

# Glava 1

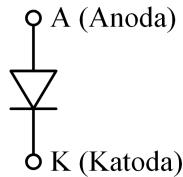
## Diode

Najjednostavniji poluprovodnički element je poluprovodnička dioda. Slično kao i otpornik, dioda ima dva kraja (izvoda, kontakta ili priključka), ali je zavisnost struje diode od napona diode nelinearna.

U prethodnoj glavi opisan je PN spoj u uslovima inverzne i direktne polarizacije. Ukoliko se spoljašnji kontakti direktno primijene sa jedne i druge strane PN spoja, dobija se dioda. Simbol i izvodi diode prikazani su na sl. 1.1. Izvod na kontaktu poluprovodnika p-tipa zove se *anoda*, a na kontaktu poluprovodnika n-tipa *katoda*. Često ove izvode (priključke) nazivamo elektrodama.

Poluprovodnička dioda ima široku primjenu. Koristi se u mnogim elektronskim kolima, kao što su, na primjer, ograničavači, ispravljači, kola za naponsku regulaciju, zatim i u nekim digitalnim kolima.

Prilikom analize električnih kola, dioda se često predstavlja svojim modelom. Postoji veći broj modela diode, ali je u mnogim primjenama sasvim dovoljno diodu predstaviti modelom idealne diode.



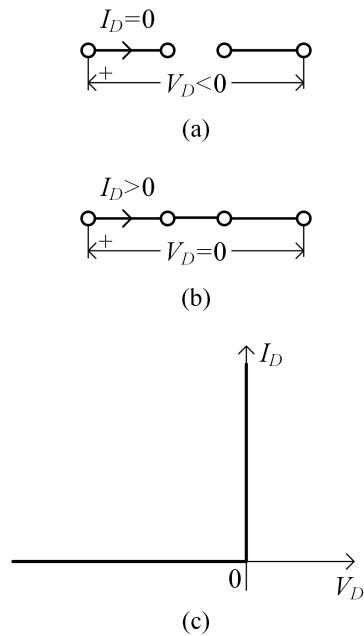
Slika 1.1. Simbol i izvodi diode

## 1.1. Idealna dioda

Model idealne diode podrazumijeva da se dioda ponaša kao idealni prekidač koji ima dva stanja.

1. U slučaju da je  $V_D < 0$ , struja diode jednaka je nuli ( $I_D = 0$ ), pa se dioda može modelovati otvorenim (isključenim) prekidačem (sl. 1.2.a).
2. U slučaju da je  $V_D = 0$ , kroz diodu protiče struja  $I_D > 0$ , pa se dioda može modelovati zatvorenim (uključenim) prekidačem (sl. 1.2.b).

Strujno-naponska karakteristika idealne diode ( $I_D = f(V_D)$ ) sastoji se od dva pravolinijska, međusobno okomita segmenta (sl. 1.2.c). Jedan segment odgovara isključenoj, a drugi uključenoj diodi.



**Slika 1.2.** Model idealne diode u isključenom stanju (a), uključenom stanju (b) i njena strujno-naponska karakteristika (c)

## 1.2. Strujno-naponska karakteristika realne diode

Na osnovu analize u Glavi 1, jasno je da se poluprovodnička dioda može realizovati kao PN spoj, pri čemu se sa obje strane PN spoja nanose kon-

takti sa izvodima. U cilju smanjenja inverzne struje zasićenja PN spoja  $I_S$ , poluprovodničke oblasti diode su više dopirane.

Strujno-naponska karakteristika realne diode prikazana je na sl. 1.3. Na ovoj karakteristici mogu se uočiti tri oblasti:

1. oblast direktne polarizacije, za  $V_D > 0$ ;
2. oblast inverzne polarizacije, za  $V_D < 0$  i
3. oblast inverznog probaja, za  $V_D < V_B$ .

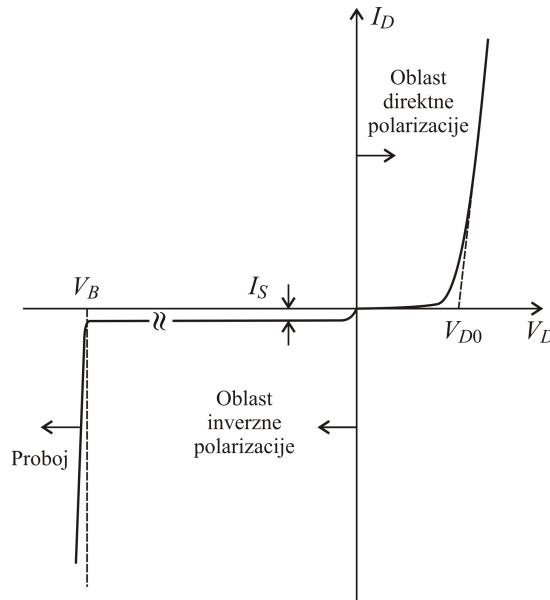
Sa  $V_B$  je označen napon probaja diode pri njenoj inverznoj polarizaciji.

### 1.2.1. Direktna polarizacija

U oblasti direktne polarizacije, zavisnost struje diode od napona  $V_D$  između anode i katode određena je jednačinom:

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{V_D}{nV_t}} - 1 \right), \quad (1.1)$$

gdje je  $I_S$  inverzna struja zasićenja PN spoja,  $V_t = kT/q$  je termički potencijal, a  $n$  je parametar koji može imati vrijednosti između jedan i dva, u



**Slika 1.3.** Strujno-naponska karakteristika realne diode

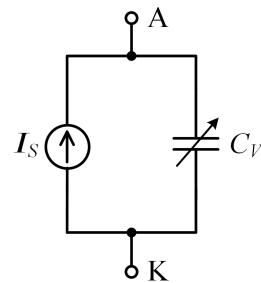
zavisnosti od materijala i fizičkih karakteristika diode. Za silicijumske diode je  $n = 1$  pri većim vrijednostima struja, dok je pri manjim strujama  $n \approx 2$ .

