

Elektronički Elementi i Sklopovi

Sadržaj Kolegija:

1. Schocklyeva jednadžba
2. Probojni napon diode
3. Usporedba karakteristika Ge,Si i GaAs dioda
4. Utjecaj temperature na strujno-naponsku karakteristiku diode
5. Idealne i stvarne diode
6. Statički otpor diode
7. Dinamički otpor diode
8. Ukupni otpor diode

Schocklyeva jednadžba

Shocklyeva jednadžba vrijedi kod propusne i kod nepropusne polarizacije diode:

$$(1) I_D = I_S(e^{V_D/nV_T} - 1)$$

Gdje je I_S struja zasićenja, V_D je napon propusne polarizacije, n je faktor između 1 i 2 (ovisno o konstrukciji diode, obično uzimamo $n = 1$) i V_T je termalni napon.

Termalni napon V_T može se izračunati iz formule:

$$(2) V_T = \frac{k T_K}{q}$$

gdje je:

k – Boltzmannova konstanta, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

T_K - absolutna temperatura u kelvinima ($273 + \text{ sobna temperatura u } ^\circ\text{C}$)

q – naboj elektrona, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

Schocklyeva jednadžba

PRIMJER 1. Na temperaturi od 27°C (uobičajena temperatura elektroničkih komponenti zatvorenih u kućište) treba odrediti termalni napon V_T .

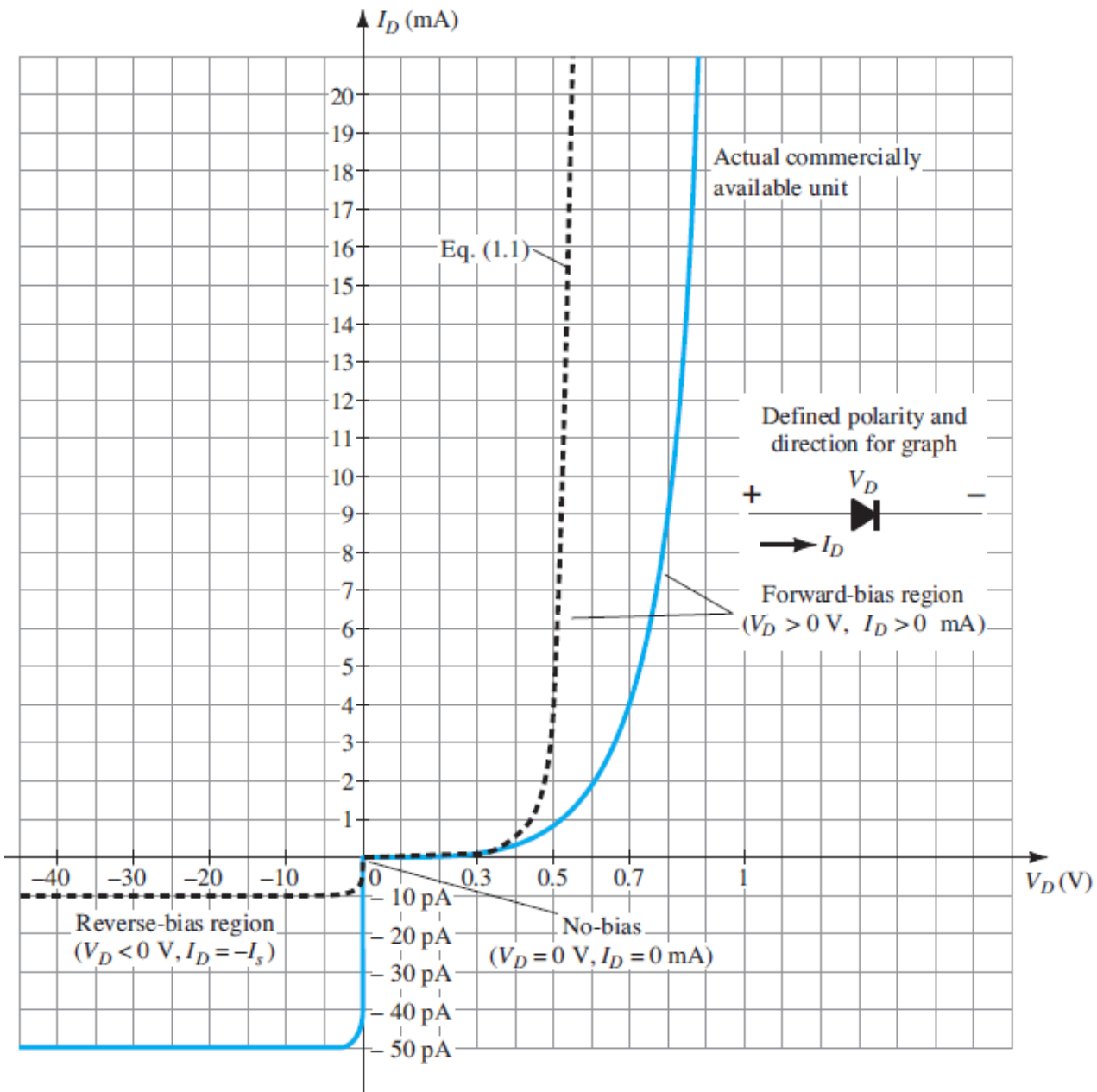
Rješenje: prvo izračunamo temperaturu u kelvinima:

$$T = 273 + 27^{\circ}\text{C} = 300\text{K}$$

termalni napon:

$$V_T = \frac{k T_K}{q} = \frac{(1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) \cdot 300\text{K}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} = 25.875\text{mV} \cong 26\text{mV}$$

Ovaj izračunati termalni napon je važan parametar u budućim razmatranjima!



Schocklyeva jednadžba

U praksi je reverzna struja zasićenja I_S obuhvaćena Schocklyevom jednadžbom bitno manja od reverzne struje I_r koju možemo izmjeriti na realnoj diodi.

