

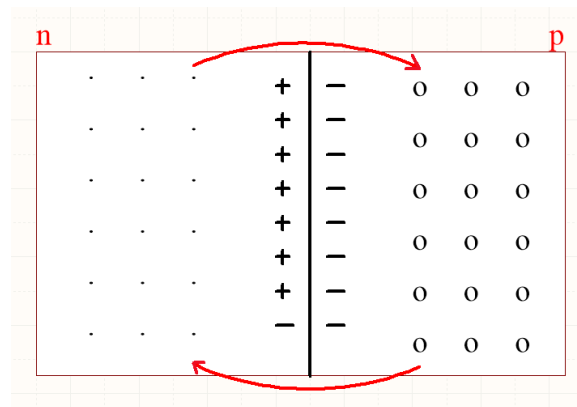
# Hardverski interfejs

## Vežbe 4

### Diode

#### Uvod:

Dioda je elektronska komponenta sa dve elektrode koje se nazivaju anoda i katoda. Dioda su napravljene na bazi p-n spoja. P-tip predstavlja poluprovodnički materijal (silicijum) u koji je ubačena trovalentna primesa (akceptor), dok n-tip predstavlja poluprovodnički materijal u koji je ubačena petovalentna primesa (donor).

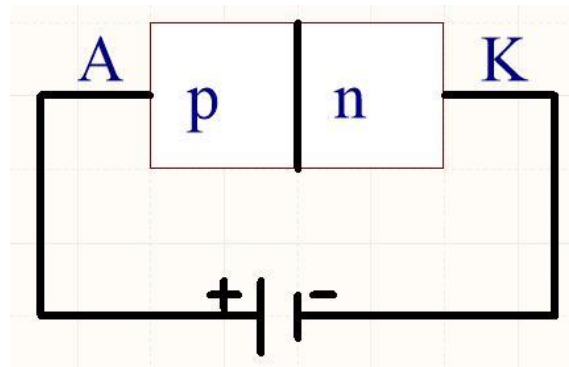


Pošto na n-strani ima mnogo više elektrona oni difuzijom prelaze na p-stranu. Na p-strani je dospeli elektron okružen sa mnogo šupljina što daje veliku verovatnoću da se prispeli elektron rekombinuje. Posle rekombinacije jedan negativan akceptorski jon na p-strani i jedan pozitivni donorski atom na n-strani ostaju električno nekompenzovani. Najverovatnije je da nekompenzovani joni nastaju u blizini p-n spoja jer su najbliži suprotnim stranama. Na sličan način šupljine prelaze sa p-strane na n-stranu gde se rekombinuju i ostavljaju po jedan nekompenzovani donorski i akceptorski jon. Dakle, kao posledica difuzije i rekombinacije, dolazi do stvaranja, neposredno uz fizički p-n spoj, oblasti sa nekompenzovanim donorskim i akceptorskim jonima, koja se naziva **oblast prostornog tovara**.

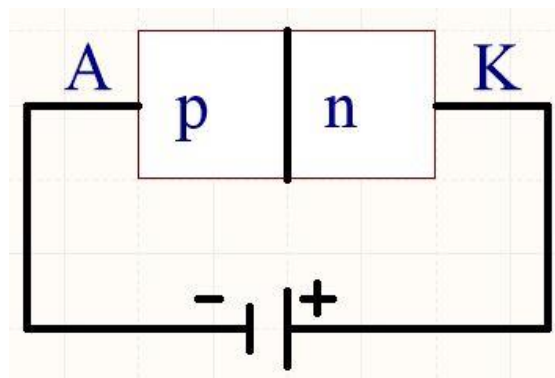
Formirani prostorni tovar stvara električno polje čiji smer je takav da teži da zaustavi proces difuzije koji ga stvara. Tako dolazi do ravnoteže pri kojoj je veličina oblasti prostornog tovara naelektrisanja konstantna.

U slučaju direktno polarisanog p-n spoja oblast prostornog tovara je uža nego u slučaju bez spoljašnje polarizacije, dok ukoliko je p-n spoj inverzno polarisan oblast prostornog tovara je šira nego u slučaju bez spoljašnje polarizacije.

