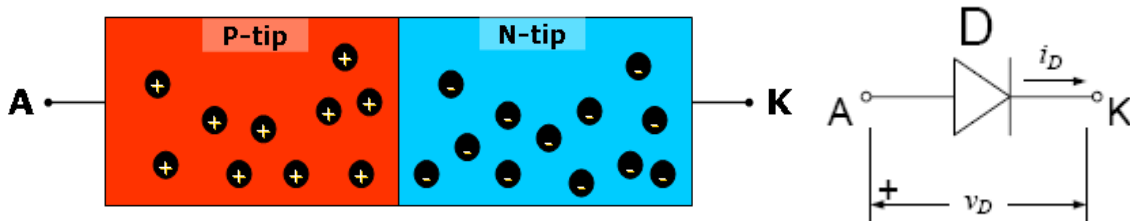


4. Poluprovodničke diode

- Dioda je poluprovodnička komponenta koja poseduje usmeračko svojstvo. Usmeračko svojstvo diode ogleda se u činjenici da provodi značajnu struju samo u jednom smeru, od anode **A** ka katodi **K**. Anoda je kontakt na P strani, a katoda kontakt na N strani PN spoja.



Dioda i njena šematska oznaka: **A** – anoda (P-tip), **K** – katoda (N-tip)

- Statička strujno-naponska karakteristika diode dobija se množenjem gustine struje

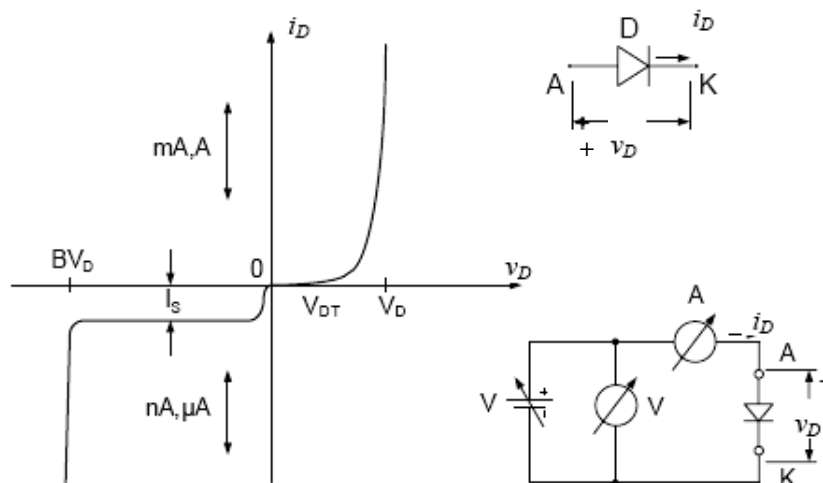
PN spoja, $J = J_s (e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1)$, $J_s = qn_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_d} + \frac{D_n}{L_n N_a} \right)$, sa površinom PN spoja:

$$I_D = J \cdot S = J_s \cdot S \left(e^{V_D/V_T} - 1 \right) = I_s \left(e^{V_D/V_T} - 1 \right), \text{ gde je:}$$

I_s - inverzna struja zasićenja diode, (treba da bude što je moguće manja!),

$V_T = kT / q = 26[\text{mV}]$ termički napon za Si poluprovodnik na 300°K ,

V_D - napon na diodi (uvek u smeru anoda-katoda $V_D = V_{AK} !$).



Statička karakteristika diode i principsko kolo za snimanje

V_D - napon na diodi kada provodi značajnu struju, tipično $V_D \approx 0.6 - 0.7[\text{V}]$

$V_{DT} = V_\gamma$ - napon praga provođenja diode, tipično $V_{DT} = V_\gamma \approx 0.5 - 0.6[\text{V}]$,

BV_D - probojni napon diode, od nekoliko volti do nekoliko stotina volti.

