

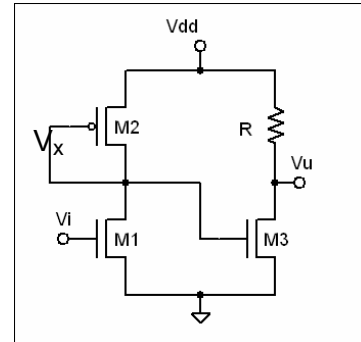
PROVA SCRITTA DI FONDAMENTI DI ELETTRONICA A  
21 SETTEMBRE 2006

1) Nel circuito in figura, i transistori MOS sono caratterizzati dalle tensioni di soglia  $V_{Tn1}=|V_{Tp2}|=V_{Tn3}=V_T$  e dai coefficienti  $\beta_{n1}$ ,  $\beta_{p2}$ ,  $\beta_{n3}$ .

Si determinino  $\beta_{n1}$ ,  $\beta_{p2}$ ,  $\beta_{n3}$  in modo che:

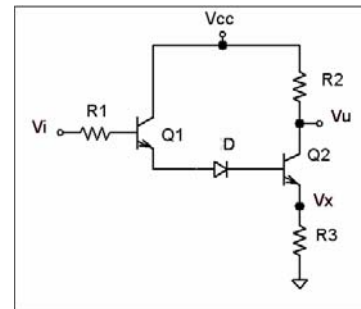
- l'escursione di  $V_u$ , al variare di  $V_i$  fra 0 e  $V_{dd}$ , sia pari a 3.1 V
- la potenza statica dissipata per  $V_i=0$  sia uguale alla potenza statica dissipata per  $V_i=V_{dd}$
- il valore di  $\beta_{n1}$  sia pari a 5 volte il valore di  $\beta_{p2}$

$V_{dd} = 3.5 \text{ V}$ ,  $V_T = 0.5 \text{ V}$ ,  $R_1 = 800 \Omega$ .



2) Nel circuito in figura, i transistori e il diodo possono essere descritti da un modello "a soglia", con  $V_\gamma=0.75 \text{ V}$  e  $V_{CE,sat}=0.2 \text{ V}$ . Si determini la caratteristica statica di trasferimento  $V_u(V_i)$ , per  $0 < V_i < V_{cc}$ .

$V_{cc} = 5 \text{ V}$ ,  $\beta_F=100$ ,  $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 500 \Omega$ .

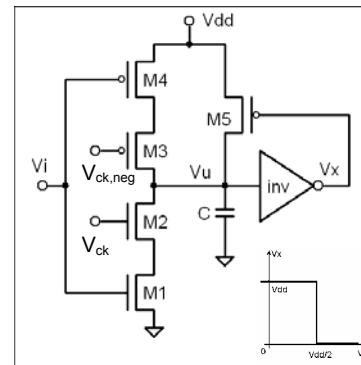


3) Nel circuito in figura, i transistori MOS sono caratterizzati dalle tensioni di soglia  $V_{Tn} = |V_{Tp}| = V_T$  e dai coefficienti  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\beta_4$  e  $\beta_5$ . Durante la fase di valutazione ( $V_{ck}=V_{dd}$ ,  $V_{ck,neg}=0$ ) il segnale di ingresso  $V_i$  compie una transizione istantanea da 0 a  $V_{dd}$ .

Si calcoli il corrispondente tempo di discesa del segnale  $V_u$ .

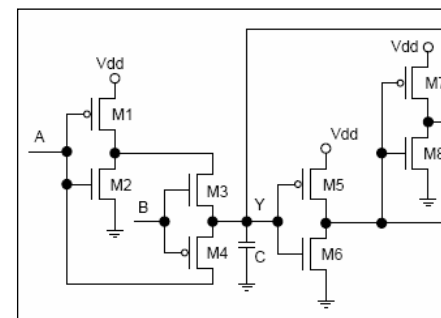
A questo scopo, si assuma per semplicità che l'invertitore "inv" si comporti in maniera ideale, con soglia logica pari a  $V_{dd}/2$ , come descritto dalla caratteristica di trasferimento riportata.

$\beta_1=\beta_2=\beta_3=\beta_4=1 \text{ mA/V}^2$ ,  $\beta_5=100 \mu\text{A/V}^2$ ,  $V_{DD}=3.3 \text{ V}$ ,  $V_T=0.45 \text{ V}$ ,  $C = 7 \text{ fF}$ .