Pri direktnoj polarizaciji diode sve do napona  $V_{D0}$  ( $V_{D0}$  je napon praga diode ili napon vođenja diode), struja diode ima malu vrijednost. Za napone  $V_D > V_{D0}$ , struja diode eksponencijalno raste u funkciji napona  $V_D$ . Tipične vrijednosti napona vođenja silicijumskih dioda su u opsegu od 0.5 do 0.7 V. Napon vođenja se grafički može odrediti kao presječna tačka tangente na strujno-naponsku karakteristiku u njenom eksponencijalnom dijelu i naponske ose (sl. 1.3).

### 1.2.2. Inverzna polarizacija

U oblasti inverzne polarizacije struja diode  $I_D$  ima malu vrijednost i smjer od katode ka anodi, suprotan smjeru struje diode pri direktnoj polarizaciji. Polazeći od izraza (1.1), a kako je  $V_D < 0$  i  $|V_D| \gg V_t$ , eksponencijalni član u tom izrazu može se zanemariti, te je  $I_D = -I_S$ . U praksi, ova struja znatno je veća od  $I_S$  i reda je nA. Ova struja nije konstantna i blago raste sa porastom inverznog napona.

U režimu inverzne polarizacije dioda se predstavlja paralelnom vezom strujnog generatora i kondenzatora (sl. 1.4). Inverznom strujom  $I_S$  modeluje se jednosmerni režim rada, a kondenzatorom  $C_V$  dinamički režim rada diode.

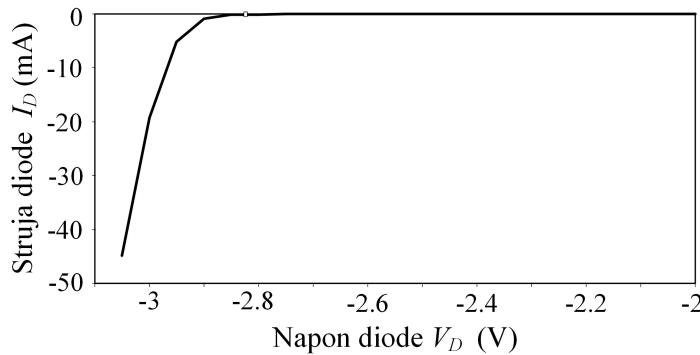


**Slika 1.4.** Model diode u režimu inverzne polarizacije

### 1.2.3. Oblast proboga

Za vrijednosti napona inverzne polarizacije diode koje su, po apsolutnoj vrijednosti, veće od probognog napona  $V_B$ , dolazi do proboga PN spoja i

struja diode naglo raste (smjer struje je od katode prema anodi). Ovaj proces ne mora biti destruktivan, ako se struja diode ograniči. Postoji i grupa dioda čija se radna tačka postavlja upravo u ovoj oblasti. To su Zener diode. Strujno-naponska karakteristika u ovoj oblasti je strma i dosta linearna. Za malu promjenu napona inverzne polarizacije dobija se značajna promjena struje diode. Na sl. 1.5 prikazan je primjer strujno-naponske karakteristike diode u oblasti inverznog probaja.



Slika 1.5. Strujno-naponska karakteristika diode u oblasti inverznog probaja

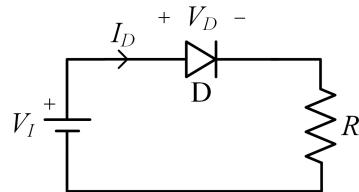
### 1.3. Određivanje statičke radne tačke

Posmatrajmo prosto kolo sa diodom koje sadrži jednosmjerni izvor napajanja  $V_I$ , diodu D i otpornik  $R$  (sl. 1.6). U ovakovom kolu, u statičkim uslovima, postoje tačno određeni napon diode i struja diode čime je definisana *statička radna tačka* diode Q ( $V_D$ ,  $I_D$ ). Ova tačka naziva se još i mirna radna tačka. Odnos napona i struje u radnoj tački diode  $R_D = V_D/I_D$  je *statička otpornost* diode u radnoj tački. Za bilo koju drugu tačku na statičkoj strujno-naponskoj karakteristici može se definisati statička otpornost diode koja predstavlja odnos napona i struje u toj tački karakteristike.

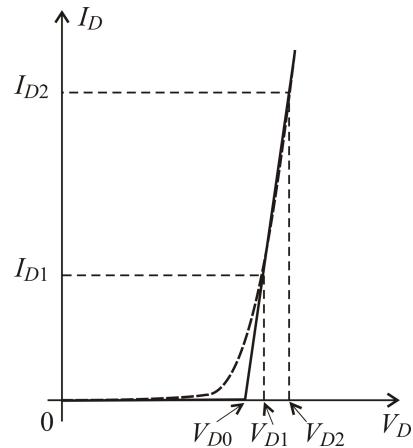
Postoji više metoda pomoću kojih se može odrediti radna tačka i oni će ovdje biti navedeni.

#### Približni metod – linearizovani model diode

Kod ovog metoda za određivanje statičke radne tačke diode koristi se *linearizovani model diode* (sl. 1.7).



**Slika 1.6.** Prosto diodno kolo za određivanje statičke radne tačke



**Slika 1.7.** Linearizacija strujno-naponske karakteristike diode

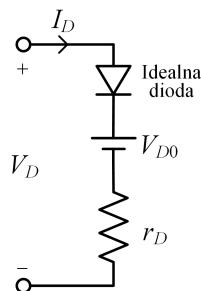
Strujno-naponska karakteristika diode se u oblasti direktne polarizacije predstavlja sa dva linearne segmenta. Prvi segment je za napone diode od 0 do  $V_{D0}$  i za ovaj opseg napona usvaja se da je struja diode jednaka nuli. Drugi segment odgovara slučaju  $V_D > V_{D0}$  i za ove vrijednosti napona struja diode je:

$$I_D = \frac{V_D - V_{D0}}{r_D}, \quad (1.2)$$

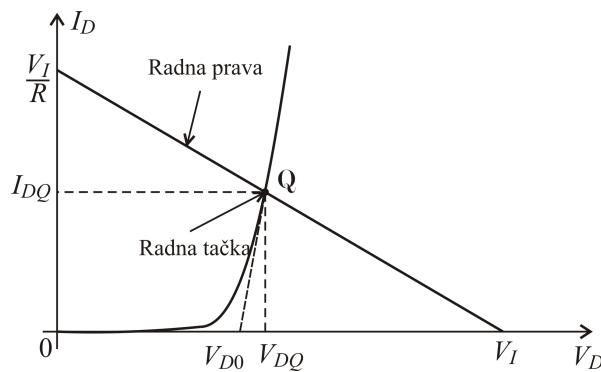
gdje je:

$$r_D = \frac{V_{D2} - V_{D1}}{I_{D2} - I_{D1}}, \quad (1.3)$$

*inkrementalna otpornost* diode. Ekvivalentno kolo za linearizovan model diode prikazano je na sl. 1.8.