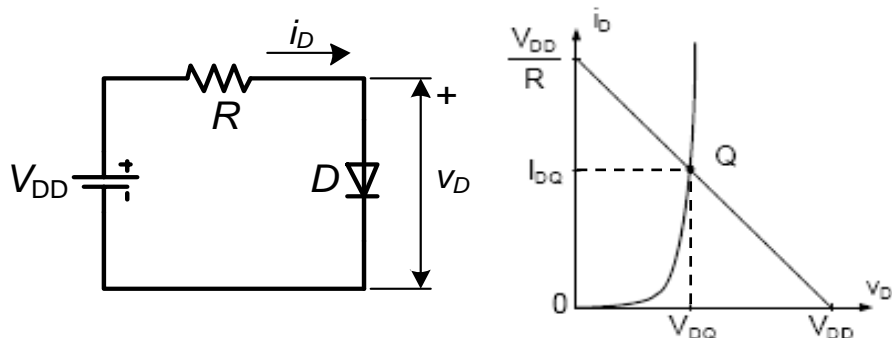
Vremenski promenljive veličine obeležavaju se malim slovima, a vremenski konstantne („jednosmerne“) veličine velikim početnim slovima. Prethodna relacija važi i za spore

promene napona diode v_D i struje diode i_D , kada glasi $i_D = I_S (e^{v_D/V_T} - 1)$, pri direktnoj i inverznoj polarizaciji diode, ali ne važi u oblasti proboja.

- Režim rada kada su naponi i struje na komponenti vremenski konstantni naziva se statički režim.

Statička karakteristika diode lako se snima pomoću principске šeme sa prethodne slike. Statička karakteristika diode zavisi od temperature diode. Sa porastom temperature raste inverzna struja saturacije spoja I_S i opada napon na provodnoj diodi V_D .

- Rešavanje jednostavnih kola sa diodama – statički režim



Za kolo sa slike važi:

$i_D = I_S (e^{v_D/V_T} - 1)$, zavisnost trenutne vrednosti struje od napona na diodi (eksponencijalna kriva).

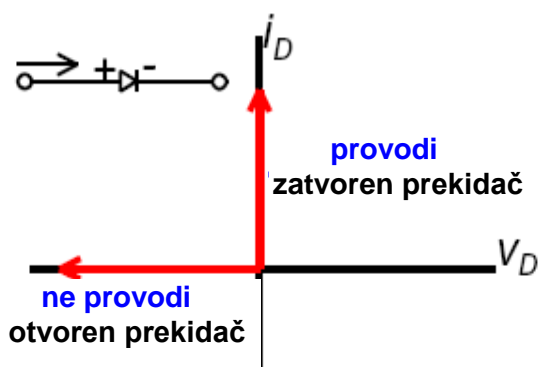
$v_D = V_{DD} - Ri_D$, tj. $i_D = (V_{DD} - v_D) / R$ jednačina naponske ravnoteže (radna prava).

Zbog prirode jednačina najjednostavnije je grafički rešiti dati sistem. U preseku karakteristike diode (eksponencijalna kriva) i radne prave nalazi se tzv. **(mirna) radna tačka** diode $Q(V_{DQ}, I_{DQ})$ čije koordinate V_{DQ} i I_{DQ} određuju napon i struju diode u kolu sa slike. Ipak, grafički metod rešavanja je krajnje nepraktičan i neprecizan.

Kako se gornji sistem sastavljen od jedne linearne i jedne nelinearne jednačine ne može tačno rešiti u zatvorenom obliku, pribegava se numeričkom rešavanju sa zadatom tačnošću. Ovakav pristup je zahvaljujući digitalnim računarima danas veoma popularan.

Numeričko rešavanje je računski isuviše intenzivno za čoveka, pa se u praktičnim primenama često koriste jednostavniji modeli diode.

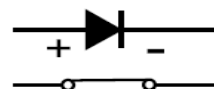
- Idealna dioda (naponom kontrolisani idealni prekidač)



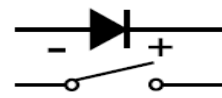
← Statička karakterisitka idealne diode

Model idealne diode je naponom kontrolisani idealni prekidač.

Kada je direktno polarisana dioda se ponaša kao zatvoreni prekidač.



