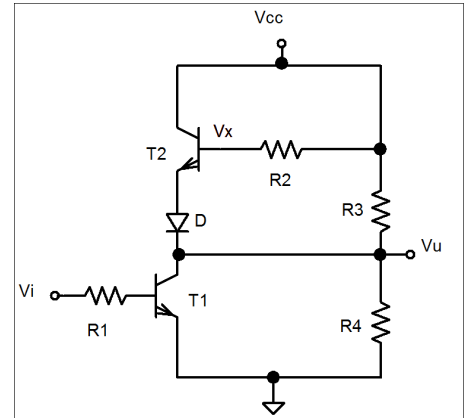


PROVA SCRITTA DI FONDAMENTI DI ELETTRONICA A  
15 GENNAIO 2010

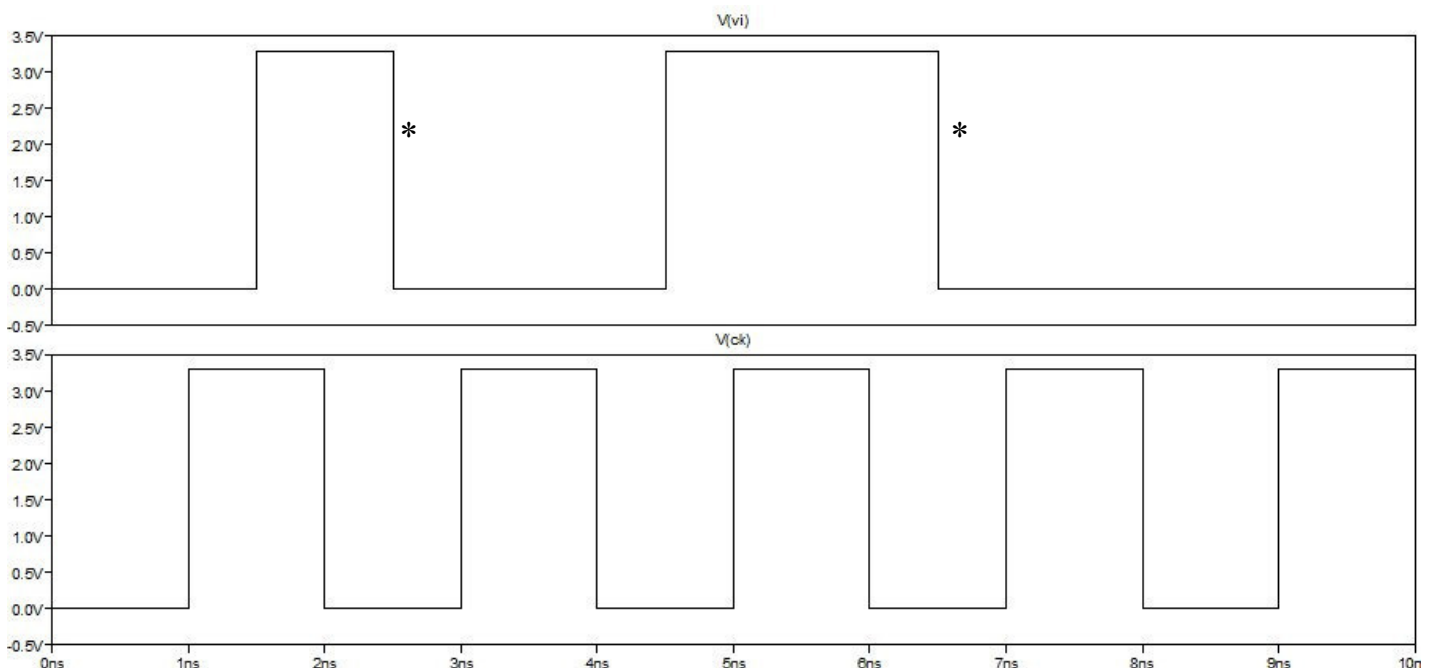
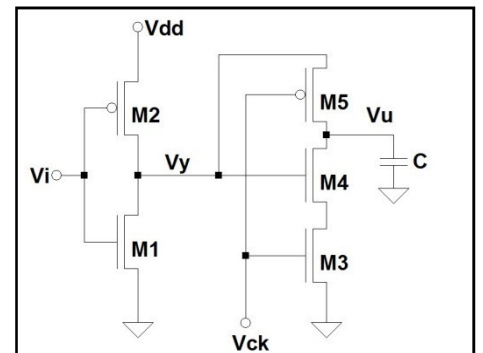
1) Nel circuito in figura, i transistori possono essere descritti da un modello “a soglia”, con  $V_{\gamma}=0.75\text{ V}$  e  $V_{CE,sat}=0.2\text{ V}$ . Si determini la caratteristica statica di trasferimento  $V_u(V_i)$ , per  $0 < V_i < V_{CC}$ .



