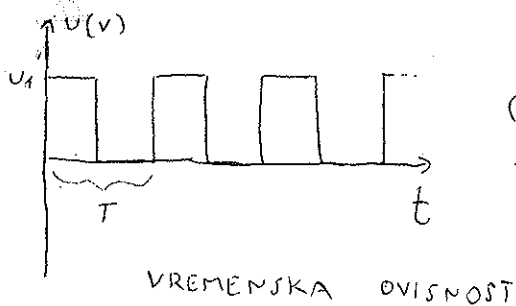


1. UVOD U ELEKTRONIKU

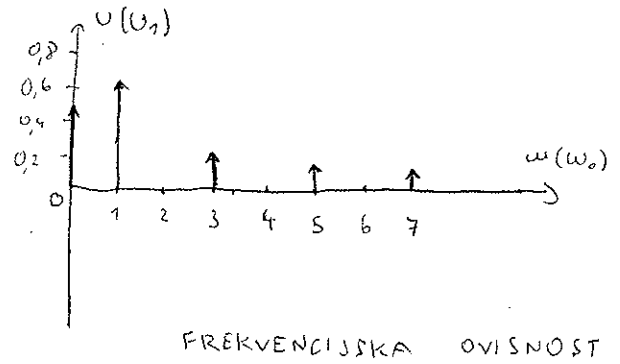
* RAZVOJ ELEKTRONIKE

• VRSTE SIGNALA



$$f: t \rightarrow U$$

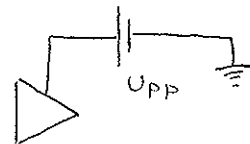
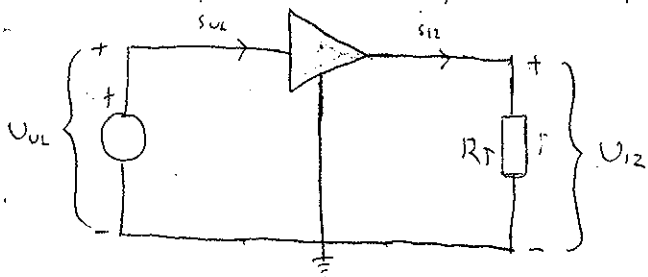
FOURIEROV RED
(TRANSFORMACIJA
ZA APERIODIČNE)



$$F: \omega \rightarrow U$$

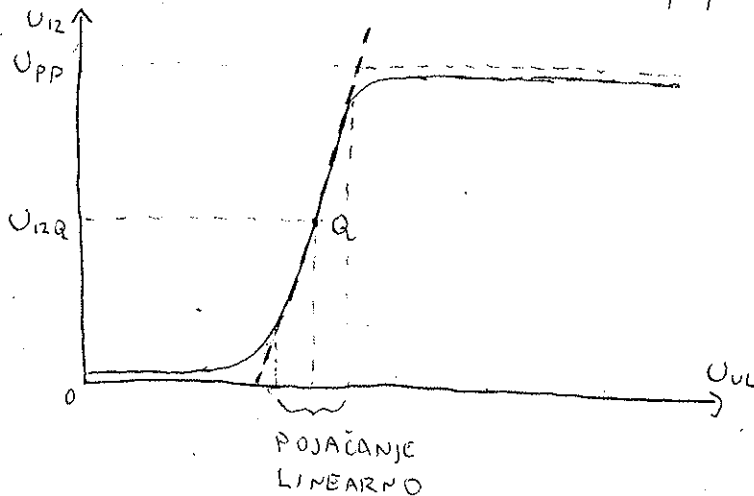
• OSNOVNA SVOJSTVA POJAČALA

* linearni sklopovi, četveropol (jedna priključnica zajednička)



- pojačalo mora imati napon napajanja
(mora nadoknaditi snagu)

* prijenosna karakteristika pojačala



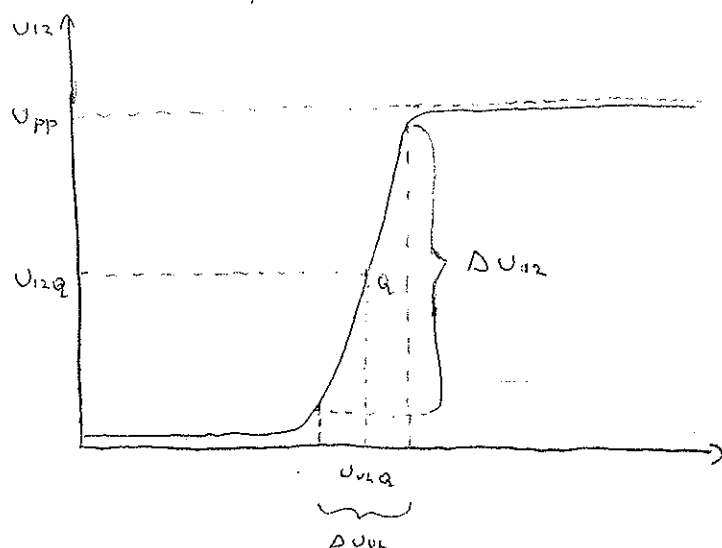
- koristimo linearni dio karakteristike

* pojačanja

$$A_v = \frac{u_{iz}(t)}{u_{ul}(t)} \quad \text{- naponsko pojačanje} \quad A_i = \frac{i_{iz}(t)}{i_{ul}(t)} \quad \text{- strujno pojačanje}$$

$$A_p = \frac{P_{iz}(t)}{P_{ul}(t)} = \frac{u_{iz} \cdot i_{iz}(t)}{u_{ul} \cdot i_{ul}(t)} = A_v \cdot A_i \quad \text{- pojačanje snage}$$

* postavljanje radne točke



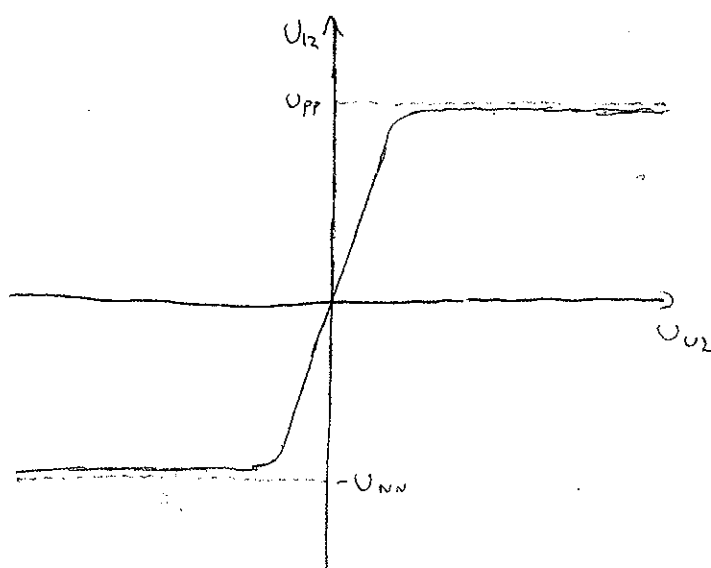
- cilj je postaviti statičku radnu točku (Q) na sredinu karakteristike
- ulazni napon ne smije doći na nelinearni dio karakteristike

- ulazni napon dovedemo do sredine karakteristike istosmjernim izvorom napona

- izmjenična komponenta ne smije "izći" iz linearnog dijela karakteristike

$$A_V = \frac{\Delta U_{12}}{\Delta U_{u2}} = \left| \Delta U_{12} \approx U_{PP} - 0 \right| \quad \Delta U_{u2} = \frac{\Delta U_{12}}{A_V} \approx \frac{U_{PP}}{A_V} \quad \text{"hod" ulaznog napona}$$

- sa dva napona napajanja možemo namjestiti da je ulazni napon za statičku radnu točku u nuli (U_{PP} i $-U_{NN}$)



- sada ulazni napon ne treba istosmjernu komponentu

$$\Delta U_{u2} = \frac{U_{PP} + U_{NN}}{A_V}$$

- snaga pojačala

$$P_{PP} = U_{PP} \cdot i_P = \frac{1}{T} \int_0^T U_{PP} i_P dt$$

- djelotvornost pojačala

$$\eta = \frac{P_{T,ac}}{P_{PP}}$$

- srednja snaga predana teretu

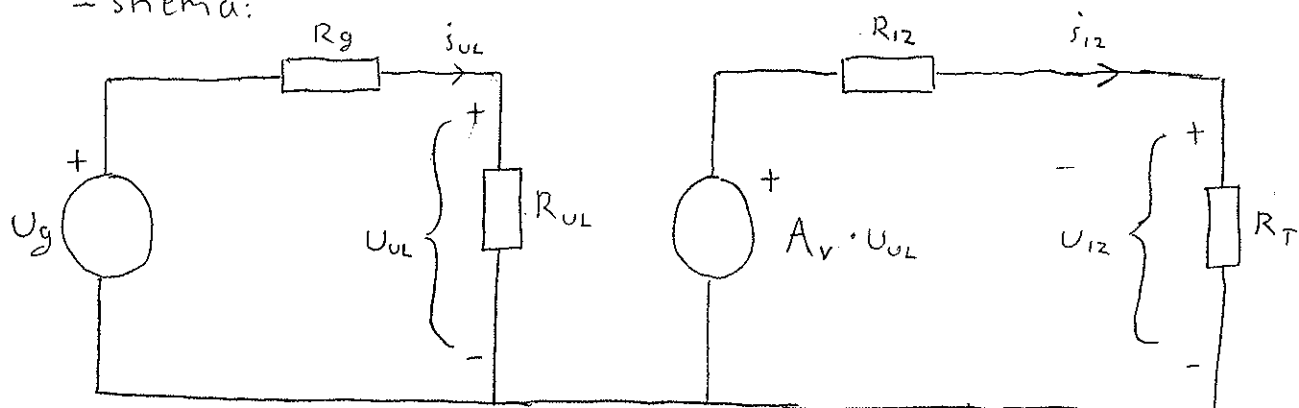
$$P_{T,ac} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{12} i_{12} dt$$

* SKLOPOVSKI MODELI POJAČALA

- naponsko pojačalo

- naponski ovisan naponski izvor

- shema:



- parametri pojačala

A_v, R_{UL}, R_{12} - parametri pojačala

A_v - pojačanje neopterećenog pojačala ($i_{12} = 0 \Rightarrow R_T = \infty$) [V]

R_{UL} - ulazni otpor (idealno $R_{UL} \rightarrow \infty$)

R_{12} - izlazni otpor (idealno $R_{12} \rightarrow 0$)

- pojačanja

$$U_{12} = A_v \cdot U_{UL} \cdot \frac{R_T}{R_T + R_{12}}, \quad A_v = \frac{U_{12}}{U_{UL}} \Rightarrow \frac{U_{12}}{U_{UL}} = A_v \cdot \frac{R_T}{R_T + R_{12}}$$

$$A_v = A_v \cdot \frac{R_T}{R_T + R_{12}} = \text{naponsko pojačanje}$$

$$U_{UL} = U_g \cdot \frac{R_{UL}}{R_g + R_{UL}}$$

$$A_{vg} = \frac{U_{12}}{U_g} = \frac{U_{12}}{U_{UL}} \cdot \frac{U_{UL}}{U_g} = A_v \cdot \frac{R_{UL}}{R_g + R_{UL}} = A_v \cdot \frac{R_T}{R_T + R_{12}} \cdot \frac{R_{UL}}{R_g + R_{UL}} - \text{naponsko pojačanje u odnosu na izvor}$$

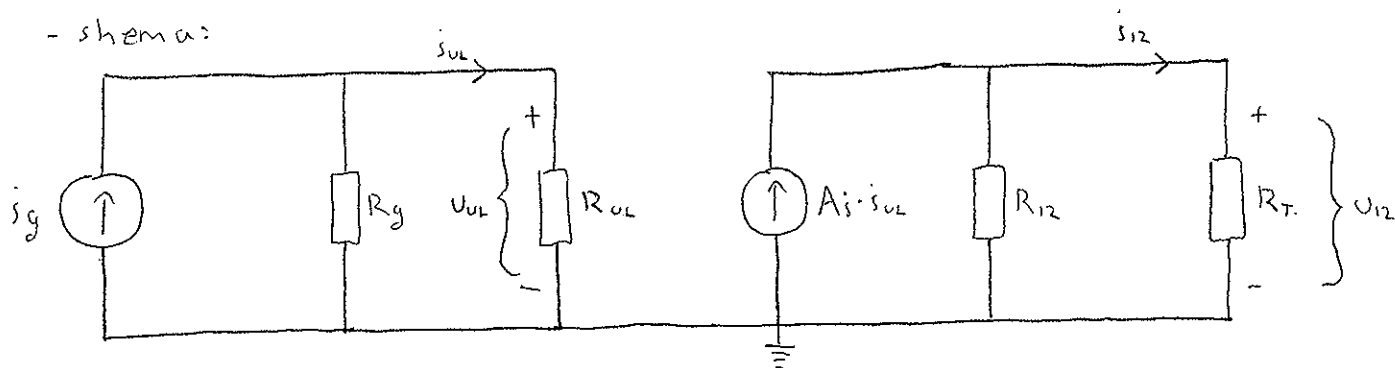
$$A_i = \frac{i_{12}}{i_{UL}} = \frac{\frac{U_{12}}{R_T}}{\frac{U_{UL}}{R_{UL}}} = A_v \cdot \frac{R_{UL}}{R_T} = A_v \cdot \frac{R_{UL}}{R_T + R_{12}} - \text{strujno pojačanje}$$

$$A_p = \frac{P_{12}}{P_{UL}} = \frac{U_{12} \cdot i_{12}}{U_{UL} \cdot i_{UL}} = A_v \cdot A_i - \text{pojačanje snage}$$

- strujno pojačalo

- strujno ovisan strujni izvor

- shema:



- parametri pojačala

A_i - strujno pojačanje neopterećenog pojačala ($U_{12}=0, R_T=0$) [A]

R_{12} - izlazni otpor ($R_{12} \rightarrow 0$)

R_{UL} - ulazni otpor ($R_{UL} \rightarrow 0$)

- pojačanja

$$A_I = \frac{i_{12}}{i_{UL}}, \quad U_{12} = i_{12} \cdot R_T, \quad U_{12} = A_i \cdot i_{UL} \cdot (R_{12} \parallel R_T) = A_i \cdot i_{UL} \cdot \frac{R_{12} \cdot R_T}{R_{12} + R_T} \Rightarrow$$

$$i_{12} \cdot R_T = A_i \cdot i_{UL} \cdot \frac{R_{12} \cdot R_T}{R_{12} + R_T} \quad / : (R_T \cdot i_{UL}) \Rightarrow$$

$$\frac{i_{12}}{i_{UL}} = A_I = A_i \cdot \frac{R_{12}}{R_{12} + R_T} \quad - \text{strujno pojačanje}$$

$$A_{I_g} = \frac{i_{12}}{i_g} = \frac{i_{12}}{i_g} \cdot \frac{i_{UL}}{i_{UL}} = \frac{i_{12}}{i_{UL}} \cdot \frac{i_{UL}}{i_g}, \quad \frac{i_{12}}{i_{UL}} = A_I = A_i \cdot \frac{R_{12}}{R_{12} + R_T}, \quad U_{UL} = i_{UL} \cdot R_{UL}$$

$$U_{UL} = i_g \cdot (R_g \parallel R_{UL}) = i_g \cdot \frac{R_g \cdot R_{UL}}{R_g + R_{UL}} \Rightarrow i_{UL} \cdot R_{UL} = i_g \cdot \frac{R_g \cdot R_{UL}}{R_g + R_{UL}} \quad / : (i_g \cdot R_{UL}) \Rightarrow \frac{i_{UL}}{i_g} = \frac{R_g}{R_g + R_{UL}}$$

$$\Rightarrow A_{I_g} = A_I \cdot \frac{R_g}{R_g + R_{UL}} = A_i \cdot \frac{R_{12}}{R_{12} + R_T} \cdot \frac{R_g}{R_g + R_{UL}} \quad - \text{strujno pojačanje u odnosu na izvor}$$

$$A_V = \frac{U_{12}}{U_{UL}} = \frac{i_{12} \cdot R_T}{i_{UL} \cdot R_{UL}} = A_I \cdot \frac{R_T}{R_{UL}}$$

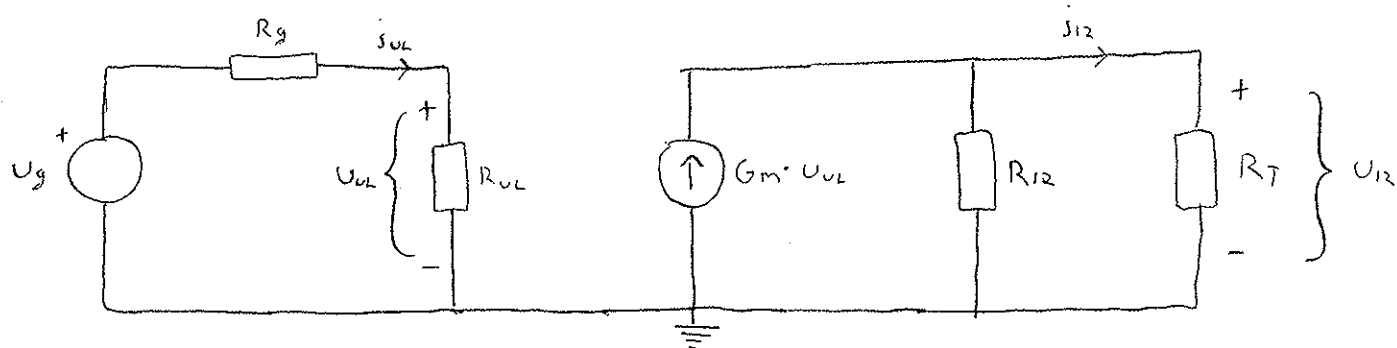
$$A_V = A_I \cdot \frac{R_{UL}}{R_T} = A_i \cdot \frac{R_{12}}{R_{12} + R_T} \cdot \frac{R_T}{R_{UL}} \quad - \text{naponsko pojačanje}$$

$$A_P = A_I \cdot A_V \quad - \text{pojačanje snage}$$

- strminsko pojačalo

- naponski ovisan strujni izvor

- shema:



- parametri pojačala

G_m - strminsko pojačanje neopterećenog pojačala ($U_{I_2} = 0, R_T = 0$) $\left[\frac{A}{V}\right] = [S]$

R_{I_2} - ulazni otpor ($R_{I_2} \rightarrow \infty$)

R_{U_L} - izlazni otpor ($R_{U_L} \rightarrow \infty$)

- pojačanja

$$G_M = \frac{i_{I_2}}{U_{U_L}}, \quad i_{I_2} = G_m \cdot U_{U_L} \cdot \frac{R_{I_2}}{R_{I_2} + R_T} \Rightarrow \frac{i_{I_2}}{U_{U_L}} = G_M = G_m \frac{R_{I_2}}{R_{I_2} + R_T} - \text{strminsko pojačanje}$$

$$A_V = \frac{U_{I_2}}{U_{U_L}}, \quad U_{I_2} = i_{I_2} \cdot R_T = G_m \cdot U_{U_L} \cdot \frac{R_{I_2}}{R_{I_2} + R_T} \cdot R_T \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A_V = G_M \cdot R_T = G_m \cdot \frac{R_{I_2} \cdot R_T}{R_{I_2} + R_T} - \text{naponsko pojačanje}$$

$$A_I = \frac{i_{I_2}}{i_{U_L}}, \quad i_{U_L} = \frac{U_{U_L}}{R_{U_L}} \Rightarrow A_I = G_m \cdot R_{U_L} = G_m \cdot \frac{R_{I_2} \cdot R_{U_L}}{R_{I_2} + R_T} - \text{strujno pojačanje}$$

$$A_P = A_V \cdot A_I - \text{pojačanje snage}$$

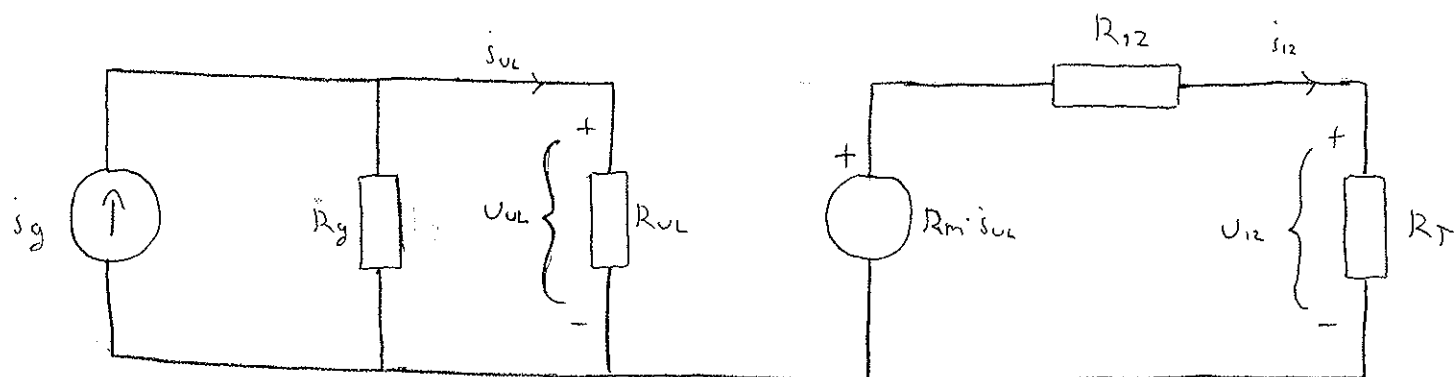
$$G_{Mg} = \frac{i_{I_2}}{U_g} = \frac{i_{I_2}}{U_{U_L}} \cdot \frac{U_{U_L}}{U_g} = G_M \cdot \frac{U_{U_L}}{U_g} = G_m \cdot \frac{i_{U_L} \cdot R_{U_L}}{i_{U_L} (R_{U_L} + R_g)}$$

$$G_{Mg} = G_m \cdot \frac{R_{U_L}}{R_{U_L} + R_g} = G_m \cdot \frac{R_{I_2}}{R_{I_2} + R_T} \cdot \frac{R_{U_L}}{R_{U_L} + R_g} - \text{strminsko pojačanje odnosu na izvor}$$

- otporno pojačalo

- strujno ovisan naponski izvor

- shema:



- parametri pojačala

R_m - strminsko pojačanje neopterećenog pojačala ($i_{12}=0, R_T=\infty$) $[\frac{V}{A}] = [1]$

R_{12} - izlazni otpor ($R_{12} \rightarrow 0$)

R_{UL} - ulazni otpor ($R_{UL} \rightarrow 0$)

- pojačanja

$$R_M = \frac{U_{12}}{i_{UL}}, \quad U_{12} = R_m \cdot i_{UL} \cdot \frac{R_T}{R_{12} + R_T} \Rightarrow R_M = R_m \cdot \frac{R_T}{R_{12} + R_T} - \text{otporno pojačanje}$$

$$A_V = \frac{U_{12}}{U_{UL}}, \quad U_{UL} = i_{UL} \cdot R_{UL} \Rightarrow A_V = R_m \cdot \frac{1}{R_{UL}} = R_m \cdot \frac{R_T}{R_{12} + R_T} \cdot \frac{1}{R_{UL}} - \text{naponsko pojačanje}$$

$$A_I = \frac{i_{12}}{i_{UL}}, \quad i_{12} = \frac{U_{12}}{R_T} \Rightarrow A_I = R_m \cdot \frac{1}{R_T} = R_m \cdot \frac{R_T}{R_{12} + R_T} \cdot \frac{1}{R_T} - \text{strujno pojačanje}$$

$$A_P = A_V \cdot A_I - \text{pojačanje snage}$$

$$R_{Mg} = \frac{U_{12}}{i_g} = \frac{U_{12}}{i_{UL}} \cdot \frac{i_{UL}}{i_g} = A_M \cdot \frac{\frac{U_{UL}}{R_{UL}}}{\frac{U_{UL}}{R_g + R_{UL}}}$$

$$R_{Mg} = R_m \cdot \frac{R_g}{R_g + R_{UL}} = R_m \cdot \frac{R_T}{R_{12} + R_T} \cdot \frac{R_g}{R_g + R_{UL}} - \text{otporno pojačanje u odnosu na izvor}$$

