



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

# Σχεδίαση Μεικτών VLSI Κυκλωμάτων

Ενότητα 5: Διαφορικοί Ενισχυτές

Αγγελική Αραπογιάννη

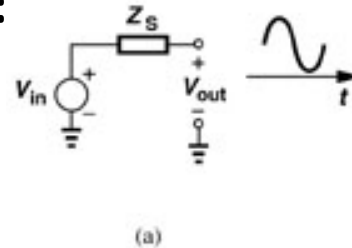
Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

# Μονόπλευρη και διαφορική λειτουργία (1 από 3)

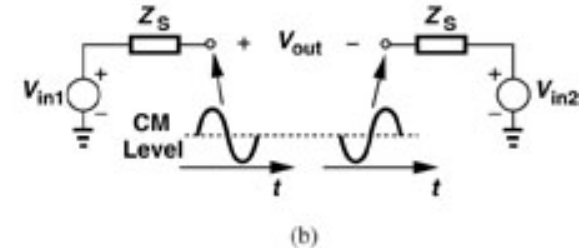
- **Μονόπλευρη έξοδος ή είσοδος:**

όταν το σήμα μετράται ως προς ένα σταθερό δυναμικό (συνήθως τη γη).



- **Διαφορική έξοδος ή είσοδος:**

όταν το σήμα μετράται μεταξύ δύο σημείων με αντίθετες μεταβολές τάσης γύρω από ένα σταθερό δυναμικό (στάθμη κοινού τρόπου). Υποτίθενται επίσης ίσες σύνθετες αντιστάσεις.

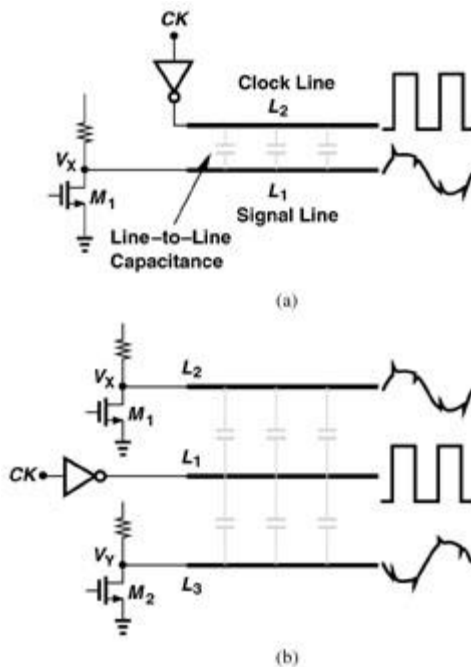


# Μονόπλευρη και διαφορική λειτουργία (2 από 3)

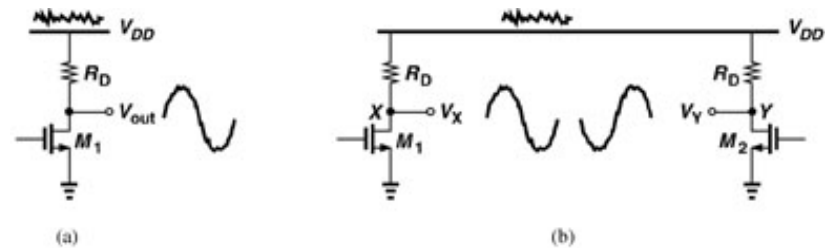
## Πλεονεκτήματα της διαφορικής λειτουργίας

