



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικό και Καποδιστριακό  
Πανεπιστήμιο Αθηνών

HELLENIC REPUBLIC  
National and Kapodistrian  
University of Athens



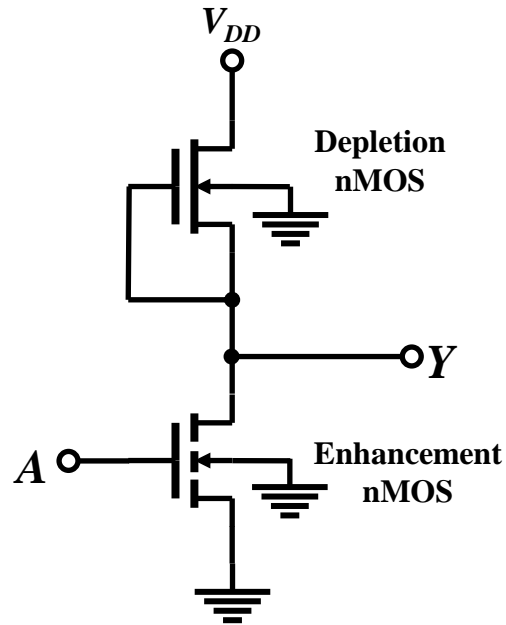
# ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ (VLSI)

*Ενότητα Β – Κεφάλαιο 4.*

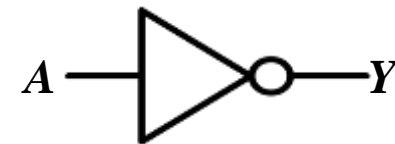
**ΨΗΦΙΑΚΑ Ο.Κ. ΜΟΣ**

*Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών*

# Δομικές Βαθμίδες MOS, ο αναστροφέας

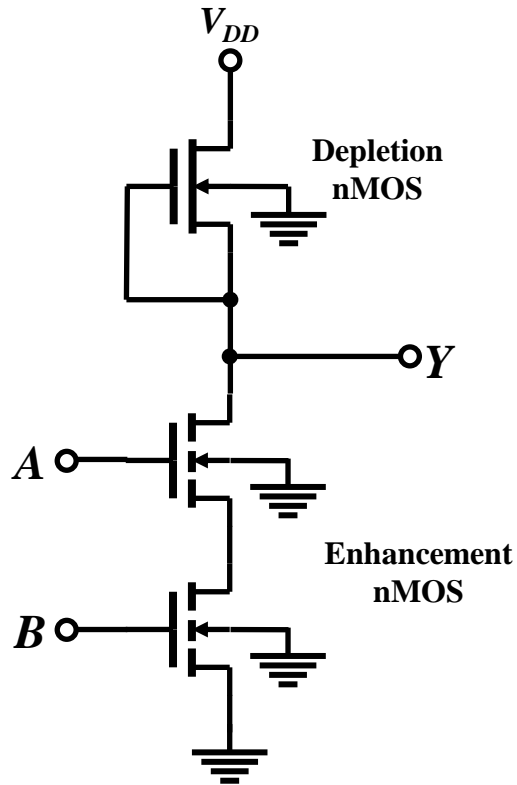


A	$Y = \bar{A}$
0	1
1	0



Τα ψηφιακά Ο.Κ. χρησιμοποιούν ως δομικά στοιχεία τις λογικές πύλες

# Δομικές Βαθμίδες MOS, πύλη NAND

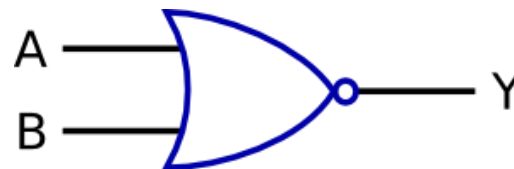
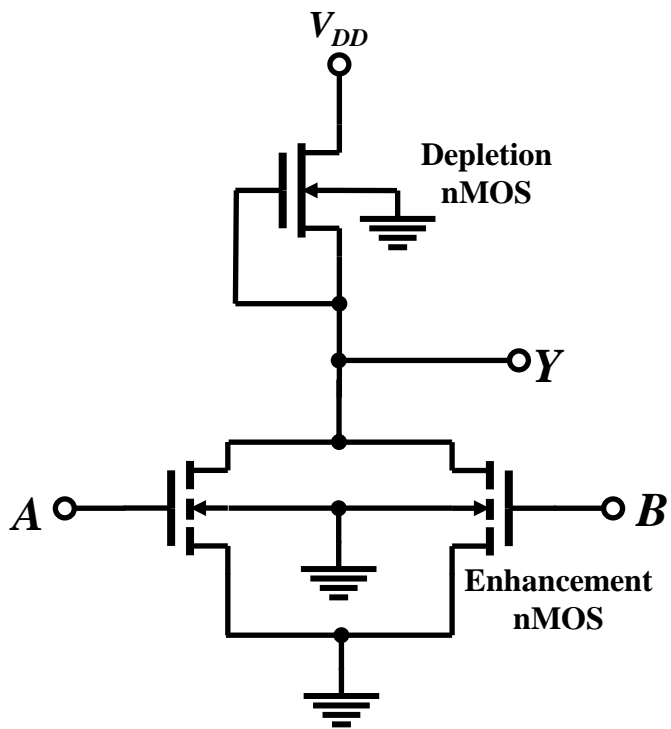


A	B	$Y = \overline{AB}$
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



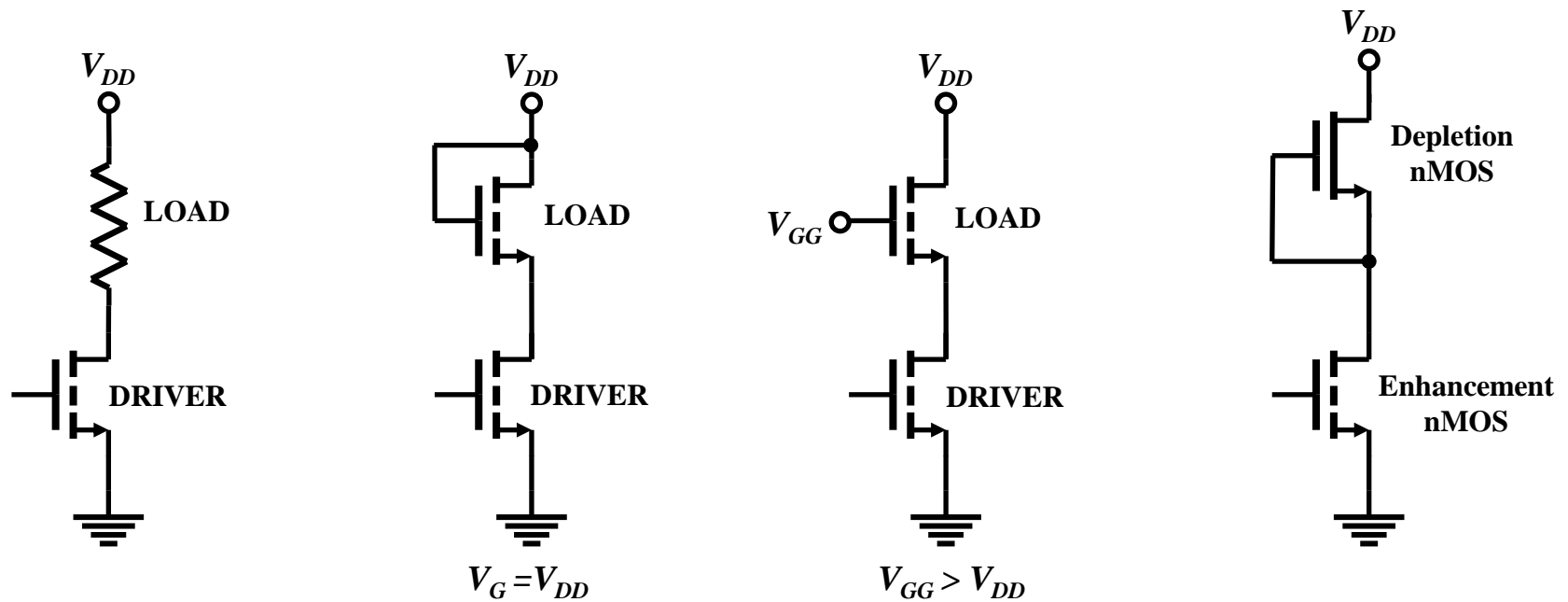
Οι λογικές πύλες στα ψηφιακά Ο.Κ. τεχνολογίας MOS συντίθενται αποκλειστικά από τρανζίστορ MOS.

# Δομικές Βαθμίδες MOS, πύλη NOR



A	B	$Y = \overline{A + B}$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

# Κυκλώματα αναστροφεία

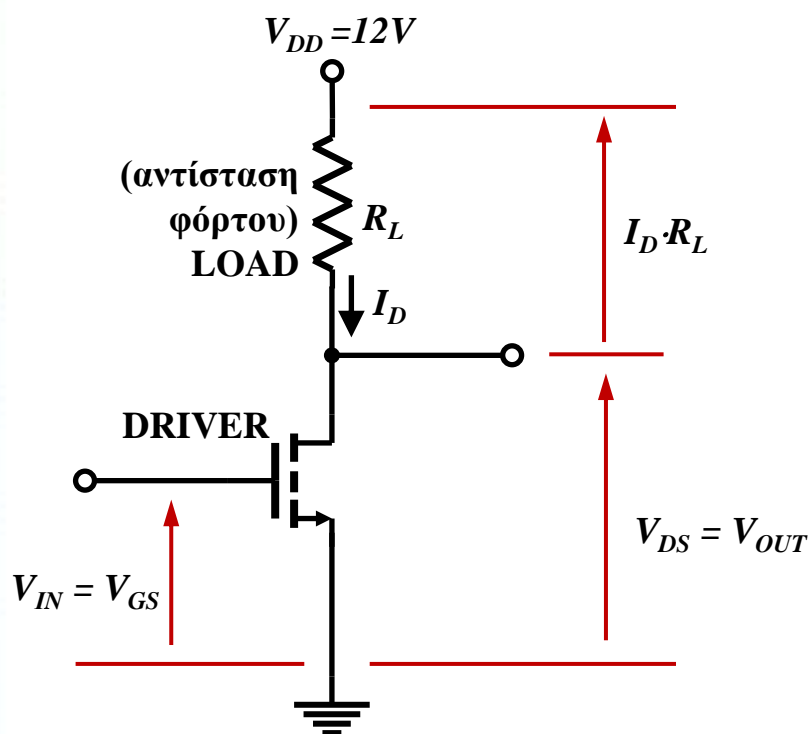


Η ανάλυση των τριών προηγούμενων λογικών πυλών ανάγεται, σ' αυτή του απλού αναστροφεία. (ο CMOS inverter αργότερα)

Η ανάλυση του αναστροφεία μπορεί να διαιρεθεί σε DC ανάλυση και μεταβατική (transient) ανάλυση.

# Αναστροφείας με ωμική αντίσταση ως φορτίο

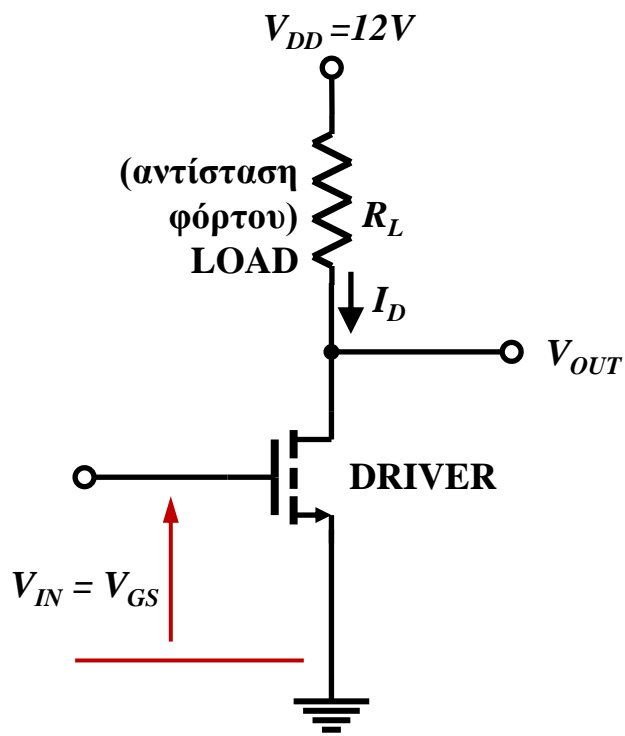
## Αναστροφείας με ωμική αντίσταση ως φορτίο



Όταν η  $V_{IN}$  μεταβάλλεται από 0 σε 1 ( $V_{DD}$ ), η έξοδος  $V_{DS}$  μεταβάλλεται από το 1 ( $V_{DD}$ ) στο 0 κατά μήκος της ευθείας φόρτου.

Όσο μεγαλύτερη είναι η  $R_L$ , τόσο μικρότερη θα είναι η στάθμη 0 της εξόδου, διότι η  $V_{OUT}$  είναι αποτέλεσμα διαίρεσης τάσης μεταξύ της  $R_L$  και της δυναμικής αντίστασης της οδηγού διάταξης.

## Αναστροφέας με ωμική αντίσταση ως φορτίο



Ο πιο απλός inverter.

Το φορτίο ή ο φόρτος είναι μια ωμική αντίσταση η  $R_L$  στο κύκλωμα.