Kada je inverzno polarisana dioda se ponaša kao otvoreni prekidač.

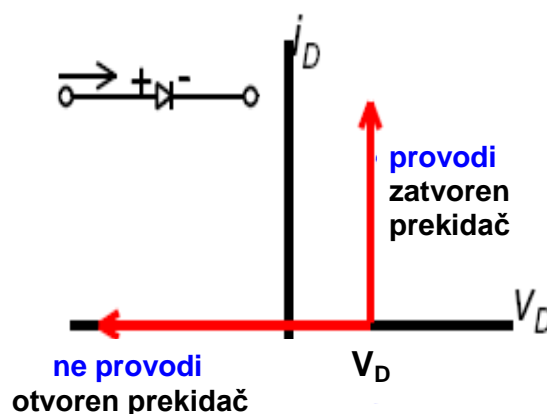


Na idealnoj diodi nema pada napona kada provodi, niti proticanja struje kada ne provodi. Takođe, njen probojni napon je „beskonačno“ veliki.

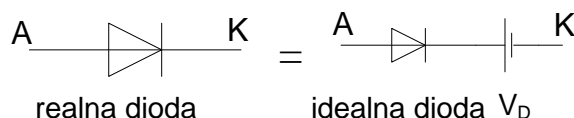
- Linearizovani model diode

Dioda provodi kada napon direktne polarizacije premaši prag provođenja PN spoja $V_{DT} = V_\gamma$, tj. kada spoljašnji napon polarizacije premaši napon potencijalne barijere PN spoja.

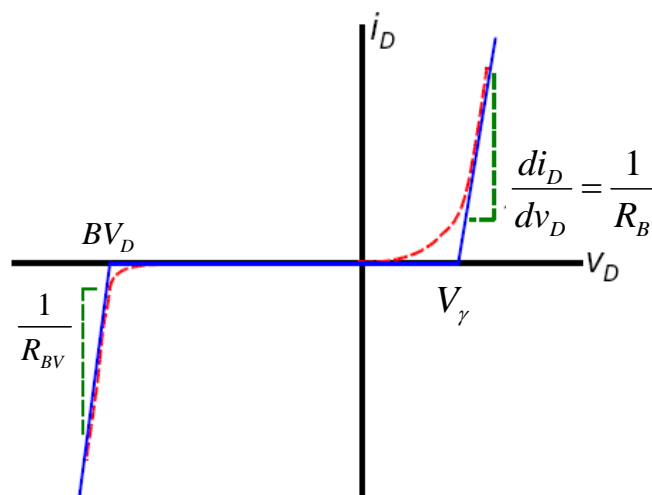
V_D je pad napona na diodi u režimu provođenja značajnih struja, tipično $V_D \approx 0.6 - 0.7[V]$.



Model diode se onda može predstaviti ekvivalentnim kolom sa slike:

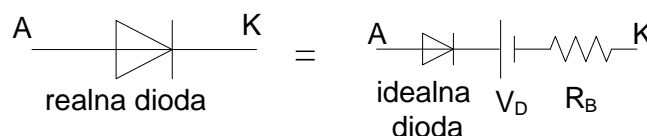


- Generalizovani linearni model diode



Statička karakteristika diode se aproksimira linearnim segmentima.

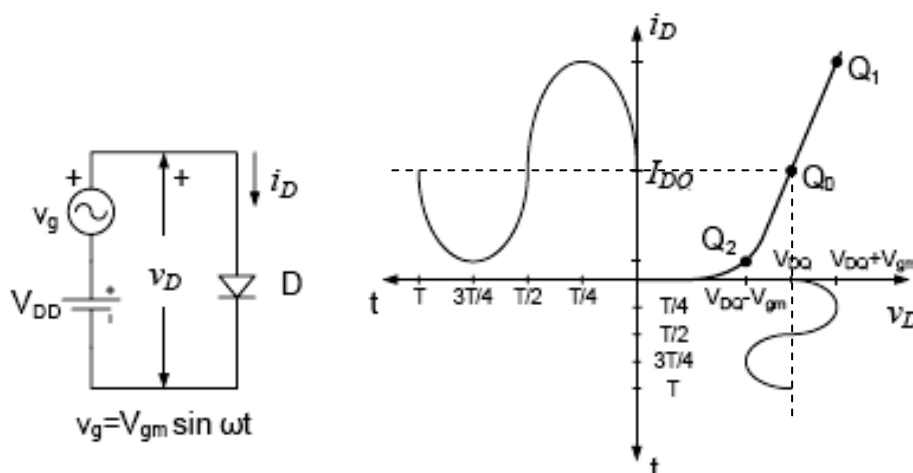
Model diode se može predstaviti ekvivalentnim kolom sa slike:



Uzima se u obzir i otpornost tela diode R_B (baze diode) pri provođenju struje. Otpornost tela diode (baze) izračunava se kao recipročna vrednost provodnosti, tj. kao recipročna vrednost nagiba linearnog segmenta karakteristike u provodnoj oblasti. Analogno, R_{BV} je otpornost tela diode u režimu proboja.

U režimu malih signala, kada se jednosmernom naponu polarizacije diode superponira mali, naizmenični, pobudni signal najčešće se koristi tzv. model za male signale.

- Model diode za male signale — dinamički režim



Jednosmerna baterija V_{DD} obezbeđuje polarizaciju diode, tj. postavljanje mirne radne tačke Q_0 u željeni deo karakteristike, u našem slučaju, na sredinu linearnog segmenta u provodnoj oblasti. Promenljiva sinusna komponenta v_g , prikazana u donjem desnom uglu statičke karakteristike, je mali naizmenični signal. Ukupan napon na diodi je onda zbir jednosmerne i naizmenične komponente: $v_D = V_{DD} + v_g$.

Pod dejstvom malog, naizmeničnog, pobudnog napona v_g radna tačka se ciklično pomera po statičkoj karakteristici između tačaka Q_1 i Q_2 , krećući se smerom $Q_2 \rightarrow Q_0 \rightarrow Q_1$ pri porastu napona i $Q_1 \rightarrow Q_0 \rightarrow Q_2$ pri opadanju napona.

Ovakvoj pobudi odgovara struja diode $i_D = I_{DQ} + i_d$ prikazana u gornjem levom uglu karakteristike. Kao što se vidi, varijacija naizmenične komponente struje diode i_d je višestruko veća od varijacije napona v_g . Odnos varijacije struje diode i_d i napona v_g određen je recipročnom vrednošću nagiba karakteristike u mirnoj radnoj tački Q_0 :

$$r_d = \frac{1}{\left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_{Q_0}} = \frac{1}{\frac{I_{DQ}}{V_T}} = \frac{V_T}{I_{DQ}} = \frac{1}{g_d}$$

i naziva se dinamička otpornost diode ili otpornost diode za mali signal. Recipročna vrednost g_d naziva se dinamička provodnost diode.

Napomena: Nagib karakteristike može se odrediti grafički ili analitički:

$$\left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_{Q_0} = \frac{d}{dv_D} \left[I_s (e^{v_{DQ}/V_T} - 1) \right] = I_s e^{v_{DQ}/V_T} \cdot \frac{1}{V_T} = \frac{I_{DQ}}{V_T}.$$

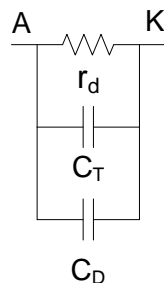
Iskorišćeno je $I_{DQ} \cong I_S e^{v_{DQ}/V_T}$, jer je u režimu vođenja značajnih struja $e^{v_{DQ}/V_T} \gg 1$. Sada konačno možemo pisati $v_d = r_d i_d$ ili $i_d = g_d v_d$.

Parametar $r_d = 1/g_d$ — dinamička otpornost diode zavisi od položaja mirne radne tačke, tj. od struje kroz diodu.

