

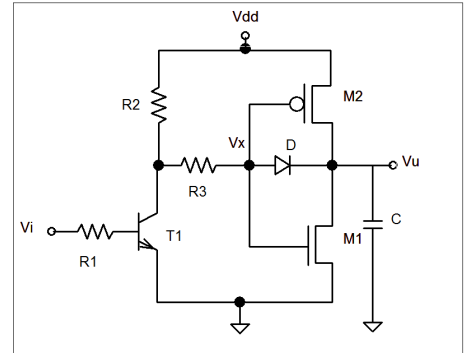
PROVA SCRITTA DI ELETTRONICA  
15 LUGLIO 2010

1) Nel circuito in figura, i transistori MOS sono caratterizzati dalle tensioni di soglia  $V_T = V_{Tn} = |V_{Tp}|$  e dai coefficienti  $\beta = \beta_n = \beta_p$ . Il transistor bipolare ed il diodo possono essere descritti da un modello "a soglia", con  $V_{\gamma} = 0.75 \text{ V}$  e  $V_{CE,sat} = 0.2 \text{ V}$ .

Il segnale d'ingresso abbia il seguente andamento:

$$t < 0: \quad V_i = 0$$

$$t > 0: \quad V_i = V_{dd}$$



Si osservi che lo stadio d'ingresso è un invertitore RTL.

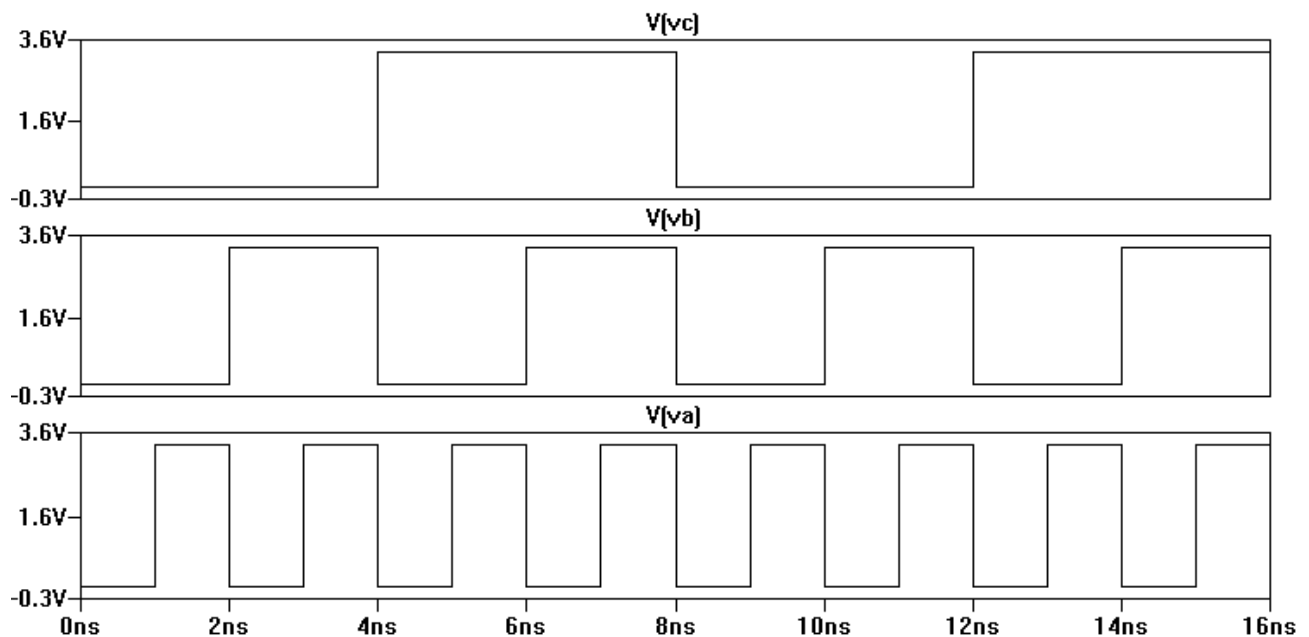
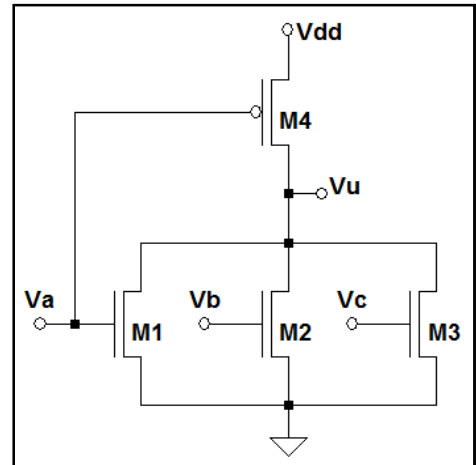
Si calcoli il ritardo di propagazione  $t_{p,LH}$  associato alla transizione del segnale d'uscita  $v_u$ .

