

**Univerzitet u Nišu  
Elektronski fakultet**

**RAČUNSKE VEŽBE IZ PREDMETA  
POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE  
(IV semestar – modul EKM)**

**I deo**

**Miloš Marjanović**

**POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE****Računske vežbe****PN SPOJ – DIODA**

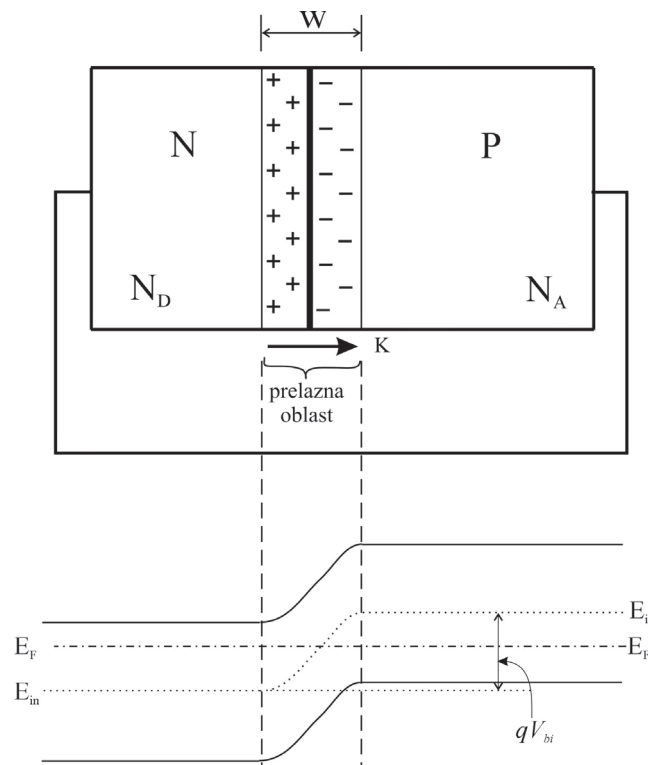
*Napomena: Izvođenja su data radi potpunosti materijala.*

**Ugrađeni napon u prelaznoj oblasti pn spoja**

Posmatramo dijagram energetske nivoa na p-n spoju. Kada elektroni iz provodne zone n- tipa poluprovodnika prelaze u provodnu zonu poluprovodnika p- tipa nailaze na potencijalnu barijeru. Energija potrebna za prelaz definiše ugrađeno električno polje, tj. ugrađeni napon u prelaznoj oblasti. Slično važi i za šupljine pri prelazu iz p- u n- tip poluprovodnika. Ovaj napon se ne može meriti, jer bi se stvorila barijera između sonde i poluprovodnika što poništava  $V_{bi}$ .

**ZADATAK 1.** Izvesti izraz za ugrađeni potencijal u prelaznoj oblasti pn spoja.

Rešenje:



Fermijev nivo u pn spoju je jedinstven. U odnosu na Fermijev nivo  $E_F$ , definišu se sopstveni Fermijevi nivoi za n i p tip poluprovodnika  $E_{in}$  i  $E_{ip}$ . Ukupni ugrađeni potencijal izrazićemo kao zbir potencijala  $\phi_{Fn}$  i  $\phi_{Fp}$ :

$$V_{bi} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}|$$

U n- tipu poluprovodnika koncentracija elektrona je približno jednaka koncentraciji donorskih primesa:

**POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE****Računske vežbe**

$$N_D = n = N_C e^{\frac{-(E_C - E_F)}{kT}} = n_i e^{\frac{E_F - E_{in}}{kT}} = n_i e^{\frac{q\phi_{Fn}}{kT}}$$

Logaritmovanjem dobijamo:

$$\phi_{Fn} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

Slično, možemo pisati za koncentraciju šupljina u p- tipu poluprovodnika:

$$N_A = p = N_V e^{\frac{-(E_F - E_V)}{kT}} = n_i e^{\frac{E_{ip} - E_F}{kT}} = n_i e^{-\frac{q\phi_{Fp}}{kT}}$$

Logaritmovanjem dobijamo:

$$\phi_{Fp} = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

Konačno je:

$$V_{bi} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}| = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = V_t \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

gde je  $V_t$  termički potencijal.

**ZADATAK 2.** Izračunati ugrađeni potencijal pn spoja, ako na sobnoj temperaturi  $T=300\text{K}$  je koncentracija akceptorskih primesa  $N_A=2 \cdot 10^{16}\text{cm}^{-3}$  i donorskih  $N_D=5 \cdot 10^{15}\text{cm}^{-3}$ . Koncentracija sopstvenih nosilaca iznosi  $n_i=1.01 \cdot 10^{10}\text{cm}^{-3}$ .

Rešenje:

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1.6 \cdot 10^{-19}} \ln\left(\frac{2 \cdot 10^{16} \cdot 5 \cdot 10^{15}}{(1.01 \cdot 10^{10})^2}\right) = 0.714 \text{ V}$$

**Širina osiromašene oblasti pn spoja**

Prelazna oblast šira je na strani sa nižom koncentracijom primesa i važi:  $x_p N_A = x_n N_D$ .

**ZADATAK 3.** Izvesti izraz za širinu osiromašene oblasti skokovitog pn spoja.

Rešenje:

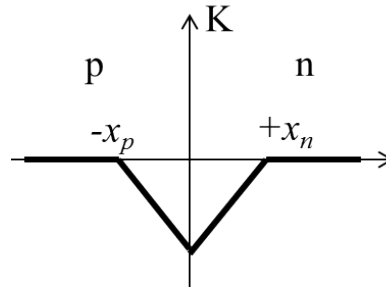
Električno polje određuje se iz Poisson-ove jednačine:

$$\frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} = -\frac{dK(x)}{dx}$$

$\varphi(x)$  – električni potencijal,  $K(x)$  – električno polje,  $\rho(x)$  – zapreminska gustina naelektrisanja. Gustina naelektrisanja su:  $\rho(x) = -qN_A$ , za  $-x_p < x < 0$  i  $\rho(x) = qN_D$ , za  $0 < x < x_n$ . Električno polje u p- oblasti se računa kao:

**POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE****Računske vežbe**

$$K = \int \frac{\rho(x)}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} dx = - \int \frac{qN_A}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} dx = - \frac{qN_A}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} x + C_1$$



Konstanta integraljenja  $C_1$  se određuje iz uslova da je  $K=0$  pri  $x=-x_p$ , tako da je električno polje u p oblasti:

$$K = - \frac{qN_A}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} (x + x_p) \quad -x_p \leq x \leq 0$$

zaključujemo da je polje linearna funkcija rastojanja ukoliko je dopiranje uniformno. Slično, za električno polje u n-oblasti dobija se:

$$K = \int \frac{qN_D}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} dx = \frac{qN_D}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} x + C_2$$

Konstanta integraljenja  $C_2$  određuje se iz uslova da je  $K=0$  pri  $x=x_n$ , tako da je električno polje u n oblasti:

$$K = \frac{qN_D}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} (x - x_n) = - \frac{qN_D}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} (x_n - x) \quad 0 \leq x \leq x_n$$

$$K_{max} = - \frac{qN_D}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} x_n \quad x = 0$$

Iz uslova da su polja na metalurškom spoju ( $x=0$ ) jednaka dobija se da je prelazna oblast šira na strani sa nižom koncentracijom primesa:

$$N_A x_p = N_D x_n$$

Potencijal na spoju se nalazi integraljenjem električnog polja. U p- oblasti je:

$$\varphi(x) = - \int K(x) dx = \int \frac{qN_A}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} (x + x_p) dx = \frac{qN_A}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \left( \frac{x^2}{2} + x \cdot x_p \right) + C_3$$

Iz uslova da je potencijal jednak  $\varphi(x)=0$  na  $x=-x_p$  izražava se konstanta integraljenja  $C_3$ :

$$\varphi(x) = \frac{qN_A}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \left( \frac{x_p^2}{2} - \frac{2x_p^2}{2} \right) + \frac{qN_A}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \frac{x_p^2}{2} = 0$$

**POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE****Računske vežbe**

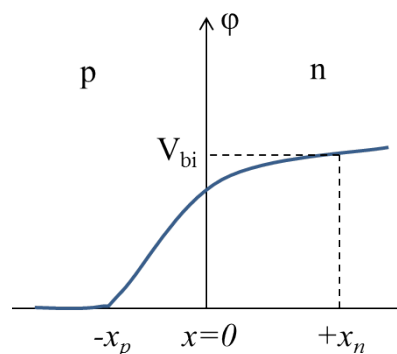
pa se može pisati:

$$\varphi(x) = \frac{qN_A}{2\varepsilon_0\varepsilon_r}(x^2 + 2xx_p + x_p^2) = \frac{qN_A}{2\varepsilon_0\varepsilon_r}(x + x_p)^2$$

Potencijal u n- oblasti se određuje integraljenjem električnog polja u n oblasti:

$$\varphi(x) = - \int K(x)dx = \int \frac{qN_D}{\varepsilon_0\varepsilon_r}(x_n - x)dx = \frac{qN_D}{\varepsilon_0\varepsilon_r}\left(xx_n - \frac{x^2}{2}\right) + C_4$$

Konstanta integraljenja  $C_4$  određuje se iz uslova kontinuiteta funkcije  $\varphi(x)$  na metalurškom spoju ( $x=0$ ):



$$\frac{qN_A}{2\varepsilon_0\varepsilon_r}x_p^2 = \frac{qN_D}{\varepsilon_0\varepsilon_r} \cdot 0 + C_4 \Rightarrow C_4 = \frac{qN_A}{2\varepsilon_0\varepsilon_r}x_p^2$$

tako da se za potencijal u n- oblasti može pisati:

$$\varphi(x) = \frac{qN_D}{\varepsilon_0\varepsilon_r}\left(xx_n - \frac{x^2}{2}\right) + \frac{qN_A}{2\varepsilon_0\varepsilon_r}x_p^2 = 0$$

Ugrađeni napon pn spoja je u stvari potencijal u  $x=x_n$ :

$$V_{bi} = |\varphi(x = x_n)| = \frac{q}{2\varepsilon_0\varepsilon_r}(N_Dx_n^2 + N_Ax_p^2)$$

Na osnovu  $x_pN_A = x_nN_D$  i korišćenjem prethodno dobijene formule dobijamo:

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_rV_{bi}}{q} \left(\frac{N_A}{N_D}\right) \left(\frac{1}{N_A + N_D}\right)}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_rV_{bi}}{q} \left(\frac{N_D}{N_A}\right) \left(\frac{1}{N_A + N_D}\right)}$$

**POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE****Računske vežbe**

$$w = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r V_{bi}}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)}$$

Kada se primeni polarizacija, izrazi za  $x_n$ ,  $x_p$  i  $w$  ostaju isti, s tim što je napon ( $V_{bi} \neq V$ ).

**ZADATAK 4.** Izračunati širinu prelazne oblasti i maksimalnu vrednost električnog polja u pn spoju. PN spoj na sobtnoj temperaturi  $T=300K$  sa ravnomernom koncentracijom dopanata ima  $N_A=2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  i  $N_D=5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ .

Rešenje:

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r V_{bi}}{q} \left( \frac{N_A}{N_D} \right) \left( \frac{1}{N_A + N_D} \right)} = 0.379 \mu\text{m}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r V_{bi}}{q} \left( \frac{N_D}{N_A} \right) \left( \frac{1}{N_A + N_D} \right)} = 0.0948 \mu\text{m}$$

$$w = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r V_{bi}}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)} = 0.474 \mu\text{m}$$

$$|K_{max}| = \frac{qN_D}{\varepsilon_0\varepsilon_r} x_n = 2.93 \cdot 10^4 \text{ V/cm}$$

**Kapacitivnost diode**

Kapacitivnost diode se sastoji od kapacitivnosti prelazne oblasti i difuzione kapacitivnosti. Kapacitivnost prelazne oblasti zavisi od njene širine  $w$ , od površine pn spoja i značajna je pri inverznoj polarizaciji. Ova kapacitivnost utiče na frekventni odziv diode, na ovom efektu zasniva se rad varikap (varaktor) diode čija se kapacitivnost menja u zavisnosti od inverznog napona na koji su priključene. Koriste se za filterska podešavanja u mikrotalasnim kolima. Difuziona kapacitivnost je značajna pri direktnoj polarizaciji diode. Zavisi od brzine prolaska nosilaca kroz prelaznu oblast i obrnuto je srazmerna dinamičkoj otpornosti diode. Difuziona kapacitivnost zajedno sa dinamičkom otpornošću određuje admitansu diode, a time i ograničava maksimalnu frekvenciju njene primene.