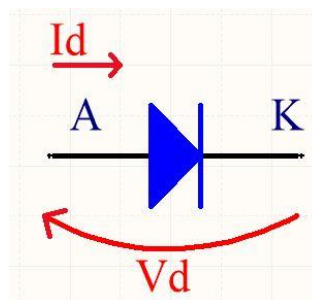
Direktno polarisan p-n spoj:



Inverzno polarisan p-n spoj:



Referentni smerovi na diodi

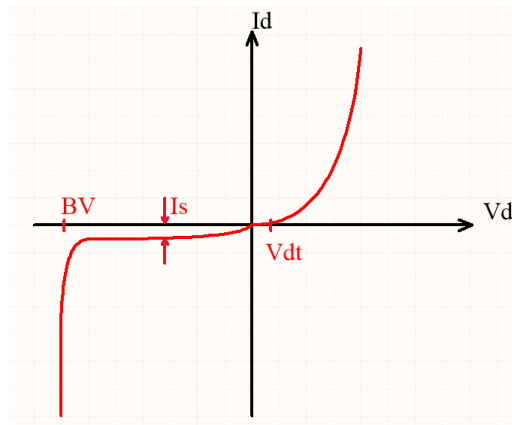


Na p-n spoju mogu da se jave dva tipa proboja (za radoznale):

1. Lavinski – nastaje usled velikog spoljašnjeg polja. Ovo polje ubrzava slobodne nosioce naelektrisanja koji udaraju u naelektrisanja u O.P.T. izbijaju ih, oni udaraju u sledeća, pa u sledeća i na taj način se stvara lavina, odnosno velika struja koja može da uništi p-n spoj. Ovaj proboj ima pozitivan temperaturni koeficijent, a to znači da je sa povećanjem temperature potreban veći napon da dovede do proboja. To se dešava zato što je pri povećanoj temperaturi haotičnije kretanje nosilaca naelektrisanja pa je potreban veći napon da bi se napravio usmereni tok.
2. Zenerov – ovaj proboj nastaje kao posledica velike koncentracije ubačenih primesa. Zbog toga se stvara veliko ugrađeno polje koje će izbijati pozitivna i negativna naelektrisanja iz O.P.T. i stvarati usmereni tok koji može uništiti p-n spoj. Ovaj proboj

ima negativan temperaturni koeficijent, a to znači da je pri večji temperaturi potreban manji napon da dovede do proboja, zato što se pri večji temperaturi lakše raskidaju kovalentne veze pa je potreban manji napon da stvori nove nosioce naelektrisanja.

Strujno – naponska karakteristika diode:



Slika iznad prikazuje zavisnost struje kroz diodu i napona na diodi, gde su:

- $V_{dt}$  – prag provođenja diode, predstavlja napon direktno polarisane diode pri kome ona počinje приметно da provodi struju
- $I_s$  – inverzna struja saturacije diode i predstavlja struju kroz diodu kada je katoda na dovoljno većem naponu u odnosu na anodu
- $BV$  – napon proboja diode

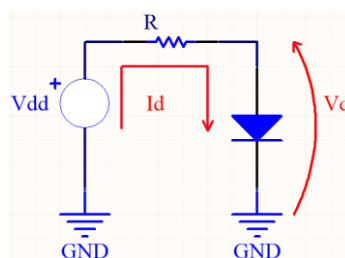
Ova kriva (izuzev dela u oblasti proboja) može se opisati jednačinom:

$$i_d = I_s \cdot (e^{\frac{v_d}{v_t}} - 1)$$

$v_t$  – predstavlja termički napon (oko 25 mV)

Određivanje radne tačke diode:

Radna tačka je određena parom struje i napona ( $I_{DQ}$ ,  $V_{DQ}$ ) koji se nalazi na strujno-naponskoj karakteristici diode.



Za kolo sa slike važi:

$$V_{dd} = I_d \cdot R + V_d$$

Ova jednačina predstavlja uticaj spoljnih elemenata kola koji primoravaju diodu da se postavi u radnu tačku.