Tako dolazimo do modela diode za male, sporo promenljive signale:

$$\begin{array}{c} \text{A} \text{---} \text{---} \text{---} \text{K} \\ \quad \quad \quad r_d \end{array}, \text{ gde je } r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{1}{\left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_{Q_0}} = \frac{V_T}{I_{DQ}}.$$

Ako je pobudni signal brzo promenljiv, moramo uzeti u obzir difuzionu i kapacitivnost oblasti prostornog tovara diode.



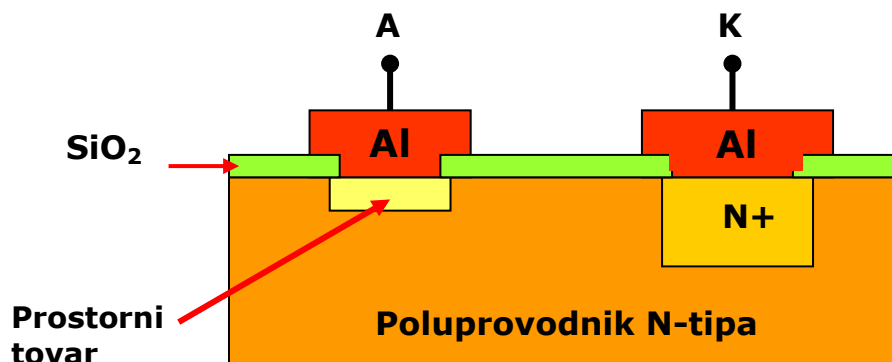
Potpuni model diode za male (naizmenične) signale za visoke frekvence u provodnom režimu.

• Rešavanje kola sa diodama primenom principa superpozicije:

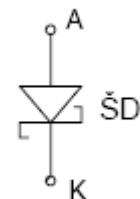
1. Anuliraju se sve vremenski promenljive (naizmenične) pobude u kolu. Odredi se položaj mirne radne tačke svake diode u jednosmernom režimu.
2. Odredi se dinamička otpornost svake diode u mirnoj radnoj tački (za brzo promenljive pobude i kapacitivnosti svake diode).
3. Anuliraju se svi jednosmerni izvori u kolu, aktiviraju naizmenični, a diode zamene dinamičkim modelom za male signale. Zatim se izračuna odziv na naizmenične pobude.

• Specijalne diode

- Šotkijeva dioda - brza usmeračka dioda, poseduje usmerački i omski kontakt.