$V_{CC} = 5\text{ V}$ ,  $\beta_F=100$ ,  $R_1 = 1.5\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 1.5\text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 100\text{ }\Omega$ ,  $R_4 = 5.5\text{ k}\Omega$ .

2) 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 ( $V_i$ ,  $V_{CK}$ ) hanno l'andamento mostrato in figura. Si determini il corrispondente andamento di  $V_u$ . Si determinino inoltre i tempi di propagazione del segnale  $V_u$  relativi alle transizioni di discesa del segnale  $V_i$  (\* evidenziate in figura).



$V_{dd} = 3.3\text{ V}$ ,  $V_T= 0.4\text{ V}$ ,  $\beta_n=1\text{ mA/V}^2$ ,  $\beta_p=800\text{ }\mu\text{A/V}^2$ ,  $C=50\text{ fF}$ .

Esame di ELETTRONICA AB (mod. B): svolgere l'esercizio 1 (tempo disponibile 1h 30m).

Esame di ELETTRONICA DEI SISTEMI DIGITALI A: l'esercizio 2 (tempo disponibile 1h 30m).

Esame di FONDAMENTI DI ELETTRONICA A: svolgere gli esercizi 1 e 2 (tempo disponibile 2h 30 m).

- 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 15-01-2010 - Esercizio #1

Osservazioni preliminari:

- 1) T2 e D sono o contemporaneamente OFF o contemporaneamente ON;
- 2) T2 quando ON è in AD (collettore connesso a Vcc).

**Regione 1:**  $v_i < v_{\gamma}$ : T1 OFF ; T2 e D OFF (sse  $v_x - v_u < 2 v_{\gamma}$ , da verificare)

Con T2 off (per Hp, e da verificare) $i_{b2} = (v_{cc} - v_x)/r_2 = 0$ , ovvero $v_x = v_{cc}$ Inoltre $v_u = v_{cc} * r_4 / (r_3 + r_4) = 4.91 \text{ V}$	Affinché T2 e D siano off deve essere $v_x - v_u < 2 v_{\gamma}$ , ma $v_u - v_x = 0.09 \text{ V} < 1.5 \text{ V}$ . Quindi l'hp fatta è verificata.
Si rimane in questa regione fintantoché T1 rimane off, sse $v_i < v_{\gamma}$ , sse $v_i < 0.75 \text{ V}$	
Regione 1: per $0 < v_i < v_{\gamma}$	