### 1. Απόρριψη θορύβου

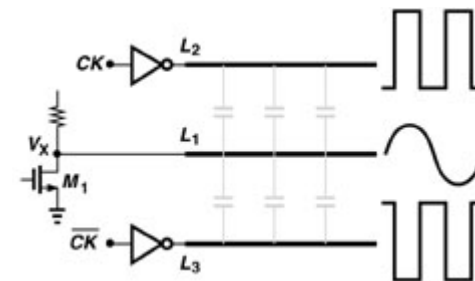
Θόρυβος ρολογιού



Θόρυβος τάσης τροφοδοσίας



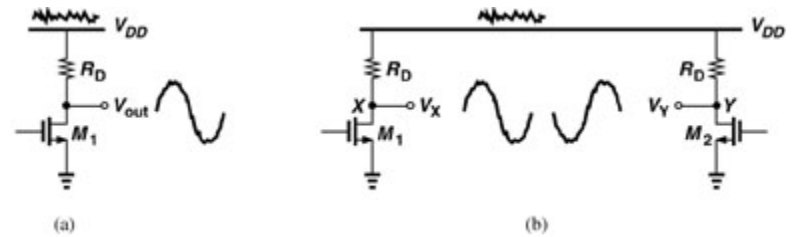
Διαφορική μεταφορά του ρολογιού



# Μονόπλευρη και διαφορική λειτουργία (3 από3)

Πλεονεκτήματα της διαφορικής λειτουργίας

2. Αύξηση των ορίων μεταβολής της τάσης εξόδου



$$\Delta V_{X_{\max}} = \Delta V_{Y_{\max}} = V_{DD} - (V_{GS} - V_{TH})$$

Μονόπλευρη έξοδος

$$\Delta(V_X - V_Y)_{\max} = 2[V_{DD} - (V_{GS} - V_{TH})]$$

Διαφορική έξοδος

3. Απλούστερη πόλωση

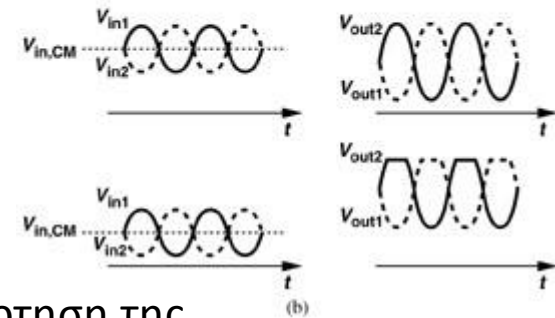
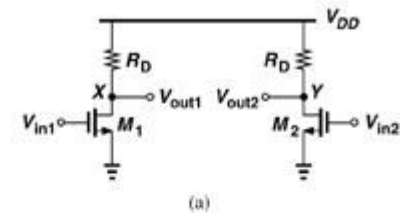
4. Υψηλότερη γραμμικότητα

Μειονέκτημα της διαφορικής λειτουργίας: Διπλάσια επιφάνεια (όχι τόσο σημαντικό)

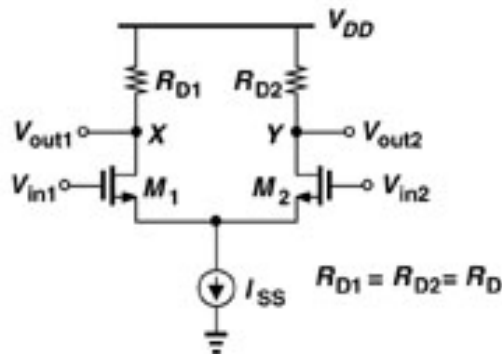
# Βασικό διαφορικό ζεύγος

Επίδραση της τάσης εισόδου κοινού τρόπου:

- Στη διαγωγιμότητα
- Στη στάθμη εξόδου CM



Πόλωση με πηγή σταθερού ρεύματος: καταργεί την εξάρτηση της πόλωσης από τη στάθμη εισόδου CM



