Computer Science & Engineering Department

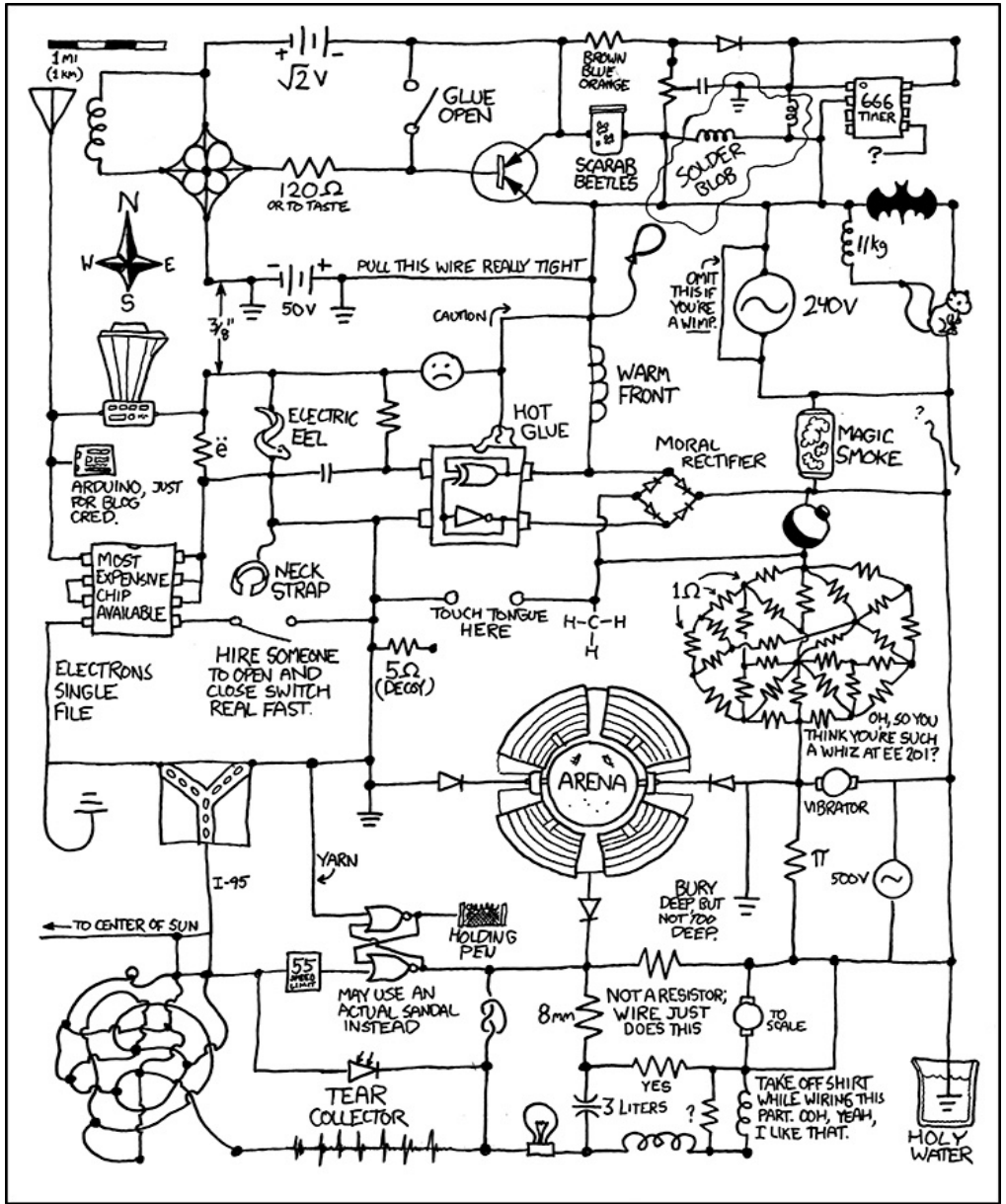
Calculatoare Numerice

– Cursul 1 –

De la porți logice la procesoare

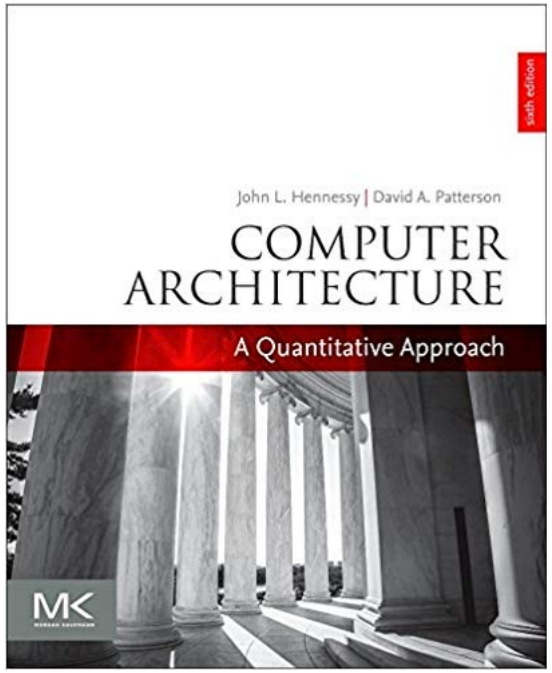
Facultatea de Automatică și Calculatoare
Universitatea Politehnica București

Comic of the day

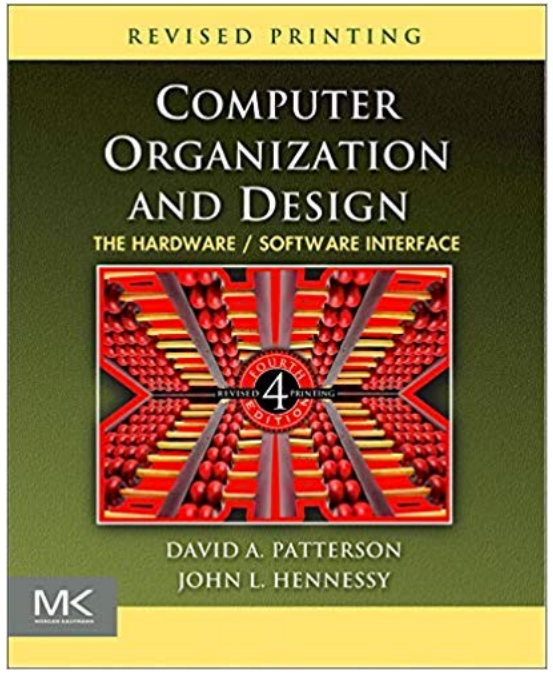


http://xkcd.com/730/

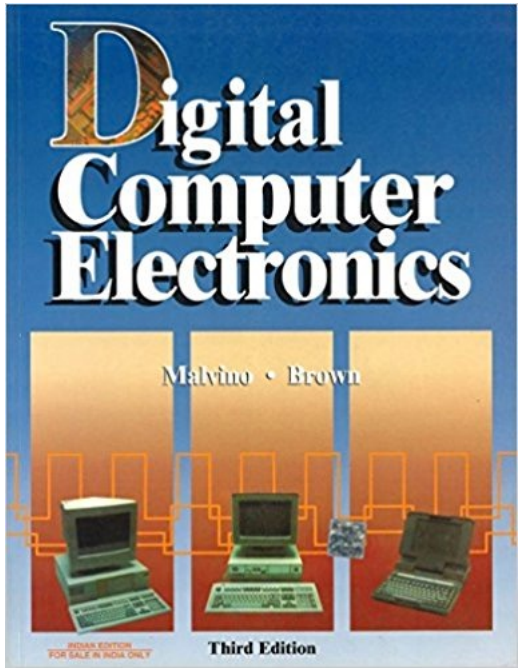
The Books



Computer Architecture: A Quantitative Approach



Computer Organization and Design: The Hardware / Software Interface

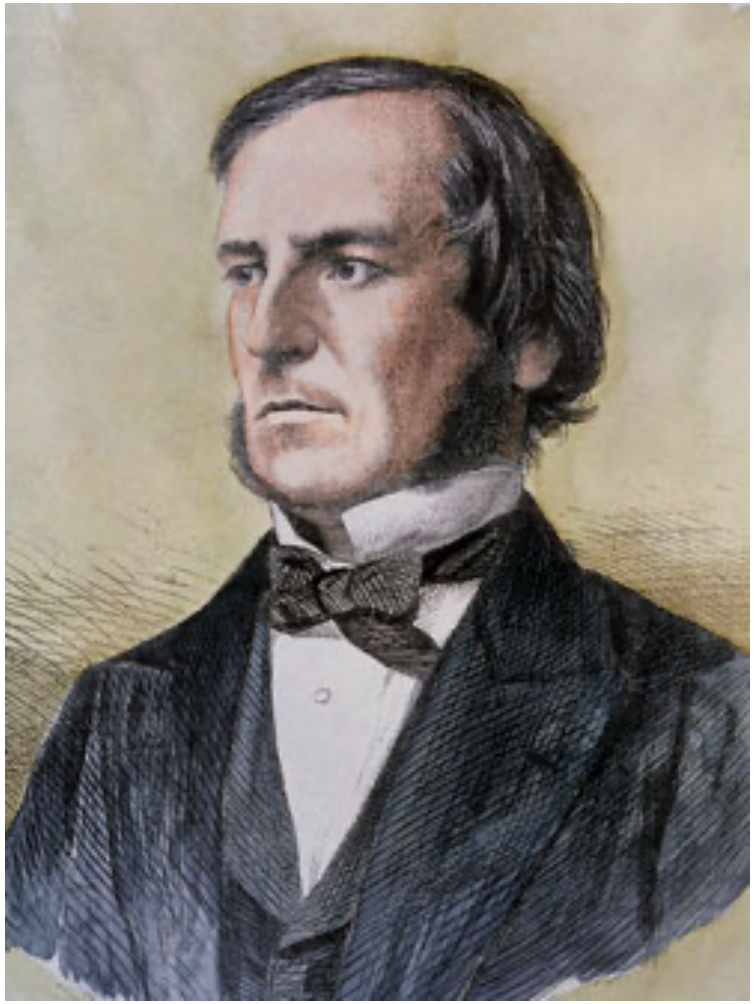


Digital Computer Electronics

Cum construiesc un calculator?

George Boole, 1815-1864

- Matematician, filozof și logician englez
- “The Laws of Thought”(1854) – algebra booleană
- Părintele erei informației



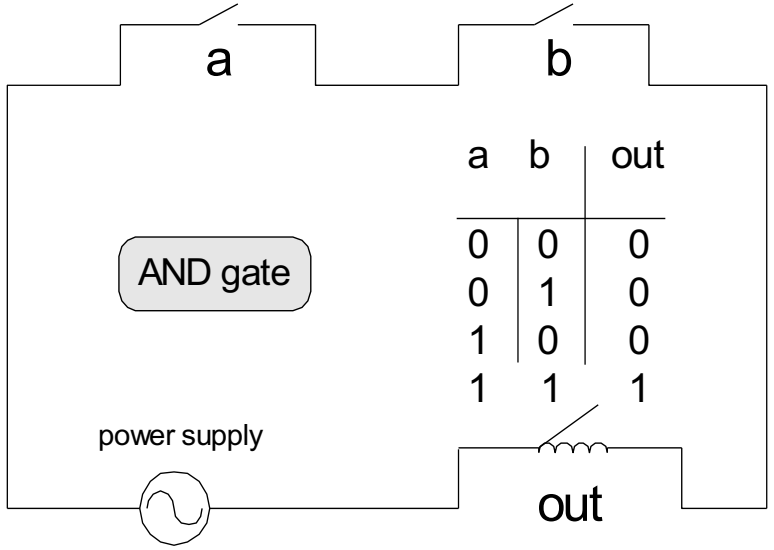
Manipularea expresiilor logice

Numele legii	Forma SAU	Forma ȘI
Identitate	$x \vee 0 = x$	$x \wedge 1 = x$
Unu/Zero	$x \vee 1 = 1$	$x \wedge 0 = 0$
Idempotență	$x \vee x = x$	$x \wedge x = x$
Negare	$x \vee x' = 1$	$x \wedge x' = 0$
Comutativitate	$x \vee y = y \vee x$	$x \wedge y = y \wedge x$
Asociativitate	$(x \vee y) \vee z = x \vee (y \vee z)$	$(x \wedge y) \wedge z = x \wedge (y \wedge z)$
Distributivitate	$x \vee (y \wedge z) = (x \vee y) \wedge (x \vee z)$	$x \wedge (y \vee z) = (x \wedge y) \vee (x \wedge z)$
DeMorgan	$(x \vee y)' = x' \wedge y'$	$(x \wedge y)' = x' \vee y'$

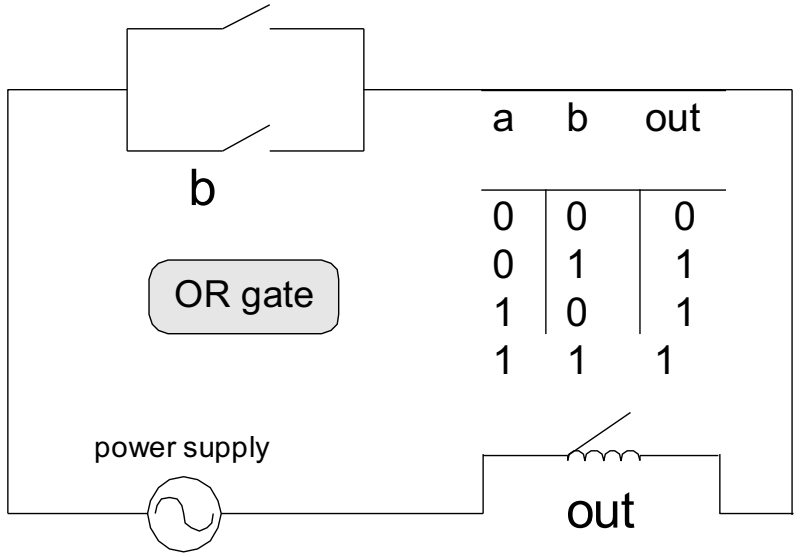
Claude Shannon, 1916-2001

- Matematician și inginer american
- ”A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits” (1938) – teză de master la MIT, aplică logica booleană circuitelor de calcul
- "A Mathematical Theory of Communication” (1948) – pune bazele teoriei informației

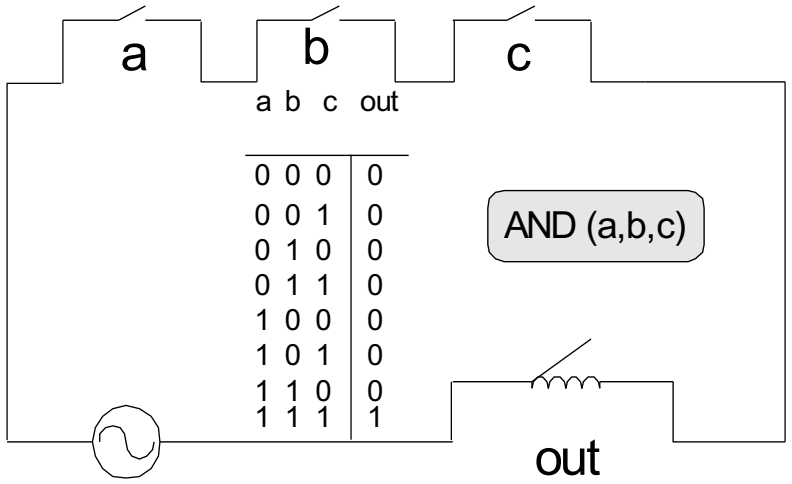
Porți logice cu relee (Shannon)



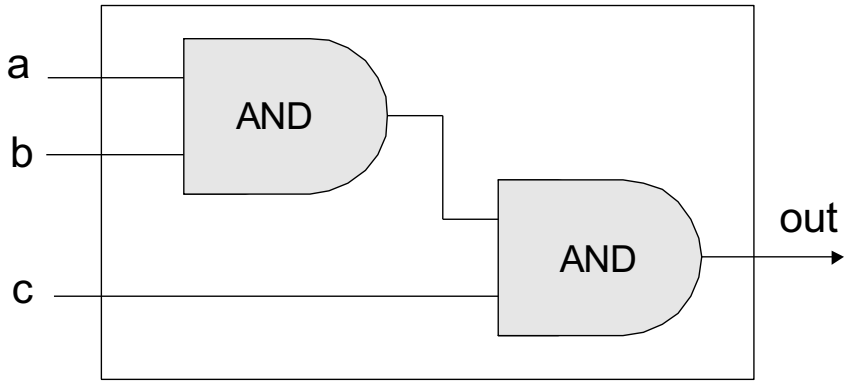
a	b	out
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



a	b	out
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

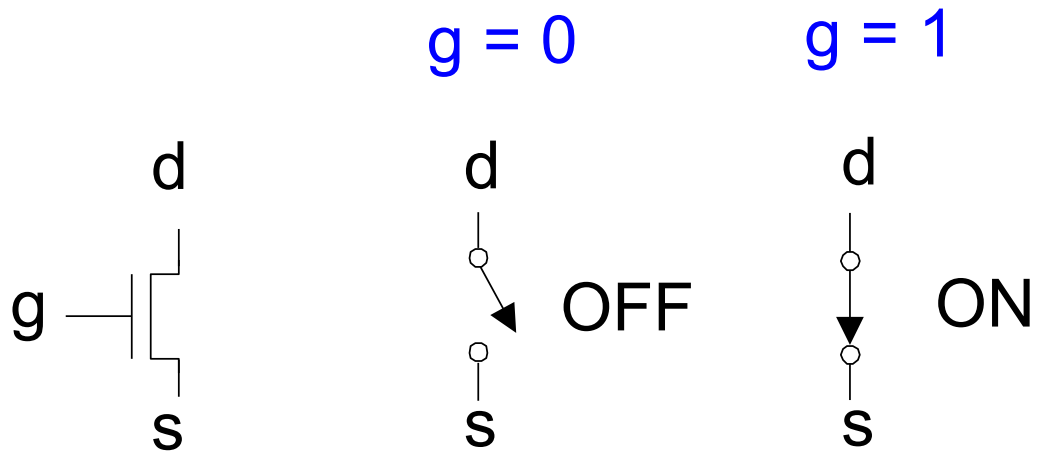


a	b	c	out
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1



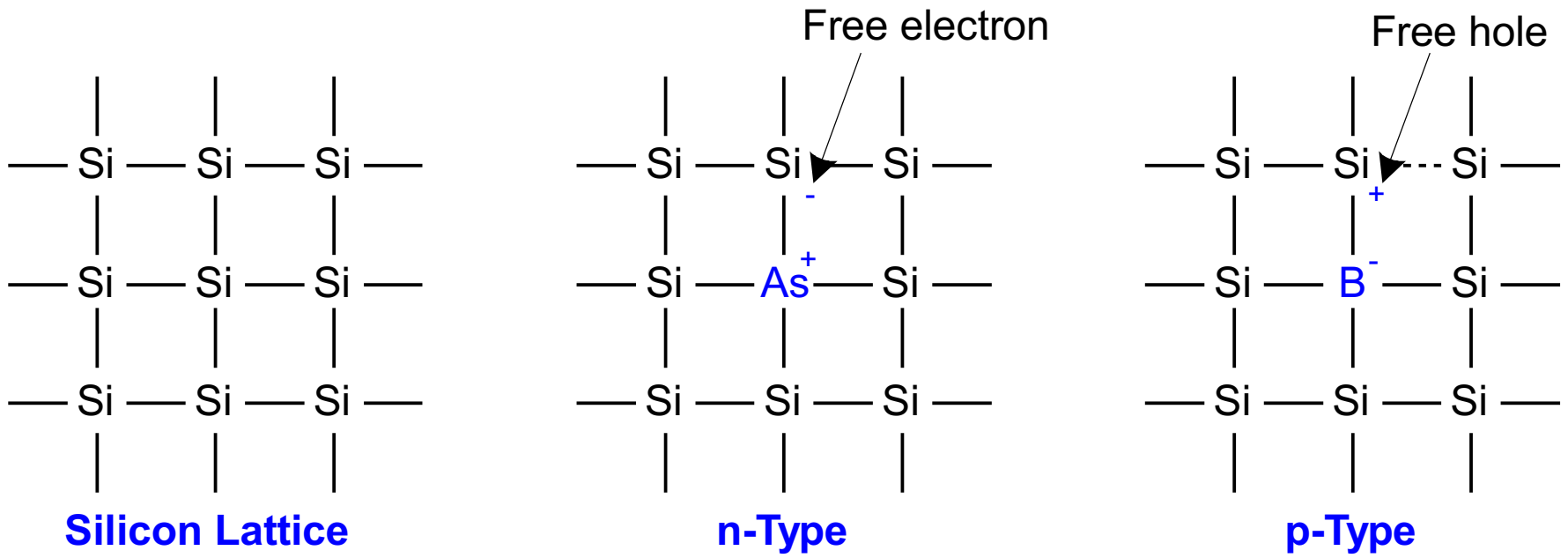
Tranzistoare

- Toate porțile logice moderne sunt construite cu tranzistoare
- Comutator controlat în tensiune cu trei porturi
  - 2 sunt conectate împreună în funcție de tensiunea aplicată pe al treilea port
  - d și s sunt conectate (ON) dacă g este 1 logic



