

## HY330 – Ψηφιακά Κυκλώματα - Εισαγωγή στα Συστήματα VLSI

Διδάσκων: Χ. Σωτηρίου, Βοηθοί: θα ανακοινωθούν

<http://inf-server.inf.uth.gr/courses/CE330>

I

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

5<sup>η</sup> διάλεξη – Ο Αντιστροφέας και οι ιδιότητες του

## Περιεχόμενα

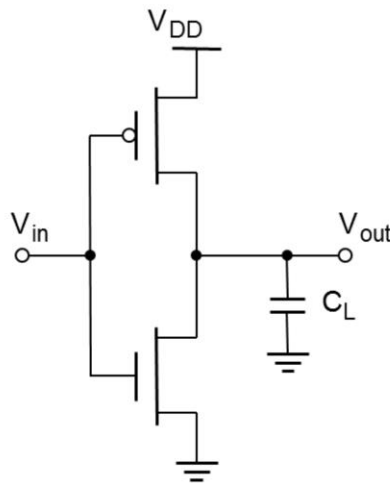
---

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ Διάταξη
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
  - ▶ Δυναμική
  - ▶ Στατική
  - ▶ Διαρροής

## Περιεχόμενα

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ Διάταξη
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
  - ▶ Δυναμική
  - ▶ Στατική
  - ▶ Διαρροής

## Αντιστροφέας – Διαισθητική Λειτουργία



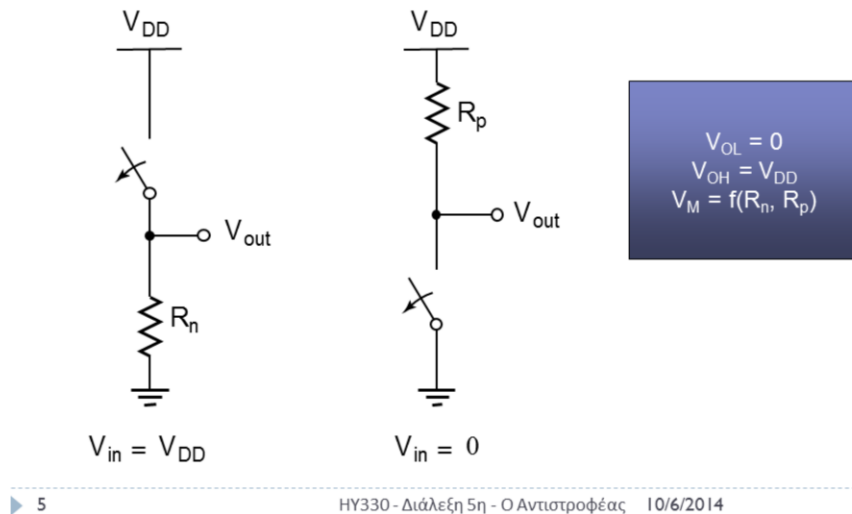
▶ 4

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

Το παραπάνω σχήμα επιδεικνύει το σχηματικό του αντιστροφέα, ο οποίος είναι το πιο θεμελιώδες ηλεκτρονικό, ψηφιακό κύκλωμα.

Ο παραπάνω αντιστροφέας είναι τύπου CMOS, μια και χρησιμοποιεί και n και p τρανζίστορ. Αποτελείται από μια είσοδο  $V_{in}$ , η οποία οδηγεί και τα δυο διαφορετικού τύπου τρανζίστορ και μια έξοδο  $V_{out}$ . Η χωρητικότητα  $C_L$  στην τελευταία είναι παρασιτική και προέρχεται από τις διασυνδέσεις στην έξοδο, αλλά και την χωρητικότητα της πύλης που οδηγεί ο αντιστροφέας.

## Διαισθητική Λειτουργία – DC Ανάλυση



Χρησιμοποιώντας το μοντέλο αντίστασης των  $n$ ,  $p$  τρανζίστορ που είδαμε στην 3<sup>η</sup> διάλεξη, δηλ. ότι μπορούμε να υπολογίζουμε μια ισοδύναμη αντίσταση  $V/I$  για κάθε τρανζίστορ μπορούμε εύκολα να ερμηνεύσουμε και να εξάγουμε διαισθητικά την λειτουργία του αντιστροφέα.

Έχουμε λοιπόν τις εξής περιπτώσεις:

- **$V_{in} = V_{DD}$**

Σε αυτή την περίπτωση το  $n$ mos τρανζίστορ είναι ανοικτό ( $V_{gsn} > V_{tn}$ ), ενώ το  $p$ mos είναι σβηστό ( $V_{gsp} = 0$ ).

Έτσι, παραπάνω αριστερά βλέπουμε το ισοδύναμο κύκλωμα, δηλ. την ισοδύναμη αντίσταση του  $n$ mos, η οποία δημιουργεί σύνδεση μεταξύ του  $V_{out}$  και της γείωσης  $Gnd$ , με αποτέλεσμα το δυναμικό της εξόδου να είναι  $0V$ .

- **$V_{in} = 0$**

Αντιθέτως, τώρα το  $p$ mos είναι ανοικτό ( $V_{gsp} < V_{tp}$ ), ενώ το  $n$ mos είναι σβηστό ( $V_{gsn} = 0$ ). Στο ισοδύναμο

κύκλωμα πάνω δεξιά βλέπουμε ότι τώρα, η ισοδύναμη αντίσταση του  $p$ mos δημιουργεί σύνδεση μεταξύ του  $V_{out}$  και τάσης  $V_{DD}$ , με αποτέλεσμα το δυναμικό της εξόδου να είναι  $V_{DD}$  ή  $2.5V$ .

Βάση των παραπάνω διαφαίνεται ότι η πύλη που δείξαμε λειτουργεί ως αντιστροφέας του δυναμικού.

## Περιεχόμενα

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ Διάταξη
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
  - ▶ Δυναμική
  - ▶ Στατική
  - ▶ Διαρροής

## Χαρακτηριστικά Στατικού Αντιστροφέα CMOS

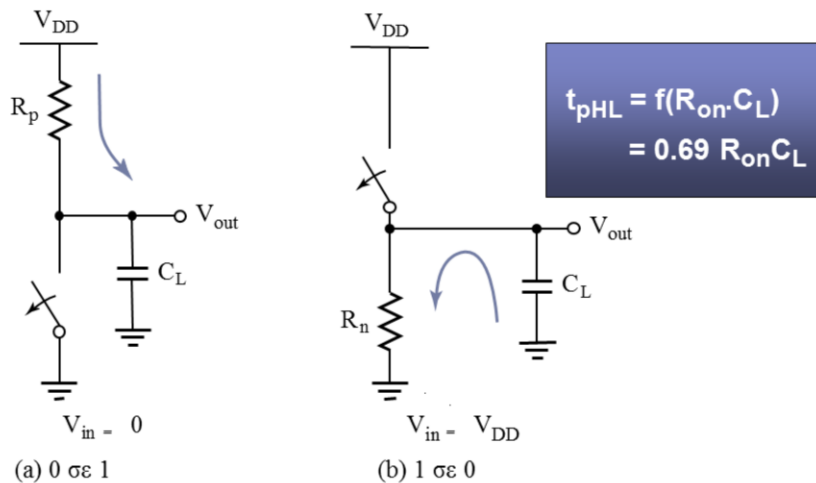
- ▶  $V_{OH} = V_{DD}, V_{OL} = 0$ 
  - ▶ άκρα της τάσης - δηλαδή μεγάλα περιθώρια θορύβου
- ▶ τα παραπάνω δεν είναι συνάρτηση των μεγεθών  $W, L$ 
  - ▶ Πύλες άλλων ειδών, λ.χ. NMOS αντιστροφέα απαιτούν συγκεκριμένο λόγο διαστάσεων των τρανζίστορ (ratioed logic)
- ▶ σε ισορροπία υπάρχει πάντα ένα μονοπάτι αντίστασης εξόδου μεταξύ  $V_{dd}$  ή  $Gnd$ .
  - ▶ χαμηλή αντίσταση εξόδου, μεγαλύτερη αξιοπιστία σε θόρυβο
  - ▶ η ισοδύναμη αντίσταση είναι της τάξης των  $k\Omega$
- ▶ σημαντικά μεγάλη αντίσταση εισόδου μια και η πύλη είναι μονωμένη και δεν τραβάει ρεύμα
  - ▶ η είσοδος επηρεάζεται από την χωρητικότητα της πύλης
- ▶ σε ισορροπία ( $V_{in} = \text{σταθερό}$ ) δεν υπάρχει ρεύμα μεταξύ τάσης και γείωσης
  - ▶ δεν καταναλώνεται στατικό ρεύμα πλην της διαρροής

## Περιεχόμενα

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ **Μεταβατική Λειτουργία**
- ▶ Διάταξη
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
  - ▶ Δυναμική
  - ▶ Στατική
  - ▶ Διαρροής



## Μεταβατική Απόκριση – TRAN Ανάλυση



9

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

Μεταβατικά, δηλαδή στην αλλαγή κατάστασης της εισόδου, και κατόπιν εξόδου, το ίδιο απλό μοντέλο της ισοδύναμης αντίστασης μας επιδεικνύει ότι ο χρόνος ανόδου ή καθόδου και η σχετική καθυστέρηση εισόδου-εξόδου αντιστοιχούν σε αυτήν δικτύου RC 1<sup>ου</sup> βαθμού.

Έτσι, ο χρόνος καθυστέρησης είναι  $t = \ln(2) \cdot \tau$ , όπου  $\tau = R_{\text{ισ}} \cdot C_L$ , και  $\ln(2) = 0.69$ .

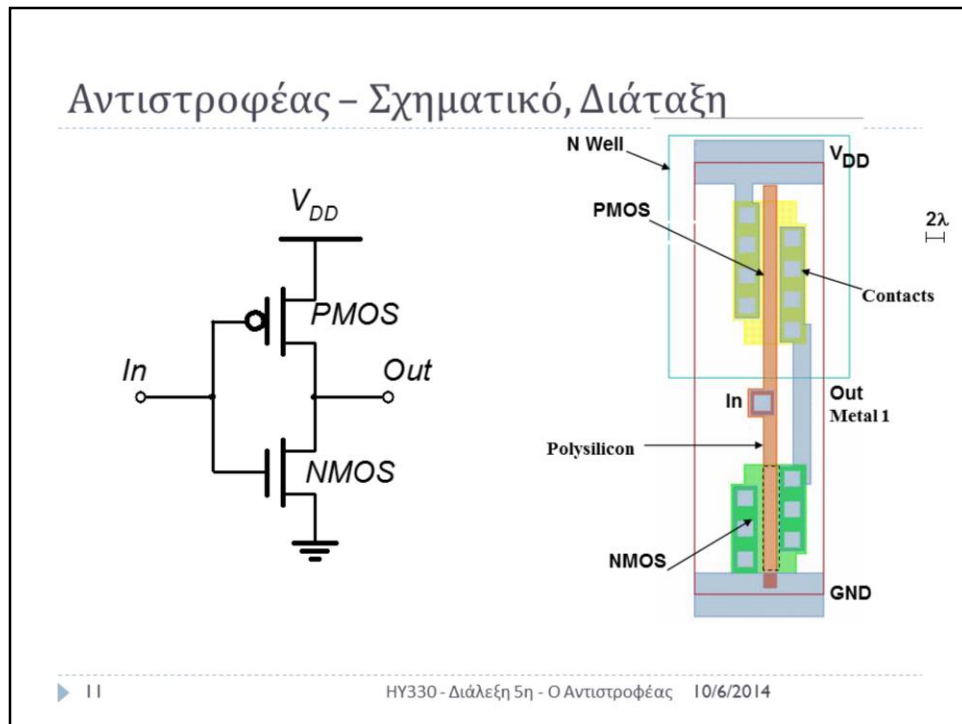
Είναι προφανές από το παραπάνω ότι μια και το  $R_{\text{ισ}}$  αλλάζει σε  $R_n$  και  $R_p$  ανάλογα με την κατεύθυνση της εισόδου, η καθυστέρηση δεν είναι απαραίτητα συμμετρική αλλά συνάρτηση των τελευταίων.

**Τα  $R_n$ ,  $R_p$  είναι συνάρτηση του  $W/L$  του σχετικού τρανζίστορ, και εδώ έχει τον λόγο ο σχεδιαστής.**

Για την σχεδίαση μιας γρήγορης πύλης πρέπει είτε (α) να κρατήσουμε την χωρητικότητα εξόδου μικρή, είτε (β) να μειώσουμε την σχετική, ισοδύναμη αντίσταση του τρανζίστορ.

## Περιεχόμενα

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ **Διάταξη**
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
  - ▶ Δυναμική
  - ▶ Στατική
  - ▶ Διαρροής



Εδώ βλέπουμε αντίστοιχη διάταξη για τον αντιστροφέα, όπου (α) το pmos έχει 4/3 μεγαλύτερο πλάτος από το nmos και ίδιο μήκος και (β) οι επαφές έχουν τοποθετηθεί διαγώνια, αντί με ορθογώνιο τρόπο όπως συνήθως.