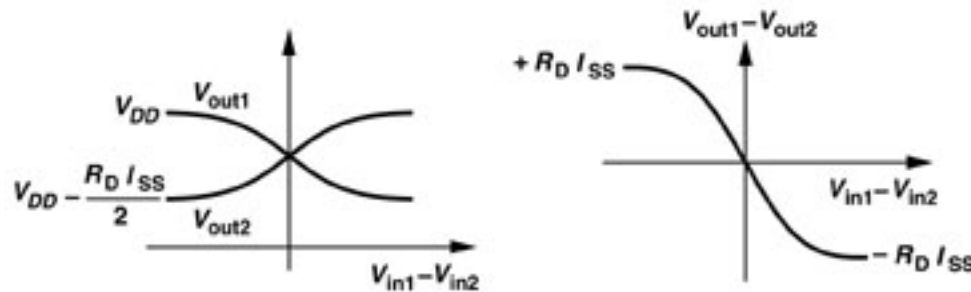
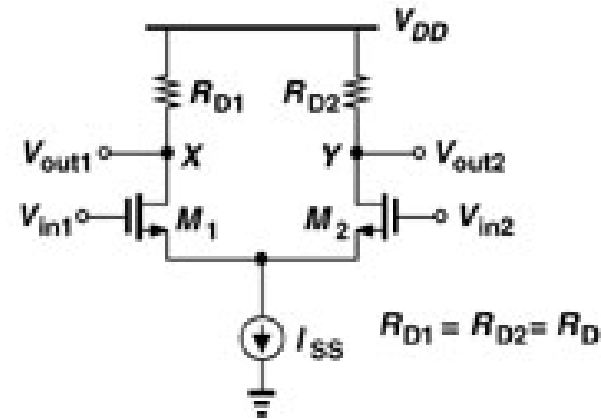
$$V_{\text{outCM}} = V_{\text{DD}} - R_D \frac{I_{\text{SS}}}{2}$$



# Ποιοτική ανάλυση (1 από 2)

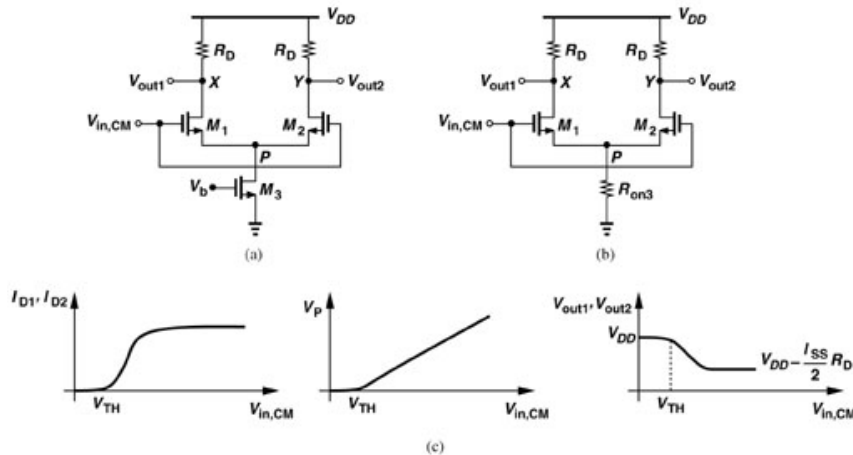
## Διαφορική συμπεριφορά:

- Στάθμες εξόδου ανεξάρτητες της στάθμης εισόδου CM.
- Απολαβή μικρού σήματος μέγιστη για  $V_{in1} = V_{in2}$ .



# Ποιοτική ανάλυση (2 από 2)

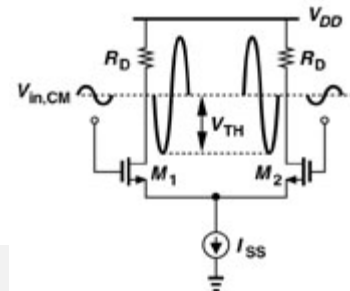
## Συμπεριφορά κοινού τρόπου



$$V_{GS1} + (V_{GS3} - V_{TH3}) \leq V_{in,CM} \leq \min \left[ V_{DD} - R_D \frac{I_{SS}}{2} + V_{TH}, V_{DD} \right]$$

## Μέγιστη μεταβολή της τάσης εξόδου

$$V_{in,CM} - V_{TH} \leq V_{out} \leq V_{DD}$$

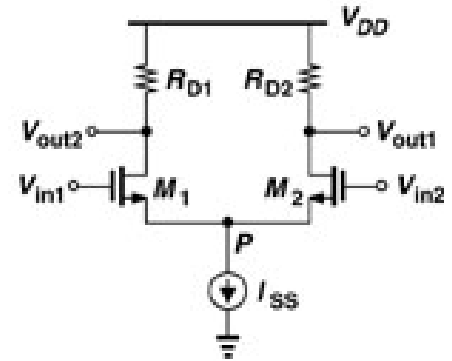


# Ποσοτική ανάλυση-ανάλυση μεγάλου σήματος (1 από 3)

## Ανάλυση μεγάλου σήματος

$$V_{out1} - V_{out2} = R_D(I_{D2} - I_{D1}) \quad V_{in1} - V_{in2} = V_{GS1} - V_{GS2}$$