Siliciul

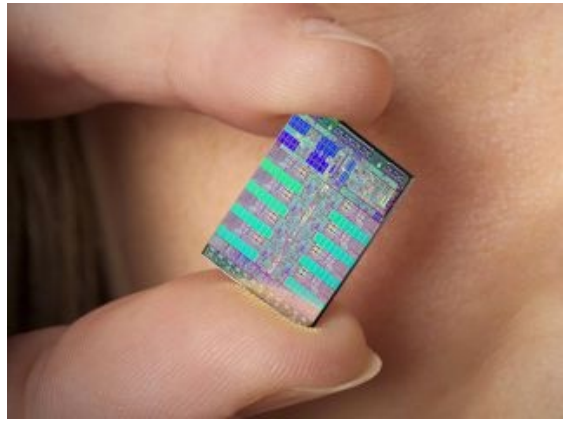
- Tranzistoare construite din siliciu, un semiconductor
- Siliciul pur nu este un conductor foarte bun (nu are sarcini libere)
- Siliciul dopat este un bun conductor (sarcini libere)
  - Tip-n (sarcini *n*egative libere, electroni)
  - Tip-p (sarcini *p*ozitive libere, goluri)

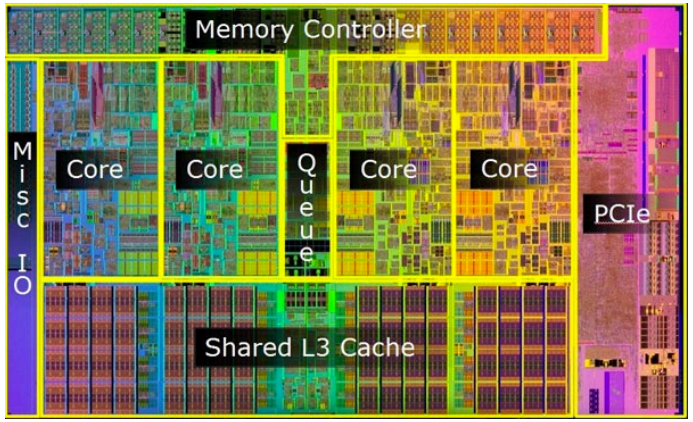


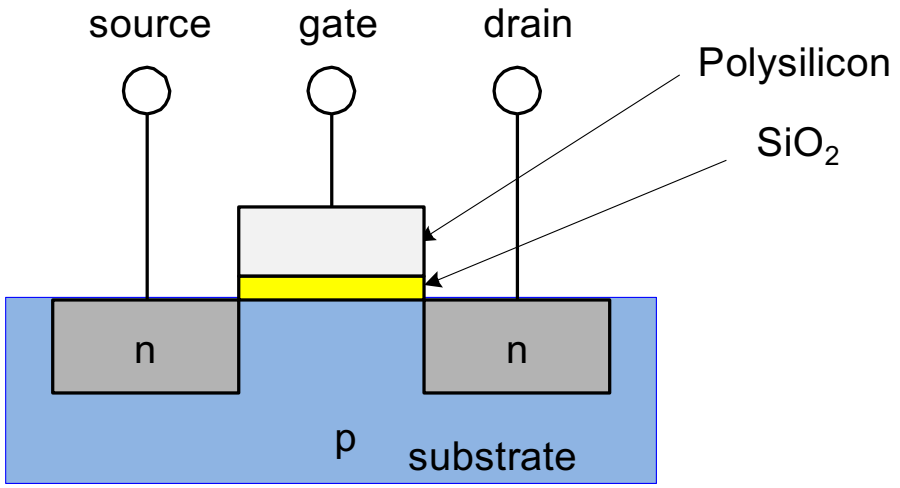
Tranzistoare MOS

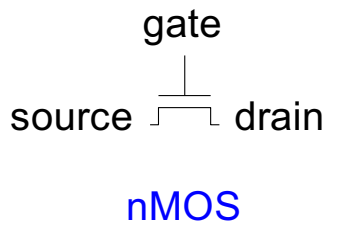
- **Metal oxide silicon (MOS):**
  - Poartă din polisiliciu (sau **Metal**)
  - Izolator din **Oxid** (dioxid de siliciu)
  - **Siliciu** dopat

Matrița unui procesor poate conține miliarde de astfel de tranzistoare.







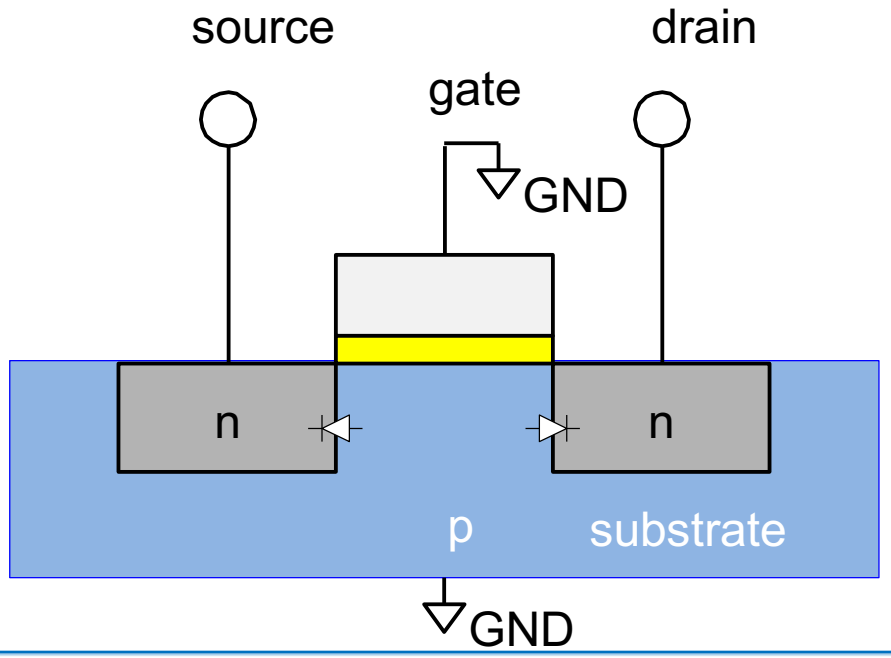


nMOS

Tranzistoare: nMOS

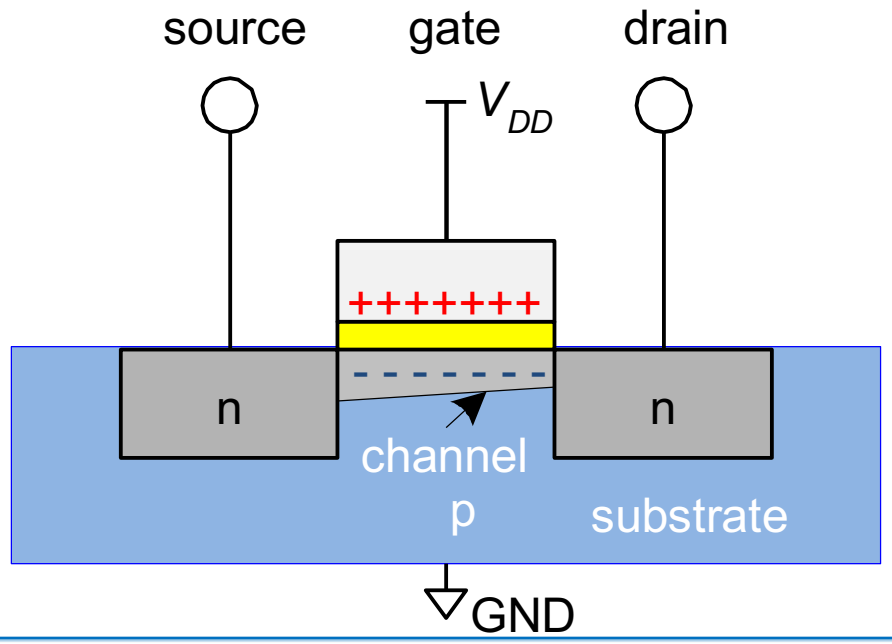
Gate = 0

OFF (nu avem conexiune între sursă și drenă)



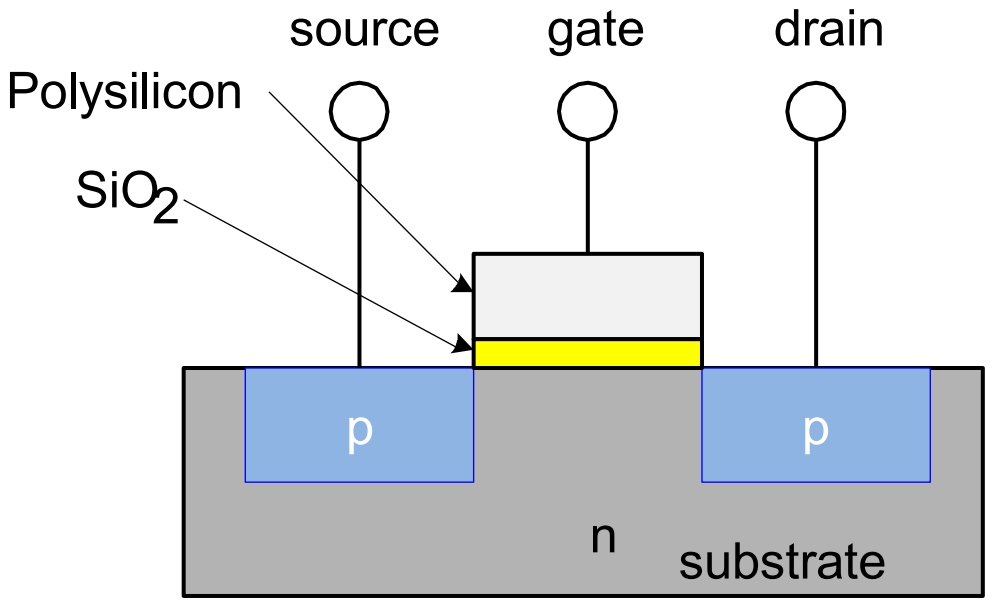
Gate = 1

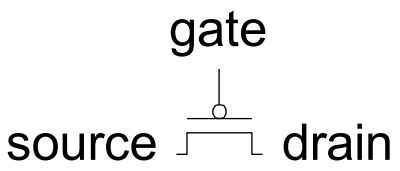
ON (canal de conducție între sursă și drenă)



Tranzistoare: pMOS

- pMOS este opusul nMOS
  - ON când Poarta = 0
  - OFF când Poarta = 1

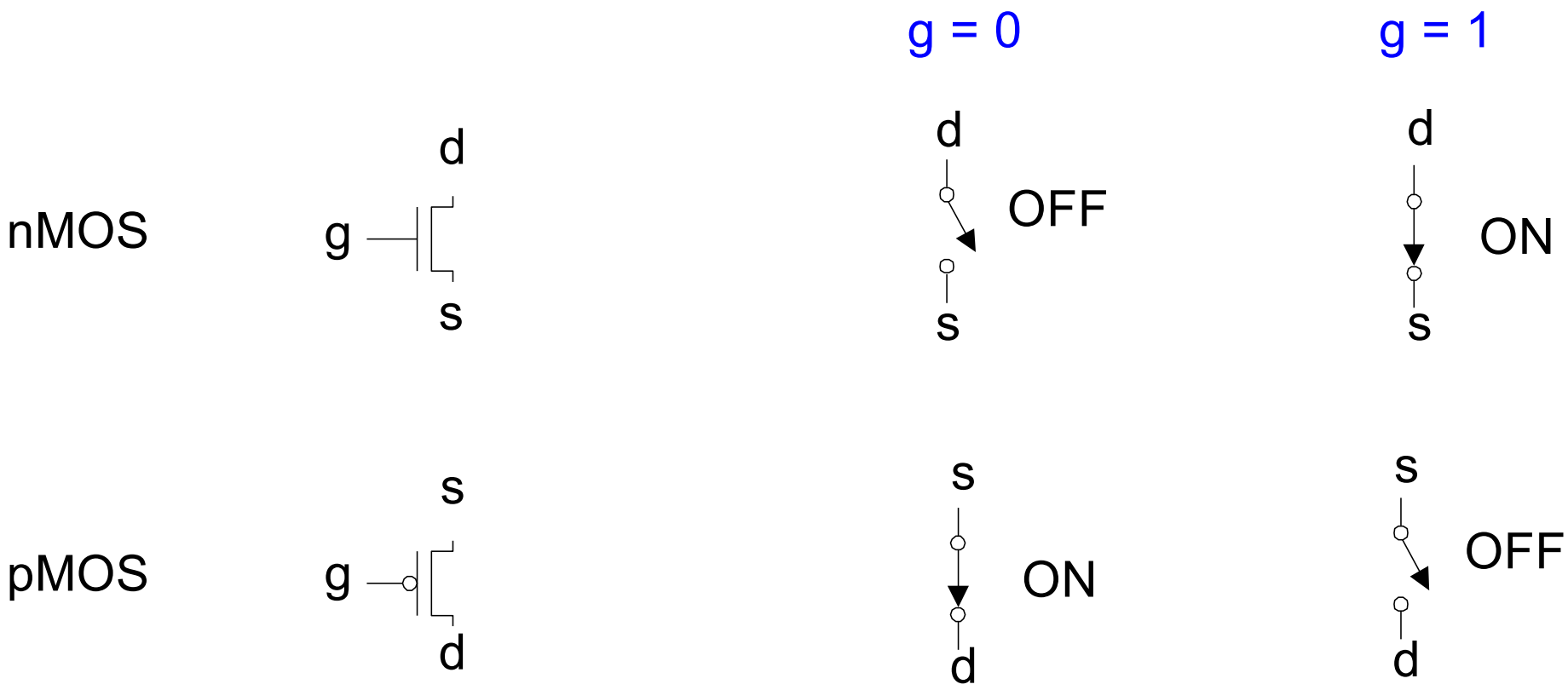




Robert Noyce, 1927-1990

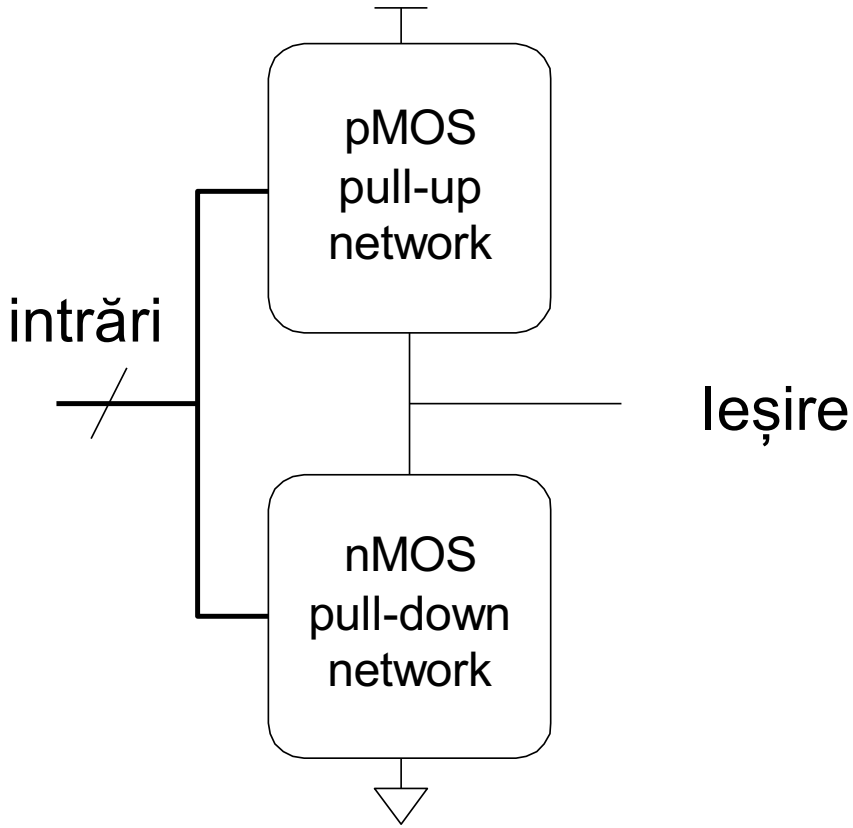
- Poreclit “Primarul din Silicon Valley”
- Co-fondator Fairchild Semiconductor în 1957
- Co-fondator Intel în 1968
- Co-inventatorul circuitului integrat

Funcționarea tranzistoarelor



Funcționarea tranzistoarelor

- **nMOS:** lasă să treacă 0-uri, deci conectăm sursa la GND
- **pMOS:** lasă să treacă 1-uri, deci conectăm sursa la V_{DD}

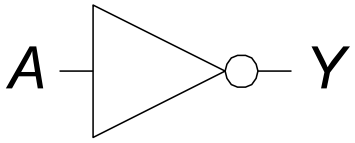


Porți logice

- **Implementează funcții logice:**
  - inversiune (NOT), AND, OR, NAND, NOR, etc.
- **O intrare:**
  - Poarta NOT, buffer
- **Două intrări:**
  - AND, OR, XOR, NAND, NOR, XNOR
- **Intrări multiple**