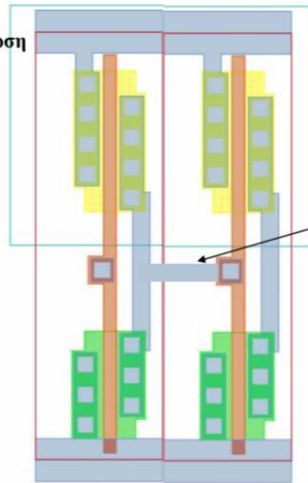
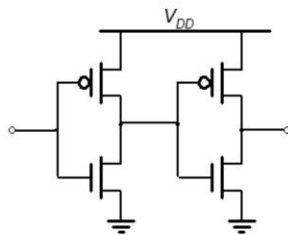
Το τελευταίο δεν έχει κάποια σημασία ως προς την λειτουργία εκτός του ότι το ρεύμα θα ακολουθεί διαγώνια πορεία στην συσκευή.

Η είσοδος φαίνεται σε m1 με επαφή στο πολύ-πυρίτιο της πύλης, ενώ η έξοδος είναι σε m1. Το pmos βρίσκεται σε πηγάδι N.

## Διάταξη Αντιστροφέα-Αντιστροφέα

Διαμοιράζουμε Τάση/Τείωση

Επικολλάμε τις πύλες

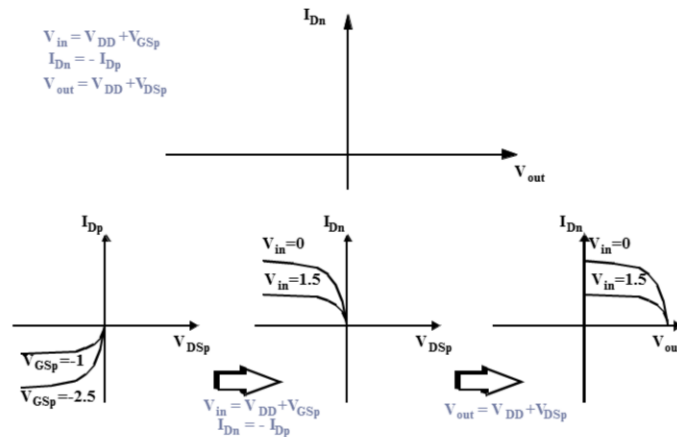


Συνδέουμε σε μέταλλο

## Περιεχόμενα

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ Διάταξη
- ▶ **Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης**
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
  - ▶ Δυναμική
  - ▶ Στατική
  - ▶ Διαρροής

## PMOS – Γράφημα Φορτίου – Load-line



▶ 14

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

Για να αναλύσουμε τον αντιστροφέα διεξοδικά πρέπει να παράγουμε την καμπύλη μεταβίβασης του δυναμικού του.

Η καμπύλη μεταβίβασης προκύπτει υπερθέτοντας και εξισώνοντας τα I-V χαρακτηριστικά των πυλών του, δηλ. των τρανζίστορ nmos και pmos. Η γραφική αυτή διαδικασία ονομάζεται γράφημα φορτίου (load line plot).

Το γράφημα φορτίου απαιτεί όλες οι σχετικές I-V χαρακτηριστικές καμπύλες να ανάγονται στις ίδιες συντεταγμένες,

ως σημεία αναφοράς. Επιλέγοντας λοιπόν τα:  $V_{in}$ ,  $V_{out}$  και  $I_{dn}$  (ρεύμα nmos) σαν μεταβλητές και συντεταγμένες, κάνουμε τις παρακάτω αντιστοιχήσεις για να αναχθούν στο ίδιο γράφημα:

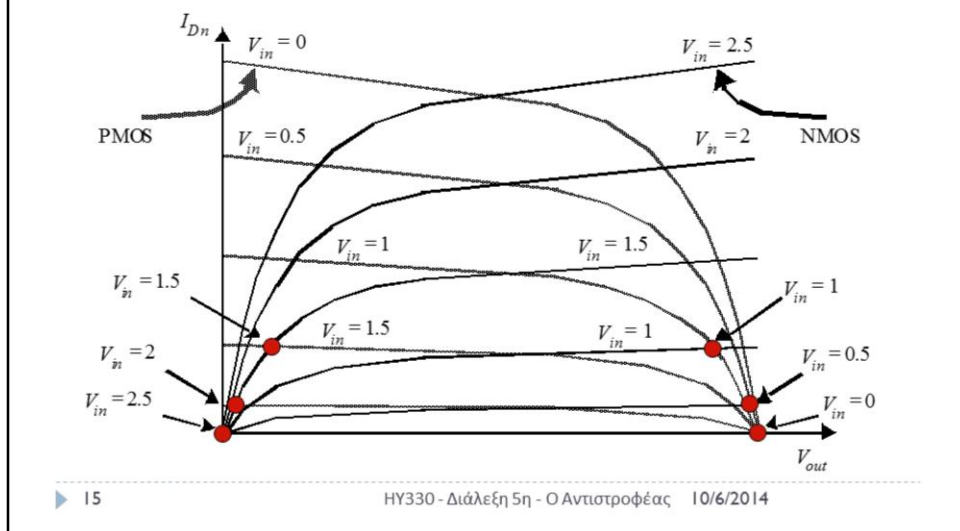
$I_{dsp} = -I_{dsn}$  (ρεύμα)

$V_{gsn} = V_{in}$ , ενώ  $V_{gsp} = V_{in} - V_{dd}$

$V_{dsn} = V_{out}$ , ενώ  $V_{dsp} = V_{out} - V_{dd}$

Έτσι παράγεται γραφικά ο μετασχηματισμός του παραπάνω σχήματος.

## CMOS – Γράφημα Φορτίου

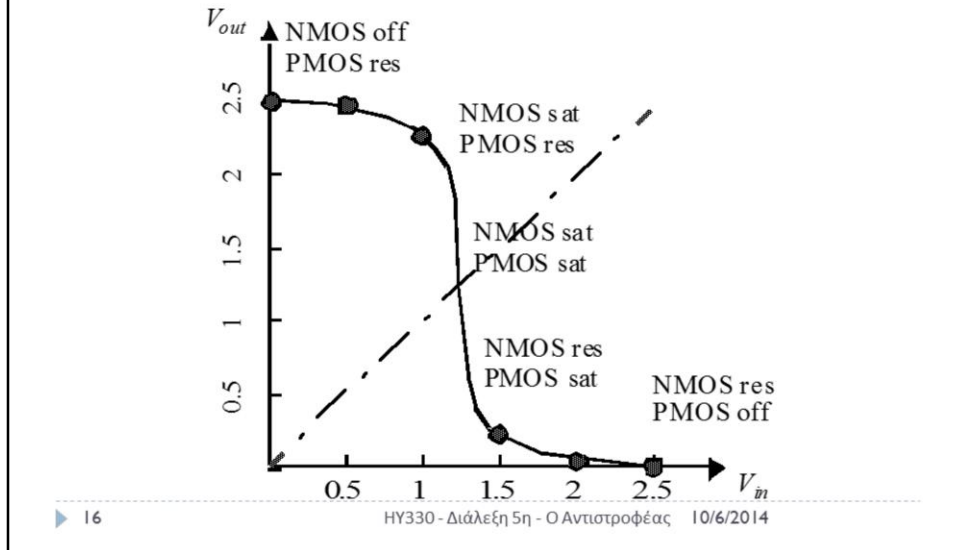


Παραπάνω βλέπουμε τις συνδυασμένες χαρακτηριστικές I-V για τα δυο τρανζίστορ.

Για να είναι έγκυρο ένα σημείο DC ισορροπίας, πρέπει  $I_{Dsn} = I_{Dsp}$ , δηλαδή τα δυο ρεύματα να είναι ίσα. Γραφικά, αυτό συνεπάγεται τα σημεία όπου τέμνονται οι γραμμές, και κάποια από αυτά ( $V_{in} = 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5$ ) φαίνονται στο σχήμα.

Όλα από αυτά, όπως φαίνονται μαζεύονται στα δυο άκρα, είτε σε μικρό είτε σε μεγάλο δυναμικό. Έτσι, συμπεραίνουμε ότι η μετάβαση μεταξύ των δυο είναι ραγδαία και γίνεται σε μια μικρή ζώνη δυναμικού. Αυτό συμβαίνει μια και στη μέση του γραφήματος, και τα δύο τρανζίστορ είναι σε κορεσμό και παρουσιάζουν μεγάλη ενίσχυση ( $v_{out}/v_{in}$ ) → μια μικρή αλλαγή στο δυναμικό εισόδου συνεπάγεται μια πολύ μεγαλύτερη στο εξόδου.

## Καμπύλη Μετάβασης από το Γράφημα



Παραπάνω βλέπουμε τον μετασχηματισμό του γραφήματος φορτίου την καμπύλη μεταβίβασης του αντιστροφέα, και μαζί την περιοχή λειτουργίας των n και p τρανζίστορ στα διάφορα σημεία της καμπύλης.

Διατρέχοντας την καμπύλη από αριστερά προς τα δεξιά,  $V_{in}$  από 0 σε 2.5V βλέπουμε τις εξής περιοχές:

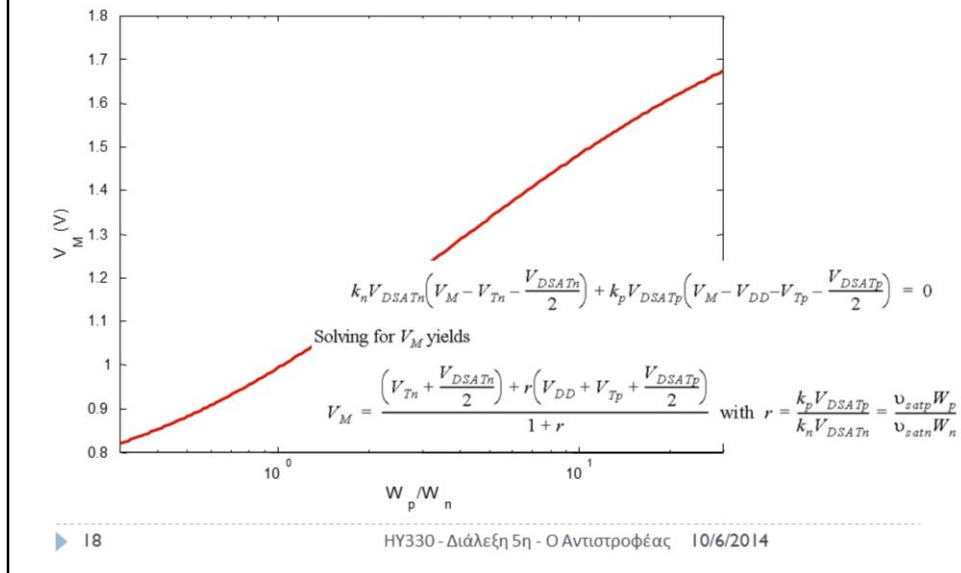
- nmos σβηστό ( $V_{dsn} = 0$ ), ενώ pmos στην γραμμική στην αρχή-αρχή του χαρακτηριστικού
- κατόπιν nmos σε κορεσμό, pmos στην γραμμική
- στο κέντρο του γραφήματος έχουμε και τα δυο σε κορεσμό μια και το  $V_d$  και των δυο είναι στην μέση του  $V_{dd}$
- κατόπιν το nmos περνάει στην γραμμική ενώ το pmos σε κορεσμό
- τέλος καθώς πλησιάζουμε το  $V_{dd}$  το nmos παραμένει στην γραμμική με το pmos να σβήνει ( $V_{dsp} = 0$ )



## Περιεχόμενα

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ Διάταξη
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
  - ▶ Δυναμική
  - ▶ Στατική
  - ▶ Διαρροής

## Κατώφλι Μετάβασης ως προς τα $W_p/W_n$



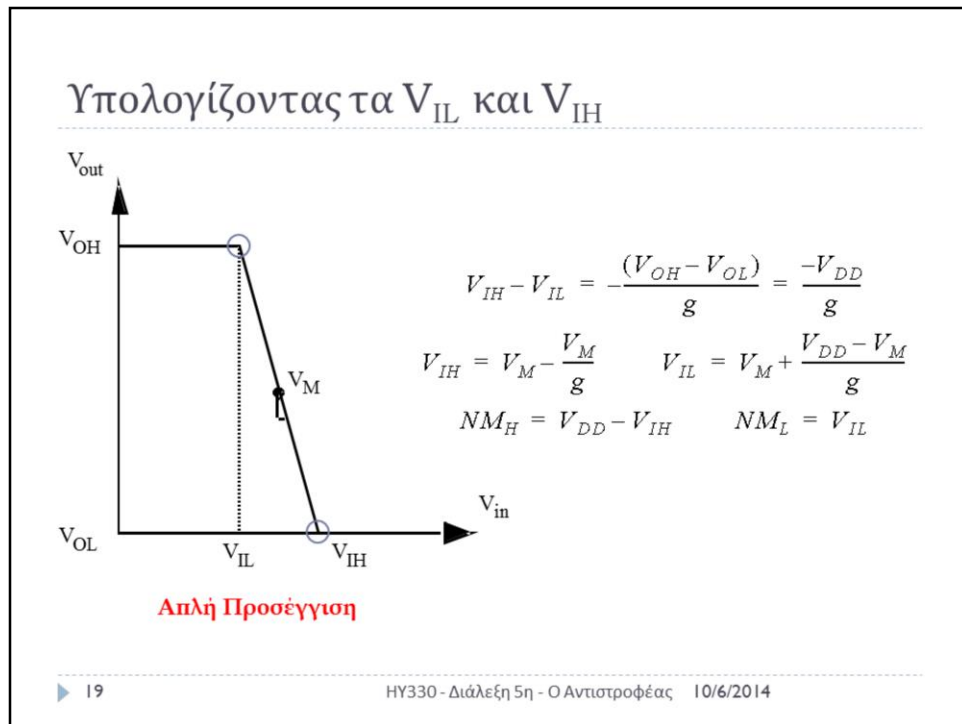
Το κατώφλι μετάβασης,  $V_M$ , ορίζεται ως το σημείο όπου  $V_{out} = V_{in}$ . Γραφικά, μπορούμε να το εντοπίζουμε από την τομή της καμπύλης μετάβασης με την διαγώνια γραμμή  $V_{out} = V_{in}$ .