- pregled sklopovskih modela pojačala

• NAPONSKO POJAČALO

$$A_v = \frac{U_{i2}}{s_{ul}} \Big|_{s_{i2}=0}$$

$$A_v = A_r \frac{R_T}{R_T + R_{i2}}$$

$$R_{ul} \rightarrow \infty$$

$$A_I = A_r \frac{R_{ul}}{R_T + R_{i2}}$$

$$R_{i2} \rightarrow \infty$$

$$A_{vg} = A_r \frac{R_T}{R_T + R_{i2}} \cdot \frac{R_{ul}}{R_g + R_{ul}}$$

• STRUJNO POJAČALO

$$A_i = \frac{i_{i2}}{i_{ul}} \Big|_{U_{i2}=0}$$

$$A_I = A_i \frac{R_{i2}}{R_{i2} + R_T}$$

$$R_{ul} \rightarrow 0$$

$$A_v = A_i \frac{R_{i2}}{R_{i2} + R_T} \cdot \frac{R_T}{R_{ul}}$$

$$R_{i2} \rightarrow \infty$$

$$A_{Ig} = A_i \frac{R_{i2}}{R_{i2} + R_T} \cdot \frac{R_g}{R_g + R_{ul}}$$

• STRMINSKO POJAČALO

$$G_m = \frac{i_{i2}}{U_{ul}} \Big|_{U_{i2}=0}$$

$$G_M = G_m \cdot \frac{R_{i2}}{R_{i2} + R_T}$$

$$R_{ul} \rightarrow \infty$$

$$A_v = G_m \frac{R_{i2} \cdot R_T}{R_{i2} + R_T}$$

$$R_{i2} \rightarrow \infty$$

$$A_I = G_m \frac{R_{i2} \cdot R_{ul}}{R_{i2} + R_T}$$

$$G_{mg} = G_m \frac{R_{i2}}{R_{i2} + R_T} \cdot \frac{R_{ul}}{R_{ul} + R_g}$$

• OTPORNO POJAČALO

$$R_m = \frac{U_{i2}}{i_{ul}} \Big|_{i_{i2}=0}$$

$$R_M = R_m \frac{R_T}{R_T + R_{i2}}$$

$$R_{ul} \rightarrow 0$$

$$A_v = R_m \frac{R_T}{R_T + R_{i2}} \cdot \frac{1}{R_{ul}}$$

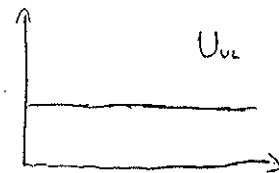
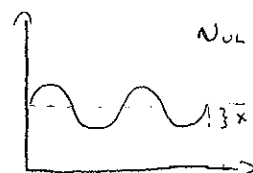
$$R_{i2} \rightarrow 0$$

$$A_I = R_m \frac{1}{R_T + R_{i2}}$$

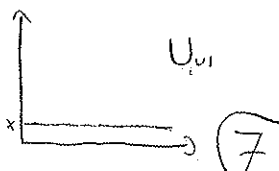
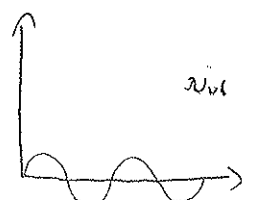
$$R_{mg} = R_m \frac{R_T}{R_T + R_{i2}} \cdot \frac{R_g}{R_g + R_{ul}}$$

- konvencija o oznakama i indeksima

U_{ul} - istosmjerna komponenta



U_{ul} - amplituda izmjenične komponente



U_{ul} - totalna vrijednost

U_{ul} - izmjenična komponenta

* POJAČANJA U DECIBELIMA

- odnos veličina ul. i iz. veličina u logaritamskom mjerilu

$$A_P = 10 \log \frac{P_{iz}}{P_{ul}} \text{ [dB]} \quad \text{- pojačanje snage u decibelima}$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

↓

$$A_P = 10 \log \frac{\frac{U_{iz}^2}{R_T}}{\frac{U_{ul}^2}{R_{ul}}} = 10 \cdot \left(\log \left(\frac{U_{iz}}{U_{ul}} \right)^2 \cdot \frac{R_{ul}}{R_T} \right) = 10 \cdot \left(2 \log \frac{U_{iz}}{U_{ul}} + \log \frac{R_{ul}}{R_T} \right)$$

$$A_P = 20 \log \frac{U_{iz}}{U_{ul}} + 10 \log \frac{R_{ul}}{R_T} \text{ [dB]}$$

⏟
NAPONSKO
POJAČANJE

$$P = I^2 \cdot R$$

↓

$$A_P = 10 \log \frac{\frac{I_{iz}^2 \cdot R_T}{I_{ul}^2 \cdot R_{ul}}}{I_{ul}^2 \cdot R_{ul}} = 10 \left(2 \cdot \log \frac{I_{iz}}{I_{ul}} + \log \frac{R_T}{R_{ul}} \right)$$

$$A_P = 20 \log \frac{I_{iz}}{I_{ul}} + 10 \log \frac{R_T}{R_{ul}}$$

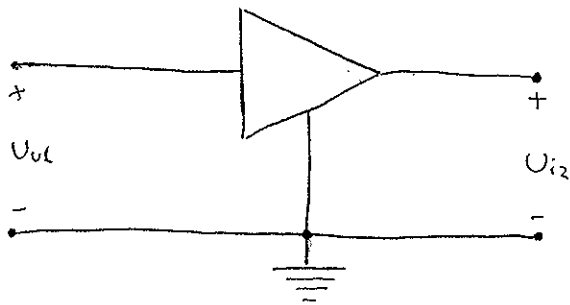
⏟
STRUJNO
POJAČANJE

$$A_V = 20 \log \frac{U_{iz}}{U_{ul}} \quad \text{- naponsko pojačanje}$$

$$A_I = 20 \log \frac{I_{iz}}{I_{ul}} \quad \text{- strujno pojačanje}$$

* FREKVENCIJSKA KARAKTERISTIKA

- svojstva pojačala određujemo davođenjem sinusnih signala raznih frekvencija te dobivamo frekvencijski odziv.



$$U_{ol} = U_{olm} \cdot \sin \omega t$$

$$U_{iz} = U_{izm} \cdot \sin(\omega t + \phi)$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

- dobili smo povećanje amplitude i pomak u fazi kod izlaznog signala

$$|A_v(f)| = \frac{U_{izm}}{U_{olm}} \quad - \text{amplituda naponskog pojačanja}$$

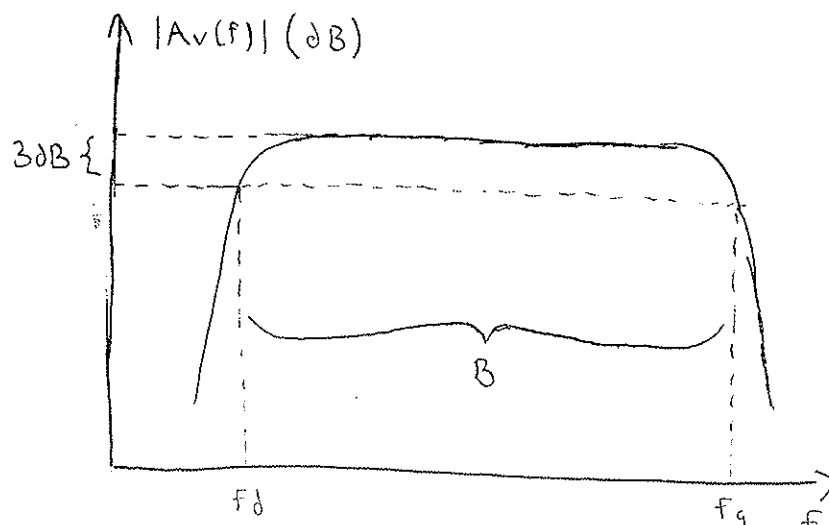
$$\angle A_v(f) = \phi \quad - \text{fazni pomak naponskog pojačanja}$$

- Možemo dobiti ovisnost amplitude i faznog pomaka naponskog pojačanja o frekvenciji.

FREKVENCIJSKA KARAKTERISTIKA

- amplitudna frekvencijska karakteristika
- fazna frekvencijska karakteristika

- amplitudna frekvencijska karakteristika pojačala



$$* 3 \text{ dB} \approx \frac{A_{vo}}{\sqrt{2}}$$

B - širina područja srednjih frekvencija

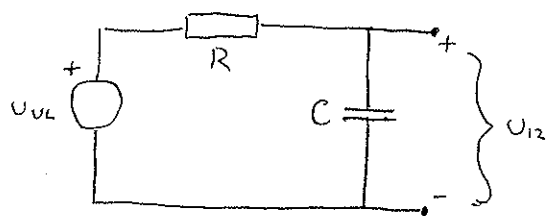
f_g - gornja granična frekvencija

f_d - donja granična frekvencija

$$B = f_g - f_d$$

* FREKVENCIJSKA KARAKTERISTIKA RC-MREŽE

- RC-mreža



- dovodimo sinusni signal:

$$u_{uk} = U_{uk} \cdot \sin(\omega t)$$

- prijenosna funkcija

$$T = \frac{U_{12}}{U_{uk}} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

vremenska konstanta [s.]

$$RC = \tau = \frac{1}{\omega_1}$$

$$T = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_1}} = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_1}} \cdot \frac{1 - j\frac{\omega}{\omega_1}}{1 - j\frac{\omega}{\omega_1}} = \frac{1 - j\frac{\omega}{\omega_1}}{1 + \frac{\omega^2}{\omega_1^2}}$$

- amplitudna karakteristika

$$|T| = \sqrt{\text{Re}(T)^2 + \text{Im}(T)^2} = \sqrt{\frac{1 + \frac{\omega^2}{\omega_1^2}}{(1 + \frac{\omega^2}{\omega_1^2})^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2}{\omega_1^2}}}$$

• u decibelima

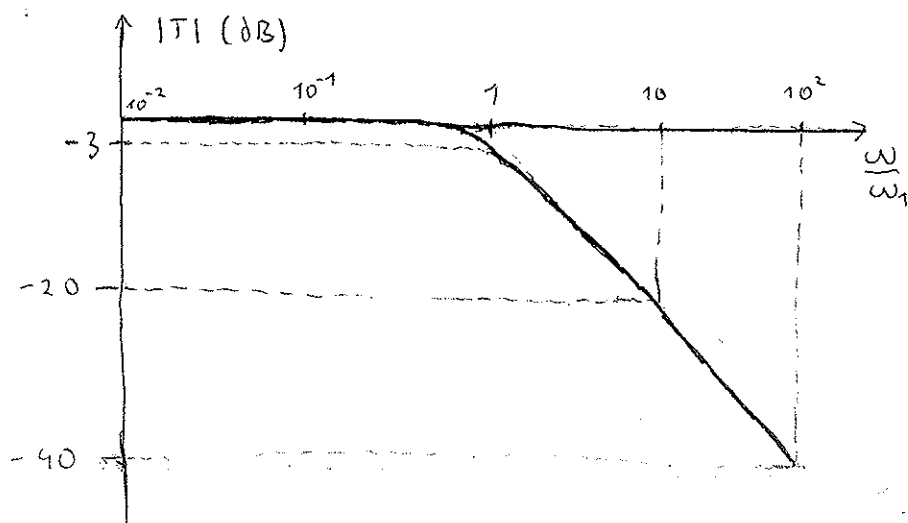
$$|T| = -20 \log \sqrt{1 + (\frac{\omega}{\omega_1})^2} \quad [\text{dB}]$$

$$\omega \ll \omega_1 \quad |T| = 0$$

$$\omega = \omega_1 \quad |T| = -3 \text{ dB}$$

$$\omega \gg \omega_1 \quad |T| = -20 \log \frac{\omega}{\omega_1}$$

} iz ovoga možemo nacrtati
amp. karakteristiku

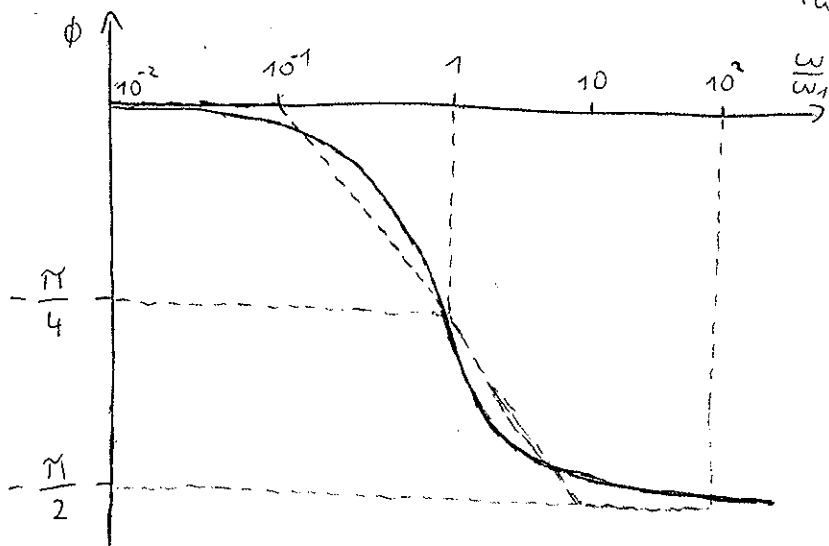


$$\omega_g = \omega_1 = \frac{1}{RC}$$

↑
gornja granična
frekvencija
RC-mreže

- fazna karakteristika

$$\phi = \arctg \left(\frac{\text{Im } \phi}{\text{Re } \phi} \right) = \arctg \frac{\frac{-\frac{\omega}{\omega_1}}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2}}{\frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2}} = -\arctg \frac{\omega}{\omega_1}$$



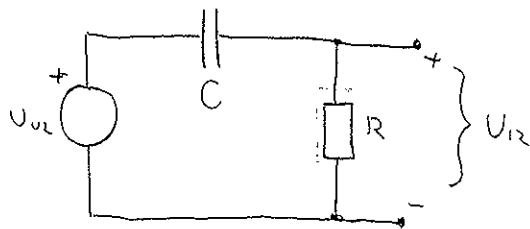
- možemo zaključiti da je

RC-mreža nisko propusni filter.

1) iz amplitudne karakteristika

2) promatrajući krug - C na visokoj frekvenciji dobro vodi struju pa je napon na izlazu slab ...

* FREKVENCIJSKA KARAKTERISTIKA CR-MREŽE



- dovodimo sinusni signal

$$U_{01} = U_{01} \sin(\omega t)$$

- prijenosna funkcija

$$T = \frac{U_{02}}{U_{01}}$$

$$T = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{Rj\omega C}{Rj\omega C + 1}, \quad RC = \gamma = \frac{1}{\omega_1}$$

$$T = \frac{j \cdot \frac{\omega}{\omega_1}}{j \frac{\omega}{\omega_1} + 1} = \frac{j \frac{\omega}{\omega_1}}{j \frac{\omega}{\omega_1} + 1} \cdot \frac{j \frac{\omega}{\omega_1} - 1}{j \frac{\omega}{\omega_1} - 1} = \frac{-\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 - j \frac{\omega}{\omega_1}}{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 + 1} = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 + j \frac{\omega}{\omega_1}}{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 + 1}$$

$$T = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2}{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 + 1} + j \frac{\frac{\omega}{\omega_1}}{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 + 1}$$

- amplitudna karakteristika

$$|T| = \sqrt{\operatorname{Re}(T)^2 + \operatorname{Im}(T)^2}$$

$$|T| = \sqrt{\left(\frac{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2}{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 + 1}\right)^2 + \left(\frac{\frac{\omega}{\omega_1}}{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 + 1}\right)^2} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^4 + \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2}{\left(\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 + 1\right)^2}} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 \left(\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 + 1\right)}{\left(\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 + 1\right)^2}} =$$

$$|T| = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 + 1}}$$

• $|T|$ izrazimo u decibelima

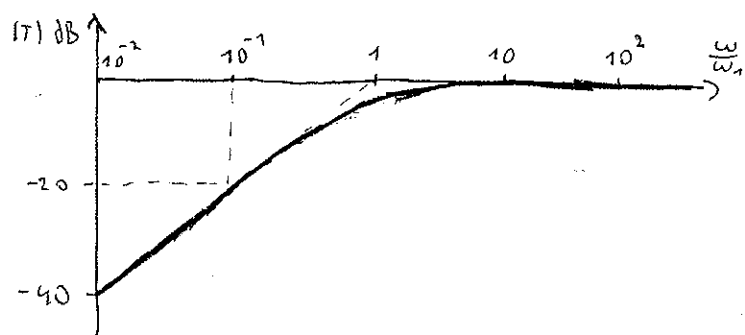
$$|T| = 20 \log \frac{\omega}{\omega_1} - 20 \log \sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2 + 1} \quad [\text{dB}] \quad \text{- imamo 3 slučaja}$$

$$\omega \ll \omega_1 \rightarrow 20 \log \frac{\omega}{\omega_1}$$

$$\omega = \omega_1 \rightarrow -20 \log \sqrt{2} = -3 \text{ dB}$$

$$\omega \gg \omega_1 \rightarrow 20 \log \frac{\omega}{\omega_1} - 20 \log \frac{\omega}{\omega_1} = 0$$

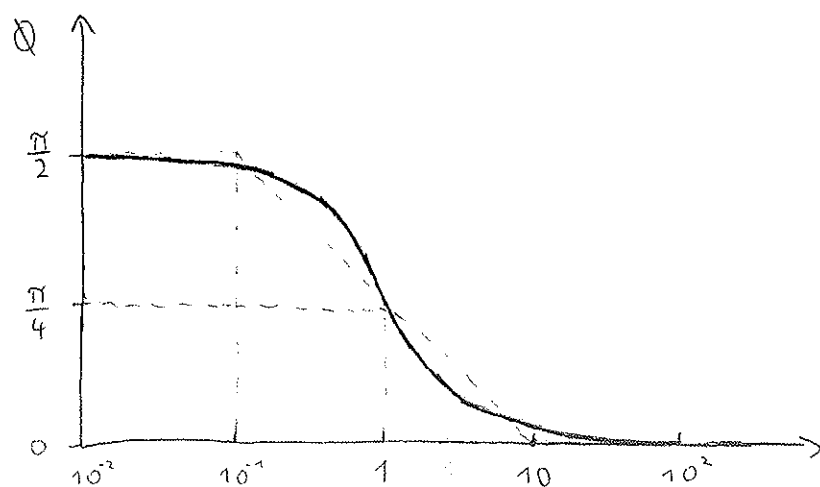
} iz ovog nacrtamo karakteristiku



- možemo zaključiti da je CR mreža visoko-propusni filter

- fazna karakteristika

$$\varphi = \arctg \frac{\operatorname{Im} T}{\operatorname{Re} T} = \arctg \frac{\omega}{\omega_1}$$



$$\omega_0 = \omega_1 = \frac{1}{R_0 C}$$

↖ donja granična frekvencija CR-mreže

* ODZIV RC-MREŽE

- odziv na pravokutni impuls
- oblik u vremenskoj domeni dobijemo iz frekvencijske domene inverznom Laplaceovom transformacijom

$T(s)$ - prijenosna funkcija ($\frac{U_{12}}{U_{ul}}$), $Z_C = \frac{1}{sC}$ - impedancija u s -domeni

$$T(s) = \frac{U_{12}(s)}{U_{ul}(s)} = \frac{\frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}} = \frac{1}{1 + RCs} = \left| RC = \gamma \right| = \frac{1}{1 + \gamma \cdot s}$$

- još nam fali Laplaceov transformat ulaznog napona, a to je pravokutni impuls:

$$u_{ul}(t) = U_1 \cdot \text{impuls} \quad U_{ul}(s) = \frac{U_1}{s}$$

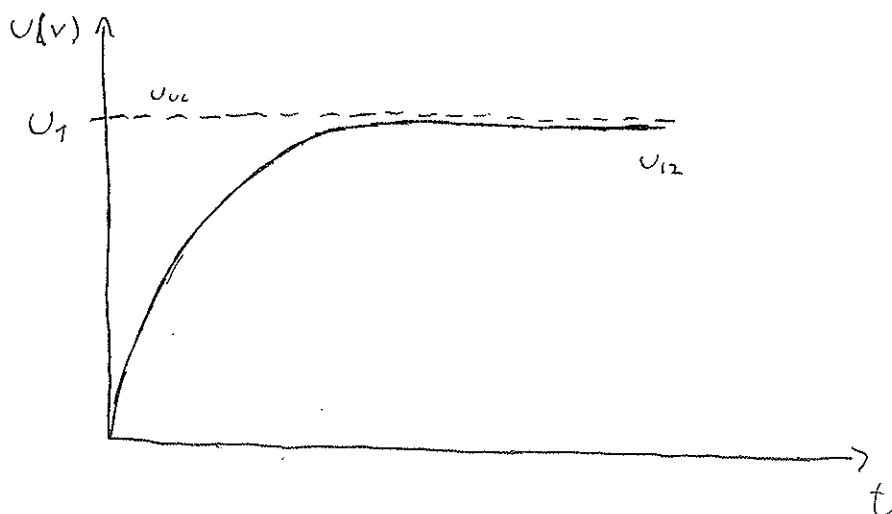
- izlazni napon u s -domeni

$$U_{12}(s) = U_{ul}(s) \cdot T(s) = \frac{U_1}{s} \cdot \frac{1}{1 + \gamma \cdot s} = U_1 \cdot \frac{1}{s + \gamma s^2} = U_1 \cdot \frac{1}{s(1 + \gamma s)} \cdot \frac{\frac{1}{\gamma}}{\frac{1}{\gamma}} =$$
$$= U_1 \cdot \frac{\frac{1}{\gamma}}{s \cdot (\frac{1}{\gamma} + s)} \rightarrow \text{elementarni Laplaceov transformat (tablični)}$$

$$\frac{d}{s(s+d)} \longleftrightarrow (1 - e^{-td}) \cdot p(t) \Rightarrow U_1 \cdot \frac{\frac{1}{\gamma}}{s(\frac{1}{\gamma} + s)} \longleftrightarrow U_1 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\gamma}})$$

- dobili smo odziv na step

$$u_{12}(t) = U_1 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\gamma}}) \cdot p(t)$$



- vrijeme porasta/pada i vrijeme kašnjenja

- vrijeme porasta - vrijeme potrebno da izlazni napon dođe sa 10% ($0,1 U_1$) do 90% ($0,9 U_1$) konačnog napona

$$t_R = t_{0,9} - t_{0,1}$$

$$0,9 U_1 = U_1 (1 - \exp(-\frac{t_{0,9}}{\tau}))$$

$$0,1 U_1 = U_1 (1 - \exp(-\frac{t_{0,1}}{\tau}))$$

$$t_R = t_F !!!$$

$$\exp \frac{t_{0,9}}{\tau} = 0,1 / \ln \rightarrow t_{0,9} = -\tau \cdot \ln 0,1$$

$$\exp \frac{t_{0,1}}{\tau} = 0,9 / \ln \rightarrow t_{0,1} = -\tau \cdot \ln 0,9$$

$$t_R = -t_{0,9} + t_{0,1} = \tau (\ln 0,9 - \ln 0,1)$$

$$t_R = \tau (\ln 0,9 - \ln 0,1) = \tau \cdot \ln 9 = \tau \cdot 2,2 \quad \text{— vrijeme porasta}$$

- vrijeme kašnjenja - vrijeme između trenutka kada ulazni napon postigne 50% konačne vrijednosti i trenutka kada izlazni napon postigne 50% konačne vrijednosti

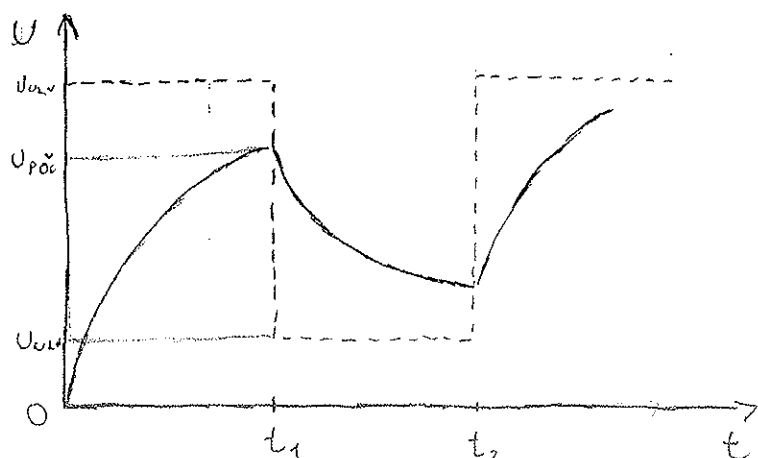
$$t_d = t_n - t_{uc}$$

$$t_{uc} = 0$$

$$0,5 U_1 = U_1 (1 - \exp(-\frac{t_{12}}{\tau})) \Rightarrow \exp(-\frac{t_{12}}{\tau}) = 0,5 \Rightarrow t_{12} = -\tau \cdot \ln 0,5$$

$$t_{12} = -\tau (-0,69) = 0,69 \cdot \tau \quad \text{— vrijeme kašnjenja}$$

- općenitiji odziv RC-mreže na pravokutni impuls



- najjednostavniji slučaj:

$$u_{12}(t) = U_1 - (U_1 - 0) \cdot \exp(-\frac{t}{\tau})$$

- općenit slučaj:

$$u_{12}(t) = U_{ul} - (U_{ul} - U_{poc}) \cdot \exp(-\frac{t}{\tau})$$

* ODZIV CR-MREŽE

- odziv na pravokutni impuls
- oblik u vremenskoj domeni dobijemo iz frekvencijske domene inverznom Laplaceovom transformacijom

$T(s) = \frac{U_{i2}(s)}{U_{ul}(s)}$ - prijenosna funkcija u frekvencijskoj domeni.