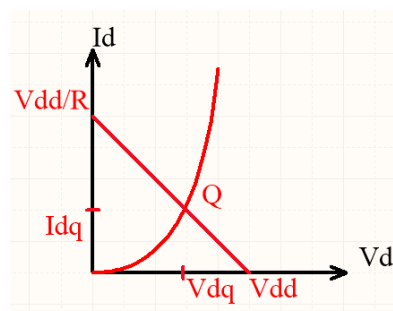
Najpre se određuje radna prava. Radna prava se može dobiti iz prethodne jednačine uzimanjem graničnih vrednosti za  $I_d$  i  $V_d$ .

Za  $I_d = 0$ :

$$V_d = V_{dd}$$

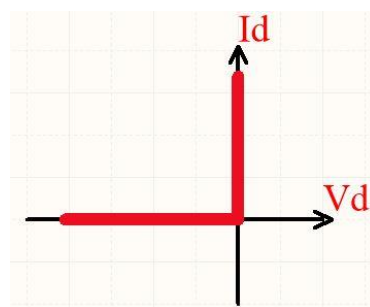
Za  $V_d = 0$ :

$$I_d = \frac{V_{dd}}{R}$$



U preseku karakteristike diode i radne prave dobija se radna tačka diode.

Model idealne diode:



Dioda je nelinearan element, a sa druge strane, analiza linearnih kola je poznata. Stoga je pogodno izvršiti linearizaciju karakteristike diode u delovima. Model **idealne diode** je najprostiji model linearizacije diode. Strujno-naponska karakteristika diode se sastoji iz dva linearna segmena. Ako je dioda direktno polarisana, napon na diodi je 0, dok ukoliko je dioda inverzno polarsana, struja kroz diodu je 0.

Za  $I_d > 0$ :

$$V_d = 0$$

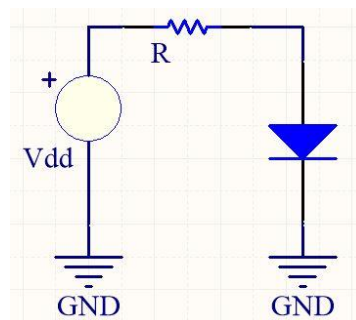
Za  $V_d < 0$ :

$$I_d = 0$$

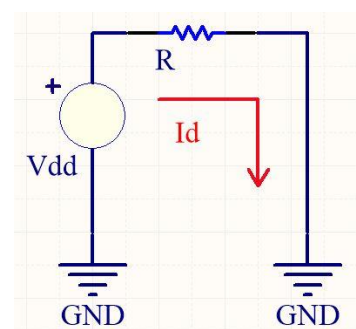
Sada se dioda može smatrati kao element sa dva stanja. Dioda provodi u „on“ stanju i ne provodi u „off“ stanju. U analizi kola, ako dioda provodi (on), dioda je predstavljena kratkim spojem. Dioda koja ne provodi (off) predstavljena je otvorenom vezom.

Napomena: Sve što je označeno plavom bojom na crtežima u sklopu zadataka je deo postavke zadataka, a sve što je označeno crvenom bojom dodato je u postupku rešavanja zadataka.

**Primer 1:** Odrediti struju kroz kolo koristeći model idealne diode, ako je  $V_{dd} = 10V$ , a  $R = 10\text{ k}\Omega$ .



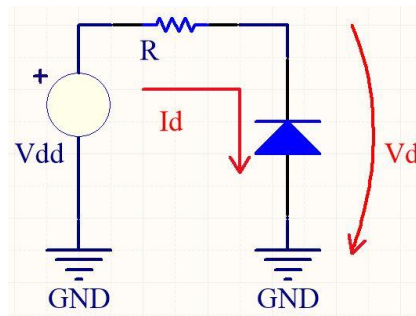
Pošto je očigledno da je dioda direktno polarizovana, to se pretpostavlja da dioda provodi, odnosno može se predstaviti kao kratak spoj.



$$I_d = \frac{V_{dd}}{R} = \frac{10V}{10k\Omega} = 1mA$$

Dakle, dioda provodi. Radna tačka je  $Q(1\text{ mA}, 0\text{ V})$ .