Niz faktora koji nisu obuhvaćeni Schocklyevom jednadžbom doprinosi tom povećanju reverzne struje:

- struje curenja
- generacija nosioca naboja u osiromašenom području
- dopiranje atomima nečistoća veće od predviđenog
- povećanje širine osiromašenog područja (udvostručavanjem osiromašenog područja se udvostručava struja zasićenja)
- osjetljivost na temperaturu (za svakih 5°C struja zasićenja se udvostruči)

Treba razlikovati reverznu struju zasićenja I_S i reverznu struju I_r (koja može biti bitno veća od I_S)

Schocklyeva jednadžba

U idealnoj situaciji, reverzna struja zasićenja I_s je otprilike jednaka 0.

Reverzna struja I_r je iznosa od $0.1\mu A$ - $1\mu A$ u tehnologiji dioda od prije 10 god.

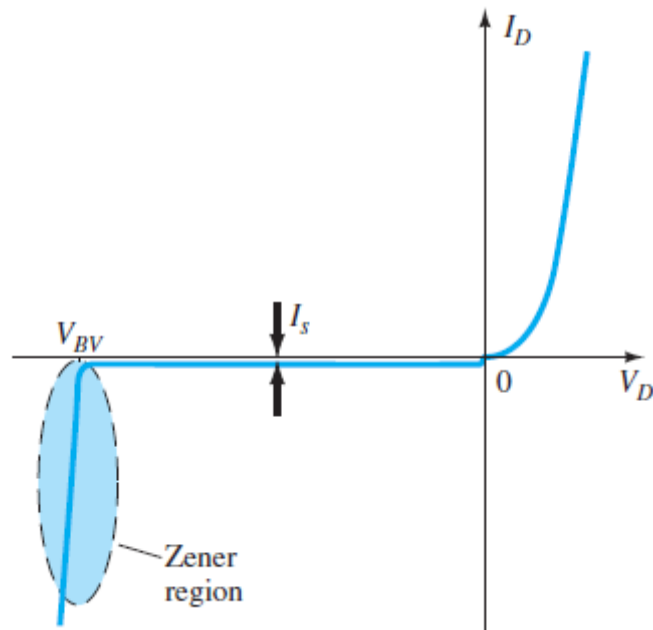
Današnje diode zbog usavršenog procesa proizvodnje imaju reverznu struju u rasponu od $0.01pA$ - $10pA$

Faktor poboljšanja zbog tehnološkog napretka je oko 100,000.

Probojni napon diode

Ako napon reverzne polarizacije dosta poraste, postoji napon kod kojeg reverzno polarizirana počinje voditi.

Taj napon se naziva probojni napon diode i označava se oznakom V_{BV} . Struja kod probojnog napona je obrnutog smjera od struje propusne polarizacije.



Mehanizam nastanka probojnog napona i probojne struje je slijedeći:

- kako napon reverzne polarizacije raste, minorni nosioci odgovorni za struju I_s dobivaju sve veću kinetičku energiju $W_K = \frac{1}{2}mv^2$
- u tim ekstremnim uvjetima, minorni nosioci mogu dobiti dovoljnu energiju da izbace elektrone iz kristalne rešetke i tako stvore dodatne nosioce naboja

Probojni napon diode

Kod probojnog napona, manjinski nosioci imaju dovoljnu kinetičku energiju da izbiju elektrone iz stabilnih kovalentnih veza. Atomi kristalne rešetke koji izgube elektron se ioniziraju.

Ovi izbijeni elektroni mogu imati dovoljnu kinetičku energiju da izbiju dodatne elektrone iz kristalne rešetke te se proces može nastaviti dok ne dobijemo *lavinski efekt*.

Kod probojnog napona diode V_{BV} dolazi do lavinskog efekta te imamo veliku struju reverzne polarizacije.

Odgovarajućim dopiranjem poluvodiča P i N tipa moguće je smanjiti probojni napon V_{BV} .

Ako se probojni napon V_{BV} dovoljno smanji ($V_{BV} = -5V$) javlja se jedan drugi efekt koji doprinosi porastu reverzne struje. Taj efekt se naziva još i *Zennerov efekt*.

Taj efekt se može iskoristiti za proizvodnju jedne druge vrste diode, tzv. Zennerove diode.

Probojni napon diode

Regiju probojnog naboja diode je najbolje izbjegavati kod aplikacije diode.

Maksimalni reverzni naboj koji možemo dovesti na diodu bez da dođe do proboja diode se naziva vršni inverzni napon (eng. PIV – peak inverse voltage).

Ako naš sklop zahtjeva primjenu većeg napona od PIV možemo u seriju spojiti nekoliko dioda. Na takav spoj dioda možemo dovesti veći napon reverzne polarizacije nego na svaku diodu pojedinačno.

Također, ako dioda ne može podnijeti maksimalnu struju koju traži aplikacija u sklopu tada možemo paralelno spojiti nekoliko dioda. Takav spoj može podnijeti veću struju nego bilo koja dioda zasebno.

Ge, Si i GaAs

Dosadašnja razmatranja bila su za silicijeve (Si) diode. Ostali poluvodički materijali (Ge i GaAs) imaju slične ali različite karakteristike.

U propusnom području germanij (Ge) je najbliži vertikalnoj osi dok je galij-arsenid (GaAs) najudaljeniji od vertikalne osi.