Και τα δυο τρανζίστορ στο κατώφλι μετάβασης βρίσκονται στην περιοχή κορεσμού (κορεσμού ταχύτητας για DSM τρανζίστορ). Έτσι, στο σημείο  $V_M$ , τα δυο ρεύματα των τρανζίστορ είναι ίσα,  $I_n = I_p$ , και η είσοδος του αντιστροφέα είναι επίσης  $V_M$ .

Βλέπουμε ότι το κατώφλι μετάβασης είναι ανάλογο με τον λόγο των μεγεθών των δυο τρανζίστορ:

$V_M \approx r/(1+r)$ , όπου  $r \approx W_p/W_n$ .

Είναι επιθυμητό, για αξιόπιστη ψηφιακή σχεδίαση το σημείο  $V_M$  να βρίσκεται κοντά στο  $V_{dd}/2$ , έτσι ώστε τα περιθώρια λογικού 0 και λογικού 1 να είναι συμμετρικά. Η διαρρύθμιση αυτή μπορεί να γίνει με κατάλληλη επιλογή του λόγου  $W_p/W_n$  για το αντιστροφέα αλλά και γενικότερα για οποιαδήποτε πύλη.



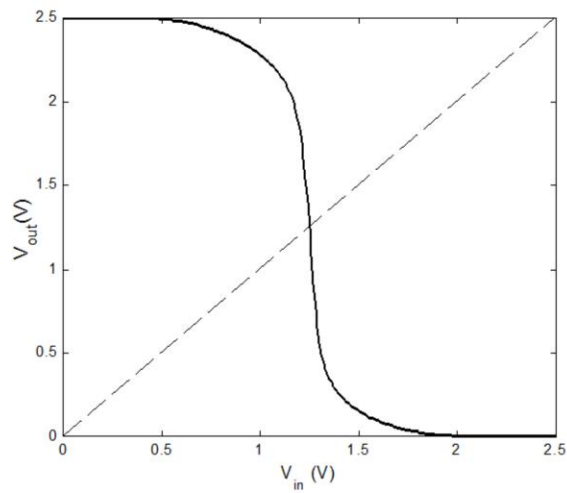
Νωρίτερα, στην 1<sup>η</sup> διάλεξη, είχαμε δει αναλυτικά τις συμβάσεις για τον υπολογισμό των  $V_{IH}$  και  $V_{IL}$ , ως τα σημεία δηλαδή που η κλίση της καμπύλης μεταβίβασης είναι -1.

Μια απλούστερη προσέγγιση για τα  $V_{IH}$  και  $V_{IL}$  είναι η εξής, η οποία παρουσιάζεται γραφικά στο παραπάνω σχήμα.

Θεωρώντας την εφαπτομένη ευθεία (κλίσης  $\Delta V_{out}/\Delta V_{in} = -g$ ) στο σημείο  $V_M$ , την προεκτείνουμε μέχρι να φτάσει να τέμνει τις οριζόντιες των σημείων  $V_{OH}$  και  $V_{OL}$ . Το σημείο τομής, αντιστοιχεί στον οριζόντιο άξονα ( $V_{in}$ ) στα  $V_{IL}$  και  $V_{IH}$  αντίστοιχα.

Έτσι, με τον παραπάνω ορισμό  $g = -(V_{OH} - V_{OL})/(V_{IH} - V_{IL})$  και με αλγεβρικές πράξεις προκύπτουν οι παραπάνω σχετικές εξισώσεις για τα  $V_{IH}$ ,  $V_{IL}$  ως προς το  $g$ ,  $V_M$  και  $V_{DD}$ . Παρατηρείστε ότι το σημείο  $V_M$  στον οριζόντιο άξονα έχει και τιμή  $V_M$  στον κάθετο άξονα.

## Χαρακτηριστική Καμπύλη σε Προσομείωση

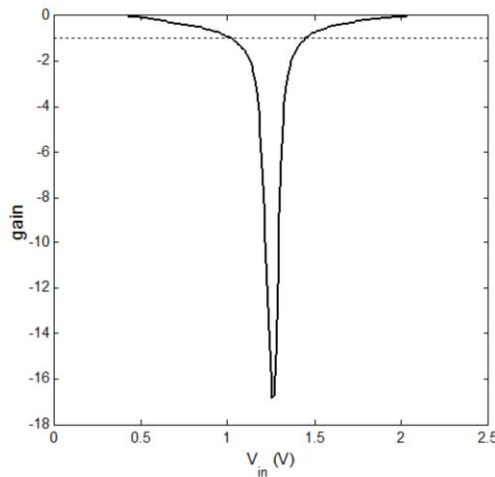


► 20

ΗΥ330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

Παραπάνω φαίνεται μια προσομοίωση της καμπύλης μετάβασης, και η τομή της με την ευθεία  $V_{out} = V_{in}$  για τον γραφικό υπολογισμό του VM.

## Ενίσχυση συναρτήσει του $V_{in}$



$$g = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}} = \frac{dV_{out}}{dV_{in}}$$

$$g = -\frac{1}{I_D(V_M)} \frac{k_n V_{DSATn} + k_p V_{DSATp}}{\lambda_n - \lambda_p}$$

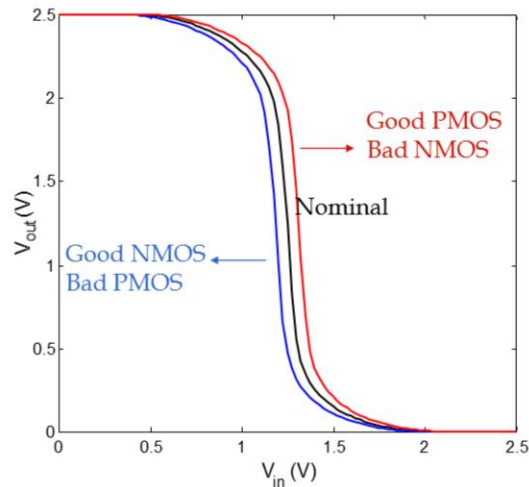
$$\approx \frac{1+r}{(V_M - V_{Tn} - V_{DSATn}/2)(\lambda_n - \lambda_p)}$$

Παραπάνω φαίνεται, για την καμπύλη μετάβασης της προηγούμενης διαφάνειας, η γραφική παράσταση της ενίσχυσης  $g$ , η οποία αντιστοιχεί στην κλίση της εφαπτομένης ( $1^{\eta}$  παράγωγο) στην καμπύλη μετάβασης.

## Περιεχόμενα

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ Διάταξη
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ **Επιρροή μεταβλητότητας**
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
  - ▶ Δυναμική
  - ▶ Στατική
  - ▶ Διαρροής

## Επιρροή Μεταβλητότητας



► 23

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

Είναι προφανές ότι όπως τα μεγέθη επηρεάζουν το  $V_M$ , η οποιαδήποτε μεταβλητότητα κατά την κατασκευή θα τροποποιήσει την ισορροπία της χαρακτηριστικής, όπως φαίνεται παραπάνω.

Κατά την διαδικασία της επαλήθευσης λειτουργίας θα πρέπει να ελέγχουμε ότι οι όποιες προδιαγραφές του κυκλώματος, συμπεριλαμβανομένων (α) εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας, (β) εύρος τάσεων λειτουργίας, (γ) μέγιστο επίπεδο θορύβου (μπορεί να προσομοιωθεί) συσχετίζονται και με τα μοντέλα μεταβλητότητας των τρανζίστορ, τα οποία σε επίπεδο μοντέλων SPICE είναι:

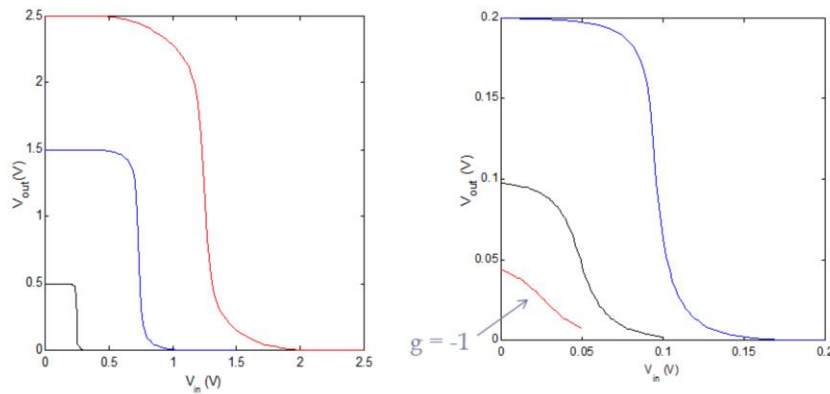
SS, SF, FS, TT, FF για NMOS και PMOS αντίστοιχα, όπου  
S = slow, T = typical, F = fast

## Περιεχόμενα

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ Διάταξη
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ **Επιρροή τάσης**
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
- ▶ Δυναμική
- ▶ Στατική
- ▶ Διαρροής



## Χαρακτηριστική και Κέρδος συναρτήσεως της Τάσης



▶ 25

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

Ένας παράγοντας ελευθερίας, στα συστήματα τελευταίας τεχνολογίας, ιδίως αυτά που προορίζονται για χαμηλή κατανάλωση είναι και η τάση. Στις παραπάνω γραφικές παραστάσεις βλέπουμε την επιρροή της τάσης στην καμπύλη μετάβασης.

Αυτό που παρατηρούμε είναι το εξής:

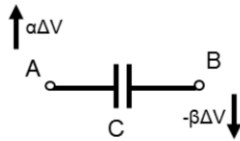
- η ενίσχυση μεγαλώνει, δηλ. η εφαπτομένη στο VM έχει υψηλότερη κλίση, με αποτέλεσμα καλύτερα σχετικά επίπεδα περιθωρίων θορύβου.
- ακόμα και κάτω από το  $V_T$ , παρόλο που τα τρανζίστορ πλέον διαρρέουν ρεύμα (η ανάλυση είναι DC) το σχήμα της καμπύλης διατηρείται, έως ότου γύρω στα 0.1V (100mV) η χαρακτηριστική εκφυλίζεται λόγω θερμικών φαινομένων.
- η κατανάλωση ισχύος πέφτει ανάλογα με το  $V_{dd}^2$ , όμως η καθυστέρηση αυξάνεται ανάλογα με το  $1/V_{dd}$  (και η συχνότητα ανάλογα με το  $V_{dd}$ ).

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της κλιμάκωσης της τάσης είναι η αύξηση της ευαισθησίας στην μεταβλητότητα, συγκεκριμένα του σημείου VM λ.χ.