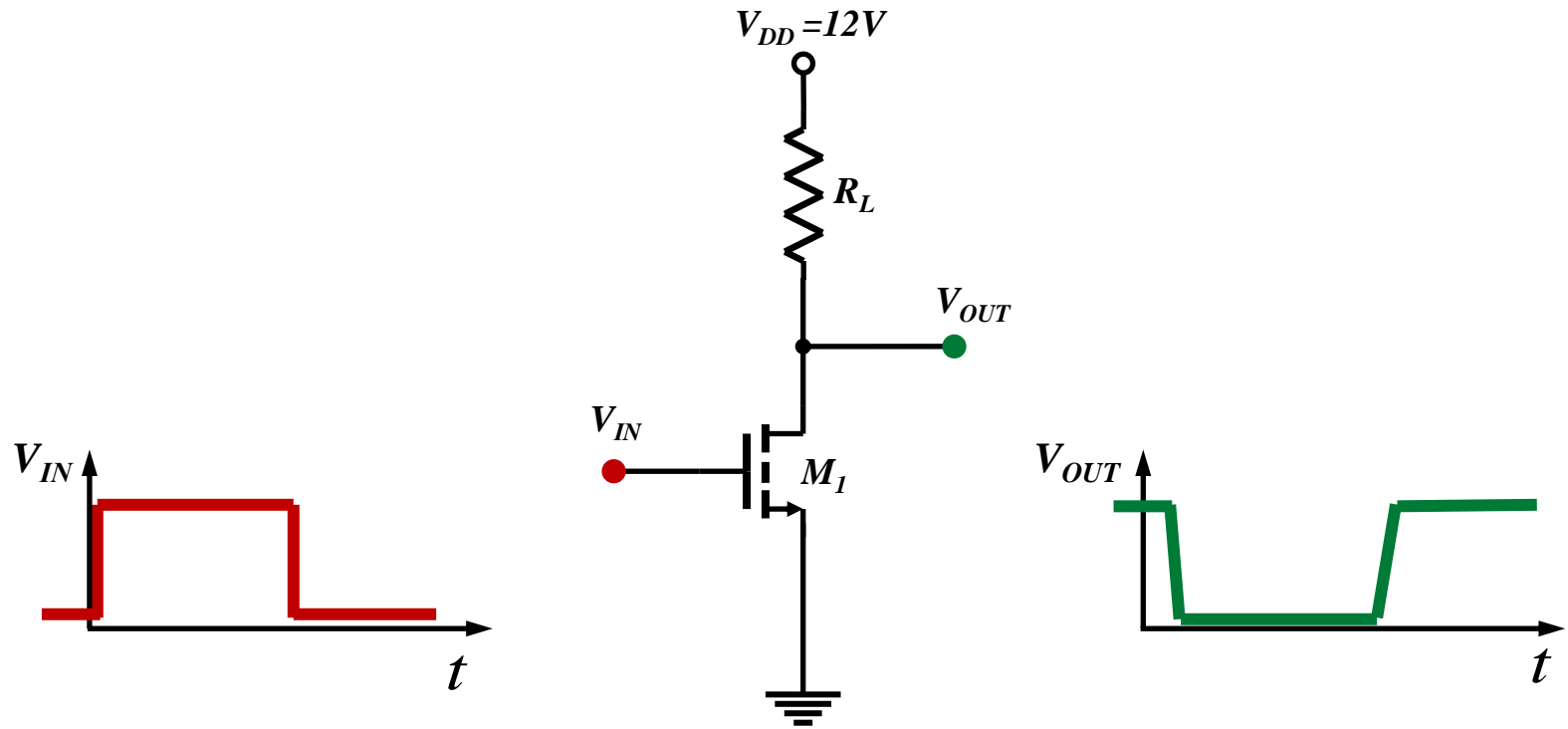
Όταν η είσοδος είναι «0» το nMOS δεν άγει και η έξοδος συνδέεται μέσω της  $R_L$  στην τροφοδοσία  $V_{DD}$ .

Όταν η είσοδος είναι «1» το nMOS άγει (ως βραχυκύκλωμα) και η έξοδος συνδέεται στη γη.

Στα ψηφιακά το λογικό «0» αντιστοιχεί στα 0V και το λογικό «1» σε αυτό το κύκλωμα αντιστοιχεί στην τροφοδοσία 12V



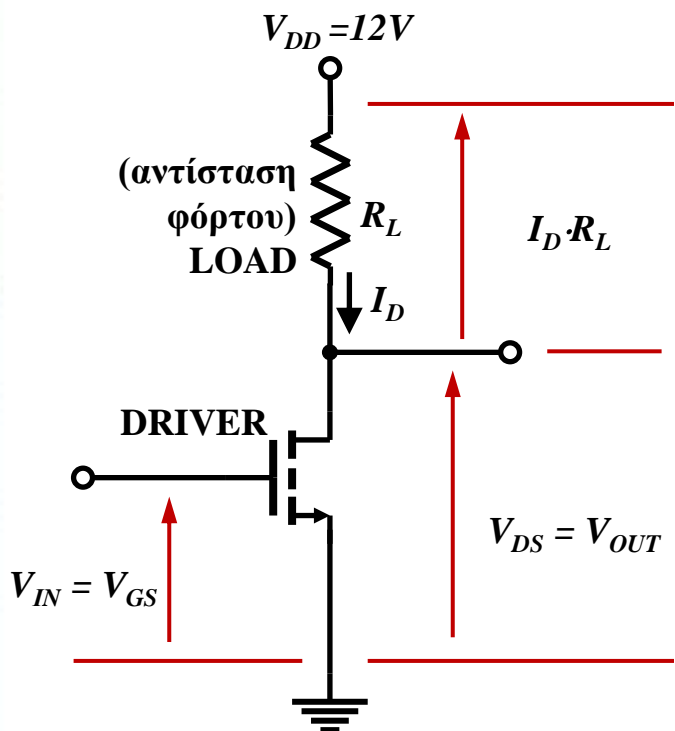
# Αναστροφέας με ωμική αντίσταση ως φορτίο



Όταν  $V_{IN} = \text{«0»}$  η έξοδος είναι  $V_{OUT} = \text{«1»}$

Όταν  $V_{IN} = \text{«1»}$  η έξοδος είναι  $V_{OUT} = \text{«0»}$

# Αναστροφείας με ωμική αντίσταση ως φορτίο



Το ρεύμα  $I_D$  του MOSFET μπορούμε να το υπολογίσουμε με δύο τρόπους:  
(α) από τις εξισώσεις:

$$I_D = K_n (V_{GS} - V_{tn})^2, \\ \text{αν } V_{DS} \geq V_{GS} - V_{tn}$$

και

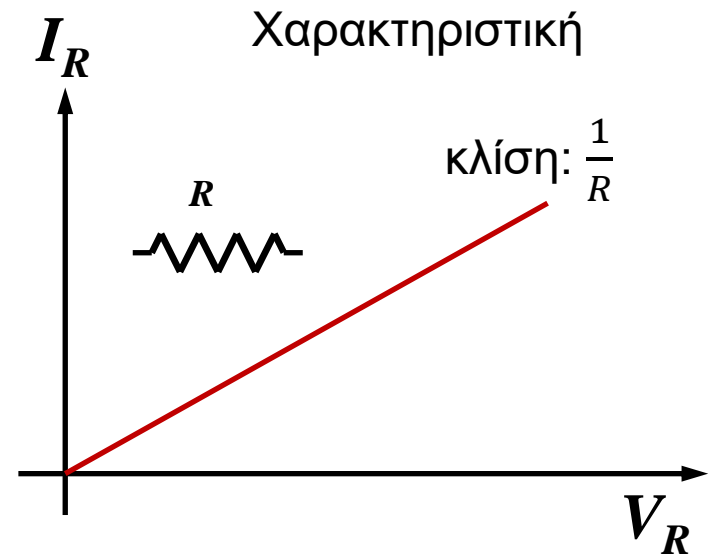
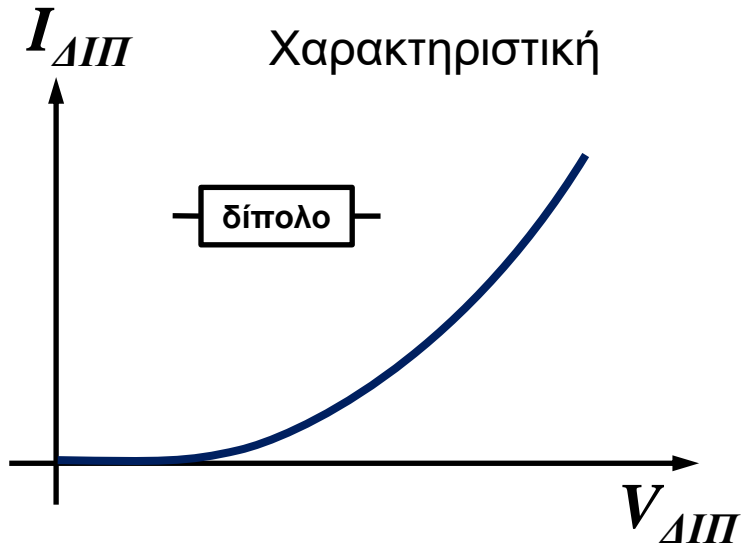
$$I_D = K_n (2(V_{GS} - V_{tn})V_{DS} - V_{DS}^2) \\ \text{αν } V_{DS} \leq V_{GS} - V_{tn}$$

**Συντελεστής  
Απολαβής:**

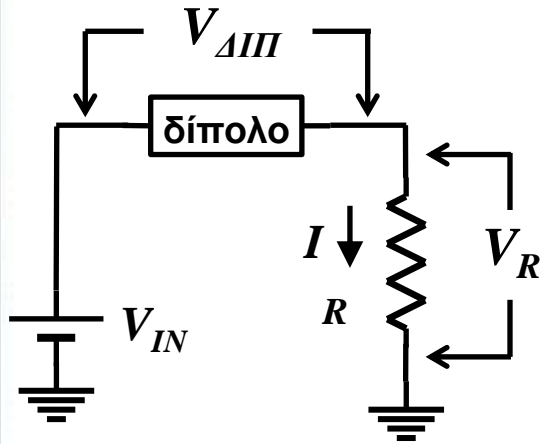
$$K_n = \frac{\mu_n \cdot \epsilon \cdot W}{2 \cdot t_{ox} \cdot L}$$

και (β) γραφικά.  
- Τι είναι το  $K_n$  ?

# Ευθεία φόρτου – Γραφική λύση



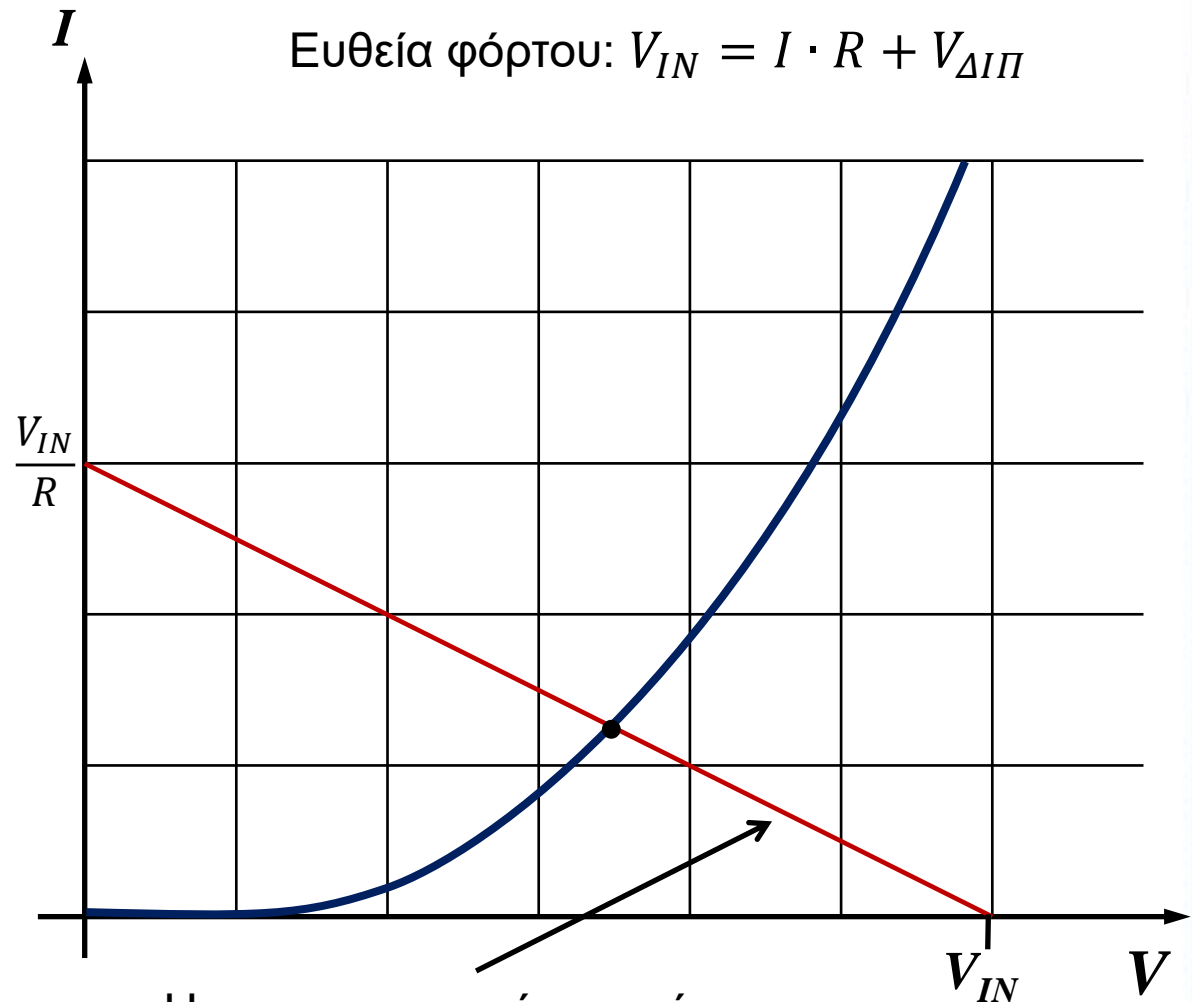
# Ευθεία φόρτου – Γραφική λύση



$$V_{IN} = V_{\Delta I \Pi} + V_R$$

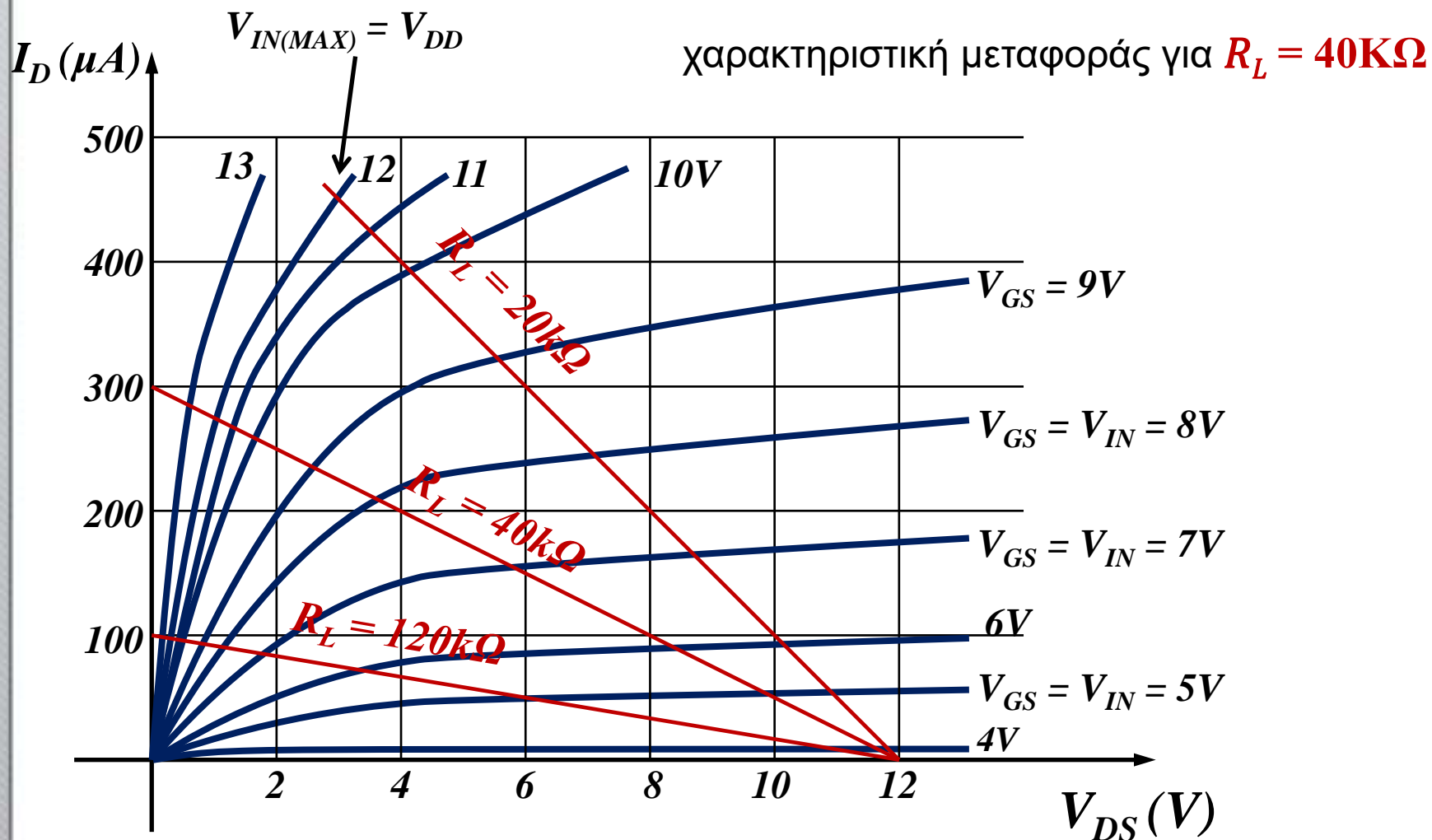
$$\text{Για } V_{\Delta I \Pi} = 0 \Rightarrow I = \frac{V_{IN}}{R}$$