**Regione 2:** T1 ON in AD, T2 e D OFF.

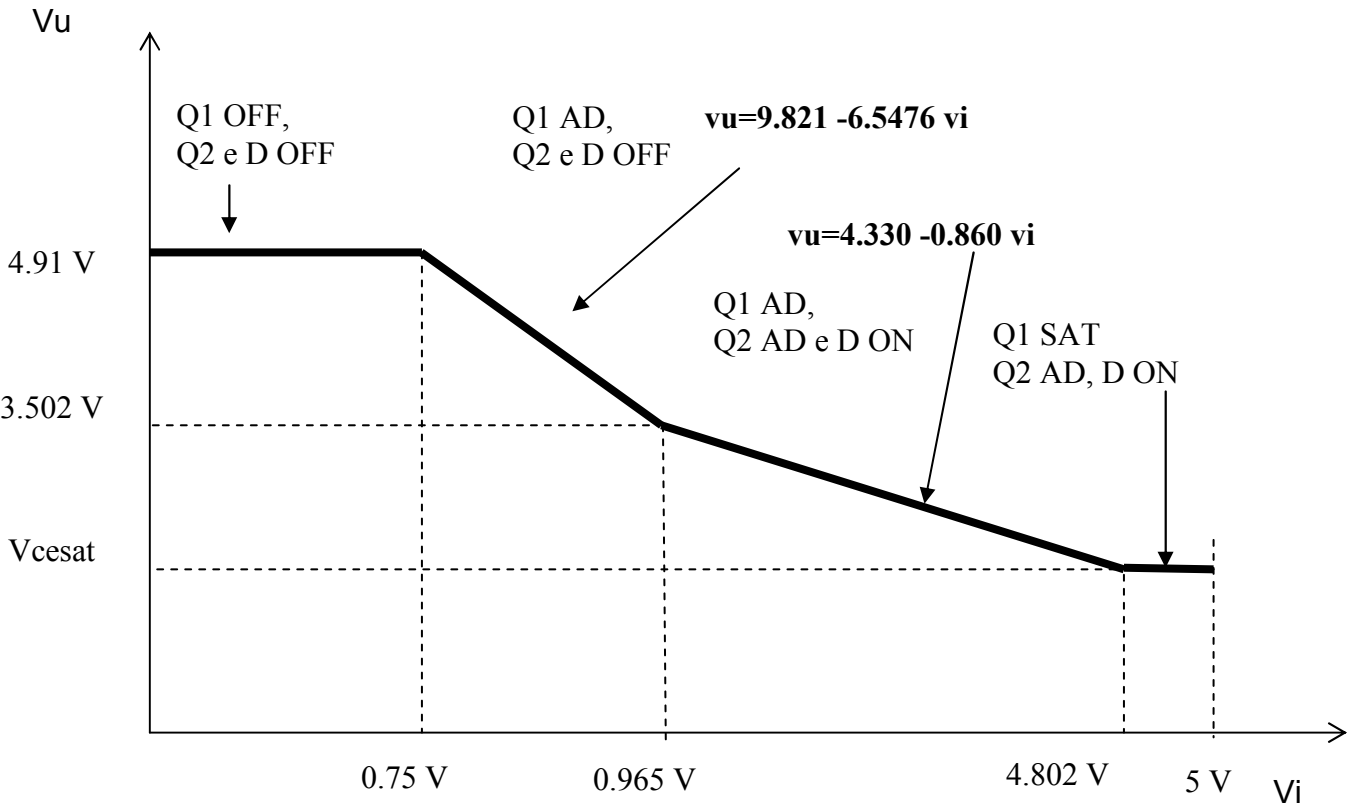
$i_{r3} = (v_{cc} - v_u)/r_3$ $i_{b1} = (v_i - v_{\gamma})/r_1$ $i_{r4} = v_u/r_4$ Ma $i_{r3} = \beta f * i_{b1} + i_{r4}$	Risolvendo si trova che: $v_u = 9.821 - 6.548 v_i$ Si rimane in questa regione fintantoché T1 va sat o T2 e D vanno ON.
1) T1 va sat quando $v_{ce} = v_u = v_{cesat}$ , sse $v_u = (9.821 - 6.5476 v_i) = v_{cesat}$ sse $v_i = 1.469 \text{ V}$	2) T2 e D rimangono off fintantoché $v_x - v_u < 2 v_{\gamma}$ , ma $v_x = v_{cc}$ , quindi sse $v_{cc} - (9.821 - 6.5476 v_i) < 2 v_{\gamma}$ , sse $v_i < 0.965 \text{ V}$ . Per valori di $v_i > 0.965 \text{ V}$ T2 e D vanno ON
Delle due condizioni quella che si verifica prima è allora l'accensione di T2 e D.	
Regione 2: per $v_{\gamma} < v_i < 0.965 \text{ V}$	