Primer 2: Odrediti napon na diodi koristeći model idealne diode ako je  $V_{dd} = 10V$ , a  $R = 10\text{ k}\Omega$ .



U ovom slučaju očigledno je da je dioda inverzno polarisana, pa je pretpostavka da dioda ne provodi.

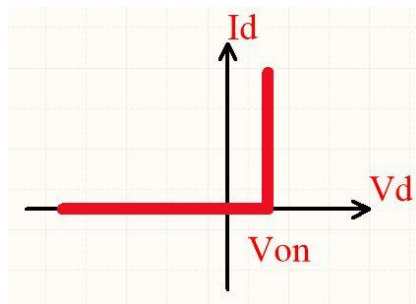
$$-V_{dd} + R \cdot I_d - V_d = 0$$

S obzirom na to da dioda ne provodi, to je  $I_d = 0$ .

$$V_d = -V_{dd} = -10V$$

Dakle, dioda ne provodi. Radna tačka je  $Q(0\text{ A}, -10\text{ V})$ .

Model konstantnog pada napona:



Poznato je da dioda pri provođenju ima skoro konstantan pad napona pri direktnoj polarizaciji. Model idealne diode ne uključuje ovaj pad napona. Model konstantnog pada napona pomera karakteristiku idealne diode i na taj način uključuje pad napona na diodi.

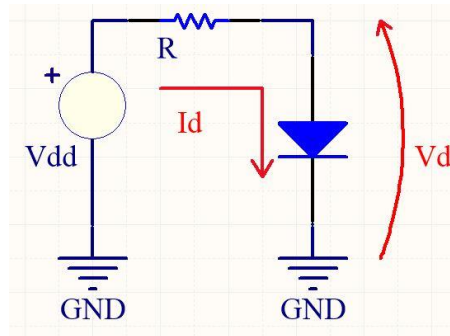
Za  $I_d > 0$ :

$$V_d = V_{on}$$

Za  $V_d < V_{on}$ :

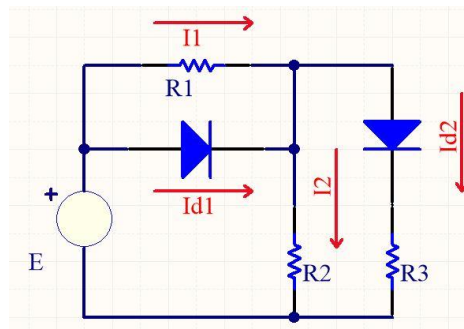
$$I_d = 0$$

Primer 3: Odrediti struju kroz diodu, ako je ona aproksimirana modelom konstantnog pada napona i ako je :  $V_{dd} = 10V$ ,  $R = 10k\Omega$  i  $V_{on} = 0.6V$ .



$$I_d = \frac{V_{dd} - V_{on}}{R} = \frac{(10 - 0.6)V}{10 k\Omega} = 0.94 mA$$

Primer 4: Na slici je prikazano kolo sa dve diode modelovane konstantnim padom napona. Odrediti struju kroz obe diode ako je  $E = 10V$ ,  $R_1 = 1k\Omega$ ,  $R_2 = 2k\Omega$ ,  $R_3 = 3k\Omega$ . Pad napona na diodama u provodnom stanju je  $0.6V$ .