$$T(s) = \frac{R}{R + \frac{1}{sC}} = \frac{sRC}{sRC + 1} = \left/ RC = \tau \right/ = \frac{s\tau}{s\tau + 1} \cdot \frac{\frac{1}{\tau}}{\frac{1}{\tau}} = \frac{s}{s + \frac{1}{\tau}}$$

$$U_{ul}(t) = U_1 \Rightarrow \frac{U_1}{s} \Rightarrow U_{i2}(s) = T(s) \cdot U_{ul}(s)$$

$$U_{ul}(s) = \frac{U_1}{s} \cdot \frac{s}{s + \frac{1}{\tau}} = U_1 \cdot \frac{1}{s + \frac{1}{\tau}} \Rightarrow U_1 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \mu(t) = U_{i2}(t) \quad \leftarrow t \geq 0$$

oblik izlaza u vrem. domeni

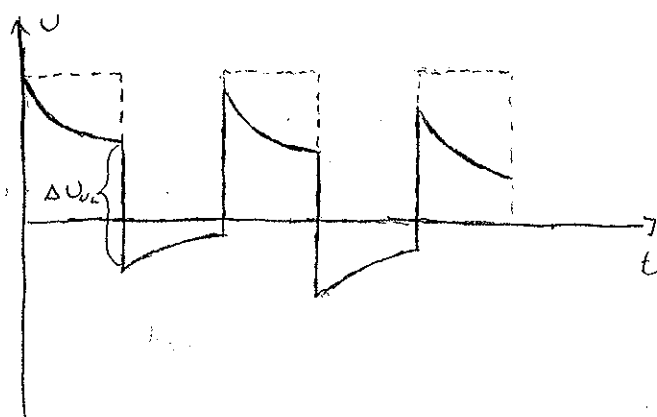


- vremena porasta/pada su jednaka kao i kod RC-mreže
- općenitiji odziv na pravokutni impuls

- najjednostavniji slučaj

$$u_{i2}(t) = U_1 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

- općenit slučaj:

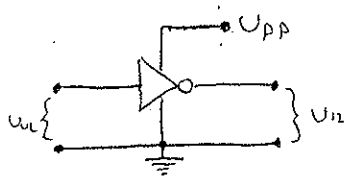


$\Delta U = U_{ulv} - U_{uln}$ - ovo proizlazi iz činjenice da je zbroj napona na otporniku i kondenzatoru uvijek jednak naponu ulaza

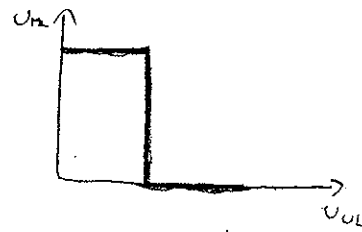
$$U_{i2} = U_{i21} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

* OSNOVNA SVOJSTVA INVERTORA

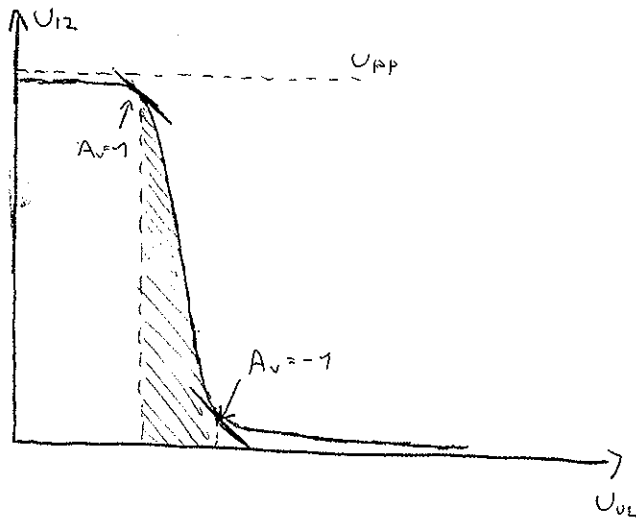
- logički simbol invertora



- prijenosna kar. idealnog invertora



- prijenosna karakteristika realnog invertora

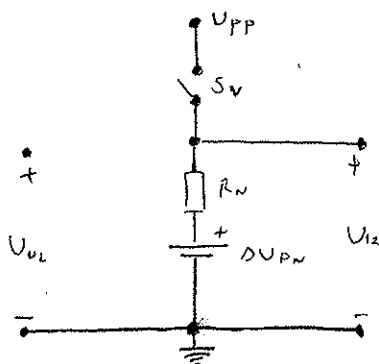


- iscrtkani dio karakteristike se koristi kod analognih signala - negativno pojačanje => signal slabi

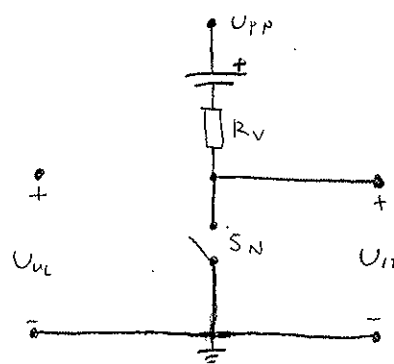
- van tog dijela sklop se ponaša kao sklopka koja invertira signal

- modeli invertora

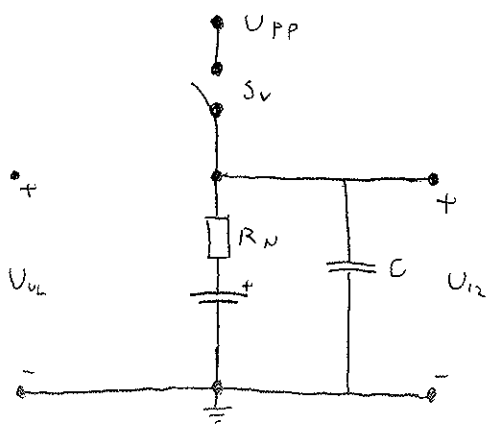
- visoki ulaz



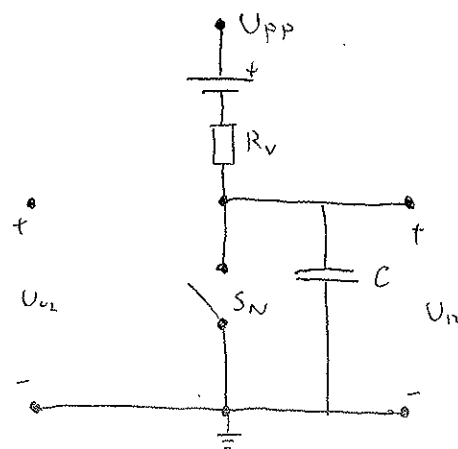
- niski ulaz



- visoki ulaz (s kapacitetom)



- niski ulaz (s kapacitetom)



2. ELEKTRIČKA SVOJSTVA POLUVODIČA

• vodiči

- visoka specifična vodljivost

• izolatori

- niska specifična vodljivost

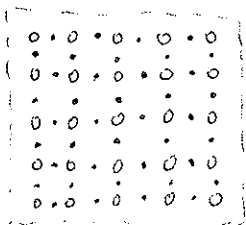
• poluvodiči

- specifična vodljivost između „izolatorske“ i „vodičke“

- možemo upravljati vodljivošću ($10^{-6} \text{ S/cm} < \sigma < 10^3 \text{ S/cm}$)

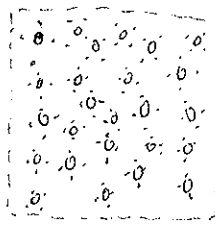
• čvrsta tijela - definiran raspored atoma

- kristalna struktura



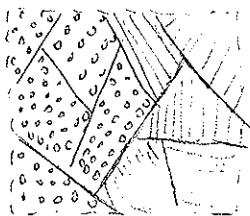
PRAVILAN
RASPORED

- amorfna struktura



NEPRAVILAN
RASPORED

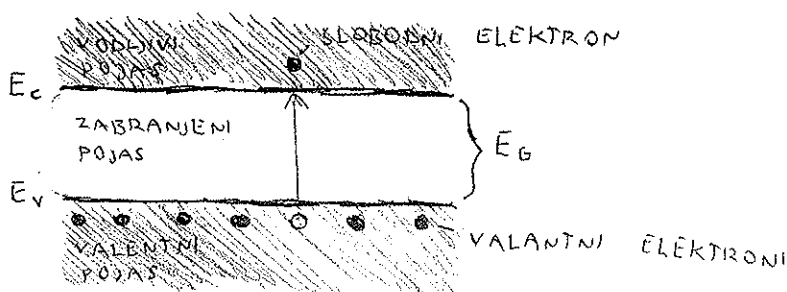
- polikristalna struktura



NAKUPINE (ZRNA)
PRAVILNIH
STRUKTURA

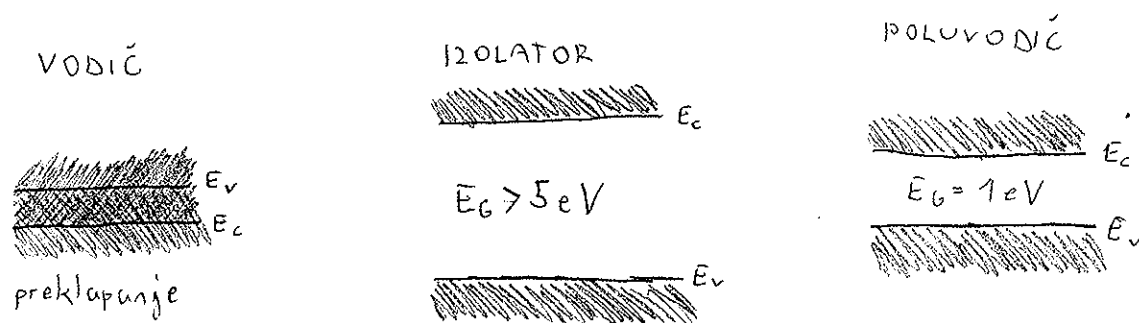
- mi koristimo kristalne materijale (najvažniji silicij)

- kristal - diskretna energetska stanja stapaju se u energetske pojaseve



- energija zabranjenog pojasa

$E_g = E_c - E_v$ - energija potrebna za prijelaz elektrona iz valentnog u vodljivi pojas



* čist silicij (intrinzičan)

- nema primjesa, četverovalentan

- jednaka koncentracija slobodnih elektrona (n) i šupljina (p)

$$p = n = n_i$$

- n_i - intrinzična koncentracija

* dopirani silicij

- dodajemo atome kojim se valentnost razlikuje za 1 te tako kontroliramo vodljivost

- trovalentna primjesa - akceptor (N_A)

3 valentna elektrona \Rightarrow prima 1 elektron od silicija te dobivamo višak šupljina

akceptor (N_A) \Rightarrow p-tip

- peterovalentna primjesa - donori (N_D)

5 valentnih elektrona \Rightarrow daje 1 elektron siliciju te imamo višak elektrona

donori (N_D) - n-tip

* poluvodički materiali i primjese

• elementarni poluvodički materiali

- silicij (Si)
- germanij (Ge)

• složeni poluvodički materiali

- galij-arsenid (GaAs)
- indij-fosfid (InP)
- galij-fosfid (GaP)
- indij-antimonid (InSb)

III-V

- kadmij-sulfid (CdS)
- cink-sulfid (ZnS)

II-VI

- silicij-karbid (SiC)
- silicij-germanij (SiGe)

IV-IV

• primjese

- Fosfor (P)
- arsen (As)
- antimon (Sb)

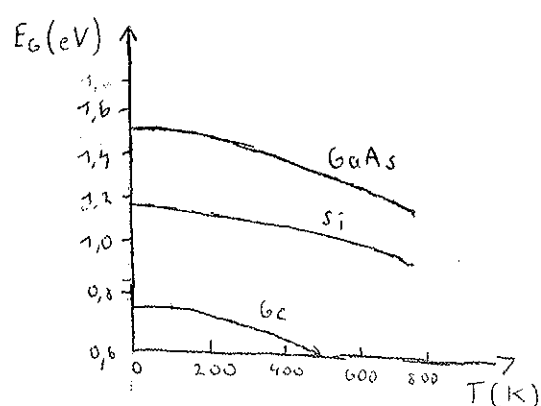
donori

- bor (B)
- aluminij (Al)
- galij (Ga)
- indij (In)

akceptori

* Širina zabranjenog pojasa

$E_G = F(T)$ - širina zabranjenog pojasa ovisi o temperaturi



- E_G pada nelinearno s porastom temperature

- mi ovisnost $E_G = F(T)$ aproksimiramo

provccem:

$$E_G(T) = E_{G0}' + \alpha T$$

- parametri materijala

$E_{G0}' - T = 300^\circ K$

α - nagib pravca ($eV \cdot K^{-1}$)

* intrinzična koncentracija

$$p = n = n_i$$

$$n_i = C \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_G(T)}{2E_T}\right)$$

$$E_T = k \cdot T = \frac{T}{11600} \text{ eV} - \text{energetski ekvivalent temperature}$$

- „lakša“ formula

$$n_i = C \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_G(T)}{2E_T}\right) = C \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{G0}' + aT}{2E_T}\right) = C \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{G0}'}{2E_T}\right) \cdot \exp\left(-\frac{a}{2}\right)$$

$$n_i = \underbrace{C \cdot \exp\left(-\frac{aT}{2E_T}\right)}_{C_1} \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{G0}'}{2E_T}\right)$$

za $T = 300 \text{ K}$ (silicij)

$$n_i = C_1 \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(\frac{E_{G0}'}{2E_T}\right)$$

$$n_i = 1,45 \cdot 10^{10} / \text{cm}^3$$

* koncentracije nosilaca u dopiranom poluvodiču

- vrijede zakoni termodinamičke ravnoteže i električke neutralnosti
- termodinamička ravnoteža:

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2 \quad (n_0, p_0 - \text{ravnotežne koncentracije nosilaca})$$

- električka neutralnost

$$Q(p_0 + N_D^+) = Q \cdot (n_0 + N_A^-)$$

ČISTI POLUVODIČ

$$N_A = N_D = 0$$

$$n_0 = p_0 = n_i$$

KOMPENZIRANI POLUVODIČ

$$N_A = N_D \neq 0$$

$$Q(n_0 + N_A^-) = Q(p_0 + N_D^+) \Rightarrow n_0 = p_0$$

$$n_0 = p_0 = n_i$$

POLUVODIČ n-TIPA

$$N_D > N_A$$

$$p_{on} = \frac{n_i^2}{n_{on}}$$

$$p_{on} + N_D = n_{on} + N_A \Rightarrow n_{on}^2 - n_{on}(N_D - N_A) - n_i^2 = 0 \text{ - KVADRATNA JEDNADŽBA (p_o n_{on})}$$

$$n_{on1,2} = \frac{N_D - N_A \pm \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}}{2} \quad (- \text{ " nema smisla })$$

⇓

$$n_{on} = \frac{N_D - N_A + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}}{2}$$

$$p_{on} = \frac{n_i^2}{n_{on}} \quad \left. \vphantom{\frac{n_i^2}{n_{on}}} \right\} \text{INTRINZIČNO TEMP. PODRUČJE}$$

$$N_D - N_A \gg n_i \Rightarrow n_{on} \approx N_D - N_A \quad \left. \vphantom{N_D - N_A} \right\} \text{EKSTRINZIČNO TEMP. PODRUČJE}$$

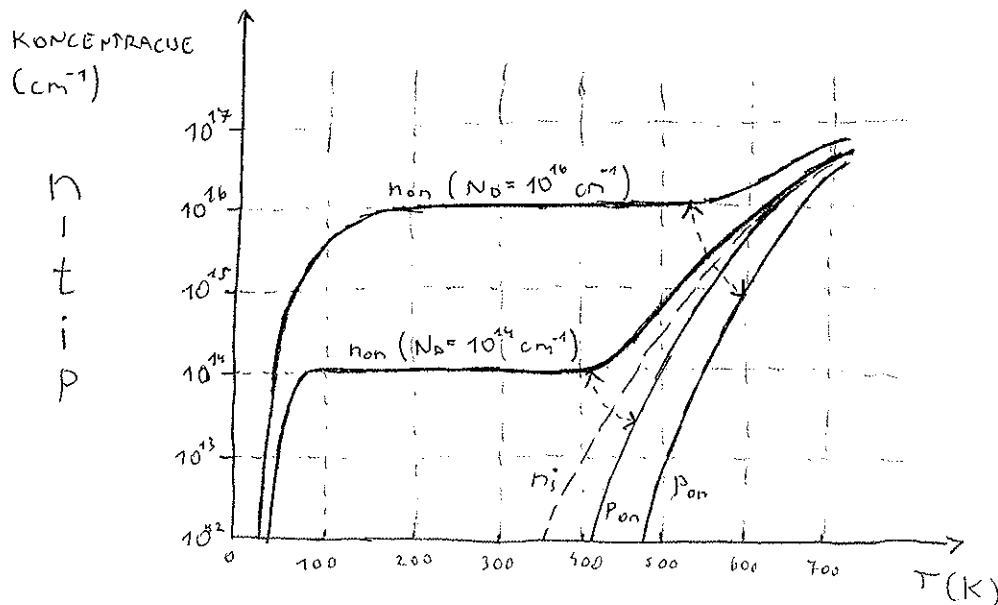
POLUVODIČ p-TIPA

$$N_A > N_D$$

$$p_{op} = \frac{N_A - N_D + \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2}}{2} \quad \left. \vphantom{\frac{N_A - N_D + \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2}}{2}} \right\} \text{INTRINZIČNO TEMP. PODRUČJE}$$

$$p_{op} \approx N_A - N_D \quad \left. \vphantom{p_{op} \approx N_A - N_D} \right\} \text{EKSTRINZIČNO TEMP. PODRUČJE}$$

$$n_{op} = \frac{n_i^2}{p_{op}}$$



* Raspodjele energija nosilaca

- energija slobodnih elektrona u vodljivom pojasu
- energija šupljina u valentnom pojasu

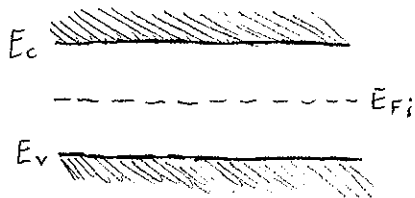
STATISTIČKA
RASPODJELA

E_F - Fermijeva energija (energija za koju je vjerojatnost popunjenosti elektronom / šuplinom jednaka 0,5)

• intrinzični poluvodič

- u intrinzičnom poluvodiču Fermijeva energija (E_{Fi}) nalazi se na sredini zabranjenog pojasa:

$$E_{Fi} = \frac{E_c + E_v}{2}$$



$$n_i^2 = p_o \cdot n_o = \underbrace{N_c \cdot N_v}_{\text{GUSTOĆE KVANTNIH STANJA}} \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_v}{E_T}\right) = C^2 \cdot T^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{E_T}\right)$$

$$N_v \approx N_c \approx C \cdot T^{\frac{3}{2}}$$

• poluvodič n-tipa

$$n_{on} = N_c \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_c}{E_T}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{E_T}\right) \Rightarrow$$

$$E_F = E_c - E_T \cdot \ln\left(\frac{N_c}{n_{on}}\right) = E_{Fi} + E_T \cdot \ln\left(\frac{n_{on}}{n_i}\right)$$

• poluvodič p-tipa

$$p_{op} = N_v \cdot \exp\left(\frac{E_v - E_F}{E_T}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_{Fi} - E_F}{E_T}\right)$$

$$E_F = E_v + E_T \cdot \ln\left(\frac{N_v}{p_{op}}\right) = E_{Fi} - E_T \cdot \ln\left(\frac{p_{op}}{n_i}\right)$$

PORASTOM
TEMPERATURE
FERMIJEVA
ENERGIJA SE
PRIBLIŽAVA
SREDINI
ZABRANJENOG
POJASA !!!

- Fermijeva energija van zabranjenog pojasa - degeneriran poluvodič

- KAKO SMO DOŠLI DO FORMULA ZA OVISNOST
IZMEĐU KONCENTRACIJE I ENERGIJA

- Elektroni imaju određen broj energetske "mesta" na koja mogu "stati". Ta raspodjela "dovoljenih" energija opisuje se GUSTOĆOM DOKVOLJENIH KVANTNIH STANJA
 $\Rightarrow S_n(E)$

$$S_n(E) = \frac{8 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot (m_e^*)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \quad \left. \vphantom{\frac{8 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot (m_e^*)^{\frac{3}{2}}}{h^3}} \right\} \text{VODLJIVI POJAS}$$

m_e^* - efektivna masa elektrona - na "stvarnu" masu utječu prilike u vodljivom pojasu, pa se ona ne povećava kao u vakuumu (onda uzimamo efektivnu vrijednost s kojom računamo kao da je u vakuumu)

- Vjerojatnost da je energija elektrona u poluvodiču jednaka E opisana je Fermi-Diracovom funkcijom:

$$f_n(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{E_T}\right)}$$

E_F - Fermijeva energija za koju vrijedi $f_n(E_F) = 0,5$

E_T - energetski ekvivalent temperature

$$E_T = \frac{T}{11000} \text{ eV}$$

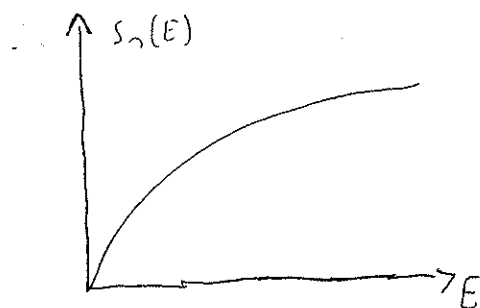
koncentracija nosilaca se dobije

$$j_n(E) = S_n(E) \cdot f_n(E) \cdot dE$$

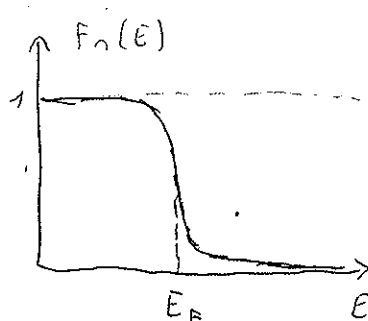
↑
GUSTOĆA
DOKVOLJENIH
KVANTNIH
STANJA

↑
FERMI-DIRACOVA
VJEROJATNOSTNA
FUNKCIJA

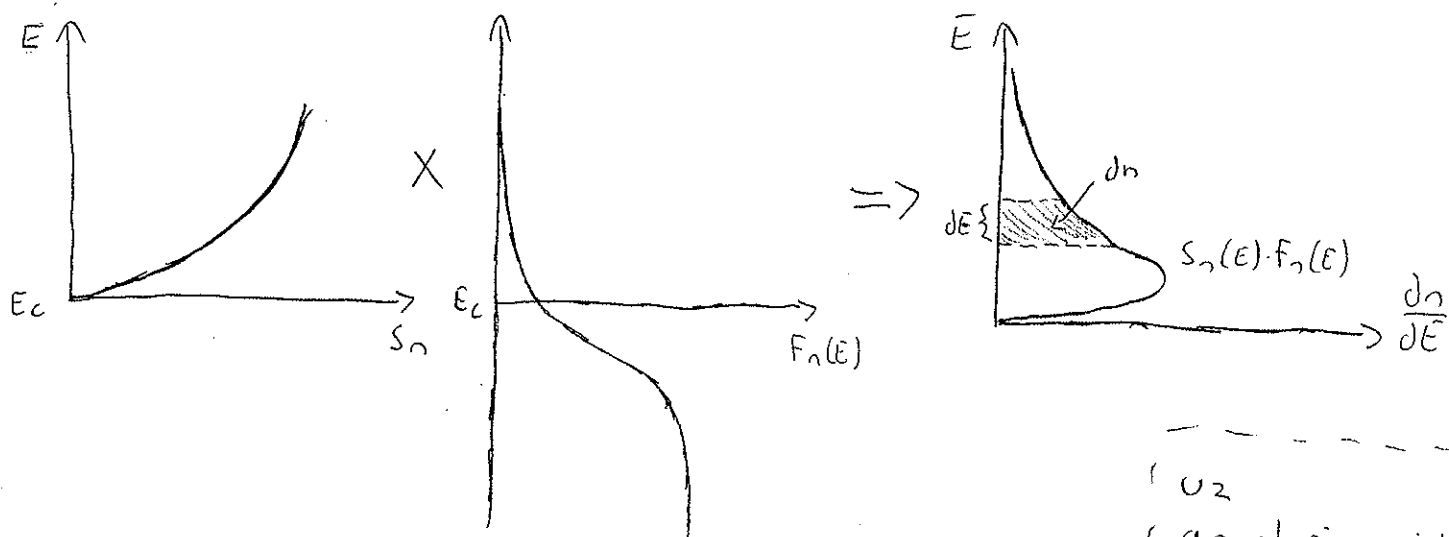
$-S_n(E)$



$F_n(E)$



OVO DVOJE POMNOŽIMO DA DOBISEMO FUNKCIJU KONCENTRACIJE



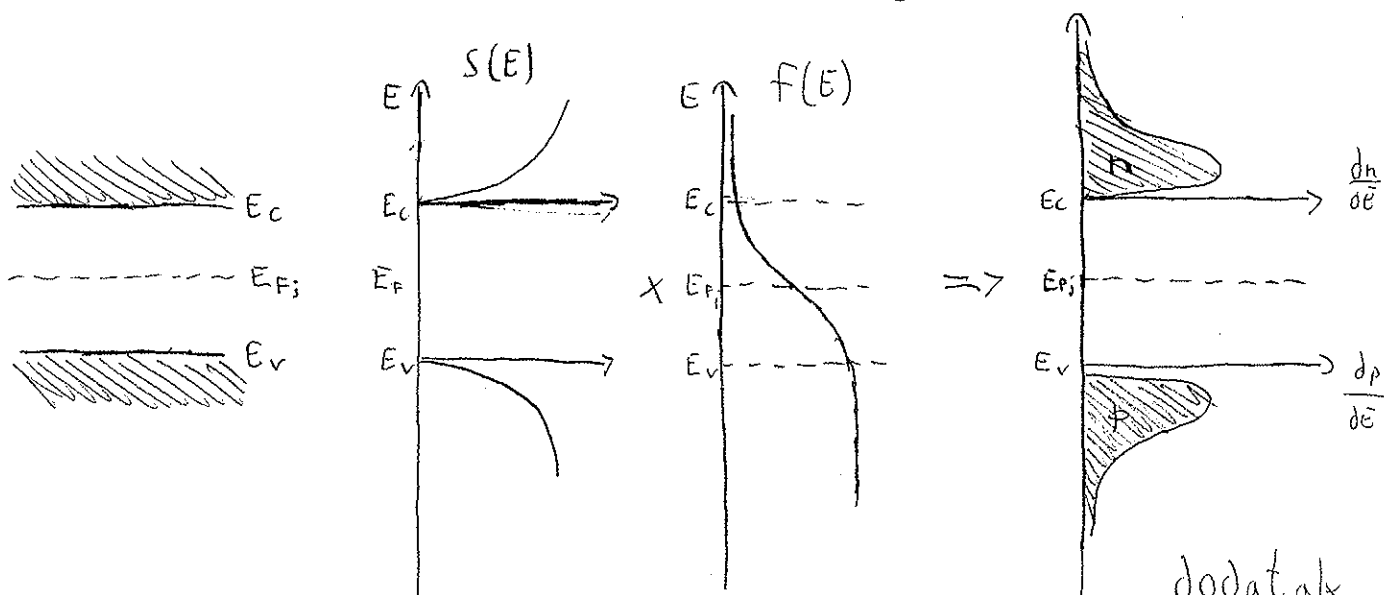
INTEGRIRANJEM IZRAZA DOBIVAMO KONCENTRACIJU

$$\int dn(E) = \int S_n(E) F_n(E) dE \Rightarrow N_c \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_c}{E_T}\right)$$