## Περιεχόμενα

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ Διάταξη
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
  - ▶ Δυναμική
  - ▶ Στατική
  - ▶ Διαρροής

## Παρένθεση – Φαινόμενο Miller

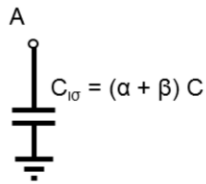


► Αν έχουμε ταυτόχρονη αλλαγή κατά:

- $\alpha\Delta V$  στην μια πλάκα
- $-\beta\Delta V$  στην άλλη πλάκα

► Τότε:

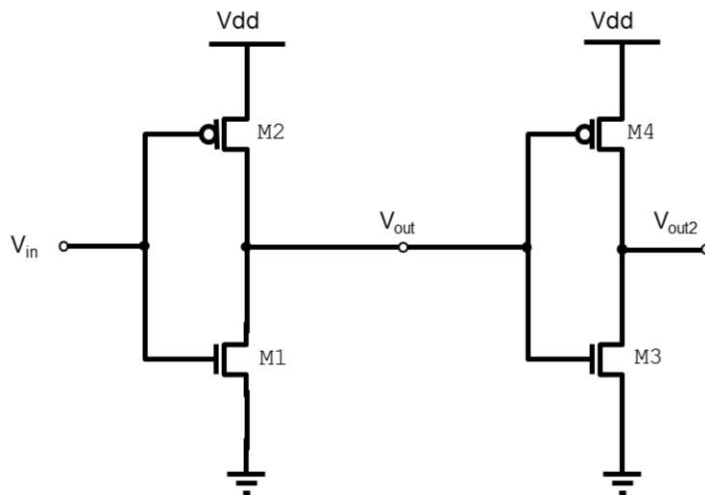
$$C = \frac{Q}{(\alpha + \beta)\Delta V}$$



► Οπότε μπορούμε να θεωρήσουμε μια ισοδύναμη χωρητικότητα προς ένα σταθερό σημείο ως:

$$C_{ισ} = \frac{Q}{\Delta V} \Leftrightarrow C_{ισ} = (\alpha + \beta)C$$

## Μεταβατική Ανάλυση Κυκλώματος Αντιστροφέα



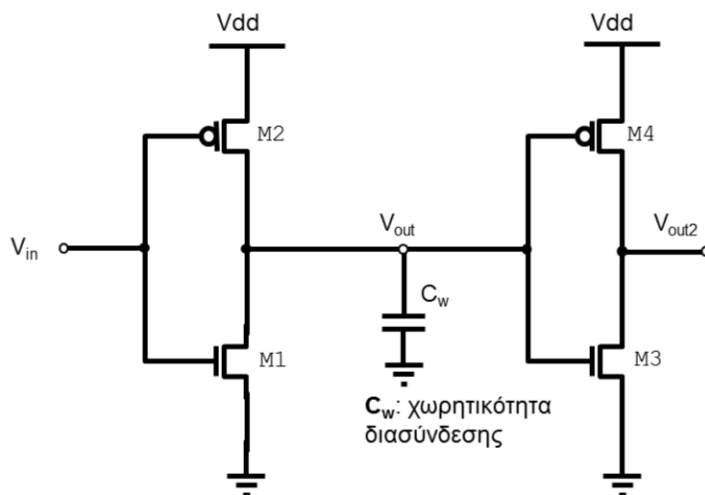
▶ 28

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

Όπως έχουμε δει, βάση του μοντέλου του τρανζίστορ ως αντίσταση, η καθυστέρηση μεταβίβασης είναι ανάλογη του  $CL$ , του φορτίου στην έξοδο ενός αντιστροφέα. Έτσι, για να ελαχιστοποιηθεί η καθυστέρηση του αντιστροφέα στο παραπάνω σχήμα, πρέπει να ελαχιστοποιήσουμε το  $CL$ .

Στις παρακάτω διαφάνειες, μελετάμε διεξοδικά τις συνισταμένες παρασιτικές χωρητικότητες που συναποτελούν την συνολική χωρητικότητα στην έξοδο του αντιστροφέα (και γενικότερα μιας πύλης CMOS).

## Μεταβατική Ανάλυση Κυκλώματος Αντιστροφέα



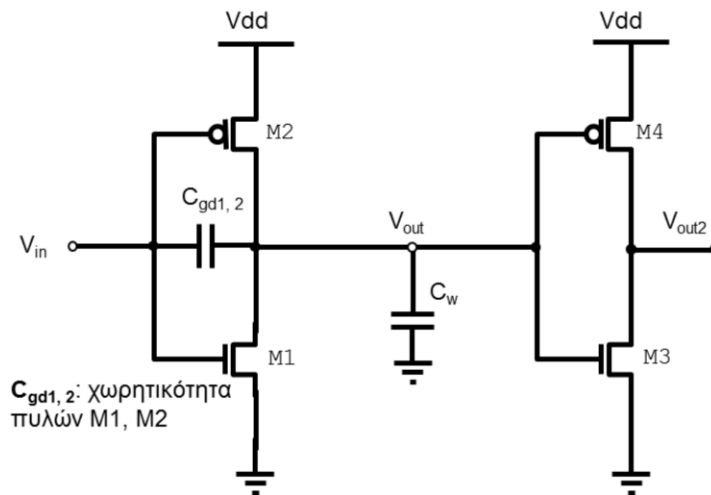
▶ 29

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

$C_w$  είναι η χωρητικότητα της διασύνδεσης από την έξοδο του 1<sup>ου</sup> αντιστροφέα στην είσοδο του 2<sup>ου</sup>.

Είναι συνάρτηση της απόστασης των δυο πυλών, αλλά και γενικά με τον πλήθος των πυλών που οδηγούνται (fan-out). Υπολογίζεται μέσω της εξόρυξης των παρασιτικών των διασυνδέσεων των μετάλλων, όπως είδαμε στην προηγούμενη διάλεξη.

## Μεταβατική Ανάλυση Κυκλώματος Αντιστροφέα



▶ 30

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

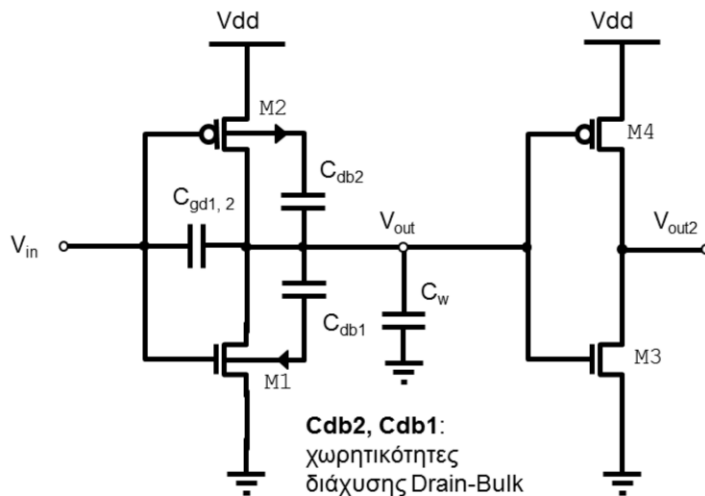
$C_{gd1,2}$ , η οποία εμφανίζεται μεταξύ του κόμβου  $V_{in}$  και του κόμβου  $V_{out}$  είναι η χωρητικότητα των πυλών των  $M1, M2$ , η οποία όπως έχουμε δει νωρίτερα είναι συνάρτηση του  $V_{ds}$ , και έχει ως συνιστώσες (α) την χωρητικότητα καναλιού, και (β) την χωρητικότητα επικάλυψης.

Επειδή κατά την διάρκεια της εφαρμογής σήματος στο  $V_{in}$  (μέχρι το σημείο 50% του τελικού), τα σχετικά τρανζίστορ  $M1$  και  $M2$  βρίσκονται στις καταστάσεις σβηστό και κορεσμού αντίστοιχα (ανάλογα με την κατεύθυνση), η χωρητικότητα καναλιού των  $C_{gd1,2}$  είναι μηδενική. Άρα η  $C_{gd1,2}$  αποτελείται μόνο από την καθυστέρηση επικάλυψης:

$$C_{gd1,2} = CGDOn \cdot Wn + CGD0p \cdot Wp$$

Βάση του φαινομένου Miller στα άκρα της  $C_{gd1,2}$ , η κάθε διαφορά δυναμικού  $\Delta V$  στην είσοδο, ανάγεται σε  $-\Delta V$  στην έξοδο, και έτσι η συνολική διαφορά δυναμικού είναι  $\sim -2\Delta V$ . Άρα, μπορούμε να ανάγουμε την  $C_{gd1,2}$  σε ισοδύναμη χωρητικότητα ( $2 \cdot C_{gd1,2}$ ) ως προς την τάση/γείωση.

## Μεταβατική Ανάλυση Κυκλώματος Αντιστροφέα



▶ 31

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

$C_{db1}$ ,  $C_{db2}$  είναι οι χωρητικότητες διάχυσης της αντίστροφα πολωμένης pn διόδου μεταξύ Drain και Bulk.

Όπως έχουμε δει νωρίτερα, η συγκεκριμένη χωρητικότητα είναι **αυστηρά μη γραμμική** και ο υπολογισμός της γίνεται βάση των δυναμικών  $V_{high}$ ,  $V_{low}$ , του εγγενούς δυναμικού  $\phi_0$  και του συντελεστή  $m$ .

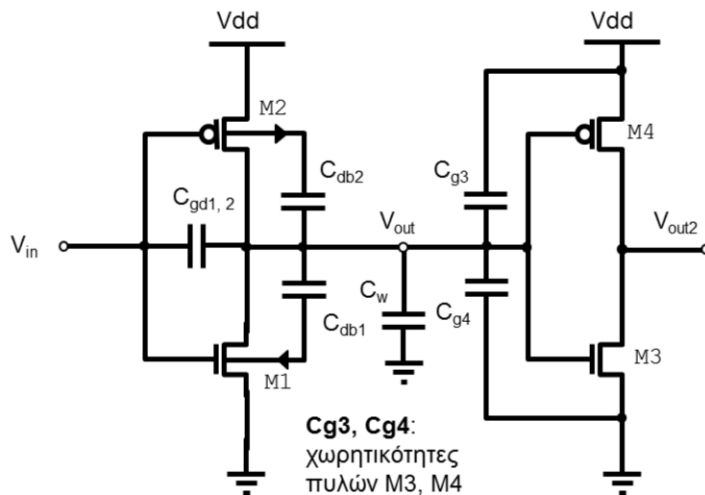
Επιπλέον, συναποτελείται από δυο συνιστώσες, την *κάθετη* και την *πλευρική* χωρητικότητα, η κάθε μια από τις οποίες έχει (α) σχετικές παραμέτρους και (β) συντελεστές χωρητικότητας ανά μονάδα εμβαδού η περιμέτρου.

Έτσι:

$$C_{db2} = K_{eqp} \cdot C_J \cdot AD_p + K_{eqswp} \cdot C_{Jsw} \cdot PD_p$$

$$C_{db1} = K_{eqn} \cdot C_J \cdot AD_d + K_{eqsw n} \cdot C_{Jsw} \cdot PD_n$$

## Μεταβατική Ανάλυση Κυκλώματος Αντιστροφέα



▶ 32

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

$C_{g3}$ ,  $C_{g4}$  είναι οι χωρητικότητες των πυλών των  $M3$ ,  $M4$ , οι οποίες αποτελούνται (α) από την χωρητικότητα του καναλιού και (β) από την χωρητικότητα της επικάλυψης, δηλ.:

$$C_{g3} = (CGSON + CGDON) Wn + Cox \cdot Wn \cdot Ln$$

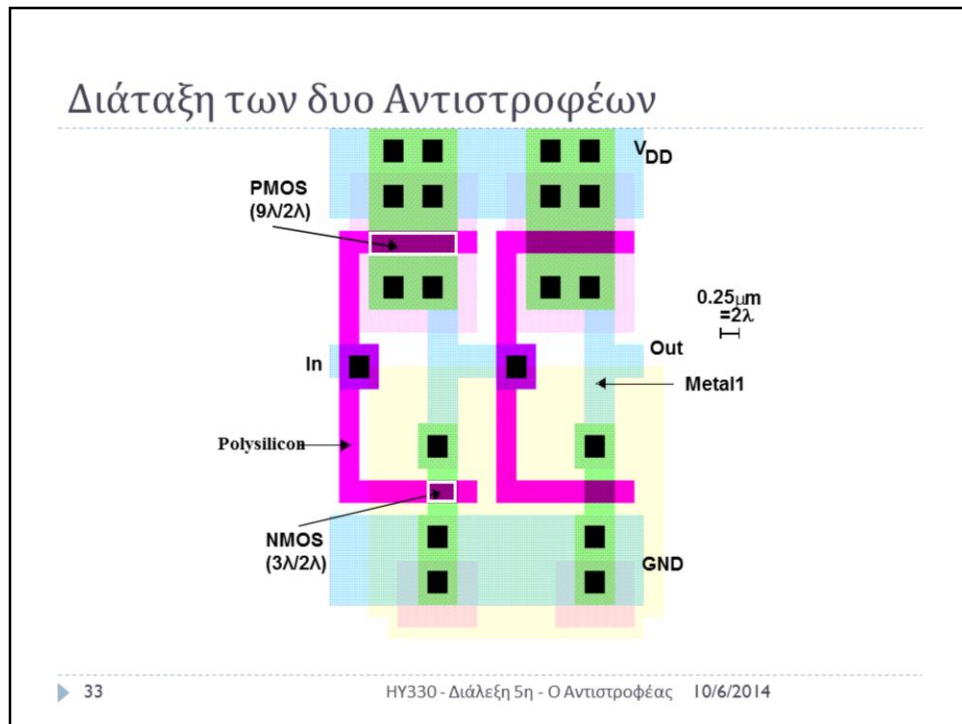
$$C_{g4} = (CGSOP + CGDOP) Wp + Cox \cdot Wp \cdot Lp$$

Οι παραπάνω εκφράσεις υποθέτουν ότι (α) όλη η χωρητικότητα των  $M3$ ,  $M4$  εμφανίζεται μεταξύ τάσης και γείωσης, δηλαδή αγνοούν την συνιστώσα  $C_{gd3,4}$  και το φαινόμενο Miller εκεί, και (β) θεωρούν ότι η χωρητικότητα είναι σταθερή (δεν γίνεται  $2/3 Cox \cdot W \cdot L$  στο Drain στον κορεσμό των  $M3$ ,  $M4$ ).

