

# RC/CR MREŽA

(1)

RC  $\Rightarrow$  izlaz je na C; CR  $\Rightarrow$  izlaz je na R

$$\tau = R_{uk} \cdot C_{uk}$$

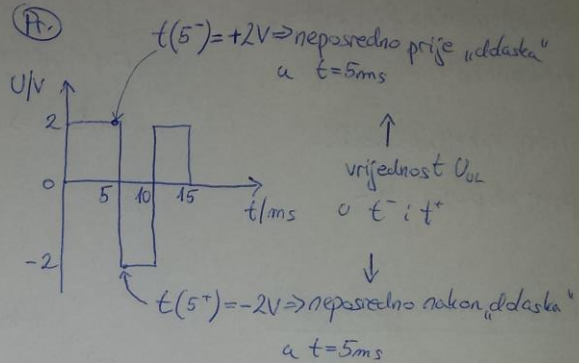
$$u(t) = U_c(t_p) + (U_{UL} - U_c(t_p)) \cdot (1 - \exp(-\frac{\Delta t}{\tau}))$$

$U_c(t_p)$  = vrijednost  $U_c$  prije trenutka  $t^-$

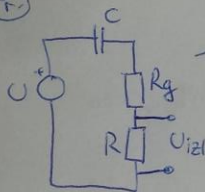
$U_{UL}$  = ulazni napon u trenutku  $t^-$

$$\Delta t = t - t_p$$

$$U_{UL} = U_R + U_C$$



(Pr.)



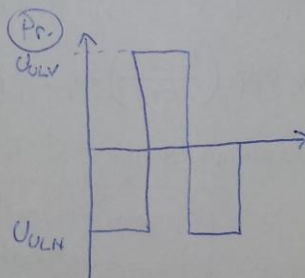
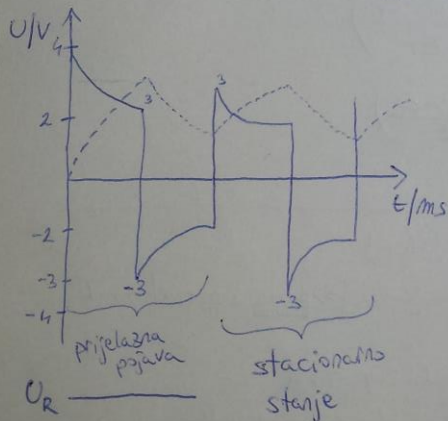
(CR)

$$U_c = U_c + (U_{UL} - U_c) \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$U_R = U_{izl} = \frac{R}{R + R_g} (U_{UL} - U_c)$$

$$\tau = (R + R_g) \cdot C$$

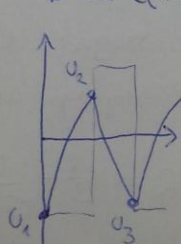
STACIONARNO STANJE  $\Rightarrow$  graf se ponavlja; završetak prijelazne pojave



$U_{ULV} \Rightarrow$  visoki  $U_{UL}$

$U_{ULN} \Rightarrow$  niski  $U_{UL}$

$\hookrightarrow$  Skica (ako se npr. radi o RC)



$$U_2 = U_1 + (U_{ULN} - U_1) \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{T}})$$

$$U_3 = U_2 + (U_{ULV} - U_2) \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{T}})$$

$$U_1 = U_3$$

$\vdots$   
itd.

# POLUVODIČI

(2)

$n$  = koncentracija elektrona

$n_i$  = intrinzična koncentracija

$p$  = koncentracija šupljina

$n > n_i \Rightarrow n$ -tip poluvodiča

$p > n_i \Rightarrow p$ -tip -II-

$$n_i = C_1 T^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{g0}}{2E_T}\right)$$

$E_g$  = širina zabranjenog područja

$C_1, E_{g0} \Rightarrow$  zadano (u formuli a)