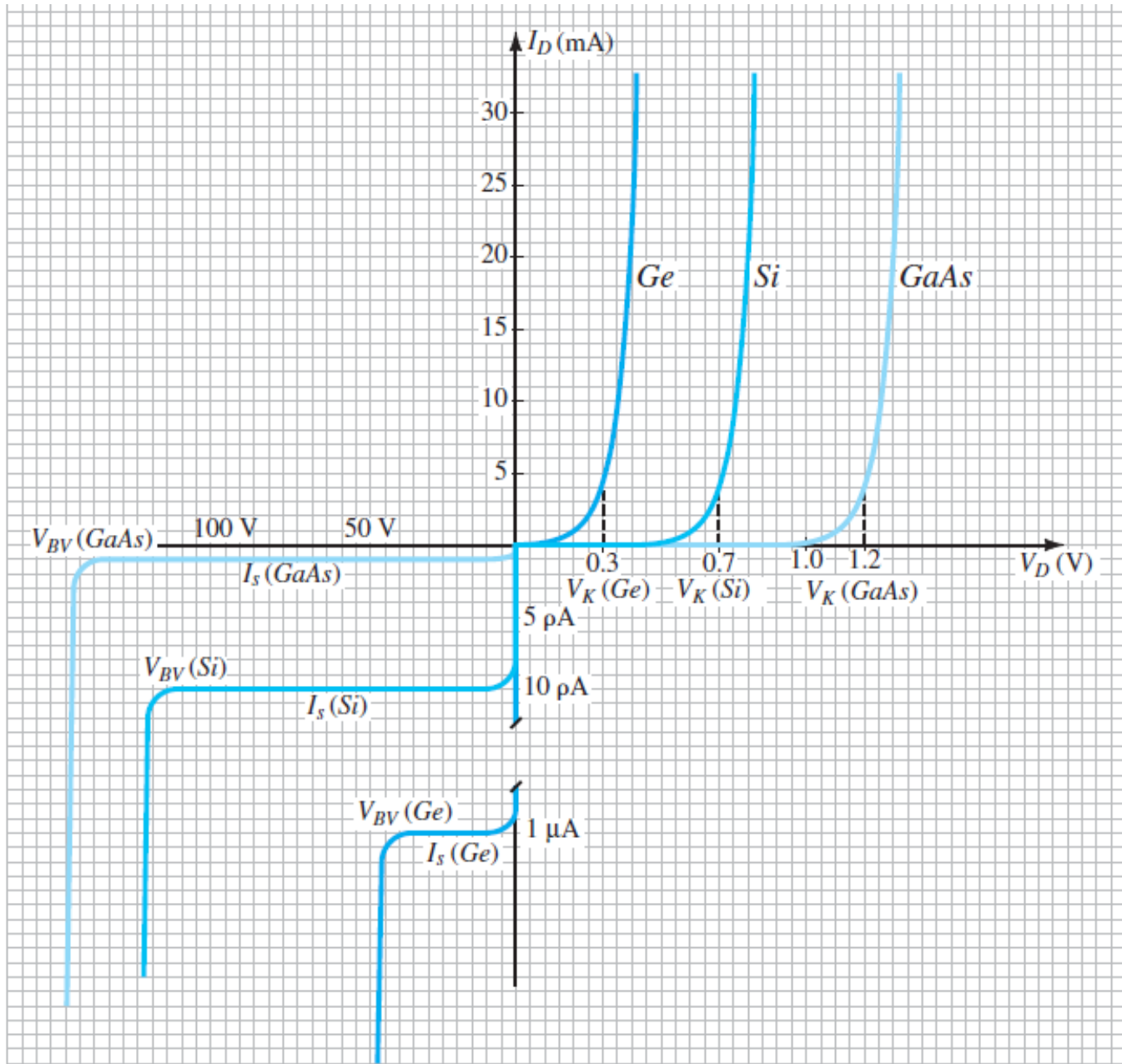
Napon koljena V_K je onaj napon nakon kojeg struja propusne polarizacije diode počinje eksponencijalno rasti.

Napon koljena V_K je različit za silicijeve (Si), germanijeve (Ge) i za diode od galij-arsenida (GaAs).

$$(3) V_K(Ge) = 0.3V$$

$$(4) V_K(Si) = 0.7V$$

$$(5) V_K(GaAs) = 1.2V$$



Usporedne karakteristike Ge, Si i GaAs poluvodičkih dioda.

Na slici su prikazane karakteristike stvarnih komercijalnih dioda.

Također struje reverzne polarizacije nisu reverzne struje zasićenja već stvarne struje reverzne polarizacije.

Ge, Si i GaAs

U zapornom području strujno-naponske karakteristike su slične za Ge, Si i GaAs.

Reverzne struje zasićenja I_S su različite za ova 3 poluvodička materijala:

$$(6) I_S(Ge) \approx 1\mu A$$

$$(7) I_S(Si) \approx 10pA$$

$$(8) I_S(GaAs) \approx 1pA$$

Također, za Ge, Si i GaAs razlikuju se i probojni naponi V_{BV} . Apsolutni iznos probojnog napona je najveći za GaAs (može biti i do kV) i za silicij (Si – tipično od 50V-100V). Germanij ima najmanji probojni napon (oko 50V).

Probojni naponi dioda ovise i o tehnologiji izrade dioda i njihovoj namjeni. Postoje silicijske diode za visoke snage sa probojnim naponom od 20kV.

Ge, Si i GaAs

Ono što se ne vidi na usporednoj strujno-naponskoj karakteristici za Ge, Si i GaAs je brzina rada uređaja.

Brzina rada poluvodičkog uređaja (diode) ovisi o mobilnosti elektrona u poluvodičkom materijalu.

Electron Mobility μ_n

Semiconductor	$\mu_n(\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s})$
Ge	3900
Si	1500
GaAs	8500

Mobilnost nosioca naboja je najveća za GaAs, tj. skoro je pet puta veća od mobilnosti nosioca naboja silicija (Si).

To znači da za aplikacije koje traže velike brzine koristimo GaAs. Međutim, zbog usavršenog tehnološkog procesa imamo silicijske diode koje rade u *GHz* području.

Danas se provode istraživanja na novim poluvodičkim materijalima od kojih se očekuju još veće brzine rada.

Ge, Si i GaAs

PRIMJER 2. Iz uporedne strujno-naponske karakteristike za Ge,Si,GaAs treba odrediti:

- A. Treba odrediti napon propusne polarizacije V_D za svaki tip diode pri struji $I_D = 1mA$.
- B. Treba odrediti napon propusne polarizacije V_D za svaki tip diode pri struji $I_D = 4mA$.
- C. Odrediti napon propusne polarizacije V_D za svaki tip diode pri struji $I_D = 30mA$.
- D. Odrediti prosječni napon za struje dane pod (A),(B) i (C) za sva tri materijala.
- E. Usporediti prosječni napon određen u (D) sa naponom koljena V_K za sva tri materijala.