**Regione 3:** T1 AD, e T2 AD e D ON.

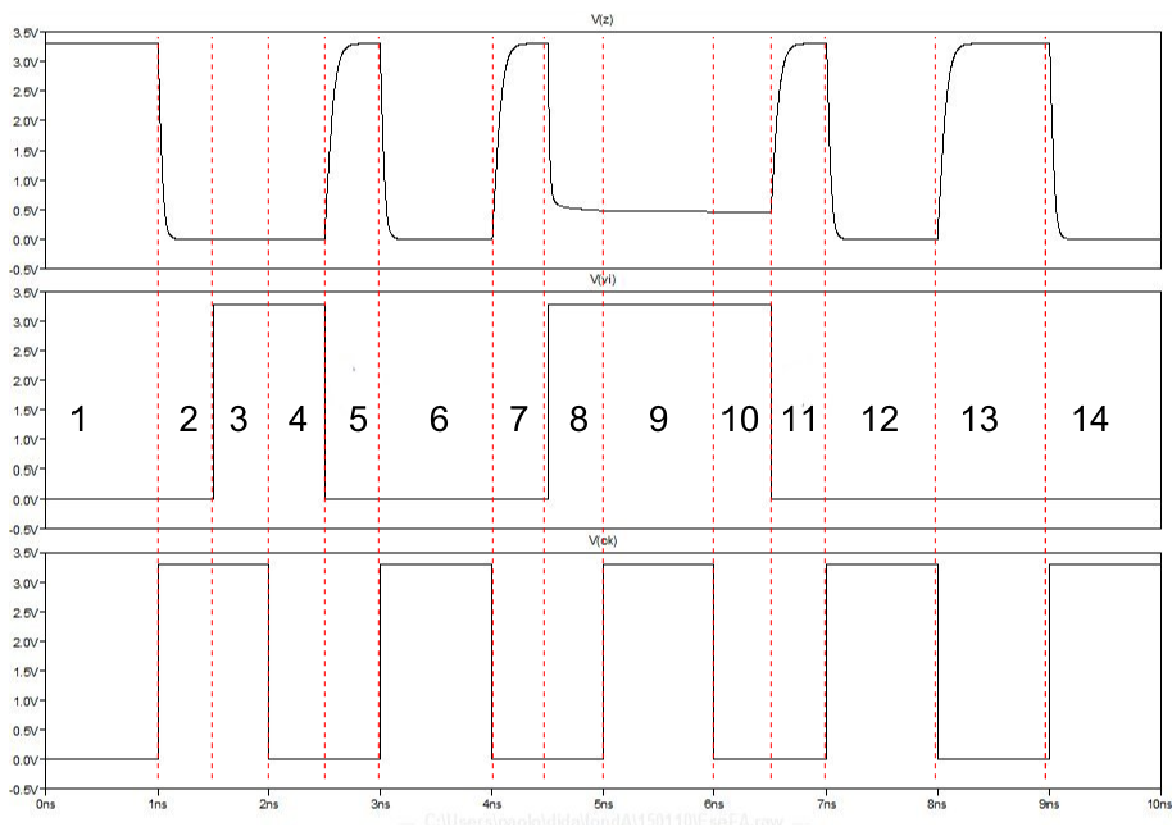
$i_{r3} = (v_{cc} - v_u)/r_3$ $i_{b1} = (v_i - v_{\gamma})/r_1$ $i_{r4} = v_u/r_4$ $i_{b2} = (v_{cc} - (v_u + 2 v_{\gamma}))/r_2$	Ma $i_{r3} + (\beta f + 1)i_{b2} = \beta f * i_{b1} + i_{r4}$ Risolvendo si ricava che: $v_u = 4.330 - 0.860 v_i$ Si rimane in questa regione fintantoché T1 va sat.
T1 va sat quando $v_{ce} = v_u = v_{cesat}$ , sse $v_u = (4.330 - 0.860 v_i) = v_{cesat}$ sse $v_i = 4.802 \text{ V}$	
Regione 3: per $0.965 \text{ V} < v_i < 4.802 \text{ V}$	

**Regione 4:** T1 sat, e T2 AD e D ON, per  $4.802 \text{ V} < v_i < V_{cc}$ ,  $v_u = v_{cesat}$  e  $v_x = v_{cesat} + 2 v_{\gamma} = 1.7 \text{ V}$

Di seguito si riporta la caratteristica statica di trasferimento.



## Esercizio 2



Con riferimento alla figura, è possibile identificare le diverse regioni di funzionamento seguenti:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$V_i$	$V_L$	$V_L$	$V_H$	$V_H$	$V_L$	$V_L$	$V_L$	$V_H$	$V_H$	$V_H$	$V_L$	$V_L$	$V_L$	$V_L$
$V_{CK}$	$V_L$	$V_H$	$V_H$	$V_L$	$V_L$	$V_H$	$V_L$	$V_L$	$V_H$	$V_L$	$V_L$	$V_H$	$V_L$	$V_H$
$M_1$	off	off	on	on	off	off	off	on	on	on	off	off	off	off
$M_2$	on	on	off	off	on	on	on	off	off	off	on	on	on	on
$M_3$	off	on	on	off	off	on	off	off	on	off	off	on	off	On
$M_4$	on	on	off	off	on	on	on	off	off	off	on	on	on	on
$M_5$	on	off	off	on	on	off	on	on	off	on	on	off	on	off
$V_y$	$V_H$	$V_H$	$V_L$	$V_L$	$V_H$	$V_H$	$V_H$	$V_L$	$V_L$	$V_L$	$V_H$	$V_H$	$V_H$	$V_H$
$V_u$	$V_H$	$V_L$	$V_L$	$V_L$	$V_H$	$V_L$	$V_H$	$V_L^*$	$V_L^*$	$V_L^*$	$V_H$	$V_L$	$V_H$	$V_L$