Slika 1.8. Linearizovani model diode



Slika 1.9. Grafički metod određivanja statičke radne tačke

### Grafički metod

Radna tačka se može dobiti u presjeku statičke karakteristike diode i radne prave. Grafički se ova jednačina može predstaviti pravom linijom koja je određena tačkama koje presijecaju ose: za  $I_D = 0$  slijedi da je  $V_D = V_I$  i za  $V_D = 0$  slijedi da je  $I_D = V_I/R$ . Ova prava linija naziva se *radna prava* (eng. *load line*) i ima nagib  $-1/R$  (sl. 1.9). Ovakav metod određivanja statičke radne tačke zahtijeva preciznu statičku karakteristiku diode i u praksi se rijetko koristi. Koordinate radne tačke predstavljaju napon  $V_{DQ}$  i struju  $I_{DQ}$  diode za uslove polarizacije iz kola sa sl. 1.6.

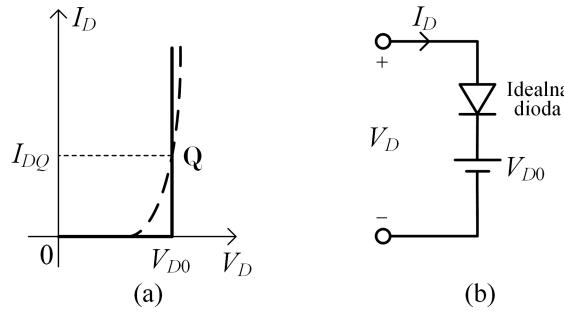
### Idealizovani model

U praksi se često koristi još jednostavniji model realne diode pri direktnoj polarizaciji. U ovom modelu zanemaruje se otpornost diode u uključenom stanju i uvažava se samo napon diode kada ona vodi. Ovaj model naziva se idealizovani model (eng. *constant-voltage-drop model*) i često se koristi u

početnim fazama analize i projektovanja kola, kada detaljne informacije o karakteristici diode nisu potrebne.

Napon  $V_D > V_{D0}$  je napon pri nominalnoj struji  $I_{DQ}$  (sl. 1.10.a) i u sebi pretpostavlja pad napona  $I_D r_D$ . Vrijednost napona  $V_D$  zavisi od struje u radnoj tački  $I_D$  i po pravilu se kreće od 0.7 V (diode male snage) do oko 1 V (diode snage).

Strujno-naponska karakteristika i ekvivalentno kolo diode predstavljene ovim modelom dati su sl. 1.10.



Slika 1.10. Strujno-naponska karakteristika (a) i idealizovani model diode (b)

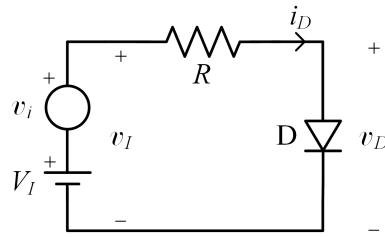
## 1.4. Model za male signale

U analizi malih signala, u kolu sa diodom, pored jednosmjernog izvora napajanja  $V_I$  koji definiše staticku radnu tačku diode u oblasti direktne polarizacije (napon polarizacije), postoji i naizmjenična pobuda  $v_i$ . Ova pobuda je obično prostoperiodična i amplituda je značajno manja od amplitude napona jednosmjernog izvora napajanja (pa se zovu još i mali signali), tako da se radna tačka diode zadržava u niskoomskoj oblasti karakteristike (sl. 1.11).

Kao posljedica prisustva jednosmjernog izvora napajanja i izvora malih signala, ukupni ulazni napon  $v_I$  jednak je zbiru napona polarizacije  $V_I$  i napona malih signala  $v_i$ . Takođe, napon diode  $v_D$  sastoji se od dvije komponente, jednosmrjerne  $V_D$  koja nastaje kao rezultat polarizacije, i komponente malih signala  $v_d$  koja nastaje kao posljedica naizmjenične pobude (sl. 1.12):

$$v_D = V_D + v_d. \quad (1.4)$$

Ukupna struja u kolu zavisiće od prisustva napona polarizacije i izvora malih



**Slika 1.11.** Diodno kolo sa izvorom malih signala

signala:

$$i_D \simeq I_S e^{\frac{v_D + v_d}{nV_t}} = I_S e^{\frac{V_D + v_d}{nV_t}} = I_S e^{\frac{V_D}{nV_t}} e^{\frac{v_d}{nV_t}}. \quad (1.5)$$

Na osnovu (1.1), jednačina (1.5) može se napisati i kao:

$$i_D = I_D e^{\frac{v_d}{nV_t}}. \quad (1.6)$$

Eksponencijalna funkcija iz (1.6) može se razviti u Meklorenov red:

$$e^{\frac{v_d}{nV_t}} = 1 + \frac{v_d}{nV_t} + \frac{1}{2!} \left( \frac{v_d}{nV_t} \right)^2 + \frac{1}{3!} \left( \frac{v_d}{nV_t} \right)^3 + \dots \quad (1.7)$$