4) Nel circuito in figura, i transistori MOS sono caratterizzati dalle tensioni di soglia  $V_{Tn} = |V_{Tp}| = V_T$  e dai coefficienti  $\beta_n$  e  $\beta_p$ . I segnali di ingresso A, B possono assumere i valori 0 e  $V_{DD}$ .

Si determini la funzione logica svolta dal circuito ( $Z = Z(A,B)$ ) indicando chiaramente, per ogni configurazione degli ingressi, lo stato (ON, OFF) di tutti i transistori presenti nel circuito. Si consideri, quindi, la sola parte di circuito costituita dai transistori M1, M2, M3 e M4 avente ingressi A e B e uscita Y, supponendo di disconnettere la parte costituita dai transistori M5, M6, M7 e M8. Si calcoli il tempo di propagazione del segnale relativo all'uscita Y supponendo che A commuti istantaneamente dal livello logico basso a quello alto con B fisso al livello logico alto.



$V_{DD}=3.3 \text{ V}$ ,  $\beta_p=100 \mu\text{A/V}^2$ ,  $\beta_n=80 \mu\text{A/V}^2$ ,  $V_T=0.35 \text{ V}$ ,  $C = 10 \text{ fF}$

Esame di ELETTRONICA AB (mod. B): svolgere gli esercizi 1 e 2.

Esame di ELETTRONICA DEI SISTEMI DIGITALI A: svolgere gli esercizi 3 e 4

Esame di FONDAMENTI DI ELETTRONICA A: svolgere almeno uno fra gli esercizi 1 e 2 e almeno uno fra gli esercizi 3 e 4.

• Indicare su ciascun foglio nome, cognome, data e numero di matricola

• Non usare penne o matite rosse

• L'elaborato deve essere contenuto in un unico foglio (4 facciate) protocollo

Compito del 21-09-2006 - Esercizio #1

OSS. PRELIMINARI: M2 sempre SAT ( $V_{sg}=V_{sd}$ ) o spento.

- Suppongo che, per  $V_i=V_{dd}$ , M1 sia ON, M2 sat,  $V_x < V_t$  (da verificare)  $\rightarrow$  M3 OFF  $\rightarrow$   
 $V_u = V_{u,High} = V_{dd}$   
 $\rightarrow V_{u,Low} = V_{u,High} - \text{escursione} = 3.5 - 3.1 = 0.4V$

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Per <math>V_i=0</math>, M1 OFF <math>\rightarrow I_{d1}=0 \rightarrow</math><br/> <math>I_{d2} = \beta_{p2}(V_{dd}-V_x-V_t)^2 = 0 \rightarrow V_x = V_{dd}-V_t &gt; V_t \rightarrow</math> M3 ON<br/> <math>V_{gs3} = V_{dd}-V_t</math>, <math>V_{ds3} = V_{u,Low} \rightarrow</math> M3 LIN</li> </ul> | $I_R = (V_{dd} - V_{u,Low})/R = 3.875 \text{ mA}$<br>$\rightarrow P_{d,Low} = V_{dd} I_R = 13.56 \text{ mW} = P_{d,High}$<br>$I_{d3} = \beta_{n3}((V_{dd}-V_t-V_t) V_{u,Low} - (V_{u,Low})^2/2)$<br>Ma $I_{d3} = I_R$ , $\rightarrow \beta_{n3} = 4.212 \text{ mA/V}^2$ |
|--|---|

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Per <math>V_i=V_{dd}</math>, M1 ON (suppongo LIN, da verificare), M2 SAT:<br/> <math>I_{d1} = \beta_{n1}((V_{dd}-V_t) V_x - V_x^2/2)</math><br/> <math>I_{d2} = \beta_{n1}/5 (V_{dd}-V_x-V_t)^2/2</math><br/> Ma <math>I_{d1} = I_{d2}</math>, da cui si ricava che :</li> </ul> | $v_x = 0.261387 \text{ (OK)}$ , $v_x = 5.73861 \text{ V (Inaccettabile: } V_{sg2} < V_t) \rightarrow \text{OK HP M1 LIN, OK HP M3 OFF}$<br>$I_{d1} = \beta_{n1}((V_{dd}-V_t) V_x - V_x^2/2) = P_{d,High}/V_{dd}$<br>$\rightarrow \beta_{n1} = 5.167 \text{ mA/V}^2 \rightarrow \beta_{p2} = \beta_{n1}/5 = 1.033 \text{ mA/V}^2$ |
|---|--|

## Compito del 21-09-2006 - Esercizio #2

Osservazioni preliminari: T1 quando ON in AD. Inoltre Q1, D e Q2 devono essere o tutti contemporaneamente ON o tutti contemporaneamente OFF.