Θεωρούμε το κύκλωμα συμμετρικό και τα M1 και M2 στον κόρο.



$$\text{Για } \lambda = 0 \Rightarrow (V_{GS} - V_{TH})^2 = \frac{I_D}{\frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}} \Rightarrow V_{GS} = \sqrt{\frac{2I_D}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} + V_{TH}$$

$$V_{in1} - V_{in2} = \sqrt{\frac{2I_{D1}}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} - \sqrt{\frac{2I_{D2}}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} \Rightarrow$$

$$(V_{in1} - V_{in2})^2 = \frac{2}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}} (I_{SS} - 2\sqrt{I_{D1}I_{D2}}), \quad \text{επειδή } I_{D1} + I_{D2} = I_{SS}$$

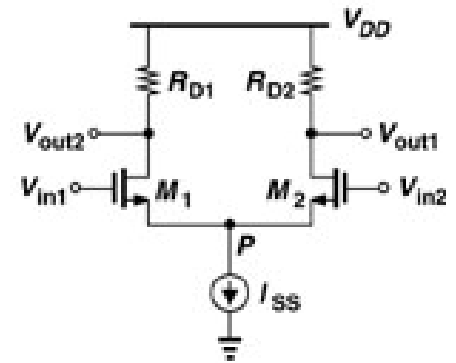
$$\text{Δηλαδή } \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{in1} - V_{in2})^2 - I_{SS} = -2\sqrt{I_{D1}I_{D2}}$$



# Ποσοτική ανάλυση-ανάλυση μεγάλου σήματος (2 από 3)

## Ανάλυση μεγάλου σήματος (συνέχεια)

$$\text{Δηλαδή} \quad \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{in1} - V_{in2})^2 - I_{SS} = -2\sqrt{I_{D1}I_{D2}}$$



$$(I_{D1} - I_{D2})^2 = -\frac{1}{4} \left( \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \right)^2 (V_{in1} - V_{in2})^4 + I_{SS} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{in1} - V_{in2})^2$$

$$\text{επειδή } 4I_{D1}I_{D2} = (I_{D1} + I_{D2})^2 - (I_{D1} - I_{D2})^2 = I_{SS}^2 - (I_{D1} - I_{D2})^2$$

$$I_{D1} - I_{D2} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{in1} - V_{in2}) \sqrt{\frac{4I_{SS}}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}} - (V_{in1} - V_{in2})^2} \Rightarrow I_{D1} - I_{D2} = 0, \text{ για } V_{in1} = V_{in2}$$

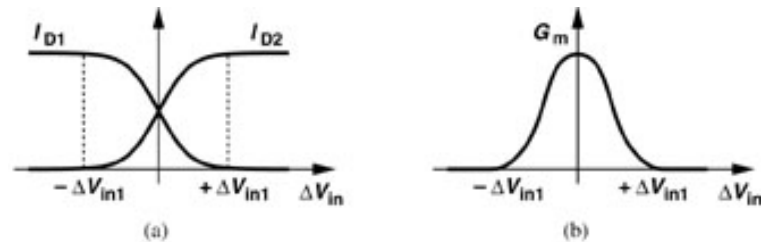


# Ποσοτική ανάλυση-ανάλυση μεγάλου σήματος (3 από 3 )

$$G_m = \frac{\partial I_{D1}}{\partial \Delta V_{in}} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \frac{\frac{4I_{SS}}{\mu_n C_{ox} W/L} - 2\Delta V_{in}^2}{\sqrt{\frac{4I_{SS}}{\mu_n C_{ox} W/L} - \Delta V_{in}^2}} \Rightarrow \text{για } \Delta V_{in} = 0 \Rightarrow G_m = \sqrt{\mu_n C_{ox} (W/L) I_{SS}}$$

$$G_m = 0 \cdot \text{για} \cdot \Delta V_{in1} = \sqrt{\frac{2I_{SS}}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} \quad \text{και} \quad I_{D1} = I_{SS}$$