Ge, Si i GaAs

Rješenje:

A. $V_D(Ge) = 0.2V$, $V_D(Si) = 0.6V$, $V_D(GaAs) = 1.1V$

B. $V_D(Ge) = 0.3V$, $V_D(Si) = 0.7V$, $V_D(GaAs) = 1.2V$

C. $V_D(Ge) = 0.42V$, $V_D(Si) = 0.82V$, $V_D(GaAs) = 1.33V$

D. Ge: $V_{av} = (0.2V + 0.3V + 0.42V)/3 = 0.307V$

Si: $V_{av} = (0.6V + 0.7V + 0.82V)/3 = 0.707V$

GaAs: $V_{av} = (1.1V + 1.2V + 1.33V)/3 = 1.21V$

E. Naponi koljena V_K za Ge, Si i GaAs su redom: 0.3V, 0.7V i 1.2V. Vidi se da prosječni naponi na diodama u slučaju (D) su vrlo blizu naponu koljena.

Utjecaj temperature na strujno-naponsku karakteristiku diode

Temperatura diode mijenja strujno-naponsku karakteristiku poluvodičke diode.

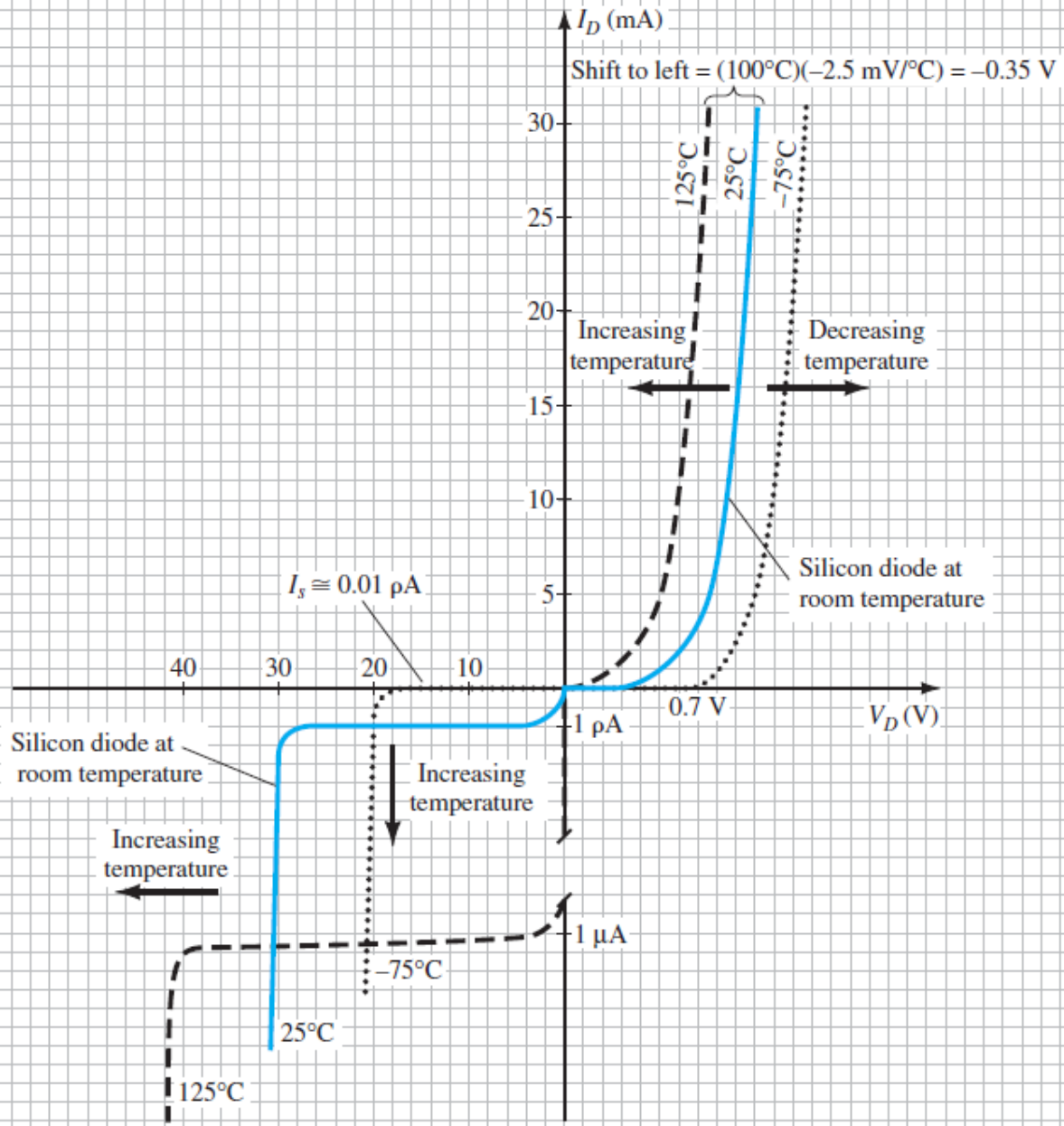
Strujno naponska karakteristika silicijeve (Si) diode se pomiče u lijevo za 2.5mV za svako povećanje temperature od 1°C.

Dakle napon koljena V_K poluvodičke diode se smanjuje s povećanjem temperature.

Ako se temperatura diode poveća sa 20°C na 100°C napon koljena V_K će se smanjiti za $80 \cdot (2.5 \text{ mV}) = 200\text{mV} = 0.2\text{V}$.

Smanjenje temperature diode ima obrnuti efekt. Ako se temperatura smanjuje strujno-naponska karakteristika se pomiče u desno.

U području nepropusne polarizacije, reverzna struja I_r se udvostruči za porast temperature od 10°C.