**ZADATAK 5.** Izvesti izraz za barijernu kapacitivnost skokovitog pn spoja.

Rešenje:

Kapacitivnost po jedinici površine pn spoja ( $S$ ) se može izraziti kao:

$$C' = \frac{dQ}{dV_R} = \frac{d(qN_D x_n)}{dV_R} = \frac{d(qN_A x_p)}{dV_R}$$

**POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE****Računske vežbe**

Na primer, širina prelazne oblasti u n- tipu poluprovodnika kada je inverzno polarisan je:

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r(V_{bi} + V_R)}{q} \left(\frac{N_A}{N_D}\right) \left(\frac{1}{N_A + N_D}\right)}$$

Tako da je kapacitivnost:

$$C' = qN_D \frac{dx_n}{dV_R} = \sqrt{\frac{q\varepsilon_0\varepsilon_r N_D N_A}{2(N_A + N_D)(V_{bi} + V_R)}} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon_r}{w}$$

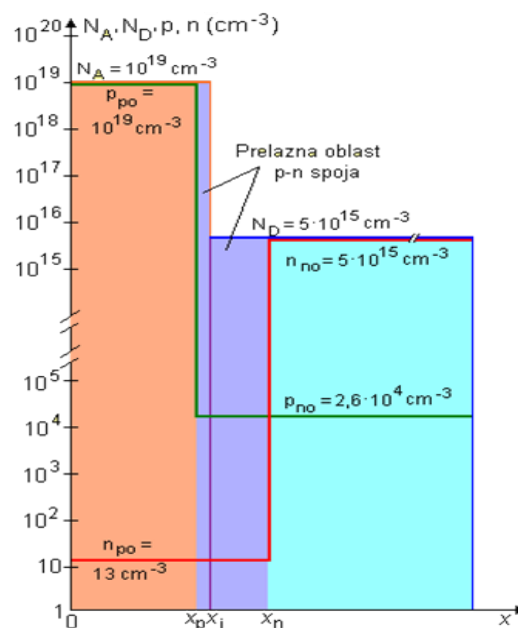
Ukupna kapacitivnost pn spoja je:

$$C = S \sqrt{\frac{q\varepsilon_0\varepsilon_r N_D N_A}{2(N_A + N_D)(V_{bi} + V_R)}}$$

U funkciji inverzne polarizacije, ukupna kapacitivnost se može računati kao:

$$C = \frac{C_{bez\ inverzne\ polarizacije}}{\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_{bi}}}}$$

**ZADATAK 6.** Koncentracije akceptorskih i donorskih primesa u silicijumskoj diodi respektivno iznose  $N_A = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  i  $N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  (kao na slici). Ako je površina poprečnog preseka  $p$ - $n$  spoja  $S = 0,1 \text{ mm}^2$ , izračunati širine prelaznih oblasti i kapacitivnosti  $p$ - $n$  spoja u slučajevima nulte polarizacije, direktne polarizacije  $V = 0,7 \text{ V}$  i inverzne polarizacije  $V_{inv} = -10 \text{ V}$ . Dielektrična konstanta vakuuma je  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$ , a dielektrična konstanta silicijuma  $\varepsilon_{rs} = 11,8$ ; temperatura je  $T = 300\text{K}$ .



**POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE****Računske vežbe**

Rešenje:

Prvo treba odrediti vrednost kontaktne razlike potencijala  $p$ - $n$  spoja:

$$V_{bi} = U_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0,026 \cdot \ln \frac{1 \cdot 10^{19} \cdot 5 \cdot 10^{15}}{(1,13 \cdot 10^{10})^2} \approx 0,874 \text{ V.}$$

Širine prelazne oblasti  $w$ , za slučaj skokovitog  $p$ - $n$  spoja i  $N_A \gg N_D$  ( $p$ - $n$  spoj), može se izraziti:

$$w \cong x_n \cong \left( \frac{2\epsilon_0 \epsilon_{rs} V_{bi}^{p-n} \pm V}{q N_D} \right)^{1/2}$$

Širina prelazne oblasti pri nultoj polarizaciji ( $V = 0$ ):

$$w_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_{rs} V_{bi}}{q N_D}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{15}}} \cdot 0,874 = 4,777 \cdot 10^{-5} \text{ cm} \approx 0,48 \text{ } \mu\text{m.}$$

Pri direktnoj polarizaciji  $V = 0,7 \text{ V}$  je

$$w_{dir} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_{rs}}{q N_D} (V_{bi} - V)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{15}}} (0,874 - 0,7) \approx 0,21 \text{ } \mu\text{m,}$$

a pri inverznoj polarizaciji  $V_{inv} = -10 \text{ V}$ :

$$w_{inv} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 \epsilon_{rs}}{q N_D} (V_{bi} + |V_{inv}|)} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{15}}} (0,874 + 10) \approx 1,685 \text{ } \mu\text{m.}$$

Kapacitivnost prostornog naelektrisanja (barijerna kapacitivnost) skokovitog  $p$ - $n$  spoja iznosi:

$$C^{p-n} = \epsilon_0 \epsilon_{rs} \frac{S}{x_n} = S \left( \frac{q \epsilon_0 \epsilon_{rs} N_D}{2 V_{bi}^{p-n} \pm V} \right)^{1/2}.$$

Kapacitivnost  $p$ - $n$  spoja pri nultoj polarizaciji je:

$$C_0 = S \sqrt{\frac{q \epsilon_0 \epsilon_{rs} N_D}{2 V_{bi}}} = 0,1 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 5 \cdot 10^{15}}{2 \cdot 0,874}} \approx 21,86 \text{ pF.}$$