U aproksimaciji malih signala, amplituda malog signala mora biti značajno manja od  $nV_t$  ( $v_d \ll nV_t$ ). Imajući ovo u vidu, viši članovi u razvoju reda (1.7) mogu se zanemariti pa, zamjenom u (1.6), dobijamo izraz za ukupnu struju diode:

$$i_D = I_D \left( 1 + \frac{v_d}{nV_t} \right) = I_D + I_D \frac{v_d}{nV_t} = I_D + i_d, \quad (1.8)$$

gdje je struja malih signala:

$$i_d = \frac{I_D}{nV_t} v_d. \quad (1.9)$$

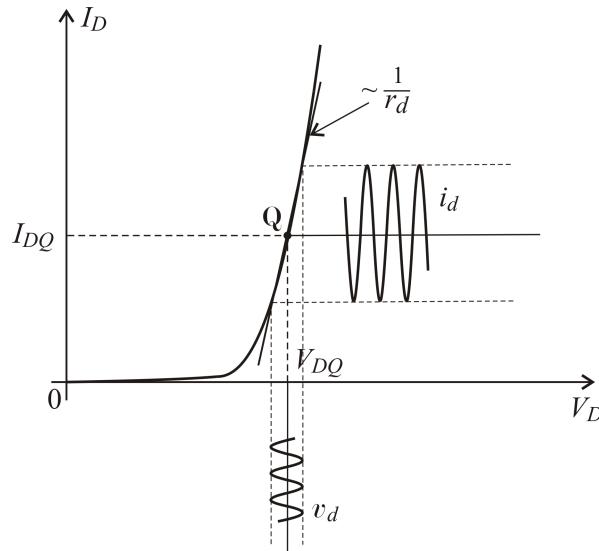
Zavisnost struje malih signala od napona malih signala je linear; koeficijent proporcionalnosti struje i napona ima dimenziju recipročne otpornosti:

$$\frac{i_d}{v_d} = \frac{I_D}{nV_t} = \frac{1}{r_d}, \quad (1.10)$$

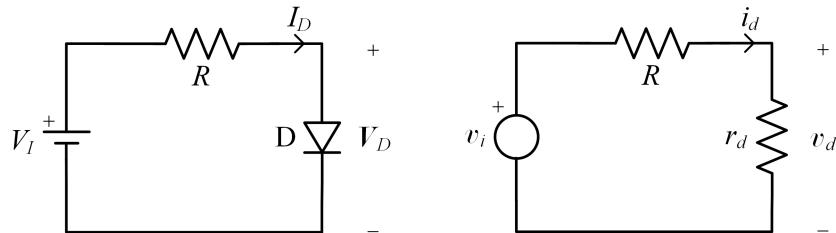
gdje je sa  $r_d$  označena *dinamička otpornost* diode:

$$r_d = \left. \frac{1}{\frac{\partial i_D}{\partial v_D}} \right|_{I_D=I_{DQ}} = \frac{nV_t}{I_D}, \quad (1.11)$$

dok je  $I_D$  struja polarizacije diode u radnoj tački.



**Slika 1.12.** Promjena radne tačke u prisustvu malih signala



**Slika 1.13.** Princip superpozicije kod analize malih signala

Napon diode, kada postoji i izvor malih signala u kolu, može se odrediti i korišćenjem sljedećeg izraza:

$$v_D = V_D + v_d = V_D + r_d i_d. \quad (1.12)$$

U aproksimaciji malih signala, za određivanje napona i struja u kolu može se koristiti teorema superpozije (ukupni odziv u kolu jednak je zbiru odziva na pojedinačne pobude), kao što je prikazano na sl. 1.13.

## 1.5. Zener dioda

U oblasti probaja, pri inverznoj polarizaciji, strujno-naponska karakteristika diode je strma, tj. za male promjene napona velike su promjene struje. Danas se proizvode diode koje su namijenjene da rade upravo u ovoj oblasti i zovu se Zener diode. Simboli Zener diode prikazani su na sl. 1.14, a njena statička karakteristika, pri inverznoj polarizaciji, na slici sl. 1.15.

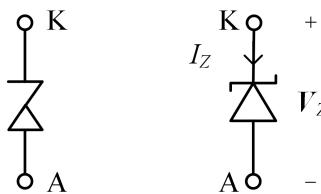
Promjena struje Zener diode sa naponom diode određena je nagibom strujno-naponske karakteristike, odnosno otpornošću:

$$r_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z}. \quad (1.13)$$

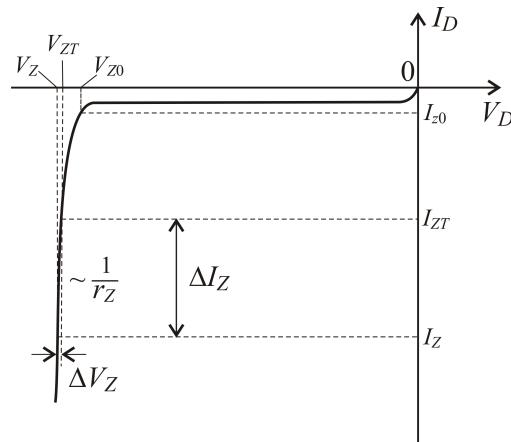
Ova otpornost naziva se *inkrementalna otpornost* Zener diode u radnoj tački i ona se daje kao kataloški podatak za određenu Zener diodu. Vrijednost otpornosti  $r_Z$  kreće se u opsegu od nekoliko oma do nekoliko desetaka oma. Proizvođač Zener dioda obično specificira napon diode  $V_{ZT}$  za testnu struju  $I_{ZT}$ . Vrijednost Zenerovog napona za koji se proizvode Zener diode kreće se u opsegu od nekoliko volti do nekoliko stotina volti.

Strujno-naponska karakteristika Zener diode je dosta linearna u oblasti u kojoj se koristi i može se predstaviti ekvivalentnim kolom prikazanim na sl. 1.16. U ovoj oblasti, Zener dioda se modeluje rednom vezom naponskog generatora ( $V_{Z0}$ ) i inkrementalne otpornosti ( $r_Z$ ). Napon Zener diode, na osnovu modela, je:

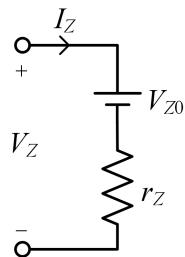
$$V_Z = V_{Z0} + r_Z I_Z. \quad (1.14)$$



**Slika 1.14.** Simboli Zener diode



**Slika 1.15.** Statička strujno-naponska karakteristika Zener diode pri inverznoj polarizaciji



**Slika 1.16.** Model Zener diode u oblasti inverznog proboja

U većini slučajeva je  $V_{Z0} \gg r_Z I_Z$ , pa je  $V_Z \simeq V_{Z0}$ , nezavisno od struje diode. Drugim riječima, radni napon Zener diode je stabilan i približno jednak njenom probojnom naponu. Zener diode se najčešće koriste kao izvori referentnog napona i u kolima naponskih ograničavača.