Integrirana Šotkijeva dioda

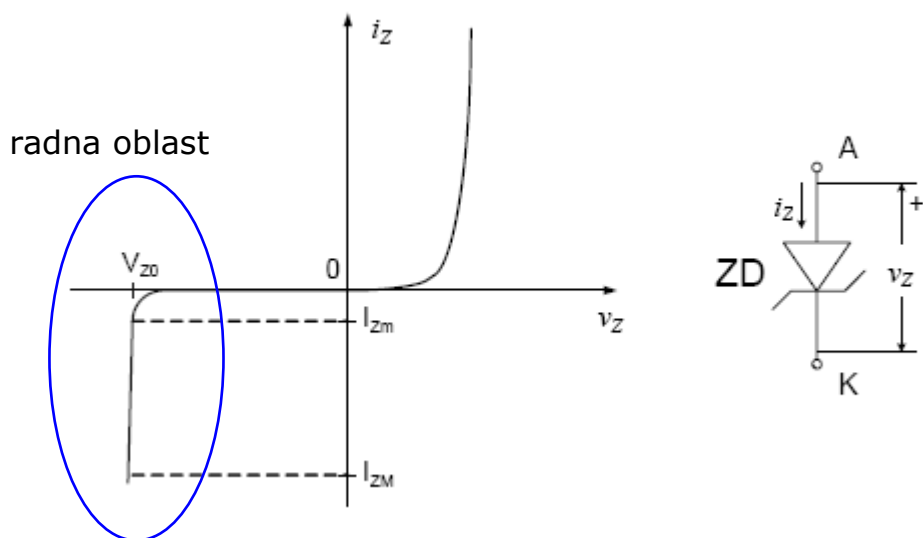


Usmerački kontakt. Metalni aluminijumski kontakt se u dodiru sa Si poluprovodnikom N tipa ponaša kao primesa P tipa. Energija slobodnih elektrona u N oblasti (provodna zona) je veća od energije elektrona u metalu, gde se valentna i provodna zona preklapaju. Elektroni slobodno prelaze iz Si u metal, ali obrnuto, zbog energetske barijere ne mogu. Kao posledica, Si N tipa će se naelektrisati pozitivno, a metalni kontakt negativno. Zato se na anodnom spoju Al—(N tip) Si stvara napon potencijalne barijere, pa se ovaj spoj ponaša kao usmerački. Napon praga provođenja ovog "PN" spoja je $V_{\gamma} \approx 0.2-0.3V$, a cela oblast prostornog tovara leži u Si poluprovodniku. Vreme rasterećivanja i nagomilavanja nosilaca u prekidačkom režimu je vrlo kratko jer u procesu provođenja struje učestvuju samo slobodni elektroni kao većinski nosioci.

Omski kontakt. Katodni spoj Al—(N⁺ ostrvo) Si je omski kontakt, jer je zbog vrlo visoke koncentracije primesa napon potencijalne barijere ovog spoja vrlo mali i može se zanemariti. Elektroni prolaze kroz ovaj spoj „tuneliranjem“ (složen kvantno-mehanički efekat). Ovaj spoj nema usmerački karakter, već predstavlja čisto omski kontakt vrlo male otpornosti.

➤ Zener dioda – referentni izvor termički stabilnog napona.

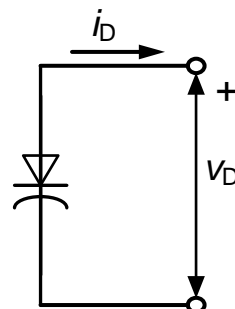
Radi u režimu tzv. Zenerovog proboja, pri inverznoj polarizaciji. Formira se od PN spoja sa vrlo visokom koncentracijom primesa. Odlikuje se relativno malim probojnim naponom i povećanom kapacitivnošću (nije pogodna za prekidački režim rada).



Kada napon inverzne polarizacije v_Z dostigne probojni Zenerov napon V_{ZD} , inverzna struja kroz diodu i_Z naglo raste, dok napon na diodi ostaje približno konstantan. Koristi se za stabilizaciju napona i izradu referentnih naponskih izvora. Vrednosti probojnog napona V_{ZD} su od 2[V] do nekoliko stotina volti. Imaju izuzetno dobru temperaturnu stabilnost Zenerovog probojnog napona.

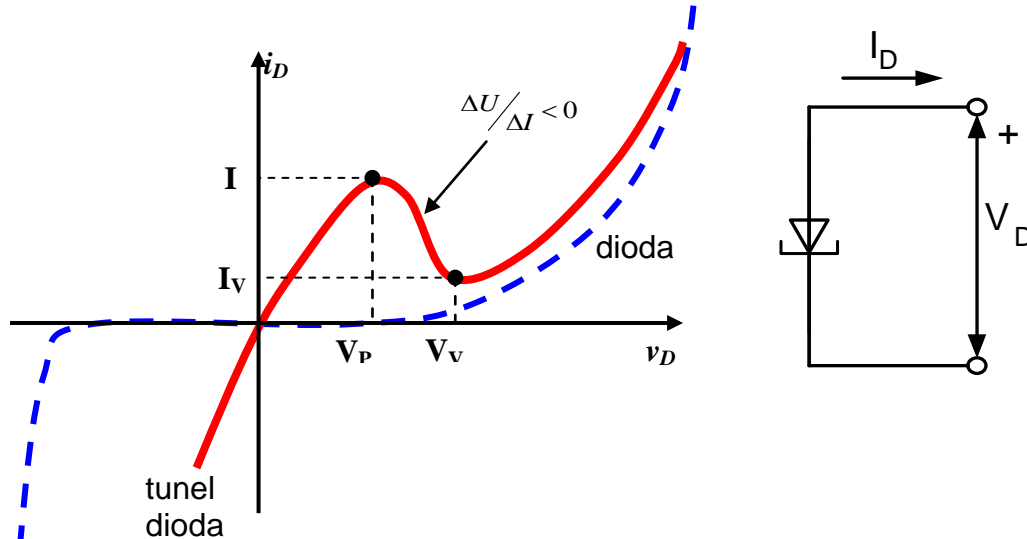
➤ Variikap dioda – dioda sa promenljivom kapacitivnošću.