Το μεταβατικό διάστημα που μας ενδιαφέρει είναι μέχρι το  $V_{out}$  να φτάσει στο 50% της τελικής του τιμής. Έτσι, ως προς το (α) θεωρούμε ότι τα  $M3$ ,  $M4$  δεν τραβάνε σημαντικό ρεύμα μέχρι το 50% και η αλλαγή στο  $V_{out2}$  είναι αμελητέα. Ως προς το (β), η παραπάνω προσέγγιση είναι πεσιμιστική μια και θεωρεί την χωρητικότητα μεγαλύτερη από ότι είναι μεταβατικά.

Έτσι, συνολικά είναι αποδεκτή για μια πρωτογενή, χειρονακτική ανάλυση.





Οι χωρητικότητες που είδαμε, προκύπτουν με φυσικό τρόπο από την παραπάνω κάτοψη.

Έτσι, μετράμε από το σχήμα για τα σχετικά τρανζίστορ:

- $W, L$  σε  $\mu m$
- περίμετρο και εμβαδό Drain για τις χωρητικότητες διάχυσης, **PD, AD**

## Περιεχόμενα

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ Διάταξη
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
- ▶ Δυναμική
- ▶ Στατική
- ▶ Διαρροής

## Εξόρυξη μεγεθών των τρανζίστορ

- ▶ Οι περιοχές Drain/Source μετρώνται από το άκρη της πύλης και πέρα
  - ▶ αν υπάρχει επαφή στην διάχυση συμπεριλαμβάνεται
  - ▶ αν όχι (τρανζίστορ σε σειρά) τότε μόνο την περιοχή μεταξύ των πυλών πολύ-πυριτίου
- ▶ Μετράμε σε  $\lambda$ :
  - ▶ Εδώ  $2\lambda = 0.25 \Leftrightarrow \lambda = 0.125$

	W/L	AD ( $\mu\text{m}^2$ )	PD ( $\mu\text{m}$ )	AS ( $\mu\text{m}^2$ )	PS ( $\mu\text{m}$ )
NMOS	0.375/0.25	0.3 (19 $\lambda^2$ )	1.875 (15 $\lambda$ )	0.3 (19 $\lambda^2$ )	1.875 (15 $\lambda$ )
PMOS	1.125/0.25	0.7 (45 $\lambda^2$ )	2.375 (19 $\lambda$ )	0.7 (45 $\lambda^2$ )	2.375 (19 $\lambda$ )

## Χωρητικότητες – Διεργασία 0.25μm

- ▶ Έτσι, συνολικά οι χωρητικότητες έχουν ως εξής:
  - ▶  $CGS = CGCS + CGSO$
  - ▶  $CGD = CGCD + CGDO$
  - ▶  $CGB = CGCB$  (όταν είναι το τρανζίστορ σβηστό)
  - ▶  $CSB = CS_{diff}$
  - ▶  $CDB = C_{diff}$
- ▶ Παρακάτω παραθέτονται χαρακτηριστικές τιμές για τις σχετικές παραμέτρους σε διεργασία 0.25μm.

	$C_{ox}$ (fF/μm <sup>2</sup> )	$C_O$ (fF/μm)	$C_j$ (fF/μm <sup>2</sup> )	$m_j$	$\phi_b$ (V)	$C_{jsw}$ (fF/μm)	$m_{jsw}$	$\phi_{Dsw}$ (V)
NMOS	6	0.31	2	0.5	0.9	0.28	0.44	0.9
PMOS	6	0.27	1.9	0.48	0.9	0.22	0.32	0.9

▶ 36

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

**Διαφάνεια Υπενθύμισης – από την διάλεξη 3**

## Χωρητικότητα Ένωσης pn

- ▶ Για μεγάλες διαφοροποιήσεις της τάσης,  $\Delta V_D$ , έχουμε:

$$C_{eq} = \frac{\Delta Q_j}{\Delta V_D} = \frac{Q_j(V_{high}) - Q_j(V_{low})}{V_{high} - V_{low}} = K_{eq} C_{j0}$$

- ▶ Όπου το  $K_{eq}$  υπολογίζεται ως:

$$K_{eq} = \frac{-\phi_0^m}{(V_{high} - V_{low})(1-m)} \left[ (\phi_0 - V_{high})^{1-m} - (\phi_0 - V_{low})^{1-m} \right]$$

Η παραπάνω έκφραση χρησιμεύει στον υπολογισμό των παρασιτικών χωρητικοτήτων των διόδων που υπάρχουν στα άκρα των MOS τρανζίστορ.

## Υπολογισμός $K_{eq}$

$$K_{eq} = \frac{-\phi 0^m}{(V_{high} - V_{low})(1-m)} \left[ (\phi 0 - V_{high})^{1-m} - (\phi 0 - V_{low})^{1-m} \right]$$

		Παράμετροι	(V <sub>high</sub> , V <sub>low</sub> )	Αποτέλεσμα
<b>NMOS</b>	<b>1→0</b>	Κάθετη	m = 0.5, φ = 0.9	<b>0.57</b>
		Πλευρική	m = 0.44, φ = 0.9	<b>0.61</b>
<b>NMOS</b>	<b>0→1</b>	Κάθετη	m = 0.5, φ = 0.9	<b>0.79</b>
		Πλευρική	m = 0.44, φ = 0.9	<b>0.81</b>
<b>PMOS</b>	<b>1→0</b>	Κάθετη	m = 0.48, φ = 0.9	<b>0.79</b>
		Πλευρική	m = 0.32, φ = 0.9	<b>0.86</b>
<b>PMOS</b>	<b>0→1</b>	Κάθετη	m = 0.48, φ = 0.9	<b>0.59</b>
		Πλευρική	m = 0.32, φ = 0.9	<b>0.7</b>

▶ 38

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

Οι τιμές V<sub>HIGH</sub> και V<sub>LOW</sub> στην παραπάνω εξίσωση αντιστοιχούν πάντα στο αρνητικότερο και θετικότερο δυναμικό στα άκρα της διόδου αντίστοιχα, μια και η εξίσωση αφορά την κατεύθυνση της θετικά στραμμένης διόδου, ενώ οι παρασιτικές διόδοι διάχυσης έχουν την αντίστροφη φορά.

## Περιεχόμενα

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ Διάταξη
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ **Ανάλυση χωρητικότητας**
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
- ▶ Δυναμική
- ▶ Στατική
- ▶ Διαρροής

## Ανάλυση της Χωρητικότητας

► Αναλύουμε τις συνιστώσες της χωρητικότητας  $C_L$

Χωρητικότητα	Έκφραση	Τιμή (fF), $I \rightarrow 0$	Τιμή (fF), $0 \rightarrow 1$
$C_{gd1}$	$2 CGDO_n W_n$	0.23	0.23
$C_{gd2}$	$2 CGDO_p W_p$	0.61	0.61
$C_{db1}$	$K_{eqp} C_J AD_n + K_{eqswp} CJSW PD_n$	0.66	0.90
$C_{db2}$	$K_{eqp} C_J AD_p + K_{eqswp} CJSW PD_p$	1.5	1.15
$C_{g3}$	$(CGDO_n + CGSO_n) W_n + C_{ox} W_n L_n$	0.76	0.76
$C_{g4}$	$(CGDO_p + CGSO_p) W_p + C_{ox} W_p L_p$	2.28	2.28
$C_w$	Από Εξόρυξη	0.12	0.12
$C_L$	$\Sigma$	<b>6.1</b>	<b>6.0</b>

► 40

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

Έτσι, έχοντας με την όλη αυτή διαδικασία υπολογίσει την χωρητικότητα  $C_L$  ως προς τις επιμέρους της συνιστώσες, μπορούμε να υπολογίσουμε την καθυστέρηση της πρώτης πύλης βάση της καθυστέρησης RC δικτύου 1<sup>ου</sup> βαθμού, δηλ.:

$$t_{LH} = 0.69 R_{eqn} C_{HL},$$

$$t_{HL} = 0.69 R_{eqp} C_{LH}, \text{ και}$$

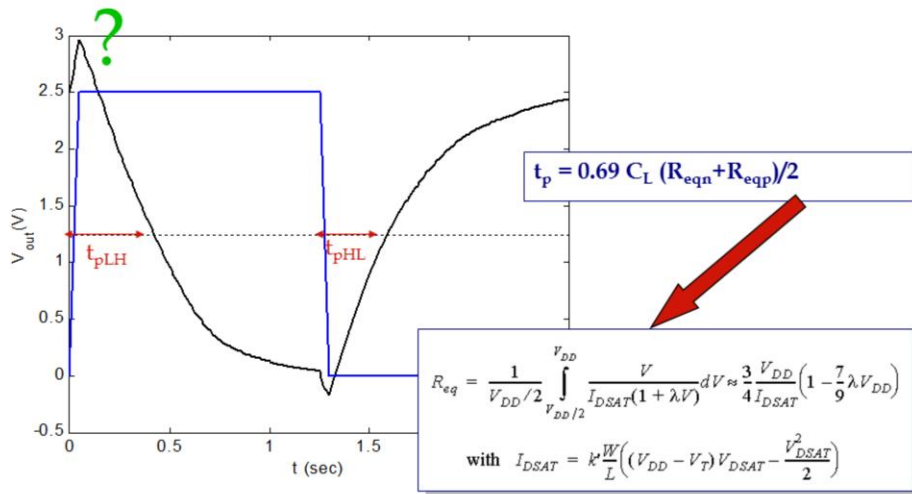
$$t_p = (t_{LH} + t_{HL})/2$$



## Περιεχόμενα

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ Διάταξη
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ **Μεταβατική απόκριση**
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
  - ▶ Δυναμική
  - ▶ Στατική
  - ▶ Διαρροής

## Μεταβατική Απόκριση (TRAN)



42

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

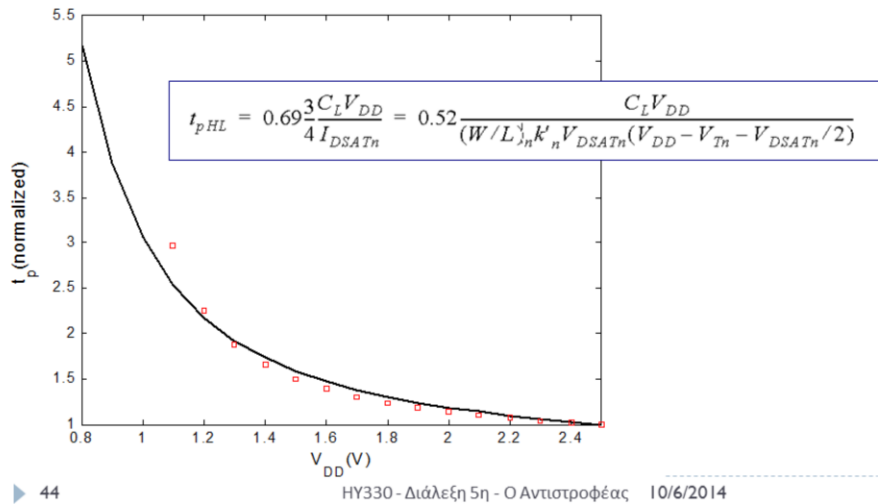
Σε τι οφείλεται η υπερκέρωση (overshoot) του δυναμικού κατά την πτώση της εξόδου και η βύθιση (undershoot) κατά την άνοδο της εξόδου;

Και τα δυο φαινόμενα οφείλονται στην ζεύξη (coupling) μεταξύ πύλης και drain των τρανζιστορ της εισόδου μέσω της σχετικής παρασιτικής χωρητικότητας. Έτσι, πριν αντιδράσουν τα M1, M2, η ζεύξη μέσω των σχετικών πυκνωτών αλλάζει το δυναμικό στο Vout στην ίδια κατεύθυνση με το δυναμικό της εισόδου!

## Περιεχόμενα

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ Διάταξη
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
  - ▶ Δυναμική
  - ▶ Στατική
  - ▶ Διαρροής

## Καθυστέρηση συναρτήσεως της Τάσης



Ως προς την εξάρτηση της καθυστέρησης ως προς την τάση, όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα

η εξάρτηση είναι αντιστρόφως ανάλογη:  $t_p \approx 1/V_{dd}$  και έτσι  $f \approx V_{dd}$ .