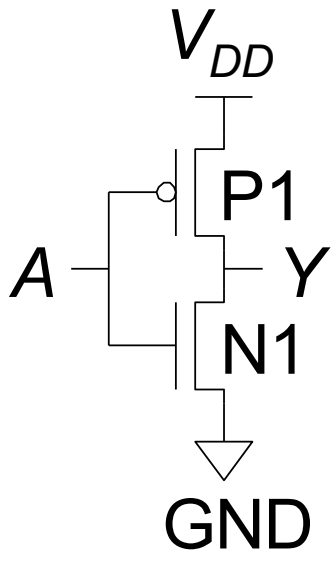
Porți CMOS: Poarta NOT

NOT

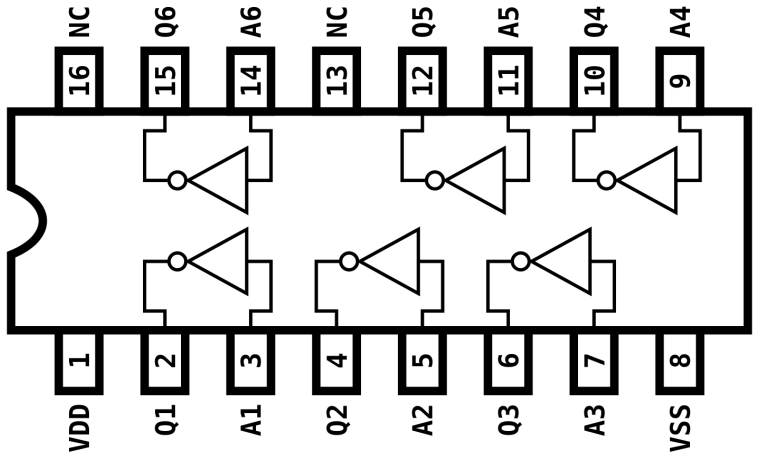


$Y = \overline{A}$

A	Y
0	1
1	0



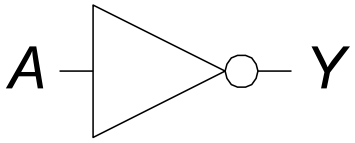
A	P1	N1	Y
0			
1			



CD4049, circuit integrat cu 6 porți logice NOT

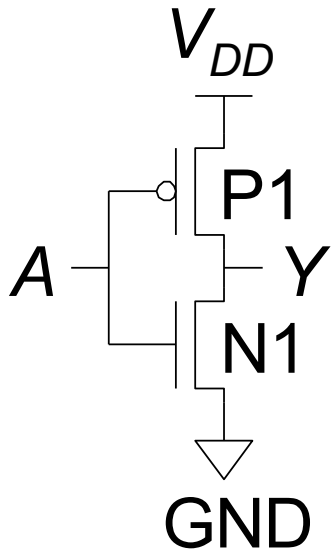
Porți CMOS: Poarta NOT

NOT

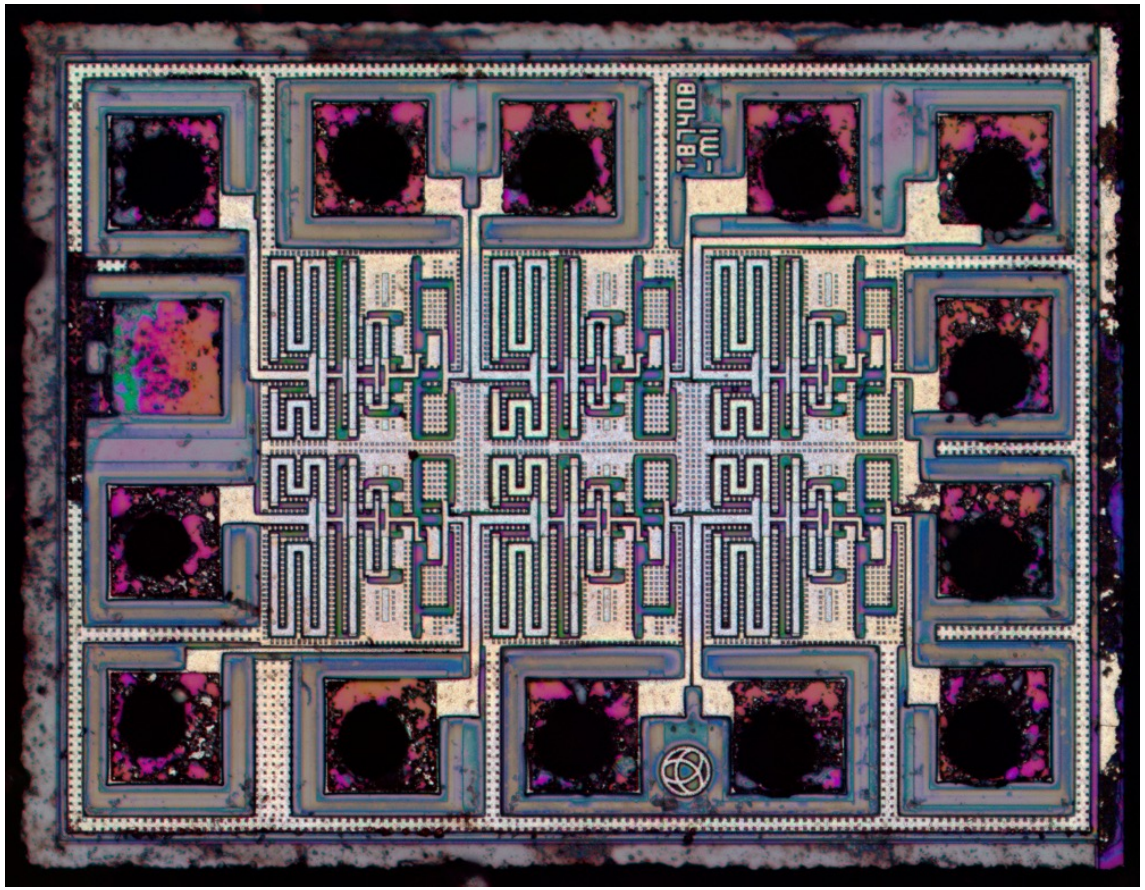


$Y = \overline{A}$

A	Y
0	1
1	0

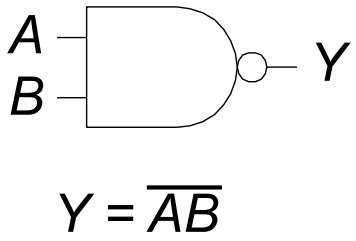


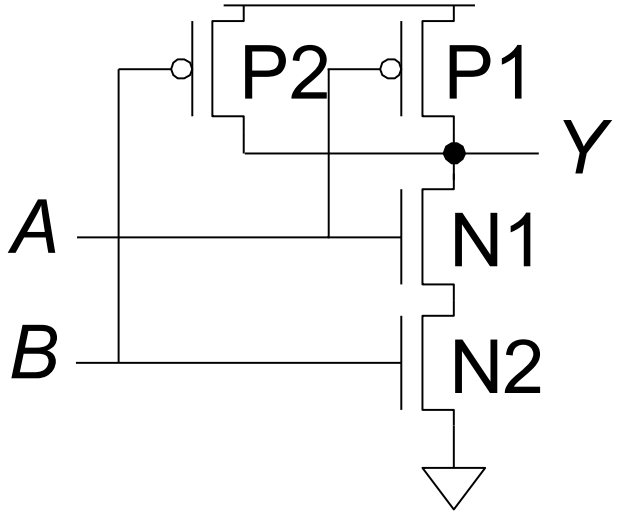
A	P1	N1	Y
0	ON	OFF	1
1	OFF	ON	0

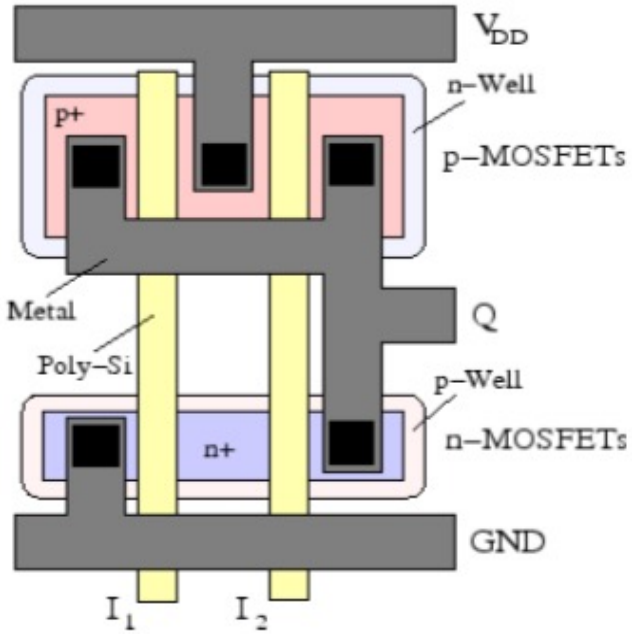


Matrița de siliciu a CD4049. Dimensiune 722x552µm
https://zeptobars.com/en/read/CD4049-cmos-inverter-metal-gate

Porți CMOS: Poarta NAND



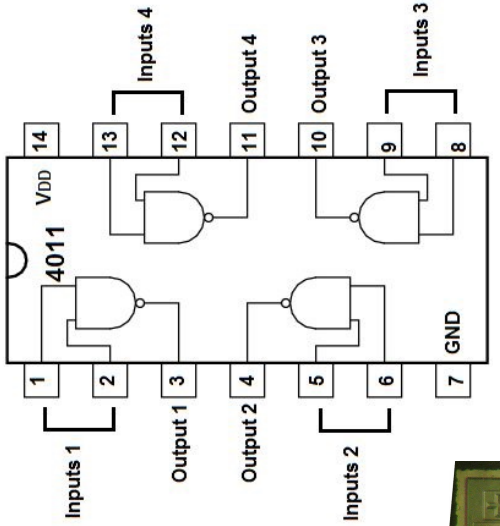




A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

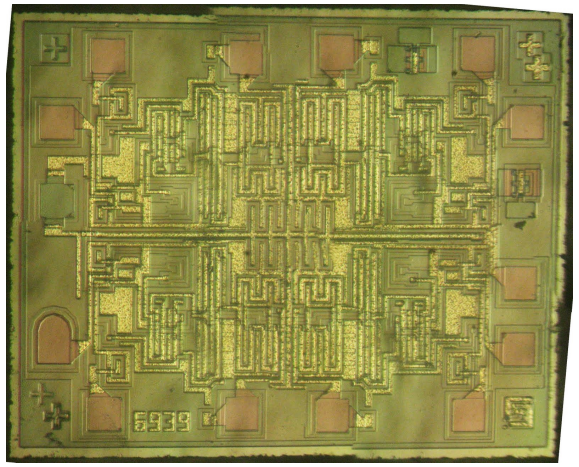
A	B	P1	P2	N1	N2	Y
0	0	ON	ON	OFF	OFF	1
0	1	ON	OFF	OFF	ON	1
1	0	OFF	ON	ON	OFF	1
1	1	OFF	OFF	ON	ON	0

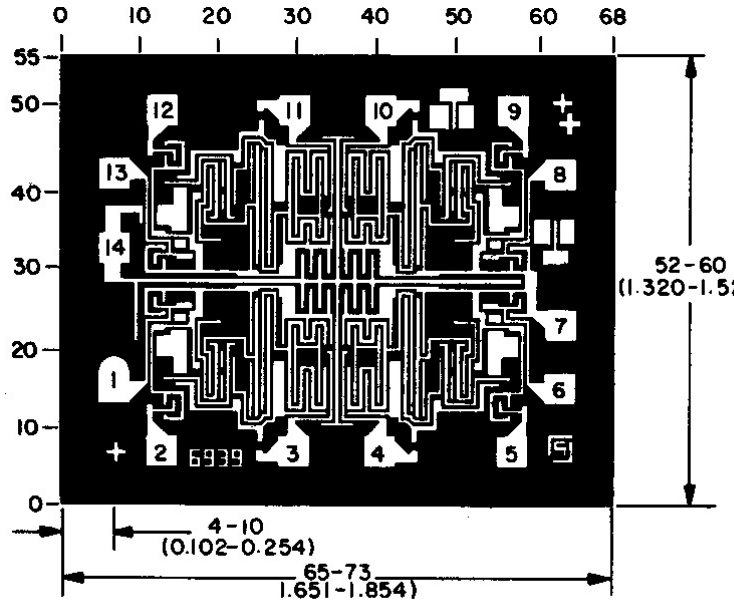
Porți CMOS: Poarta NAND



Structura internă a circuitului CD4011

CD4011, circuit integrat cu 4 porți logice NAND

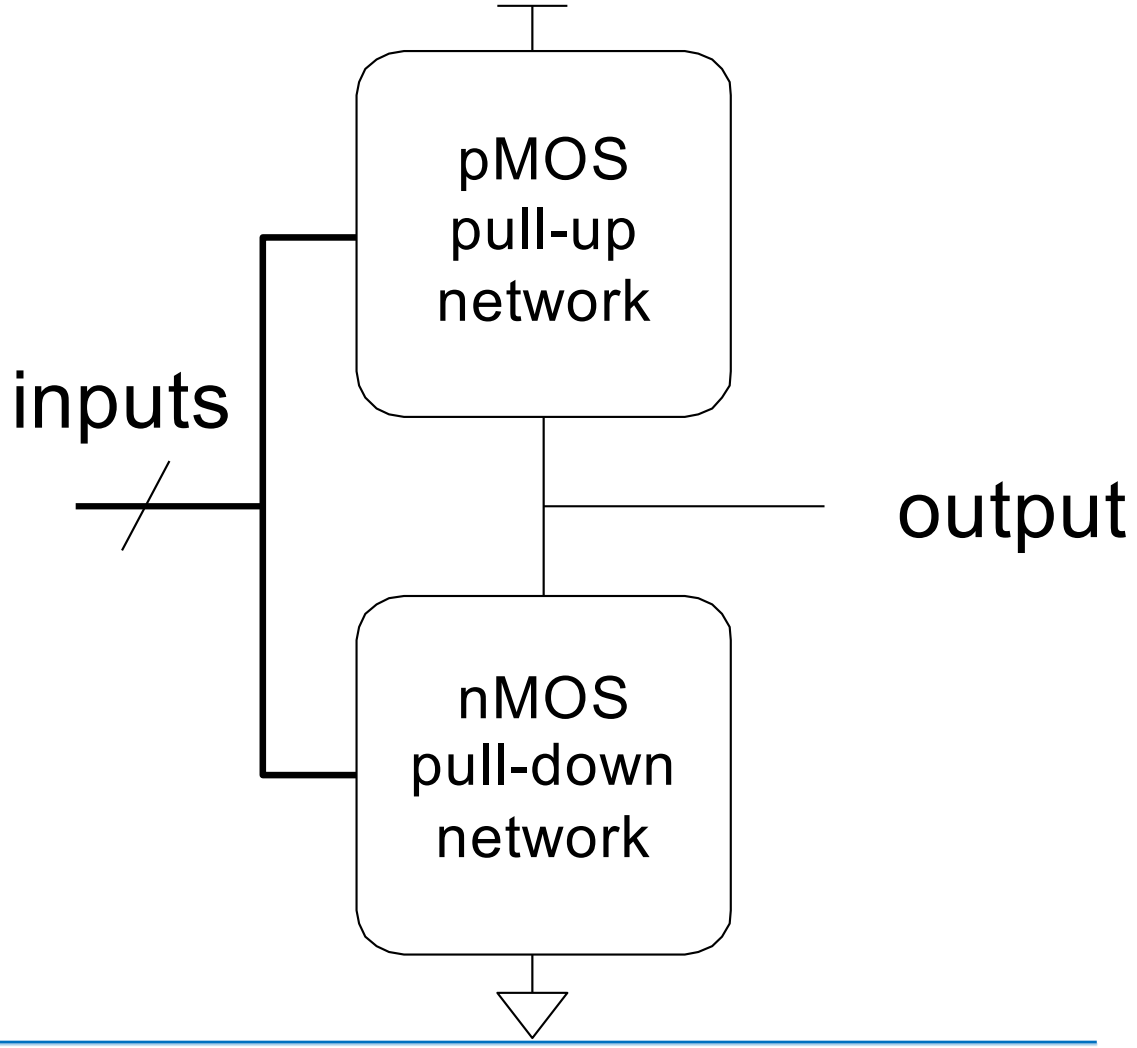




Structura unei porți CMOS

Structura internă a oricărei porți logice, indiferent de complexitate, poate fi simplificată la două structuri:

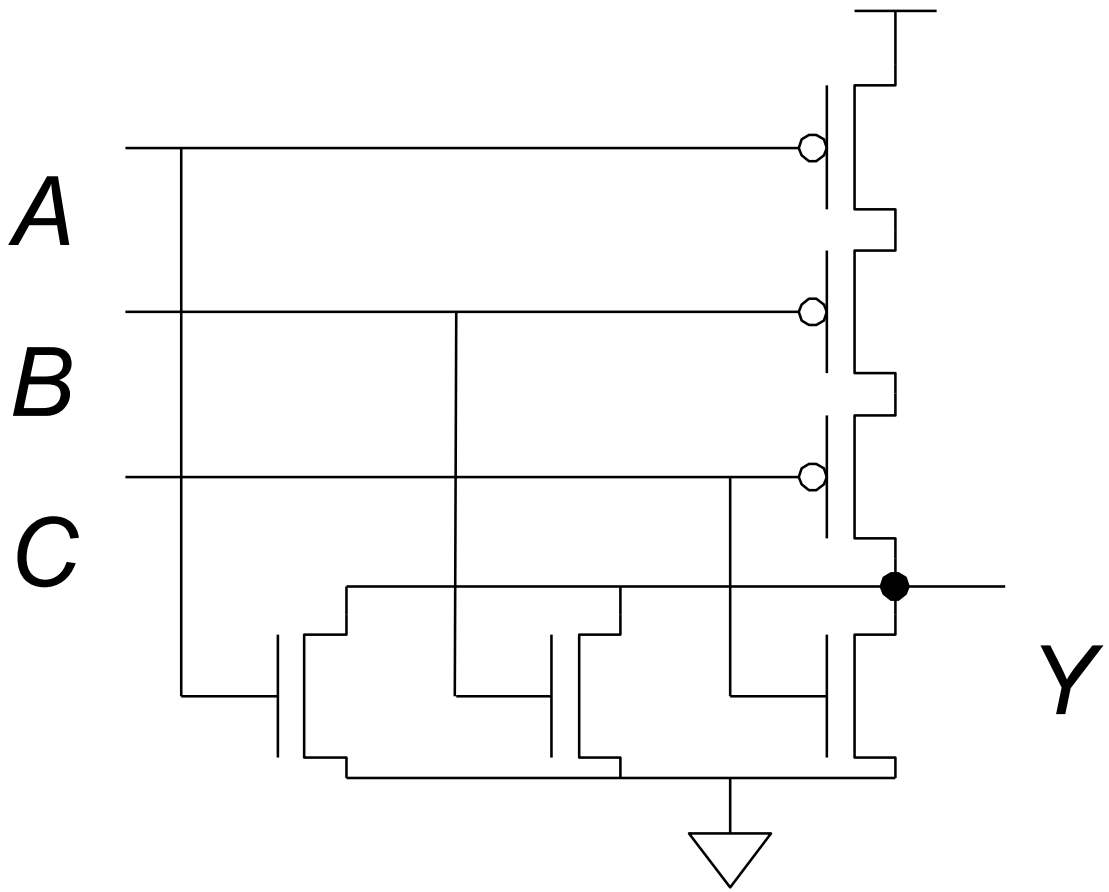
- Rețea **pull-up** -> trage ieșirea la ‘1’ logic (Vcc)
- Rețea **pull-down** -> trage ieșirea la ‘0’ logic (GND)



Poarta NOR

Cum construim o poartă NOR cu trei intrări?

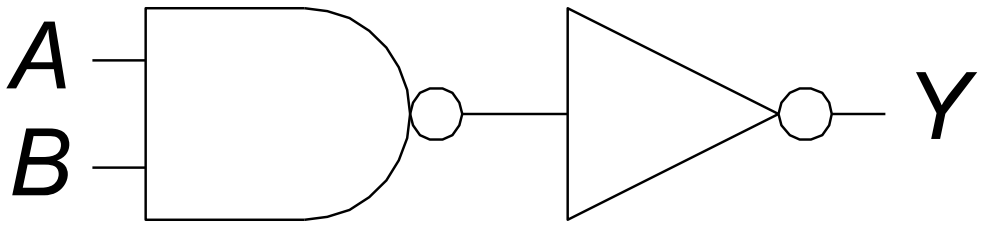
Poarta NOR3



Alte porți CMOS

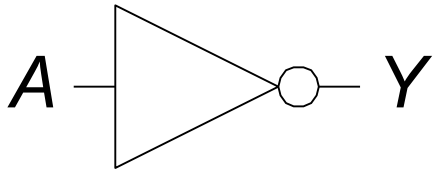
Cum construim o poartă AND cu două intrări?

