

ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ VLSI

Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων



Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής



Κεφάλαιο 1^ο

Γ. Τσατούχας



ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ VLSI

Διάρθρωση

1. Άλγεβρα Boole – Χάρτης Karnaugh
2. MOS τρανζίστορ
3. Συνδεσμολογία τρανζίστορ
4. CMOS λογική



VLSI Systems
and Computer Architecture Lab

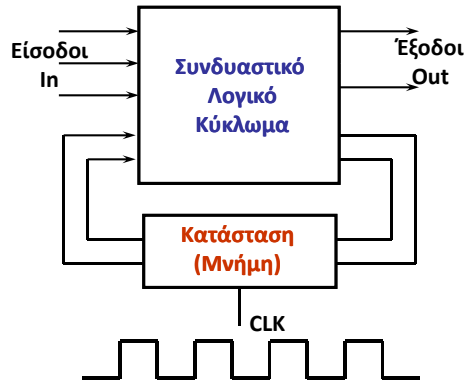
CMOS Κυκλώματα

2

Συνδυαστική και Ακολουθιακή Λογική



Συνδυαστική Λογική
 έξοδοι = $f(\text{εισόδων})$



Ακολουθιακή Λογική
 έξοδοι = $f(\text{εισόδων, κατάστασης})$



Άλγεβρα Boole (I)

Αxiώματα και Θεωρήματα

$$x + 0 = x$$

$$x \cdot 1 = x$$

$$x + \bar{x} = 1$$

$$x \cdot \bar{x} = 0$$

$$x + x = x$$

$$x \cdot x = x$$

$$x + 1 = 1$$

$$x \cdot 0 = 0$$

$$=$$

$$x = x$$

Αντιμεταθετική: $x + y = y + x$

$$x \cdot y = y \cdot x$$

Προσεταιριστική: $x + (y + z) = (x + y) + z$

$$x \cdot (y \cdot z) = (x \cdot y) \cdot z$$

Επιμεριστική: $x(y + z) = xy + xz$

$$x + (y \cdot z) = (x + y) \cdot (x + z)$$

De Morgan: $\overline{x + y} = \bar{x} \cdot \bar{y}$

$$\overline{x \cdot y} = \bar{x} + \bar{y}$$

$$x + xy = x$$

$$x \cdot (x + y) = x$$



Άλγεβρα Boole (II)

Ελαχιστόροι και Μεγιστόροι

$x y z$	<i>Ελαχιστόροι</i>	<i>Μεγιστόροι</i>
000	$\bar{x} \cdot \bar{y} \cdot \bar{z}$	$x + y + z$
001	$\bar{x} \cdot \bar{y} \cdot z$	$x + y + \bar{z}$
010	$\bar{x} \cdot y \cdot \bar{z}$	$x + \bar{y} + z$
011	$\bar{x} \cdot y \cdot z$	$x + \bar{y} + \bar{z}$
100	$x \cdot \bar{y} \cdot \bar{z}$	$\bar{x} + y + z$
101	$x \cdot \bar{y} \cdot z$	$\bar{x} + y + \bar{z}$
110	$x \cdot y \cdot \bar{z}$	$\bar{x} + \bar{y} + z$
111	$x \cdot y \cdot z$	$\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}$