Utjecaj temperature na strujno-naponsku karakteristiku diode

Ako temperatura silicijeve diode poraste sa 20°C na 100°C reverzna struja zasićenja I_S će se promijeniti sa 10 nA na $2.56\text{ }\mu\text{A}$, što znači da će se struja I_S povećati 256 puta.

Ako primjena diode u sklopu zahtjeva da dioda radi na povišenoj temperaturi tada treba odabrati diodu sa što manjom strujom I_S na sobnoj temperaturi.

Postoje i GaAs diode koje normalno funkcioniraju u rasponu temperatura od -200°C do $+200^{\circ}\text{C}$ te neke GaAs diode mogu funkcionirati čak na oko $+400^{\circ}\text{C}$.

Također s promjenom temperature mijenja se i probojni napon V_{BV} te sa promjenom temperature apsoluti iznos probojnog napona V_{BV} može rasti ili padati.

Poluvodičke diode - sažetak

Ge: Germanijeve diode su danas rjeđe zastupljene zbog temperaturne osjetljivosti i visoke reverzne struje zasićenja I_S (u odnosu na ostale poluvodičke diode). Komercijalno su još uvijek dostupne za brže aplikacije (zbog većeg faktora mobilnosti u odnosu na Si) te se zbog osjetljivosti na svjetlo i na toplinu koriste u aplikacijama kao što su foto-dektori te senzori sustava sigurnosti.

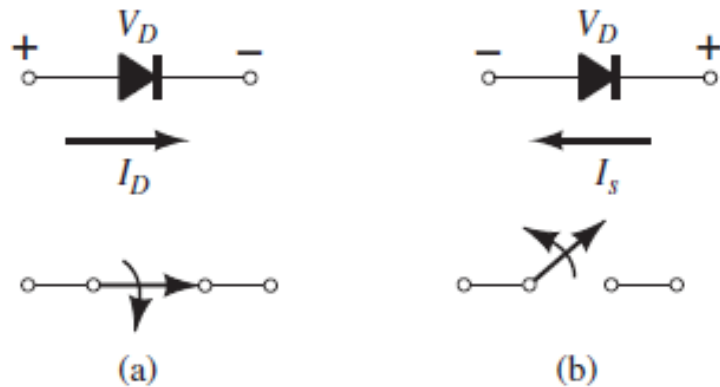
Si: Silicijeve diode su najzastupljenije i koriste se u širokom rasponu elektroničkih proizvoda. Prednosti su niska cijena, niska reverzna struja zasićenja I_S , pogodna temperaturna karakteristika te pogodne vrijednosti probojnog napona. Također, zbog usavršenog procesa proizvodnje Si diode se najviše koriste kod VLSI integriranih krugova.

GaAs: tehnologija GaAs se razvija još od 1990 i očekuje se da će GaAs diode s razvojem tehnologije preuzeti vodeću poziciju od Si dioda naročito kod proizvodnje VLSI krugova. Pogodne karakteristike su niska reverzna struja zasićenja I_S , dobra temperaturna stabilnost te visoki iznos probojnog napona. Danas 80% primjena GaAs dioda je za LED diode, solarne ćelije fotodetektori. Pretpostavlja se da je GaAs dioda tehnologija budućnosti poluvodičkih uređaja.

Idealne i stvarne diode

Iz dosadašnjih razmatranja vidjeli smo da P-N spoj dozvoljava velike struje diode kod propusne polarizacije te vrlo male struje kod reverzne polarizacije.

Može se povući paralela između poluvodičkih dioda i mehaničkih prekidača:



Kod idealnih dioda smatramo kad je dioda propusno polarizirana da vodi struju te kad je nepropusno polarizirana da dioda ne vodi struju (zanemarujemo reverznu struju zasićenja i napon koljena)

Idealne i stvarne diode

Poluvodička dioda se ponaša slično kao mehanički prekidač u smislu da se može odrediti da li će struja teći kroz diodu ili neće.

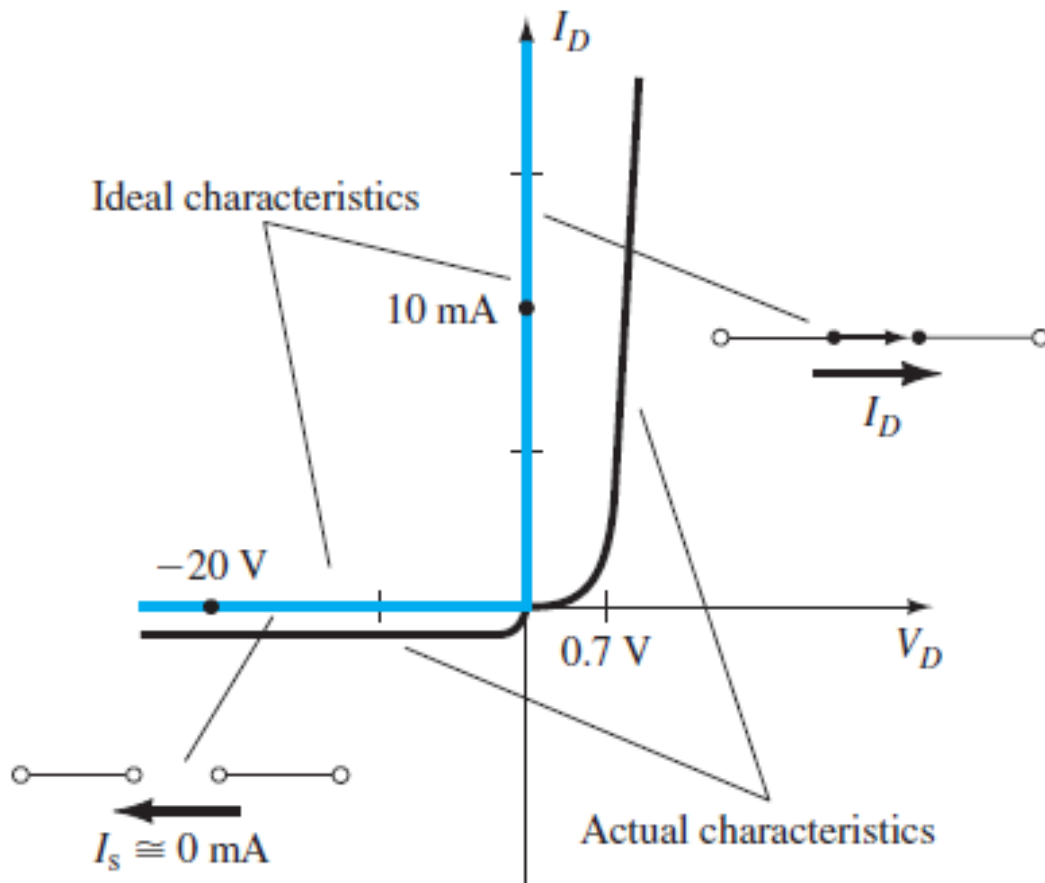
Postoje i razlike između diode i mehaničkog prekidača:

Poluvodička dioda se razlikuje od mehaničkog prekidača u smislu da kad je ukopčana (slično kao i kod mehaničkog prekidača) dozvoljava tijek struje u samo jednom smjeru.

Kada bi poluvodička dioda bila istovjetna mehaničkom prekidaču tada bi otpor diode u propusnoj polarizaciji bio 0Ω .

Također kada bi dioda bila analogna mehaničkom prekidaču kod reverzne polarizacije njen otpor bi bio beskonačan (∞) te bi dioda bila otvoreni krug.

Idealne i stvarne diode



Poredba idealne diode (označeno plavom bojom na slici) i stvarne diode (označeno crnom bojom).

Vidimo da stvarna dioda približno aproksimira mehanički prekidač.

Kod prekidača, kad je zatvoren, otpor je:

$$(9) R_F = \frac{0V}{I_D} = 0\Omega$$

Također kad je prekidač otvoren, njegov je otpor:

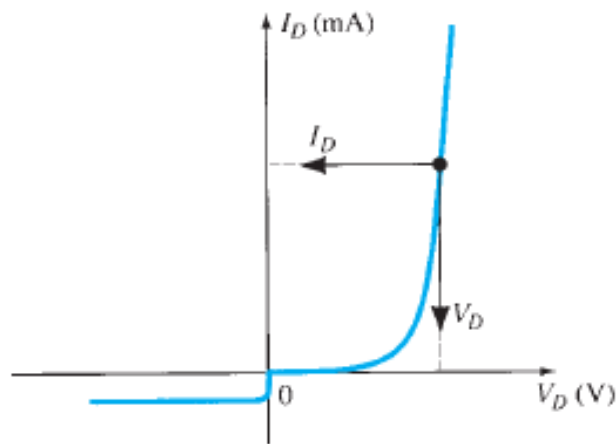
$$(19) R_F = \frac{V_D}{0} = \infty\Omega$$

Statički otpor diode

Ako je dioda pod DC naponom, radna točka diode se neće mijenjati u vremenu. Statički (ili DC) otpor diode može se izračunati iz napona na diodi V_D te struje na diodi I_D :

$$(3) R_D = \frac{V_D}{I_D}$$

U propusnom području ako je napon V_D manji od napona koljena V_K je statički otpor diode malen. U propusnom području odtpor se smanjuje kako struja raste. U zapornom području otpor diode je vrlo visok (jer je I_D u nA ili μA).

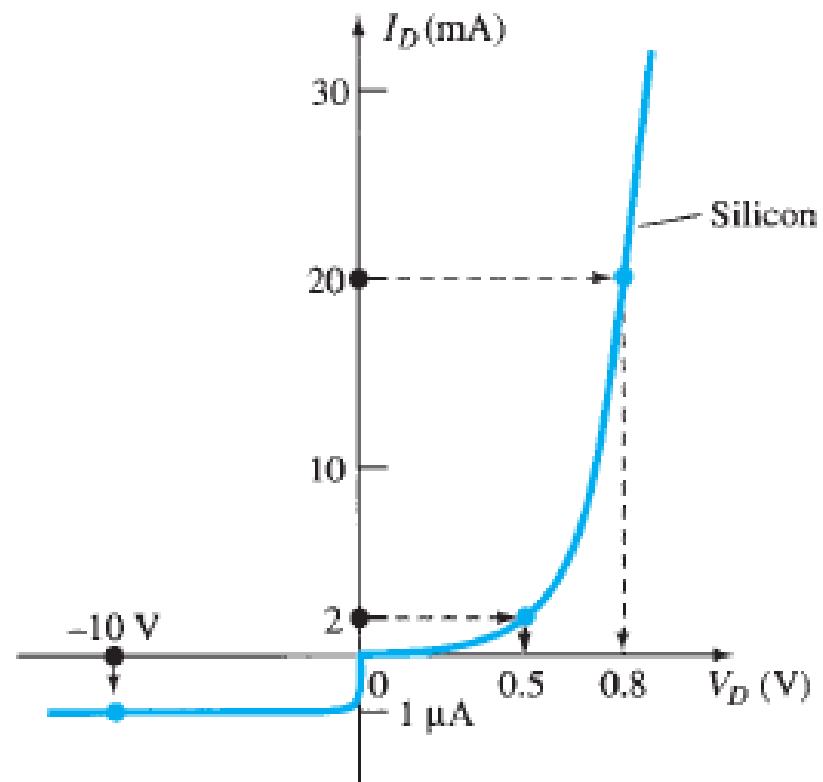


Određivanje otpora diode u radnoj točki

Statički otpor diode

PRIMJER 3. Odrediti statički DC otpor diode sa slike ako je:

- A. $I_D = 2 \text{ mA}$
- B. $I_D = 20 \text{ mA}$
- C. $V_D = -10 \text{ V}$



Statički otpor diode

Rješenje:

A. Za $I_D = 2 \text{ mA}$ iz grafa se vidi da je $V_D = 0.5 \text{ V}$ te se statički otpor može izračunati kao:

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0.5 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 250 \Omega$$

B. Za $I_D = 20 \text{ mA}$ imamo da je $V_D = 0.8 \text{ V}$ te se statički otpor računa kao:

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0.8 \text{ V}}{20 \text{ mA}} = 40 \Omega$$

Statički otpor diode

C. Ako je $V_D = -10V$ tada je struja diode $I_D = -I_S = -1\mu A$ te je statički otpor:

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{10V}{1\mu A} = 10 M\Omega$$

Dinamički otpor diode

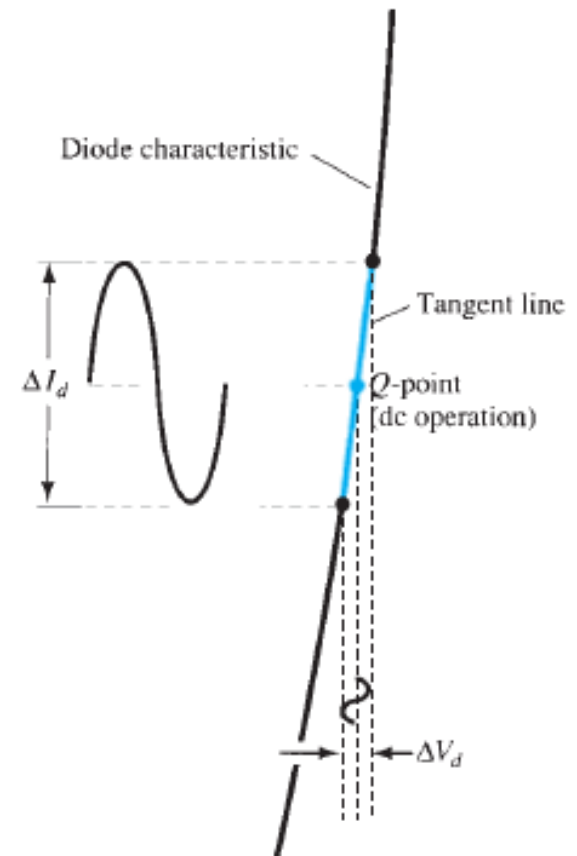
Ako na diodu narinemo mali izmjenični napon tada taj napon varira oko statičke radne točke Q .

Statička radna točka se označava sa Q zbog toga što taj pojam dolazi od latinske riječi *quiescenes*, što znači mirna tj. ona koja ne varira.

Ako su varijacije napone i struje male onda se dinamički otpor diode može izračunati iz izraza:

$$(3) r_D = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$$

Dinamički otpor diode označava se malim slovom r .



Dinamički otpor diode

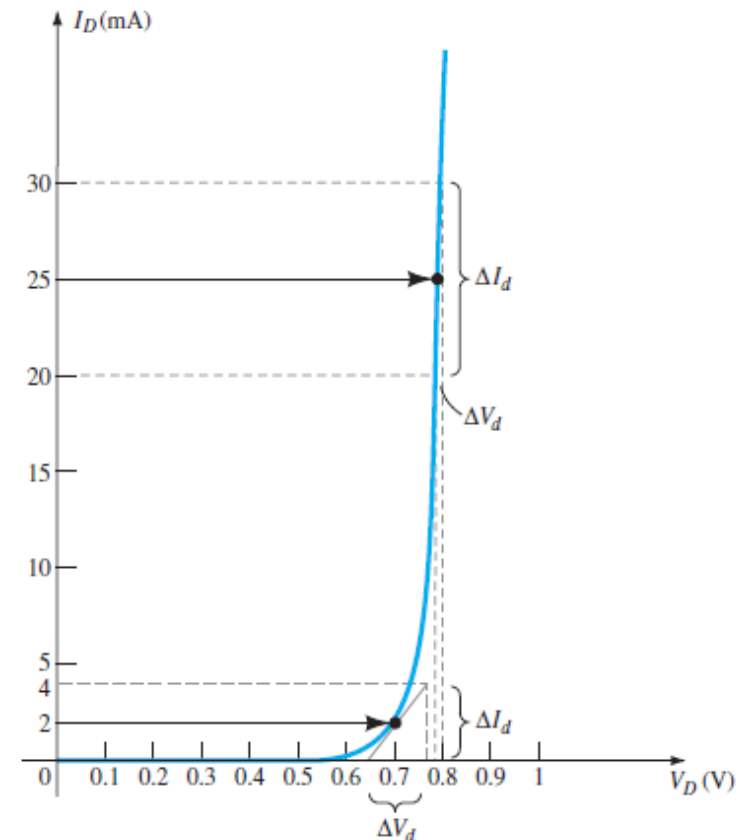
Iz slike se vidi da što je strmina strujno-naponske karakteristike veća, tada je ΔV_D manji za istu promjenu struje ΔI_D dakle dinamički otpor r_D se smanjuje što je veća strmina strujno-naponske karakteristike.

Dakle što je Q-točka bliže horizontalnj osi strujno-naponske karakteristike to je dinamički otpor diode veći.