Poarta AND2



Porți logice cu o intrare

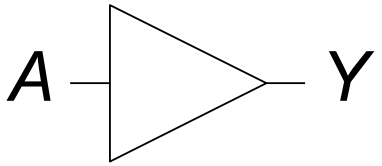
NOT



$Y = \overline{A}$

A	Y
0	1
1	0

BUF

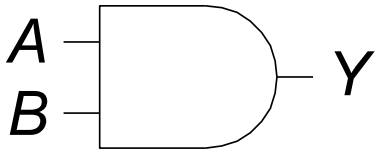


$Y = A$

A	Y
0	0
1	1

Porți logice cu două intrări

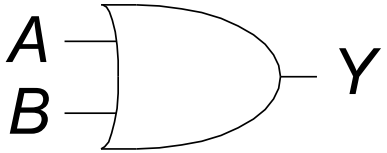
AND



$Y = AB$

A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

OR

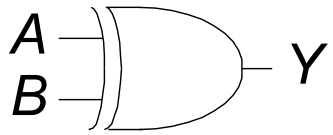


$Y = A + B$

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Mai multe porți logice cu două intrări

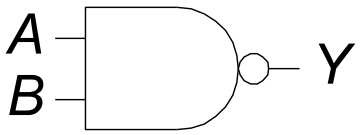
XOR



$Y = A \oplus B$

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

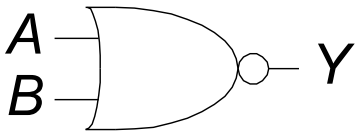
NAND



$Y = \overline{AB}$

A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

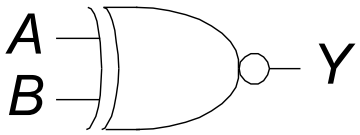
NOR



$Y = \overline{A + B}$

A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

XNOR

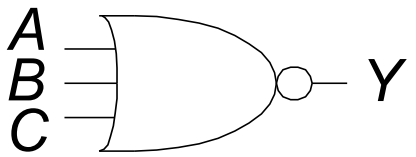


$Y = \overline{A \oplus B}$

A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Porți logice cu mai multe intrări

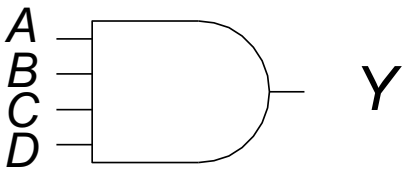
NOR3



$$Y = \overline{A+B+C}$$

A	B	C	Y
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	0

AND4

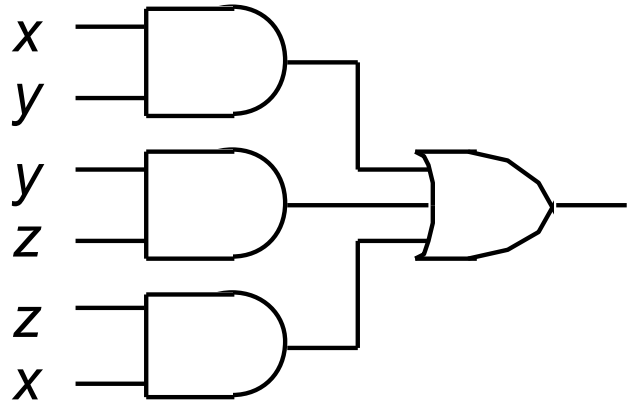


$$Y = ABCD$$

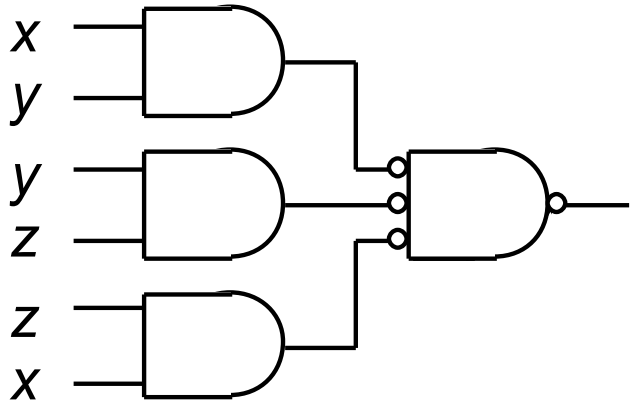
A	B	C	D	Y
0	0	0	0	0
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	0
1	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	1

Proiectarea rețelelor de porți logice

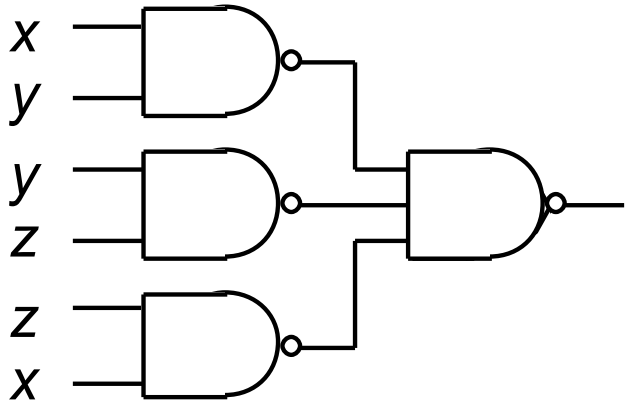
- AND-OR, NAND-NAND, OR-AND, NOR-NOR
- Optimizare logică: cost, viteză de execuție, putere disipată



(a) AND-OR circuit



(b) Intermediate circuit

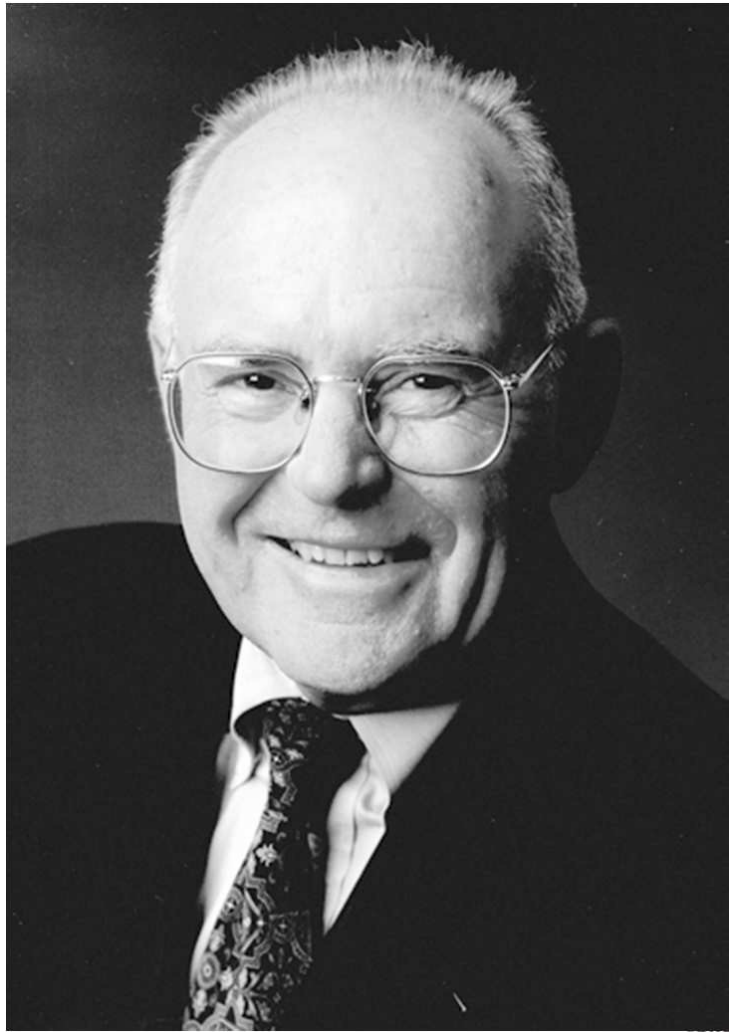


(c) NAND-NAND equivalent

Un circuit AND-OR pe 2 niveluri și două circuite echivalente

Gordon Moore, 1929-

- Co-fondator Intel în 1968 cu Robert Noyce.
- **Legea lui Moore:** numărul de tranzistoare de pe un circuit integrat se dublează în fiecare an (observat în 1965)
- Din 1975, numărul s-a dublat la fiecare doi ani.

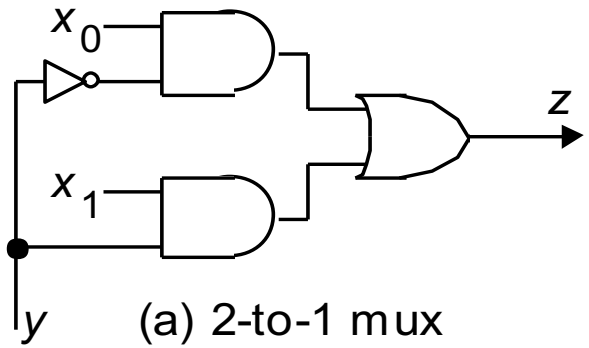


Circuite combinaționale utile

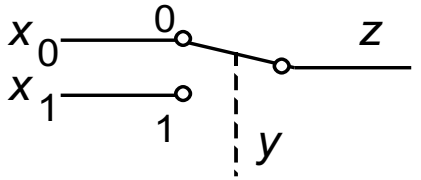
- Blocuri de nivel înalt
- Seamănă cu blocurile prefabricate folosite în construcția unei case
- Componente aritmetice (Sumatoare, Multiplicatoare, Unități Aritmetice-Logice)
- În continuare vom vorbi despre trei componente utile: **multiplexoare**, **decodificatoare/demultiplexoare** și **codificatoare**

Multiplexoare

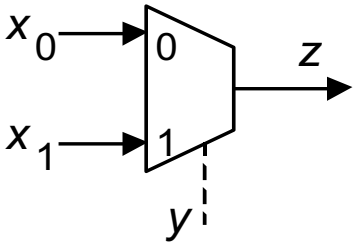
Permite selectarea uneia sau mai multor intrări și rutarea acestora la ieșire, în funcție de valoarea binară a intrărilor de selecție/adresă furnizate.



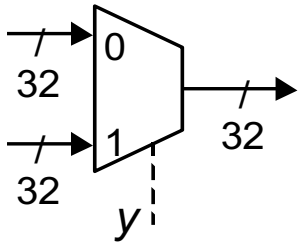
(a) 2-to-1 mux



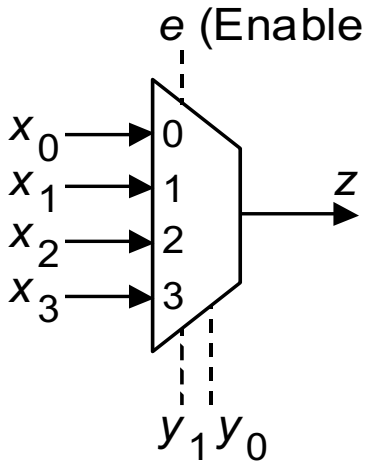
(b) Switch view



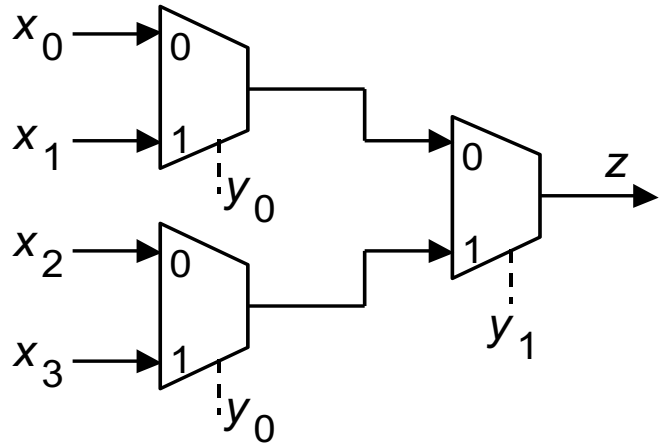
(c) Mux symbol



(d) Mux array

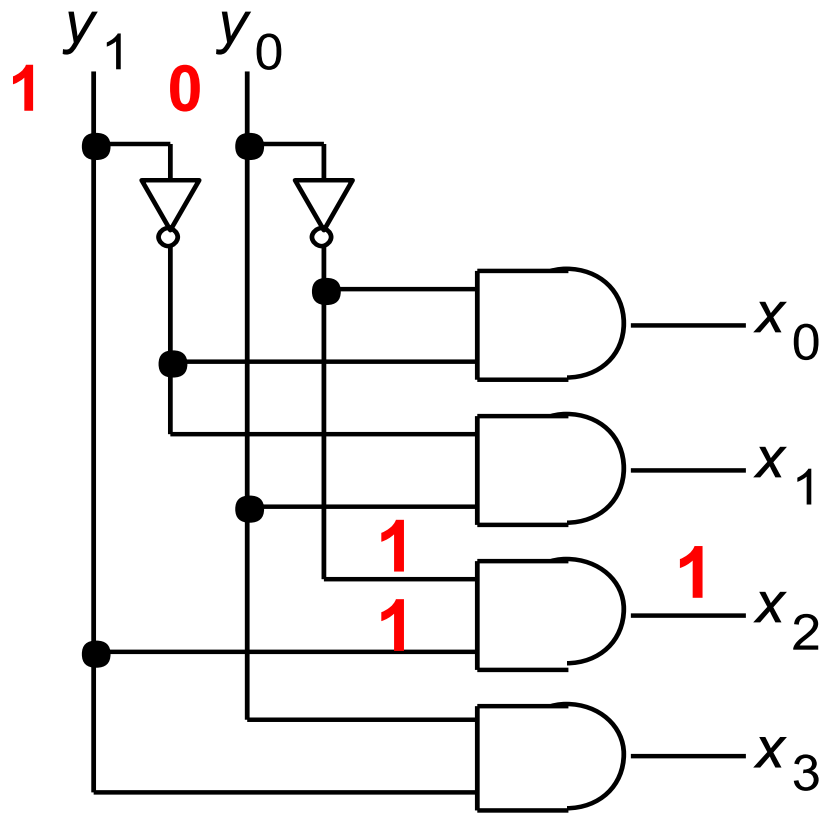


(e) 4-to-1 mux with enable

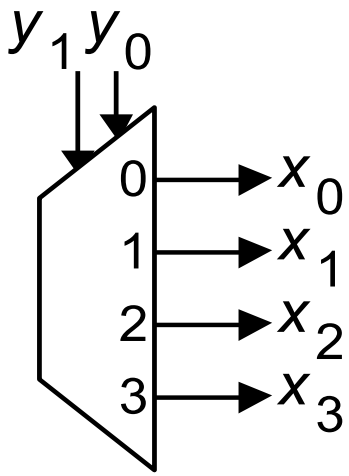


(e) 4-to-1 mux design

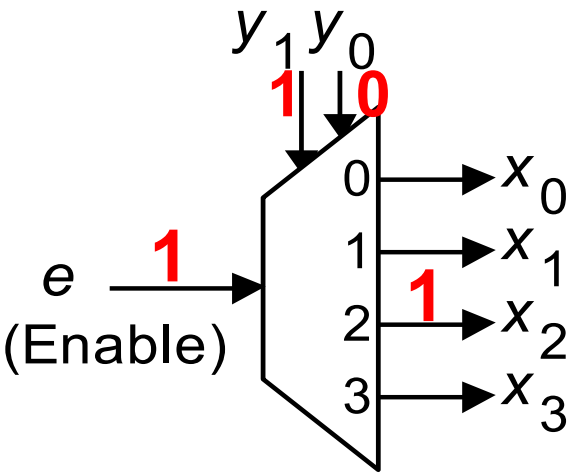
Decodificatoare/demultiplexoare



(a) 2-to-4 decoder



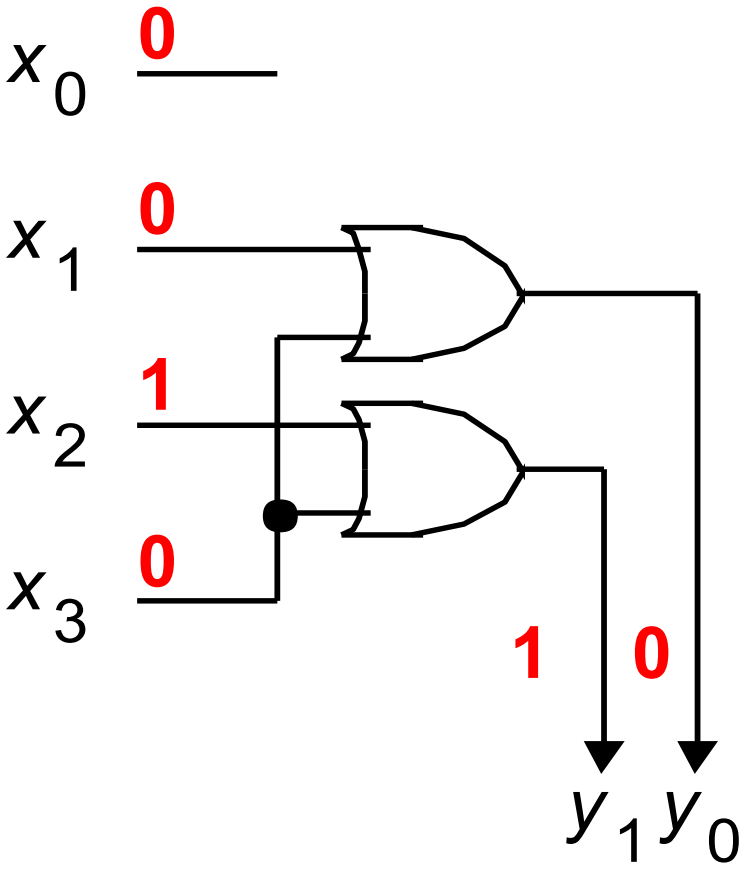
(b) Decoder symbol



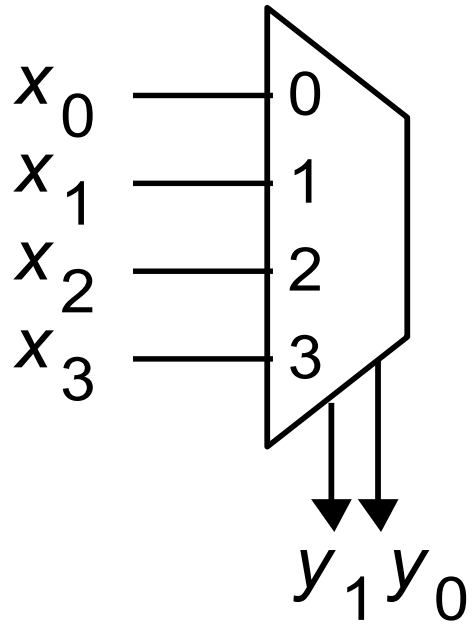
(c) Demultiplexer, or decoder with “enable”

Un decodificator permite selecția a uneia dintre cele 2^a intrări cu ajutorul a unei intrări de selecție pe *a* biți. Un demultiplexor (demux) selectează o ieșire în funcție de semnalele de adresă și o intrare suplimentară de Enable.

Codificatoare



(a) 4-to-2 encoder

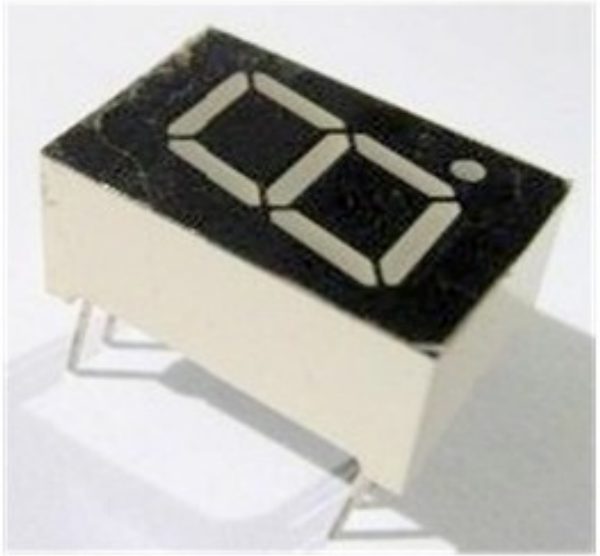


(b) Encoder symbol

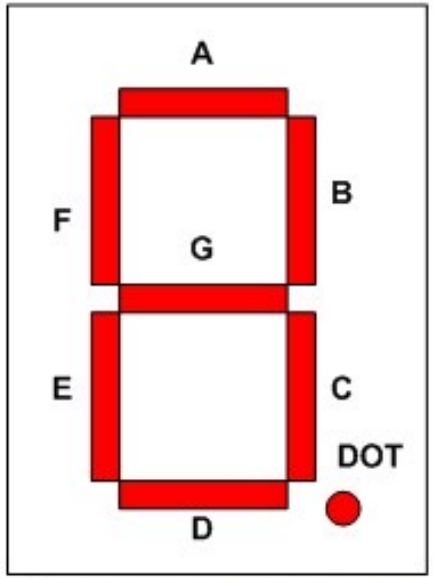
Un codificator 2^a-la-a furnizează la ieșire un număr binar pe a-biți egal cu rangul valorii unice de 1 de la intrare.

Afișarea cifrelor zecimale pe un display cu 7 segmente

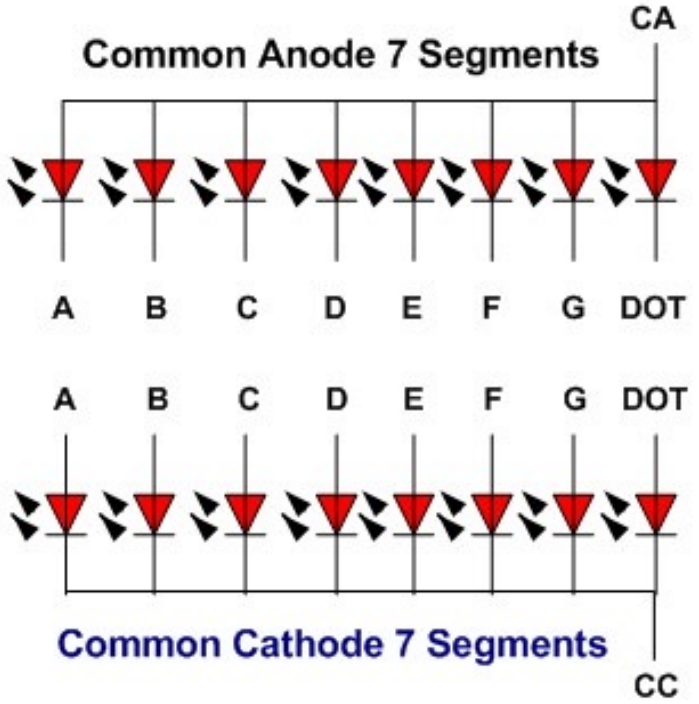
Afișaj seven-segment pentru toate cifrele zecimale. Fiecare din cele 7 segmente corespunde unui bit care poate fi activ (=> segment aprins) sau inactiv (segment stins). În acest fel putem afișa cifre pe un ecran.