$V_{dd} = 3.5 \text{ V}$ ,  $V_T = 0.5 \text{ V}$ ,  $\beta = 2 \text{ mA/V}^2$ ,  $\beta_F = 100$ ,  $R_1 = 500 \text{ } \Omega$ ,  $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 10 \text{ nF}$ .

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  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  abbiano l'andamento periodico mostrato in figura. Si determini l'andamento dei segnali, valutando in particolare i valori asintotici al termine di ciascuna commutazione, trascurando i tempi di propagazione. Si calcoli la potenza statica media dissipata dal circuito.

$V_{dd} = 3.3 \text{ V}$ ,  $V_T = 0.5 \text{ V}$ ,  $\beta_n = 1.2 \text{ mA/V}^2$ ,  $\beta_p = 0.7 \text{ mA/V}^2$ .



Esame di ELETTRONICA AB (mod. B): svolgere l'esercizio 1 (tempo disponibile 1h 15m).

Esame di ELETTRONICA DEI SISTEMI DIGITALI A: l'esercizio 2 (tempo disponibile 1h 15m).

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

- 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

## Soluzione esercizio 1

### Compito del 15-07-2010 – Soluzione Esercizio #1

#### OSS. PRELIMINARI:

In condizioni stazionarie il diodo D può essere ON solo se anche il transistor M1 è acceso.

1.  $t < 0$ ,  $v_i = 0$ , allora Q1 è off. Suppongo D on e M1 on (da verificare). Essendo D on, la tensione ai suoi capi vale  $v_\gamma$ , quindi la tensione  $v_x$  vale  $v_u + v_\gamma$ .
- M1:  $V_{GS} = v_x = v_\gamma + v_u$ ,  $V_{DS} = v_u$ , allora M1 lavora in lin, poiché  $v_\gamma + v_u > v_u + v_t$  è verificata.
  - M2:  $V_{SG} = v_{dd} - v_x = v_{dd} - (v_\gamma + v_u)$ . M2 è on sse  $v_{dd} - v_\gamma - v_u > v_t$ , sse  $v_u < v_{dd} - v_\gamma - v_t = 2.25V$ , lo ipotizzo quindi on (da verificare)
- Se ON M2 è sat sse  $v_{dd} - v_u - v_\gamma < v_{dd} - v_u + v_t$ , sse  $-v_\gamma < v_t$ , quindi se on M2 è sat.

Calcolo  $v_u$  nell'ipotesi di avere D on, M1 lin e M2 sat.

$id_{n1lin} = \beta((v_u + v_\gamma - v_t) * v_u - v_u^2 / 2)$	Da cui si ricava che $v_u = 1.047V$ .
$id_{p2sat} = \beta / 2 (v_{dd} - v_u - v_\gamma - v_t)^2$	Tale soluzione soddisfa l'hp di accensione di D e
$id = i_{r2} = i_{r3} = (v_{dd} - v_u - v_\gamma) / (r_2 + r_3)$	M1 ( $v_u + v_\gamma = 1.796V$ ) e di accensione di M2
Ma $id_{p2sat} + id = id_{n1lin}$	( $v_u = 1.046V < 2.25V$ ).

2. Per  $t \rightarrow \infty$ ,  $v_i = v_{dd}$ , quindi Q1 va on. Lo suppongo sat (da verificare). In queste condizioni, D e M1 sono off poiché  $v_x = v_{cesat}$ , mentre M2 è on ( $V_{SG} = v_{dd} - v_{cesat} = 3.3 > v_t = 0.5V$ ) e lin, con  $v_u = v_{dd}$ .

Verifico l'Hp di saturazione di Q1:	Q1 è sat se $ic_1 < \beta f * ib_1$ , $0.66 < 550$
$i_{r2} = (v_{dd} - v_{cesat}) / r_2 = ic_1 = 0.66mA$	che è verificata.
$ib_1 = (v_{dd} - v_\gamma) / r_1 = 5.5mA$	

3. Per  $t = 0+$   $v_i = v_{dd}$ , Q1 va sat,  $v_x = v_{cesat}$ , allora M1 e D vanno off e M2 è on.  $v_u(0+) = v_u(0-) = 1.047V$ . Il  $t_{plh}$  è il tempo che il segnale d'uscita impiega per compiere il 50% della transizione totale del segnale:  $V_u(0+) = 1.047V$ ,  $V_u(\infty) = v_{dd}$ , quindi  $v_{uiniz} = 1.047V$  e  $v_{ufinal} = (1.047 + 3.5) / 2 = 2.2735V$ .

Analizzo le regioni di funzionamento di M1 durante il transitorio analizzato:

- 1) M2 sat per  $(v_{dd} - v_{cesat}) < (v_{dd} - v_u) + v_t$ , sse  $v_u < v_{cesat} + v_t = 0.7V$ , lin altrove.

Il calcolo del tempo si salita avviene con M2 che lavora sempre in zona lineare.

