala struja zasićenja I_S . U fotodiodi ta se struja naziva **tamna struja** (engl. dark current). Svojom energijom upadno optičko zračenje generira unutar poluvodičke strukture parove nosilaca elektron-šupljina. Nosiocice generirane u osiromašenom sloju razdvaja električko polje, tj. odvlači elektrone na n -, a šupljine na p -stranu. Kretanje tih nosilaca proizvodi **fotostruju** I_P (engl. photocurrent) koja je proporcionalna intenzitetu upadnog zračenja, a čiji je smjer isti kao i smjer tamne struje I_S . Strujno-naponska karakteristike neosvijetljene i osvijetljene fotodiode prikazana je na slici 3.44. Fotodioda se koristi u 3. kvadrantu prikazane karakteristike.



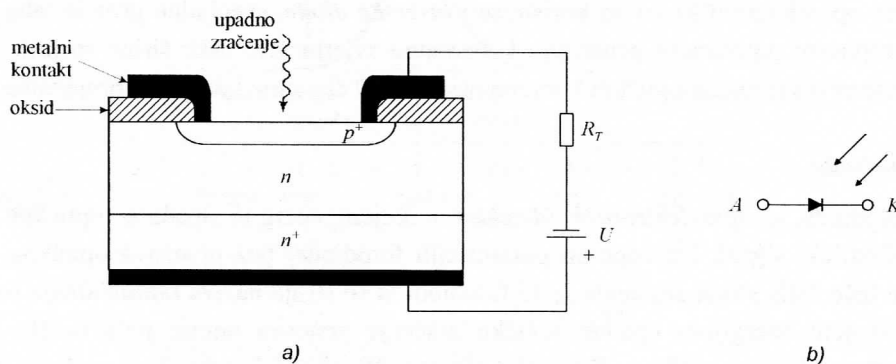
Slika 3.44 – Karakteristika neosvijetljene i osvijetljene fotodiode.

Interval valnih duljina koje detektira pojedini poluvodički materijal je ograničen. Prema (3.108) optička zraka valne duljine λ predaje poluvodiču energiju

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1,24}{\lambda \text{ (}\mu\text{m)}} \text{ eV} . \quad (3.??)$$

Maksimalna valna duljina λ_{max} koju detektira poluvodič ograničena je minimalnom energijom potrebnom za generaciju nosilaca $E = E_G$.

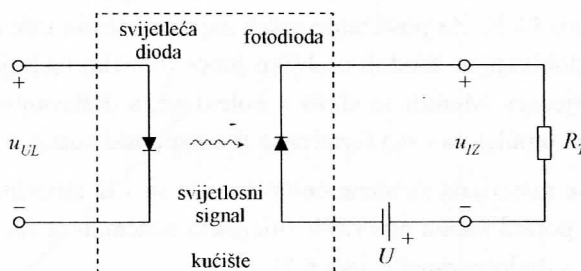
Fotodiode detektiraju optičke signale uskih spektralnih širina. Površine su im male, kako bi se smanjio kapacitet osiromašenog sloja i povećala brzina rada. Zapornom polarizacijom proširuje se osiromašeni sloj u kojem dolazi do razdvajanja generiranih nosilaca. Time se osigurava veća apsorpcija upadnog optičkog zračenja, odnosno veća djelotvornost optoelektričke pretvorbe. Na slici 3.45a prikazan je presjek tipične pn -fotodiode, a na slici 3.45b električki simbol. Površinski metalni kontakt izvodi se na rubu p^+ sloja, kako bi se središnji dio oslobodio za prolaz optičkog zračenja. Osiromašeni sloj formira se pretežno u slabije dopiranom n -području. Osim pn -dioda, za detekciju optičkih signala koriste se i fotodiode temeljene na spoju metal-poluvodič.



Slika 3.45 – Fotodiode: a) tehnološki presjek; b) električki simbol.