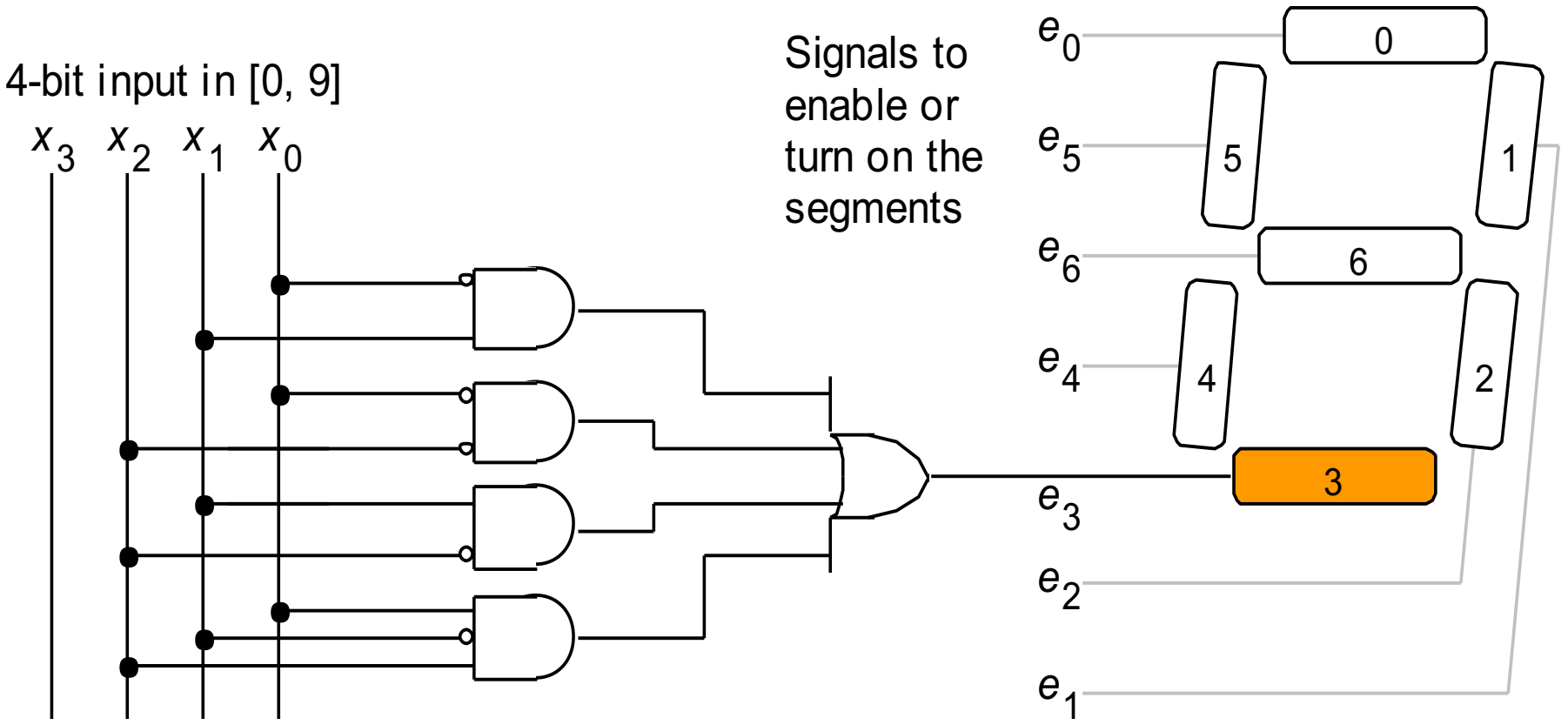
Typical 7 Segments Display



The 7 Segment's Name and the DOT



Decodificator BCD-to-Seven-Segment



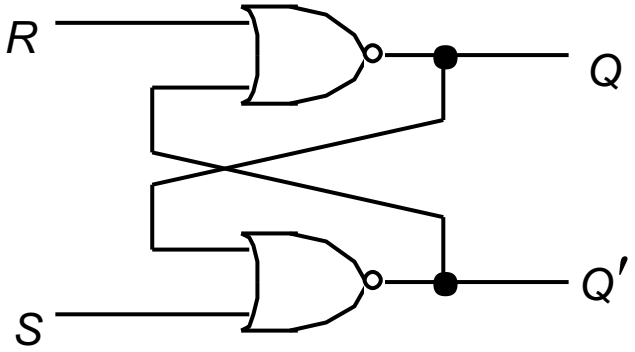
Circuitul logic care generează semnalul de Enable pentru segmentul cel mai de jos al unui digit 7-segment

Circuite secvențiale utile

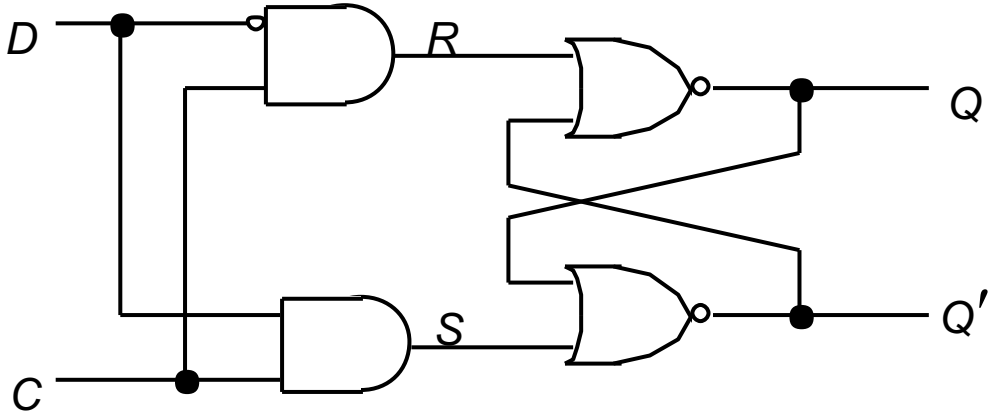
- Blocuri de nivel înalt
- Folosesc bistabile și componente combinaționale

pentru a implementa **circuite cu memorie –** registre, registre de deplasare, numărătoare etc.

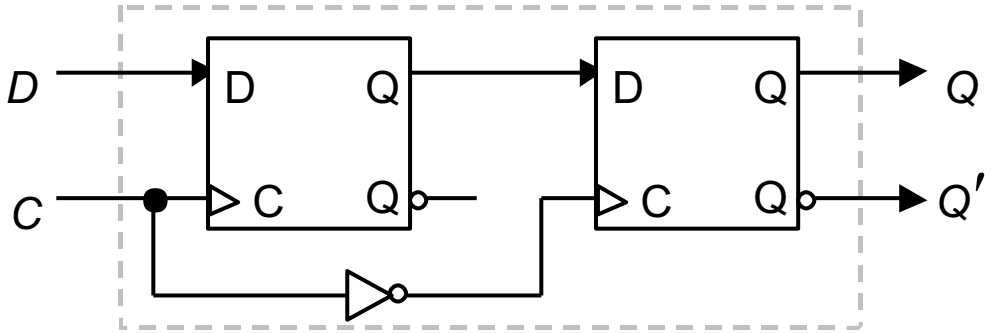
Latch-uri, Flip-Flop-uri și Registre



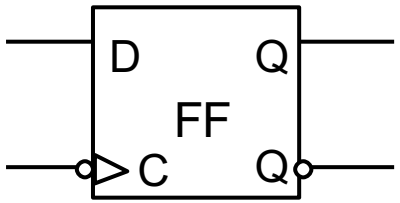
(a) SR latch



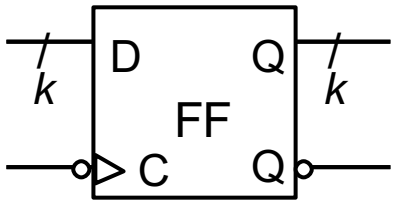
(b) D latch



(c) Master-slave D flip-flop



(d) D flip-flop symbol



(e) *k*-bit register

Automate FSM

Current state	Input: Dime	Input: Quarter	Input: Reset
S_{00}	S_{10}	S_{25}	S_{00}
S_{10}	S_{20}	S_{35}	S_{00}
S_{20}	S_{30}	S_{35}	S_{00}
S_{25}	S_{35}	S_{35}	S_{00}
S_{30}	S_{35}	S_{35}	S_{00}
S_{35}	S_{35}	S_{35}	S_{00}

Next state

S_{00} is the initial state
S_{35} is the final state

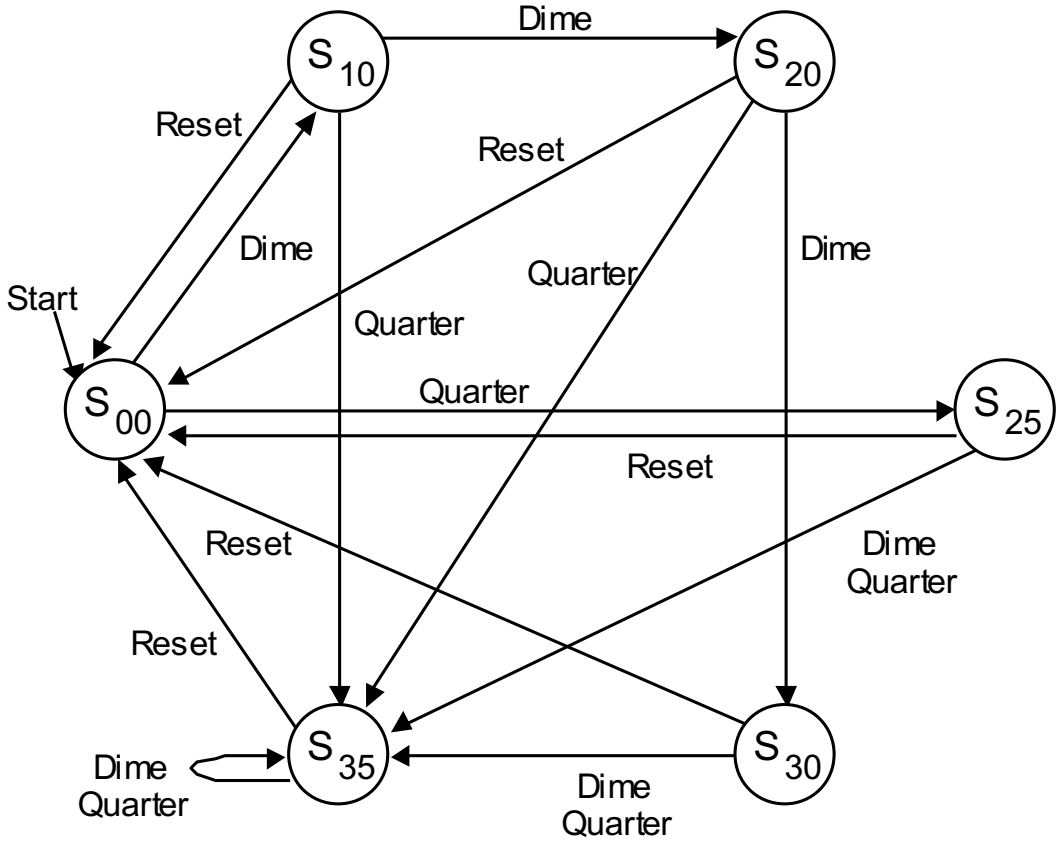
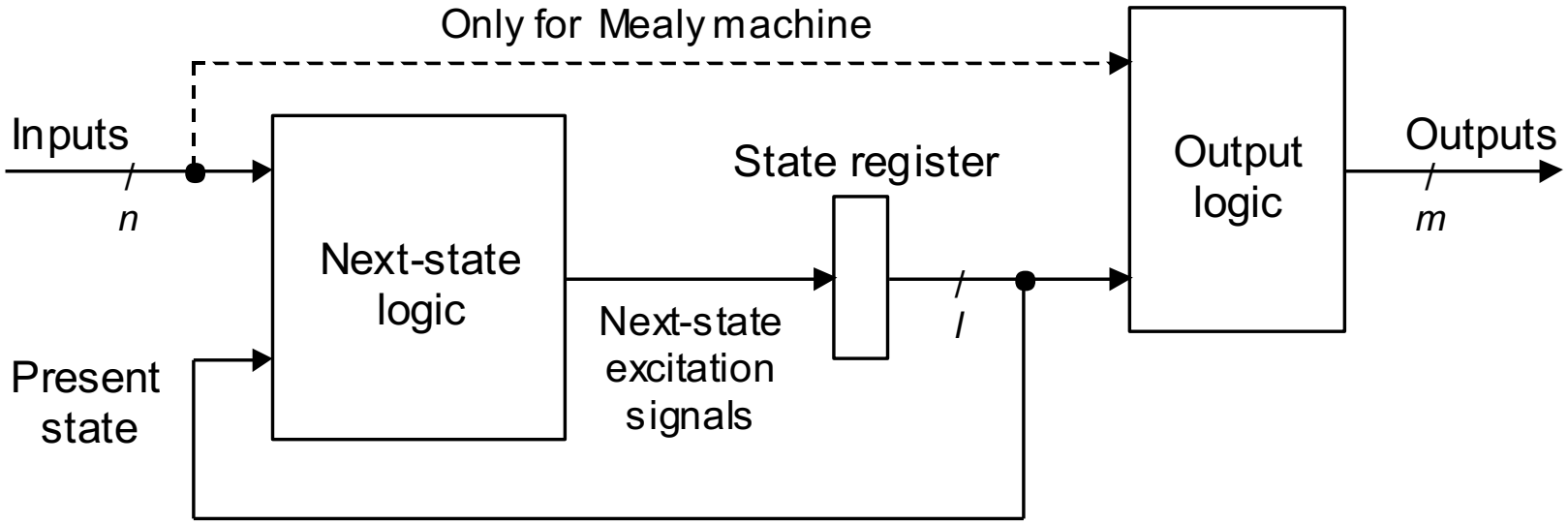


Tabela de stări și diagrama pentru un automat de băuturi răcoritoare.

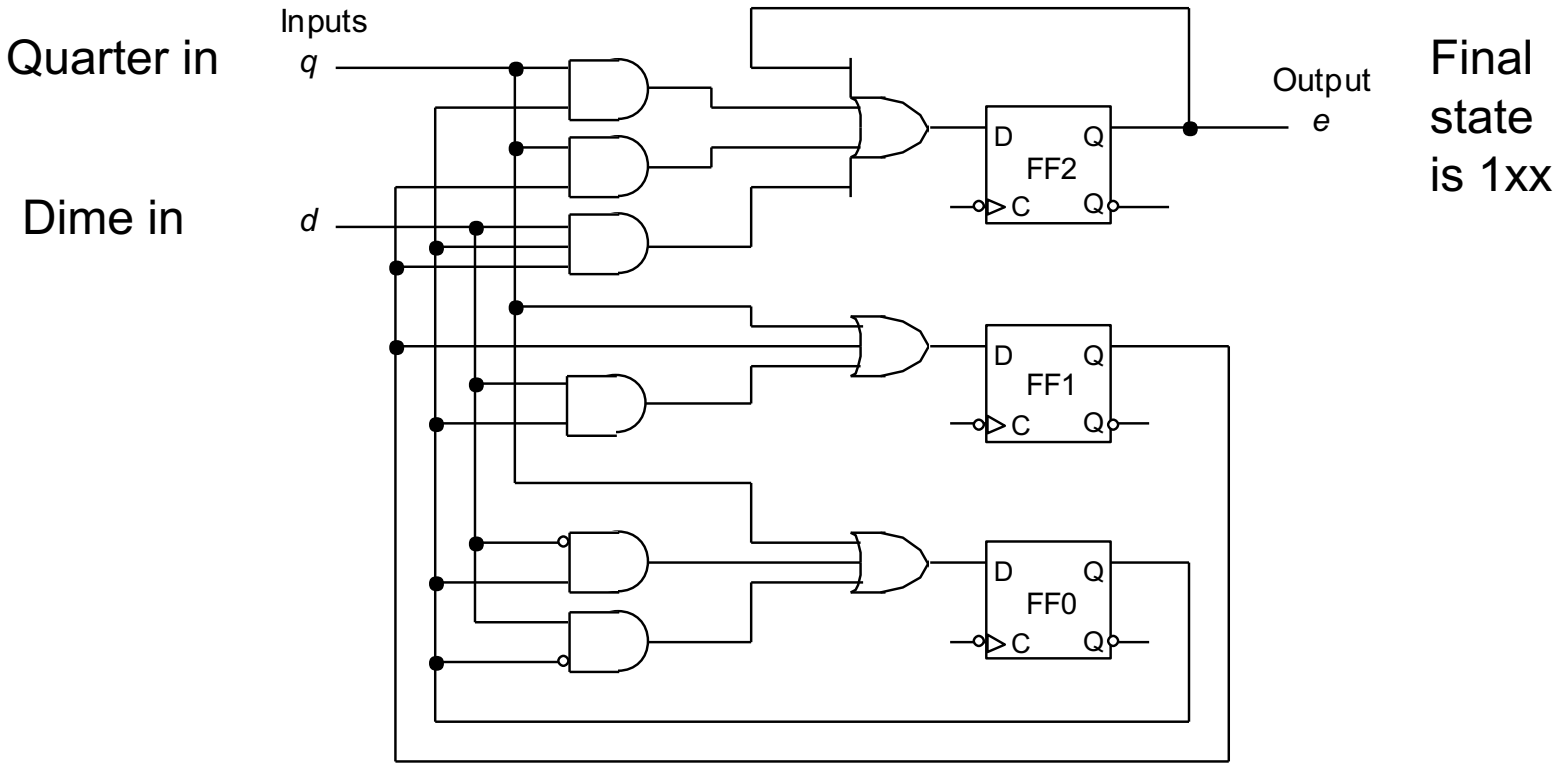
Implementarea logicii secvențiale



Realizarea hardware a automatelor secvențiale Moore și Mealy.

Proiectarea circuitelor secvențiale

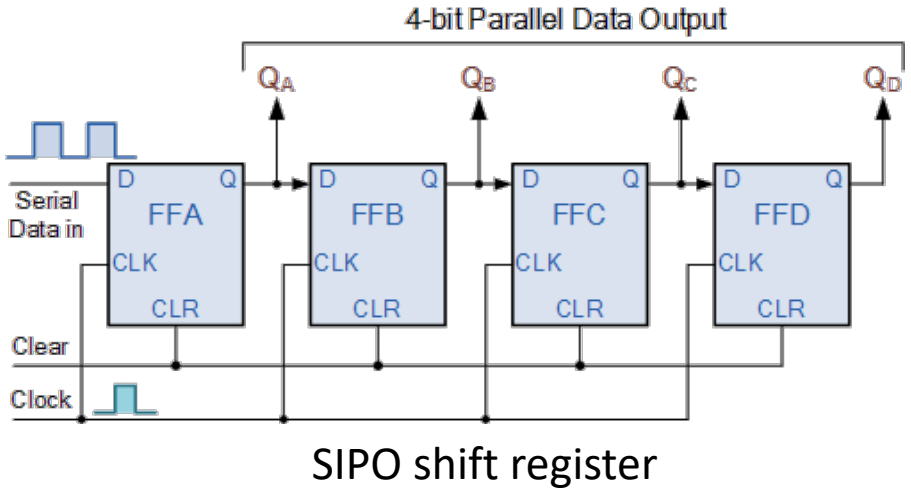
Exemplu



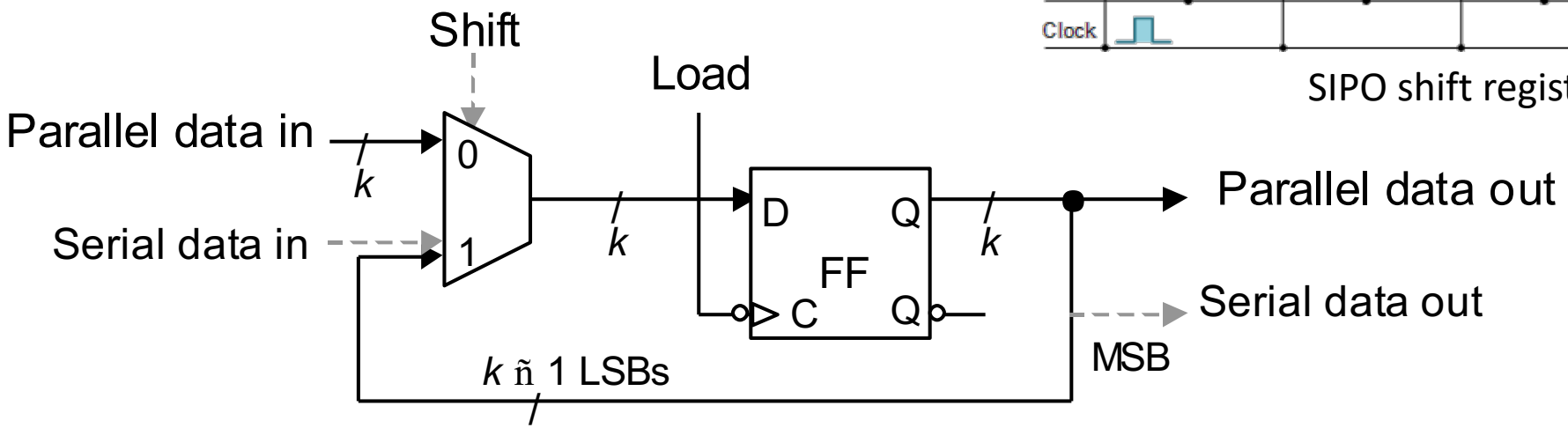
Implementarea hardware a automatului de răcoritoare.