Kapacitivnost  $p$ - $n$  spoja pri inverznoj polarizaciji  $V_{inv} = -10 \text{ V}$ :

$$C_{inv} = S \sqrt{\frac{q \epsilon_0 \epsilon_{rs} N_D}{2 V_{bi} + |V_{inv}|}} = 10^{-3} \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 11,8 \cdot 5 \cdot 10^{15}}{2 \cdot 0,874 + 10}} \approx 6,2 \text{ pF.}$$



**POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE****Računske vežbe**

**ZADATAK 7.** Kapacitivnost prostornog naelektrisanja skokovitog pn spoja pri naponu polarizacije  $U_1 = -5 \text{ V}$  je  $C_1 = 20 \text{ pF}$ , a pri  $U_2 = -6 \text{ V}$  je  $C_2 = 18.5 \text{ pF}$ . Odrediti ovu kapacitivnost pri polarizaciji  $U_3 = -8 \text{ V}$ .

Rešenje:

$$C = \frac{C(0)}{\sqrt{1 - \frac{V}{V_{bi}}}}, \quad \text{Nepoznate veličine su } V_{bi} \text{ i } C(0).$$

Pri zadatim polarizacijama kapacitivnosti prostornog naelektrisanja PN spoja iznose:

$$C_1 = \frac{C(0)}{\sqrt{1 - \frac{V_1}{V_{bi}}}} \dots\dots\dots(1)$$

$$C_2 = \frac{C(0)}{\sqrt{1 - \frac{V_2}{V_{bi}}}} \dots\dots\dots(2)$$

Deljenjem (1) i (2) dobijamo:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\sqrt{1 - \frac{V_2}{V_{bi}}}}{\sqrt{1 - \frac{V_1}{V_{bi}}}} \dots\dots\dots(3)$$

Kvadriranjem uzraza (3) dobijamo:

$$\left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2 = \frac{V_{bi} - V_2}{V_{bi} - V_1} \quad | \quad \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2 (V_{bi} - V_1) = V_{bi} - V_2$$

$$V_{bi} \left[ \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2 - 1 \right] = \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2 V_1 - V_2 \quad | \quad V_{bi} = \frac{\left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2 V_1 - V_2}{\left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2 - 1} = \frac{\left(\frac{20}{18.5}\right)^2 (-5) + 6}{\left(\frac{20}{18.5}\right)^2 - 1} = 0.9264 \text{ V}$$

Iz izraza (1) dobijamo:

$$C(0) = C_1 \sqrt{1 - \frac{V_1}{V_{bi}}} = 20 \text{ pF} \sqrt{1 - \frac{-5}{0.9264}} = 50.585 \text{ pF}$$

Sada se za kapacitivnost pri polarizaciji  $U_3 = -8 \text{ V}$  dobija:

**POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE****Računske vežbe**

$$C_3 = \frac{C(0)}{\sqrt{1 - \frac{V_3}{V_{bi}}}} = \frac{50.585 \text{ pF}}{\sqrt{1 - \frac{-8}{0.9264}}} = 16.3 \text{ pF}$$

**Otpornost diode**

Statička (DC) otpornost diode u radnoj tački Q se definiše kao:

$$R_D = \frac{V_{DQ}}{I_{DQ}}$$

Dinamička (AC) otpornost diode se definiše kao:

$$r_d = \frac{\Delta V_{dQ}}{\Delta I_{dQ}}$$

Dinamička otpornost može se odrediti na osnovu Šoklijevog izraza za struju diode:

$$I_D = I_s \left( e^{\frac{V_D}{nV_t}} - 1 \right)$$

tako da je:

$$r_d = \frac{dV_D}{dI_D} = \frac{1}{\frac{dI_D}{dV_D}} = \frac{1}{\frac{I_s}{nV_t} e^{\frac{V_D}{nV_t}}} = \frac{nV_t}{I_D}$$

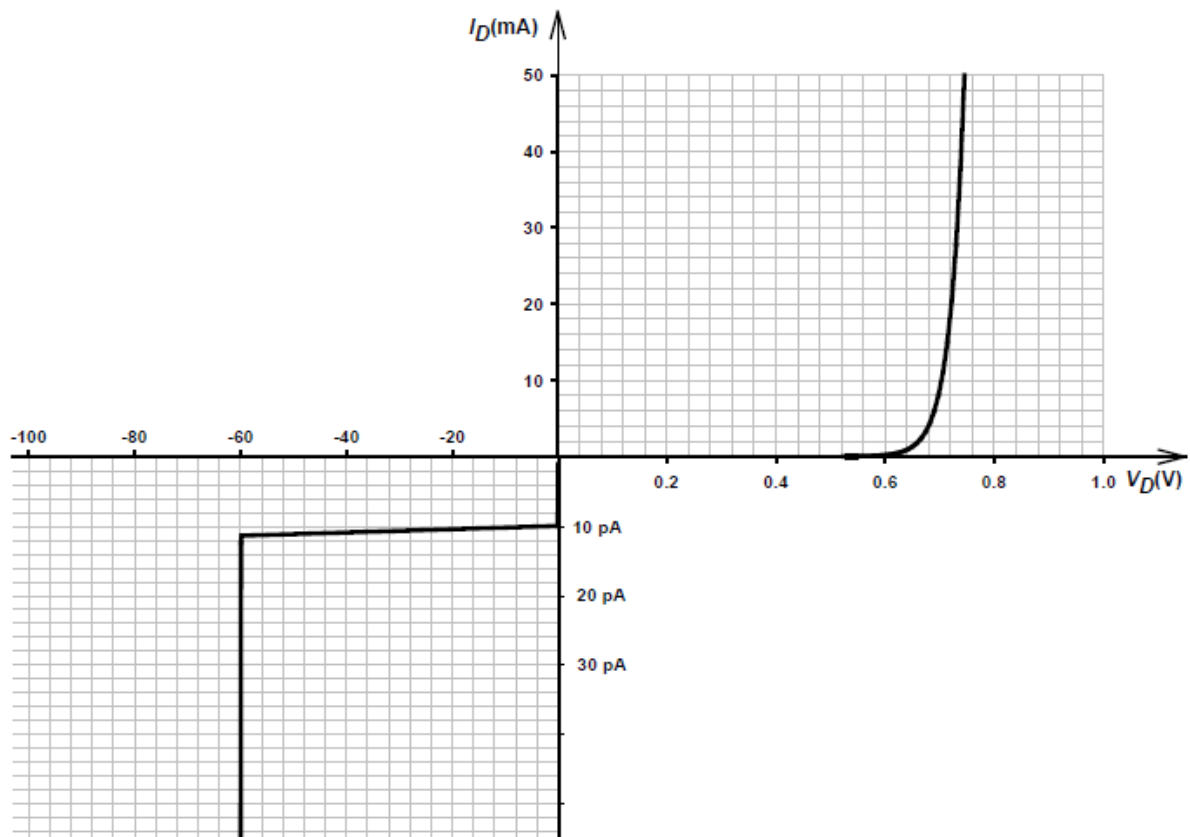
pri čemu je  $n=2$  za napone manje od napona vođenja,  $n=1$  za napone veće od napona vođenja. Ovde nisu uključene otpornosti tela i kontakata diode.