$$\text{Για } V_{\Delta I \Pi} = V_{IN} \Rightarrow I_{MIN} = 0$$



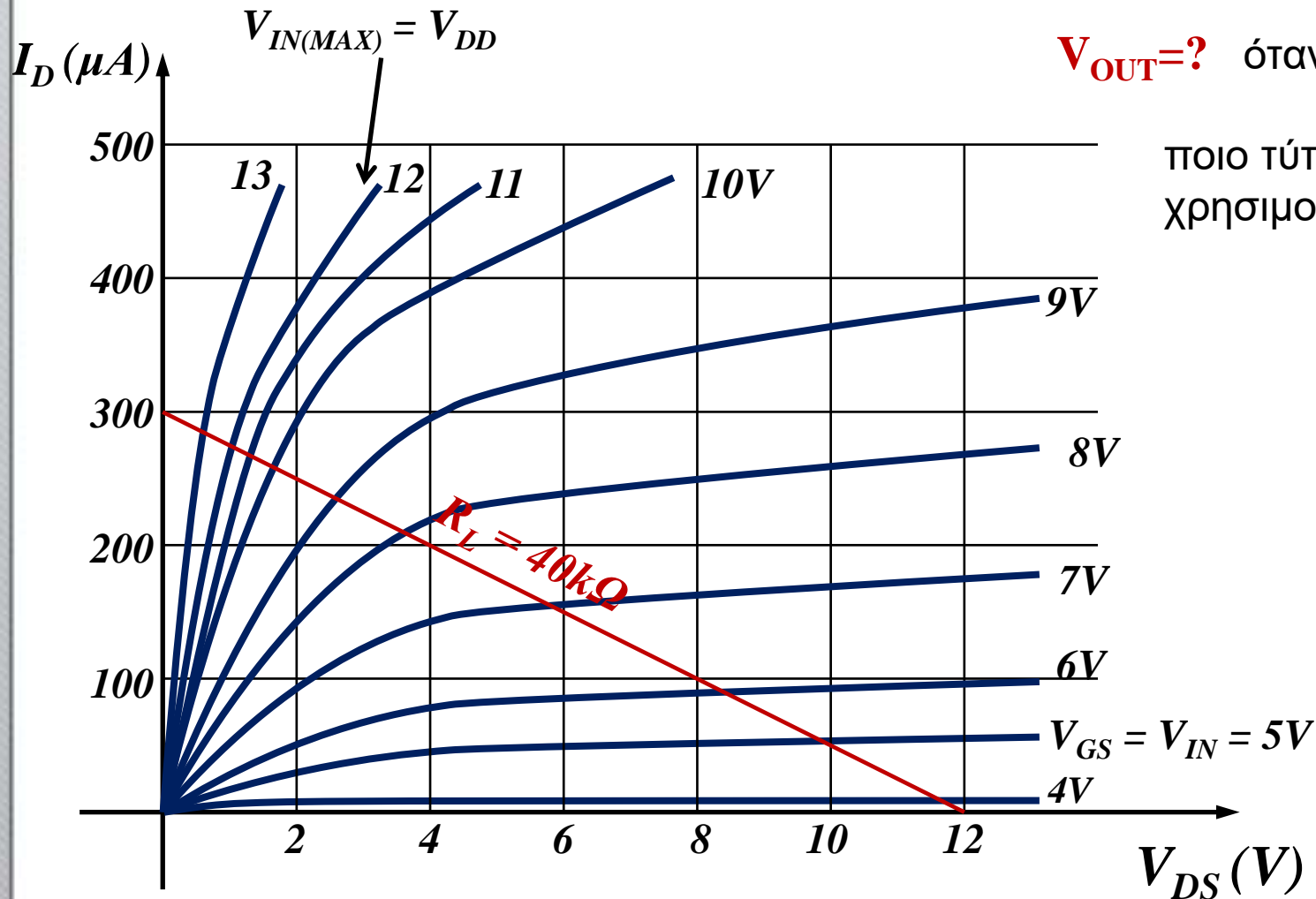
Η χαρακτηριστική του φόρτου  
σχεδιάζεται κατοπτρικά

# Αναστροφείας με ωμική αντίσταση ως φορτίο



Ευθεία φόρτου:  $V_{DD} = I_D R_L + V_{DS}$

# Αναστροφείας με ωμική αντίσταση ως φορτίο

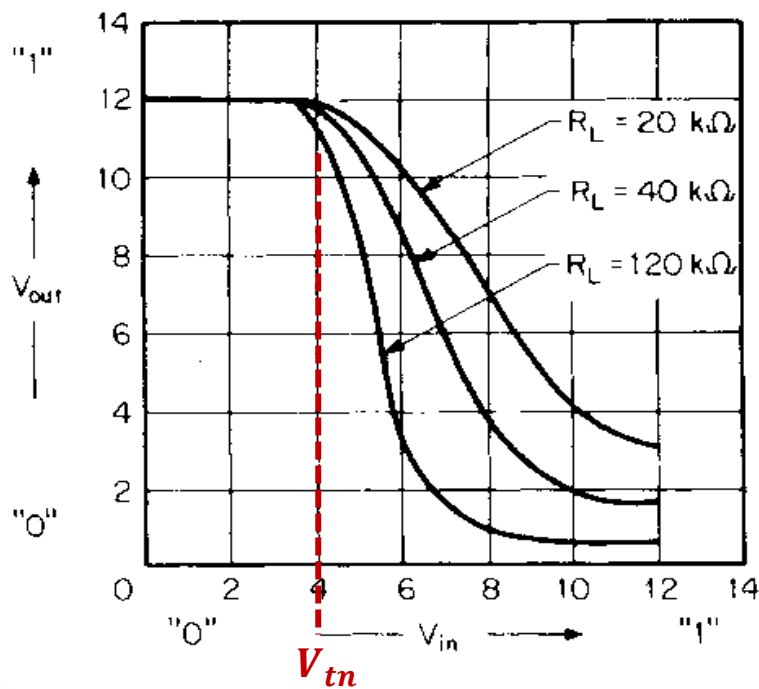


$V_{OUT}=?$  όταν  $V_{GS} = V_{DD}$

Ποιο τύπο θα χρησιμοποιήσουμε

Ευθεία φόρτου:  $V_{DD} = I_D R_L + V_{DS}$

## Αναστροφείας με ωμική αντίσταση ως φορτίο



Αν χαραχθεί η  $V_{OUT}$  σαν συνάρτηση της  $V_{IN}$  θα ληφθεί η χαρακτηριστική μεταφοράς.

Όταν η  $V_{IN}$  είναι κάτω από την τάση κατωφλίου  $V_T$ , η οδηγός διάταξη είναι σε αποκοπή και στην έξοδο παίρνουμε την τάση τροφοδοσίας.

Όσο μεγαλύτερη είναι η  $R_L$ , τόσο μικρότερη θα είναι η στάθμη 0 της εξόδου.

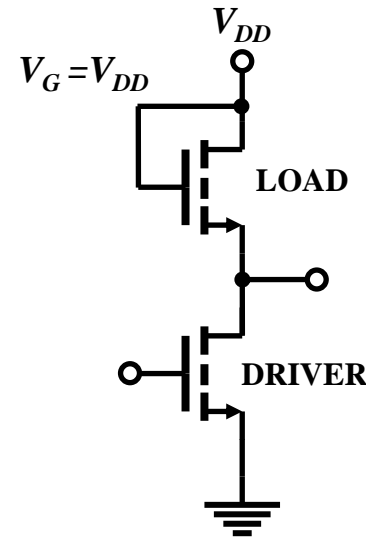
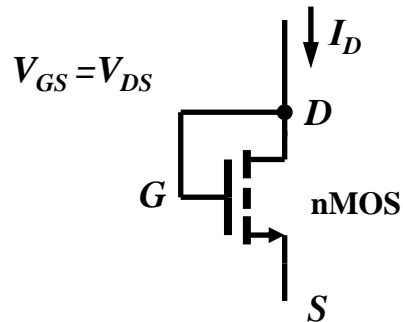
Για να βρούμε τη στάθμη 0 της τάσης εξόδου για δεδομένη  $R_L$  θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση:

$$I_D = K_n(2(V_{GS} - V_{tn})V_{DS} - V_{DS}^2)$$

# Αναστροφεάς με MOS έγχυσης στον κόρο ως φόρτο



# Αναστροφέας με MOS έγχυσης στον κόρο ως φόρτο



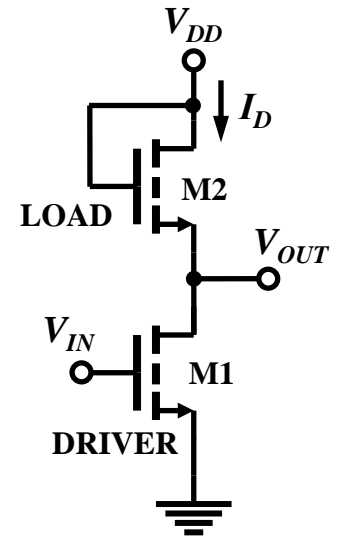
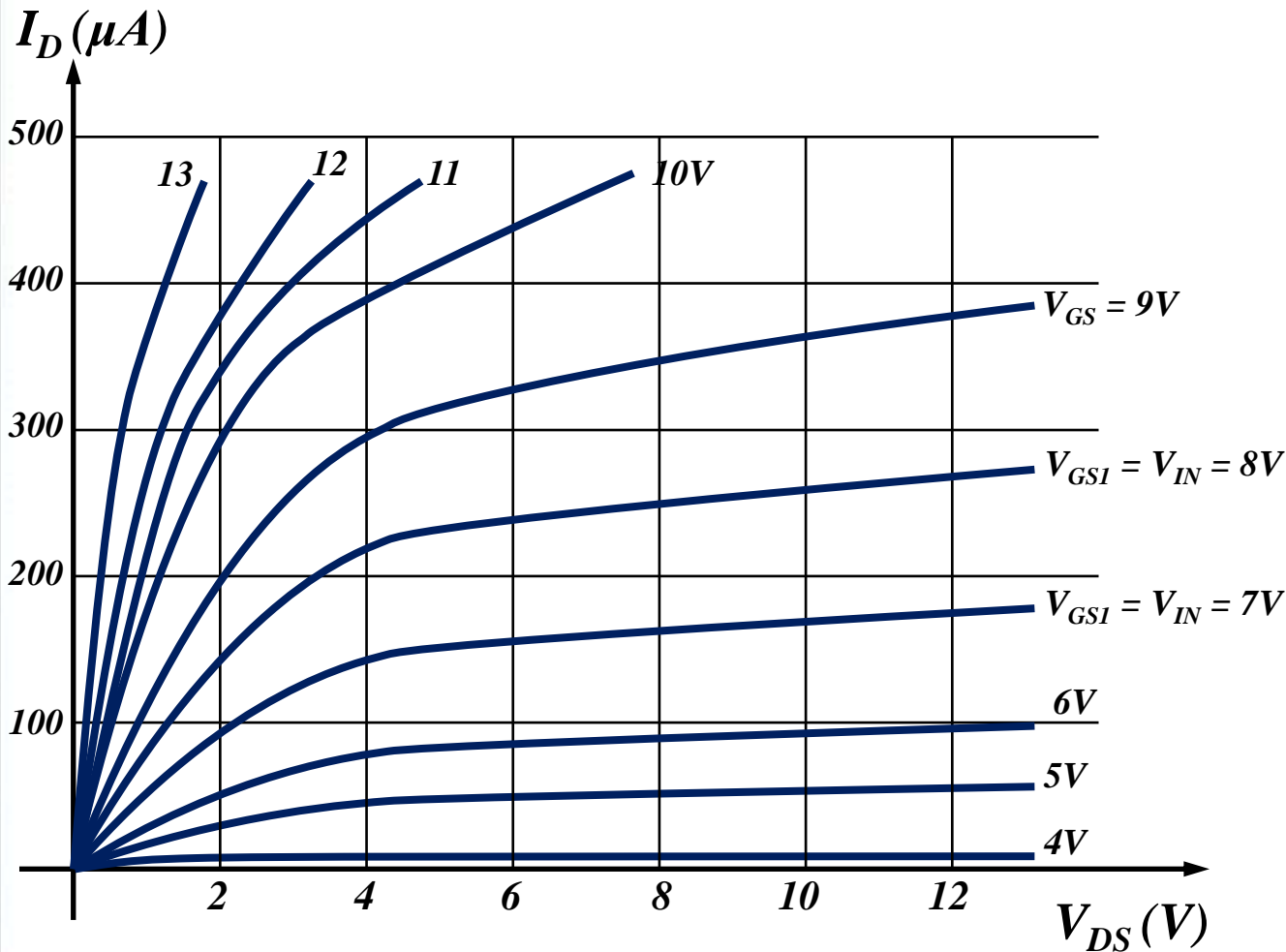
το nMOS έγχυσης με συνδεδεμένη την Πύλη (Gate) στην Υποδοχή (Drain) λειτουργεί πάντα στον κόρο. Το ρεύμα  $I_D$  δίνεται από τη σχέση (?):

$$I_D = K_n (V_{GS} - V_{tn})^2,$$

$$K_n = \frac{\mu_n \cdot \epsilon \cdot W}{2 \cdot t_{ox} \cdot L}$$

Πως μπορούμε να βρούμε γραφικά την χαρακτηριστική μεταφοράς ?