Registre deplasare

- Serial-In Serial-Out (SISO)
- Parallel-In Serial-Out (PISO)
- Serial-In Parallel-Out (SIPO)



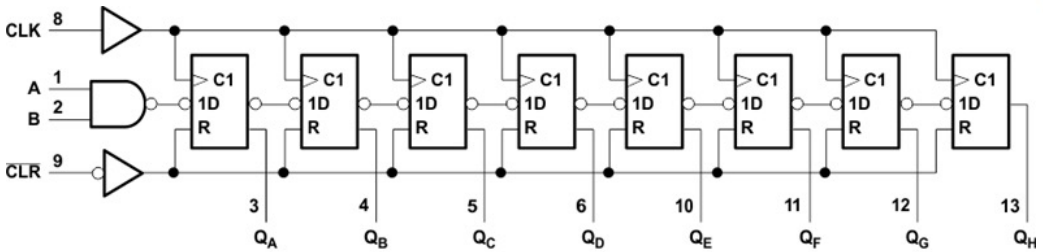
SIPO shift register

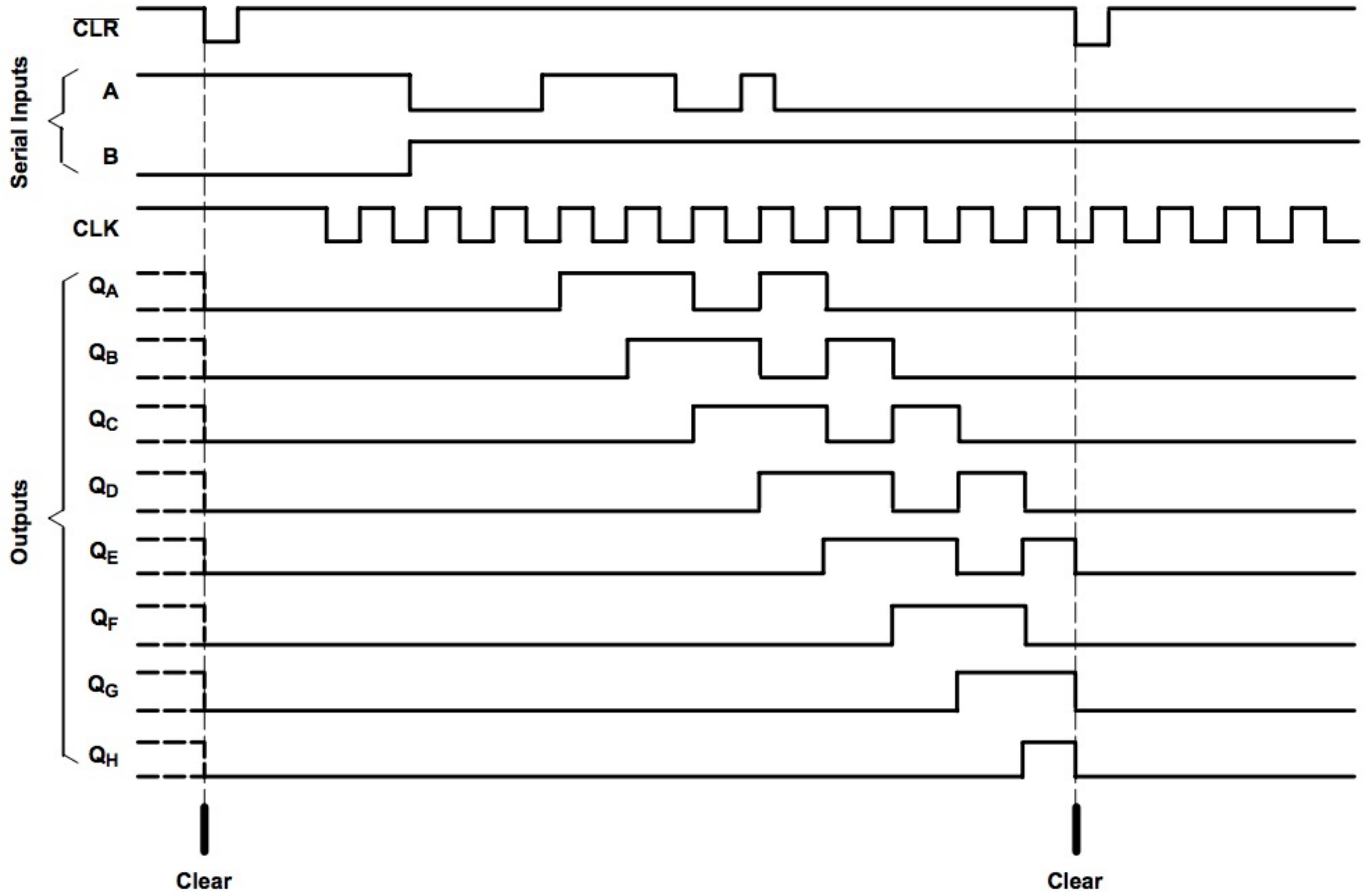


Registru deplasare mutifuncțional. Poate funcționa fie parallel-in, fie serial-in și poate furniza datele la ieșire fie paralel, fie serial.

Registre deplasare - exemple

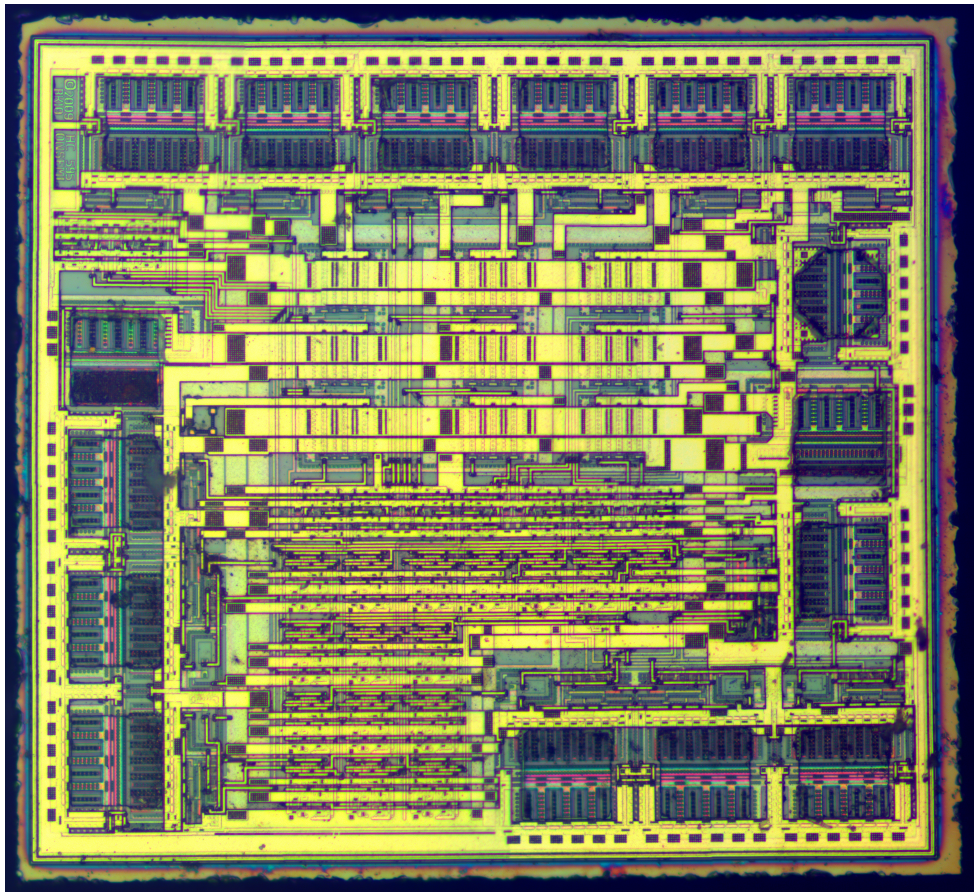
74HC164 – registru deplasare 8 biți Serial-In, Parallel-Out

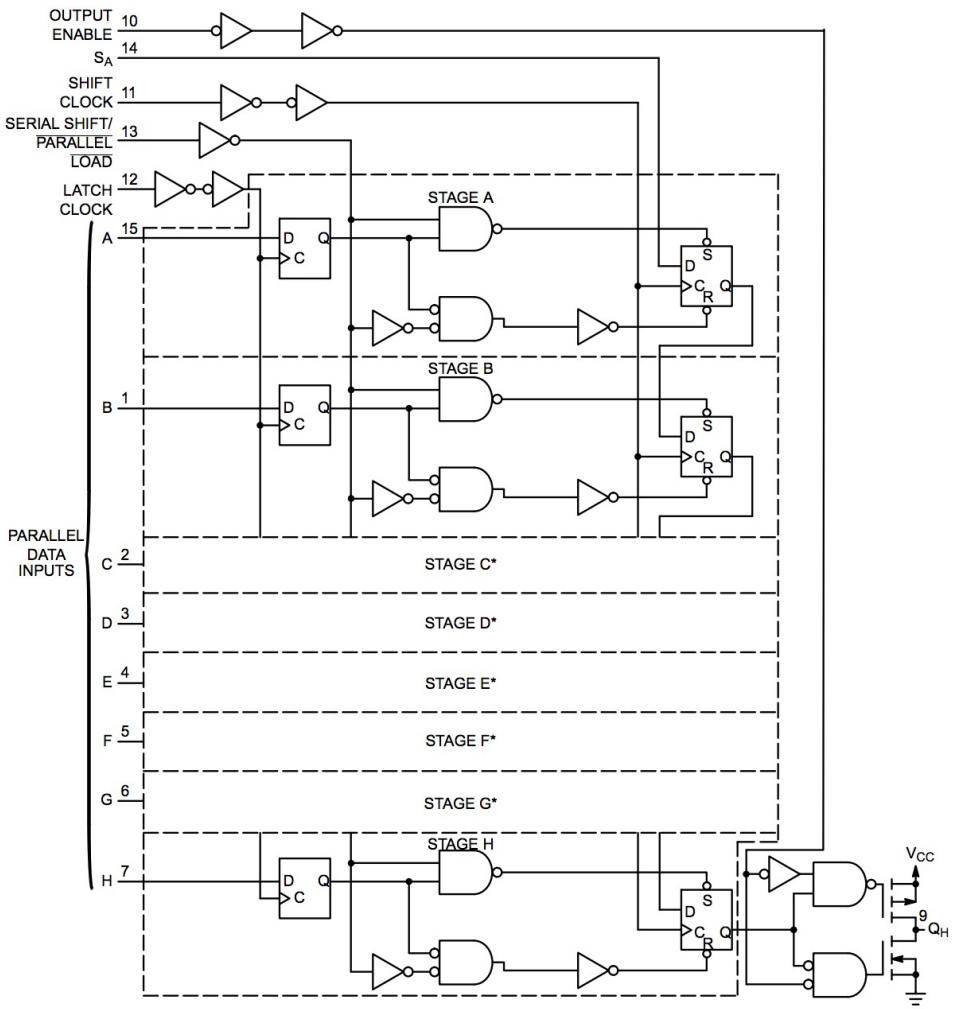




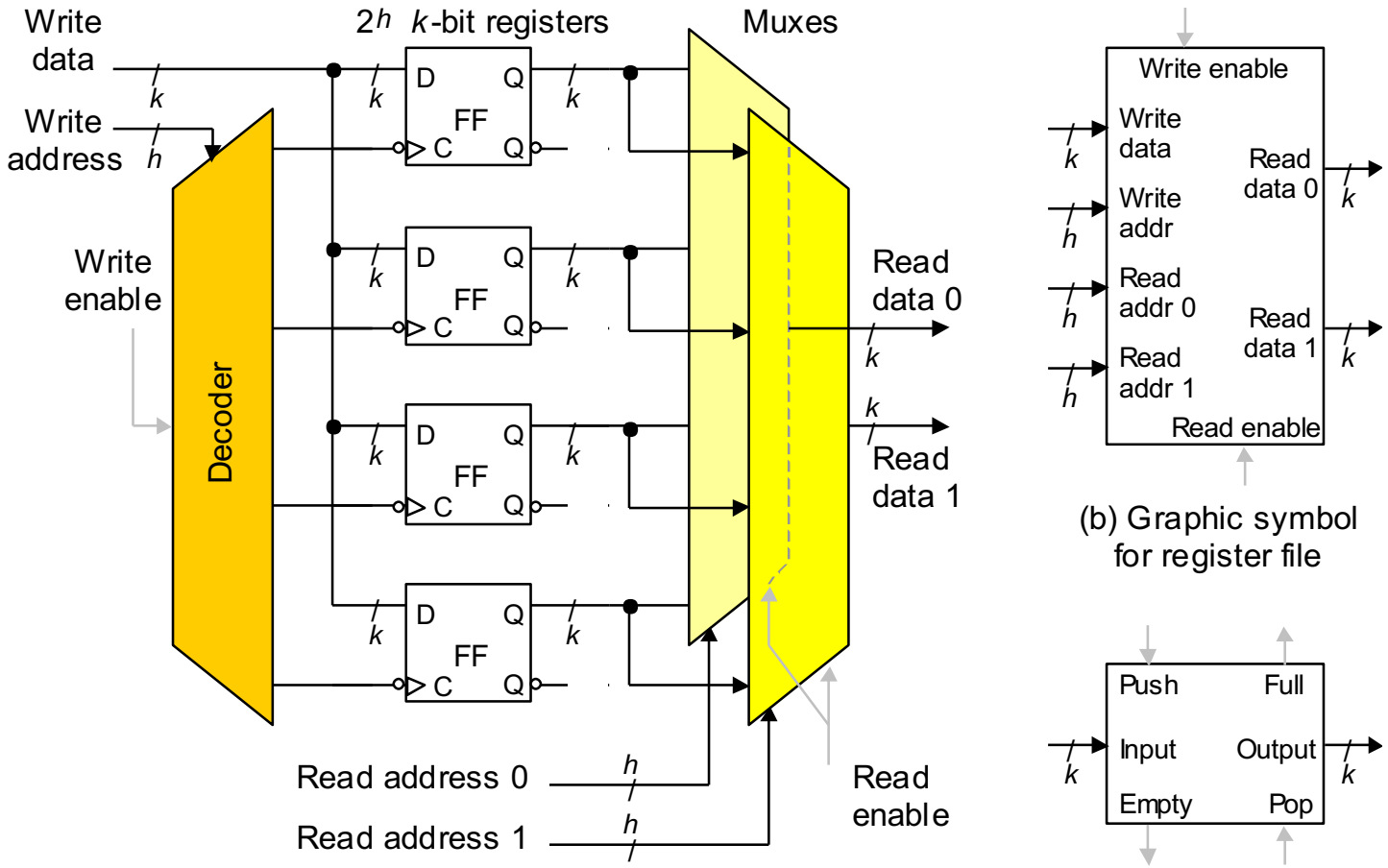
Registre deplasare - exemple

74HC589– registru deplasare 8 biți Parallel-In, Serial-Out





Registre și buffere FIFO



(a) Register file with random access

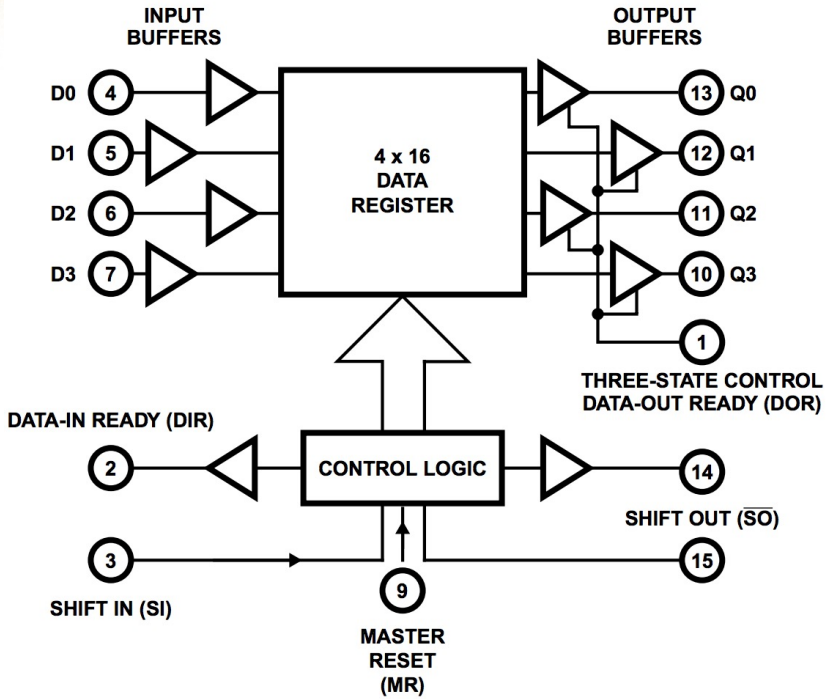
(b) Graphic symbol for register file

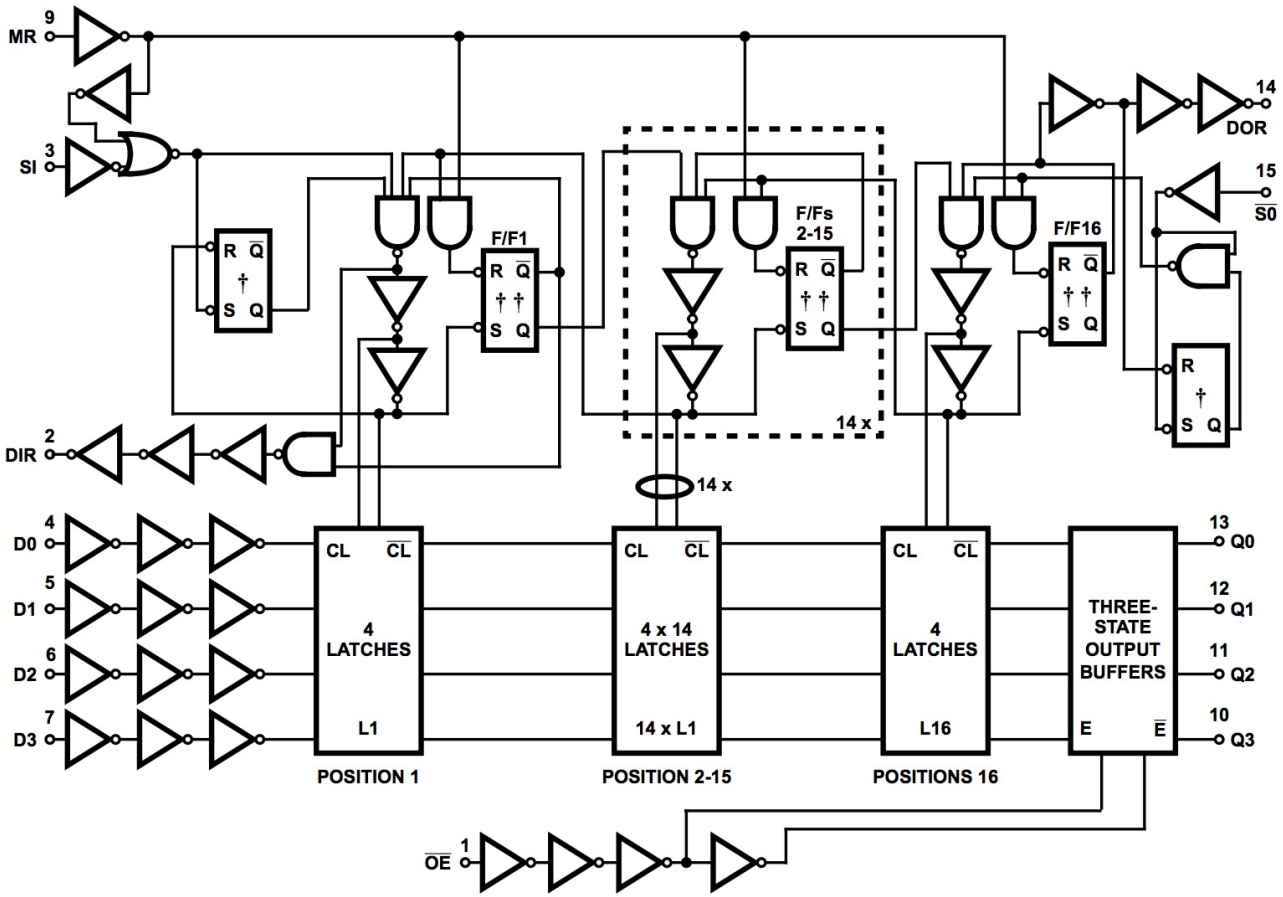
(c) FIFO symbol

Implementarea unui registru și a unui FIFO.