$$E - V_{d1} - R_2 \cdot I_2 = 0$$

$$I_2 = \frac{E - V_{d1}}{R_2} = 4.7 mA$$

S obzirom na to da je napon na otporniku  $R_1$  zapravo napon na diodi  $V_{d1}$ , možemo napisati:

$$I_1 = \frac{V_{d1}}{R_1} = 0.6 mA$$

$$I_2 \cdot R_2 = V_{d2} + I_{d2} \cdot R_3$$

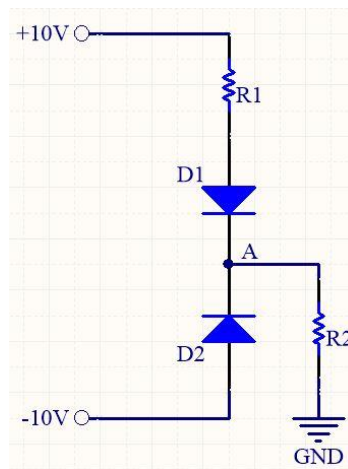
$$I_{d2} = \frac{I_2 \cdot R_2 - V_{d2}}{R_3} = 2.93 \text{ mA}$$

Na osnovu Kirhofovog zakona za struje važi:

$$I_1 + I_{d1} = I_{d2} + I_2$$

$$I_{d1} = I_{d2} + I_2 - I_1 = 7.03 \text{ mA}$$

**Primer 5:** Naći potencijal tačke A u odnosu na masu. Dioda su modelovane konstantnim padom napona, koji u provodnom stanju iznosi 0.6 V.  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10 \text{ M}\Omega$ .



Dioda  $D_2$  je inverzno polarizovana, jer je anoda negativnija u odnosu na katodu. Zbog toga je struja koja prolazi kroz nju 0 (dioda ne provodi), odnosno struja koja prolazi kroz otpornik  $R_1$  jednaka je struji koja prolazi kroz otpornik  $R_2$ .

$$10\text{V} - R_1 \cdot I - V_{d1} - R_2 \cdot I = 0$$

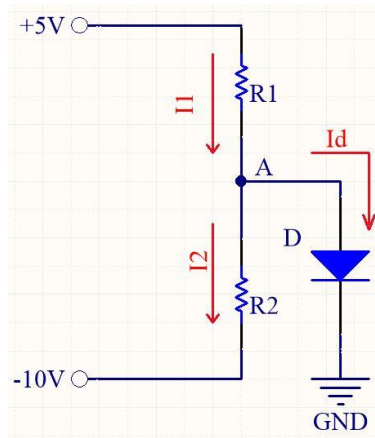
$$I = \frac{10\text{V} - 0.6\text{V}}{1\text{k}\Omega + 10\text{M}\Omega} = 939.9 \text{ nA}$$

$$V_A = R_2 \cdot I = 9.399 \text{ V}$$

**Primer 6:** Naći označene struje u kolu. Dioda je modelovana konstantnim padom napona koji iznosi 0.6 V u provodnom stanju.  $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 4 \text{ k}\Omega$ .

Prvo je potrebno izračunati potencijal tačke A u odnosu na masu, kada je dioda odspojena, da bi se videlo da li dioda može da provodi ili ne (kako bi se znalo da li je struja kroz otpornik  $R_1$  jednaka struji kroz otpornik  $R_2$  sa diodom u kolu ili nije). To se može izračunati primenom metoda superpozicije.





$$V_A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot 5V + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot (-10V) = 2V$$

Dakle, dioda, kada se priključi, može da provodi (anoda će biti na većem potencijalu u odnosu na katodu). Ako se definiše kontura od +5V do GND dobija se:

$$5V - R_1 \cdot I_1 - V_d = 0$$

Potencijal tačke A u odnosu na masu, kada se dioda priključi u kolo, biće naravno onoliko koliki iznosi napon diode u provodnom stanju  $V_d$ .

$$I_1 = \frac{5V - V_d}{R_1} = 4.4 \text{ mA}$$

Ako se definiše kontura od GND do -10V dobija se:

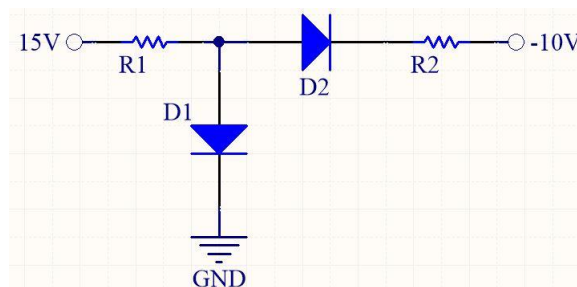
$$V_d - R_2 \cdot I_2 - (-10V) = 0$$

$$I_2 = \frac{V_d - (-10V)}{R_2} = 2.65 \text{ mA}$$

Na osnovu Kirhofovog zakona za struje dobija se:

$$I_d = I_1 - I_2 = 1.75 \text{ mA}$$

**Primer 7:** U kolu sa slike odredi struje kroz diode  $D_1$  i  $D_2$ . Dioda su predstavljene idealnim modelom.  $R_1 = 10k\Omega$ ,  $R_2 = 5k\Omega$ .



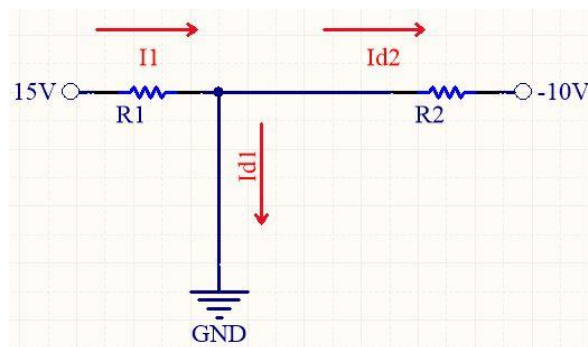
Pošto svaka dioda ima dve oblasti linearnosti postoji ukupno 4 moguća stanja prikazanog kola. S obzirom na to da postoji samo jedno tačno stanje kola, u nastavku se neće razmatrati sva 4 moguća scenarija, već ono rešenje koje se poklopi sa pretpostavkom, uzeće se kao tačno.

### 1. pretpostavka

- Dioda  $D_1$  provodi

- Dioda  $D_2$  provodi

Stoga se prethodno kolo može predstaviti na sledeći način:



$$I_1 = \frac{(15 - 0)V}{10k\Omega} = 1.5 \text{ mA}$$

$$I_{d2} = \frac{0 - (-10)V}{5k\Omega} = 2 \text{ mA}$$

Po Kirhifovom zakonu za struje dobija se:

$$I_{d1} = I_1 - I_{d2} = -0.5 \text{ mA}$$

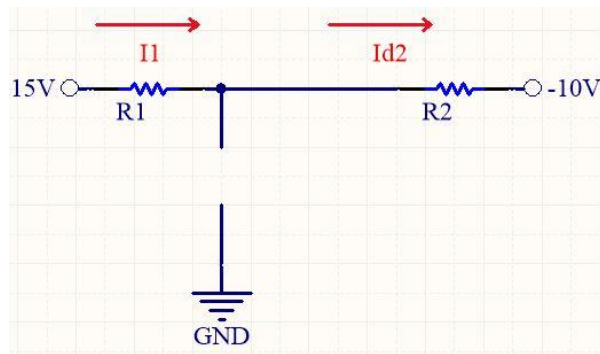
Napomena: Iako izgleda neispravno da protiče kroz kratak spoj, struja  $I_{d1}$  postoji jer je u originalnom kolu dioda na tom mestu, a kratak spoj u ovom slučaju je samo aproksimacija koristeći model idealne diode.

Struja  $I_{d2}$  je veća od 0, dakle dioda  $D_2$  provodi, što je u skladu sa pretpostavkom. Međutim, struja  $I_{d1}$  je manja od 0, dioda  $D_1$  nije u provodnom režimu, što nije u skladu sa pretpostavkom.

### 2. pretpostavka

- Dioda  $D_1$  ne provodi

- Dioda  $D_2$  provodi



$$I_1 = I_{d2} = \frac{(15 - (-10))V}{(10 + 5)k\Omega} = 1.67 \text{ mA}$$

$$V_{d1} = 15V - R_1 \cdot I_1 = 15V - 16.7V = -1.67V$$

Ovo je očigledno dobro rešenje, odnosno polazna pretpostavka je bila dobra. Dioda D<sub>1</sub> zaista ne provodi, a dioda D<sub>2</sub> je zaista u provodnom režimu.