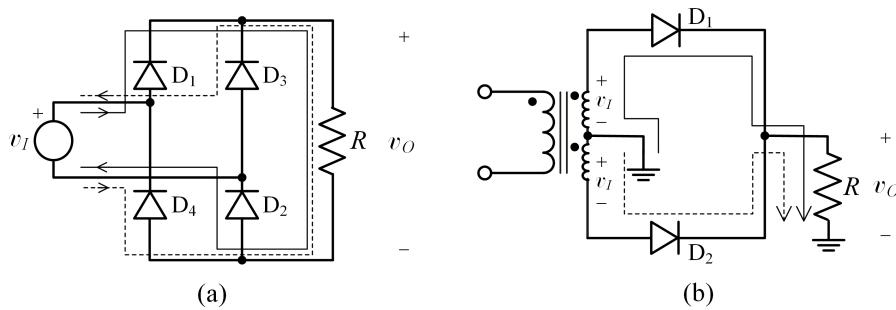
## 1.6. Dioda u ispravljačkim kolima

Vrlo značajna primjena dioda je u ispravljačkim kolima (ispravljačima). Ispravljači su osnovna kola pretvarača naizmjeničnog napona/struje u jednosmjerni napon/struju (AC/DC pretvarači). Najčešće se koriste jednofazni ili višefazni (obično trofazni) diodni punotalasni ispravljači.

### 1.6.1. Jednofazni punotalasni ispravljači

Razlikuju se dva osnovna tipa ovih ispravljača:

1. diodni mosni punotalasni ispravljač - Grecov spoj (sl. 1.17.a) i
2. diodni ispravljač sa srednjim izvodom na sekundaru transformatora (sl. 1.17.b).



**Slika 1.17.** Jednofazni punotalasni diodni ispravljači: Grecov spoj (a) i ispravljač sa srednjim izvodom na sekundaru transformatora (b)

#### Grecov spoj

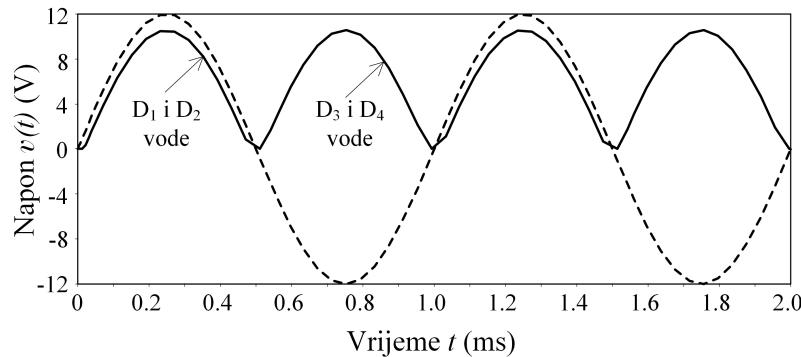
Na sl. 1.17.a prikazan je Grecov spoj i tok električne struje za vrijeme pozitivne (puna linija), odnosno negativne (isprekidana linija) poluperiode izlaznog napona. Ovaj ispravljač propušta pozitivnu poluperiodu ulaznog napona (vode diode D<sub>1</sub> i D<sub>2</sub>), a negativnu poluperiodu ispravlja (vode diode D<sub>3</sub> i D<sub>4</sub>). Talasni oblici ulaznog i izlaznog napona prikazani su na sl. 1.18.

U praksi, za veće ulazne napone, diode u mosnom ispravljaču smatraju se idealnim. U ovom slučaju, naponi dioda koje vode se zanemaruju, pa je srednja vrijednost izlaznog napona jednaka:

$$V_{Osr} = 2 \frac{V_m}{\pi}. \quad (1.15)$$

Srednja vrijednost izlazne struje je  $I_{Osr} = V_{Osr}/R$ . Za slučaj idealnih dioda, srednja vrijednost izlazne struje za ispravljač na sl. 1.17.a je:

$$I_{Osr} = 2 \frac{V_m}{\pi R}. \quad (1.16)$$



Slika 1.18. Talasni oblici ulaznog i izlaznog napona za Grecov spoj

### Punotalasni ispravljač sa srednjim izvodom na sekundaru transformatora

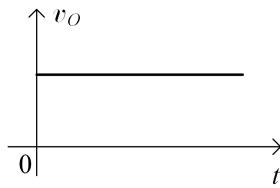
Punotalasni ispravljač sa srednjim izvodom na sekundaru transformatora (sl. 1.17.b) radi tako da u toku pozitivne poluperiode ulaznog napona vodi dioda D<sub>1</sub> (puna linija), a u toku negativne poluperiode dioda D<sub>2</sub> (isprekidana linija). Iako ima dvije diode manje u odnosu na Grecov spoj, ovaj ispravljač se rijetko koristi iz sljedećih razloga:

- neophodno je korišćenje ulaznog transformatora,
- ulazni (mrežni) transformator je složeniji nego ako se isti koristi kod Grecovog spoja i
- kod ovog ispravljača moraju se koristiti diode koje imaju dva puta veći probojni napon, nego što je to slučaj kod Grecovog spoja.

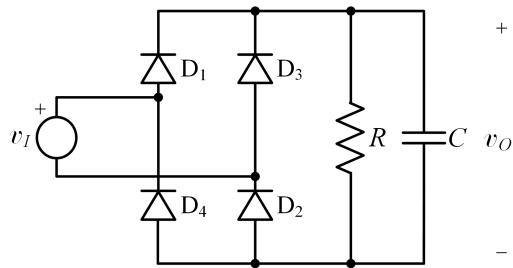
#### 1.6.2. Filtri na izlazu ispravljača

U idealnom slučaju, napon na izlazu ispravljača trebalo bi da ima oblik prikazan na sl. 1.19. Evidentno je da izlazni napon diodnog punotalasnog ispravljača znatno odstupa od idealnog oblika. Stoga, zbog značajnih pulsacija izlaznog napona, na izlazu ispravljača obično se dodaju filtri. Filter je najčešće kapacitivnog tipa i kao filter koristi se kondenzator ili više kondenzatora povezanih na odgovarajući način (sl. 1.20).