Από το παραπάνω συμπεραίνουμε ότι για σχεδίαση υψηλής ταχύτητας θέλουμε να κρατήσουμε την τάση

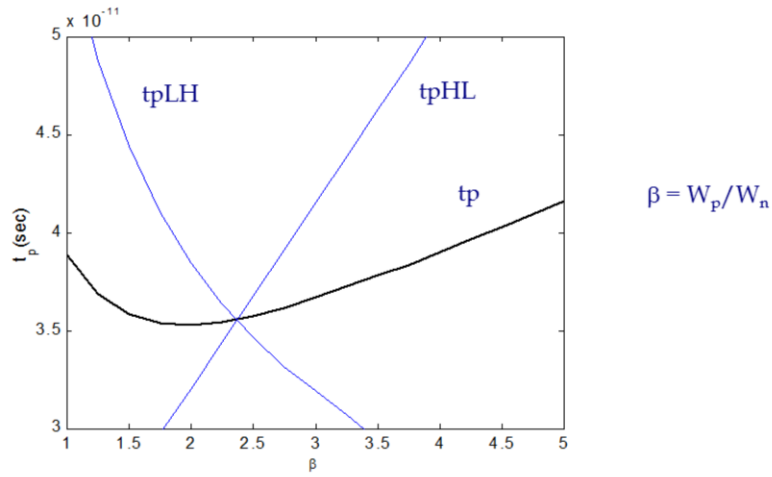
σε σχετικά υψηλά επίπεδα. Επιπλέον, παρατηρήστε την ομοιότητα της παραπάνω καμπύλης με αυτήν της

ισοδύναμης αντίστασης του τρανζίστορ συναρτήσεως του δυναμικού στην πύλη του.

## Περιεχόμενα

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ Διάταξη
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
  - ▶ Δυναμική
  - ▶ Στατική
  - ▶ Διαρροής

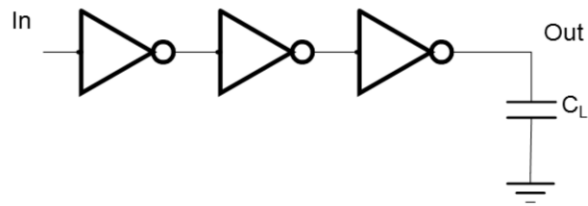
## Λόγος W των PMOS και NMOS



## Περιεχόμενα

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ Διάταξη
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
  - ▶ Δυναμική
  - ▶ Στατική
  - ▶ Διαρροής

## Βελτιστοποίηση μεγεθών για Υψηλή Απόδοση



- ▶ Σε πολλές πρακτικές περιπτώσεις πρέπει να οδηγήσουμε ένα σήμα σε σημαντικές χωρητικότητες:
  - ▶ έξοδοι (pads) του κυκλώματος
  - ▶ σήματα ενεργοποίησης πολλαπλών bit, π.χ. 32, 64 bit
  - ▶ δέντρα ρολογιού που οδηγούν χιλιάδες καταχωρητές
- ▶ Χρειαζόμαστε έναν αλγόριθμο/ευριστικό ενίσχυσης τέτοιων διατάξεων



## Βελτιστοποίηση μεγεθών για Υψηλή Απόδοση

### ► Γενικεύουμε τα συμπεράσματα για τον αντιστροφέα:

#### ► οι χωρητικότητες στην έξοδο μπορούν να διαχωριστούν σε:

##### ► **εσωτερικές:** εγγενής χωρητικότητες της πύλης, δηλ.

- χωρητικότητες διάχυσης d, s
- χωρητικότητες επικάλυψης Cgd με το σχετικό φαινόμενο Miller

##### ► **εξωτερικές:** εξωγενής χωρητικότητες της πύλης, δηλ.

- χωρητικότητες συνδέσεων
- φορτίο επόμενων πυλών (fan-out)

#### ► Έτσι, με βάση την ισοδύναμη αντίσταση των τρανζίστορ, για μια πλήρως συμμετρική πύλη:

$$t_p = 0.69R_{eq}(C_{int} + C_{ext}) = 0.69R_{eq}C_{int}\left(1 + \frac{C_{ext}}{C_{int}}\right) = t_{p0}\left(1 + \frac{C_{ext}}{C_{int}}\right)$$

#### ► όπου $t_{p0}$ η καθυστέρηση ενός αντιστροφέα χωρίς φορτίο

## Βελτιστοποίηση μεγεθών για Υψηλή Απόδοση

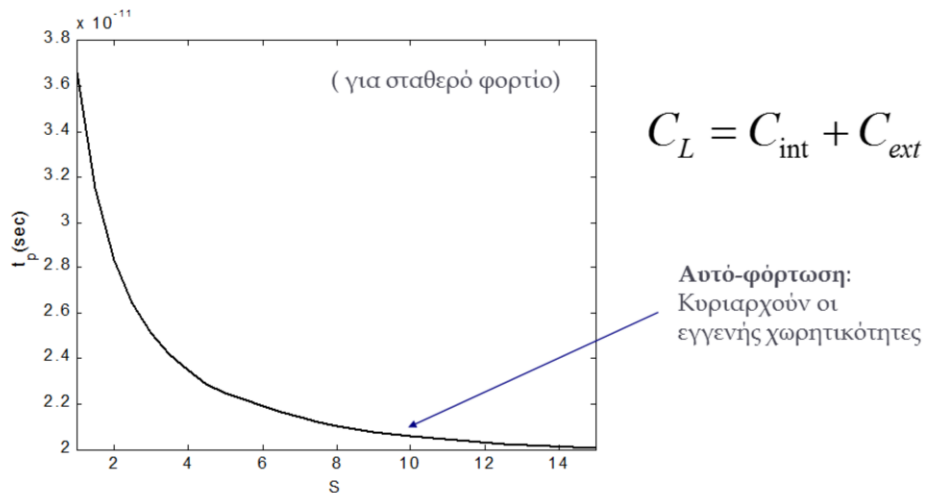
- ▶ Για πύλη μεγέθους  $S$ , δηλ.  $W = S \cdot W_{\min}$ ,  $L = L_{\min}$

$$t_p = t_{p0} \left(1 + \frac{C_{ext}}{C_{int}}\right) = t_{p0} \left(1 + \frac{C_{ext}}{S C_{int ref}}\right) = t_{p0} \left(1 + \frac{f}{\gamma}\right) \quad \text{όπου:} \quad C_{int} = \gamma C_g, f = \frac{C_{ext}}{C_g}$$

- ▶ Συνεπώς, μεγαλώνοντας το  $S$ :
  - ▶ όταν  $C_{ext}$  της ίδιας τάξης μεγέθους με το  $S \cdot C_{int ref}$
  - ▶ οδηγεί σε *μεγαλύτερη καθυστέρηση* → **Αυτό-φόρτωση**
- ▶ Αυτό-φόρτωση ονομάζουμε την περίπτωση που η καθυστέρηση της πύλης κυριαρχείται από εγγενής χωρητικότητες του εαυτού της
- ▶ Επιπλέον βλέπουμε ότι για αρκετά μεγάλο  $S$  η καθυστέρηση της πύλης τείνει στο  $t_{p0}$
- ▶ Η δεύτερη μορφή της έκφρασης καθυστέρησης χρησιμοποιεί:
  - ▶  $f$ : λόγος μεγέθους εξωτερικής χωρητικότητας προς την χωρητικότητα της πύλης
  - ▶  $\gamma$ : σχέση μεγέθους πύλης και εγγενής χωρητικότητας

Το  $f$  ονομάζεται και ουσιαστικό fan-out. Η τελευταία έκφραση μας βοηθάει να εξερευνήσουμε την καθυστέρηση μιας πύλης ως προς το φορτίο που της επιβάλλει η επόμενη, μια και  $C_{ext}$  είναι η χωρητικότητα της επόμενης, που οδηγείται (μαζί και με χωρητικότητα των συνδέσεων), και αναλογεί στο μέγεθος της, και  $C_g$  είναι η χωρητικότητα της ίδιας, που οδηγεί.

## Μέγεθος και Καθυστέρηση



► 51

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε την καθυστέρηση του αντιστροφέα συναρτήσει της κλιμάκωσης του μεγέθους του  $S$ .

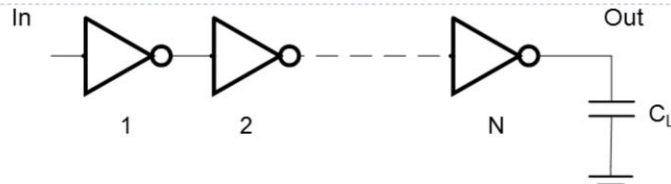
Από ένα  $S$  και πέρα ξεκινούν να κυριαρχούν οι εγγενής χωρητικότητες, με αποτέλεσμα σε αυτή την περιοχή της αυτό-φόρτωσης η καθυστέρηση να τείνει αργά, καθώς μεγαλώνει το  $S$  προς το  $t_{p0}$ .

## Σχεδίαση για Υψηλή Απόδοση

---

- ▶ Έλεγχος των παρασιτικών χωρητικοτήτων
  - ▶ Όσο μικρότερες είναι εφικτό
- ▶ Μεγάλα μεγέθη τρανζίστορ
  - ▶ Αυτό-φόρτωση:
    - ▶ Περίπτωση όπου η καθυστέρηση της πύλης κυριαρχείται από τις παρασιτικές χωρητικότητες των τρανζίστορ που την απαρτίζουν
    - ▶ Δηλαδή από την εγγενή χωρητικότητα της διάχυσης
  - ▶ Προσοχή στην αυτό-φόρτωση
    - ▶ Όταν μια πύλη ισχύει η αυτό-φόρτωση δεν βοηθάει να μεγαλώσουμε το μέγεθος των τρανζίστορ...
    - ▶ Μεγαλώνουμε μέχρι η εγγενής χωρητικότητα να είναι της ίδιας τάξης με την εξωτερική!
- ▶ Μεγαλύτερη τάση;
  - ▶ Αύξηση της τάσης;

## Ελάχιστη Καθυστέρηση στην οδήγηση χωρητικότητας



- ▶ Στην παραπάνω λοιπόν γενική περίπτωση η συνολική καθυστέρηση  $In \rightarrow Out$  είναι:

$$t_p = t_{p1} + t_{p2} + \dots + t_{pN}$$

$$F = \frac{C_L}{C_{g(1)}}$$

- ▶ Και για την πύλη  $j$  ισχύει:

$$t_{p(j)} = t_{p0} \left( 1 + \frac{C_{g(j+1)}}{\gamma C_{g(j)}} \right) = t_{p0} \left( 1 + \frac{f_j}{\gamma} \right) \quad \text{Όπου } f_j \text{ ο λόγος των μεγεθών των πυλών } j \text{ και } j+1$$

- ▶ Άρα:  $t_p = t_{p0} \sum_{j=1}^N t_{p(j)}$  και στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί το  $t_p$

## Βέλτιστη κλιμάκωση των μεγεθών, $f$ , και καθυστέρηση

- ▶ Η εξίσωση που είδαμε έχει  $(n-1)$  αγνώστους:

- ▶ είτε  $f(j)$ , για  $j > 1$

- ▶ είτε  $C_g(j)$ , για  $j > 1$

$$t_p = t_{p0} \sum_{j=1}^N t_{p(j)} = t_{p0} \sum_{j=1}^N \left(1 + \frac{C_{g(j+1)}}{\gamma C_{g(j)}}\right)$$

- ▶ Για ελάχιστη καθυστέρηση  $(n-1)$  παράγωγοι:

$$\frac{C_L}{C_{g(N)}} = \frac{C_{g(j+1)}}{C_{g(j)}} = \frac{C_{g(j)}}{C_{g(j-1)}} = \dots = \frac{C_2}{C_1}$$

- ▶ Συνεπώς, για ελάχιστη καθυστέρηση θέλουμε **έναν σταθερό λόγο μεγεθών** για όλες τις πύλες:

Όπου η βέλτιστη καθυστέρηση είναι:

$$f = \sqrt[N]{\frac{C_L}{C_{g(1)}}} = \sqrt[N]{F}$$

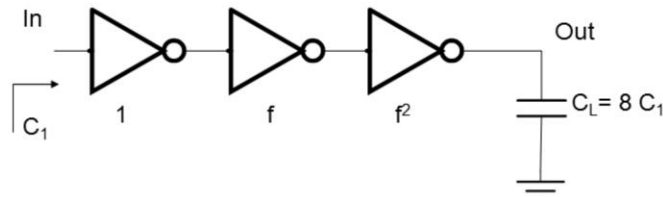
$$t_p = N t_{p0} \left(1 + \frac{\sqrt[N]{F}}{\gamma}\right)$$

Η παραπάνω εξίσωση της καθυστέρησης καταδεικνύει ένα πολύ σημαντικό αποτέλεσμα ως προς την επιλογή βέλτιστων μεγεθών για ενίσχυση.

Αν  $(\alpha)$  ο αριθμός των σταδίων είναι πολύ μεγάλος, τότε το πρώτο μέρος της εξίσωσης  $(N \cdot t_{p0})$  κυριαρχεί την καθυστέρηση, ενώ αν  $(\beta)$  ο αριθμός των σταδίων είναι πολύ μικρός, τότε το δεύτερο μέρος της εξίσωσης κυριαρχεί, δηλ. το  $f$ , ο λόγος των χωρητικοτήτων σε κάθε στάδιο.