# Αναστροφέας με MOS έγχυσης στον κόρο ως φόρτο



$$I_{D2} = K_n (V_{GS2} - V_{tn})^2$$

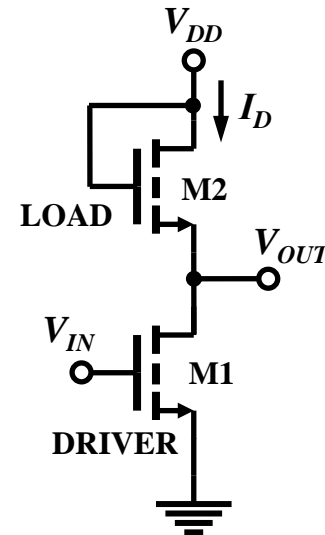
# Αναστροφέας με MOS έγχυσης στον κόρο ως φόρτο

$$I_{D2} = K_n (V_{GS2} - V_{tn})^2$$

$$V_{GS2} = (?)$$

$$V_{GS2} = V_{G2} - V_{S2}$$

$$V_{GS2} = V_{DS2} = V_{DD} - V_{OUT}$$

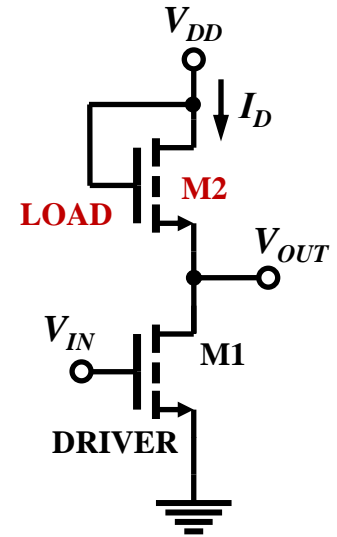
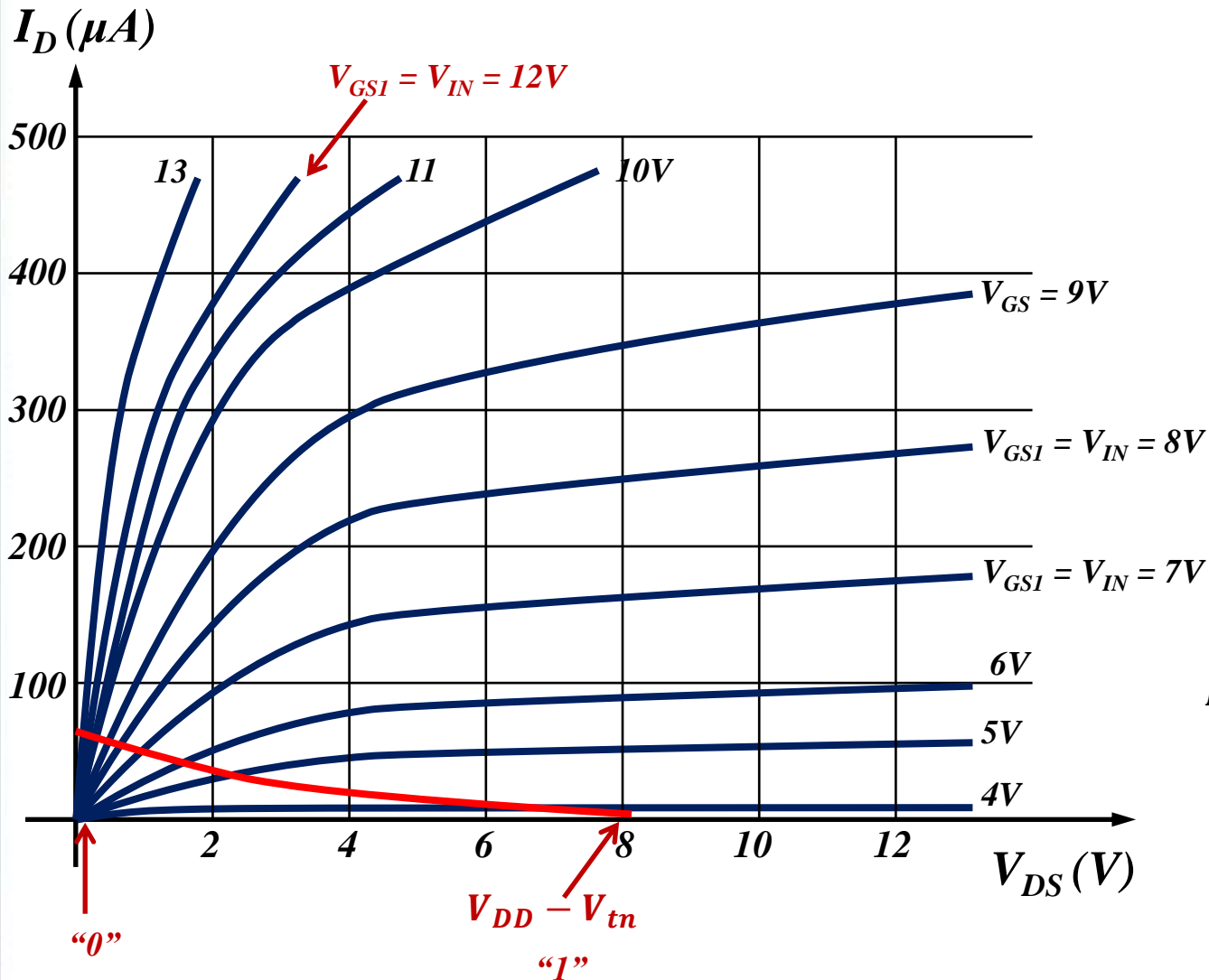


Όταν η είσοδος γίνει «1» άγει το M1 και το M2 αλλά το M1 σχεδιάζεται να είναι πιο αγώγιμο και ο κόμβος στο  $V_{OUT}$  αποφορτίζεται και πηγαίνει στο μηδέν.

Όταν η είσοδος γίνει «0» άγει το M2, το M1 είναι σε αποκοπή και ο κόμβος  $V_{OUT}$  φορτίζεται και πηγαίνει στο  $V_{DD}$ . Τι τάση θα αποκτήσει ο κόμβος στο  $V_{OUT}$  (?)

$$V_{OUT} = V_{DD} - V_{DS2} \quad V_{OUT\_MAX} = V_{DD} - V_{tn}$$

# Αναστροφέας με MOS έγχυσης στον κόρο ως φόρτο



$$I_{D2} = K_n (V_{GS2} - V_{tn})^2$$

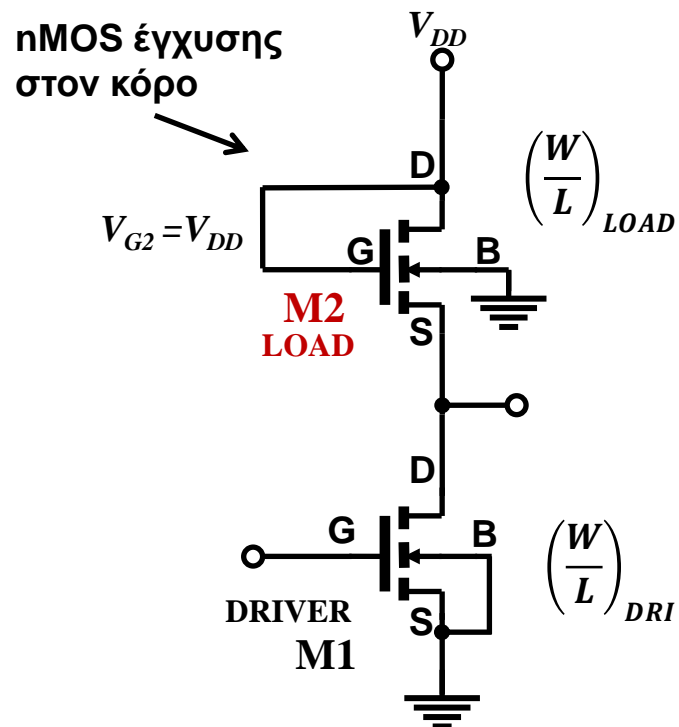
$$V_{GS2} = V_{DD} - V_{OUT}$$

$$V_{OUT,MAX} = V_{DD} - V_{tn}$$

# Αναστροφέας με MOS έγχυσης στον κόρο ως φόρτο

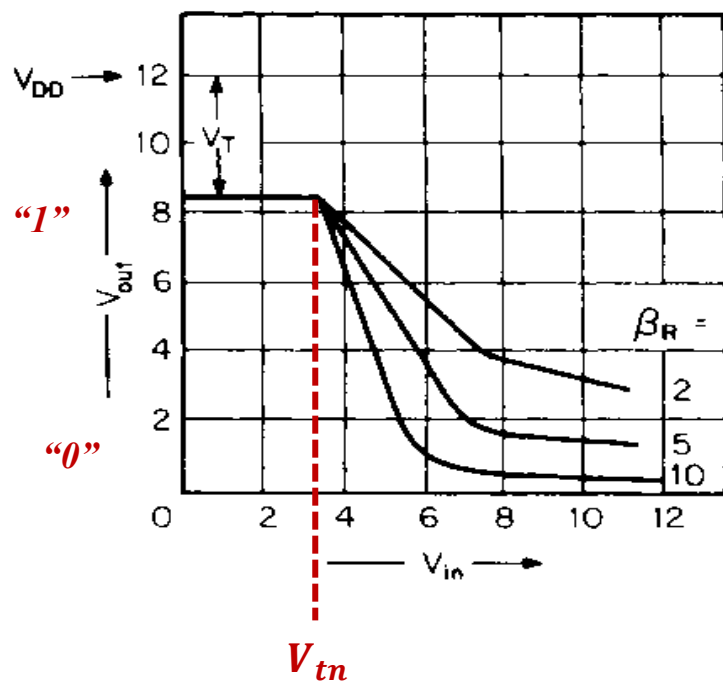
Όταν χρησιμοποιείται ως φόρτος MOS έγχυσης στον κόρο, ο λόγος  $W/L$  που ρυθμίζει το ρεύμα  $I_{DS}$  της οδηγού διάταξης επιλέγεται ως εξής:

$$\left(\frac{W}{L}\right)_{DRI} > 10 \left(\frac{W}{L}\right)_{LOAD}$$



# Αναστροφέας με MOS έγχυσης στον κόρο ως φόρτο

- η έξοδος δεν φτάνει την τιμή της  $V_{DD}$  αλλά παραμένει κάτω κατά  $V_{tn}$ .
- όταν αυξάνει ο λόγος  $\beta_R$ , η τάση εξόδου στη στάθμη 0 μειώνεται.



$$\beta_R = \frac{\left(\frac{W}{L}\right)_{DRI}}{\left(\frac{W}{L}\right)_{LOAD}}$$

Στην πραγματικότητα η  $V_{OUT}$  είναι ακόμη μικρότερη λόγω της επίδρασης του υποστρώματος, που αυξάνει την  $V_{tn}$  κατά  $\Delta V_{tn}$ .

# Αναστροφέας με MOS έγχυσης στον κόρο ως φόρτο

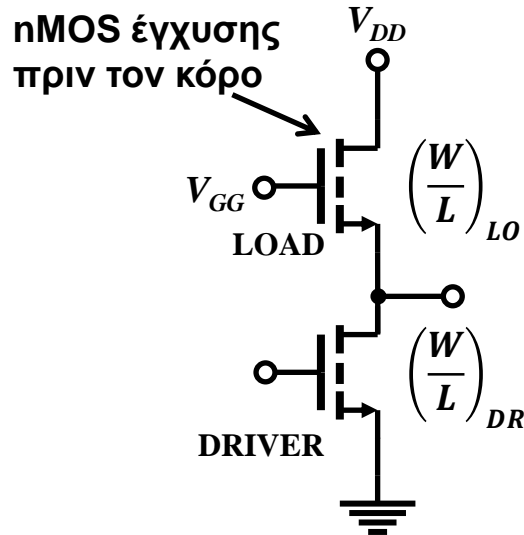
## Μειονεκτήματα:

- 10πλάσια επιφάνεια του τρανζίστορ οδήγησης
- «Ισχυρό» «0» αλλά «ασθενές» «1» διότι δεν φτάνει η τάση στο VDD
- δεν μπορούμε να βραχυκυκλώσουμε το B2 με το S2 στο τρανζίστορ M2 (όπως γίνεται στο M1) οπότε θα μεταβάλλεται η τάση κατωφλίου άρα και το «1» στην έξοδο
- στον αναστροφέα με ωμική αντίσταση όταν έχουμε στην είσοδο το «1» καταναλώνει κάποιο ρεύμα, η κατανάλωση αυτή είναι **στατική κατανάλωση**

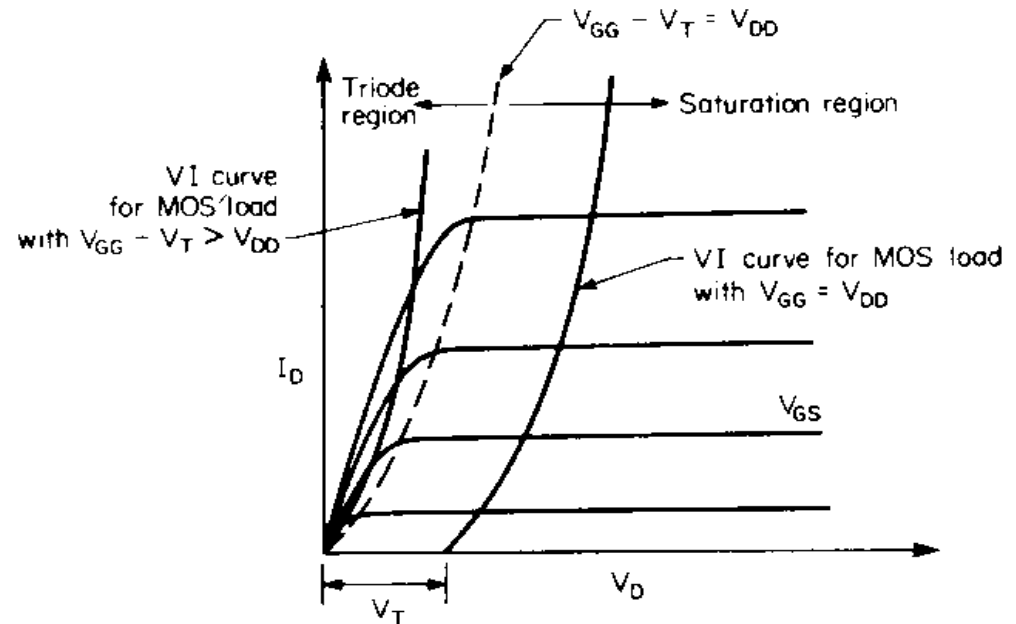
# Αναστροφεάς με MOS έγχυσης πριν τον κόρο ως φόρτο