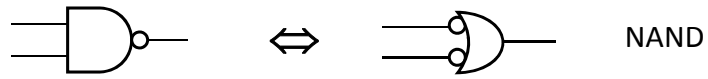


Λογικές Πύλες

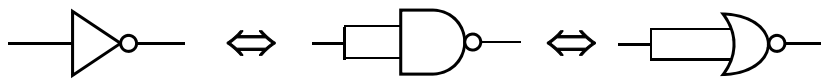
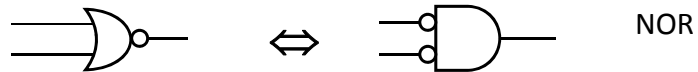
<p>AND</p> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="text-align: right; margin-right: 5px;">x</div> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: left; margin-left: 5px;">$F = x \cdot y$</div> </div> <table style="margin-left: 20px; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">$x y$</td><td style="padding: 2px 5px;">F</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0 0</td><td style="padding: 2px 5px;">0</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0 1</td><td style="padding: 2px 5px;">0</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1 0</td><td style="padding: 2px 5px;">0</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1 1</td><td style="padding: 2px 5px;">1</td></tr> </table>	$x y$	F	0 0	0	0 1	0	1 0	0	1 1	1	<p>NAND</p> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="text-align: right; margin-right: 5px;">x</div> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: left; margin-left: 5px;">$F = \overline{x \cdot y}$</div> </div> <table style="margin-left: 20px; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">$x y$</td><td style="padding: 2px 5px;">F</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0 0</td><td style="padding: 2px 5px;">1</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0 1</td><td style="padding: 2px 5px;">1</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1 0</td><td style="padding: 2px 5px;">1</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1 1</td><td style="padding: 2px 5px;">0</td></tr> </table>	$x y$	F	0 0	1	0 1	1	1 0	1	1 1	0
$x y$	F																				
0 0	0																				
0 1	0																				
1 0	0																				
1 1	1																				
$x y$	F																				
0 0	1																				
0 1	1																				
1 0	1																				
1 1	0																				
<p>OR</p> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="text-align: right; margin-right: 5px;">x</div> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: left; margin-left: 5px;">$F = x + y$</div> </div> <table style="margin-left: 20px; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">$x y$</td><td style="padding: 2px 5px;">F</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0 0</td><td style="padding: 2px 5px;">0</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0 1</td><td style="padding: 2px 5px;">1</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1 0</td><td style="padding: 2px 5px;">1</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1 1</td><td style="padding: 2px 5px;">1</td></tr> </table>	$x y$	F	0 0	0	0 1	1	1 0	1	1 1	1	<p>NOR</p> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="text-align: right; margin-right: 5px;">x</div> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: left; margin-left: 5px;">$F = \overline{x + y}$</div> </div> <table style="margin-left: 20px; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">$x y$</td><td style="padding: 2px 5px;">F</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0 0</td><td style="padding: 2px 5px;">1</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0 1</td><td style="padding: 2px 5px;">0</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1 0</td><td style="padding: 2px 5px;">0</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1 1</td><td style="padding: 2px 5px;">0</td></tr> </table>	$x y$	F	0 0	1	0 1	0	1 0	0	1 1	0
$x y$	F																				
0 0	0																				
0 1	1																				
1 0	1																				
1 1	1																				
$x y$	F																				
0 0	1																				
0 1	0																				
1 0	0																				
1 1	0																				
<p>NOT</p> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="text-align: right; margin-right: 5px;">x</div> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: left; margin-left: 5px;">$F = \bar{x}$</div> </div> <table style="margin-left: 20px; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">x</td><td style="padding: 2px 5px;">F</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0</td><td style="padding: 2px 5px;">1</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1</td><td style="padding: 2px 5px;">0</td></tr> </table>	x	F	0	1	1	0	<p>XOR</p> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="text-align: right; margin-right: 5px;">x</div> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: left; margin-left: 5px;">$F = x \oplus y$</div> </div> <table style="margin-left: 20px; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">$x y$</td><td style="padding: 2px 5px;">F</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0 0</td><td style="padding: 2px 5px;">0</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0 1</td><td style="padding: 2px 5px;">1</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1 0</td><td style="padding: 2px 5px;">1</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1 1</td><td style="padding: 2px 5px;">0</td></tr> </table>	$x y$	F	0 0	0	0 1	1	1 0	1	1 1	0				
x	F																				
0	1																				
1	0																				
$x y$	F																				
0 0	0																				
0 1	1																				
1 0	1																				
1 1	0																				
<p>BUFFER</p> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="text-align: right; margin-right: 5px;">x</div> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: left; margin-left: 5px;">$F = x$</div> </div> <table style="margin-left: 20px; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">x</td><td style="padding: 2px 5px;">F</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0</td><td style="padding: 2px 5px;">0</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1</td><td style="padding: 2px 5px;">1</td></tr> </table>	x	F	0	0	1	1	<p>XNOR</p> <div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="text-align: right; margin-right: 5px;">x</div> <div style="text-align: center;"> </div> <div style="text-align: left; margin-left: 5px;">$F = \overline{x \oplus y}$</div> </div> <table style="margin-left: 20px; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">$x y$</td><td style="padding: 2px 5px;">F</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0 0</td><td style="padding: 2px 5px;">1</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0 1</td><td style="padding: 2px 5px;">0</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1 0</td><td style="padding: 2px 5px;">0</td></tr> <tr><td style="border-right: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1 1</td><td style="padding: 2px 5px;">1</td></tr> </table>	$x y$	F	0 0	1	0 1	0	1 0	0	1 1	1				
x	F																				
0	0																				
1	1																				
$x y$	F																				
0 0	1																				
0 1	0																				
1 0	0																				
1 1	1																				



Ισοδυναμίες Πυλών



De Morgan



Οικουμενικότητα των πυλών NAND και NOR
NAND και NOR δυϊκές πύλες



Χάρτης Karnaugh

Έστω η συνάρτηση:

$$F = \overline{(A \cdot B) + (C \cdot D)}$$

Χάρτης Karnaugh

F		AB			
		00	01	11	10
CD	00	1	1	0	1
	01	1	1	0	1
	11	0	0	0	0
	10	1	1	0	1

Πίνακας Αληθείας

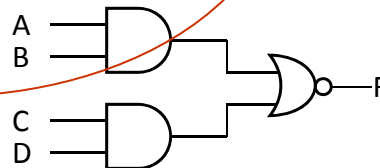
A	B	C	D	F
0	0	0	0	1
0	0	0	1	1
0	0	1	0	1
0	0	1	1	0
0	1	0	0	1
0	1	0	1	1
0	1	1	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	0	1	1
1	0	1	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	0

$$F = \overline{A \cdot C} + \overline{A \cdot D} + \overline{B \cdot C} + \overline{B \cdot D}$$