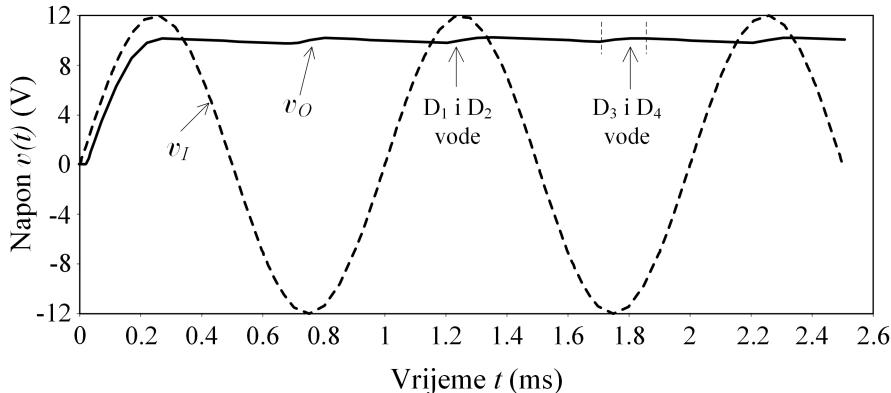
Kapacitivni filter povezuje se na izlaz ispravljača paralelno sa opterećenjem (sl. 1.20). Primjenom ovakvog filtra, smanjuju se pulsacije izlaznog napona i povećava njegova srednja vrijednost. Talasni oblici ulaznog i iz-



Slika 1.19. Talasni oblik idealnog napona na izlazu ispravljača



Slika 1.20. Kapacitivni filter na izlazu Grecovog spoja



Slika 1.21. Talasni oblici ulaznog i izlaznog napona za Grecov spoj sa kapacitivnim filtrom

laznog napona za jednofazni punotalasni ispravljač sa kapacitivnim filtrom prikazani su na sl. 1.21.

Kod ovog ispravljača razlikuju se dva karakteristična intervala u toku jednog perioda izlaznog napona:

- kraći interval, kada vodi jedan par dioda i iz primarnog izvora vrši se

- dopuna kondenzatora i obezbjeđuje energija za opterećenje i
- duži interval, kada se energija za opterećenje obezbjeđuje na osnovu akumulisane energije u kondenzatoru. Tada ne vodi nijedan par dioda. U ovom intervalu, izlazni napon je veći od ulaznog napona.

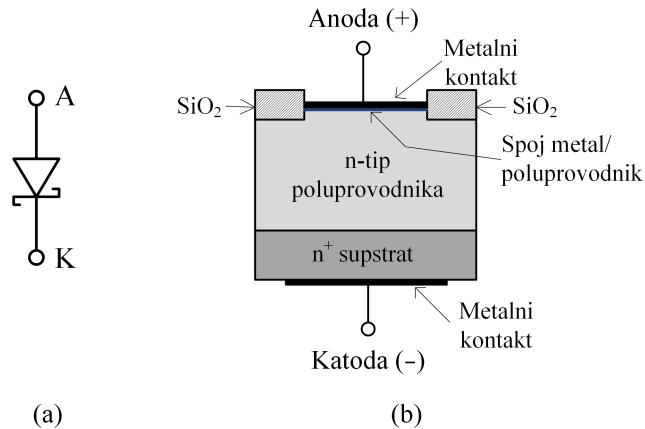
## 1.7. Tipovi dioda

Osim PN i Zener diode, primjenjuju se još neke vrste dioda. Podjela je prema strukturi, ili još češće, specifičnosti primjene. Za razliku od PN diode, Šotkijeve diode su spoj metala i poluprovodnika n-tipa, a varikap diode su invezno polarisane u radnom režimu i ponašaju se kao kondenzatori. LE diode emituju svjetlost određene boje, a fotodiode generišu struju proporcionalnu intenzitetu svjetlosti koja pada na diodu.

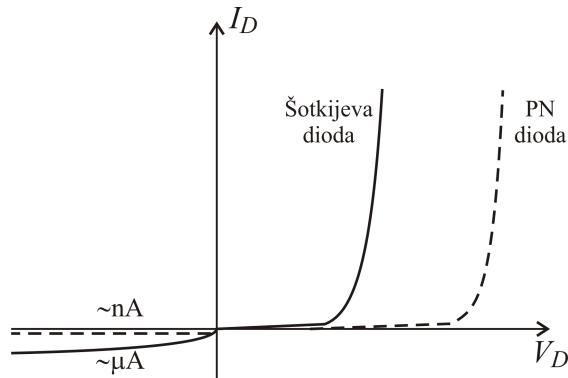
### 1.7.1. Šotkijeva dioda

Šotkijeva dioda realizuje se kao spoj posebno odabranog metala i jako dopiranog poluprovodnika n-tipa. Ovaj spoj posjeduje svojstvo usmjeravanja i naziva se Šotkijeva barijera. Simbol i poprečni presjek Šotkijeve diode prikazani su na sl. 1.22.

Kada je energija slobodnih elektrona u poluprovodniku veća nego u metalu, elektroni odlaze iz poluprovodnika u metal, a nekompenzovana pozitivna naelektrisanja gomilaju se u poluprovodniku u blizini kontakta sa



**Slika 1.22.** Simbol (a) i poprečni presjek (b) Šotkijeve diode



Slika 1.23. Strujno-naponska karakteristika Šotkijeve diode

metalom. Na taj način formira se potencijalna razlika koja sprečava prelazak elektrona iz poluprovodnika u metal. Budući da imaju malu energiju, elektroni iz metala ne prelaze u poluprovodnik. Zbog naglog prelaza iz jedne sredine u drugu kroz Šotkijevu barijeru, Šotkijeva dioda se ponaša slično PN spoju sa strmim prelazom. Ako se Šotkijeva dioda direktno polarise, potencijalna barijera se smanjuje. I obrnuto, u slučaju inverzne polarizacije, potencijalna barijera se povećava i ne dozvoljava prelazak elektronima iz poluprovodnika u metal. Napon direktne polarizacije provodne Šotkijeve diode je od 0.2 do 0.3 V i manji je od napona direktno polarisane provodne poluprovodničke diode, dok je struja pri inverznoj polarizaciji veća nego kod poluprovodničke diode (sl. 1.23).