# Αναστροφέας με MOS έγχυσης πριν τον κόρο ως φόρτο

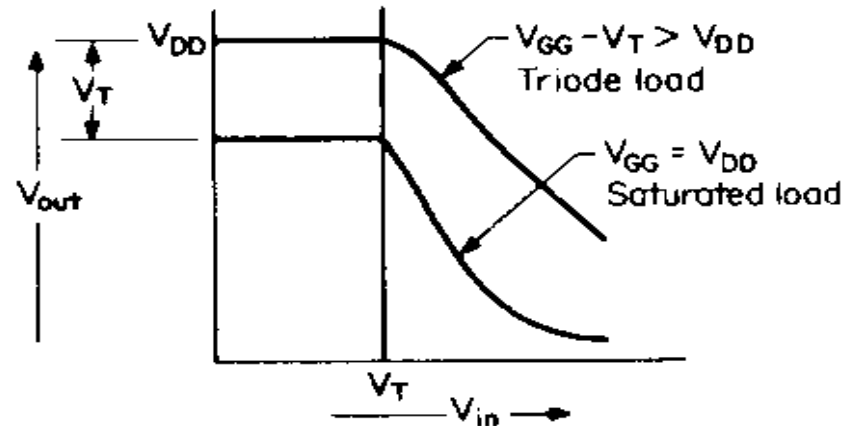
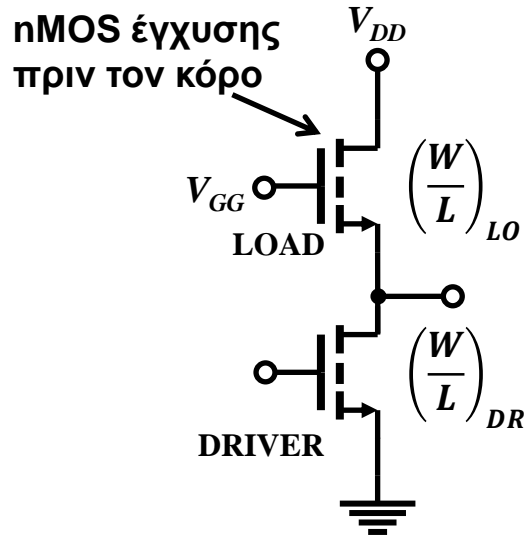


Αν η τάση πύλης της διάταξης φόρτου συνδεθεί σε πιο θετική τάση από την  $V_{DD}$ , ( $V_{GG} > V_{DD}$ ) τότε το φορτίο λειτουργεί πάντοτε στην περιοχή πριν από τον κόρο.



τώρα χρειάζεται μεγαλύτερος λόγος  $\beta_R$  για να πετύχουμε την ίδια στάθμη εξόδου.

# Αναστροφέας με MOS έγχυσης πριν τον κόρο ως φόρτο

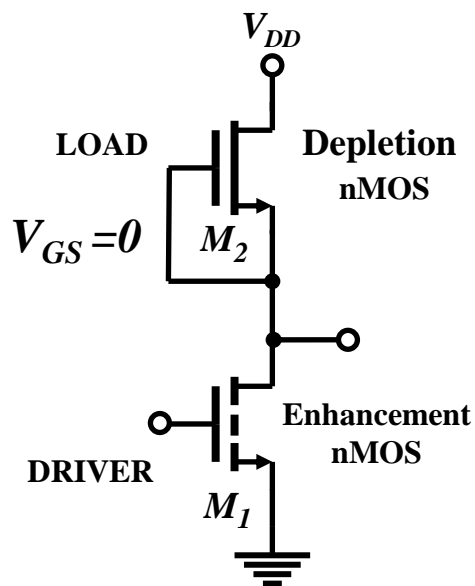


Χαρακτηριστικές μεταφοράς

Επειδή η διάταξη φόρτου έχει μικρότερη ενεργό αντίσταση, η τάση εξόδου που αντιστοιχεί στο “0” θα είναι μεγαλύτερη από ότι στην προηγούμενη περίπτωση (φόρτος στον κόρο).

# Αναστροφείας με MOS απογύμνωσης ως φόρτο

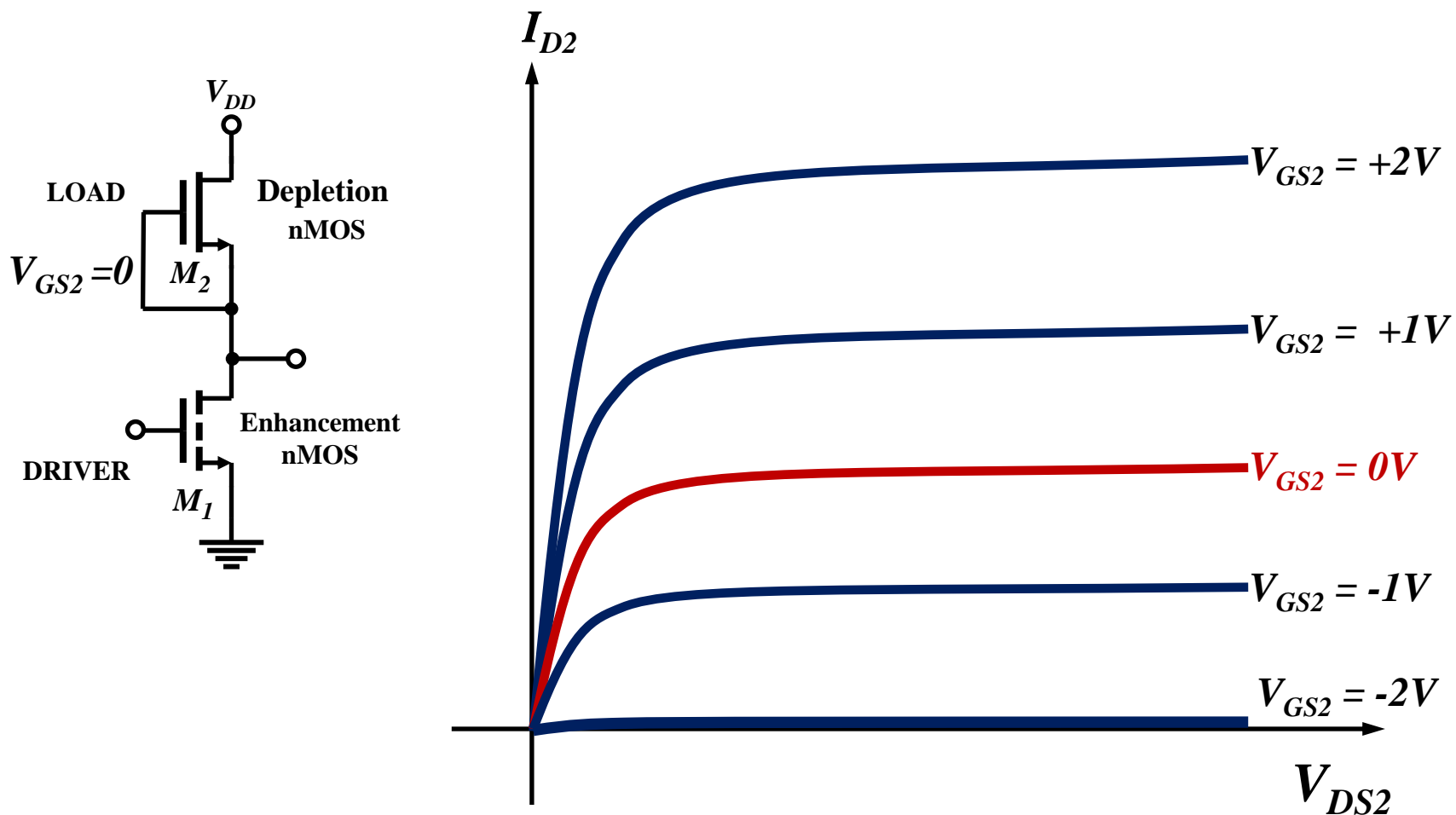
# Αναστροφείας με MOS απογύμνωσης ως φόρτο



Το τρανζίστορ  $M_2$  είναι τρανζίστορ απογύμνωσης άρα άγει και με τάση  $V_{GS} = 0$

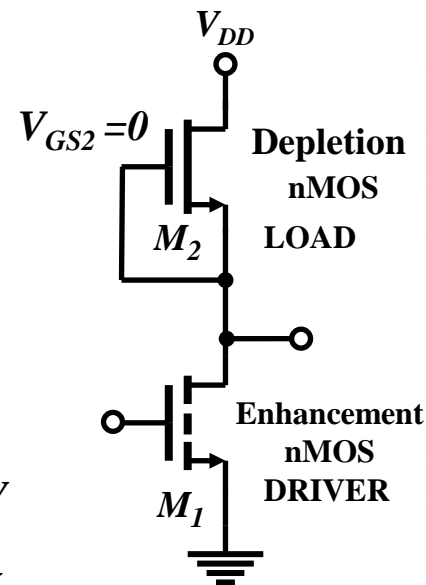
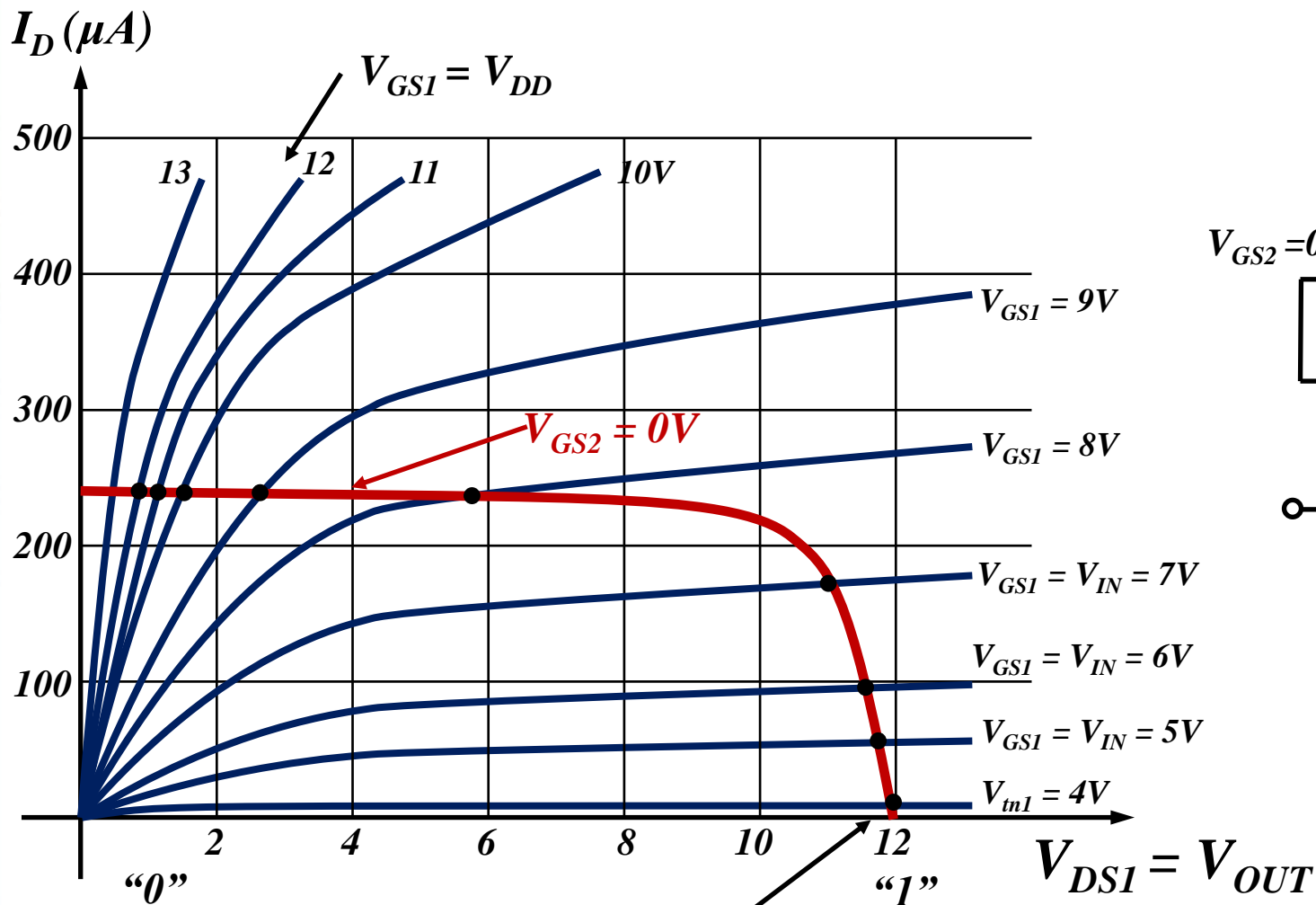
Το τρανζίστορ  $M_1$  είναι συνδεδεμένο ως φόρτος με βραχυκυκλωμένη την πύλη με την πηγή.