FIFO Buffer

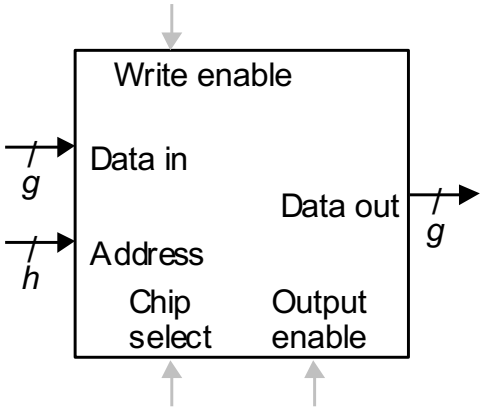
74HC40105– registru deplasare 16 cuvinte x 4 biți



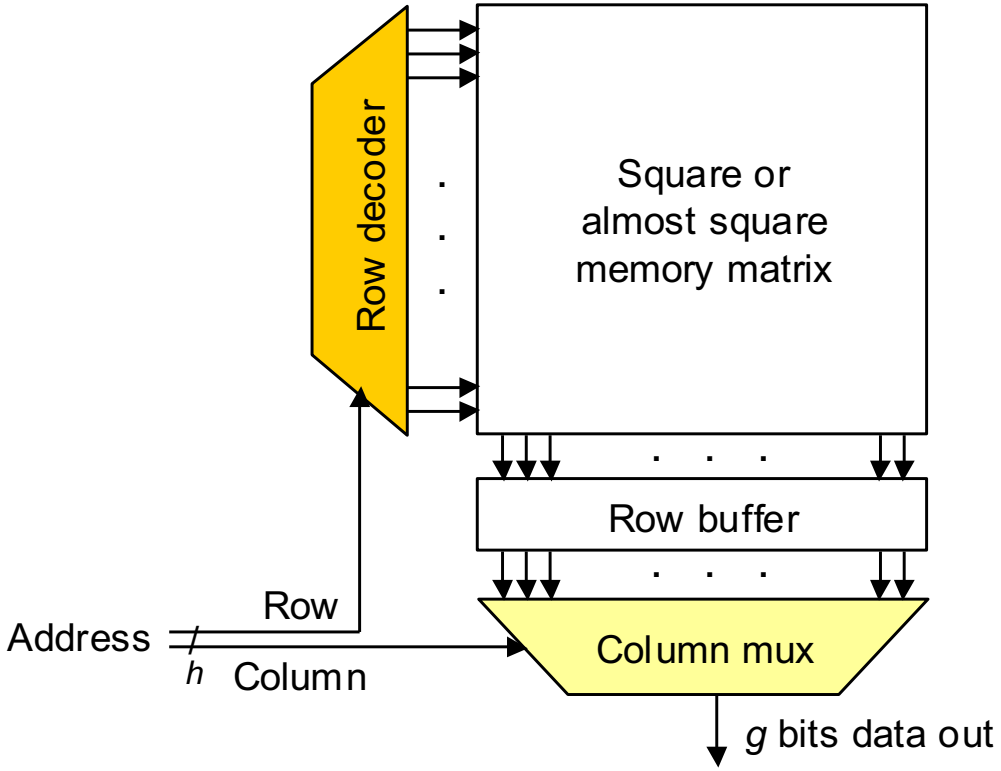


Datasheet: http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd74hc40105.pdf

Static RAM (SRAM)



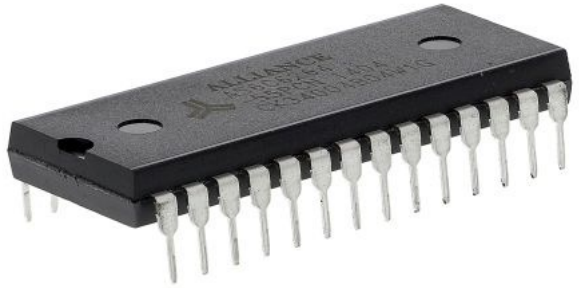
(a) SRAM block diagram

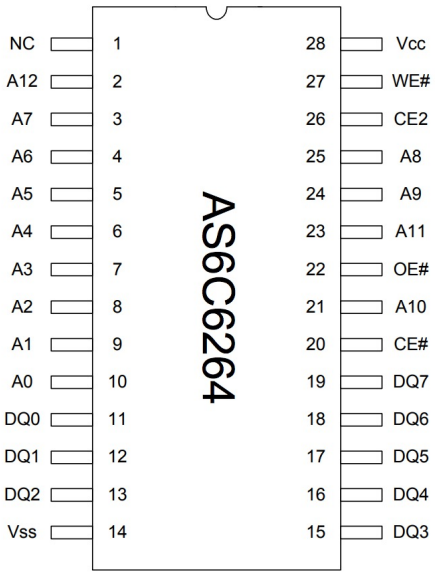


(b) SRAM read mechanism

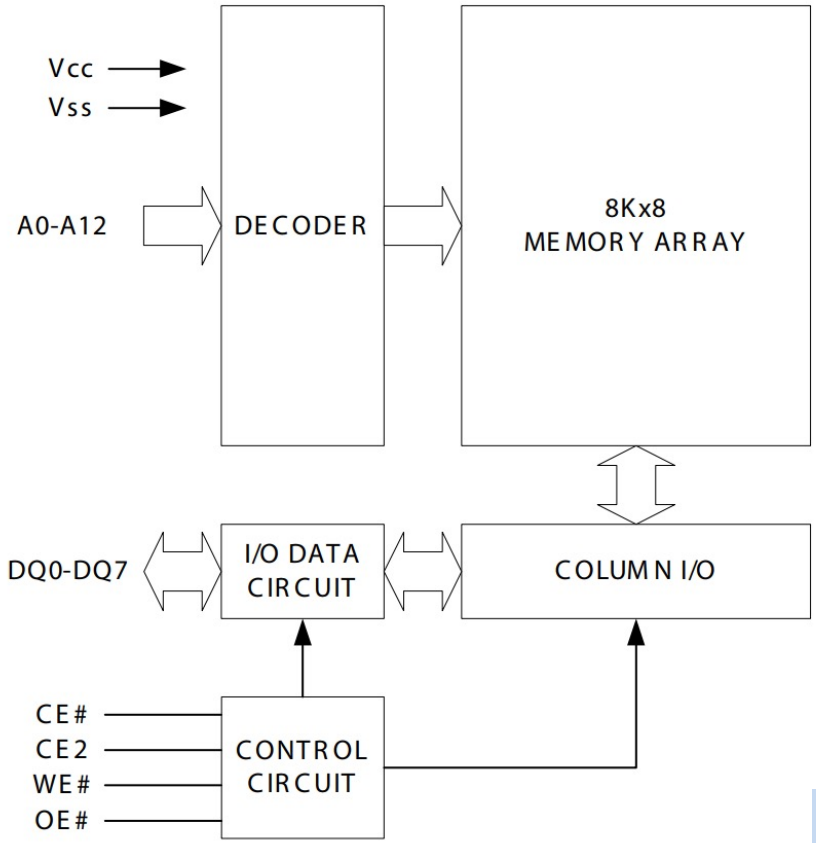
Memoria SRAM nu este altceva decât o matrice foarte mare de registre single-port.

SRAM - exemplu





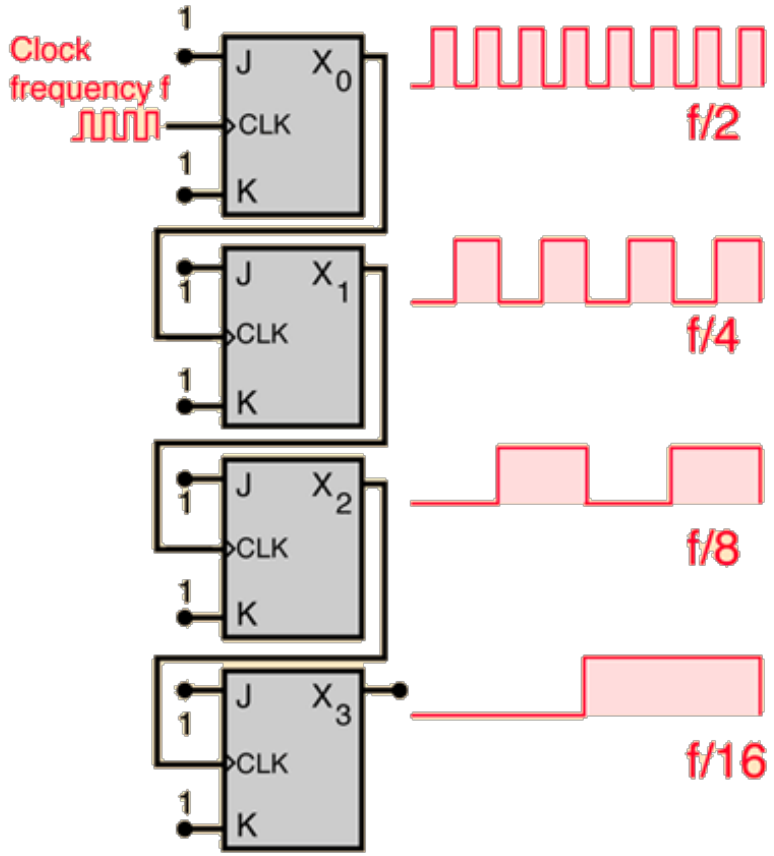
PDIP/SOP



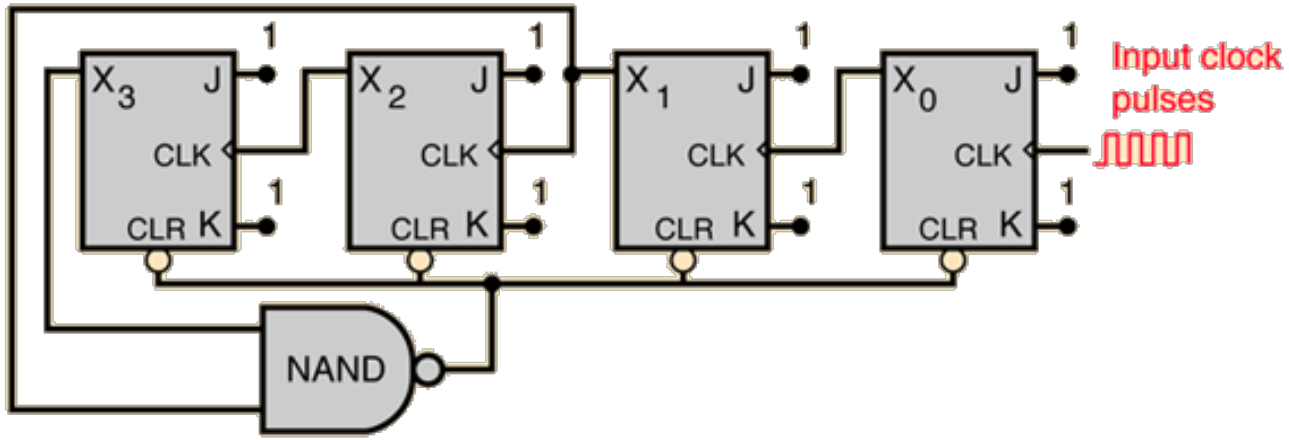
SYMBOL	DESCRIPTION
A0 - A12	Address Inputs
DQ0 – DQ7	Data Inputs/Outputs
CE#, CE2	Chip Enable Inputs
WE#	Write Enable Input
OE#	Output Enable Input
Vcc	Power Supply
Vss	Ground
NC	No Connection

8K X 8 BIT LOW POWER CMOS SRAM

Numărătorul Binar

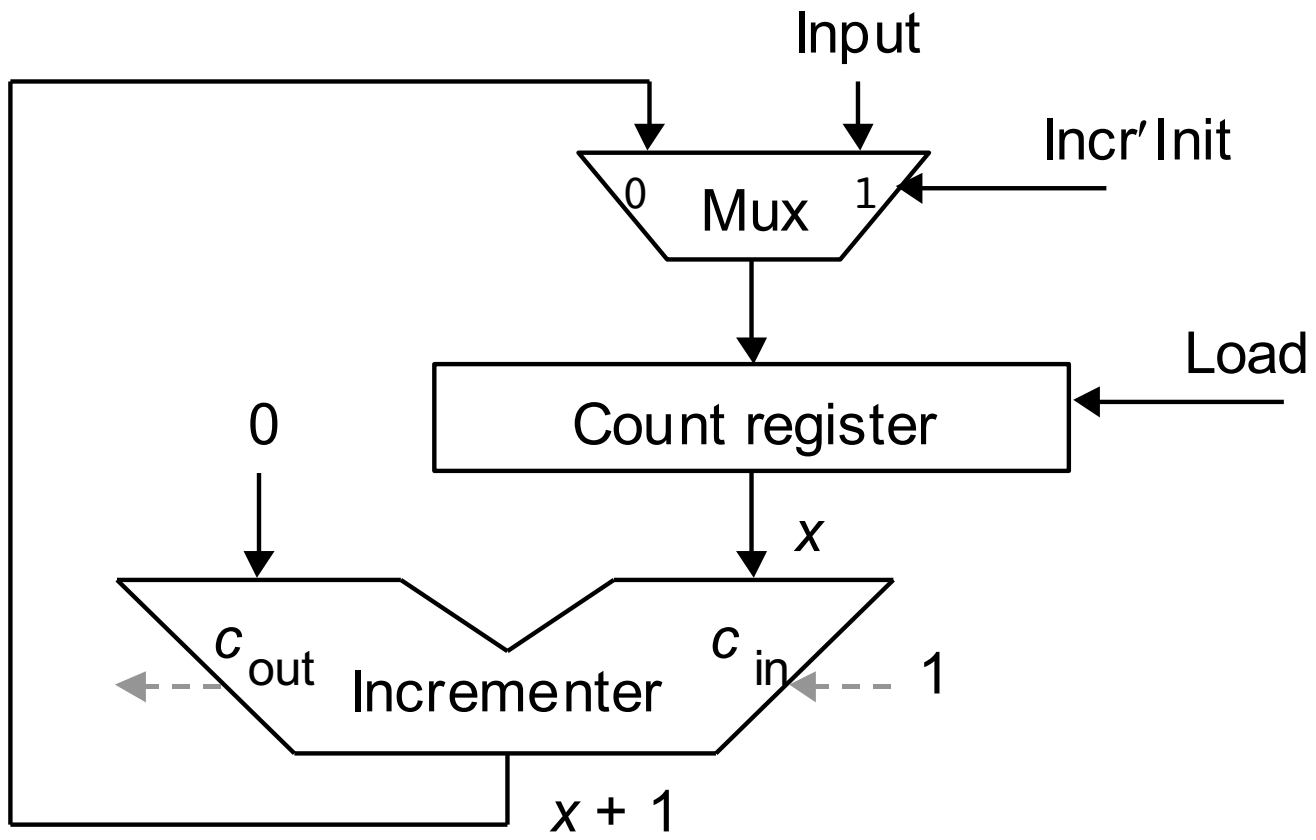


Divizor de frecvență / numărător binar



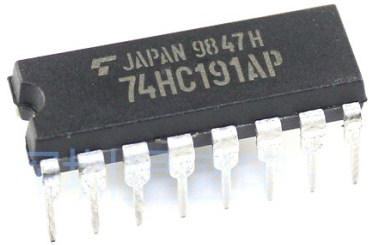
Numărător BCD – se resetează automat după ce ieșirile ajung la cifra 9 (1001)

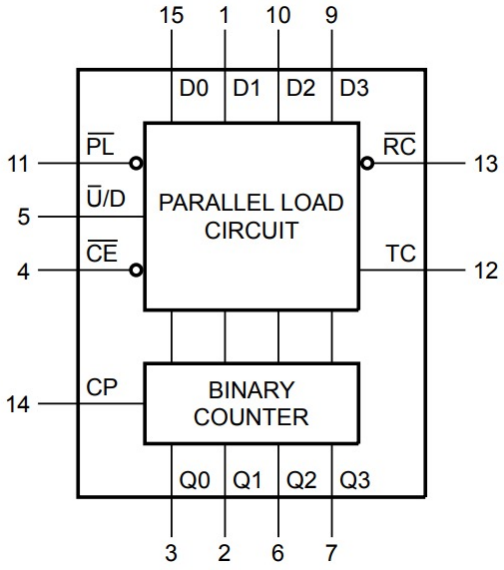
Numărătorul Binar

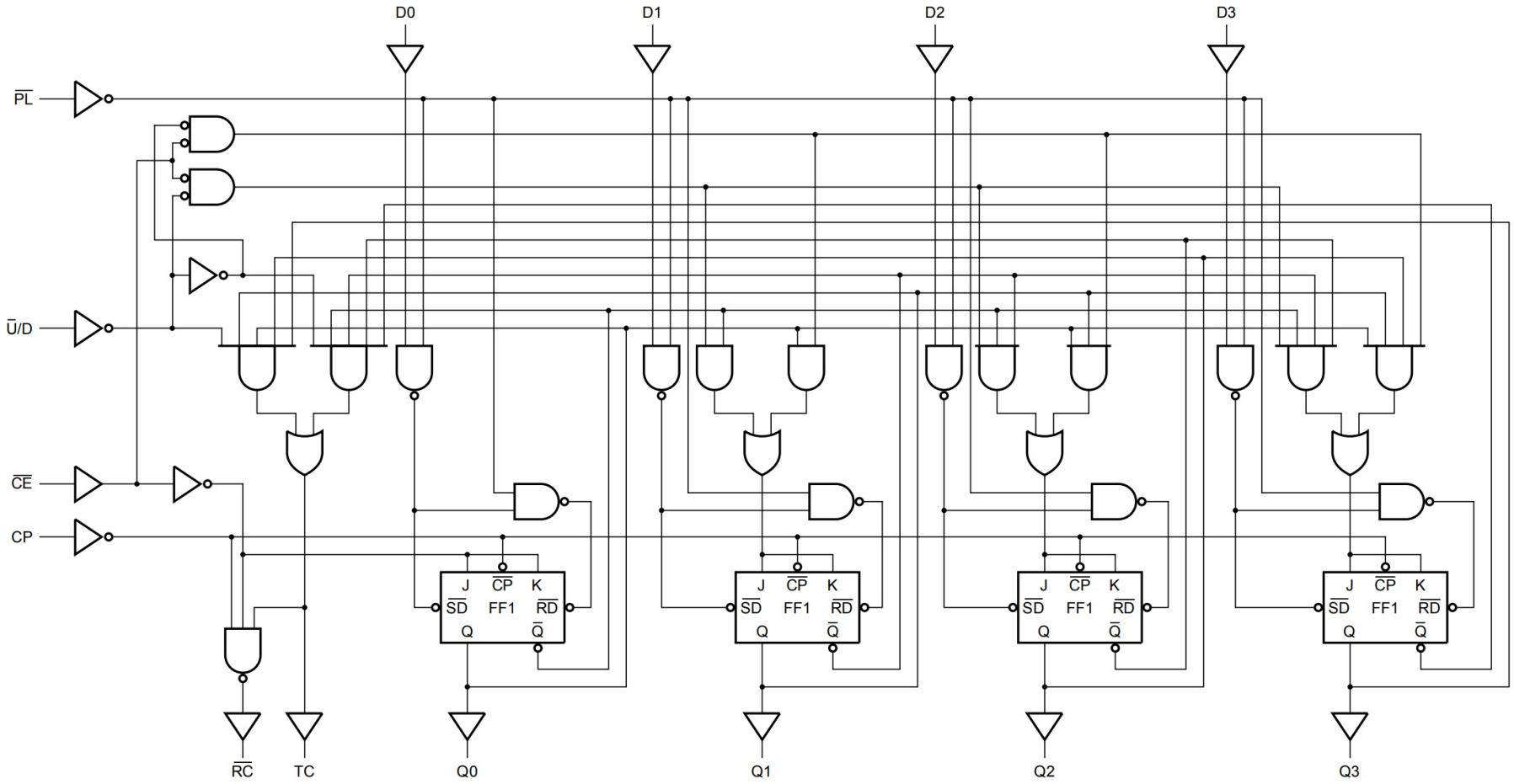


Numărător binar sincron cu capabilitate de inițializare.