ANALOGNO I ZA ŠUPLYNE

— — — — —
 1. uz
 1. aproksimaciju
 1. Fermi-Diracove
 1. funkcije
 Maxwell-Boltzmannove

$$\frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{E_T}\right)} \approx \exp\left(-\frac{E - E_F}{E_T}\right)$$



dodatak (22)

* vođenje struje u poluvodiču

- elektroni se na $T > 0\text{ K}$ gibaju nasumično, ali nema ukupnog pomaka \Rightarrow nema struje
- gibaju se termičkom brzinom (za $T = 300\text{ K}$ iznosi 10^7 cm/s)

• driftna brzina i pokretljivost nosilaca

- na polje djeluje električno polje \vec{E} :
 - dolazi do pomaka nosioca (drift)
 - driftna brzina je proporcionalna polju

$$\vec{v}_{dn} = -\mu_n \cdot \vec{E}$$

$$\vec{v}_{dp} = \mu_p \cdot \vec{E}$$

\vec{v}_{dn} - driftna brzina elektrona

\vec{v}_{dp} - driftna brzina šupljine

μ_n - pokretljivost elektrona

μ_p - pokretljivost šupljine

• driftna struja i specifična vodljivost

$$\vec{J}_E = \sigma \cdot \vec{E} \text{ - gustoća driftne struje}$$

σ - specifična vodljivost [S/cm]

- driftna struja nosilaca je također:

$$\vec{J}_{Fn} = -q \cdot n \cdot \vec{v}_{dn} \Rightarrow \vec{J}_{Fn} = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot \vec{E} \text{ - gustoća driftne struje elektrona}$$

$$\vec{J}_{Fp} = q \cdot p \cdot \vec{v}_{dp} \Rightarrow \vec{J}_{Fp} = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot \vec{E} \text{ - gustoća driftne struje šupljina}$$

$$\vec{J}_E = \vec{J}_{Fn} + \vec{J}_{Fp} = q \cdot \vec{E} \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)$$

$$\sigma = q(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \text{ - specifična vodljivost poluvodiča}$$

- specifična vodljivost intrinzičnog poluvodiča

$$\sigma = q \cdot n_i (\mu_n + \mu_p)$$

- difuzijska struja

- nastaje usljed izjednačavanja koncentracije nosilaca - difuzije

$$\left. \begin{aligned} \vec{J}_{Dn} &= q \cdot D_n \cdot \text{grad } n \\ \vec{J}_{Dp} &= -q \cdot D_p \cdot \text{grad } p \end{aligned} \right\} 3D$$

$$\left. \begin{aligned} \vec{J}_{Dn} &= q \cdot D_n \cdot \frac{dn(x)}{dx} \\ \vec{J}_{Dp} &= -q \cdot D_p \cdot \frac{dp(x)}{dx} \end{aligned} \right\} 1D$$

- za nedegenerirani vodič vrijedi:

$$D_n = U_T \cdot \mu_n$$

$$D_p = U_T \cdot \mu_p$$

$$U_T = \frac{k \cdot T}{q} = \frac{T}{11600} \text{ [V]} - \text{naponski ekvivalent temperature}$$

- ukupna struja poluvodiča

$$\vec{J} = \vec{J}_{Fn} + \vec{J}_{Dn} + \vec{J}_{Fp} + \vec{J}_{Dp}$$

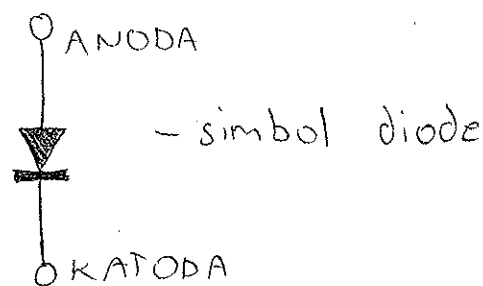
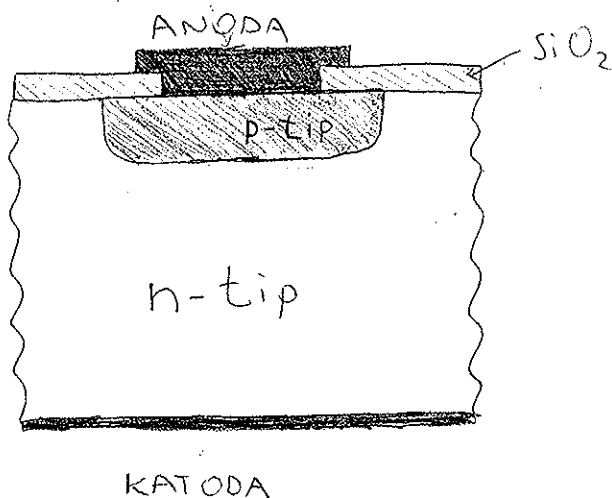
* ELEKTRIČKA SVOJSTVA POLUVODIČA (REKAPITULACIJA)

- širina zabranjenog pojasa pada s porastom temperature ($T \uparrow E_g \downarrow$)
- intrinzična koncentracija raste s porastom temperature ($T \uparrow n_i \uparrow$)
- povećanjem koncentracije elektrona Fermijeva energija se približava vodljivom pojasu ($n \uparrow E_F \uparrow$)
- povećanjem koncentracije šupljina Fermijeva energija se približava valentnom pojasu ($p \uparrow E_F \downarrow$)
- porastom temperature Fermijeva energija se približava sredini zabranjenog pojasa

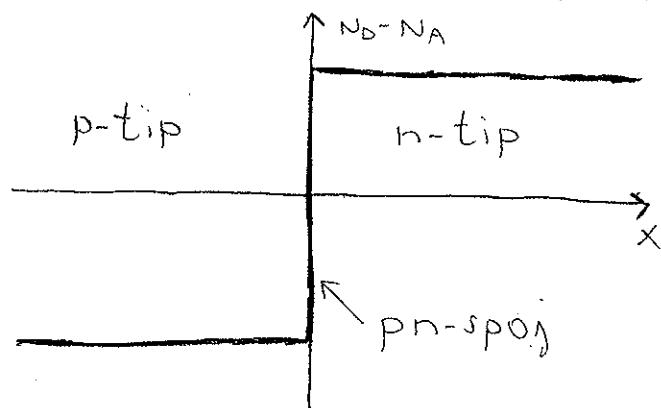
$$(T \uparrow E_F \rightarrow E_{Fi})$$

3. POLUVODIČKE DIODE

* STRUKTURA PN-SPOJA

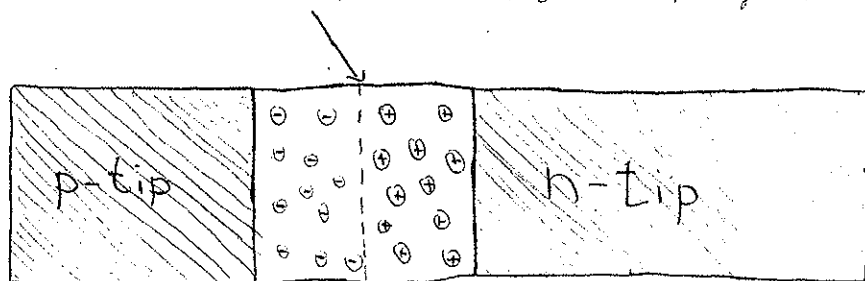


- skokovita raspodjela primjesa pn-spoja



* RAVNOTEŽA PN-SPOJA, KONTAKTNI POTENCIJAL

- prikaz pn-spoja i njegova podjela

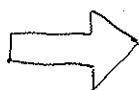


KVAZINEUTRALNO
P-PODRUČJE

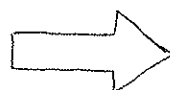
OSIROMAŠENO
PODRUČJE

KVAZINEUTRALNO
N-PODRUČJE

NAKON SPAJANJA
P I N STRANE,
ZBOG RAZLIKE
KONCENTRACIJA,
DIFUZIJSKA STRUJA
"ŠALJE" ELEKTRONE NA
P, A ŠUPLJINE NA
N STRANU



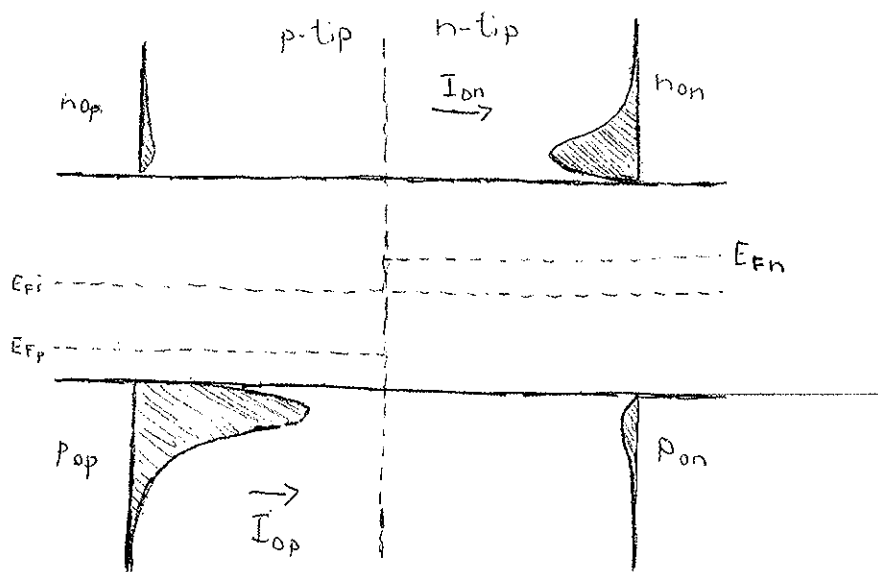
ELEKTRONI NA
P-STRANI, A
ŠUPLJINE NA N
REKOMBINIRAJU
TE NASTAJE
OSIROMAŠENO
PODRUČJE



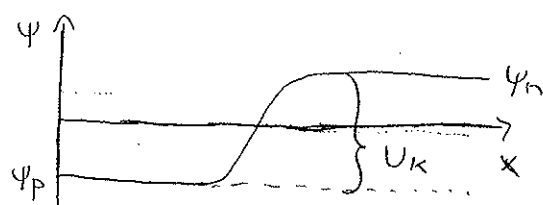
U OSIROMAŠENOM
PODRUČJU OSTAJU
IONIZIRANE VEZIBE
PRIMJESA, PA SE U
OSIROMAŠENOM PODRUČJU
JAVLJA POLJE, A S
POLJEM I POTENCIJAL

energetski dijagram

NEPOSREDNO PRIJE KONTAKTA

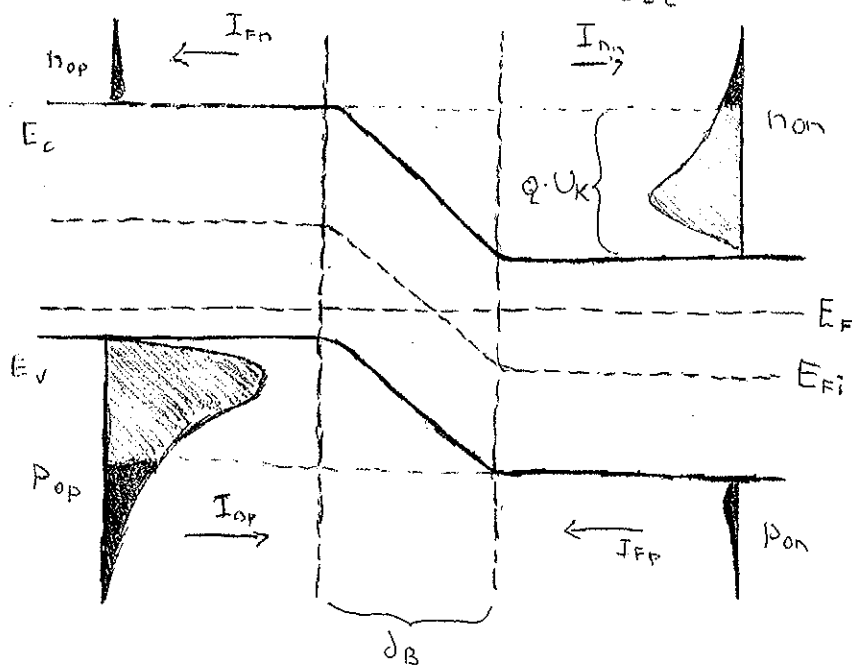


RASPODJELA POTENCIJALA



U_T i E_T imaju isti izno
ako su izraženi u:
 U_T - volt [V]
 E_T - elektronvolt [eV]

NAKON USPOSTAVE RAVNOTEŽE



$$I_n = I_{bn} - I_{Fn} = 0$$

$$I_p = I_{bp} - I_{Fp} = 0$$

$$I = I_n + I_p = 0$$

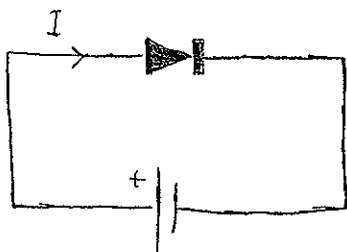
- kontaktni potencijal (U_K) je jednak energiji koju elektron treba da bi prešao na p-stranu

$$U_K = \frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{q} = \frac{1}{q} \left(E_T \cdot \ln \left(\frac{n_{on}}{n_i} \right) + E_T \cdot \ln \left(\frac{p_{op}}{n_i} \right) \right), \quad \frac{E_T}{q} = U_T$$

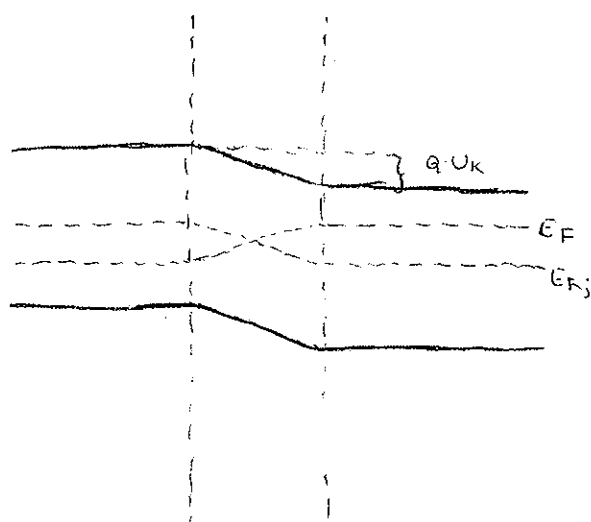
$$U_K = U_T \cdot \ln \left(\frac{n_{on} \cdot p_{op}}{n_i^2} \right) = U_T \cdot \ln \left(\frac{N_D \cdot N_A}{n_i^2} \right)$$

* POLARIZACIJA pn-SPOJA

PROPUSNA POLARIZACIJA

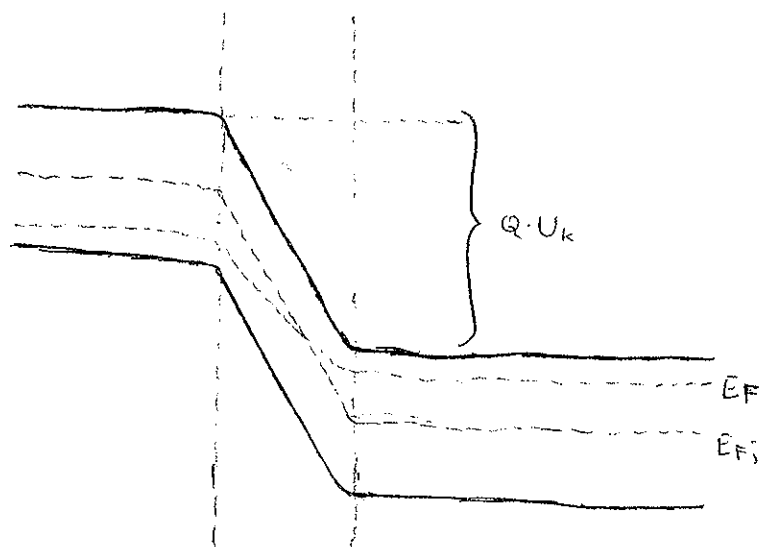
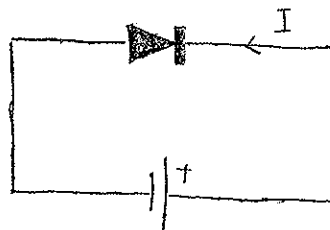


$$U_{TOT} = U_K - U_{AK}$$



dominantna
difuzijska struja

ZAPORNA POLARIZACIJA



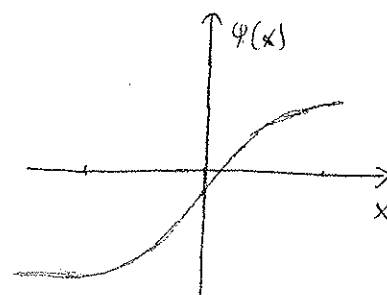
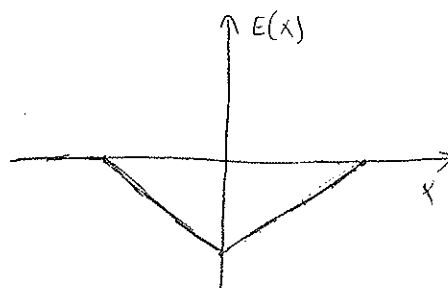
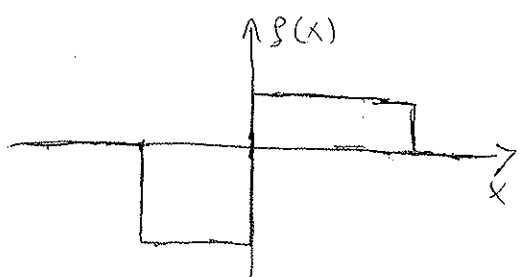
dominantna
driftna struja

* OSIROMAŠENI SLOJ

- raspodjela potencijala, polja i prostornog naboja opisana je Poissonovom jednačinom (ϵ je dielektrička konstanta):

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon} \quad \text{— Poissonova jednačina}$$

$$\rho(x) = \begin{cases} -q \cdot N_A & x \in (-d_{Bp}, 0) \\ q \cdot N_D & x \in (0, d_{Bn}) \end{cases}$$



- naboj u osiromašenom području

$$\rho(x) = \begin{cases} -Q \cdot N_A & -d_{BP} < x < 0 \\ Q \cdot N_D & 0 < x < d_{BN} \end{cases}$$

- polje u osiromašenom području

$$\frac{dF}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon} \Rightarrow dF = \frac{1}{\epsilon} \cdot \rho(x) dx \quad / \int$$

$$F(x) = \begin{cases} -\frac{Q \cdot N_A}{\epsilon} (x + d_{BP}) & -d_{BP} < x < 0 \\ \frac{Q \cdot N_D}{\epsilon} (x - d_{BN}) & 0 < x < d_{BN} \end{cases}$$

$$F(0^-) = -\frac{Q \cdot N_A}{\epsilon} \cdot d_{BP} = F(0^+) = \frac{Q \cdot N_D}{\epsilon} \cdot d_{BN} = F_{\max} \leftarrow \text{maksimalno polje}$$

sljedeći:

$$N_A \cdot d_{BP} = N_D \cdot d_{BN} \Rightarrow \text{osiromašeno područje se širi na slabije dopiranu stranu}$$

$$d_{BP} = d_B \cdot \frac{N_D}{N_A + N_D}, \quad d_{BN} = d_B \cdot \frac{N_A}{N_A + N_D}$$

- potencijal u osiromašenom području

$$-\frac{d\psi}{dx} = F \Rightarrow \psi(x) = \begin{cases} \psi_p + \frac{Q \cdot N_A}{2\epsilon} (x + d_{BP})^2 & -d_{BP} < x < 0 \\ \psi_n - \frac{Q \cdot N_D}{2\epsilon} (x - d_{BN})^2 & 0 < x < d_{BN} \end{cases}$$

- ukupni napon na osiromašenom području

$$U_{TOT} = \psi(d_{BN}) - \psi(-d_{BP}) = \psi_n - \psi_p = \frac{Q}{2\epsilon} (N_A d_{BP}^2 + N_D d_{BN}^2) = \frac{Q}{2\epsilon} \cdot \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \cdot d_B^2$$

- širina osiromašenog područja

$$d_B = \sqrt{\frac{2\epsilon}{Q} \frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D} \cdot U_{TOT}}$$

- max. polje

$$F_{\max} = -\frac{2 U_{TOT}}{d_B}$$

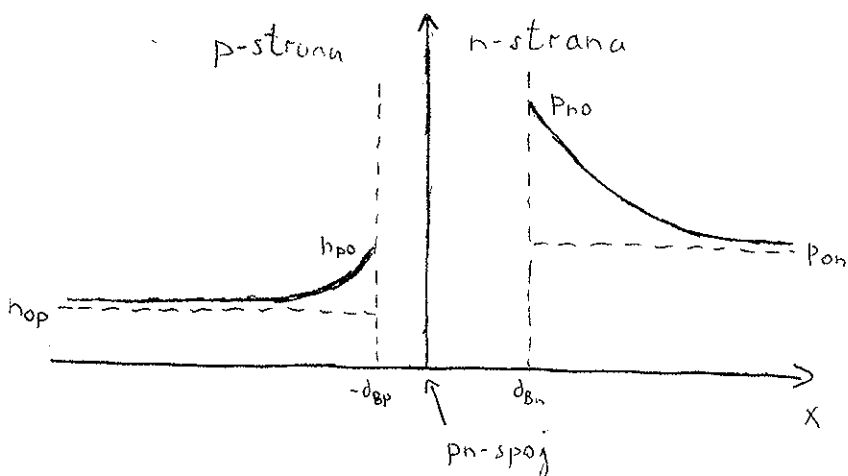
* STRUJNO-NAPONSKA KARAKTERISTIKA PN-DIODE

- difuzijom - elektroni prelaze na p-stranu i postaju manjinski nosioci
- šupljine prelaze na n-stranu i postaju manjinski nosioci



INJEKCIJA MANJINSKIH NOSILACA

- prelaskom na "tuđu" stranu, koncentracija manjinskih nosilaca opada s udaljenošću