# Αναστροφείας με MOS απογύμνωσης ως φόρτο



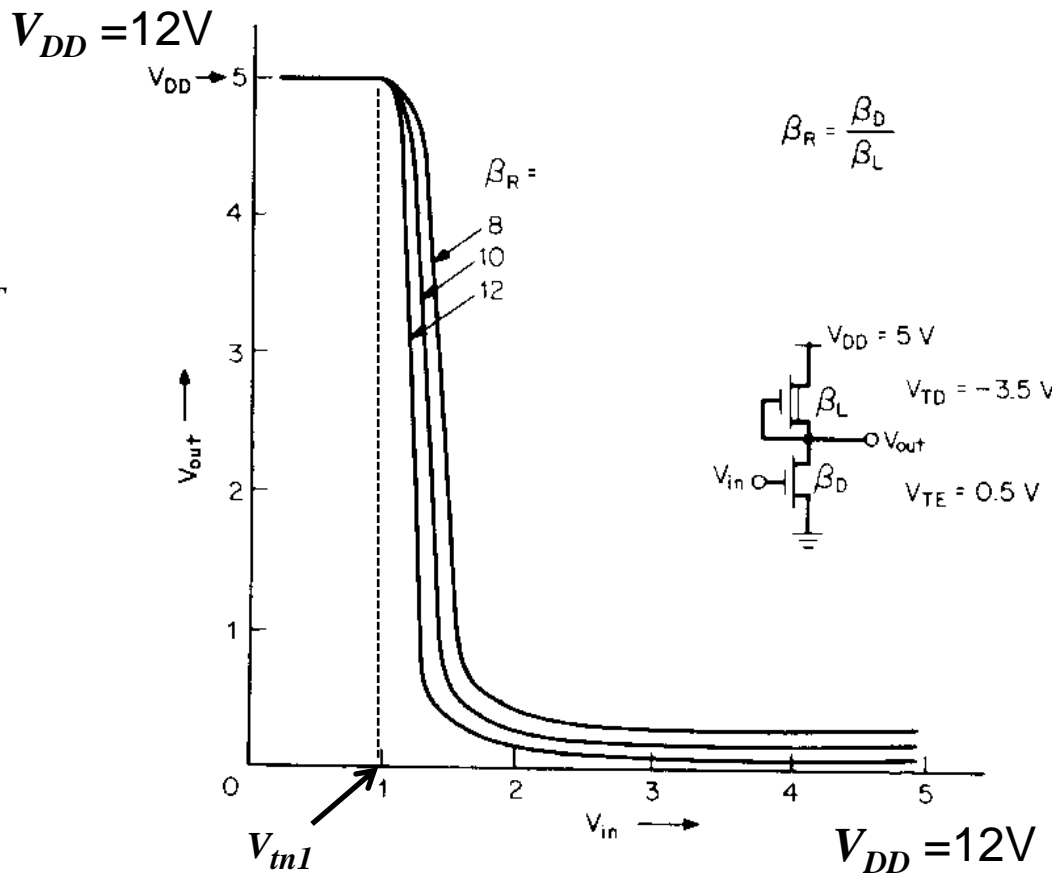
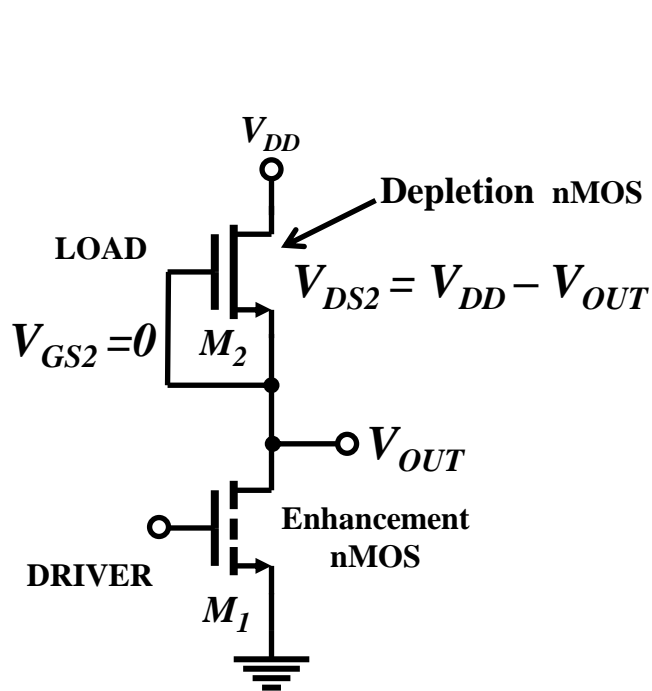
Οι χαρακτηριστικές του τρανζίστορ  $M_2$

# Αναστροφείας με MOS απογύμνωσης ως φόρτο



Για  $I_D = 0$  η τάση εξόδου είναι  $V_{DD}$  γιατί άγει το  $M_2$

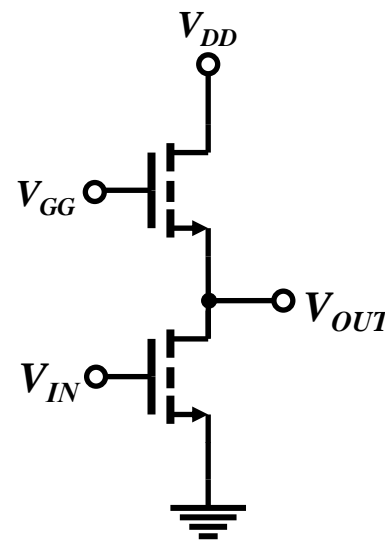
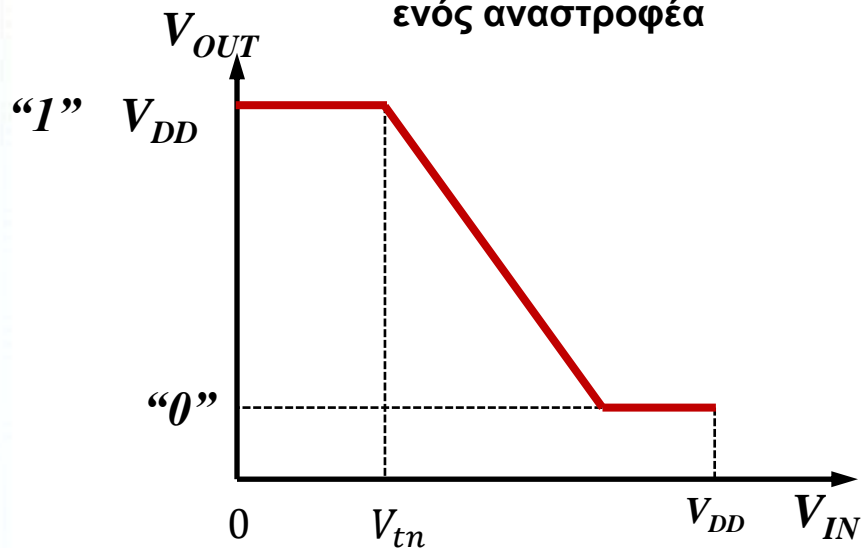
# Αναστροφείας με MOS απογύμνωσης ως φόρτο



Η τάση εξόδου μπορεί να πάρει όλες τις τιμές μέχρι την  $V_{DD}$  επειδή η διάταξη φόρτου άγει πάντοτε, ακόμη και με την πύλη συνδεδεμένη στην πηγή. Ο αναστροφείας αυτός έχει την μεγαλύτερη ταχύτητα απόκρισης

# Περιθώριο Θορύβου Αναστροφεία

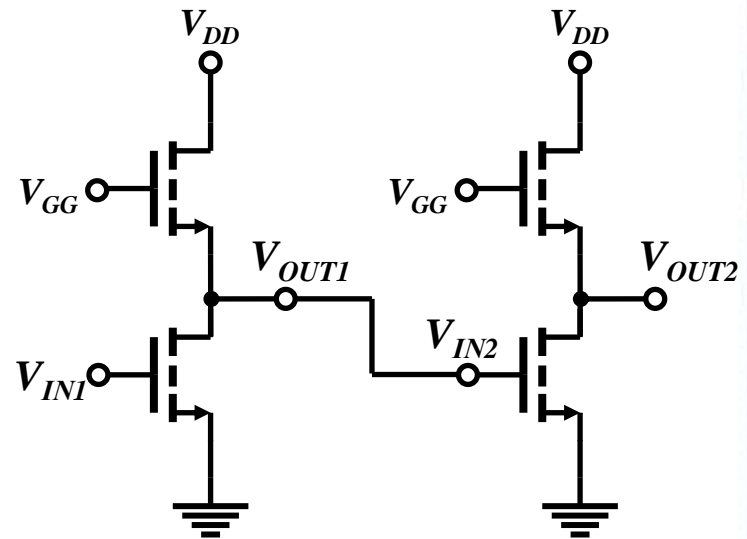
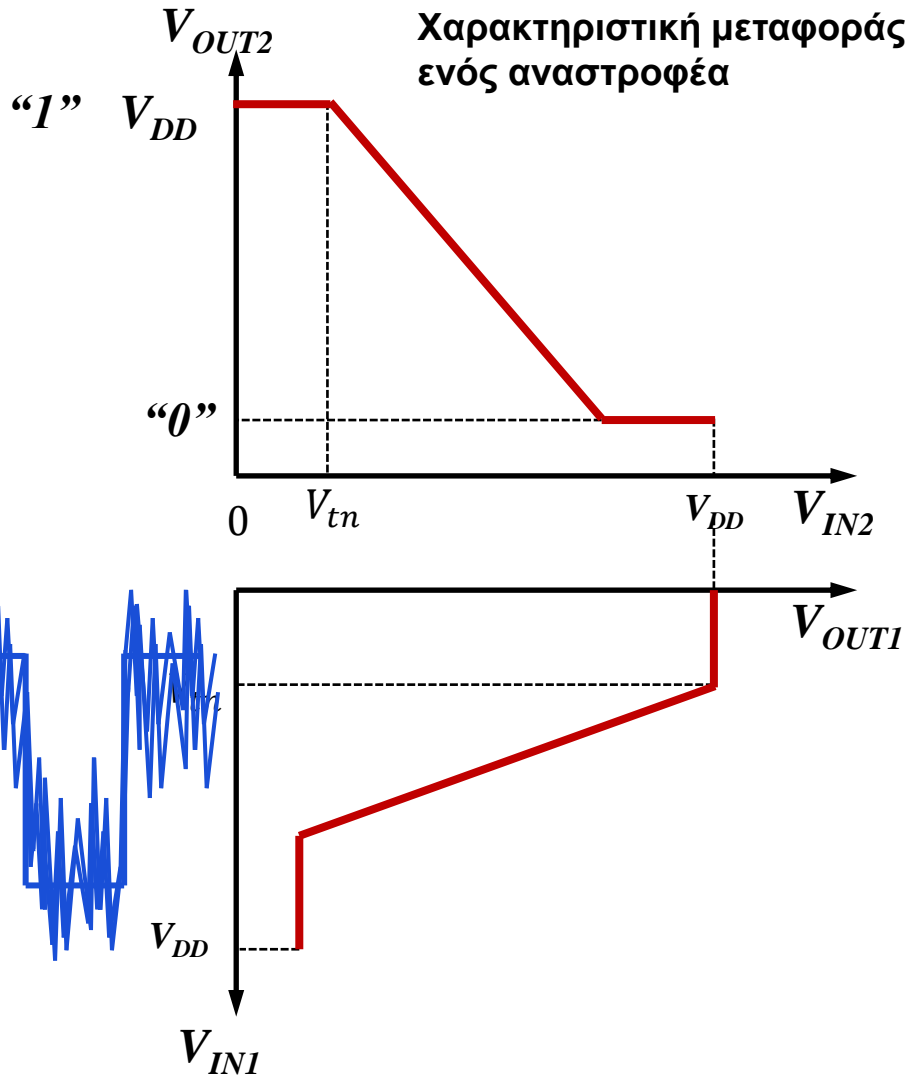
Χαρακτηριστική μεταφοράς ενός αναστροφέα



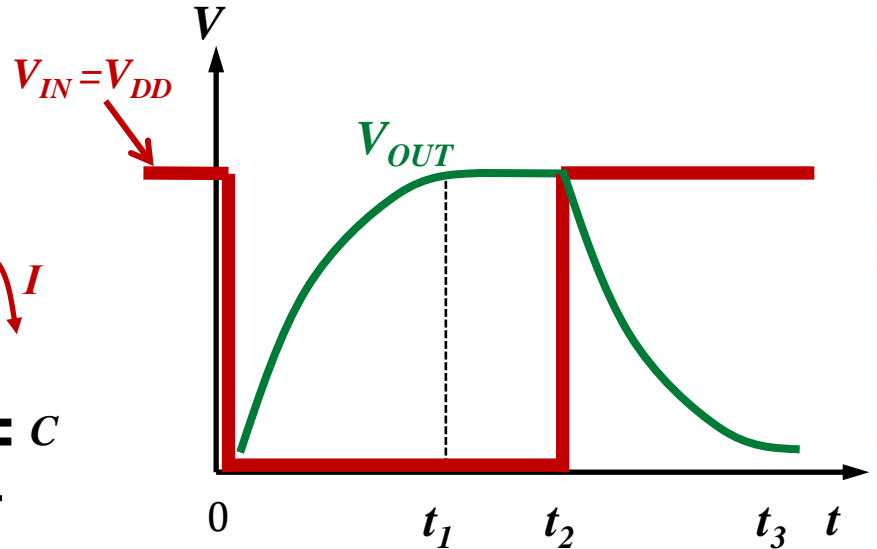
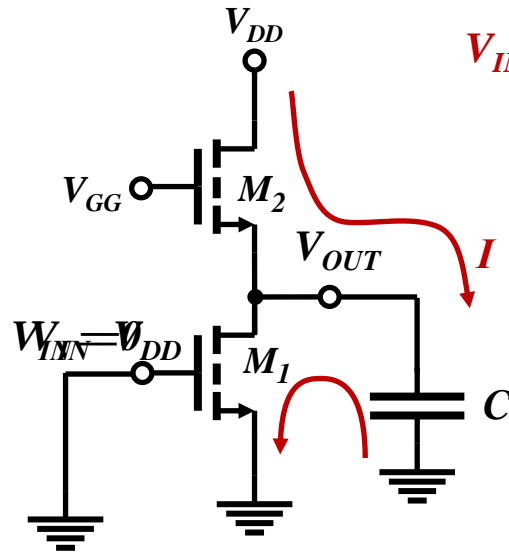
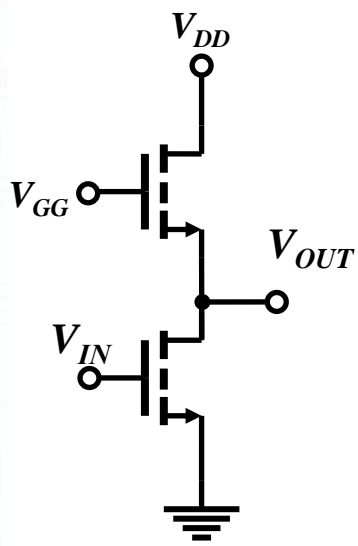