**ZADATAK 8.** Za diskretnu Si diodu (1N4001) čija je strujno-naponska karakteristika na sobnoj temperaturi data na slici:

- Odrediti statičku i dinamičku otpornost, kao i otpornost na osnovu Šoklijevog izraza za  $I_{D1}=4\text{mA}$  i  $I_{D2}=24 \text{ mA}$ .
- Odrediti dinamičku otpornost i probojni napon u inverznom režimu rada;
- Odrediti kolika greška se unosi u razmatranje kola koje sadrži ovu diodu ukoliko se upotrebí praktičan model umesto realnog pri struji od 24 mA.
- Koliki napon je potreban da bi struja diode bila 30mA na temperaturama  $100^\circ\text{C}$  i  $-55^\circ\text{C}$ ?

## POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE

## Računske vežbe



Rešenje:

- a) Za struju  $I_{D1} = 4\text{mA}$ , sa karakteristike čitamo napon  $V_{D1} = 0.68\text{V}$ . Statička otpornost je  $R_S = V_{D1}/I_{D1} = 170\Omega$ . Sa karakteristike očitavamo da pri promeni napona  $\Delta V_{D1} = 0.07\text{V}$ , dolazi do promene struje  $\Delta I_{D1} = 9\text{mA}$ . Dinamička otpornost je  $r_d = \Delta V_{D1}/\Delta I_{D1} = 8.89\Omega$ . Dinamička otpornost na osnovu Šoklijevog izraza je:  $r_d = nV_t/I_D = 13\Omega$ , za  $n = 2$  pošto dioda još uvek ne vodi (ne protiče značajna struja).

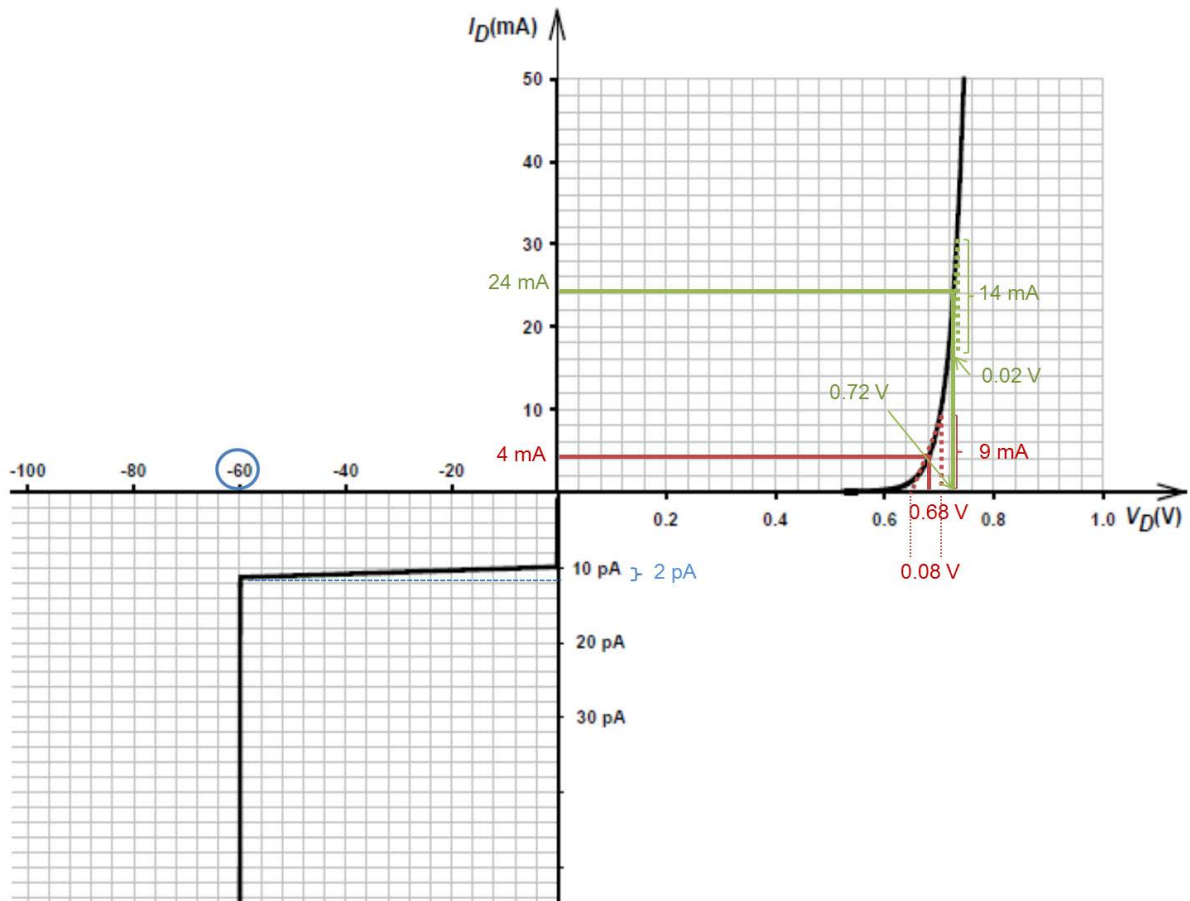
Za struju  $I_{D2} = 24\text{mA}$ , sa karakteristike čitamo napon  $V_{D2} = 0.72\text{V}$ . Statička otpornost je  $R_S = V_{D2}/I_{D2} = 30\Omega$ . Sa karakteristike očitavamo da pri promeni napona  $\Delta V_{D2} = 0.02\text{V}$ , dolazi do promene struje  $\Delta I_{D2} = 14\text{mA}$ . Dinamička otpornost je  $r_d = \Delta V_{D2}/\Delta I_{D2} = 1.43\Omega$ . Dinamička otpornost na osnovu Šoklijevog izraza je:  $r_d = nV_t/I_D = 1.083\Omega$ , za  $n = 1$  pošto dioda vodi (protiče značajna struja).