- koncentracije uz rub osiromašenog područja

$$p_{no} - p_{on} = n_{no} - n_{on}$$

$$n_{no} = n_{on} + p_{no} - p_{on}$$

$$p_{po} = p_{on} + n_{po} - n_{on}$$

TERMODINAMIČKA RAVNOTEŽA I ELEKTRIČKA NEUTRALNOST

$$n_{no} p_{no} > n_i^2$$

$$p_{po} n_{po} > n_i^2$$

PROPUŠNA
POLARIZACIJA

$$n_{no} p_{no} < n_i^2$$

$$p_{po} n_{po} < n_i^2$$

ZAPORNA
POLARIZACIJA

• RUBNI UVJETI

- koncentracije manjinskih nosilaca uz rub osiromašenog područja određene su Boltzmannovim jednažbama:

$$h_{po} = n_{op} \cdot \exp\left(\frac{U}{U_T}\right)$$

$$p_{no} = p_{on} \cdot \exp\left(\frac{U}{U_T}\right)$$

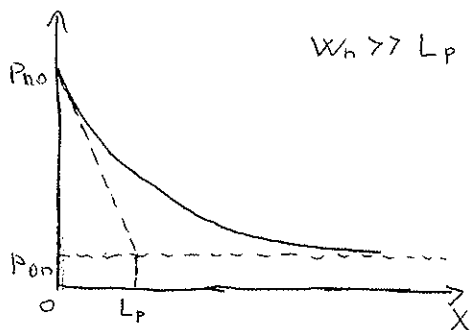
• ŠIRINA n i p STRANA

$$\left. \begin{aligned} L_p &= \sqrt{D_p \tau_p} \\ L_n &= \sqrt{D_n \tau_n} \end{aligned} \right\} \text{DIFUZIJSKE DULJINE ELEKTRONA I ŠUPLJINA}$$

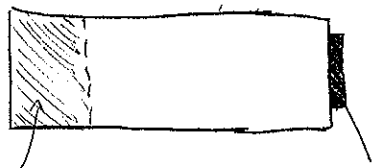
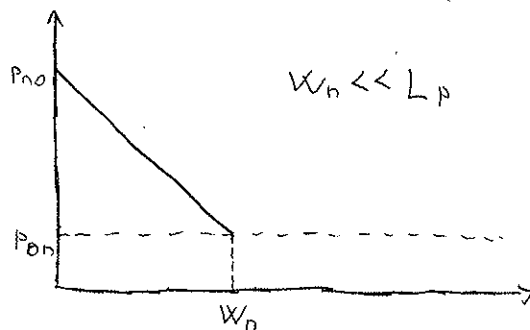
$\left. \begin{aligned} W_p \\ W_n \end{aligned} \right\}$ UDALEŽENOSTI OD RUBOVA OSIROMAJENOG PODRUČJA DO KATODE/ANODE

- za n-stranu (isto i za p stranu)

ŠIROKA n-STRANA



USKA n-STRANA



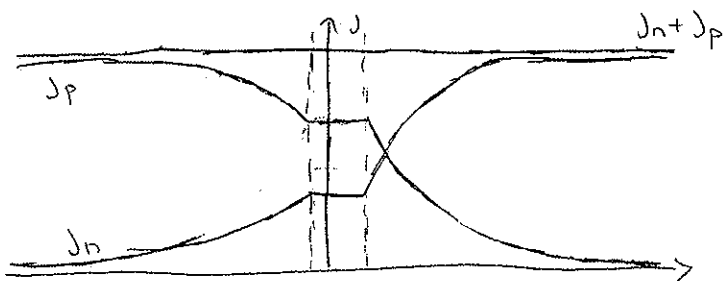
OSIROMAJENO
PODRUČJE

KATODA



* SHOCKLEYEVA JEDNADŽBA

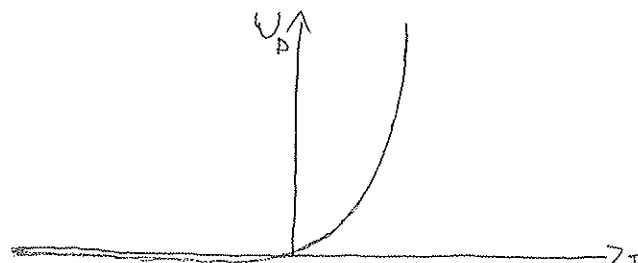
- raspodjela ukupnih struja



$$I_s = J_s \cdot S$$

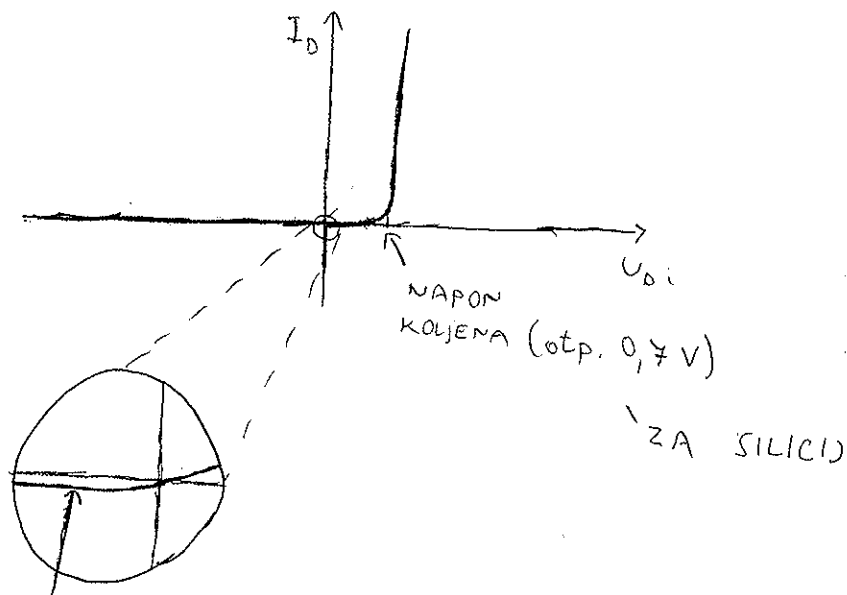
$$J = \underbrace{q \left(D_n \frac{n_{0p}}{L_n(W_p)} + D_p \frac{p_{0n}}{L_p(W_n)} \right)}_{J_s} \cdot \left[\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right]$$

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{U}{U_T}\right) - 1 \right]$$



- strujno-naponska karakteristika

$$I_D = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right) - 1 \right] \quad \text{- idealna dioda}$$



NAPON
KOLJENA (otp. 0,7 V)

ZA SILICIJ

aproksimacija za
velike napone

$$I_D = I_s \cdot \exp\left(\frac{U}{U_T}\right)$$

* STRUJNO-NAPONSKA KARAKTERISTIKA REALNE PN-DIODE

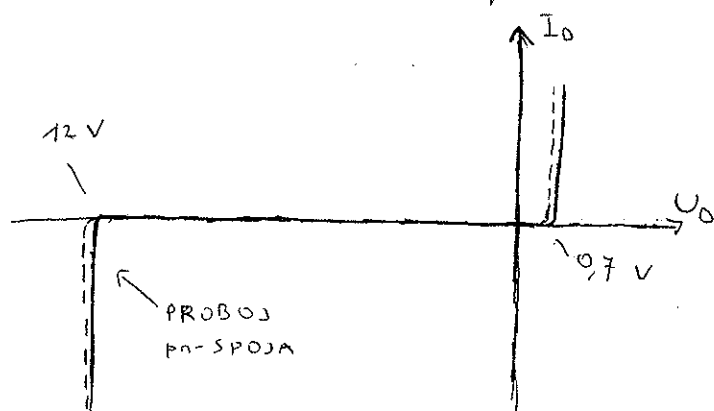
$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{U}{m U_T}\right) - 1 \right]$$

m - faktor injekcije

m = 1 - idealna dioda

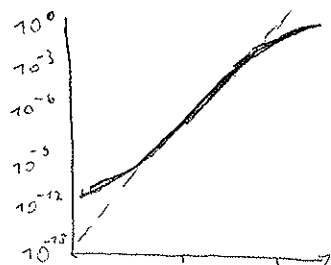
$$1 \leq m \leq 2$$

m → 2 - visoka injekcija



----- - idealna dioda
————— - realna dioda

- logaritamsko mjerilo



* PROBOJ pn-SPOJA

- povećanjem napona zaporne polarizacije dolazi do proboja pn-spoja i struja naglo poteče
- taj napon se zove probojni napon (U_B - breakdown voltage)
- na dva načina dolazi do proboja:

• LAVINSKI PROBOJ

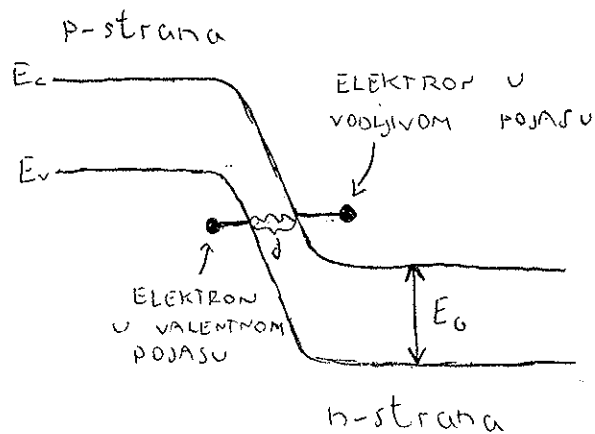
- porast napona \rightarrow porast polja \rightarrow velika energija elektrona \rightarrow elektroni pri sudaru ioniziraju jezgru i stvaraju nove parove elektron-šupljina \rightarrow pojava se ponavlja (dolazi do multiplikacije) \rightarrow povećanje koncentracije nosilaca \rightarrow \rightarrow nagli porast struje

- karakteristične vrijednosti probojnog napona:

$U_B > 8V$ - lavinski proboj

• ZENEROV PROBOJ

- jako dopirane p i n strane
- energija elektrona u valentnom pojasu odgovara energiji elektrona u vodljivom pojasu



- d je mali za visoke koncentracije primjesa

- dolazi do kvantno-mehaničkog efekta kojim elektroni prelaze na drugu stranu - tuneliranje

- karakteristične vrijednosti: $U_B < 5V$ - Zenerov proboj

* TEMPERATURNÁ OVISNOST

$$I_s = q \cdot S \cdot \left(D_n \frac{n_{op}}{L_n} + D_p \frac{p_{op}}{L_p} \right)$$

Uvrstimo:

$$n_{op} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$p_{op} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$I_s = q \cdot n_i^2 \cdot S \left(\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D} \right)$$

↑
 n_i RASTE
 EKSPONENCIJALNO
 S PROMJENOM
 TEMPERATURE

- možemo zaključiti da i I_s raste eksponencijalno s temperaturom

* OVISNOST NAPONA PROBOJA O TEMPERATURI

- porast temperature: \Rightarrow

- \Rightarrow - porast sudara elektrona s atomima, pa je potrebno i jače el. polje \Rightarrow porast lavinskog probojnog napona
- smanjivanje širine zabranjenog pojasa, tj. suživanje energetske barijere, pa je potrebno i manje polje da bi došlo do tuneliranja \Rightarrow pad Zenerovog probojnog napona

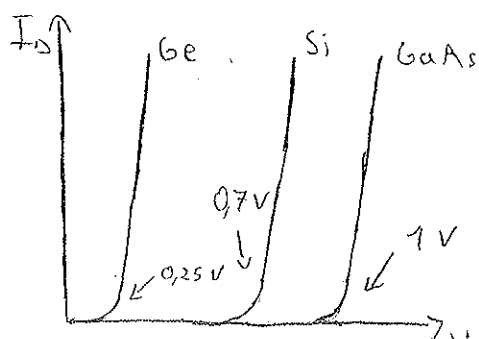
* KARAKTERISTIKE pn-DIODA RAZLIČITIM POLUVODIČIMA

GERMANIJ - uži zabranjeni pojas, veća intrinzična koncentracija

- veća struja zasićenja, manji napon koljena

GALIJ-ARSENID - veći E_g , manja n_i

- veća I_s , manji U_r



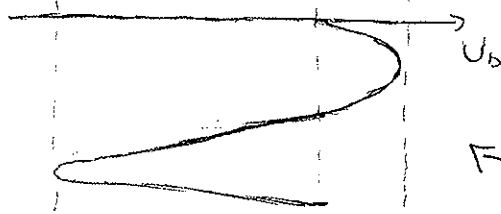
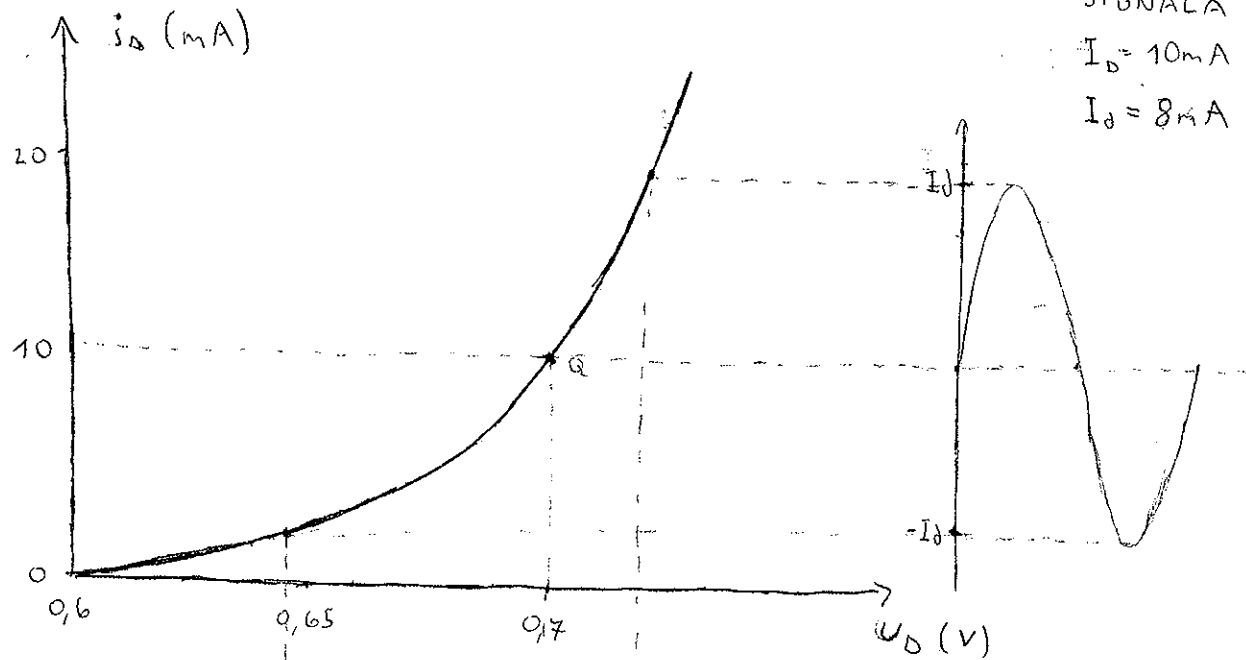
↑
 U ODNOSU
 NA SILICIJ

* DINAMIČKA SVOJSTVA pn-DIODE

- na diodu dovodimo struju oblika

$$i_D(t) = I_D + i_d(t)$$

\uparrow ISTOSMJERNA KOMPONENTA KOJA ODREĐUJE RADNU TOČKU Q
 \leftarrow IZMJENIČNA KOMPONENTA (SINUSNI OBLIK) (ODREĐUJE REŽIM RADA)



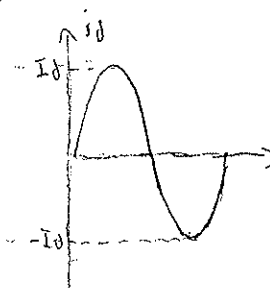
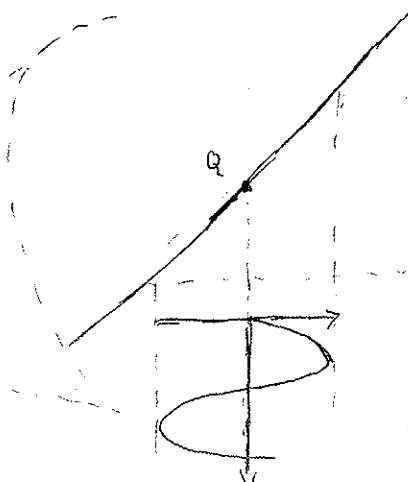
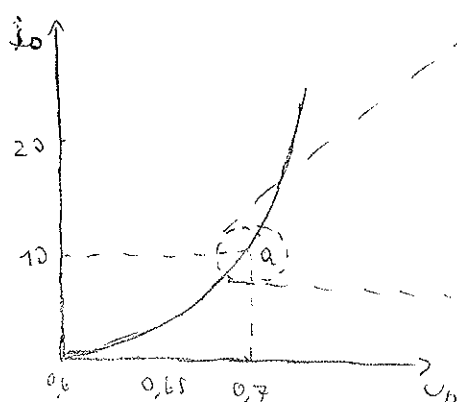
\leftarrow došlo je do izobličenja signala

• REŽIM MALOG SIGNALA

$$I_D = 10\text{mA}$$

$$I_d = 1\text{mA}$$

„skoro“ linearno

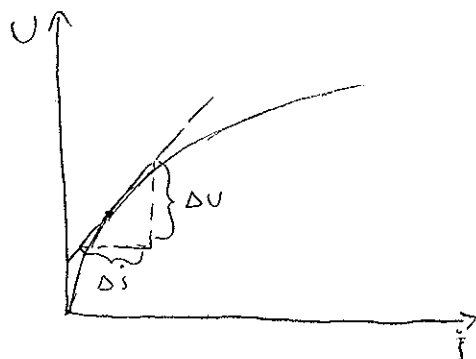


radna točka se „giba“ po linearnom dijelu karakteristike

\leftarrow zadržan sinusni oblik

* DINAMIČKI OTPOR

- derivacija napona po struji
- grafička interpretacija - nagib tangente na strujno-naponsku karakteristiku



$$r_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}$$

NISKE
FREKVENCIJÉ!!!

- dinamički otpor diode

$$I_D = I_s \left(\exp \frac{U_D}{U_T} - 1 \right) \Rightarrow \frac{I_D}{I_s} + 1 = \exp \frac{U_D}{U_T} \Rightarrow U_D = U_T \cdot \ln \frac{I_D + I_s}{I_s}$$

$$\frac{dU_D}{dI_D} = U_T \cdot \frac{1}{I_s} \cdot \frac{I_s}{I_D + I_s} \Rightarrow r_d = \frac{U_T}{I_D + I_s} \text{ - dinamički otpor pn-diode}$$

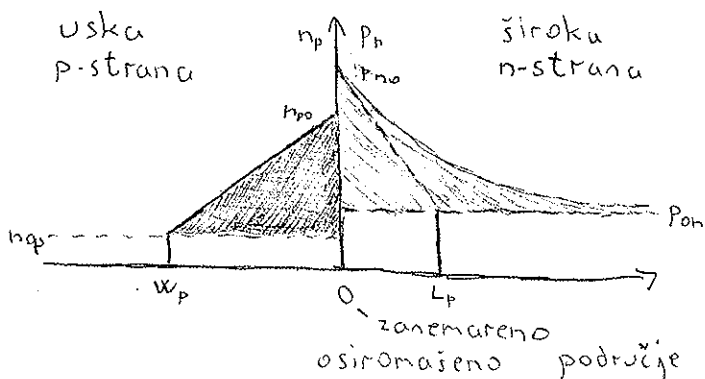
$$r_d = \frac{U_T}{I_D} \text{ - visoka propusna polarizacija}$$

$$r_d = \frac{m U_T}{I_D} \text{ - realna dioda s faktorom injekcije } m$$

* DIFUZIJSKI KAPACITET

- na visokim frekvencijama uzimamo u obzir kapacitivne efekte
- primjer - nakrcani naboj manjinskih nosilaca u propusno polariziranoj pn-diodi

pn-diode



$$I_p = Q_p \frac{D_p}{L_p^2} = \frac{Q_p}{\tau_p}$$

$$\tau_p = \frac{L_p^2}{D_p} \text{ - vrijeme života supljine}$$

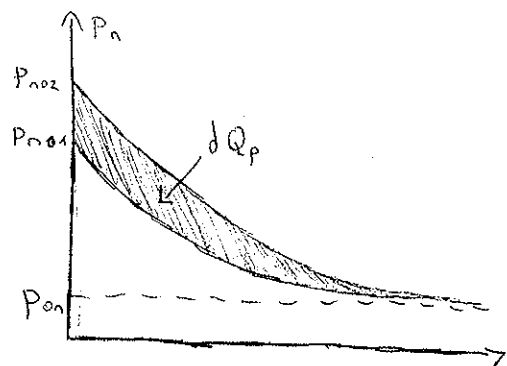
VRIJEDI ZA
ŠIROKU
STRANU

$$I_n = Q_n \frac{2 D_n}{w_p^2} = \frac{Q_n}{t_n}$$

$$t_n = \frac{w_p^2}{2 D_n} \text{ - vrijeme proleta elektrona}$$

VRIJEDI ZA
USKU
STRANU

- promjenom napona na diodi (prema Boltzmannovim jednačinama), mijenjaju se rubne koncentracije, a time i raspodjela nosilaca
- promatramo manjinske šupljine na n-strani
- uslijed promjene koncentracija s $p_{n1}(x)$ na $p_{n2}(x)$, dolazi i do promjene nakrcanog naboja dQ_p
- ovisnost promjene nakrcanog naboja manjinskih nosilaca s promjenom napona određena je difuzijskim kapacitetom.



$$C_d = \frac{dQ_p}{dU_b} = \frac{dQ_p}{dI_p} \frac{dI_p}{dU_b} = \frac{\tau_p}{r_d} \quad \text{— za široku n-stranu}$$

— asimetričan pn-spoj:

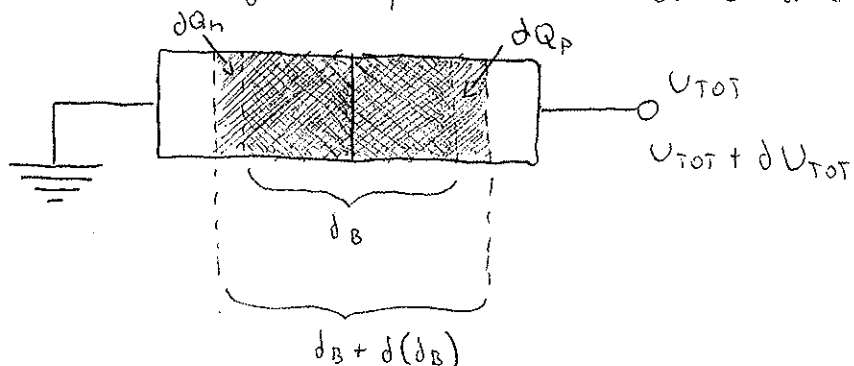
$$C_d = \frac{\tau}{2r_d}$$

↑
VRIJEDI ZA
NİŽE FREKVENCIJE

τ — vrijeme života manjinskih nosilaca slabije dopirane strane

* KAPACITET OSIROMAŠENOG SLOJA

- promjenom priključenog napona mijenja se i širina osiromašenog područja, a time i obuhvaćeni naboj ioniziranih primjesa.
- ovisnost te promjene obuhvaćenog naboja promjenom napona određena je kapacitetom osiromašenog područja



$$C_B = \frac{d(Q_p + Q_n)}{dU_{TOT}}$$

$$U_{TOT} = U_K - U_b$$

- KAPACITET OSIROMAŠENOG PODRUČJA KAO KAPACITET PLOČASTOG KONDENZATORA

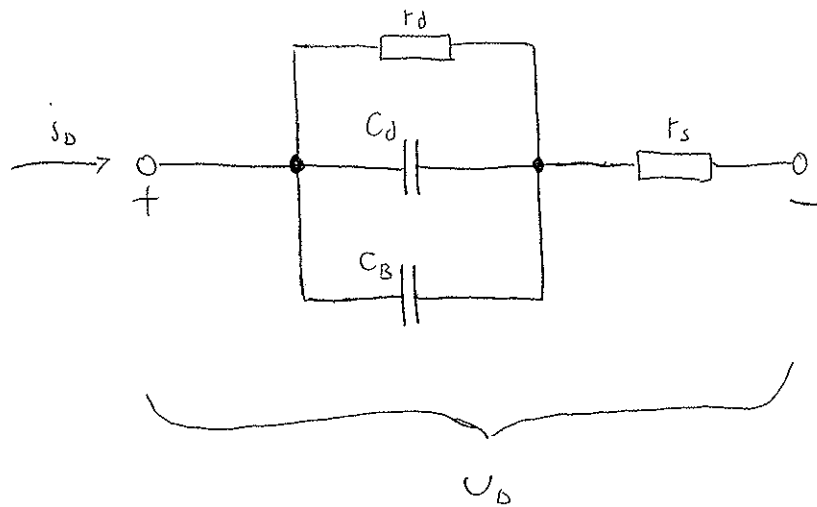
$$C_B = \epsilon \cdot \frac{S}{d_B}$$

ϵ — dielektrička konstanta poluvodiča

$$C_B = \frac{C_{B0}}{\sqrt{1 - \frac{U_b}{U_K}}}$$

$C_{B0} = C_B(U_b = 0)$ — kapacitet u stanju ravnoteže

* MODEL DIODE ZA MALI SIGNAL



r_d - dinamički otpor diode

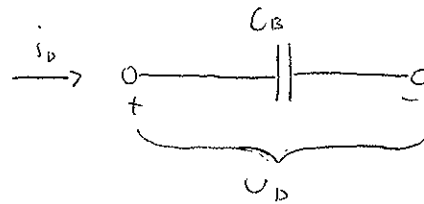
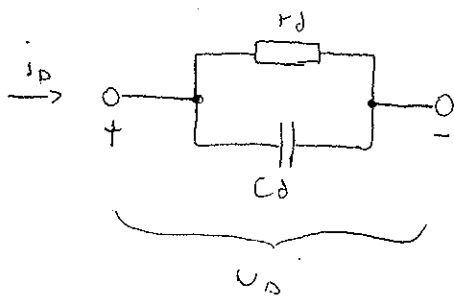
C_d - difuzijski kapacitet