ή

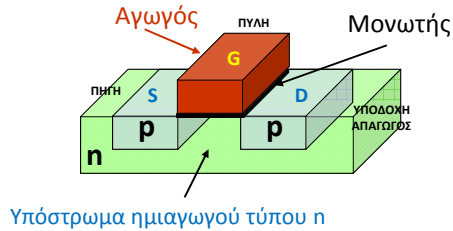
$$F = (\overline{A} + \overline{B}) \cdot (\overline{C} + \overline{D})$$

$$\overline{F} = (A \cdot B) + (C \cdot D)$$

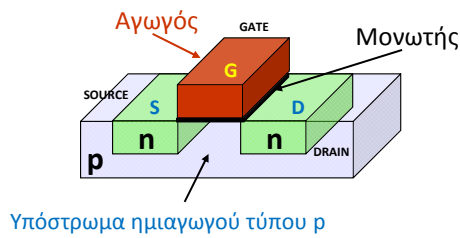


Το MOS Τρανζίστορ

Δισδιάστατο (planar) MOS τρανζίστορ



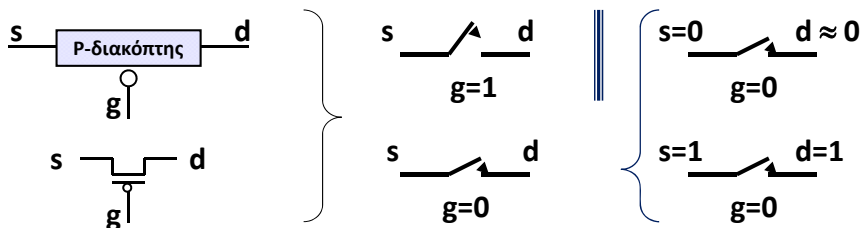
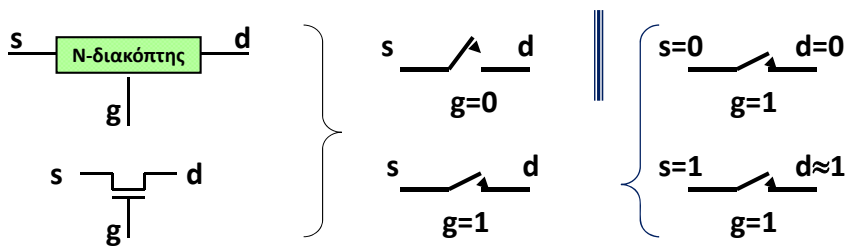
pMOS τρανζίστορ