- b) Probojni napon iznosi  $-60\text{V}$ . Dinamička otpornost u inverznom režimu rada je:  $r_d = \Delta V_{DR}/\Delta I_{DR} = 60/(2 \cdot 10^{-12}) = 30\text{T}\Omega$ .
- c) Praktični model diode podrazumeva da je napon na diodi isti za sve struje i jednak je naponu vođenja diode. Ovaj napon je  $0.7\text{V}$ . Razmatranjem realnog modela dobija se da je napon na diodi pri struji od  $24\text{mA}$  jednak  $0.72\text{V}$ , pa je razlika ovih napona  $0.02\text{V}$ .

## POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE

## Računske vežbe

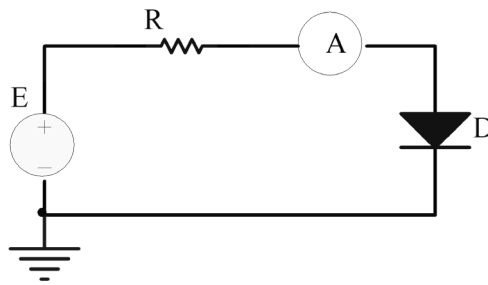
- d) Strujno – naponska karakteristika se pomera u levo za 2mV pri porastu temperature za 1°C. Na sobnoj temperaturi (25°C) je pri struji od 30mA napon jednak 0.73V. Na 100°C će ista struja teći kroz diodu pri naponu  $0.73 - (100 - 25) \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0.58V$ . S druge strane, da bi se postigla ista struja kroz diodu na temperaturi -55°C, potreban napon biće  $0.73 + (25 + 55) \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0.89V$ .



## Primena dioda

*Napomena: Primena dioda u ispravljačkim kolima (jednostrani i dvostrani ispravljači), kliperima, klamperima i množačima biće obrađena u okviru vežbi na računaru (kroz simulaciju u LT Spice-u) i na laboratorijskim vežbama (praktična realizacija).*

**ZADATAK 9.** U kolu sa slike iskorišćena je silicijumska dioda čija je inverzna struja zasićenja  $I_S = 6.4 \cdot 10^{-14}$  A i izmerena struja u kolu je 10 mA. Odrediti vrednost otpornosti otpornika R i napone na otporniku i diodi. Poznato je:  $E = 5$  V. Ukoliko se silicijumska dioda zameni LED diodom koja vodi pri  $V_{LED} = 2$  V, odrediti otpornosti otpornika R tako da struja kroz LED bude 20 mA.

**POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE****Računske vežbe**

Rešenje:

Struja kroz diodu je:

$$I_D = I_s \left( \exp \frac{V_D}{U_T} - 1 \right) \approx I_s \exp \frac{V_D}{U_T}$$

Napon na diodi je:

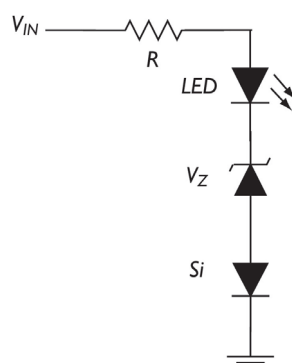
$$V_D = U_T \ln \frac{I_D}{I_s} = 0.67V$$

Za kolo se može napisati jednačina:  $E = RI_D + V_D$ , tako da se za otpornost dobija  $R = 433\Omega$ .

Napon na otporniku je  $V_R = RI_D = 4.33V$ . Kada se Si dioda zameni LED-om dobija se:

$$R = \frac{E - V_{LED}}{I_{LED}} = 150\Omega$$

**ZADATAK 10.** Za kolo na slici odrediti maksimalnu vrednost otpornika za koju će LED dioda svetleti punim sjajem na  $25^\circ C$  i  $75^\circ C$ , ako je  $V_{in} = 12V$ . Parametri dioda su:  $V_{Si}(T_0 = 25^\circ C) = 0.7V$ ,  $V_{LED}(T_0 = 25^\circ C) = 5V$ ,  $V_Z(T_0 = 25^\circ C) = 3.3V$ ,  $T_{CZ} = -0.072\%/^\circ C$ .



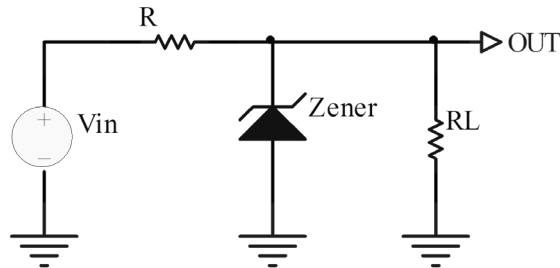
Rešenje:

Na  $T = 25^\circ C$  je  $V_{IN} = RI_{LED} + V_{LED} + V_Z + V_{Si}$ . Da bi LED svetleo punim intenzitetom potrebno je  $20mA$ , pa je  $R = 150\Omega$ .

**POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE****Računske vežbe**

Na  $T=75^{\circ}\text{C}$  je  $V_{Si}=0.7\cdot 50\cdot 10^{-3}=0.6\text{V}$ , dok je  $V_Z(75)=V_Z(25)+\Delta V_Z$ , pri čemu je  $\Delta V_Z = -0.072\cdot 50\cdot 3.3/100=-0.1188\text{V}$ , pa je  $V_Z(75)=3.1812\text{V}$ , tako da se za otpornost dobija  $R=160.94\Omega$ .