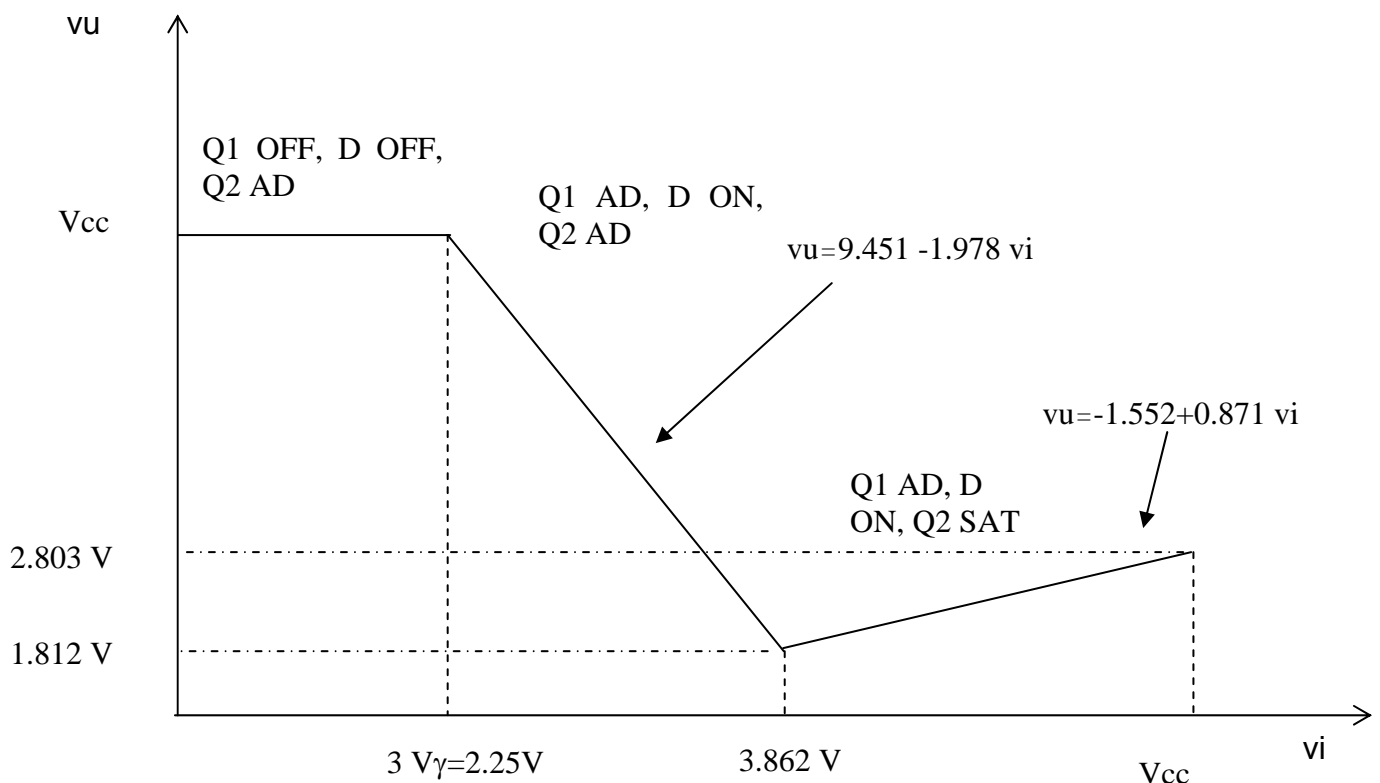
1) Regione 1:  $v_i < 3V_\gamma$ , T1, D e T2 tutti contemporaneamente OFF, quindi  $v_u = V_{cc}$ .

2) Regione 2:  $3V_\gamma < v_i < 3.862 \text{ V}$ , T1 AD, D ON, T2 AD.