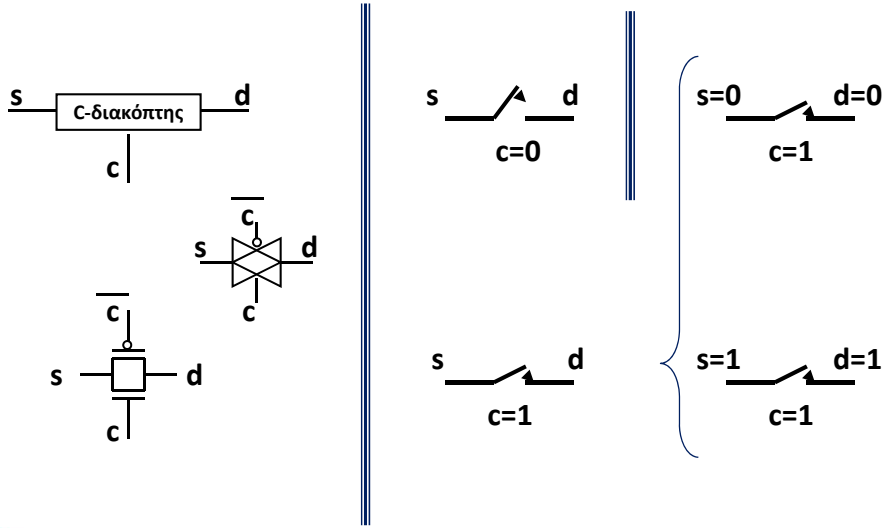
nMOS τρανζίστορ



Το MOS Τρανζίστορ ως Διακόπτης

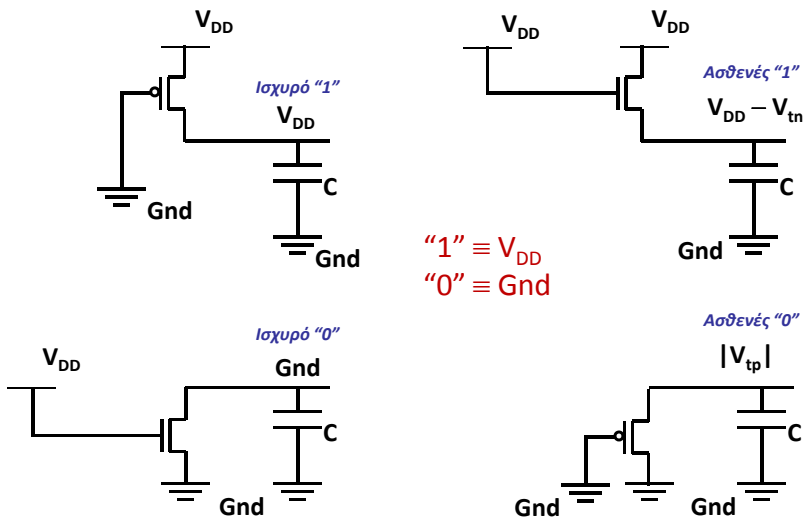


Ο Συμπληρωματικός Διακόπτης

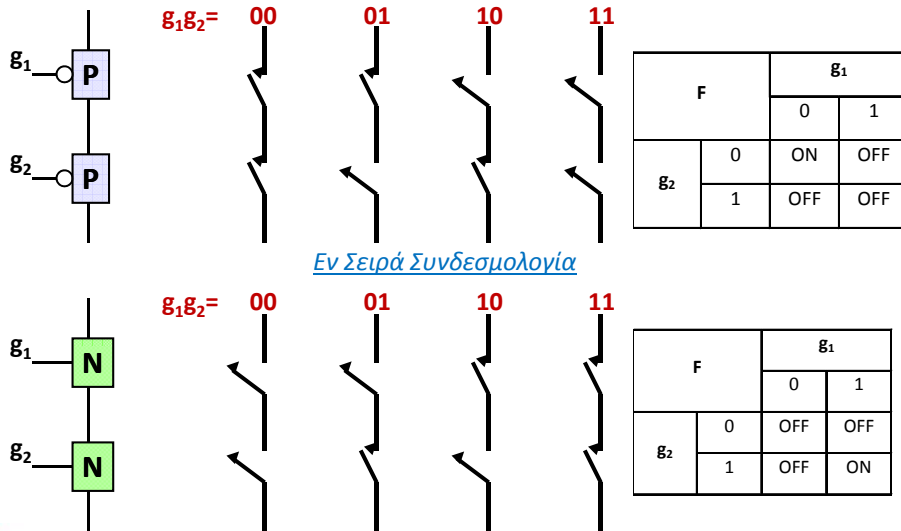


Επίδραση της Τάσης Κατωφλίου V_t

Η τάση κατωφλίου αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος του τρανζιστορ όπως θα δούμε αργότερα.



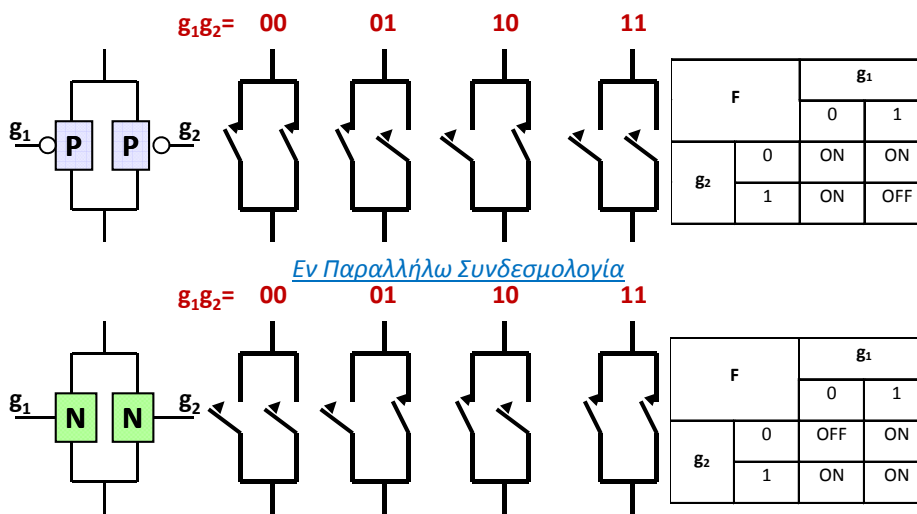
Συνδεσμολογίες Τρανζίστορ (I)



CMOS Κυκλώματα

13

Συνδεσμολογίες Τρανζίστορ (II)

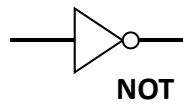
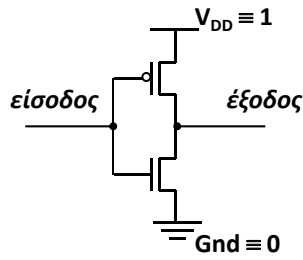