**ZADATAK 11.** U kolu stabilizatora napona (slika) iskorišćena je Zener dioda, čiji je Zenerov napon  $V_Z=6.8\text{V}$ . Poznato je:  $R=100\Omega$ ,  $R_L=1\text{k}\Omega$ .

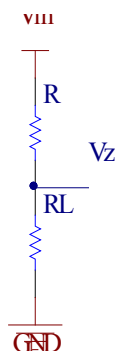


- Odrediti minimalnu vrednost napona  $V_{in}$  za koju će kolo ispravno raditi.
- Odrediti maksimalnu vrednost napona  $V_{in}$  koja sme da se dovede na ulaz a da dioda ne pregori, ako je maksimalna dozvoljena disipacija na diodi  $P_{max} = 220\text{mW}$ .
- Ako se kolo napaja sa  $V_{in}=12\text{V}$ , odrediti opseg otpornosti potrošača za koje će kolo ispravno raditi, ako je maksimalna dozvoljena disipacija na diodi  $P_{max} = 220\text{mW}$ .
- Ova Zenerova dioda ( $6.8\text{V}$  na  $25^{\circ}\text{C}$ ) ima pozitivni temperaturni koeficijent  $0.05\%/^{\circ}\text{C}$ . Odrediti Zenerov napon na  $100^{\circ}\text{C}$ .

Rešenje:

- Da bi smo odredili minimalnu vrednost napona  $V_{in}$  kolo ćemo posmatrati kao razdelnik napona:

$$V_Z = V_{out} = \frac{R_L}{R_L + R} V_{INmin}$$



Dobija se:

$$V_{INmin} = \left(1 + \frac{R}{R_L}\right) V_Z = 7.48\text{V}$$

- Za kolo se može napisati jednačina:

**POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE****Računske vežbe**

$$V_{IN} = RI + V_Z = R \left( \frac{P_{max}}{V_Z} + \frac{V_Z}{R_L} \right) + V_Z = 10.72V$$

- c) Za određivanje minimalne vrednosti otpornosti opterećenja kolo posmatramo kao razdelnik napona (a), pa se dobija:

$$R_{Lmin} = \frac{V_Z}{V_{IN} - V_Z} R = 130.8\Omega$$

Slično, iz jednačine kojom je kolo opisano pod b) dobija se da je maksimalna otpornost opterećenja za koju će kolo raditi kao stabilizator napona kada je na ulaz priključeno 12V:

$$R_{Lmax} = \frac{V_Z}{\frac{V_{IN} - V_Z}{R} - \frac{P_{max}}{V_Z}} = 346\Omega$$

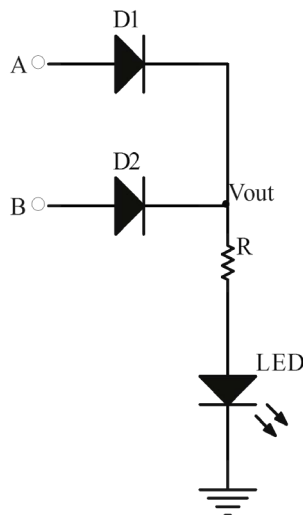
- d) Promena Zenerovog napona je:

$$\Delta V_Z = \frac{T_C}{100} (T - T_0) V_Z = 0.255V$$

tako da je Zenerov napon na 100°C:

$$V_Z(100) = V_Z(25) + \Delta V_Z = 7.055V$$

**ZADATAK 12.** Kolo sa slike je ILI (OR) gejt. Diode D1 i D2 su identične i napon vođenja je 0.7V pri temperaturi 25°C.



- a) Popuniti tabelu i odrediti vrednost otpornosti otpornika R, ako je struja neophodna da LED daje intenzivnu svetlost 10mA, pri čemu je napon na njemu 2V. Koristiti praktični model diode.
- b) Za koliko će se promeniti izlazni napon ako se temperatura poveća na 55°C? Smatrati da se otpornost otpornika i napon na LED-u ne menjaju sa temperaturom.

**POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE****Računske vežbe**

A [V]	B [V]	V <sub>OUT</sub> [V]	I <sub>D1</sub> [mA]	I <sub>D2</sub> [mA]
0	0			
0	5			
5	0			
5	5			

Rešenje:

- a) Izlazni napon je jednak  $V_{out}=V_A-V_D=V_B-V_D=5-0.7=4.3V$ . Kada su naponi na ulazu jednaki nuli i izlazni napon je jednak nuli. Kada je na bar jedan od ulaza napon logičke jedinice (5V), na izlazu će biti 4.3V. Iz jednačine  $V_{out}=RI_{LED}+V_{LED}$ , određujemo  $R=300\Omega$ . Kada vodi samo jedna dioda, kroz nju protiče struja od 10mA. Kada vode obe diode, pošto su identične kroz svaku protiče 5mA. Popunjena tabela:

A [V]	B [V]	V <sub>OUT</sub> [V]	I <sub>D1</sub> [mA]	I <sub>D2</sub> [mA]
0	0	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
0	5	<b>4.3</b>	<b>0</b>	<b>10</b>
5	0	<b>4.3</b>	<b>10</b>	<b>0</b>
5	5	<b>4.3</b>	<b>5</b>	<b>5</b>

- b) Napon na diodi pri temperaturi  $T=55^\circ C$ ,  $V_D=0.7-(55-25)\cdot 2\cdot 10^{-3}=0.64V$ . Tako da je izlazni napon  $V_{out}=5-0.64=4.36V$ , odnosno promeni se za 0.06V.