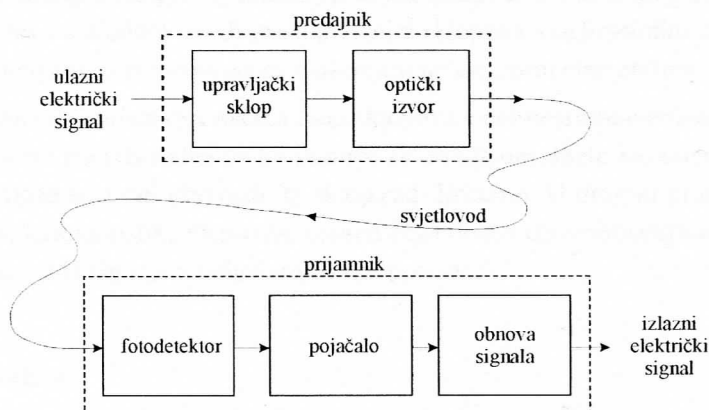
Pojedinačni **fotodetektor** upotrebljavaju se za detekciju optičkog zračenja u različitim primjenama. Fotodiode redovito daju manje fotostruje (tipično oko 10-tak μA), ali su im vremena odziva kratka (reda veličine 1 ns). Korištenjem pojačanja veće struje osiguravaju **fototranzistori** temeljeni na strukturi bipolarnog tranzistora.

Kombiniranjem svijetleće diode koja je u istom kućištu kroz izolacijski medij optički povezana s fotodetektorom (fotodiodom ili fototranzistorom) realiziraju se **optoizolatori** (engl. optoisolators). Zbog optičke sprege optoizolatori se još nazivaju i **optosprežnici** (engl. optocouplers). Prema slici 3.46, na ulazu optoizolatora svijetleća dioda pretvara električni signal u svjetlo, koje detektira fotodetektor i pretvara ga ponovo u električni signal na izlazu. Korištenje optoizolatora omogućuje potpunu električku izolaciju električke mreže spojene na ulaz optoizolatora od mreže spojene na njegov izlaz. Uspostavom optičke, a izostankom električke veze između ulaznog i izlaznog kruga niskonaponski ulazni sklop može upravljati izlaznim sklopom velike snage bez opasnosti uništenja ulaznog kruga.



Slika 3.46 – Shema optoizolatora.

Važno područje primjene optoelektroničkih elemenata su **optičke komunikacije**. Optički komunikacijski sustav prikazan je blokovskom shemom na slici 3.47. U predajniku se ulazni električni signal primjenom optičkog izvora (svijetleća ili laserska dioda) pretvara u optičko zračenje, koje se **svjetlovodom** ili **optičkim vlaknom** prenosi na daljinu do prijamnika. Tu se primjenom fotodetektora (fotodioda ili fototranzistor) optički signal pretvara ponovo u električni signal. Optičkim komunikacijama signal se prenosi znatno brže i uz manje gubitaka u odnosu na klasični električni prijenos pa današnje komunikacijske mreže postaju sve više optičke mreže.



Slika 3.47 – Blokovska shema optičkog komunikacijskog sustava.

3.10.3 Sunčane ćelije

Sunčane ćelije su poluvodički elementi za fotonaponsku konverziju u kojima se energija Sunčevog zračenja pretvara u električnu energiju. Izvode se najčešće kao *pn*-diode, a rad im se, kao i kod fotodioda, zasniva na generiranju parova nosilaca primjenom Sunčevog zračenja, te

razdvajanju generiranih nosilaca s pomoću električkog polja u osiromašenom sloju. Sunčane ćelije se ne polariziraju, već se razdvajanjem fotogeneriranih nosilaca na stezaljkama diode stvara **fotonapon** koji se upotrebljava kao istosmjerni naponski izvor. Strujno-naponska karakteristika sunčane ćelije odgovara karakteristici osvijetljene fotodiode sa slike 3.44 u 4. kvadrantu. Fotonapon sunčane ćelije je napon osvijetljene ćelije uz struju jednaku nuli. Površine sunčanih ćelija su velike kako bi se dobile što veće struje.

Najčešći poluvodički materijal za sunčane ćelije je silicij. Napon monokristalnih silicijskih sunčanih ćelija je oko 0,6 V, a gustoća struje do 30 mA/cm². Djelotvornost silicijskih sunčanih ćelija, definirana kao omjer dobivene električne energije u odnosu na energiju upadnog Sunčevog zračenja, je oko 14 %. Za postizanje većih napona i struja više ćelija spaja se serijski i paralelno. Na taj način dobivaju se moduli u obliku ploče (panela) na kojoj su ćelije učvršćene i zaštićene od vanjskih utjecaja. Moduli se slažu u kolektore, a dodavanjem potrebnih elemenata (pretvarača, regulatora, akumulatora i sl.) formira se fotonaponski sustav.

Zbog niže cijene materijala sunčane ćelije izvode se i iz amorfnog silicija (a-Si). Zbog veće širine zabranjenog pojasa napon amorfnih silicijskih sunčanih ćelija je oko 0,85 V, gustoća struje je do 15 mA/cm², a djelotvornost je oko 6 %.