ε

ekstrinzičan poluvodič:

ako je:  $n \gg n_i \Rightarrow n \approx N_D \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{n}$

ako je:  $p \gg n_i \Rightarrow p \approx N_A \Rightarrow n = \frac{n_i^2}{p}$

intrinzično temperaturno područje:

ako NE VRIJEDI  $n \gg n_i$  ILI  $p \gg n_i$

$$n = \frac{1}{2} [N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}]; p = \frac{1}{2} [N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2}]$$

\* Ako imamo 2 dopiranja, računamo netto koncentraciju donora/akceptora

$$\hookrightarrow 1.) N_A > N_D \Rightarrow N_{A,netto} = N_A - N_D; 2.) N_D > N_A \Rightarrow N_{D,netto} = N_D - N_A$$

onda s neto vrijednostima računamo  $n$  ili  $p$

$$\text{koncentracija elektrona: } n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_c}{E_T}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{E_T}\right)$$

$$\text{II- šupljina: } p_0 = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{E_T}\right) = n_i \exp\left(\frac{E_{Fi} - E_F}{E_T}\right)$$

$$N_v, N_c \Rightarrow \text{efektivne gustoće kvantnih stanja} = C \cdot T^{3/2}$$

$E_F \Rightarrow$  Fermijeva energija

$E_{Fi} \Rightarrow$  -II- -II- intrinzičnog silicija

$E_v \Rightarrow$  energija VALENTNOG POJASA

$E_c \Rightarrow$  ENERGIJA VODLJIVOG POJASA

$E_c$  i  $E_v \Rightarrow$  ne računa se niti je zadano,

služi za određivanje

položaja  $E_F$

$\sigma$  = specifična vodljivost [S/cm]

$\mu_n, \mu_p$  = pokretljivost nosilaca [cm<sup>2</sup>/Vs]  $\Rightarrow$  pada s porastom  $T$

$\sigma \Rightarrow$  veća ako se radi o  $n$ -tipu

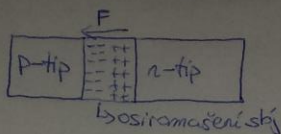
$\sigma \Rightarrow$  NAJVEĆA ako su obje primjese istog tipa

$\sigma \Rightarrow$  najmanja ako su različitog tipa uz ujet  $N_A > N_D$

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1}{\sigma} \cdot \frac{l}{S}$$



## PN-DIODA



$F \Rightarrow$  el. polje  $\Rightarrow$  u osiromašenom sloju  
(rekombinacija s većinskim nosiocima)

### RAVNOTEŽA

$$E_F = \text{konst.}$$

napon na p-n spoju je  $U = 0V$

$$\left. \begin{aligned} I_n = I_{n0} - I_{n'} &= 0 \\ I_p = I_{p0} - I_{p'} &= 0 \end{aligned} \right\} I = I_n + I_p = 0$$

$U_k$  = kontaktni potencijal (prostorni naboj uzrokuje razliku potencijala)

$$E_{Fn} - E_{Fp} = E_T \ln \left( \frac{n_{0n}}{n_i} \right) + E_T \ln \left( \frac{p_{0p}}{n_i} \right)$$

$\hookrightarrow$  \* za većinske nosioce ( $n_{0n}, p_{0p}$ ) na zadanoj temperaturi:  
 $\hookrightarrow U_k = U_T \ln \left( \frac{n_{0n} p_{0p}}{n_i^2} \right)$

$$p_{0p} \approx N_A; n_{0n} \approx N_D$$

### POLARIZACIJA

- ukupni napon u osiromašenom sloju:  $U_{0k} = U_k - U$

$\hookrightarrow U > 0 \Rightarrow$  povećava difuziju većinskih nosilaca  $\Rightarrow I_n \approx I_{n0}; I_p \approx I_{p0}; I = I_{n0} + I_{p0}$   
 $\Rightarrow$  povećanjem  $U$ , struja raste  $\Rightarrow$  propusna polarizacija

$\hookrightarrow U < 0 \Rightarrow$  drift manjinskih nosilaca;  $I_n \approx -I_{n'}$ ,  $I_p \approx -I_{p'}$ ;  $I = -I_{n'} - I_{p'}$   
 $\Rightarrow$  pronađenom  $U$  struja se ne mijenja  $\Rightarrow$  zaporna polarizacija