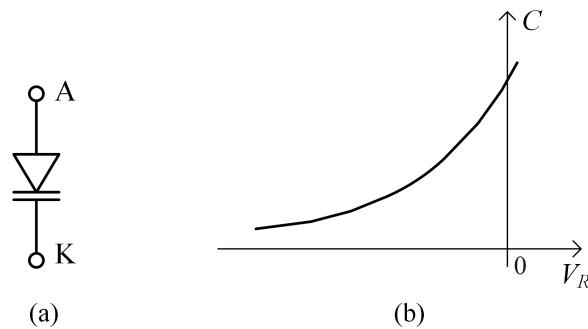
Šotkijeva dioda je brža od poluprovodničke diode, nema efekat nagomilavanja nanelektrisanja pri direktnoj polarizaciji, a i njena difuziona kapacitivnost je manja. Stoga joj je i najznačajnija primjena u brzim prekidačkim kolima. Probojni napon Šotkijeve diode prvenstveno je određen koncentracijom primjesa u epitaksijalnom sloju. Maksimalne vrijednosti probognog napona su nekoliko desetaka volti.

### 1.7.2. Varikap dioda

Varikap diode su poluprovodničke PN diode koje su tehnološki realizovane tako da sa promjenom napona inverzne polarizacije diode dobija što veća promjena kapacitivnosti. Ova pojava je karakteristična za svaki PN spoj. Međutim, varikap dioda je izvedena tako da se postigne nešto veći raspon promjene kapacitivnosti, na primjer do 10:1. Pri tome je obično širina osiromaćene oblasti proporcionalna kvadratnom korijenu primijenjenog na-

pona, pa je kapacitivnost obrnuto proporcionalna kvadratnom korijenu naponu ( $C \sim 1/\sqrt{V_R}$ ). Za realizaciju varikap dioda, pored silicijuma, koristi se i galijum-arsenid (GaAs). Simbol varikap diode i primjer promjene kapacitivnosti sa promjenom napona inverzne polarizacije prikazani su na sl. 1.24.

Najvažnija primjena varikap dioda je u realizaciji oscilatornih kola, gdje one zamjenjuju mehanički promjenljive kondenzatore. Koriste se i u naponom kontrolisanim oscilatorima (VCO), za automatsku kontrolu i modulaciju frekvencije, te u parametarskim pojačavačima.



**Slika 1.24.** Simbol varikap diode (a) i primjer promjene kapacitivnosti sa promjenom napona inverzne polarizacije (b)

### 1.7.3. LE dioda

LE dioda ili LED (eng. *Light Emitting Diode*) pripada grupi optoelektronskih poluprovodničkih komponenata. Emitovanje svjetlosti dešava se pri direktnoj polarizaciji diode i ova pojava naziva se *elektroluminiscencija*. Mnjinski nosioci nanelektrisanja injektuju se kroz PN spoj u poluprovodnik suprotnog tipa i difuziono se kreću kroz oblast. Tu se rekombinuju sa većinskim nosiocima nanelektrisanja. Tom prilikom se višak energije oslobađa u obliku fotona. Za realizaciju LE dioda koriste se odgovarajući poluprovodnički materijali, poznati kao materijali sa direktnim prelazom, među kojima su najpoznatiji GaAs, GaAsP i SiC. Simbol LE diode prikazan je na sl. 1.25.a.

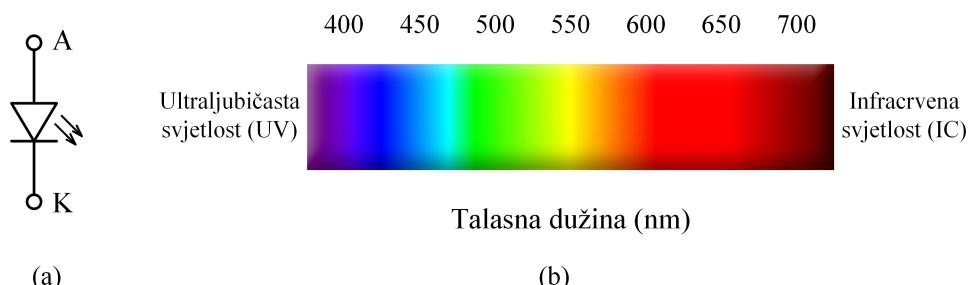
U zavisnosti od konstrukcije diode i materijala koji se koristi, LED može emitovati svjetlost različitih talasnih dužina, od ultraljubičaste, preko vidljivog spektra, do infracrvene (sl. 1.25.b). Napon LE diode pri direktnoj polarizaciji različit je i zavisi od svjetlosti koju dioda emituje, a intenzitet emitovane svjetlosti proporcionalan je struji diode (tabela 1.1).

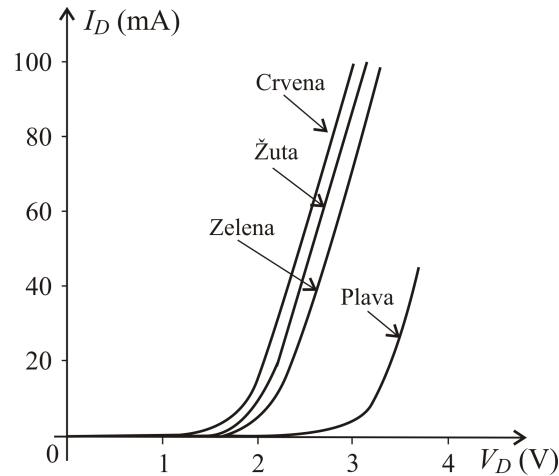
**Tabela 1.1.** Tipične vrijednosti napona direktnе polarizacije i struja kod LE dioda

Svjetlost	$V_D$ (V)	$I_D$ (mA)
Infracrvena	1.2	20 $\div$ 50
Crvena	1.8	10 $\div$ 20
Narandžasta	2.0	10 $\div$ 20
Žuta	2.1	10 $\div$ 20
Zelena	2.2	10 $\div$ 20
Plava	3.5	20 $\div$ 30
Bijela	3.5	20 $\div$ 30
Ultraljubičasta	3.6	20