# Περιθώριο Θορύβου Αναστροφεία

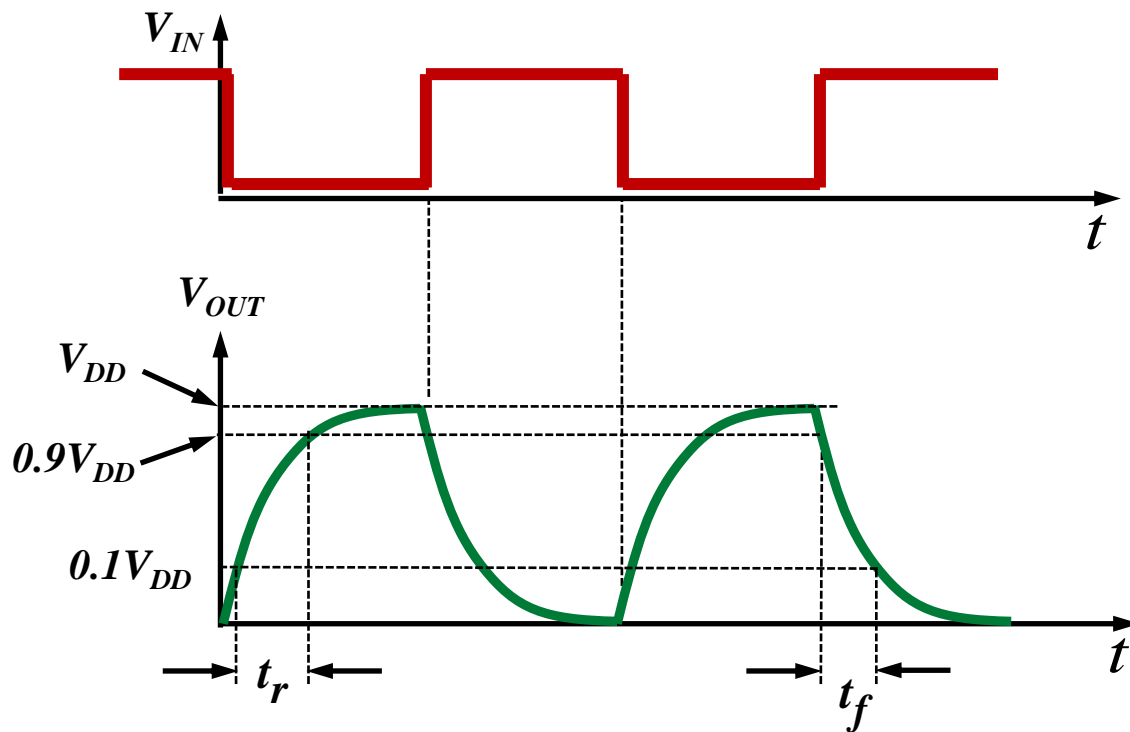
Χαρακτηριστική μεταφορά ενός αναστροφέα



# Χωρητικό φορτίο στην έξοδο του Αναστροφέα



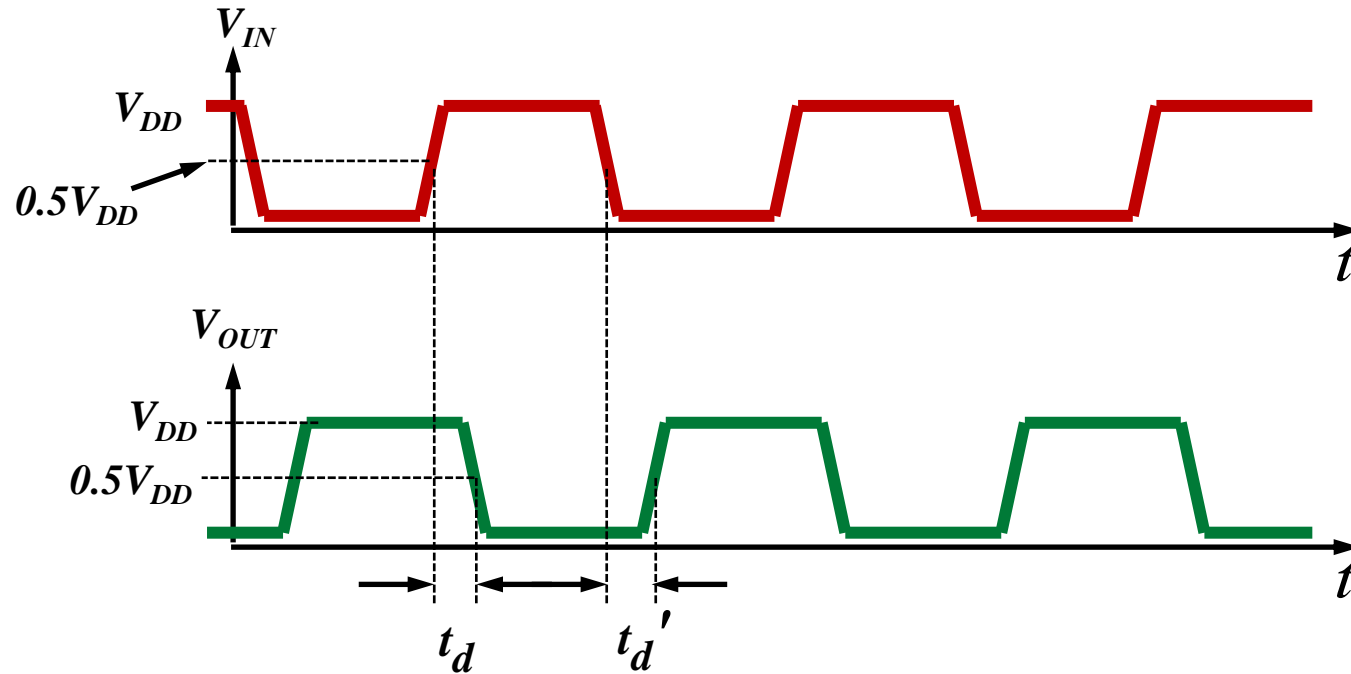
## Rise Time – Fall Time (Χρόνος Ανόδου – Χρόνος Καθόδου)



Η συχνότητα λειτουργίας εξαρτάται από το  $t_r$  και το  $t_f$  του παλμού εξόδου  
Γενικά πρέπει  $RC \ll T$

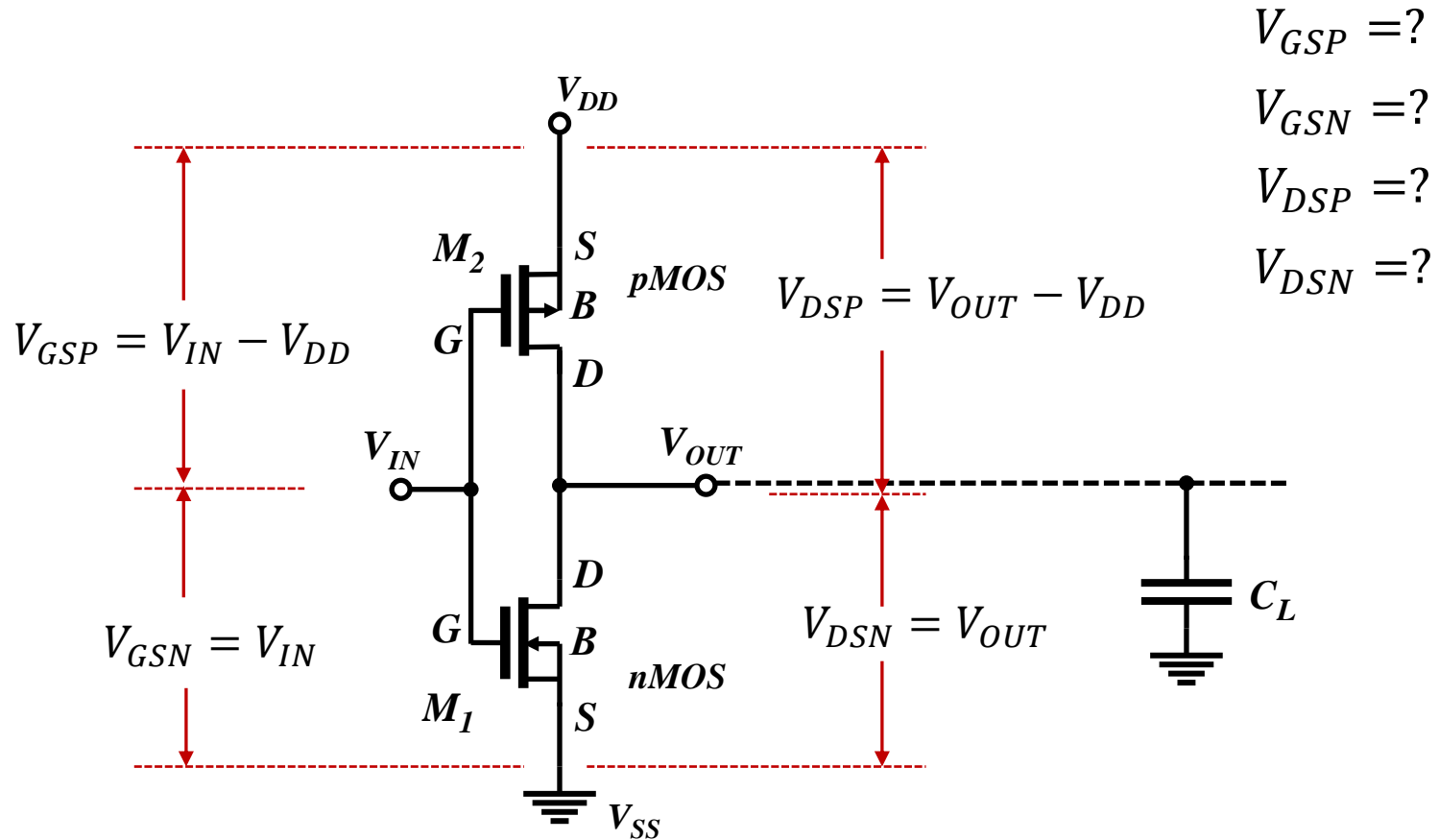
Ποιος χρόνος είναι μεγαλύτερος ο  $t_r$  ή ο  $t_f$  ?