### OSIROMAŠENI SLOJ

-  $d_{Bp}$  i  $d_{Bn} \Rightarrow$  grance os. sloja na p- i n-strani

$$\text{- ukupna širina sloja: } d_B = d_{Bn} + d_{Bp} = d_B \frac{N_A}{N_A + N_D} + d_B \frac{N_D}{N_A + N_D} = \sqrt{\frac{2 \epsilon_0 \epsilon_r}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (U_k - U)} \quad \begin{aligned} \epsilon_r(Si) &= 11,7 \\ \epsilon_r(SiO_2) &= 3,9 \end{aligned}$$

$$\text{- kapacitet osiromašenog područja: } C_B = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d_B}$$

$$\text{- koncentracije manjinskih nosilaca uz rub os. sloja: } n_{p0} = n_{0p} \exp\left(\frac{U}{U_T}\right); p_{n0} = p_{0n} \exp\left(\frac{U}{U_T}\right)$$

-  $W_n, W_p \Rightarrow$  krajevi p- i n- priključka

$$\text{- } L_p, L_n \Rightarrow \text{difuzijska duljina} \Rightarrow L_p = \sqrt{D_p \tau_p}; L_n = \sqrt{D_n \tau_n}; D_p = \mu_p U_T; D_n = \mu_n U_T$$

# STRAJNO-NAPONSKA KARAKTERISTIKA

4

- propusna polarizacija:

$I_D \Rightarrow$  struja kroz diodu

$I_S \Rightarrow$  struja zasićenja

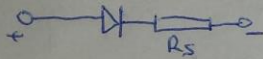
$$I_D = I_S \left[ \exp\left(\frac{U_D}{m U_T}\right) - 1 \right]$$

manjinski nosioci na p-strani:  $n_{op} = \frac{n_i^2}{N_A}$

-11-

n-strani:  $p_{on} = \frac{n_i^2}{N_D}$

$r_d = \text{DINAMIČKI OTPOR} = \frac{U_T}{I + I_S}$  ;  $U = U_D + I \cdot R_S$

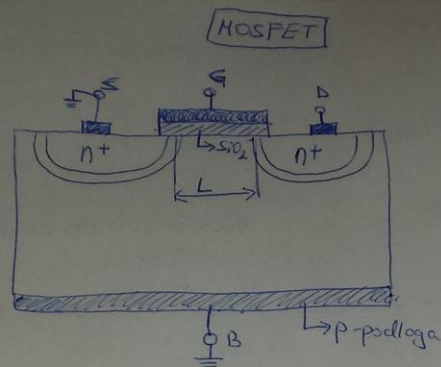


$U_D = U_T \ln\left(\frac{I_D}{I_S} + 1\right)$  (za  $m=1$ )

- U zadatcima kod računanja, prvo izračunaj sve s n-strane, pa s p-strane da ne dođe do zabune

$\hookrightarrow$  p-strana:  $n_{op}, D_n, L_n$

$\hookrightarrow$  n-strana:  $p_{on}, D_p, L_p$



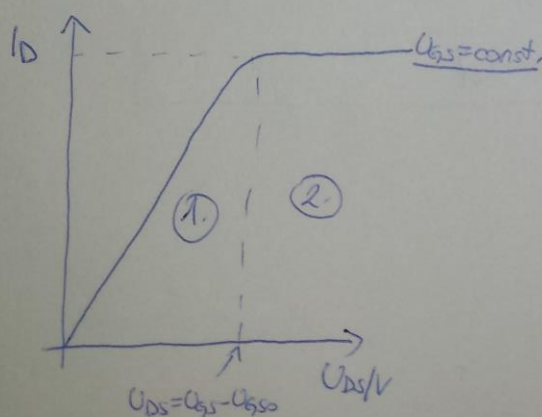
- tip MOSFET-a suprotan tipu podloge
- ističu se 2 jako dopirana ( $n^+$ ) područja  
ulazna (S) i izlaza (D)
- upravljačka elektroda (G)  $\Rightarrow$  od podloge  
odvojen slojem  $\text{SiO}_2 \Rightarrow$  izolator
- $\hookrightarrow$  \* struja kroz G neće teći prema  
podlozi bez obzira na napon od G
- \* struja teče između S i D
- \* iznos i određuje napon dovoda na upr. elektrodu