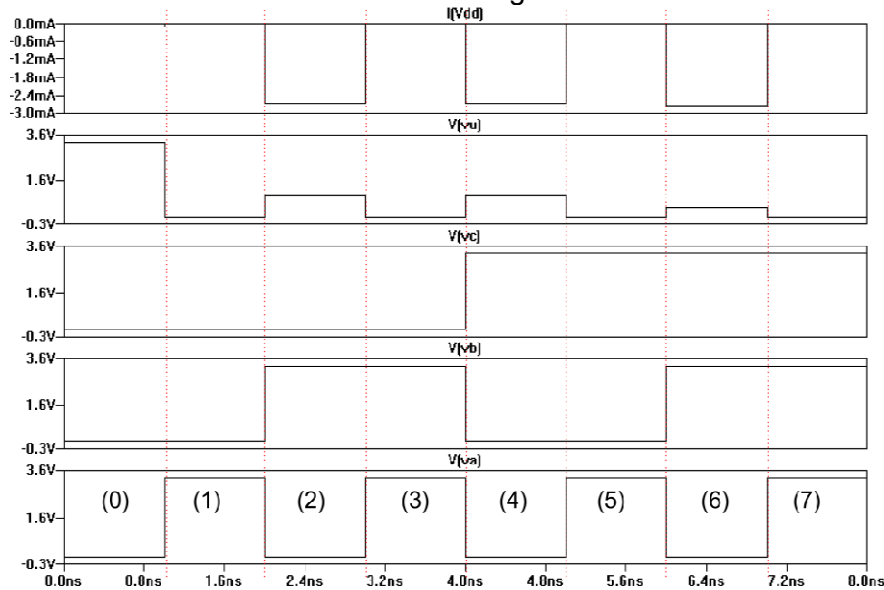
$id_{p2lin} = \beta((v_{dd} - v_{cesat} - v_t) * (v_{dd} - v_u) - 0.5 * (v_{dd} - v_u)^2)$	$t_{plh} = \int_{1.047}^{2.2735} \frac{C}{id_{p2lin}} dv_u = 1.825 \mu s$
--	---

## Soluzione esercizio 2

Il circuito è composto da un solo transistor di pull-up (M4, complementare a M1) e da 3 transistori di pull-down (M1,M2,M3). Il comportamento è riassunto dalla tabella seguente:

$V_c$	$V_b$	$V_a$	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	pull-up	pull-down	
$V_L$	$V_L$	$V_L$	off	off	off	on	on	off	(0)
$V_L$	$V_L$	$V_H$	on	off	off	off	off	on	(1)
$V_L$	$V_H$	$V_L$	off	on	off	on	on	on	(2)
$V_L$	$V_H$	$V_H$	on	on	off	off	off	on	(3)
$V_H$	$V_L$	$V_L$	off	off	on	on	on	on	(4)
$V_H$	$V_L$	$V_H$	on	off	on	off	off	on	(5)
$V_H$	$V_H$	$V_L$	off	on	on	on	on	on	(6)
$V_H$	$V_H$	$V_H$	on	on	on	off	off	on	(7)

da cui è possibile desumere l'andamento mostrato in figura:



In particolare, negli intervalli (2) e (4) sono simultaneamente attivi il pull-up e il pull-down (costituito da un transistor nMOS acceso); ipotizzando sia il transistor di pull-up che il transistor di pull-down in regime lineare, si ottiene:

$$\left. \begin{aligned} I_n &= \beta_n \left[ (V_{dd} - V_T) V_u - \frac{V_u^2}{2} \right] \\ I_p &= \beta_p \left[ (V_{dd} - V_T)(V_{dd} - V_u) - \frac{(V_{dd} - V_u)^2}{2} \right] \\ I_n &= I_p \end{aligned} \right\} \rightarrow V_u = 0.958 V, I_n = I_p = I^* = 2.67 \text{ mA}$$

che verifica le ipotesi di funzionamento.

Nel caso (6), invece, sono ancora simultaneamente attivi il pull-up e il pull-down, ma quest'ultimo consiste ora di due nMOS in parallelo ( $\beta_{eq} = 2 \beta_n$ ); ipotizzando il transistor di pull-up in regime di saturazione e il transistor di pull-down in regime lineare, si ottiene:

$$\left. \begin{aligned} I_n &= \beta_{eq} \left[ (V_{dd} - V_T) V_u - \frac{V_u^2}{2} \right] \\ I_p &= \frac{\beta_p}{2} (V_{dd} - V_T)^2 \\ I_n &= I_p \end{aligned} \right\} \rightarrow V_u = 0.443 V, I_n = I_p = I^{**} = 2.74 \text{ mA}$$

che verifica le ipotesi di funzionamento.

I segnali sono periodici, con  $T=8 \text{ ns}$ . La potenza media vale quindi:

$$\tilde{P} = \frac{1}{T} \int_0^T I_d V_{dd} dt = \frac{V_{dd}}{T} \left\{ \int_{2ns}^{3ns} I^* dt + \int_{4ns}^{5ns} I^* dt + \int_{6ns}^{7ns} I^{**} dt \right\} = 3.39 \text{ mW}$$