Numărătorul Binar - exemplu







74HC191 - numărător binar presetabil cu numărare în sus sau jos

Niveluri Logice

- Valori discrete de tensiune reprezintă 1 și 0
- De exemplu:
  - 0 = *ground* (GND) sau 0 volți
  - 1 = V_{DD} sau 5 volți

- Dar 4.99 volți?
- Dar 3.2 volți?

Este un 0 sau un 1?

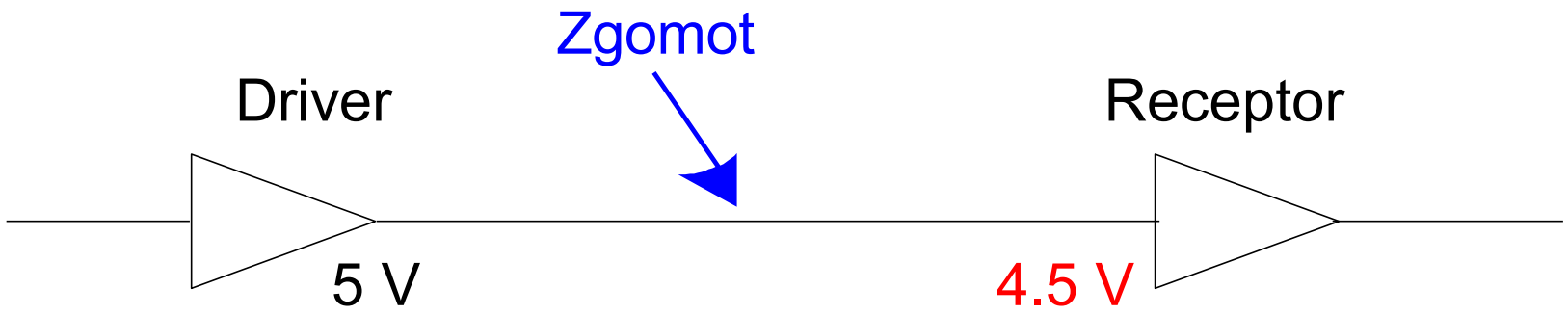
Niveluri Logice

- *Domeniu* de tensiuni pentru 1 și 0
- Domenii diferite pentru intrări și ieșiri, pentru a lua în calcul și *zgomotul*

Ce este zgomotul?

Ce este zgomotul?

- **Orice degradează semnalul**
  - E.g., rezistența, zgomotul sursei de alimentare, cuplajele parazite de la conductorii învecinați etc.
- **Exemplu:** o poartă (driver) pune la ieșirea sa 5 V dar, din cauza rezistenței liniei lungi, receptorul primește 4.5 V

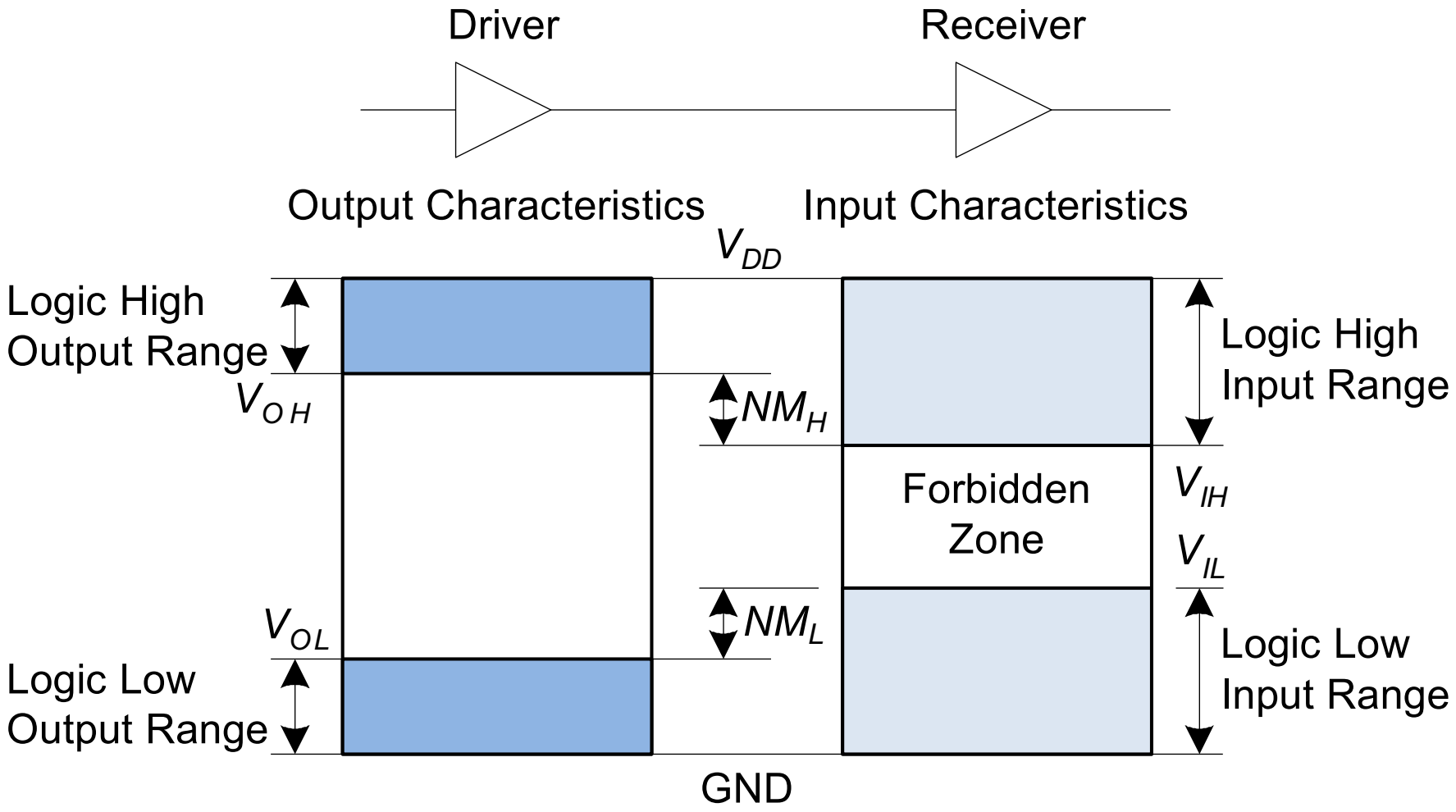


Analiza statică

- Pornind de la niște intrări logice valide, fiecare element de circuit trebuie să producă ieșiri valide din punct de vedere logic

- Trebuie să folosim o gamă restrânsă de tensiuni pentru a reprezenta valorile discrete

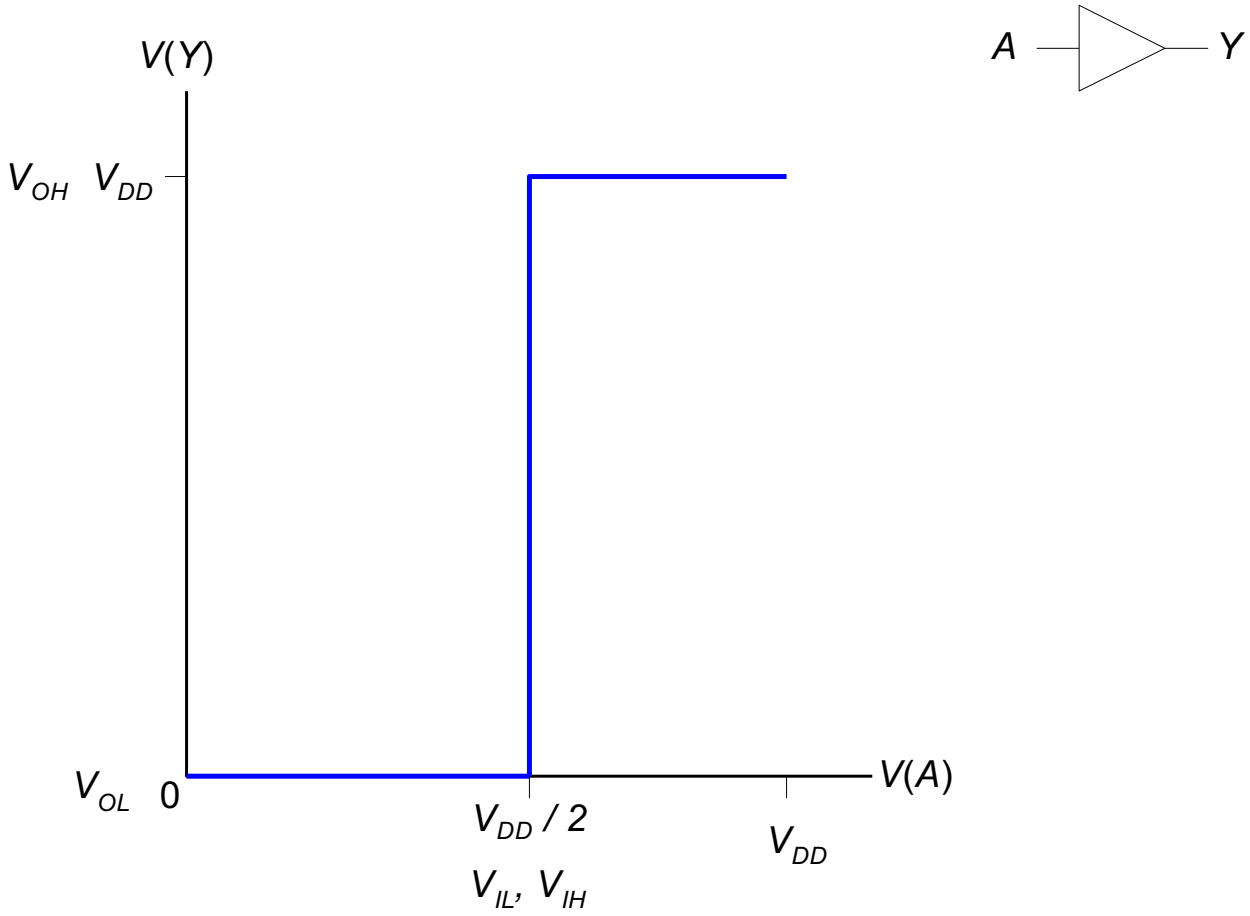
Niveluri logice



$$NM_H = V_{OH} - V_{IH} \qquad NM_L = V_{IL} - V_{OL}$$

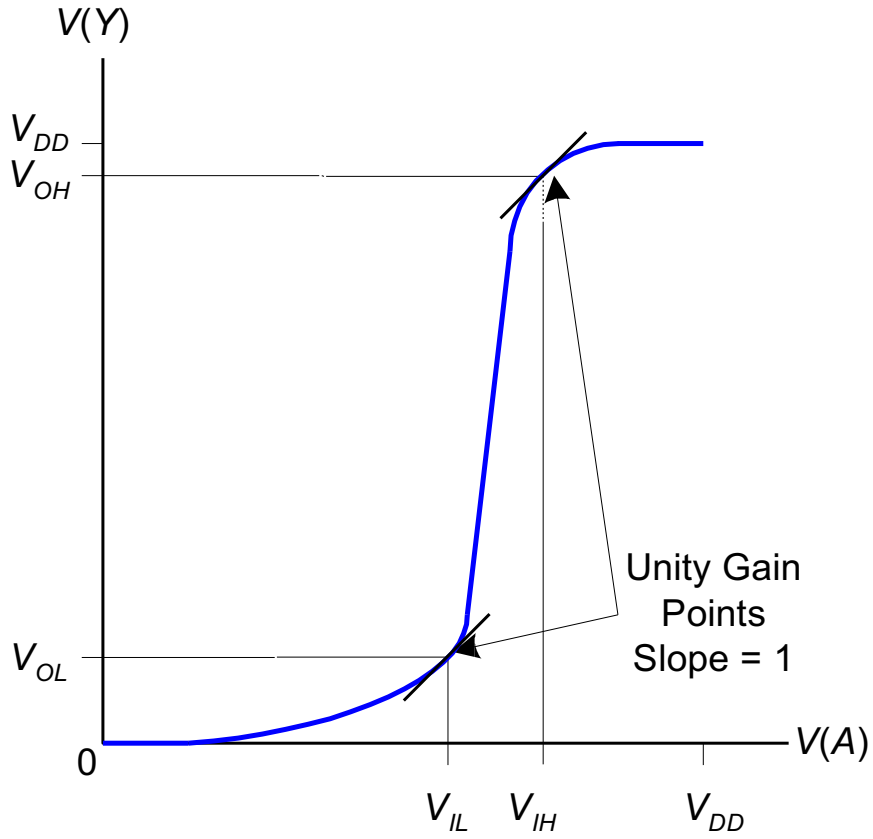
Caracteristici de transfer în c.c.

Buffer ideal:



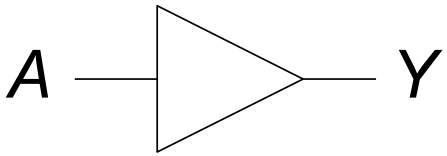
$NM_H = NM_L = V_{DD}/2$

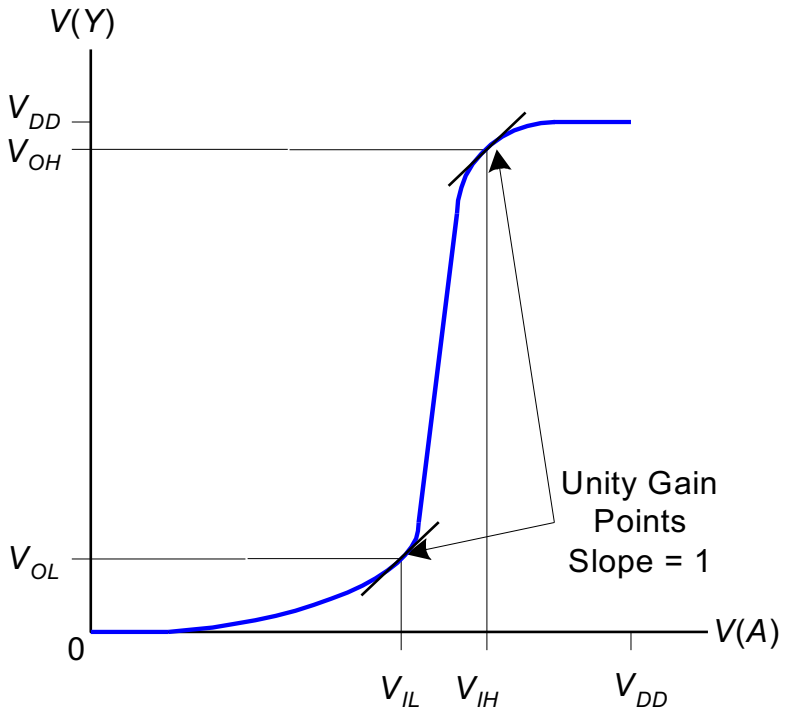
Buffer real:

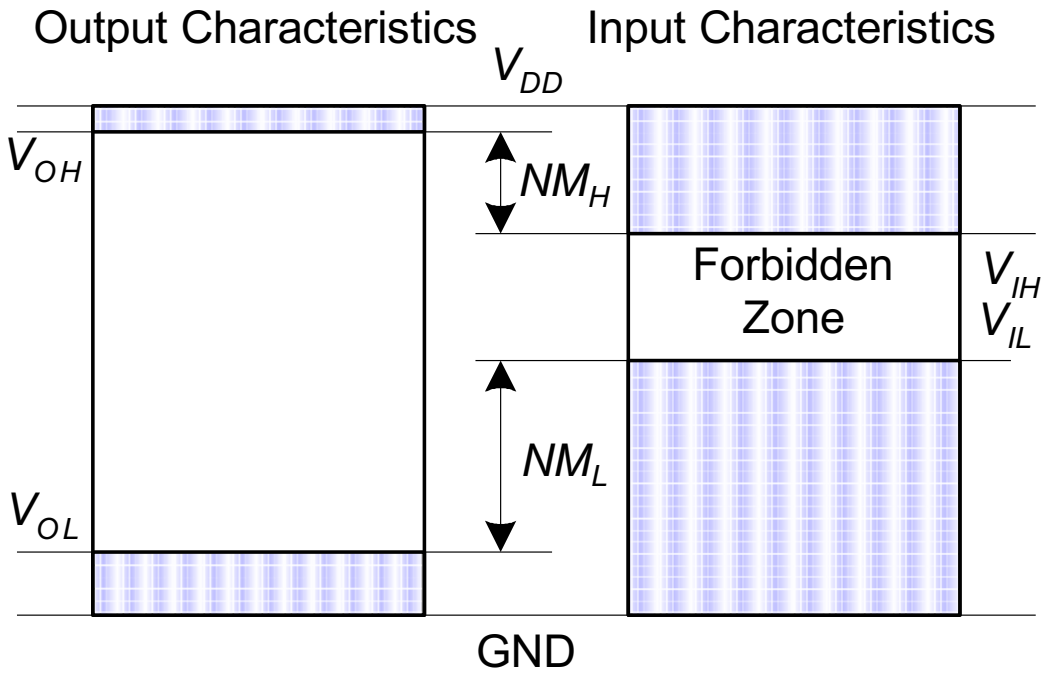


NM_H , $NM_L < V_{DD}/2$

Caracteristici de transfer în c.c.







Scalarea VDD

- In anii 1970 și 1980, V_{DD} = 5 V
- V_{DD} a scăzut
  - Tranzistoarele s-au micșorat
  - Consumă mai puțină putere
- 3.3 V, 2.5 V, 1.8 V, 1.5 V, 1.2 V, 1.0 V, …
- Aveți grijă când conectați componente ce funcționează la diferite niveluri de tensiune

Teorie alternativă:

Circuitele funcționează pe bază de fum magic!

Dovada:

- Dacă iese fumul magic, circuitul nu mai funcționează!

Diferite familii de circuite logice

Familie Logică	V_{DD}	V_{IL}	V_{IH}	V_{OL}	V_{OH}
TTL	5 (4.75 - 5.25)	0.8	2.0	0.4	2.4
CMOS	5 (4.5 - 6)	1.35	3.15	0.33	3.84
LVTTL	3.3 (3 - 3.6)	0.8	2.0	0.4	2.4
LVCMOS	3.3 (3 - 3.6)	0.9	1.8	0.36	2.7

Consumul de putere

- Putere = Energia consumată pe unitatea de timp
  - Consum de putere în regim dinamic
  - Consum de putere în regim static

Puterea dinamică

- **Puterea necesară pentru a încărca capacitățile parazite ale porților**

Energia necesară pentru a încărca o capacitate C, la V_{DD} este CV_{DD}^2

- Circuitul lucrează la frecvența f: tranzistoarele comută (din 1 în 0 și vice versa) la acea frecvență
- Condensatorul este încărcat de $f/2$ ori pe secundă (descărcarea din 1 în 0 este gratis)

Puterea dinamică: $P_{dynamic} = \frac{1}{2} f C V_{DD}^2$

Puterea statică

- Puterea consumată când nici o poartă nu comută
- Cauzată de *curentul de mers în gol*, I_{DD} (numit și curent de *leakage*)

Puterea statică: $P_{static} = I_{DD}V_{DD}$

Exemplu de calcul consum putere

- Estimați consumul de putere pentru un calculator portabil cu următoarele specificații:
  - V_{DD} = 1.2 V
  - C = 20 nF
  - f = 1 GHz
  - I_{DD} = 20 mA

$$P = \tfrac{1}{2}CV_{DD}^2f + I_{DD}V_{DD}$$

$$= \tfrac{1}{2}(20\text{ nF})(1.2\text{ V})^2(1\text{ GHz}) + (20\text{ mA})(1.2\text{ V})$$

$$= \mathbf{14.4\text{ W}}$$

Acknowledgements

- Aceste slide-uri conțin materiale aparținând:
  - Arvind (MIT)
  - Krste Asanovic (MIT/UCB)
  - Joel Emer (Intel/MIT)
  - James Hoe (CMU)
  - John Kubiatowicz (UCB)
  - David Patterson (UCB)
  - Behrooz Parhami (UCSB)

- MIT material derived from course 6.823
- UCB material derived from course CS252