- $U_{DS}$  = napon na izlazu (D)
- $U_{GS}$  = napon na upravljačkoj elektrodi (G)
- $U_{GS}$  raste  $\Rightarrow$  podloga postaje sve slabiji p-tip  $\Rightarrow I_D$  raste
- $U_{GS0} \Rightarrow$  napon praga  $\Rightarrow$  pri njemu se formira inverzijski sloj; obično iznosi 0,5 i 1V
- inverzijski sloj  $\Rightarrow$  kad se dobije dovoljan broj elektrona (izjednačavan el. na površini s brojem  
šupljina u podlozi) da struja teče između S i D

$\Rightarrow$  ako se struja mijenja linearno  $\Rightarrow$  MOSFET se ponaša kao otpornik

$\Rightarrow U_{GS} \leq U_{GS0} \Rightarrow$  struja NE TEČE (nije formiran kanal)

$\Rightarrow$  kako raste  $U_{DS} \Rightarrow$  sužava se kanal  $\Rightarrow$  raste ukupni otpor



① TRIODNO PODRUČJE  $\Rightarrow |U_{DS}| < |U_{GS} - U_{GS0}|$   
 $\Rightarrow I_D$  raste

② PODRUČJE ZASICENJA  $\Rightarrow |U_{DS}| \geq |U_{GS} - U_{GS0}|$   
 $\Rightarrow I_D = \text{const.}$ , ne raste



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

- ZASICENJE  $\Rightarrow I_D = \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2 (1 + \lambda U_{DS})$

$K \Rightarrow$  strujni koeficijent  $\Rightarrow \mu C_{ox} \frac{W}{L} = K$

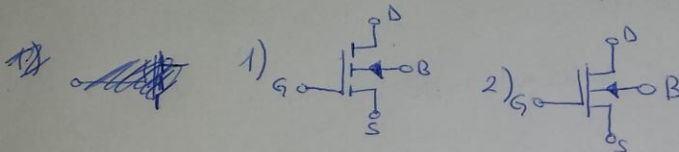
$\epsilon_{ox}$  = dielektrična konstanta  $SiO_2$   
 $= 3,9 \cdot \epsilon_0$

$C_{ox} \Rightarrow$  kapacitet po jedinici površine  $\Rightarrow C_{ox} = \frac{C}{S} = \frac{\epsilon_{ox}}{l_{ox}}$   $l_{ox}$  = debljina oksida (obično 10nm)

$L \Rightarrow$  dužina upravljačke elektrode  
 $W \Rightarrow$  širina  $-||-$   $\left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\} S = W \cdot L$

obogađeni tip  $\Rightarrow$  radi samo s 1 predznakom napona (napon samo + ili samo -)  $\Rightarrow 1$

osiranašev tip  $\Rightarrow$  radi s oba predznaka napona  $\Rightarrow 2$



### DINAMIČKI PARAMETRI

U TRIODNOM PODRUČJU	U PODRUČJU ZASICENJA
$g_m = K \cdot U_{DS}$	$g_m = K(1 + \lambda U_{DS})(U_{GS} - U_{GS0})$
$g_d = K(U_{GS} - U_{GS0} - U_{DS})$	$g_d = \frac{K\lambda}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2$
$r_d = \frac{1}{g_d}$	$r_d = \frac{1}{g_d}$
$\mu = g_m \cdot r_d$	$\mu = g_m \cdot r_{ed}$

$g_m$  = strmina

$\lambda$  = faktor modulacije kanala

$\mu$  = faktor pojačanja

$g_d$  = izlazna dinamička vodljivost

$r_d$  = dinamički otpor