CMOS Κυκλώματα

14

Η CMOS Λογική

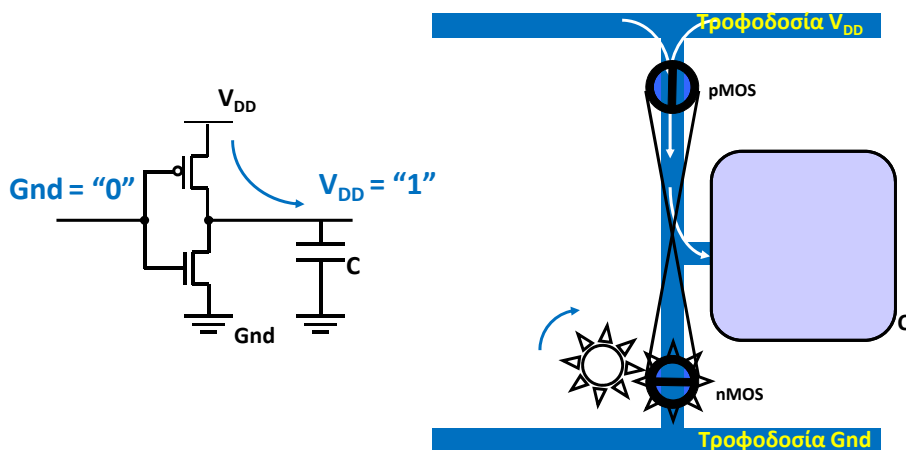
Αναστροφέας - Πύλη NOT



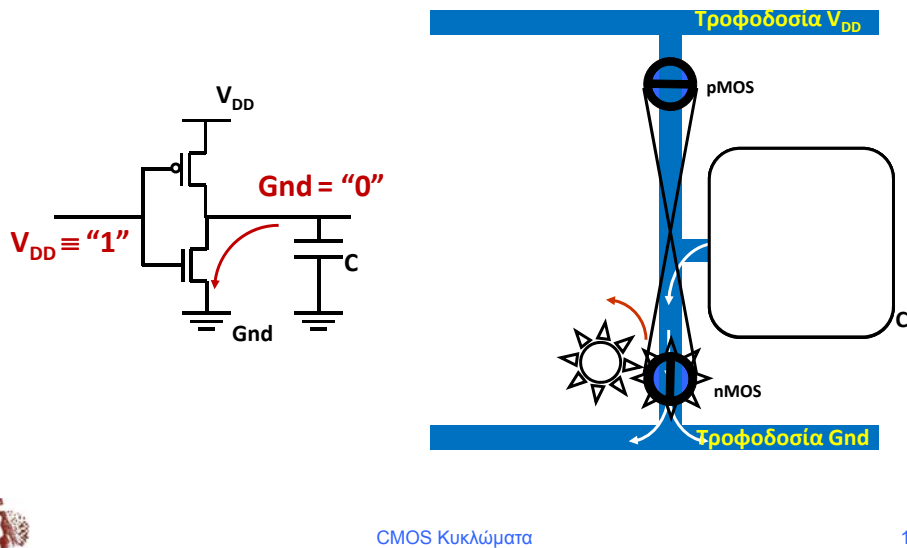
NOT



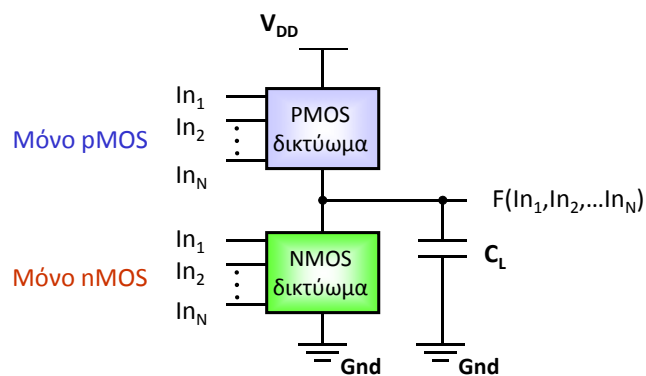
Μηχανικό Ισοδύναμο (I)



Μηχανικό Ισοδύναμο (II)



Στατική Πύλη CMOS



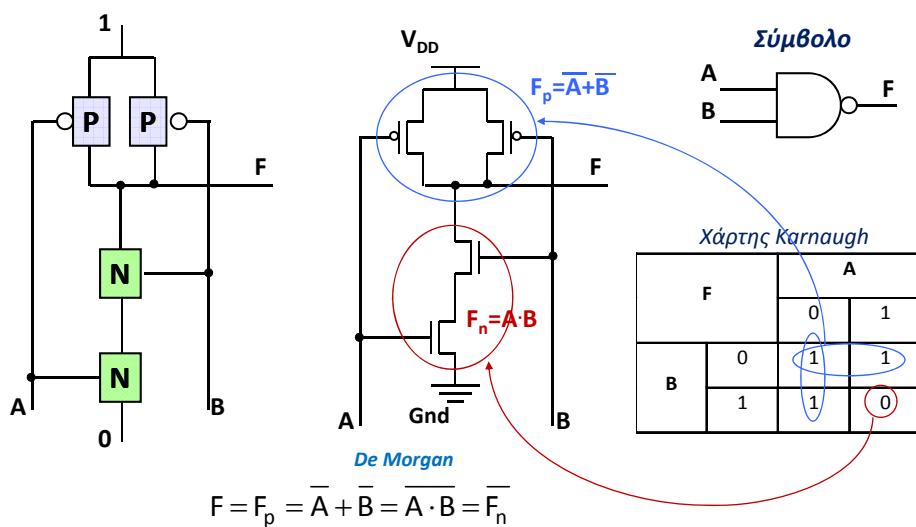
Τα PMOS και NMOS λογικά δικτύωματα είναι **συμπληρωματικά** μεταξύ τους. Μόνο ένα από τα δύο δικτύωματα άγει όταν το κύκλωμα είναι σε κατάσταση ηρεμίας