(AI)

(AI)

- 1)  $V_u$  è alto, tramite il pull-up  $M_2$ - $M_5$  in serie.
- 2)  $V_y$  è alto (uscita invertitore  $M_1$ - $M_2$ ), per cui pull-down  $M_3$ - $M_4$  in serie attivo e  $V_u$  alto
- 3)  $V_y$  è basso (uscita invertitore  $M_1$ - $M_2$ ), per cui  $V_u$  in alta impedenza (ancora alto)
- 4)  $V_y$  è basso (uscita invertitore  $M_1$ - $M_2$ ), quindi  $V_u$  basso, tramite il pull-down  $M_5$ - $M_1$  in serie ( $M_5$  è un pMOS nella rete di pull-down, ma l'uscita è già bassa (0 V) e non c'è bisogno di scaricare il condensatore)
- 5)  $V_u$  è alto, tramite il pull-up  $M_2$ - $M_5$  in serie.
- 6) Come punto 2
- 7) Come punto 5
- 8) Come punto 4, ma in questo caso il condensatore è inizialmente carico: il transitorio si arresta quindi quando si azzerla la corrente, cioè per  $V_{DS1}=0$  ( $M_1$  lin) e  $V_{SG5}=V_T$  ( $M_5$  sat).  $V_u$  assume il valore "debole"  $V_L^* = V_T$
- 9)  $V_y$  è basso (uscita invertitore  $M_1$ - $M_2$ ), per cui, come nel punto 3,  $V_u$  in alta impedenza (in questo caso 0 debole)
- 10) Come punto 8
- 11) Come punto 5
- 12) Come punto 6
- 13) Come punto 1
- 14) Come punto 6

Il primo transitorio richiesto è relativo alla transizione 4→5: il condensatore, inizialmente scarico ( $V_u=0$ ), si carica attraverso la serie dei due pMOS  $M_2$ - $M_5$  in serie, equivalenti ad un pMOS con  $\beta_{eq} = \frac{\beta_p}{2}$ . Il calcolo del transitorio segue quindi il procedimento abituale. Inizialmente, per  $0 < V_u < V_T$ , il pMOS equivalente si trova in saturazione:

$$\left. \begin{array}{l} I_D = \frac{\beta_{eq}}{2} (V_{DD} - V_T)^2 \\ I_C = C \frac{dV_u}{dt} \\ I_D = I_C \end{array} \right\} \rightarrow C \frac{dV_u}{dt} = \frac{\beta_{eq}}{2} (V_{DD} - V_T)^2 \rightarrow \int_0^{t_{SAT}} dt = \int_0^{V_T} \frac{C}{\frac{\beta_{eq}}{2} (V_{DD} - V_T)^2} dV_u$$

$$\rightarrow t_{SAT} = 11.89 \text{ ps}$$

Successivamente, per  $V_T < V_u < \frac{V_{DD}}{2}$ , il pMOS equivalente si trova in regione lineare:

$$\left. \begin{array}{l} I_D = \beta_{eq} \left( (V_{DD} - V_T)(V_{DD} - V_u) - \frac{(V_{DD} - V_u)^2}{2} \right) \\ I_C = C \frac{dV_u}{dt} \\ I_D = I_C \end{array} \right\} \rightarrow \int_{t_{SAT}}^{t_p} dt = \int_{V_T}^{\frac{V_{DD}}{2}} \frac{C}{\beta_{eq} \left( (V_{DD} - V_T)(V_{DD} - V_u) - \frac{(V_{DD} - V_u)^2}{2} \right)} dV_u$$

Da cui, integrando (scomposizione in fratte semplici), si ricava:

$$t_p - t_{SAT} = 39.76 \text{ ps}$$

E quindi il tempo complessivo di propagazione:

$$t_p = 51.65 \text{ ps}$$

Il secondo transitorio è invece relativo alla transizione 10→11, ed è analogo a quello appena considerato. Il condensatore, tuttavia, non è inizialmente completamente scarico ( $V_u=V_T$ ) per i motivi sopra descritti. Il transitorio è quindi più breve, limitandosi alla sola parte lineare, e quindi, in questo caso:

$$t_p = 39.76 \text{ ps}$$