$i_{b1} = (v_i - 3V_\gamma - v_x) / r_1$	Ma
$i_{b2} = (v_i - 3V_\gamma - v_x) / r_1 * (\beta_f + 1)$	$i_{e2} = i_{b2} * (\beta_f + 1)$
$i_{c2} = (v_{cc} - v_u) / r_2$	$i_{c2} = i_{b2} * \beta_f$
$i_{e2} = v_x / r_3$	da cui si ricava che:
	$v_u = 9.451 - 1.978 v_i$ , e $v_x = -2.248 + 0.999 v_i$
In questa regione si rimane fintantoché Q2 entra in saturazione, allora	$v_x = -2.248 + 0.999 v_i$
$v_x = v_u - v_{cesat}$ , ma	$v_u - v_x = v_{cesat}$ , da cui si ricava
$v_u = 9.451 - 1.978 v_i$ e	$v_i = 3.862 \text{ V}$ ( cui corrisponde una $v_u = 1.812 \text{ V}$ )
	Quindi si rimane in regione 2 fintantoché $v_i < 3.862 \text{ V}$

3) Regione 3:  $v_i > 3.862 \text{ V}$ , T1 AD, D ON, T2 SAT.

$i_{b1} = (v_i - 3V_\gamma - (v_u - v_{cesat})) / r_1$	Ma $i_{e2} = i_{c2} + i_{b2}$ ,
$i_{b2} = (v_i - 3V_\gamma - (v_u - v_{cesat})) / r_1 * (\beta_f + 1)$	da cui si ricava che $v_u = -1.552 + 0.871 v_i$ .
$i_{c2} = (v_{cc} - v_u) / r_2$	$v_u (v_i = v_{cc}) = 2.803 \text{ V}$ .
$i_{e2} = (v_u - v_{cesat}) / r_3$	



### Esercizio #3

Si tratta di un p-latch C<sup>2</sup>MOS; il segnale V<sub>x</sub> in retroazione pilota un pMOS per contrastare le correnti di perdita nella fase di alta impedenza di uscita. In corrispondenza del fronte di salita di V<sub>i</sub>, il segnale V<sub>u</sub> compie quindi una transizione opposta, passando dal valore iniziale V<sub>dd</sub> a 0.

Prima della commutazione di V<sub>i</sub> (t<0):

$$V_i=0, V_{CK}=V_{dd}, V_{CK,neg}=0 \rightarrow M1 \text{ OFF}, M2 \text{ ON}, M3 \text{ ON}, M4 \text{ ON} \rightarrow V_u=V_{dd} \rightarrow V_x=0 \rightarrow M5 \text{ ON} \\ V_c(t<0)=V_{dd}$$

Dopo la commutazione:

$$V_i=V_{dd}, V_{CK}=V_{dd}, V_{CK,neg}=0 \rightarrow M1 \text{ ON}, M2 \text{ ON}, M3 \text{ ON}, M4 \text{ OFF}$$

V<sub>u</sub> quindi discende, e la capacità si scarica attraverso una rete di pull-down costituita dalla serie di M1 e M2 (equivalenti a un transistor M12 con  $\beta_{12}=\beta_1/2$ ), contrastata del transistor di pull-up M5, acceso (e in regime LIN) fino a che V<sub>x</sub>=0 (cioè per V<sub>u</sub>>V<sub>dd</sub>/2).

Il tempo di discesa è relativo alla variazione di V<sub>u</sub> dal 90% al 10% della propria escursione.

Il transitorio si articola quindi in più tratti:

1) 90% V<sub>dd</sub> > V<sub>u</sub> > V<sub>dd</sub>-V<sub>t</sub> M12 SAT, M5 LIN (V<sub>x</sub>=0)

$$I_{d12}=\beta_{12}/2 (V_{dd}-V_t)^2 \\ I_{d5}=\beta_5 ((V_{dd}-V_t)(V_{dd}-V_u)- (V_{dd}-V_u)^2/2)$$

$$I_c= I_{d5} - I_{d12} = C dV_u/dt \rightarrow t_1= \int_{2.97}^{2.85} C/I_c dV_u = 0.436 \text{ ps}$$

2) V<sub>dd</sub>-V<sub>t</sub> > V<sub>u</sub> > V<sub>dd</sub>/2 M12 LIN, M5 LIN (V<sub>x</sub>=0)

$$I_{d12}=\beta_{12} ((V_{dd}-V_t) V_u - V_u^2/2) \\ I_{d5}=\beta_5 ((V_{dd}-V_t)(V_{dd}-V_u)- (V_{dd}-V_u)^2/2)$$

$$I_c= I_{d5} - I_{d12} = C dV_u/dt \rightarrow t_2= \int_{2.85}^{1.65} C/I_c dV_u = 5.076 \text{ ps}$$