Η  $\Delta V_{in1}$  είναι η μέγιστη επιτρεπτή διαφορική είσοδος.



$$\text{Εφόσον } V_{out1} - V_{out2} = R_D G_m \Delta V_{in} \Rightarrow |A_v| = \sqrt{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_{SS}} R_D = g_m R_D$$

$$\text{Όταν } I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_{SS}}{2} \Rightarrow (V_{GS} - V_{TH})_{1,2} = \sqrt{\frac{I_{SS}}{\mu_n C_{ox} \frac{W}{L}}} = \frac{\Delta V_{in1}}{\sqrt{2}}$$



# Ποσοτική ανάλυση-Ανάλυση μικρού σήματος (1 από 2)

**Μέθοδος 1.** (υπέρθεση ή αρχή της επαλληλίας)

$$R_S = \frac{1}{g_{m2}}$$

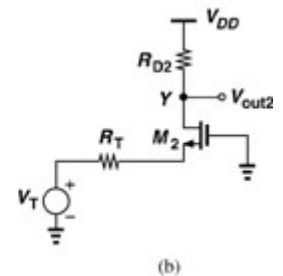
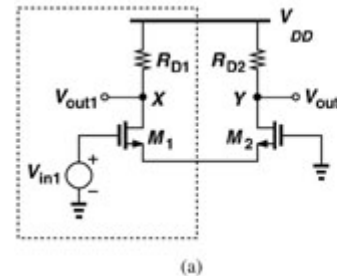
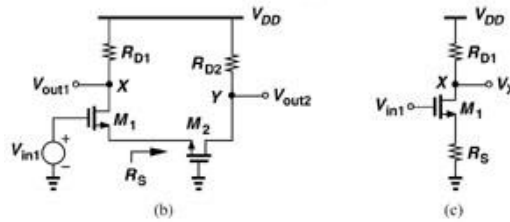
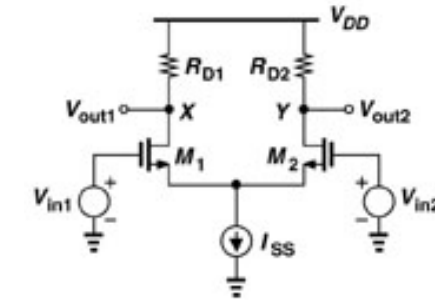
$$\frac{V_X}{V_{in1}} = \frac{-R_D}{\frac{1}{g_{m1}} + \frac{1}{g_{m2}}}$$

$$\frac{V_Y}{V_{in1}} = \frac{R_D}{\frac{1}{g_{m2}} + \frac{1}{g_{m1}}}$$

$$(V_X - V_Y) \Big|_{\text{Due-to-}V_{in1}} = \frac{-2R_D}{\frac{1}{g_{m1}} + \frac{1}{g_{m2}}} V_{in1}, \text{για } g_{m1} = g_{m2} = g_m \Rightarrow$$

$$(V_X - V_Y) \Big|_{\text{Due-to-}V_{in1}} = -g_m R_D V_{in1}$$

$$(V_X - V_Y) \Big|_{\text{Due-to-}V_{in2}} = g_m R_D V_{in2} \quad \frac{(V_X - V_Y)_{\text{tot}}}{V_{in1} - V_{in2}} = -g_m R_D$$