C_B - kapacitet osiromašenog sloja

r_s - serijski otpor kvazineutrnih područja

• PROPUSNA POLARIZACIJA

- nema osiromašenog područja, pa nema ni kapaciteta osiromašenog područja



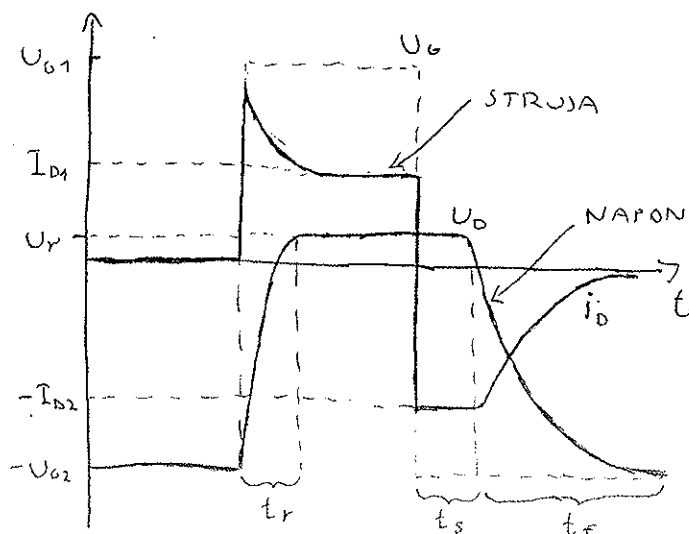
MODEL ZA
ZAPORNU
POLARIZACIJU

• ZAPORNA POLARIZACIJA

- nema struje i_D , pa nema ni dinamičkog otpora ni difuzijskog kapaciteta

* IMPULSNI RAD DIODE

$$U_D(t) = i_D(t) \cdot R + U_D(t)$$



t_r - vrijeme porasta (rise)

t_s - vrijeme zadržavanja (storage)

t_f - vrijeme pada (fall)

$t_r + t_s$ - vrijeme oporavka (recovery)

propusna:

$$i_D \cdot I_{D1} = \frac{U_{D1} - U_r}{R}$$

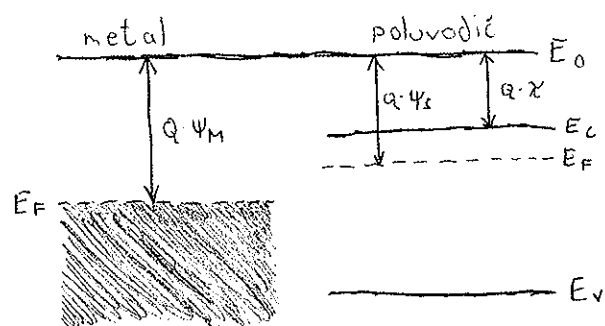
zaporna:

$$i_D = -I_{D2} = \frac{-U_{D2} - U_r}{R}$$

* SPOJ METAL-POLUVODIČ

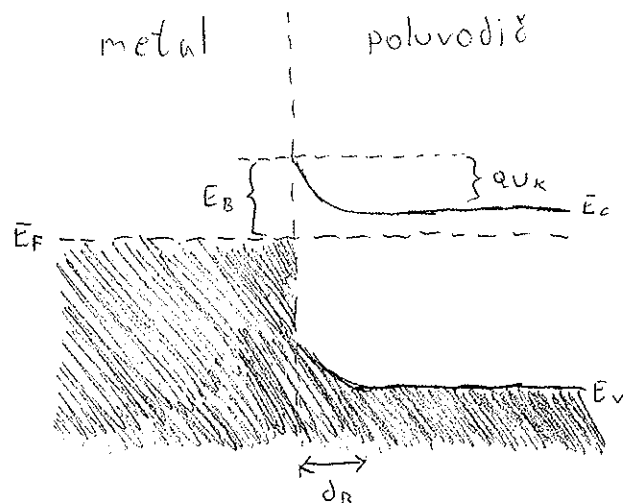
• ISPRAVLJAČKI SPOJ

- energetski dijagram:



ENERGETSKI DIJAGRAM
PRIJE KONTAKTA

KONTAKT



$$Q\psi_M = E_0 - E_F$$

$$Q\chi = E_0 - E_C$$

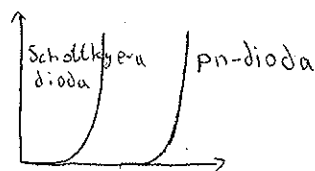
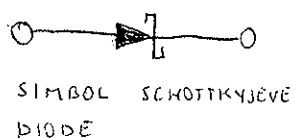
$\left. \begin{matrix} Q\psi_M \\ Q\psi_s \end{matrix} \right\}$ energije radova izlaza

$E_B = Q(\psi_M - \chi)$ - Schottkyjeva barijera χ - elektronski afinitet
- suprotstavlja se prilazu elektrona iz metala u poluvodič

$Q\psi_K = Q(\psi_M - \psi_s)$ - suprotstavlja se prilazu iz poluvodiča u metal

$$d_B = \sqrt{\frac{2\epsilon}{qN_D} \cdot \psi_K}$$

- Schottkyjev efekt - blagi porast struje s porastom zapornog napona
- ovim spojem se dobije Schottkyjeva dioda



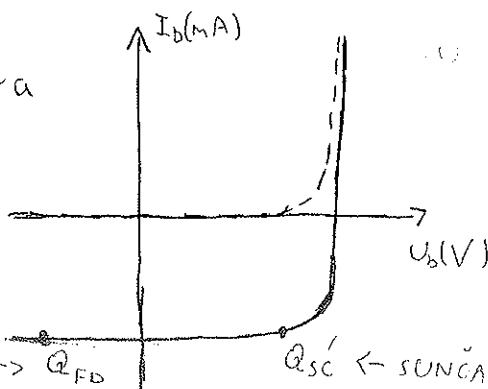
\Rightarrow Schottkyjeva dioda je "brža" od pn-diode

• OMSKI SPOJ

- promjenom koncentracija primjesa, spoj metal-poluvodič može biti i omski

* OPTOELEKTRONIKA

- fotodiode pretvara energiju upadnog zračenja u električki signal



U-I KARAKTERISTIKA
OSVJETLJENE
NEOSVJETLJENE
FOTODIODE

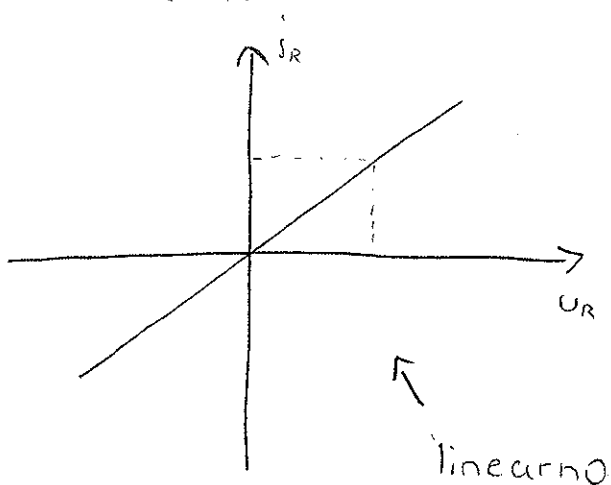
$$E = f \cdot h = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

FOTODIODA
(3. kvadrant) $\rightarrow Q_{FD}$

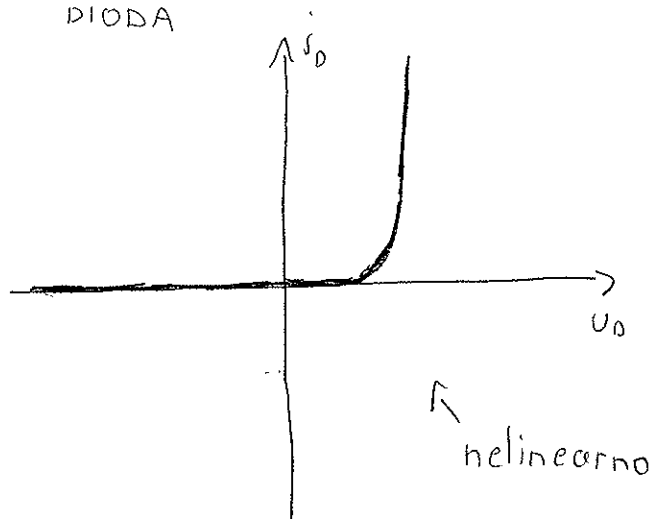
$Q_{SC} \leftarrow$ SUNČANA ĆELIJA (4. kvadrant)

4. SKLOPOVI S DIODAMA

OTPORNIK



DIODA



* STATIČKA ANALIZA

- istosmjernje veličine

$$U_G = R I_D + U_D$$

problem $\rightarrow I_D = f(U_D)$

$$I_D = I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right) - 1 \right]$$

\Downarrow

$$U_G = R \cdot I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right) - 1 \right] + U_D$$

OVO NE MOŽEMO
RIJEŠITI ANALITIČKI

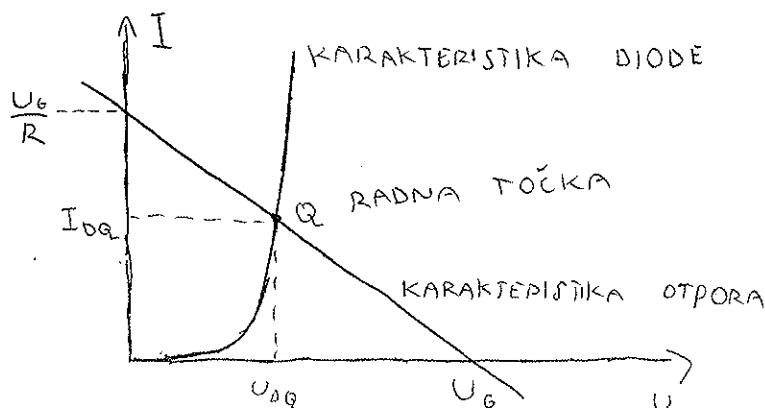
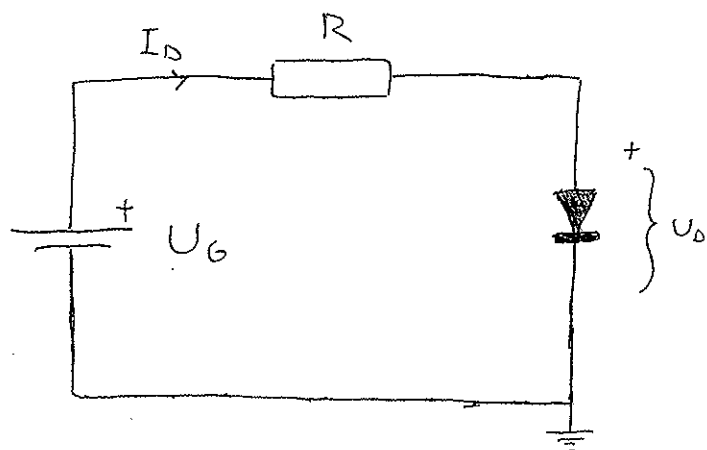
\swarrow

riješavamo:

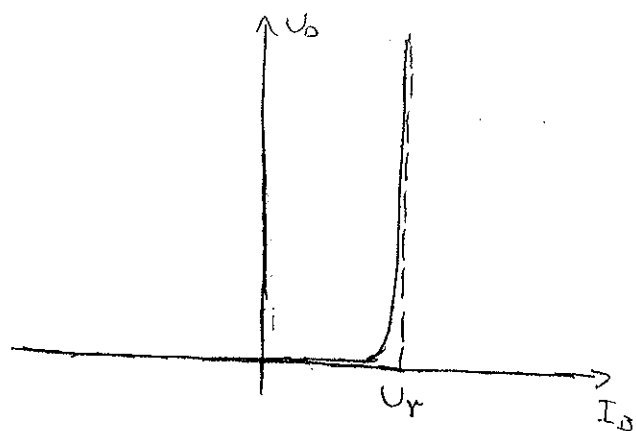
- numerički

- grafički \rightarrow

- iterativno

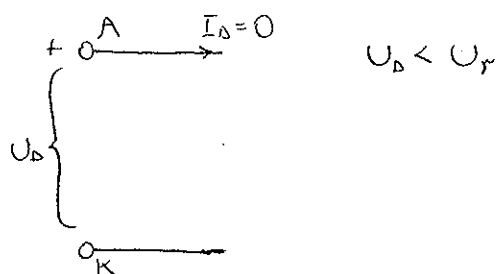


• model diode za statičku analizu

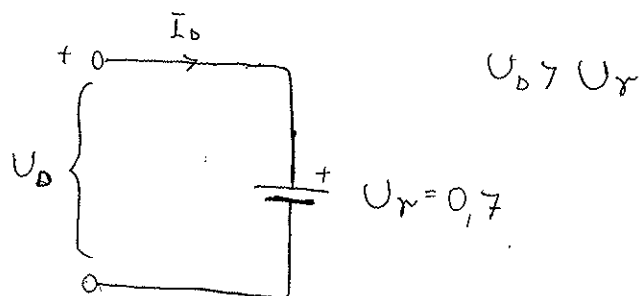


- KARAKTERISTIKA DIODE
- APROKSIMACIJA ZA STATIČKU ANALIZU
- eksponencijalnu karakteristiku nadomještamo "stepom"

MODEL PROPUSNO POLARIZIRANE DIODE



MODEL ZAPORNO POLARIZIRANE DIODE

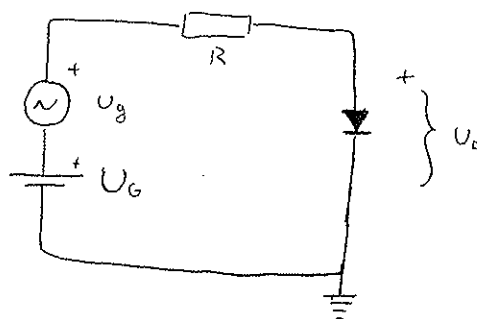


$U_T = 0,7$ - napon koljena (silicij)

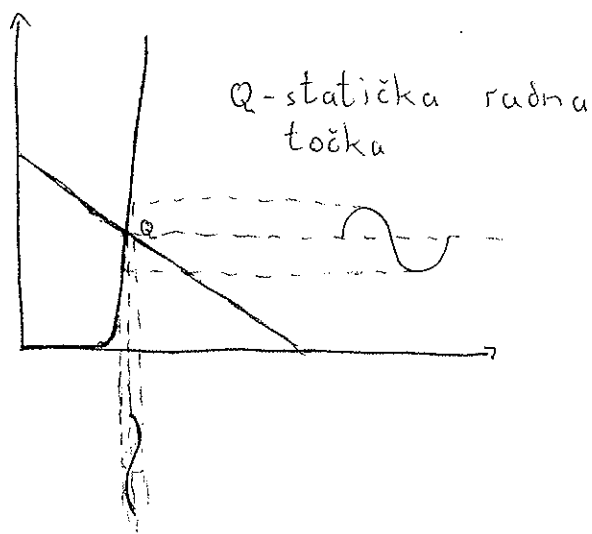
* ANALIZA ZA MALI SIGNAL

$$U_G = U_G + U_g = U_G + U_g \cdot \sin \omega t$$

$$U_G = R I_D + U_D$$



• grafička analiza



ZA MALI SIGNAL:

$$i_D = I_{DQ} + \hat{i}_D = I_{DQ} + \hat{i}_D \cdot \sin \omega t$$

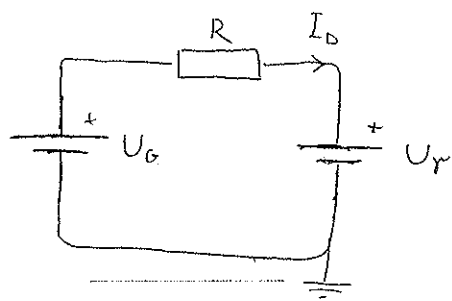
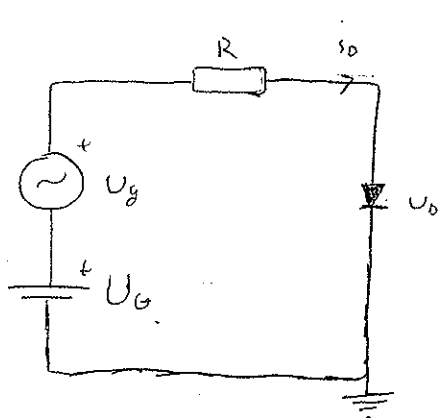
$$U_D = U_{DQ} + \hat{U}_D = U_{DQ} + \hat{U}_D \cdot \sin \omega t$$

$$\hat{i}_D = i_D - I_{DQ}$$

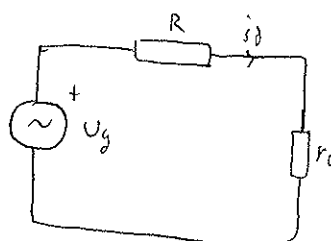
$$\hat{U}_D = U_D - U_{DQ}$$

- uvjet za rad u režimu malog signala: $U_D \ll U_T$

• MALI SIGNAL (ANALITIČKA METODA) - SUPERPOZICIJA

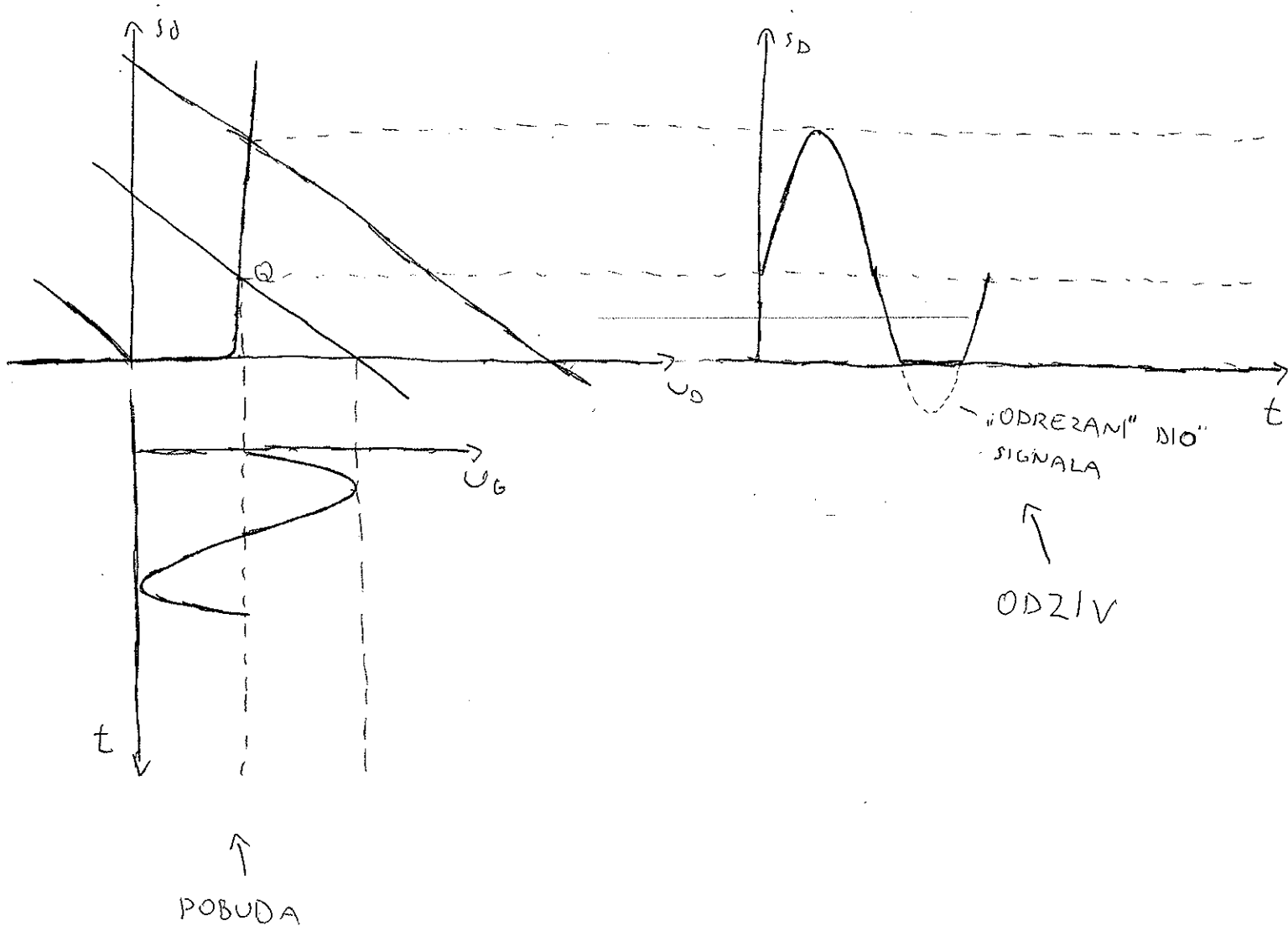


HEMA ZA
STATIČKU
ANALIZU



HEMA ZA
DINAMIČKU
ANALIZU

* PRIKLJUČAK VELIKOG SIGNALA



- zbog nelinearne karakteristike, dio signala je "odrezan"
- to svojstvo diode se koristi kod ispravljača

* ISPRAVLJAČI

IZMJENIČNI
SIGNAL

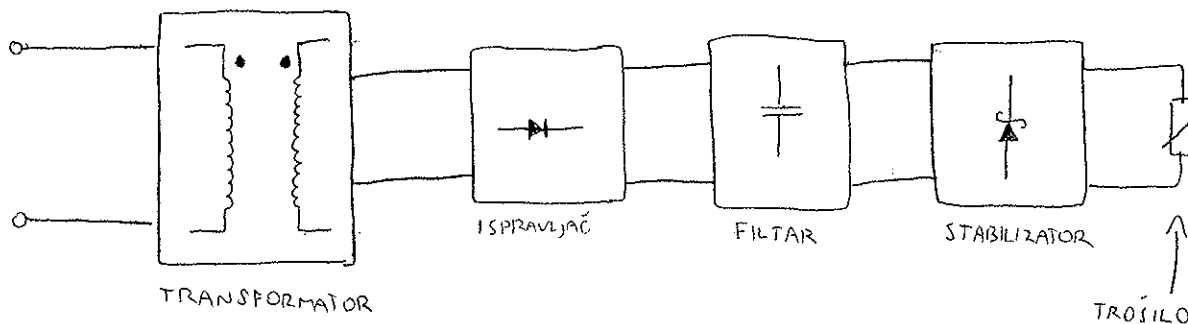
ISPRAVLJAČ
→

ISTOSMJERNI
SIGNAL

$$F = 50 \text{ Hz}$$

$$U_{ef} = 220 \text{ V}$$

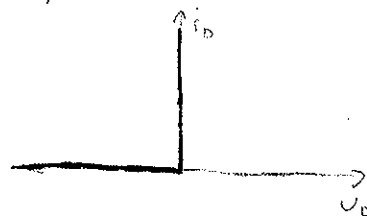
MREŽNI
NAPON



- analiza ispravljača

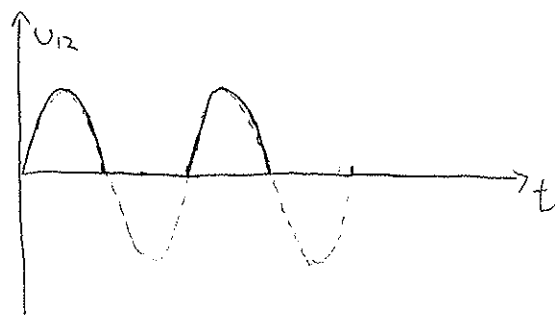
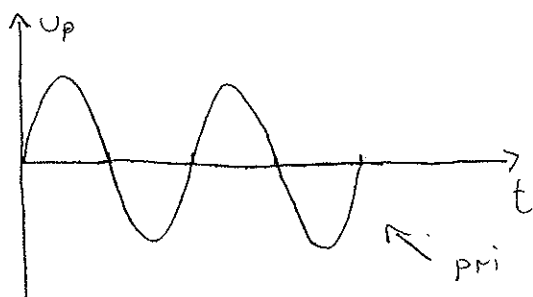
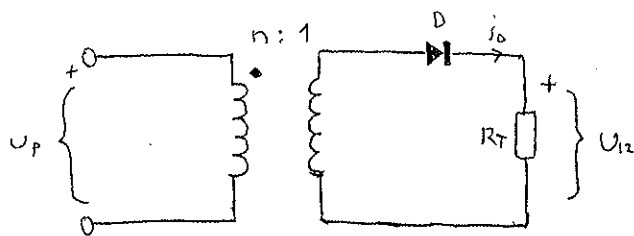
- vrijednosti napona su tipično preko 10V pa zanemarujemo napon koljena ($U_r = 0,7 \text{ V}$)