## Παράδειγμα

- ▶ Έστω  $C_L = 8 C_1$



- ▶ Έχουμε 3 συνολικά στάδια στα οποία θέλουμε να διαμοιραστεί το 8.  $C_1$ , άρα:

$$f = \sqrt[3]{8} = 2 \qquad t_p = 3t_{p0} \left(1 + \frac{2}{1}\right) = 9t_{p0}$$

**Αν το N είναι άγνωστο;**

▶ 55

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

Το παραπάνω παράδειγμα επιδεικνύει τον υπολογισμό του βέλτιστου λόγου  $f$ , βάση της προηγούμενης ανάλυσης.

Ο αριθμός των σταδίων είναι δηλαδή δεδομένος και το ζητούμενο είναι το  $f$ . Όπως βλέπουμε παραπάνω η καθυστέρηση στο παράδειγμα είναι  $9t_{p0}$  ή απλά 9, αν κάνουμε σχετική ανάλυση ως προς τον μικρότερο αντιστροφέα.

Αν όμως δεν είναι προαποφασισμένος ο αριθμός των σταδίων της αλυσίδας, ποιο είναι το βέλτιστο  $n$  και  $f$ ;

- Για να βρούμε τον βέλτιστο αριθμό σταδίων,  $N$ :

- Θεωρούμε την παράγωγο  $dt_p/df$  και την θέτουμε 0 για να βρούμε το  $N$

$$t_p = N t_{p0} \left(1 + \frac{\sqrt[N]{F}}{\gamma}\right) \quad \frac{\partial t_p}{\partial f} = \gamma + \sqrt[N]{F} - \frac{\sqrt[N]{F} \ln F}{N} = 0$$

$$\frac{\partial t_p}{\partial f} = \frac{t_{p0} \ln F}{\gamma} \cdot \frac{\ln f - 1 - \gamma/f}{\ln^2 f} = 0$$

$$f = e^{(1+\gamma/f)}$$

- Για  $\gamma = 0$ :

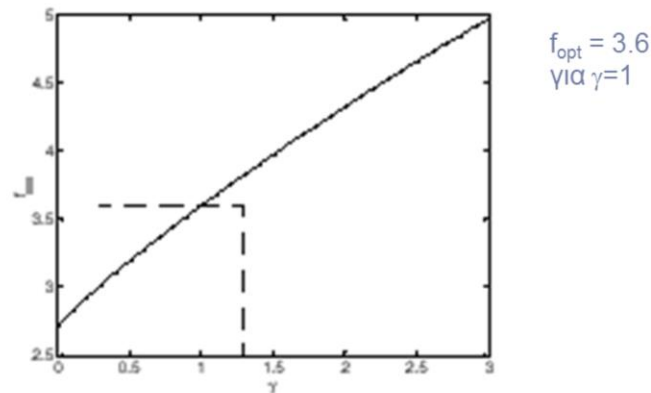
$$f = e = 2.71828, N = \ln F$$

Το παραπάνω μαθηματικό αποτέλεσμα δεν μπορεί προφανώς να εφαρμοστεί όπως είναι σε πρακτικά κυκλώματα.

Έτσι, για πρακτικά κυκλώματα, όπου και το  $\gamma$  δεν είναι μηδέν, **η ενδεδειγμένη τιμή του  $f$  είναι 4 – fan-out 4** -, δηλαδή ο λόγος μεταξύ των σταδίων είναι 4, ενώ το  $N$  υπολογίζεται ως  $\ln F$ .



## Αριθμητική επίλυση με $\gamma \neq 0$

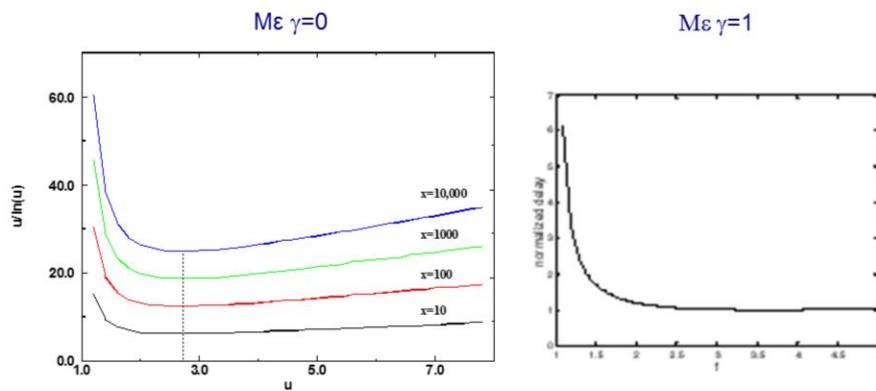


► 57



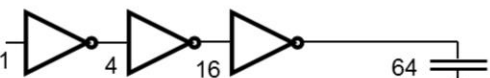
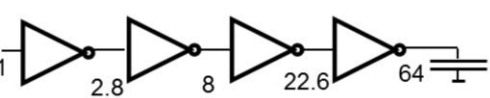
HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

Στην παραπάνω γραφική παράσταση φαίνεται η μαθηματική ανάλυση της βέλτιστης τιμής  $f$  για διαφορετικές τιμές του  $\gamma$ . Βλέπουμε ότι για  $\gamma = 1$  η βέλτιστη τιμή  $f$  είναι 3.6. Έτσι, η συνήθης πρακτική είναι να θέτουμε το  $f$  σε 4.

## Καθυστέρηση και $\gamma \neq 0$



## Παράδειγμα Ενίσχυσης

	N	f	$t_p$
	1	64	65
	2	8	18
	3	4	15
	4	2.8	15.3

## Η επίδραση της Ενίσχυσης

F	Χωρίς Ενίσχυση	Δύο επίπεδα	Αλυσίδα Αντιστροφών
10	;	;	;
100	;	;	;
1000	;	;	;
10000	;	;	;

► Υπολογίστε τις τιμές του πίνακα...

## Η επίδραση της Ενίσχυσης

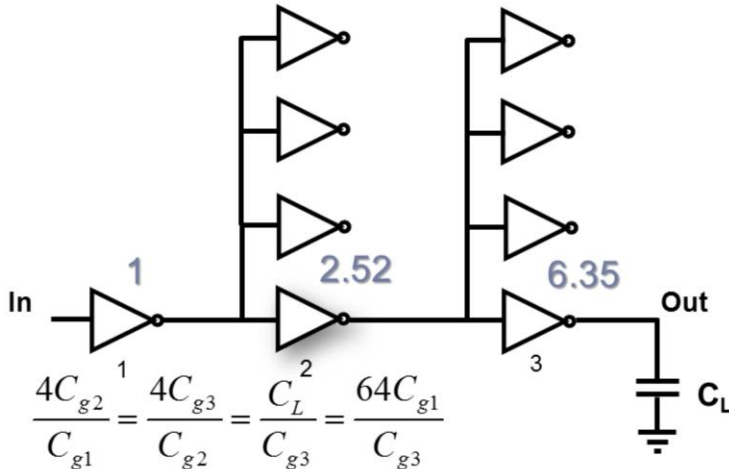
F	Χωρίς Ενίσχυση	Δύο επίπεδα	Αλυσίδα Αντιστροφών
10	11	8.3	8.3
100	101	22	16.5
1000	1001	65	24.9
10000	10001	202	33.1

- $t_{p10}(2\eta\sigma\tau\acute{\eta}\lambda\eta) = t_{p0} (1 + 10/1) = 11$ 
 $t_p = t_{p0} \sum_{j=1}^N t_{p(j)} = t_{p0} \sum_{j=1}^N (1 + \frac{C_{g(j+1)}}{\gamma C_{g(j)}})$
- $t_{p10}(3\eta\sigma\tau\acute{\eta}\lambda\eta) = t_{p0} (1 + 3.16/1 + 1 + 10/3.16) = 8.32$ 
 $t_p = N t_{p0} (1 + \frac{\sqrt[N]{F}}{\gamma})$
- $t_{p1000}(4\eta\sigma\tau\acute{\eta}\lambda\eta): N = 5, f = 3.98, t_{p1000} = 5(1 + 3.98) = 24.9$
- $t_{p10000}(4\eta\sigma\tau\acute{\eta}\lambda\eta): N = 7, f = 3.72, t_{p10000} = 7(1 + 3.72) = 33.1$

Μετατροπή βάσης λογαρίθμων:  $\log_4(x) = \ln(x)/\ln(4)$

## Παράδειγμα με ενδιάμεσες διακλαδώσεις

► Ποια τα μεγέθη  $C_{g1}$ ,  $C_{g2}$ ,  $C_{g3}$ ;



► 62

ΗΥ330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

Αφού εκφράσουμε την σχέση  $4C_{g2}/C_{g1}$  (1) =  $4C_{g3}/C_{g2}$  (2) =  $64C_{g1}/C_{g3}$  (3), επιλύουμε τις 3 εξισώσεις για τους 3 αγνώστους.

$$(1, 2) \Rightarrow C_{g2}^2 = C_{g1} \cdot C_{g3},$$

$$(1, 3) \Rightarrow 16C_{g1}^2 = C_{g2} \cdot C_{g3}$$

$$(2, 3) \Rightarrow C_{g3}^2 = 16 C_{g1} \cdot C_{g2}$$

$$(1, 3)/(1, 2) \Rightarrow 16 C_{g1}^2/C_{g2}^2 = (C_{g2} \cdot C_{g3})/(C_{g1} \cdot C_{g3}) \Leftrightarrow 16C_{g1}^3 = C_{g2}^3 \Leftrightarrow C_{g2} = 16^{(1/3)} \cdot C_{g1}$$

$$(1, 2)/(2, 3) \Rightarrow C_{g2}^2/C_{g3}^2 = (C_{g1} \cdot C_{g3})/(16 C_{g1} \cdot C_{g2}) \Leftrightarrow 16C_{g2}^3 = C_{g3}^3 \Leftrightarrow C_{g3} = 16^{(1/3)} \cdot C_{g2}$$

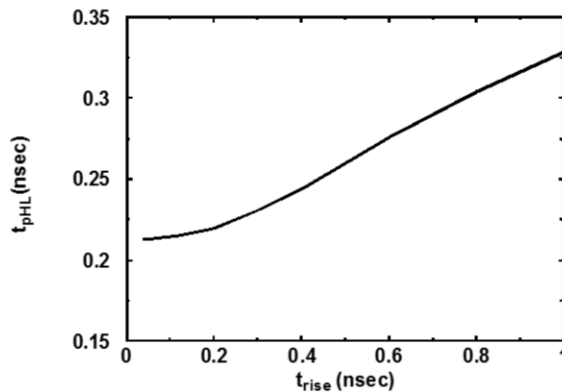
$$\text{Άρα } C_{g2} = 2.52 C_{g1}, C_{g3} = 2.52 C_{g2} = 6.35 \cdot C_{g1}$$

Βλέπουμε ότι η διακλάδωση επηρέασε τον λόγο και δεν είναι 4.

## Περιεχόμενα

- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ Διάταξη
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ **Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου**
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
  - ▶ Δυναμική
  - ▶ Στατική
  - ▶ Διαρροής

## Επιρροή του Χρόνου Ανόδου/Καθόδου



$$t_p^i = t_{step}^i + \eta t_{step}^{i-1}$$

▶ 64

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

Μέχρι τώρα δεν αναφέραμε και δεν εξετάσαμε καθόλου την επιρροή του χρόνου ανόδου/καθόδου στην καθυστέρηση του αντιστροφέα. Θεωρούσαμε ότι η όποια αλλαγή στην είσοδο γίνεται στιγμιαία και θεωρητικά σε μηδενικό χρόνο.

Η παραπάνω γραφική παράσταση συσχετίζει τον χρόνο ανόδου (η ίδια τάση ισχύει και για τον χρόνο καθόδου) με την καθυστέρηση του αντιστροφέα. Το χαρακτηριστικό της γραφικής παράστασης είναι ότι για  $t_{rise} > t_{pHL}$  η καθυστέρηση είναι ανάλογη της κλίσης του χρόνου ανόδου. Άρα, κατανοούμε ότι αργές κλίσεις στις ανόδους και καθόδους έχουν άμεση επιρροή στην καθυστέρηση του αντιστροφέα, και σχεδιαστικά καλό είναι να τις αποφεύγουμε, δηλ. να έχουμε **καλή ενίσχυση, σύμφωνα με τα προηγούμενα**.

Μια γενική προσέγγιση που συσχετίζει την καθυστέρηση με την κλίση φαίνεται παραπάνω, όπου  $i$  είναι η τρέχουσα πύλη,  $i-1$  η προηγούμενη της, και  $\eta$  μια σταθερά με συνήθη τιμή  $\sim 0.25$ . Συνεπώς, βλέπουμε ότι η καθυστέρηση είναι συνάρτηση της αδρανειακής καθυστέρησης (με τέλεια είσοδο – σκαλοπάτι), και η επί την καθυστέρηση της προηγούμενης.