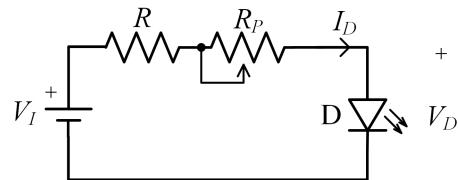
Na sl. 1.26 prikazane su strujno-naponske karakteristike LE dioda koje generišu različitu svjetlost. Uočljivo je da su ove karakteristike slične strujno-naponskim karakteristikama silicijumske PN diode, s tim što je napon provodne LED veći. Taj napon zavisi od materijala LE diode, od čega zavisi i boja emitovane svjetlosti. Tabela 1.1 pokazuje da se napon provodne LE diode kreće od oko 1 V do nekoliko volti. Za ove diode nije uobičajen rad u oblasti inverzne polarizacije i tipična vrijednost inverznog napona, pri kojoj dolazi do probroja PN spoja, kod LE dioda je oko 5 V.

U električno kolo jednosmjernog napona, LE diode se vežu serijski sa otpornikom. U zavisnosti od vrijednosti jednosmjernog napona napajanja, otpornik se bira tako da se dobije željena vrijednost struje LE diode. Ako se želi promjenjiva struja diode kojom se reguliše intenzitet svjetlosti koju emituje LE dioda, na red sa otpornikom može se vezati promjenljivi otpornik (sl. 1.27).

**Slika 1.25.** Simbol LE diode (a) i spektar vidljive svjetlosti (b)



Slika 1.26. Strujno-naponska karakteristika različitih LE dioda



Slika 1.27. Osnovno kolo sa LE diodom

### Primjena LE dioda

LE diode obično se pakaju u odgovarajuća prozirna kućišta (sl. 1.28.a), pri čemu je izvod katode kraći od izvoda anode. Uobičajeno se kao indikatori stanja elektronskih uređaja koriste LE diode koje emituju vidljivu svjetlost. LE dioda se često primjenjuje i u LED displejima. U primjenama je široko rasprostranjen 7-segmentni LED displej koji se koristi za prikaz brojnih vrijednosti, najčešće u mjernim instrumentima (sl. 1.28.b).

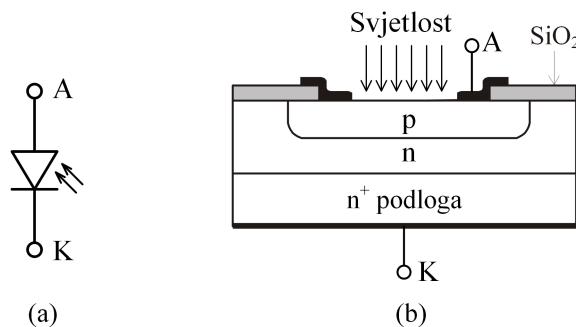
LE diode se sve više koriste i za rasvjetu. Više LE dioda se grupiše tako da formiraju LED lampu. Ove lampe karakteriše mala potrošnja i dosta dug vijek trajanja u odnosu na sijalice sa žarnim nitima i druga rasvjetna tijela.



**Slika 1.28.** Uzorci LE dioda koje su pakovane u različita prozirna kućišta (a) i 7-segmentni LED displej (b)

#### 1.7.4. Fotodioda

Fotodioda je optoelektronska komponenta koja radi u inverznom režimu. Sama dioda ima mali transparentni otvor koji omogućava prodiranje upadne svjetlosti do PN spoja. Na sl. 1.29 prikazani su simbol i poprečni presjek fotodiode.

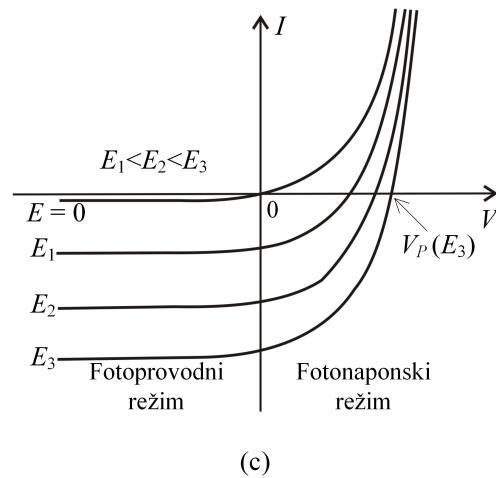
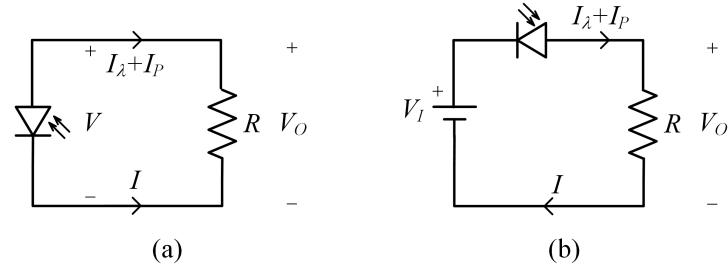


**Slika 1.29.** Simbol fotodiode (a) i poprečni presjek (b)

Kada dioda nije osvijetljena, kroz diodu protiče inverzna struja  $I_\lambda$ , koja se zove *struja tame* (eng. *dark current*). Vrijednost ove struje je mala, slično inverznoj struci zasićenja kod standardnih PN dioda. Vidjeli smo da se inverzna struja zasićenja mijenja sa promjenom temperature. Kod fotodiode inverzna struja zasićenja mijenja se sa promjenom intenziteta upadne svjetlosti. Naime, prilikom osvjetljavanja diode, uslijed energije upadne svjetlosti dolazi do generacije parova elektron-šupljina i raste vrijednost inverzne struje fotodiode (fotostruja  $I_P$ ). Ukupna struja fotodiode jednaka je zbiru fotostruje i struje tame. Da bi se povećala osjetljivost struje na intenzitet

upadne svjetlosti, neophodno je da struja tame ima što je moguće manju vrijednost.

Na sl. 1.30.c prikazane su strujno-naponske karakteristike fotodiode.



**Slika 1.30.** Osnovna kola fotodiode kod fotonaponskog (a) i fotoprovodnog (b) efekta i strujno-naponske karakteristike fotodiode (c)