Radi u inverznom režimu, kada je dominantna kapacitivnost oblasti prostornog tovara. Promenom inverznog napona na diodi menja se kapacitivnost OPT, pa se ponaša kao naponom kontrolisana kapacitivnost. Primenjuje se za stabilizaciju i podešavanje učestanosti oscilovanja.



➤ Tunel dioda – karakteristika "negativne otpornosti".

Imaju vrlo veliku koncentraciju primesa. Mehanizam tunelskog proboja omogućava proboj i pri vrlo malim naponima inverzne polarizacije. Koriste se za realizaciju oscilatora, pojačavača i brzih prekidača. U jednom delu karakteristike imaju osobinu tzv. negativne otpornosti, kada se pri porastu napona na diodi struja diode smanjuje.



➤ LED (Light Emitting Diode) dioda – emituje svetlost.

LED diode emituju svetlost pri direktnoj polarizaciji. Svetlost se emituje tokom rekombinacije elektrona sa šupljinama.

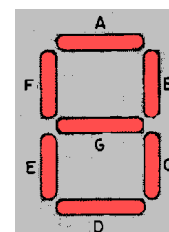
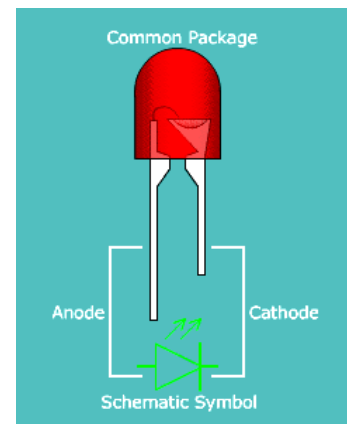
Jačina svetlosti je srazmerna naponu direktne polarizacije, a boja zavisi od vrste poluprovodničkog materijala. Uglavnom se koriste jedinjenja Galijuma (GaAs, GaP,...).

Pad napona na provodnoj diodi je tipično između 1 i 2 V.

Koriste se kao izvori nekoherentnog svetlosnog zračenja u vidljivom i nevidljivom delu spektra.

Poznat je 7-segmentni LED display.

Takođe, koriste se kao svetlosni emiteri u optičkim kablovima.



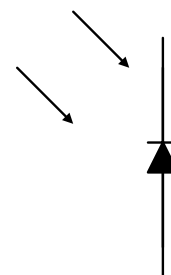
➤ Fotodioda – pretvara svetlosnu u električnu energiju.

Rade u režimu inverzne polarizacije, kada je inverzna struja zasićenja spoja proporcionalna jačini osvetljenosti diode.

Nosioci naelektrisanja generisani u oblasti prostornog tovara pomoću svetlosnih fotona (fotogeneracija) pod dejstvom zaprečnog polja u OPT bivaju lako transportovani kroz spoj do kontakata pojačavajući tako inverznu struju zasićenja.

Osetljivost fotodiode zavisi od talasne dužine upotrebljene svetlosti.

Koriste se za izradu detektora različitih vrsta zračenja, a grupisane u tzv. solarne panele (ćelije) kao izvori električne energije. Solarne ćelije rade, naravno, bez spoljašnje polarizacije.



- Optokapler – povezivanje elektronskih kola bez galvanske veze.

Optokapler sačinjavaju LED i fotodioda u istom kućištu. Optokapler služi za povezivanje elektronskih kola bez direktnog ožičavanja. Omogućava efikasno povezivanje raznorodnih sistema, kao na primer pogonskog dela i kontrolne elektronike, ili visokonaponskog i niskonaponskog dela nekog uređaja. Galvansko razdvajanje sprečava da eventualni incident u pogonskom delu ošteti kontrolnu elektroniku.