Στατικά Κυκλώματα CMOS

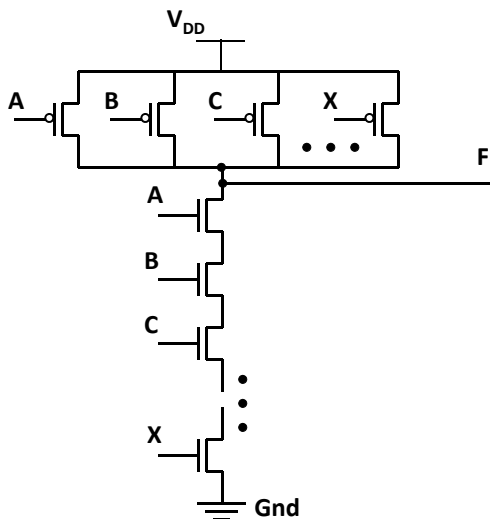
- Σε κάθε χρονική στιγμή (εκτός των περιόδων όπου οι εισοδοί αλλάζουν τιμές) η έξοδος μιας CMOS πύλης είναι πάντα συνδεδεμένη είτε με την τροφοδοσία V_{DD} είτε με την τροφοδοσία Gnd. Ποτέ, όταν ένα CMOS κύκλωμα είναι σε ηρεμία, δεν μπορεί να είναι βραχυκυκλωμένες μεταξύ τους οι τροφοδοσίες V_{DD} και Gnd.
- Η ανωτέρω σύνδεση πραγματοποιείται είτε μέσω του pMOS είτε μέσω του nMOS δικτύωματος αντίστοιχα. Τα δικτύωματα αυτά όταν άγουν συμπεριφέρονται ως μία αντίσταση χαμηλής τιμής. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δεν άγουν, η αντίστασή τους θεωρείται ιδανικά άπειρη.
- Εξαιρέσεις:
 - Υπάρχουν κυκλώματα όπου σε κάποια χρονικά διαστήματα κανένα δικτύωμα δεν άγει και η έξοδος είναι "αιωρούμενη" (*floating*).
 - Υπάρχουν κυκλώματα όπου σε κάποια χρονικά διαστήματα και τα δύο δικτύωματα άγουν ταυτόχρονα και η έξοδος είναι σε στάθμη "διαμάχης" (*contention*).



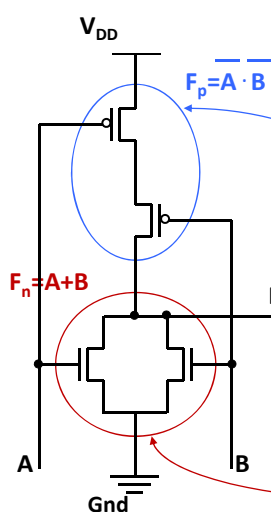
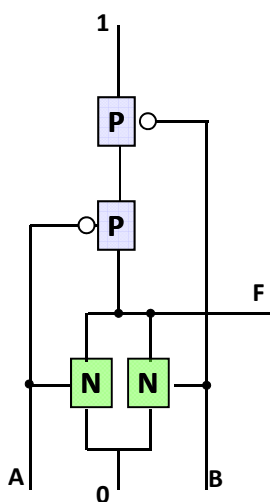
Η Πύλη NAND



Πύλη NAND Πολλαπλών Εισόδων



Η Πύλη NOR

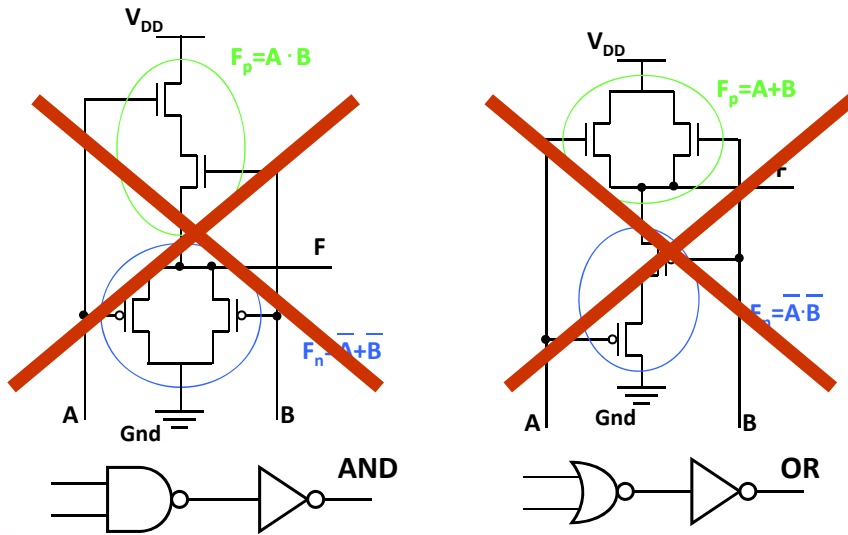


Χάρτης Karnaugh

F		A	
		0	1
B	0	1	0
	1	0	0



Οι Πύλες AND και OR



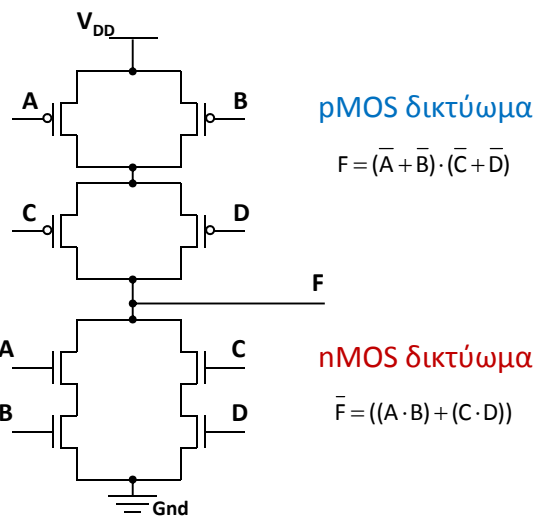
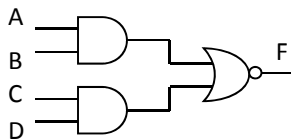
CMOS Κυκλώματα