3) V<sub>dd</sub>/2 > V<sub>u</sub> > 10% V<sub>dd</sub> M12 LIN, M5 OFF (V<sub>x</sub>=V<sub>dd</sub>)

$$I_{d12}=\beta_{12} ((V_{dd}-V_t) V_u - V_u^2/2) \\ I_{d5}=0$$

$$I_c= - I_{d12} = C dV_u/dt \rightarrow t_3= \int_{1.65 \text{ V}}^{0.33 \text{ V}} C/I_c dV_u = 9.292 \text{ ps}$$

Il tempo di discesa quindi vale:

**t<sub>f</sub>=t<sub>1</sub>+t<sub>2</sub>+t<sub>3</sub>= 14.8 ps**

#### Esercizio #4

Funzione logica svolta dal circuito:

A=0 V, B=0 V: M1 ON, M2 OFF, M3 OFF, M4 ON  $\Rightarrow Y=V_T$  V  
M5 ON, M6 OFF  $\Rightarrow Z=V_{DD} \Rightarrow$  M7 OFF, M8 ON allora Y viene portato a 0 V (M4 si spegne essendo  $V_{SG}=V_S-V_G=V_Y-V_B=0-0=0<V_T$ ) e Z confermato a  $V_{DD}$

A=0 V, B=  $V_{DD}$ : M1 ON, M2 OFF, M3 ON, M4 OFF  $\Rightarrow Y=V_{DD}-V_T$   
M5 OFF, M6 ON  $\Rightarrow Z=0$  V  $\Rightarrow$  M7 ON, M8 OFF allora Y viene portato a  $V_{DD}$  (M3 si spegne essendo  $V_{GS}=V_G-V_S=V_B-V_Y=V_{DD}-V_{DD}=0<V_T$ ) e Z confermato a 0 V

A= $V_{DD}$ , B=0 V: M1 OFF, M2 OFF, M3 OFF, M4 ON  $\Rightarrow Y=V_{DD}$   
M5 OFF, M6 ON  $\Rightarrow Z=0$  V  $\Rightarrow$  M7 ON, M8 OFF allora Y confermato a  $V_{DD}$  e Z a 0 V

A= $V_{DD}$ , B= $V_{DD}$ : M1 OFF, M2 ON, M3 ON, M4 OFF  $\Rightarrow Y=0$  V  
M5 ON, M6 OFF  $\Rightarrow Z=V_{DD} \Rightarrow$  M7 OFF, M8 ON allora Y confermato a 0 V e Z a  $V_{DD}$

Pertanto  $Z = \overline{A} \overline{B} + AB$

Considero la sola parte di circuito costituita dai transistori M1, M2, M3 e M4.  
Analizzo la transizione A=0 B=1  $\rightarrow$  A=1 B=1 corrispondente a Y:  $V_{DD}-V_T \rightarrow 0$

Per A=0 B=1 M1 ON, M2 OFF, M3 ON, M4 OFF  $\Rightarrow Y=V_{DD}-V_T$

Per A=1 B=1 M1 OFF, M2 ON, M3 ON, M4 OFF  $\Rightarrow Y=0$  V

Nella transizione si spegne M1 e si accende M2 quindi l'uscita andrà bassa attraverso la serie di M3 e M2 cioè attraverso un transistore  $M_{eq}$  avente  $\beta_{eq} = \beta_n/2 = 40 \mu A/V^2$

Per  $V_{ds} > V_{gs} - V_T$   $M_{eq}$  è sat

$$V_Y > V_{DD} - V_T = 3.3 - 0.35 = 2.95$$

Allora da  $M_{eq}$  è sempre in LIN e il transistorio da studiare va da

$$V_{DD} - V_T = 3.3 - 0.35 = 2.95 \rightarrow (V_{DD} - V_T)/2 = 1.475$$

$$I_{ds} = -C(dY/dt)$$

$$t_{pHL} = \int_{v_{dd}-v_t}^{(v_{dd}-v_t)/2} \frac{-C_Y}{(\beta_n/2) \left( (v_{dd}-v_t)(v_u) - \frac{(v_u)^2}{2} \right)} dv_u$$

$$t_{pHL} = 93.1027 \text{ ps}$$