**ZADATAK 13.** Na slici je prikazano kolo filtera propusnika opsega koje se koristi u radio uređajima. Varikap dioda služi za podešavanje rezonantne frekvencije. Zavisnost kapacitivnosti varikap diode od primenjenog napona data je u tabeli:

V <sub>R</sub>	0V	-2V	-20V
C	40pF	22p	

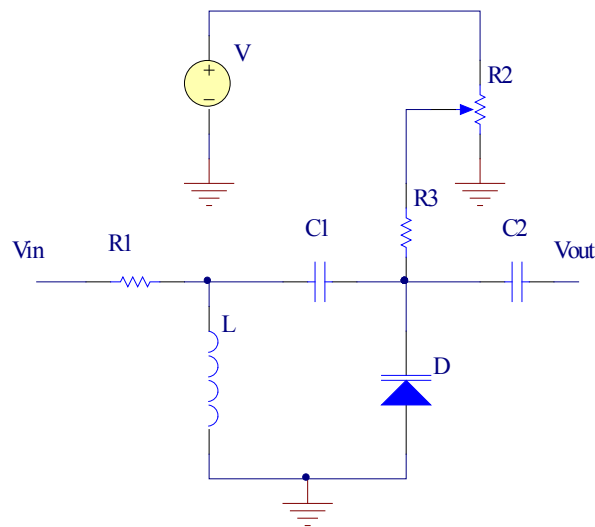
- a) Odrediti kapacitivnost diode kada se primeni napon od -20V, ako je faktor CR (odnos kapacitivnosti diode pri inverznom naponu 2V i 20V) jednak 5.
- b) Ako je upotrebljen kalem induktivnosti  $L=82nF$  odrediti opseg frekvencija koje će propustiti filter ako se napon V menja od 0 do -20V.

$C_1$  i  $C_2$  su coupling (blok) kondenzatori i ne utiču na rezonantnu učestanost.



## POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE

## Računske vežbe



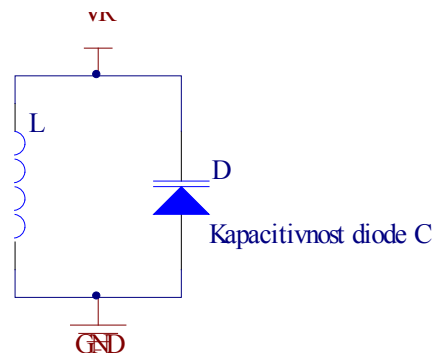
Rešenje:

a)

$$C_{20} = \frac{C_2}{CR} = 4.4pF$$

b) Posmatramo uprošćeno paralelno LC rezonantno kolo, gde umesto kondenzatora postoji varikap dioda kapacitivnosti C. Uslov rezonance je  $X_L = X_C$ , pa za ovo kolo važi:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



Dobija se:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}} = 87.8MHz$$

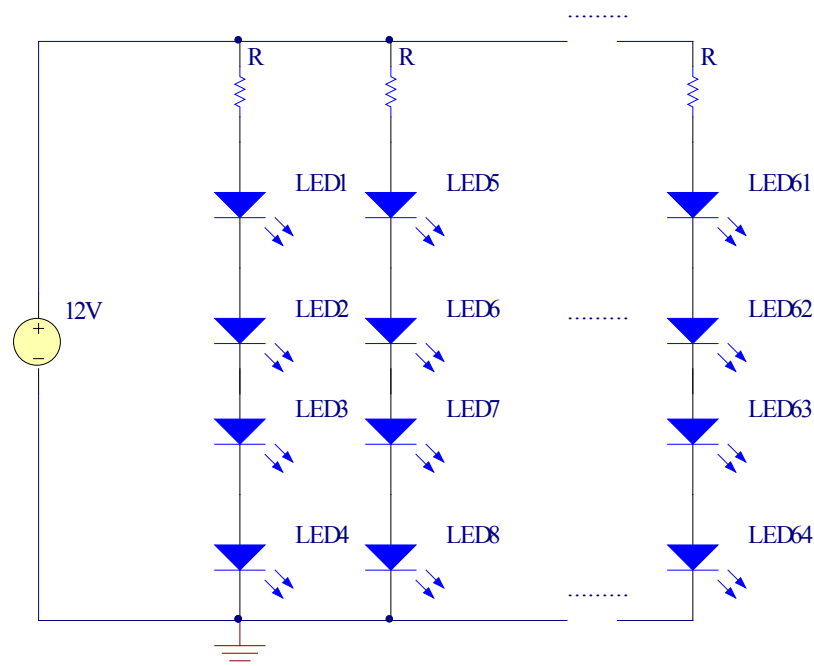
$$f_{20} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{20}}} = 265MHz$$

**POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE****Računske vežbe**

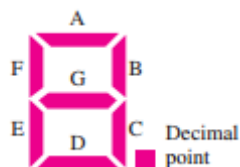
**ZADATAK 14.** Projektovati LED niz za novogodišnje lampione sastavljen od 64 crvene diode čiji je napon vođenja 2.5V pri struji od 30mA, korišćenjem minimalnog broja otpornika za ograničenje struje, pri čemu izvor generiše 12V.

Rešenje:

Maksimalni broj dioda koji se može vezati redno je:  $12 : 2.5 = 4.8$ . Vezaćemo 4 LED-a na red, pad napona na diodama biće  $4 \cdot 2.5 = 10V$ . Pad napona na otporniku biće  $12 - 10 = 2V$ . Pošto je struja ograničena na 30mA, treba iskoristiti otpornik  $R = 2 / (30 \cdot 10^{-3}) = 66.7\Omega$ . Izabraćemo otpornik iz standardnog niza od 68 $\Omega$ . Niz treba da sadrži 64 diode, što znači da je potrebno  $64 : 4 = 16$  otpornika. Potrebno je 16 paralelnih grana sa 4 LED-a vezana redno, kao što je ilustrovano na slici.



**ZADATAK 15.** Povezati 7-segmentni displej tako da na njemu bude ispisan broj „5“. Napon potreban da bi svetleo segment je 2V. Maksimalna struja koja sme da protokne kroz LED koji čini jedan segment displeja je 30mA. Napon logičke jedinice jednak je 5V. Dati rešenja sa zajedničkom anodom i zajedničkom katodom.



**POLUPROVODNIČKE KOMPONENTE**

**Računske vežbe**

Rešenje:

Treba da svetle segmenti A, F, G, C, D. Otpornik za ograničenje struje treba da bude  $R = (5 - 2) / (30 \cdot 10^{-3}) = 100 \Omega$ . Na slici je prikazano rešenje za 7-segmentni displej sa zajedničkom anodom i zajedničkom katodom.