23

Σύνθετες Πύλες (I)

Υλοποίηση της συνάρτησης:

$$F = \overline{((A \cdot B) + (C \cdot D))}$$



pMOS δικτύωμα

$$F = (\bar{A} + \bar{B}) \cdot (\bar{C} + \bar{D})$$

nMOS δικτύωμα

$$\bar{F} = ((A \cdot B) + (C \cdot D))$$

CMOS Κυκλώματα

24

Σύνθετες Πύλες (II)

Υλοποίηση της συνάρτησης:

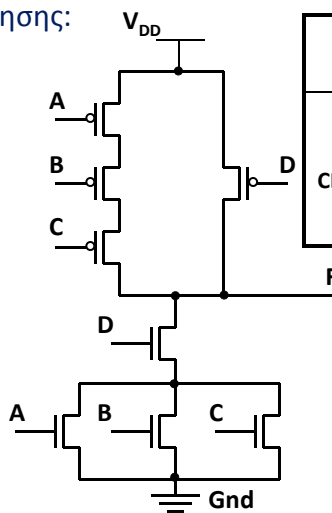
$$F = \overline{((A + B + C) \cdot D)}$$

ρMOS δικτύωμα

$$F = \overline{A \cdot B \cdot C + D}$$

ηMOS δικτύωμα

$$\overline{F} = (A + B + C) \cdot D$$



Χάρτης Karnaugh

F		AB			
		00	01	11	10
CD	00	1	1	1	1
	01	1	0	0	0
	11	0	0	0	0
	10	1	1	1	1



CMOS Κυκλώματα

25

Σύνθετες Πύλες (III)

Υλοποίηση της συνάρτησης:

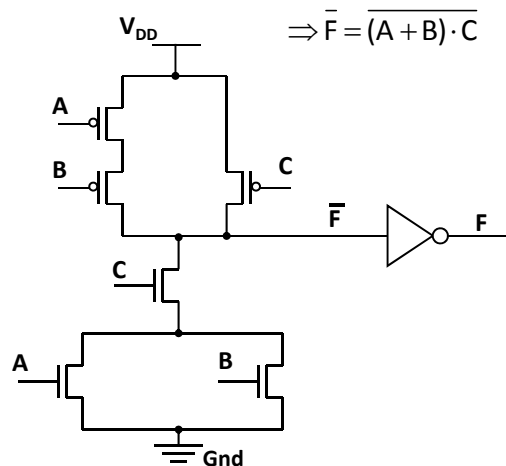
$$F = (A + B) \cdot C$$

ρMOS δικτύωμα

$$\overline{F} = \overline{A \cdot B + C}$$

ηMOS δικτύωμα

$$F = (A + B) \cdot C$$

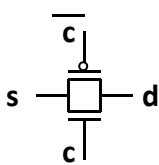
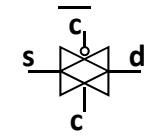


CMOS Κυκλώματα

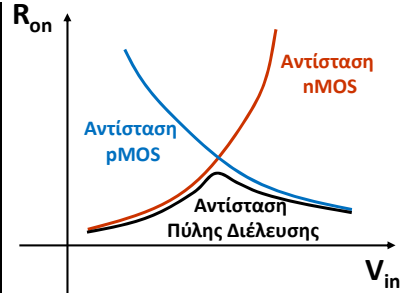
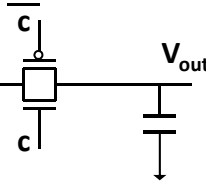
26

CMOS Πύλη Διέλευσης

Συμβολισμοί



C = '0'	nMOS off pMOS on $V_{in}='0', V_{out}='Z'$ $V_{in}='1', V_{out}='1'$
C = '1'	nMOS on pMOS off $V_{in}='0', V_{out}='0'$ $V_{in}='1', V_{out}='0'$

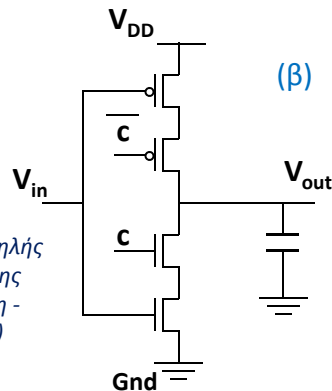
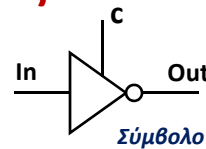
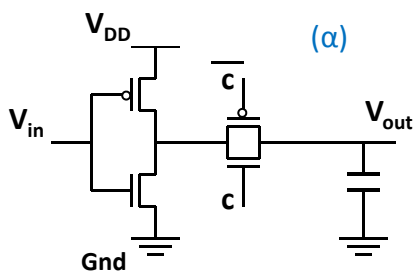


Z = κατάσταση υψηλής εμπέδησης ή αιώρησης (floating ή high-Z)