- koristimo model idealne diode



• poluvalni ispravljač

- sklop poluvalnog ispravljača



← istosmjernan, ali nije stalan

• srednja vrijednost poluvalno. ispravljenog napona

- ovo je istosmjerna komponenta signala

$$U_{I2} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_{I2}(t) dt = \frac{U_s}{2\pi} \cdot \left(\int_0^{\pi} \sin(\omega t) dt + \int_{\pi}^{2\pi} 0 dt \right) = \frac{U_s}{2\pi} \cdot [-1] \cdot \cos(\omega t) \Big|_0^{\pi} =$$

$$= \frac{U_s}{\pi} = 0,318 U_s$$

• efektivna vrijednost

$$U_{I2ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u_{I2}^2(t) dt} = \frac{U_s}{2}$$

- izmjenične komponente u ispravljenom signalu su predstavljene
naponom valovitosti (u_{I2v})

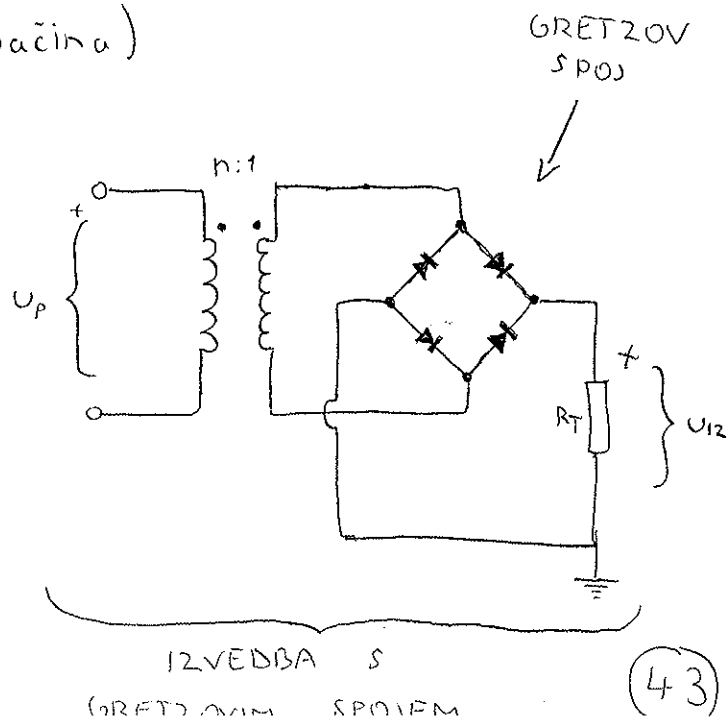
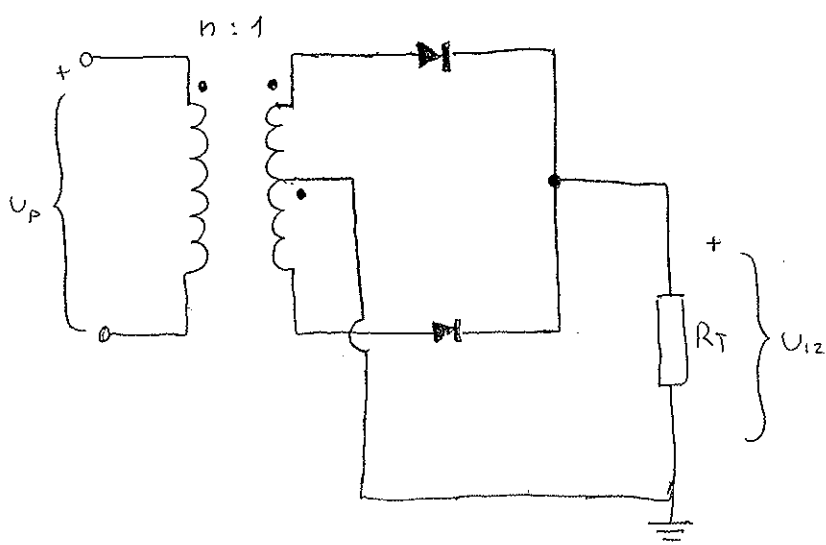
$$U_{I2cf} = \sqrt{U_{I2}^2 + U_{I2ef}^2}$$

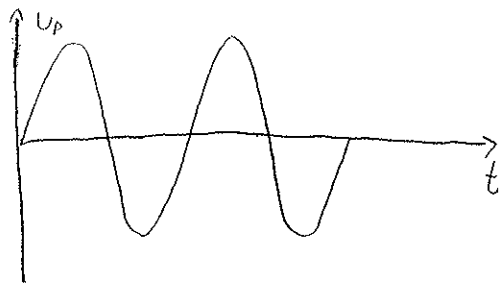
• faktor valovitosti

$$r = \frac{U_{I2cf}}{U_{I2}} = 1,21 \quad - \text{ za poluvalno ispravljeni signal}$$

* Punovalni ispravljač

- sklop punovalnog ispravljača (2 načina)





• SREDNJA VRIJEDNOST

$$U_{i2} = \frac{2 U_{s1}}{\pi} = 0,637 U_s$$

• EFEKTIVNA VRIJEDNOST

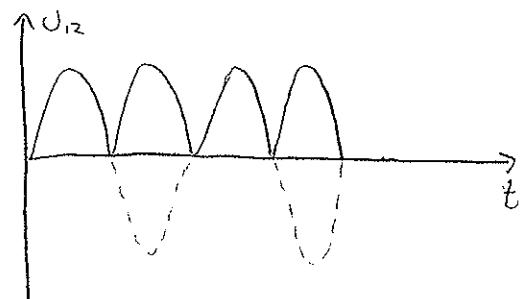
$$U_{i2ef} = \frac{U_s}{\sqrt{2}} = 0,707 U_s$$

• NAPON VALOVITOSTI

$$U_{i2vef} = 0,308 U_{sm}$$

• FAKTOR VALOVITOSTI

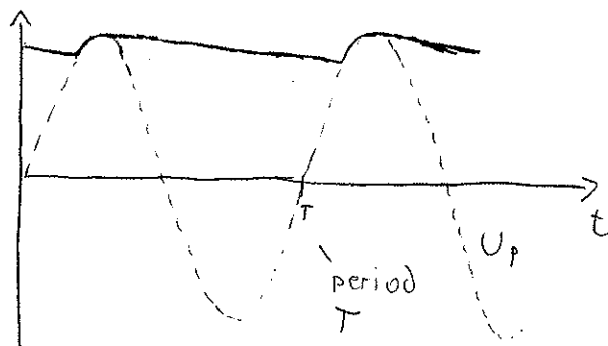
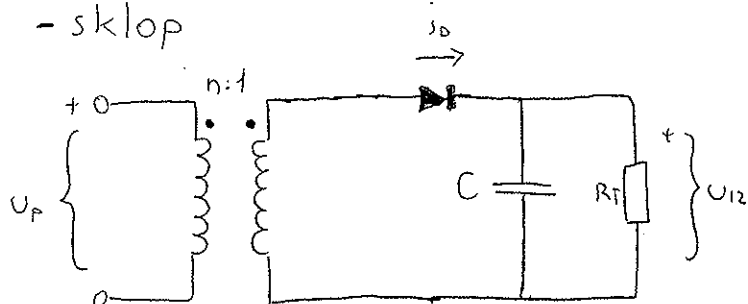
$$r = 0,483$$



PUNOVALNO
ISPRAVLJEN
SIGNAL

* ispravljač s kapacitivnim opterećenjem

- sklop



$\gamma = R \cdot C$ - vremenska konstanta

• NAPON VALOVITOSTI

$$U_{i2v} = U_{i2v} \left(1 - \frac{2t}{T} \right)$$

• EFEKTIVNA VRIJEDNOST

NAPONA VALOVITOSTI

$$U_{i2vef} = \frac{U_{i2v}}{\sqrt{3}}$$

• FAKTOR VALOVITOSTI

$$r = \frac{U_{i2ef}}{U_{i2}} = \frac{\frac{T}{2\gamma}}{\sqrt{3} \left(1 - \frac{T}{2\gamma} \right)}$$

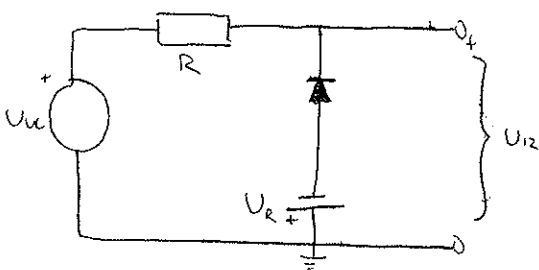
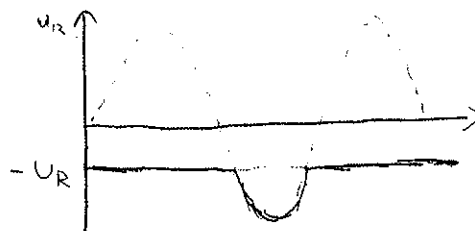
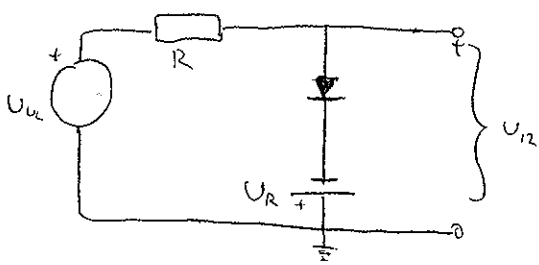
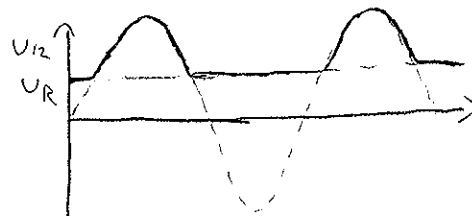
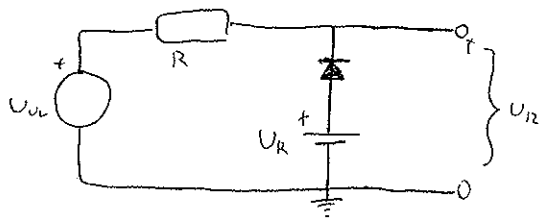
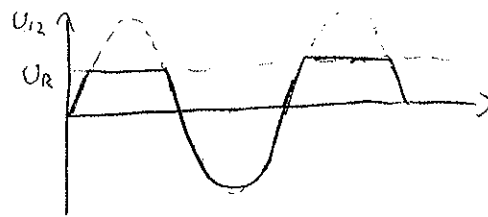
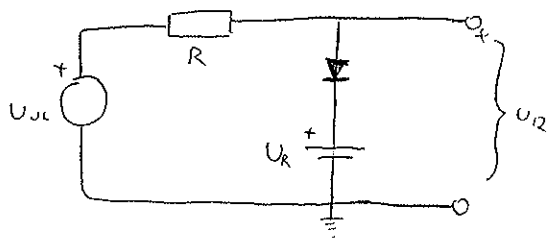
• SREDNJA VRIJEDNOST

$$U_{i2} = U_{i2} \left(1 - \frac{T}{2\gamma} \right)$$

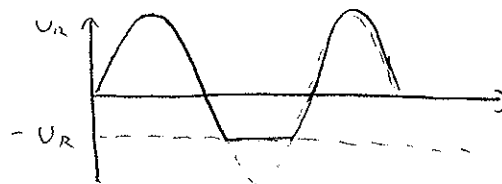
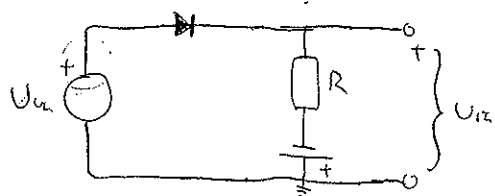
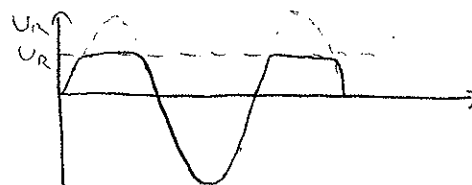
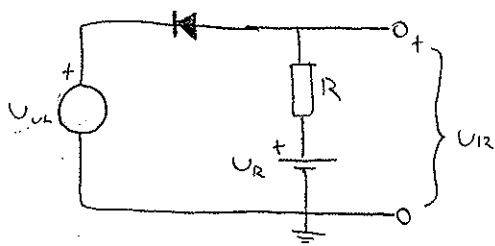
* Ograničavači

- ograničavanje hoda izlaznog napona

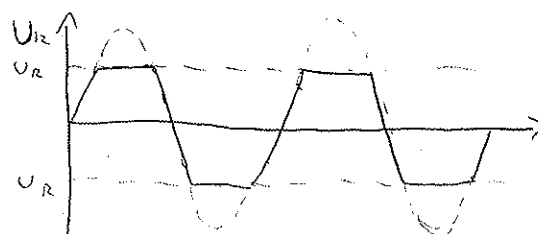
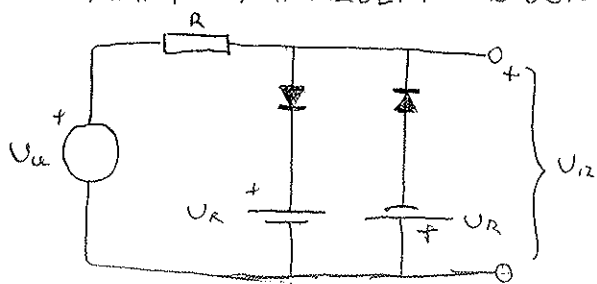
• PARALELNI DIODNI OGRANIČAVAČ



• SERIJSKI DIODNI OGRANIČAVAČ



• DVOSTRANI PARALELNI DIODNI OGRANIČAVAČ

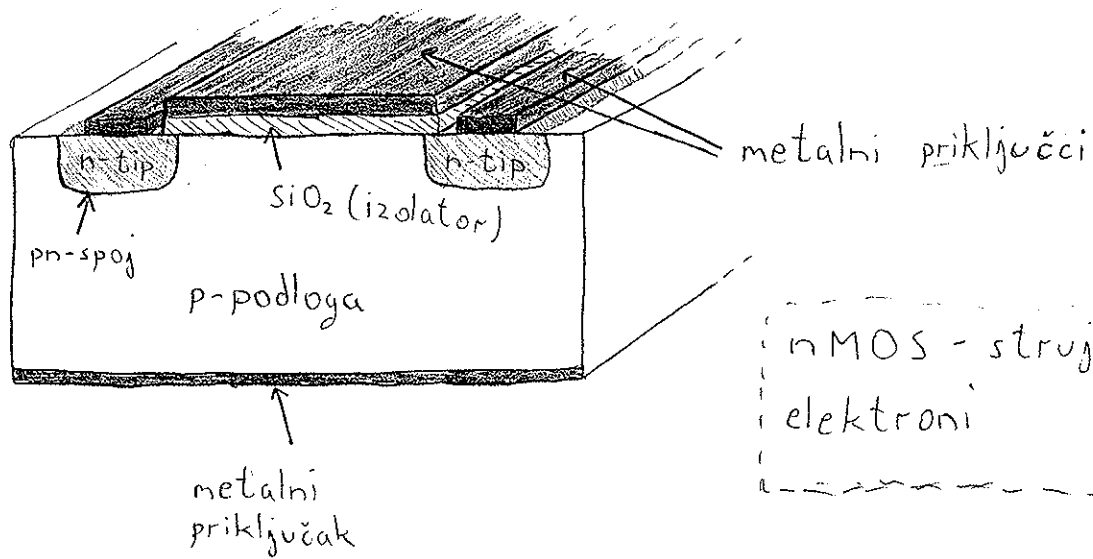


5. UNIPOLARNI TRANZISTORI

- dioda - 2 priključka
 - tranzistor - 3 priključka (ulaz, izlaz, zajednički)
 - unipolarni tranzistor - FET (Field Effect Transistor)
 - FET - naponom u ulaznom krugu upravljamo strujom u izlaznom krugu
 - ulazni krug - ne trošimo snagu
 - izlazni krug - velike snage
- AKTIVNI POLUVODIČKI ELEMENTI
- FET-ovi temelje svoj rad na naponskom upravljanju poluvodičkog otpora
 - unipolarni - struju vodi samo jedan tip nosioca
 - vrste FET-ova:
 - MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor FET) - kod izvedbe se, kao izolator, koristi sloj silicijevog dioksida
 - n-kanalni MOSFET
 - p-kanalni MOSFET
 - n-kanalni MOSFET osiromašenog tipa
 - p-kanalni MOSFET osiromašenog tipa
 - JFET (Junction FET) ili spojni FET
 - najznačajniji poluvodički elementi današnjice

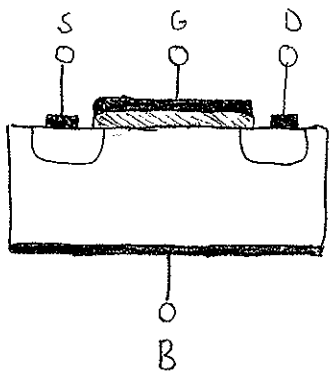
* STRUKTURA n-KANALNOG MOSFET-a I PRINCIP RADA

• nMOS tranzistor - tehnološka struktura



nMOS - struju vode elektroni

- elektrode (priključci) nMOS tranzistora



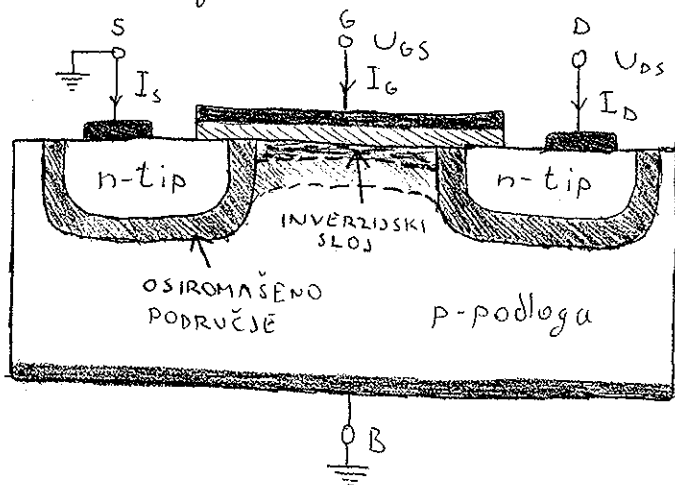
S - uvod (source)

G - upravljačka elektroda (gate)

D - odvod (drain)

B - podloga (body)

• Formiranje kanala



- uvod (S) je uzemljen ($U_S = 0$)

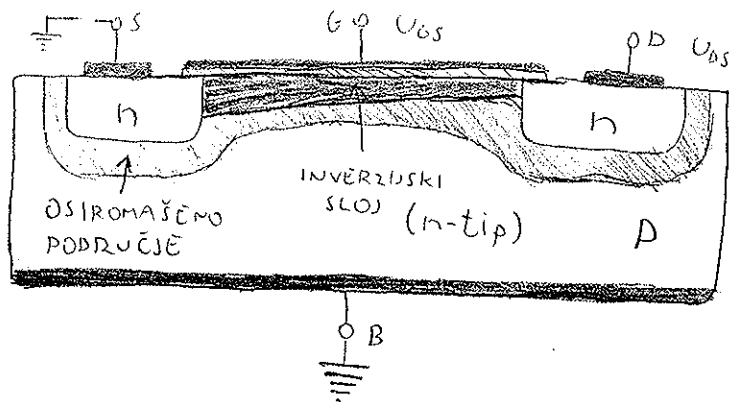
- podloga (B) je uzemljena ($U_B = 0$)

- struja u upravljačku elektrodu (G) ne teče ($I_G = 0$)

- uz $U_{GS} = 0$ nema formiranog osiromašenog područja ispod upravljačke elektrode

- Pozitivan napon U_{DS} privlači elektrone od uvida prema odvodu, ali nema formiranog kanala, pa ne teče struja

- na upravljačku elektrodu (G) dovodimo pozitivan napon U_{GS}



- taj napon će „otjerati“

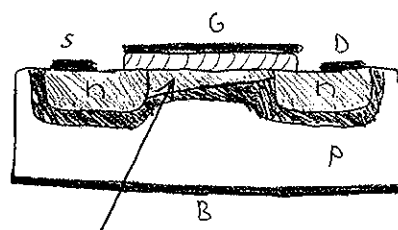
šupljine u dubinu p-podloge, a privući elektrone na površinu

- elektroni na površini rekombiniraju sa šupljinama stvarajući osiromašeno područje

- povećavajući napon U_{GS} , u jednom trenutku se stvori

inverzijski sloj (n-tipa)

kroz koji poteče struja

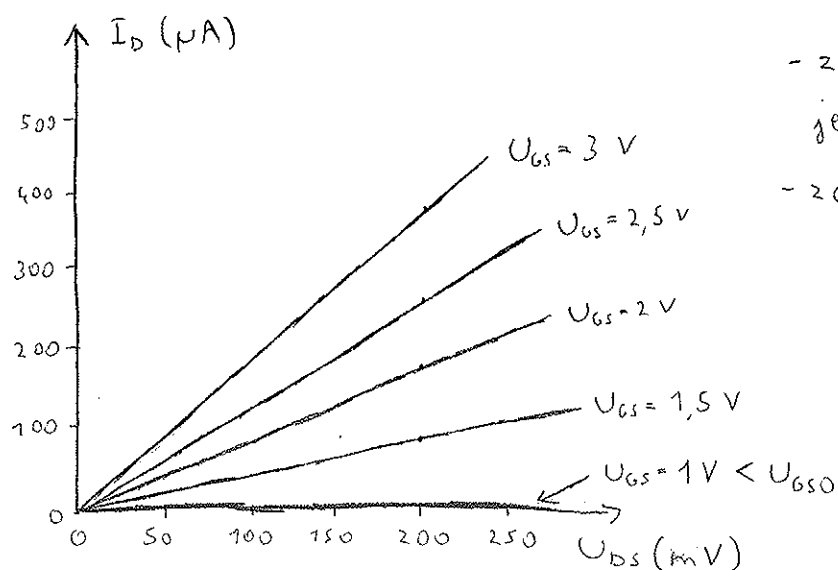


KROZ STVORENI INVERZIJSKI SLOJ (n TIPa) MOŽE TEĆI STRUJA, I IMA SVOJ POLUVODIČKI OTPOR KOJI OVISI O U_{GS}

- napon pri kojem se stvara inverzijski sloj (koncentracija elektrona na površini jednaka koncentraciji šupljina u dubini) se naziva napon praga (U_{GS0}).

* rad uz mali napon U_{DS}

- ovisnost I_D o U_{DS} za različite U_{GS}



- za male napone U_{DS} , ovisnost je linearna

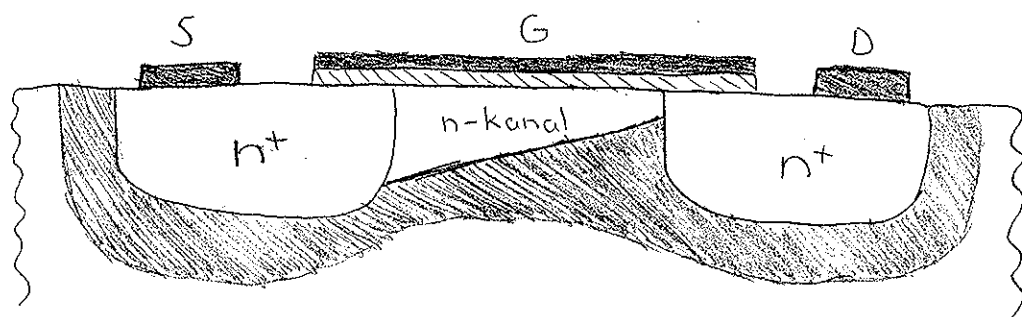
- za $U_{GS} < U_{GS0}$ struja I_D ne teče

- vidimo da naponom U_{GS} možemo mijenjati otpor MOSFET-a

← obogaćeni tip → napon U_{GS0} je pozitivan

* rad uz veći napon U_{DS}

- za mali napon U_{DS} , $U_{DS}-I_D$ ovisnost je linearna



- n^+ područja su jako vodljiva, pa je sav pad napona na kanalu

- potencijal u kanalu se mijenja od 0 (uvod) do U_{DS} (odvod)

- koncentracija elektrona ovisi o razlici potencijala na upravljačkoj elektrodi i u kanalu.