Dinamički otpor diode

PRIMJER 4. Iz strujno-naponske karakteristike na slici treba odrediti:

- A. Dinamički otpor diode ako je $I_D = 2 \text{ mA}$
- B. Dinamički otpor diode ako je $I_D = 25 \text{ mA}$
- C. Usporediti dinamički otpor diode sa statičkim otporom diode



Dinamički otpor diode

A. Ako je $I_D = 2 \text{ mA}$ tada sa slike možemo odrediti napon $V_D = 0.7V$ te možemo odrediti statičku radnu točku $Q(0.7V, 2mA)$. Možemo uzeti da će struja varirati $\pm 2mA$ oko statičke radne točke Q. Tada možemo izračunati promjene struje i napona kao:

$$\Delta I_d = 4mA - 0mA = 4mA$$

$$\Delta V_d = 0.76V - 0.65V = 0.11V$$

Iz promjene struje i napona može se odrediti dinamički otpor diode kao:

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0.11V}{4mA} = 27.5 \Omega$$

Dinamički otpor diode

B. Ako je $I_D = 25 \text{ mA}$ tada je napon u statičkoj radnoj točki $V_D = 0.79 \text{ V}$ te se statička radna točka odredi na $Q(0.79 \text{ V}, 25 \text{ mA})$. Ako uzmemo da je promjena struje $\pm 5 \text{ mA}$ oko radne točke Q tada je ukupna promjena struje:

$$\Delta I_d = 30 \text{ mA} - 20 \text{ mA} = 10 \text{ mA}$$

Promjena struje od $\pm 5 \text{ mA}$ oko radne točke Q izaziva promjenu napona ΔV_d :

$$\Delta V_d = 0.8 \text{ V} - 0.78 \text{ V} = 0.02 \text{ V}$$

Iz izraza (3) dinamički otpor diode se izračuna kao:

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0.02 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 2 \Omega$$

Dinamički otpor diode

C. Ako je $I_D = 2 \text{ mA}$ tada $V_D = 0.7 \text{ V}$ te je statički otpor diode R_D :

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0.7 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 350 \ \Omega$$

U slučaju kada je $I_D = 25 \text{ mA}$ tada $V_D = 0.79 \text{ V}$ te je statički otpor diode R_D :

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0.79 \text{ V}}{25 \text{ mA}} = 31.62 \ \Omega$$

U oba slučaja je statički otpor diode R_D daleko veći od dinamičkog otpora diode r_d , tj. $R_D \gg r_d$.

Dinamički otpor diode

Dinamički otpor diode se može odrediti iz Shocklyeve jednadžbe (1) deriviranjem po naponu V_D . Shocklyevu jednadžbu $I_D = I_S(e^{V_D/nV_T} - 1)$ deriviramo po naponu V_D , tj. računamo $\frac{dI_D}{dV_D}$ te se dobije:

$$(4) \quad g_d = \frac{dI_D}{dV_D} = \frac{I_S e^{V_D/nV_T}}{nV_T} = \frac{1}{nV_T} (I_D + I_S)$$

U izrazu (4) simbolom g_d označavamo dinamičku vodljivost koja je obrnuto proporcionalna dinamičkom otporu:

$$(5) \quad r_d = \frac{1}{g_d}$$

U propusnom području generalno je struja I_D takva da je $I_D \gg I_S$. Zbog toga se reverzna struja zasićenja I_S može zanemariti:

$$(6) \quad g_d = \frac{dI_D}{dV_D} \cong \frac{I_D}{nV_T}$$

Dinamički otpor diode

Kombinirajući izraze (5) i (6) dobije se dinamički otpor diode r_d kao:

$$(7) r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{nV_T}{I_D}$$

Ako uzmemo da je $n = 1$ te da je termalni napon diode $V_T \cong 26 \text{ mV}$ tada se dobije aproksimativni izraz za dinamički otpor diode:

$$(8) r_d = \frac{26 \text{ mV}}{I_D}$$

Značenje jednadžbe (8) je da dinamički otpor diode u propusnoj polarizaciji ovisi najviše o struji diode!

Treba imati u vidu da jednadžba (8) vrijedi samo za napone V_D koji su iznad napona koljena V_K . Ako je napon diode V_D manji ili otprilike jednak naponu koljena V_K (a dioda je još uvijek propusno polarizirana) onda je $n = 2$ (za silicij) te se dinamički otpor r_d množi sa faktorom 2.

Ukupni otpor diode

U dosadašnjim razmatranjima zanemarili smo dva izvora otpora diode:

(a) zanemarili smo otpor poluvodičkog materijala

(b) zanemarili smo otpor spoja metalnih izvoda diode sa poluvodičkim materijalom

Ukupni otpor diode r'_d možemo izraziti jednadžbom:

$$(9) r'_d = \frac{26 \text{ mV}}{I_D} + r_B$$

Otpor r_B je otpor spoja metalnih izvoda diode sa poluvodičem te otpor samog poluvodičkog materijala. Tipična vrijednost otpora $r_B \approx 0.1\Omega$ za diode velike snage, dok je za male signalne diode iznos otpora $r_B \approx 2\Omega$.

Ukupni otpor diode

U primjeru 4 pod (B) izračunali smo da je dinamički otpor diode:

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0.02V}{10mA} = 2 \Omega$$

Ako koristimo jednadžbu (8) onda za slučaj 4 (B) dobijemo da je dinamički otpor diode:

$$r_d = \frac{26 mV}{I_d} = \frac{26 mV}{25mA} = 1.04 \Omega$$

Razlika dinamičkih otpora od 1 Ω se može objasniti kao uticaj otpora r_B na ukupni dinamički otpor diode.

Za primjer 4 pod (A) imamo slučaj kada je napon V_D manji od napona koljena V_K . Tada se dinamički otpor može izračunati iz (8) ali pošto je $V_D \approx V_K$ tako dobiveni dinamički otpor treba množiti sa faktorom 2.

Ukupni otpor diode

U primjeru 4 (A) izračunali smo dinamički otpor iz strujno-naponske karakteristike:

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{0.11V}{4mA} = 27.5 \Omega$$

Koristeći izraz (8) te uzimajući u obzir da je napon V_D otprilike jednak naponu koljena V_K imamo $n = 2$ te zbog toga množimo dinamički otpor dobiven izrazom (8) sa faktorom 2:

$$r_d = 2 \left(\frac{26 mV}{I_D} \right) = 2 \left(\frac{26 mV}{2 mA} \right) = 2 \cdot (13 \Omega) = 26 \Omega$$

Dakle imamo razliku od 1.5Ω određujući napon iz strujno naponske karakterstike te pomoću izraza (8).

Imamo sličnu razliku kao i u slučaju 4 (B). Ova razlika se također može pripisati otporu r_B .