CMOS Κυκλώματα

27

Τρισταθής Αναστροφείας



Πίνακας Αληθείας

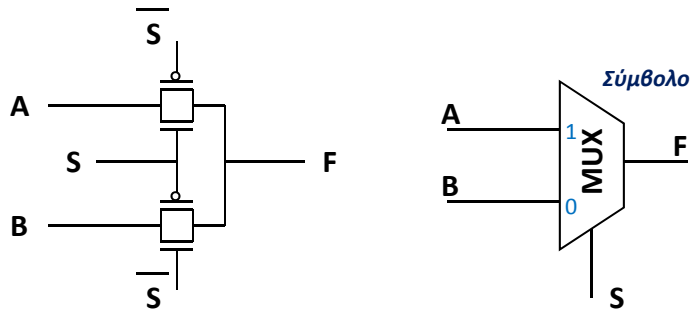
V_{in}	C	V_{out}
X	0	Z
0	1	1
1	1	0

Στάθμη Υψηλής Εμπέδησης - Αιώρηση - (high Z)

CMOS Κυκλώματα

28

Πολυπλέκτης



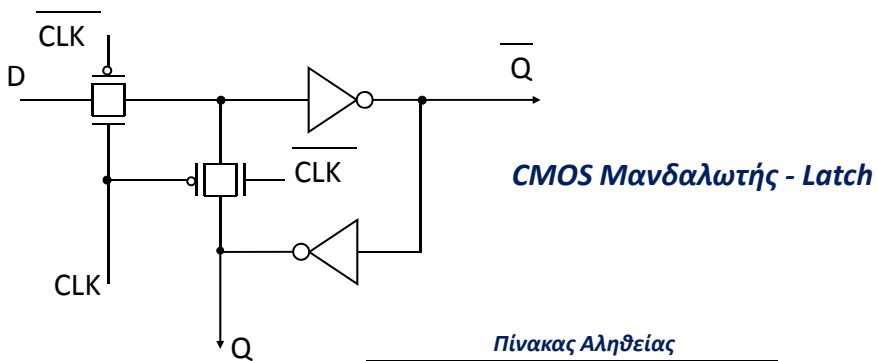
Πίνακας Αληθείας

A	B	S	F
X	0	0	0 (B)
X	1	0	1 (B)
0	X	1	0 (A)
1	X	1	1 (A)

CMOS Κυκλώματα

29

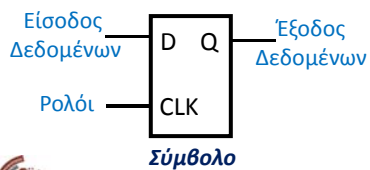
Μανδαλωτής



CMOS Μανδαλωτής - Latch

Πίνακας Αληθείας

D	CLK	Q	Q _{bar}
0	0	Μνήμη	
0	1	0	1
1	0	Μνήμη	
1	1	1	0



Στοιχείο Μνήμης

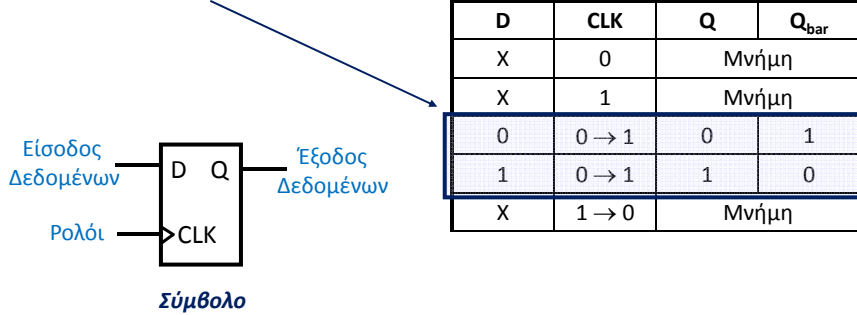
CMOS Κυκλώματα

30

To D Flip-Flop

Θετικά Ακμοπυροδότητο D Flip-Flop

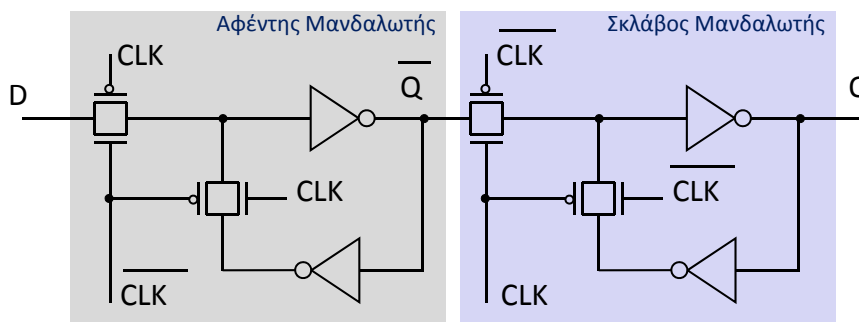
Πίνακας Αληθείας



D	CLK	Q	Q _{bar}
X	0	Μνήμη	
X	1	Μνήμη	
0	0 → 1	0	1
1	0 → 1	1	0
X	1 → 0	Μνήμη	



Σχεδίαση CMOS D Flip-Flop



CMOS Ακμοπυροδότητο D Στοιχείο Μνήμης
CMOS Edge Triggered D Flip-Flop



Λειτουργία D Flip-Flop