↓
ova razlika na
uvodu je jednaka

$$U_{GS} - 0$$

↓
ova razlika na
odvodu je jednaka
 $U_{GD} - U_{DS}$
BITNO
↓
IZ OVOG SLIJEDE
NAPON PRI KOJEM
ULAZIMO U ZASIĆENJE

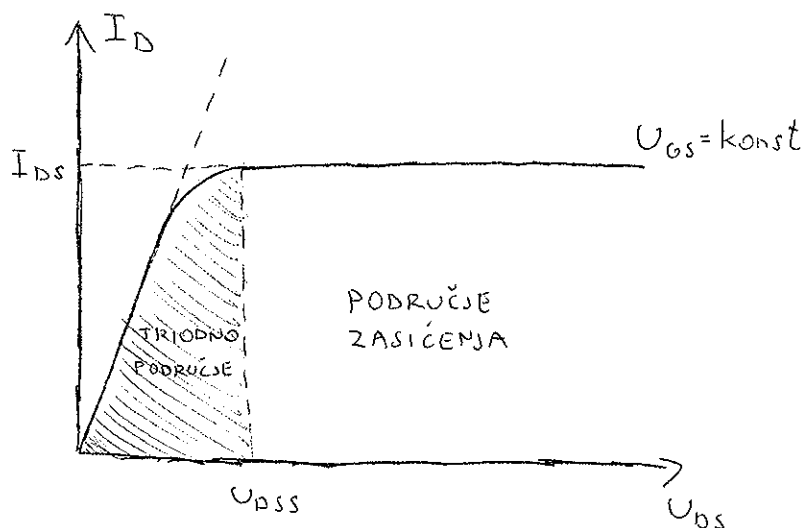
- možemo zaključiti da koncentracija elektrona opada od uvoda prema odvodu (prikazano kao suženje kanala)

- kako napon U_{DS} raste, suženje kanala je sve veće, te je ukupni otpor kanala sve veći

- nakon nekog vremena, kada je U_{DS} velik, ovisnost struje I_D o naponu U_{DS} postaje nelinearna

- kada napon U_{DS} dosegne $(U_{GS} - U_{GS0})$ (pogledaj gore zašto) struja I_D dostiže maksimum i ulazi u zasićenje

• ovisnost I_D o U_{DS}



I_{DS} - struja zasićenja

$$U_{DSS} = U_{GS} - U_{GS0}$$

triодно područje

$$U_{DS} < U_{GS} - U_{GS0}$$

područje zasićenja

$$U_{DS} > U_{GS} - U_{GS0}$$

* ovisnost I_D o U_{DS} , U_{GS} i U_{GS0}

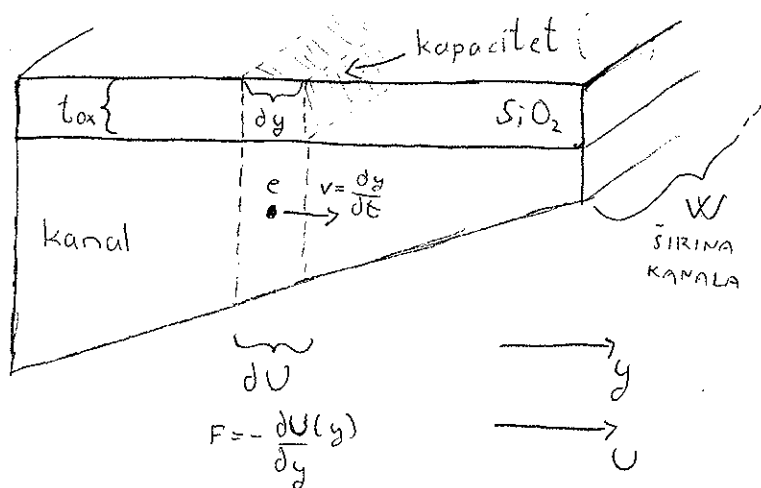
- vrijedi za triодно područje rada ($U_{DS} < U_{GS} - U_{GS0}$) $C_{ox} \cdot W \cdot dy$

- struktura metal-SiO₂-

- n-kanal predstavlja pločasti kondenzator

C_{ox} - kapacitet po jedinici površine

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}, \quad \epsilon_{ox} = 3,9 \cdot \epsilon_0 = 3,45 \cdot 10^{-13} \text{ F/cm}$$



W - širina kanala

L - duljina kanala

• IZ VOD IZRAZA ZA STRUJU I_D

$$dQ = -C_{ox} \cdot dy \cdot W [U_{GS} - U_{GS0} - U(y)], \quad I_{Fn} = \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dt} = \frac{\partial Q}{\partial y} \cdot v_{dn}(y)$$

$$I_{Dn} = -I_{Fn} = \mu_n \cdot C_{ox} \cdot W [U_{GS} - U_{GS0} - U(y)] \frac{dU(y)}{dy} \cdot dy \int_0^L \Rightarrow$$

$$\Rightarrow K = \mu_n \cdot C_{ox} \frac{W}{L} \text{ - strujni koeficijent}$$

I_{DS} - struja
zasićenja

$$I_D = K \cdot \left[(U_{GS} - U_{GS0}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right] \Rightarrow I_{DS} = \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2$$

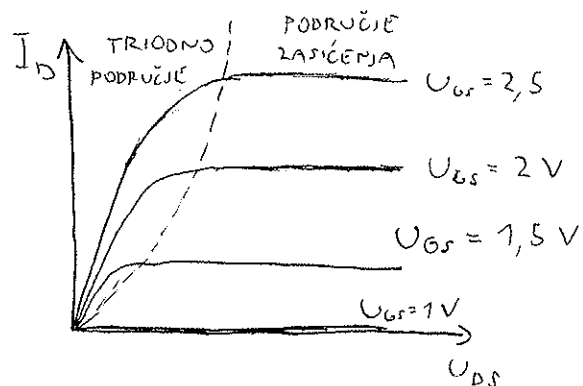
* STRUJNO-NAPONSKE KARAKTERISTIKE n-KANALNOG MOSFET-A

- prikaz za najčešće korišteni spoj zajedničkog izvoda:

- G - ulazni priključak
- D - izlazni priključak
- S - zajednički priključak

• izlazne karakteristike ($I_D = f(U_{DS})$), $U_{GS} = \text{konst.}$

- ulazna struja (I_G) je nula, pa gledamo izlaznu I_D struju



• napon praga $U_{GS0} = 1 \text{ V}$

• TRIODNO PODRUČJE

$$U_{GS0} < U_{DS} < U_{GS} - U_{GS0}$$

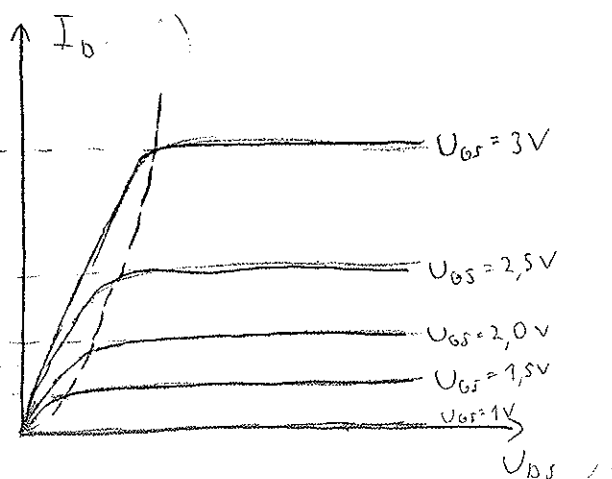
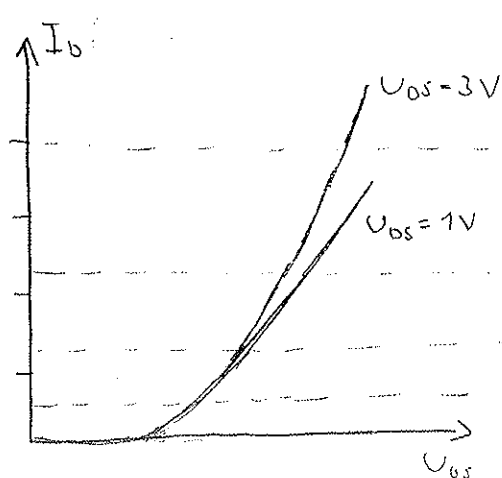
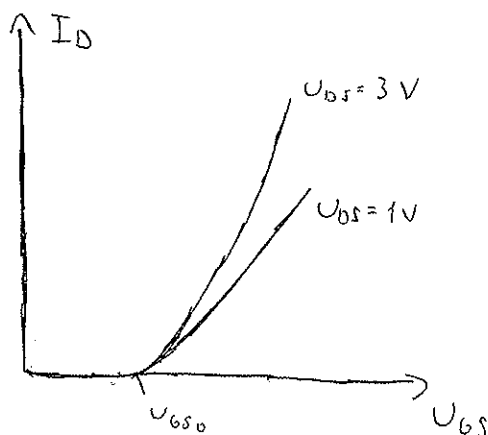
• PODRUČJE ZASIĆENJA

$$U_{DS} > U_{GS} - U_{GS0}$$

• PODRUČJE ZAPIRANJA

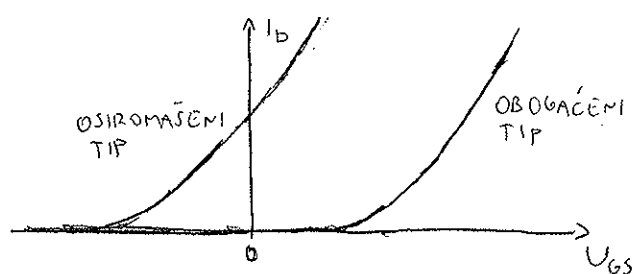
$$U_{DS} < U_{GS0}$$

• prijenosne karakteristike ($I_D = f(U_{GS})$), $U_{DS} = \text{konst.}$



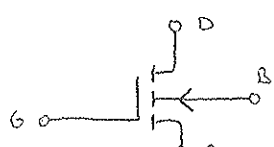
* VRSTE n-KANALNIH MOSFET-A

- dosad smo promatrali nMOSFET obogaćenog tipa (koncentracija akceptora je relativno visoka)
 - za relativno mali pozitivan napon na upravljačkoj diodi ($U_{GS} < U_{GS0}$, U_{GS0} je pozitivan), koncentracija elektrona je još uvijek jako mala u odnosu na koncentraciju šupljina
 - nema inverzijskog sloja (n-kanala) i nema struje
 - n-kanalni MOSFET osiromašenog tipa
 - spoj p-podloge (silicijev kristal) i silicijevog dioksida (SiO_2) nije idealan - silicij nema pravilnu kristalnu strukturu i u silicijevom dioksidu uvijek postoji neki (mali) pozitivni naboj
 - ako je koncentracija akceptora u podlozi relativno niska, pozitivni naboj iz SiO_2 "otjera" elektrone i bez dovedenog napona U_{GS} stvara inverzijski sloj (n-kanal) i vodi i struju
- => - osiromašeni tip (naziv zbog niske koncentracije akceptora) vodi struju i za $U_{GS0}=0$ ili čak $U_{GS0}<0$ (možemo regulirati U_{GS0})

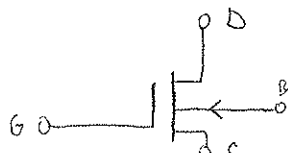


- prijenosne karakteristike

* električki simboli nMOSFET-A



nMOSFET
obogaćenog
tipa

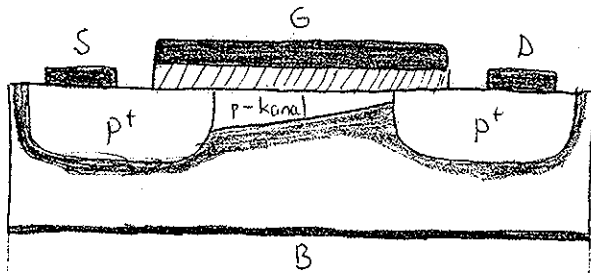


nMOSFET
osiromašenog
tipa

* p-KANALNI MOSFET

- struktura pMOSFET-a je jednaka kao i kod nMOSFET-a, ali je tip primjesa zamijenjen (n-podloga i p^+ područja)
- sve što smo rekli za n-kanalni MOSFET, vrijedi i za p-kanalni uz negativne predznake

• struktura p-kanalnog MOSFET-a



• NAPOMENA!!!

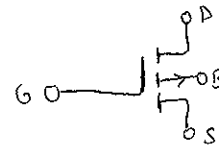
- sve Formule su jednake kao i za nMOS, osim K:

$$K = -\mu_p \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L}$$

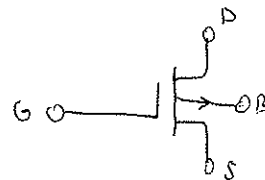
- slično kao i za n-kanalni MOSFET (ali negativno):

- na upravljačku elektrodu dovodimo negativan napon ($U_{GS} < 0$)
- obogaćeni tip- napon praga je negativan ($U_{GS0} < 0$)
- osiromašeni tip- napon praga može biti i pozitivan
- napon između uvida i odvoda je negativan ($U_{DS} < 0$)
- struja u odvod je negativna ($I_D < 0$)

• električki simboli

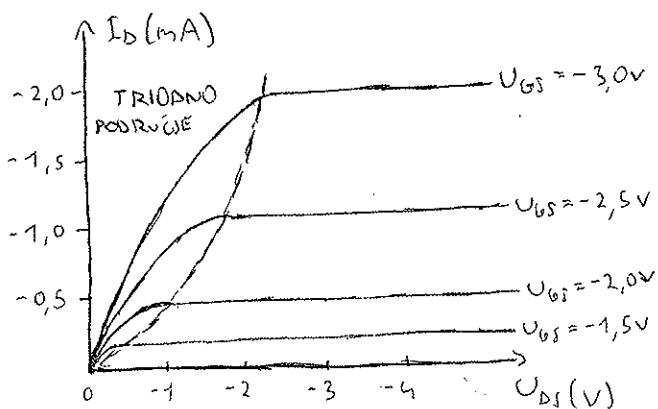


p-kanalni MOSFET
obogaćenog tipa

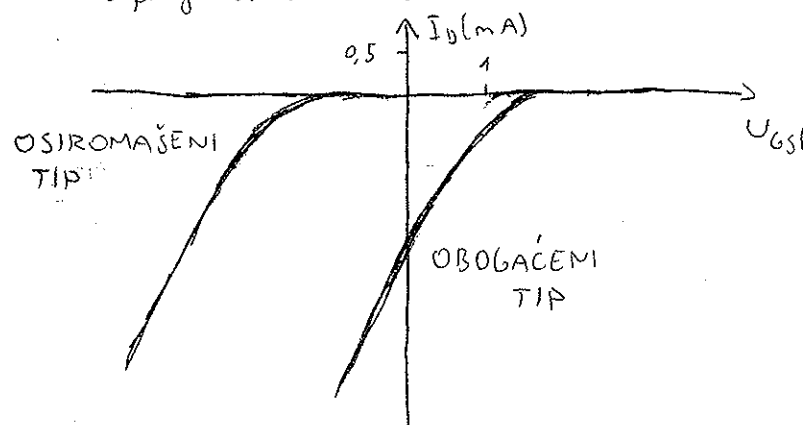


p-kanalni MOSFET
osiromašenog tipa

• izlazne karakteristike pMOSFET-a



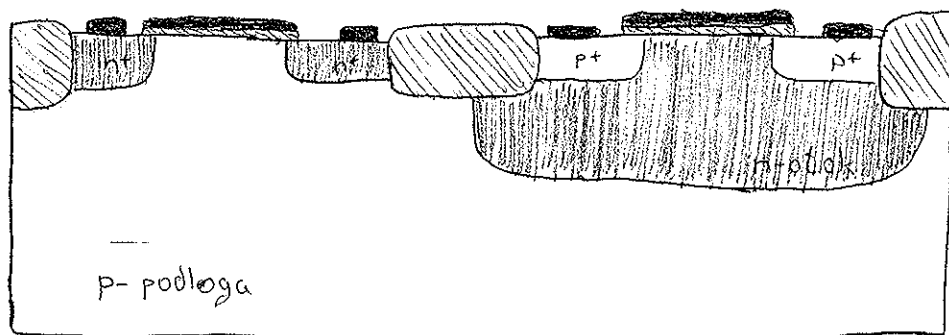
• prijenosne karakteristike



* CMOS-tehnologija

- komplementarni MOSFET-sklopovska tehnologija u kojoj zajedno koristimo p- i n-kanalne MOSFET-e

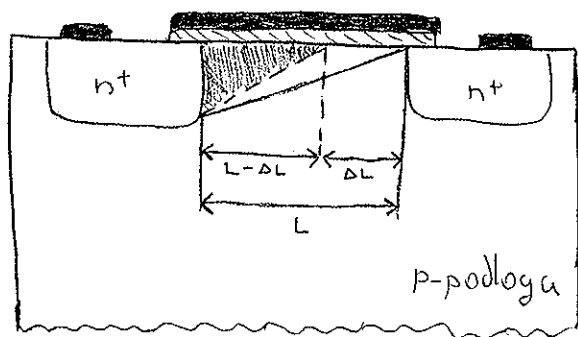
- struktura:



* konačni nagib izlaznih karakteristika u području zasićenja

- struja I_D u području zasićenja ipak nije konstantna, nego imaju određeni nagib, tj. struja I_D ipak raste (sporo) s porastom napona U_{DS}

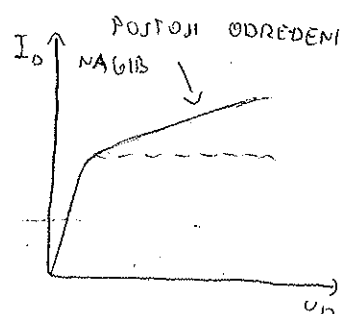
- povećanjem napona U_{DS} , kanal se sužava, ali i skraćuje, a to skraćivanje se naziva modulacija dužine kanala.



- porastom napona U_{DS} , kanal se skratio za ΔL , pa taj mali porast struje u području zasićenja, objašnjavam činjenicom da se skraćivanjem kanala ukupni otpor smanjio

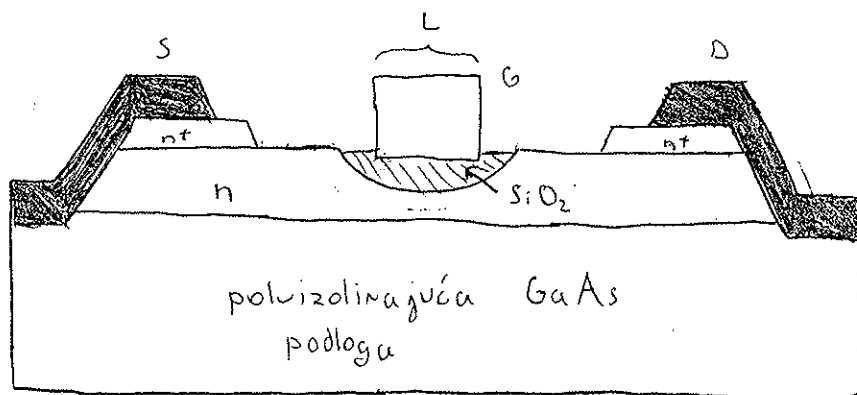
- izraz za struju I_D u području zasićenja

$$I_D = \frac{1}{2} \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{W}{L - \Delta L} \cdot (U_{GS} - U_{GS0})^2 = \frac{K}{2} \frac{1}{1 - \frac{\Delta L}{L}} (U_{GS} - U_{GS0})^2$$



* MESFET

- Metal-Semiconductor FET
- umjesto pn-spoja, koristi se ispravljački spoj metal-poluvodič
- brzi sklopovi
- samo n-kanalna izvedba
- znatna modulacija dužine kanala - velik konačni nagib izlaznih kar.
- struktura:



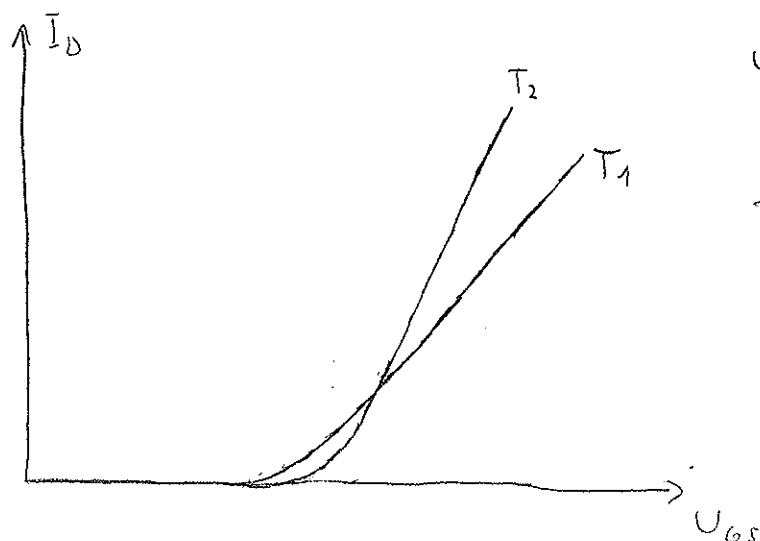
* Temperaturna svojstva MOSFET-a

- porast temperature \Rightarrow strujni koeficijent (K) se smanjuje (zbog smanjenja pokretljivosti nosilaca)
- napon praga (U_{GS0}) se smanjuje



- smanjenje K doprinosi smanjenju I_D (prevladava pri višim strujama)
- smanjenje U_{GS0} doprinosi povećanju I_D (prevladava pri nižim strujama)

\Rightarrow prienosne karakteristike za različite temperature:



$U_{DS} = \text{konst.}$

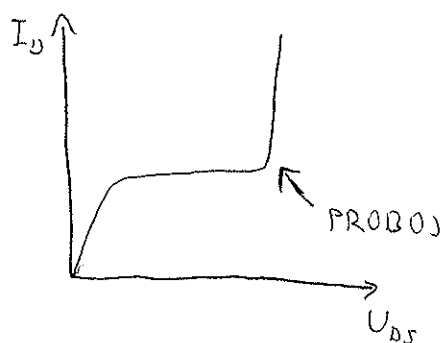
$T_1 < T_2$

* proboji kod unipolarnih tranzistora

• 3 vrste proboja:

- Povećanjem U_{DS} , raste zaporna polarizacija na pn-spoju odvoda i podloge te dolazi do lavinskog proboja
- Zbog povećanja U_{DS} , osiromašeni sloj podloga-odvod se širi skroz do uvoda. Dolazi do prohvata - te struja naglo raste (ipak blaže nego kod lavinskog)
- Proboj oksidnog sloja zbog prevelikog U_{GS} (ovo je najopasnija vrsta proboja)

- izlazna karakteristika nJFET-a s uključenim probojem



* DINAMIČKI PARAMETRI I MODELI UNIPOLARNIH TRANZISTORA

$$\left. \begin{aligned} U_{GS} &= U_{GS} + u_{gs} \\ i_D &= I_D + i_d \\ U_{DS} &= U_{DS} + u_{ds} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{istosmjerna i} \\ \text{izmjenična} \\ \text{komponenta} \end{array}$$

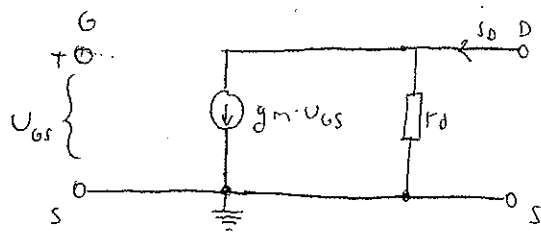
- struja ovisi o dvije veličine, pa je njena promjena:

$$di_D = \frac{\partial i_D}{\partial U_{GS}} dU_{GS} + \frac{\partial i_D}{\partial U_{DS}} dU_{DS}$$

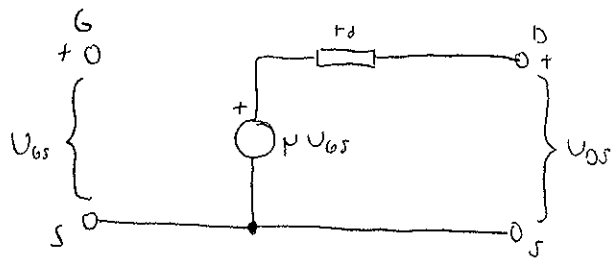
$$\left. \frac{\partial i_D}{\partial U_{GS}} \right|_{U_{DS} = \text{konst}} = g_m \leftarrow \text{strmina FET-a}$$

$$\left. \frac{\partial i_D}{\partial U_{DS}} \right|_{U_{GS} = \text{konst}} = g_d \leftarrow \text{dinamička vodljivost}$$

$\frac{1}{g_d} = r_d$ - izlazni dinamički otpor



← model FET-a za mali signal



← model s ovisnim naponskim izvorom

$$\mu = g_m \cdot r_d \quad \mu = - \left. \frac{\partial U_{DS}}{\partial U_{GS}} \right|_{i_D = \text{konst.}}$$

- faktor naponskog pojačanja

- sledi:

$$U_{DS} = -\mu \cdot U_{GS} + r_d \cdot i_D$$

• analitičko određivanje dinamičkih parametara (područje zasićenja)

$$g_m = \frac{\partial i_D}{\partial U_{GS}} = \sqrt{2k \cdot I_D}$$

$\lambda = - \frac{1}{U_{GS}}$ - parametar modulacije dužine kanala

- struja odvoda u području zasićenja

$$i_D = \frac{k}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2 (1 + \lambda \cdot U_{DS})$$

$$g_d = \frac{\partial i_D}{\partial U_{DS}} = \lambda \frac{I_D}{1 + \lambda U_{DS}} \approx \lambda I_D$$

$$r_d = \frac{1}{g_d} \approx \frac{1}{\lambda I_D}$$