# Καθυστέρηση Αναστροφεία

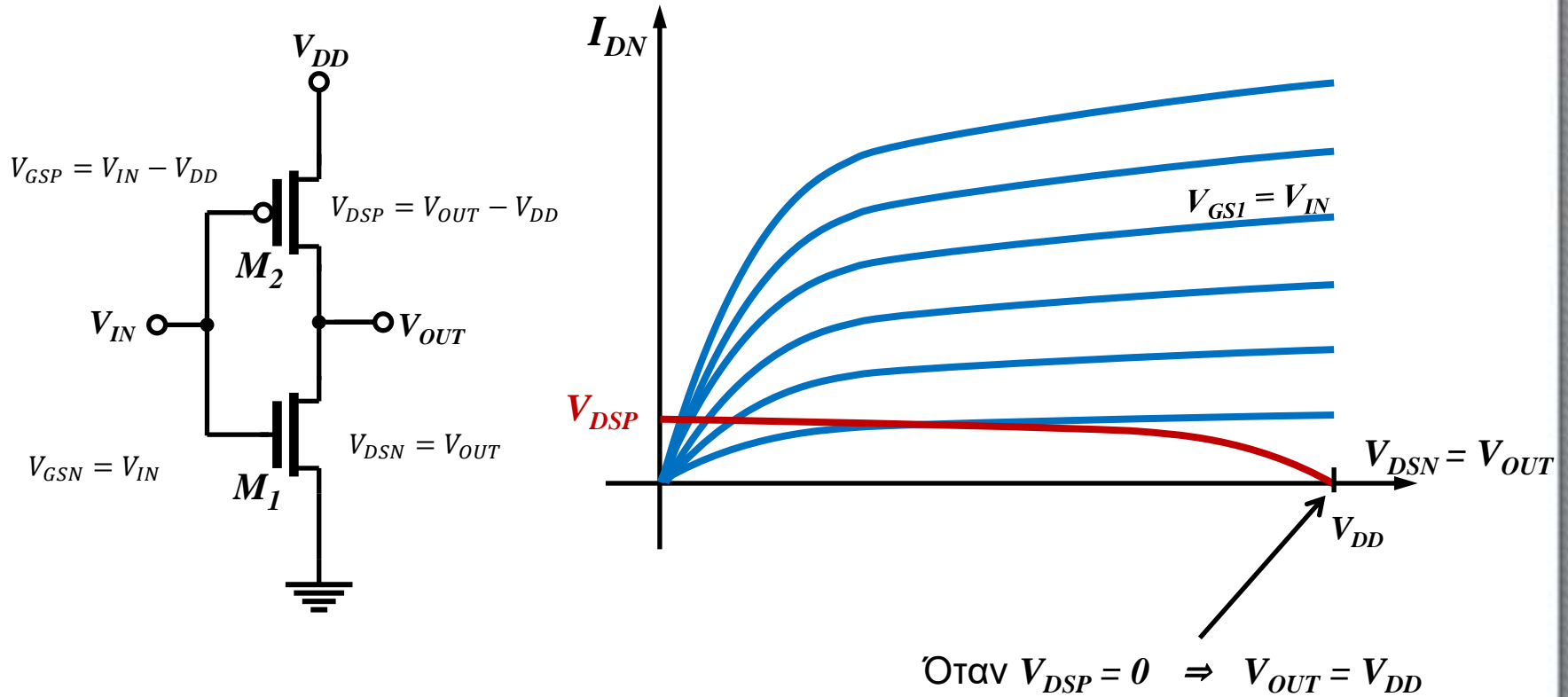


# Αναστροφείας CMOS

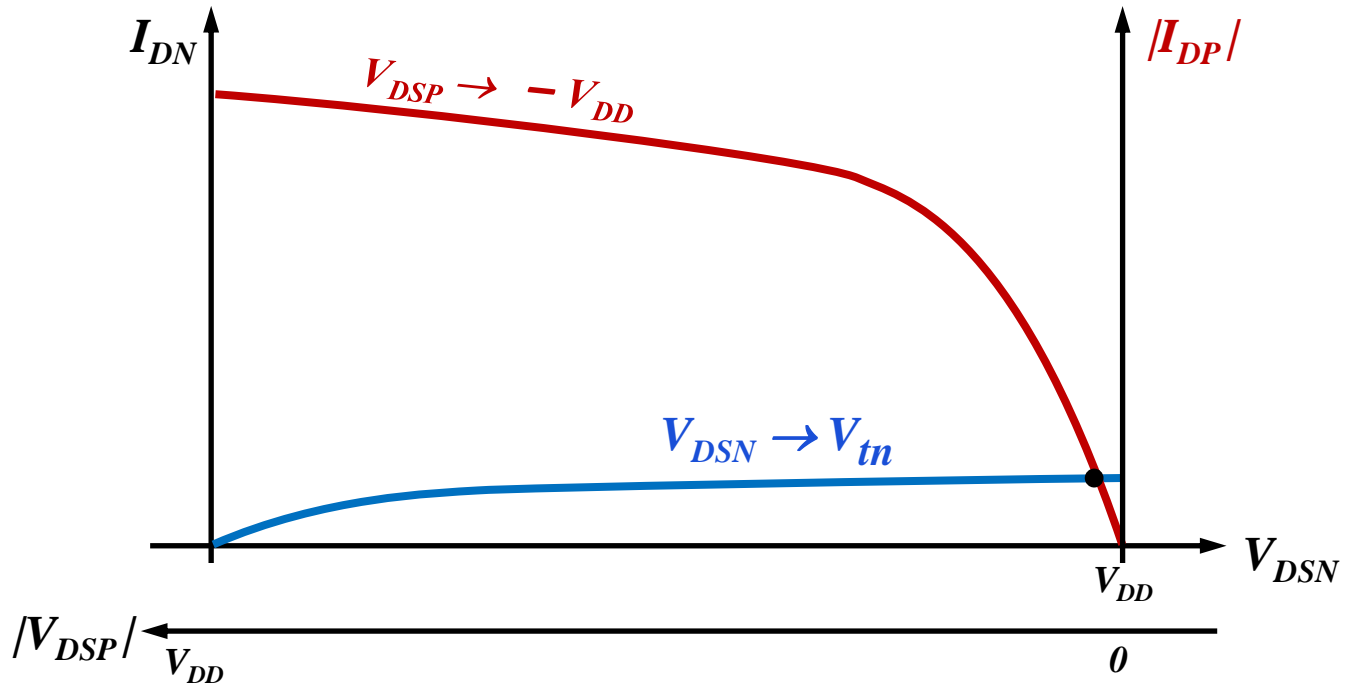
# Αναστροφείας CMOS



# Αναστροφέας CMOS – Χαρακτηριστική Μεταφοράς



# Αναστροφέας CMOS – Χαρακτηριστική Μεταφοράς

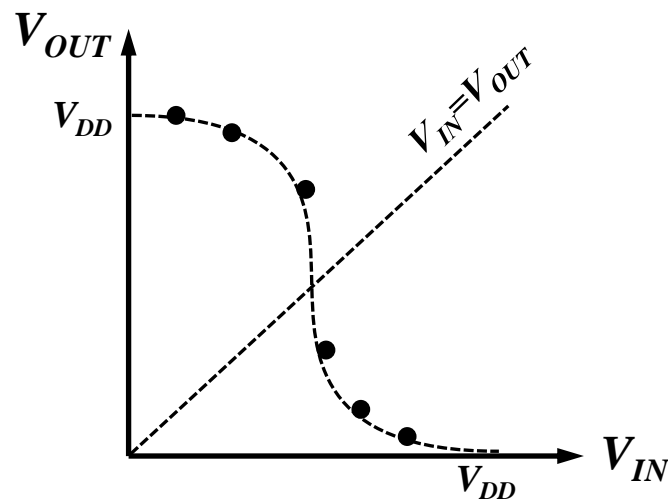
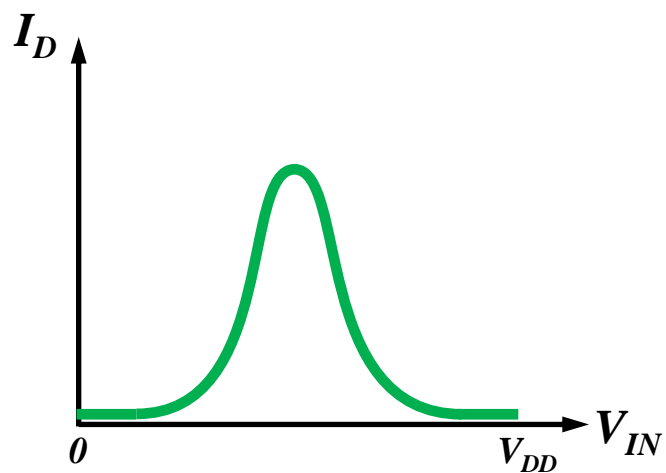
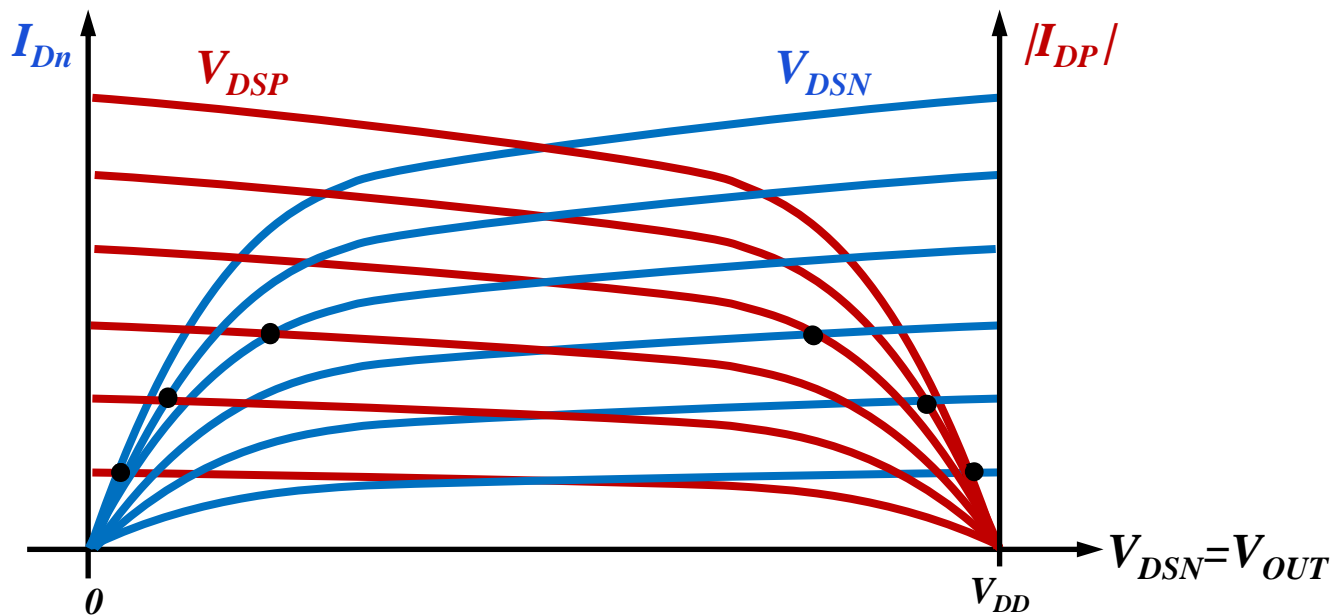


Όταν  $V_{DSN} < V_{tn} \Rightarrow V_{DSP} \rightarrow ?$

$V_{DSP} \rightarrow -V_{DD}$

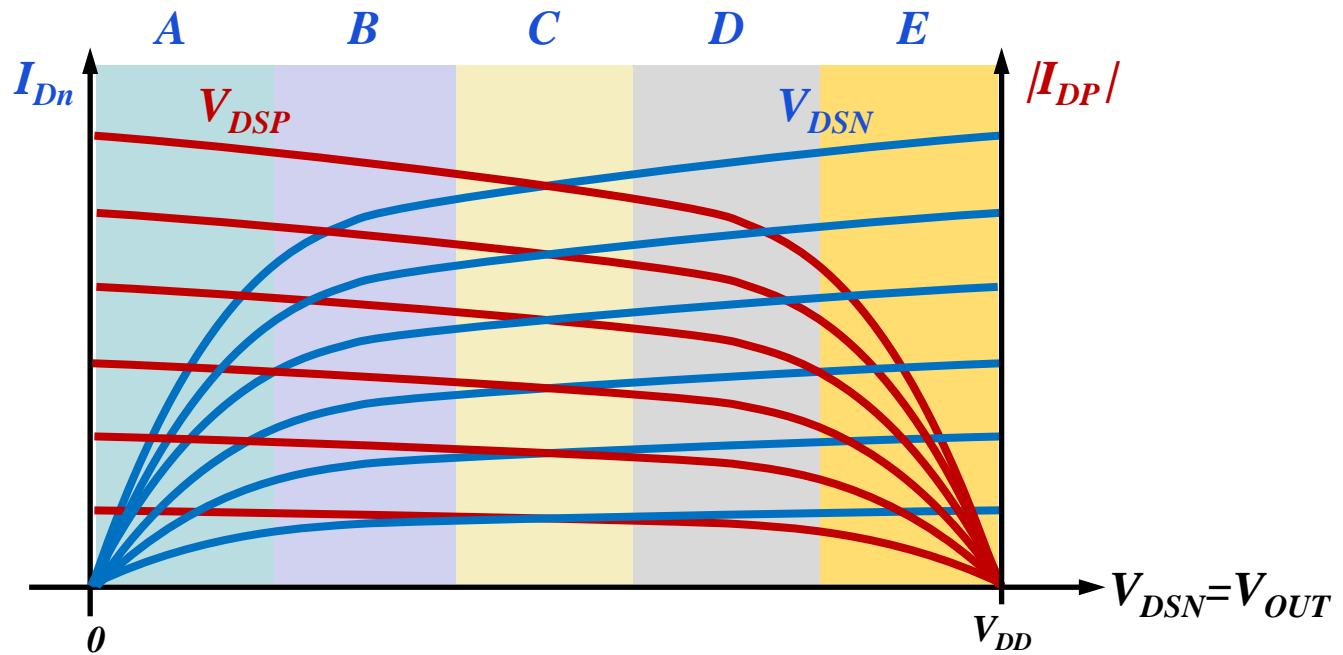


# Αναστροφείας CMOS



$V_{DSN} \rightarrow V_{tn}$

# Αναστροφείας CMOS



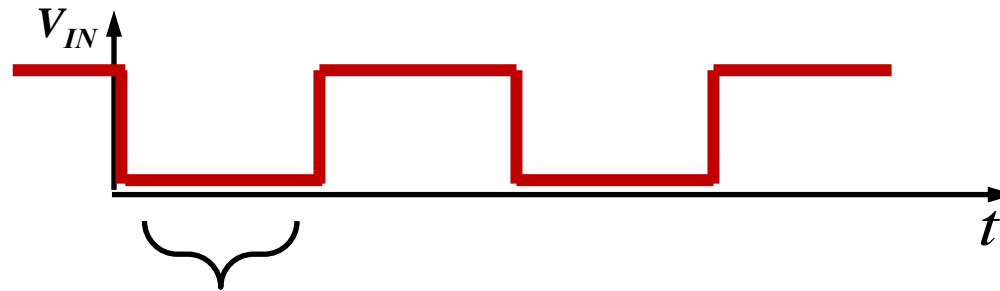
$$V_{DSN} \rightarrow V_{tn}$$

# Αναστροφείας CMOS

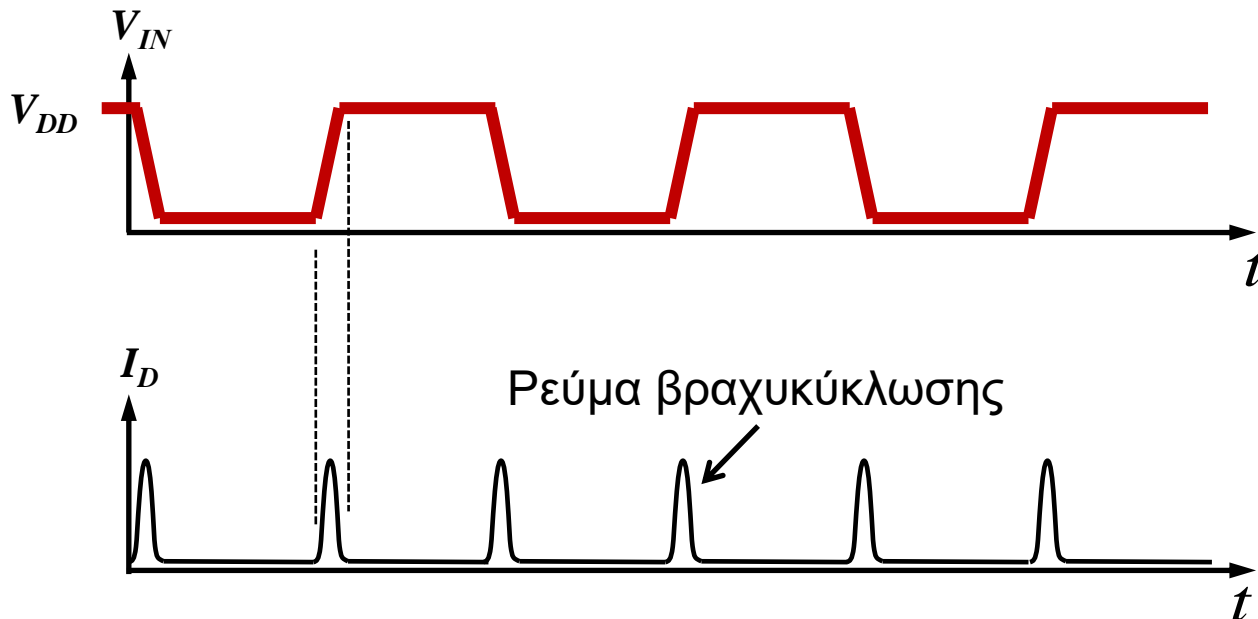
	ΤΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΤΑΣΗ ΕΞΟΔΟΥ	ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ
A	$0 < V_{IN} < V_{tn}$	$V_{OUT} = V_{DD}$	nMOS: αποκοπή pMOS: τρίοδος
B	$V_{tn} < V_{IN} < V_{inv}$		nMOS: κόρος pMOS: τρίοδος
C	Περιοχή αναστροφής $V_{IN} = V_{inv}$	$V_{OUT} \approx 0.5V_{DD}$	nMOS: κόρος pMOS: κόρος
D	$V_{inv} < V_{IN}$		nMOS: τρίοδος pMOS: κόρος
E	$V_{DD} -  V_{tp}  < V_{IN} < V_{DD}$	$V_{OUT} = 0$	nMOS: τρίοδος pMOS: αποκοπή

$$V_{inv} \approx \frac{V_{DD}}{2}$$

# Κατανάλωση Ισχύος Αναστροφή CMOS



Στατική κατανάλωση ισχύος  
αναστροφέα CMOS = 0



# Δυναμική Κατανάλωση Αναστροφέα CMOS

## Τι είναι η δυναμική κατανάλωση;

Όταν έχουμε συνδεδεμένο χωρητικό φορτίο στην έξοδο, το ρεύμα φόρτισης ή εκφόρτισης του φορτίου αυτού απαιτεί επιπλέον κατανάλωση ισχύος.

## Ποια πλεονεκτήματα έχει η CMOS τεχνολογία;

- Το "0" αντιστοιχεί σε τάση εξόδου μηδέν
- Ελάχιστες διαστάσεις οδηγού και φόρτου ( $\beta_R=10$  σε τεχνολογία NMOS)

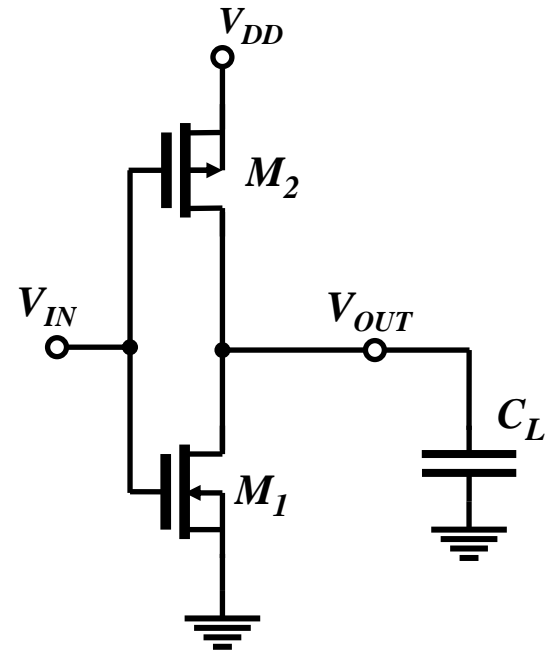
# Ρεύμα Φόρτισης Φόρτου στον Αναστροφέα CMOS

Το ρεύμα του τρανζίστορ καθορίζει και το χρόνο φόρτισης ή εκφόρτισης του χωρητικού φορτίου στην έξοδο.

Για να είναι το ρεύμα φόρτισης  $I_{Dp}$  ίσο με το ρεύμα εκφόρτισης  $I_{Dn}$  τι θα πρέπει να καθορίσουμε;

$$I_{Dn} = \frac{\mu_n \cdot C_{ox}}{2} \left(\frac{W}{L}\right) (V_{GSn} - V_{tn})^2$$

$$I_{Dp} = \frac{\mu_p \cdot C_{ox}}{2} \left(\frac{W}{L}\right) (V_{GSp} - V_{tp})^2$$



# Τέλος Ενότητας

# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Αραπογιάννη Αγγελική 2014. «Σχεδίαση Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων. Εισαγωγή.». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/DI31/>.