## Περιεχόμενα

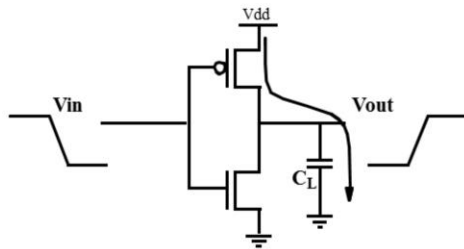
- ▶ Διαισθητική λειτουργία
- ▶ Χαρακτηριστικά Αντιστροφέα CMOS
- ▶ Μεταβατική Λειτουργία
- ▶ Διάταξη
- ▶ Διάγραμμα φορτίου και Εξαγωγή Καμπύλης Μετάβασης
- ▶ Σημείο μετάβασης VM και προσέγγιση των VIH, VIL
- ▶ Επιρροή μεταβλητότητας
- ▶ Επιρροή τάσης
- ▶ Διεξοδική ανάλυση χωρητικότητας – μεταβατικής καθυστέρησης
- ▶ Φαινόμενο Miller
- ▶ Εξόρυξη μεγεθών
- ▶ Ανάλυση χωρητικότητας
- ▶ Μεταβατική απόκριση
- ▶ Καθυστέρηση και τάση
- ▶ Καθυστέρηση και λόγος N/P
- ▶ Βελτιστοποίηση μεγεθών για ελάχιστη καθυστέρηση
- ▶ Επιρροή χρόνου ανόδου/καθόδου
- ▶ Κατανάλωση ενέργειας
  - ▶ Δυναμική
  - ▶ Στατική
  - ▶ Διαρροής

## Κατανάλωση Ενέργειας

---

- ▶ Ποιοι είναι οι παράγοντες κατανάλωσης;
- ▶ Δυναμική Ενέργεια
  - ▶ φόρτωση και εκφόρτωση των κόμβων του κυκλώματος
  - ▶ τοπικές και παρασιτικές χωρητικότητες
- ▶ Στατική Ενέργεια
  - ▶ κατανάλωση κατά την μετάβαση μιας πύλης, όπου δημιουργείται στιγμιαία μονοπάτι από την τάση στην γείωση
- ▶ Ενέργεια Διαρροής
  - ▶ ρεύματα διαρροής των τρανζίστορ, και σχετικών διόδων

## Δυναμική Ενέργεια και Κατανάλωση



$$P_{dyn} = \alpha \cdot f_{0 \rightarrow 1} \cdot C_L \cdot V_{DD}^2$$

- ▶ Μετάβαση  $0 \rightarrow 1$  : απαιτείται εξωτερική ενέργεια
- ▶ Ενέργεια/μετάβαση =  $C_L \cdot V_{DD}^2$
- ▶ Ενέργεια που αποθηκεύεται στον πυκνωτή =  $\frac{1}{2} \cdot C_L \cdot V_{DD}^2$
- ▶ Ενέργεια που εκλύεται ως θερμότητα =  $\frac{1}{2} \cdot C_L \cdot V_{DD}^2$
- ▶ Ισχύς = (Ενέργεια/μετάβαση)  $\cdot f = C_L \cdot V_{DD}^2 \cdot f$
- ▶ **Δραστηριότητα**  $\alpha = \% \text{ μεταβάσεων σε } N \text{ κύκλους}$

▶ 67

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

Όπως φαίνεται στην παραπάνω διαφάνεια, η δυναμική κατανάλωση, η οποία είναι και η κυρίαρχη συνιστώσα της κατανάλωσης στα ψηφιακά κυκλώματα είναι ισχυρά εξαρτώμενη από την δραστηριότητα του κυκλώματος, δηλαδή το %, κατά μέσο όσο, που αλλάζει ένας κόμβος σε  $N$  κύκλους, όπου το  $N$  θα πρέπει να είναι μεγάλο, και το % να χαρακτηρίζεται για την τυπική λειτουργία του κυκλώματος.

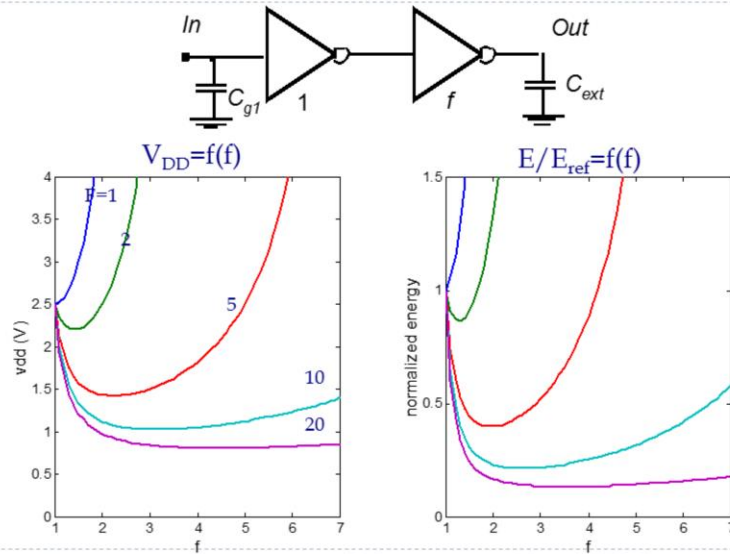
Το % υπολογίζεται μέσω προσομοίωσης της τυπικής λειτουργίας του κυκλώματος.

**Για κάθε κύκλωμα προς**

**κατασκευή είναι απαραίτητο να υπάρχει ξεκάθαρη ιδέα του  $P_{dyn}$** , μια και αυτό καθορίζει και το μέσο

ρεύμα που παρέχει η πηγή. Προσέξτε ότι για τυπικά κυκλώματα η δραστηριότητα  **$\alpha$  είναι της τάξης 0.20-0.30.**

## Επιλογή βέλτιστου μεγέθους για ενέργεια;



68

HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

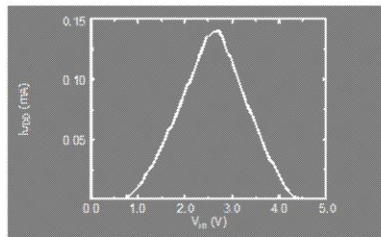
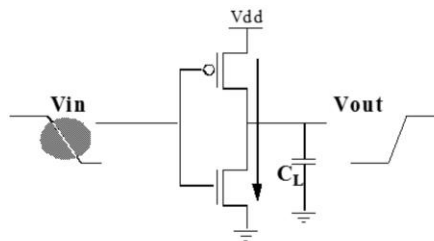
Όπως είδαμε πριν ανάλυση για βέλτιστο μέγεθος ως προς την καθυστέρηση, δηλ. ελαχιστοποίηση της, αναλόγως μπορεί να μελετηθεί και η κατανάλωση. Οι αναλυτικές εκφράσεις όμως που προκύπτουν για την κατανάλωση δεν μπορούν να αναχθούν σε απλές διαισθητικές εκφράσεις (η βελτιστοποίηση δεν μπορεί να γίνει με το χέρι, αλλά με κατάλληλους αλγορίθμους).

Έτσι, παραπάνω παρουσιάζουμε δυο γραφικές παραστάσεις που συσχετίζουν το  $f$  με την ενέργεια και την τάση.

**Παρατηρείστε ότι αν ένα κύκλωμα παρουσιάσει μεγαλύτερη απόδοση από την απαιτούμενη, τότε μπορούμε να μειώσουμε την τάση για να έχουμε κέρδος στην κατανάλωση ( $\sim V_{dd}^2$ ), αν φυσικά μπορεί να γίνει πρακτικά κάτι τέτοιο !!!**

Η δεξιά γραφική παράσταση δείχνει την τιμή του  $V_{dd}$  ως προς το μέγεθος  $f$ , για διαφορετικές τιμές του  $F$ , ενώ η αριστερή δείχνει τον λόγο της ενέργειας ως προς το κύκλωμα με  $V_{dd} = 2.5V$ . **Για τιμές μεγαλύτερες της ρίζας  $F$** , δηλ. την βέλτιστη τιμή για απόδοση δεν υπάρχει κέρδος σε ενέργεια. Άρα το βέλτιστο μέγεθος για ενέργεια είναι μικρότερο από αυτό της απόδοσης!!!

## Στατική Ενέργεια – στατικό ρεύμα



▶ 69

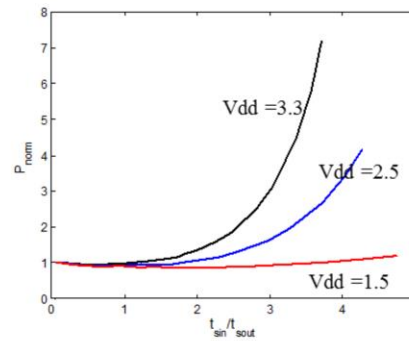
HY330 - Διάλεξη 5η - Ο Αντιστροφέας 10/6/2014

Το στατικό ρεύμα, και η σχετική στατική κατανάλωση είναι απόρροια δυο παραγόντων, της κλίσης ανόδου/καθόδου της εισόδου, αλλά και της χωρητικότητας της εξόδου, και της σχετικής παραγόμενης κλίσης εκεί.

Αν η εξωτερική χωρητικότητα είναι  $C_L$  μεγάλη, τότε κατά την αλλαγή λ.χ. της εισόδου από  $1 \rightarrow 0$ , όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η έξοδος θα βρίσκεται ακόμα στο μηδέν. Έτσι, το ημος θα επιδείξει ελάχιστο στατικό ρεύμα, κατά αυτή την μετάβαση, μια και η διαφορά δυναμικού  $V_{ds}$  θα είναι μηδέν. Αντιθέτως, αν η εξωτερική χωρητικότητα είναι μικρή (λ.χ. μόνο η εγγενής), τότε το ημος θα επιδείξει μέγιστο στατικό ρεύμα, μια και η διαφορά δυναμικού  $V_{ds}$  θα είναι μέγιστη.

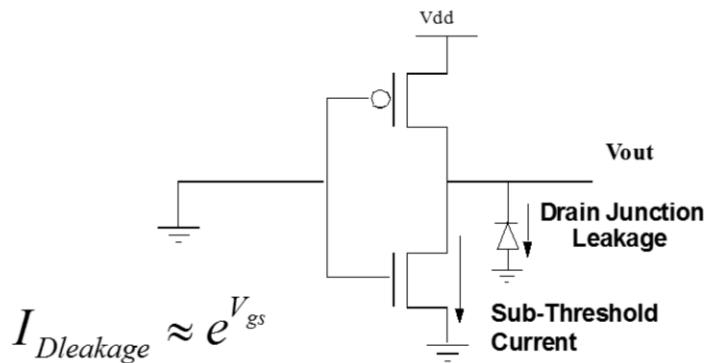
Συνεπώς, αυτό που προκύπτει από την παραπάνω απλοϊκή ανάλυση είναι ότι όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της εξόδου προς την είσοδο τόσο μικραίνει το στατικό ρεύμα και η σχετική κατανάλωση. Από την άλλη όμως, τόσο μεγαλύτερη η καθυστέρηση!

## Στατική Ενέργεια – στατικό ρεύμα



- ▶ Αν  $t_r \approx t_f$ , τότε η στατική κατανάλωση ελαχιστοποιείται
- ▶ Επίσης, είναι αντιστρόφως ανάλογη με την τάση

## Ενέργεια Διαρροής – Ρεύμα διαρροής



- Ο χειρισμός του ρεύματος διαρροής είναι από τα σημαντικότερα προβλήματα στην σημερινή σχεδίαση!!!

Το μεγάλο πρόβλημα με το ρεύμα διαρροής είναι η εκθετική του σχέση και με το  $V_{gs}$  αλλά και με το  $V_t$ . Έτσι, μικραίνοντας το  $V_t$  για να αυξήσουμε την ταχύτητα των τρανζίστορ μεγαλώνουμε με εκθετικό τρόπο το ρεύμα διαρροής!!!

## Συμπεράσματα ως προς την Κατανάλωση

- ▶ βέλτιστο μέγεθος για ενέργεια < βέλτιστο μέγεθος για απόδοση
- ▶ η δυναμική ισχύς είναι  $\sim V_{dd}^2$
- ▶ ενώ η καθυστέρηση με  $V_{dd}$  [ $t_p = V_{dd}(1 - e^{-t/RC})$ ]
- ▶ η κλιμάκωση της τάσης είναι σημαντικός παράγοντας κέρδους ενέργειας
- ▶ για μια πύλη, τεχνολογία και έναν αντιστροφέα μπορεί να υπολογιστεί ένα βέλτιστο  $V_{dd}$ , έτσι ώστε EDP ελάχιστο
  - ▶ τέτοιες μελέτες καθορίζουν συνήθως την ονομαστική τάση
- ▶ Το ρεύμα διαρροής αποτελεί μεγάλη πρόκληση
  - ▶ νέες τεχνικές δοκιμάζονται και εφαρμόζονται σήμερα
  - ▶ multi-VT τεχνολογίες, power gating