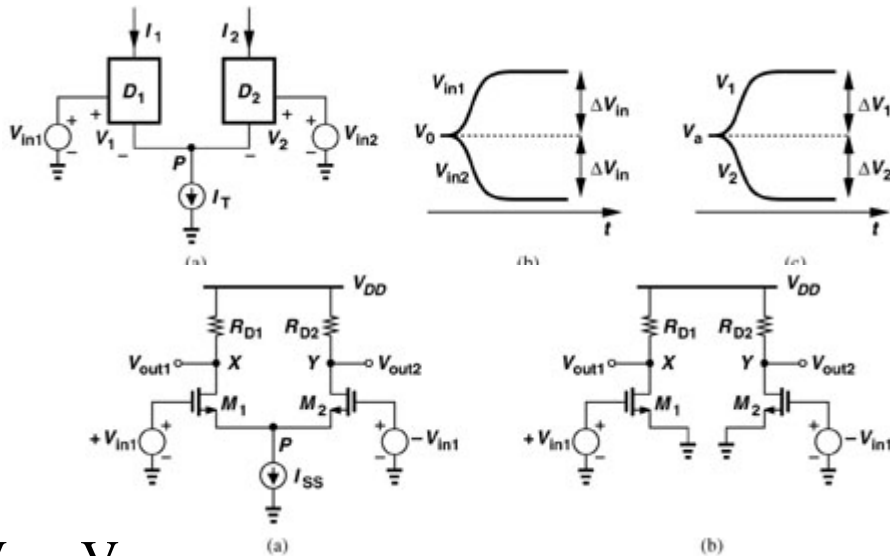


( $g_m$  μικρότερο από του ενισχυτή CS με το ίδιο ρεύμα πόλωσης)



# Ποσοτική ανάλυση-Ανάλυση μικρού σήματος (2 από 2)

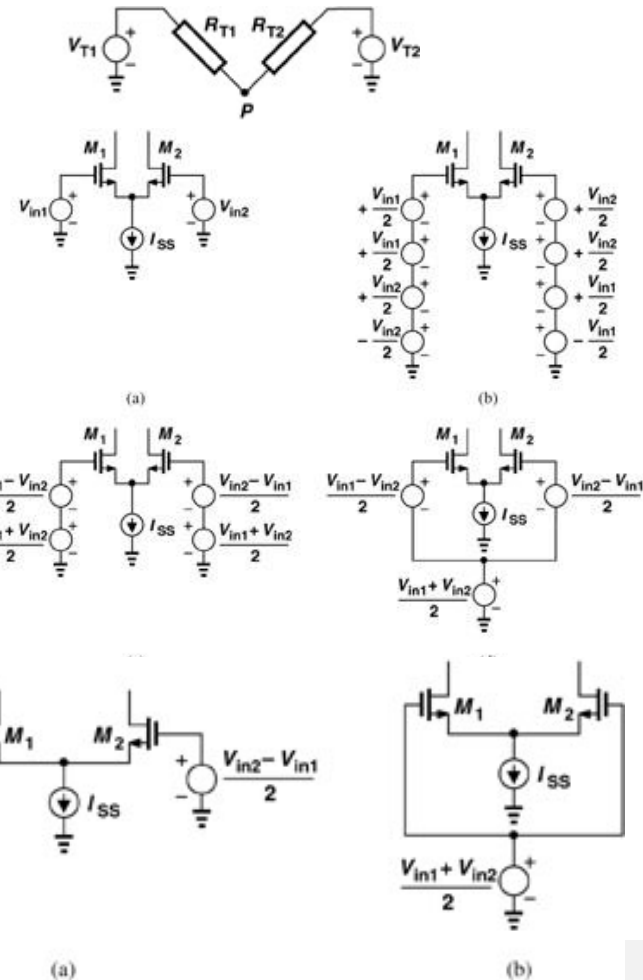
**Μέθοδος 2.** Λήμμα: Για μικρές αντίθετες μεταβολές  $\Delta v_{in}$  το  $V_P$  δεν μεταβάλλεται



$$\frac{V_X - V_Y}{2V_{in}} = -g_m R_D$$

$$V_{in1} = \frac{V_{in1} - V_{in2}}{2} + \frac{V_{in1} + V_{in2}}{2}$$

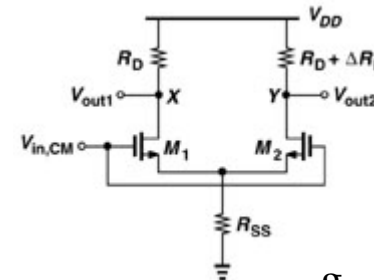
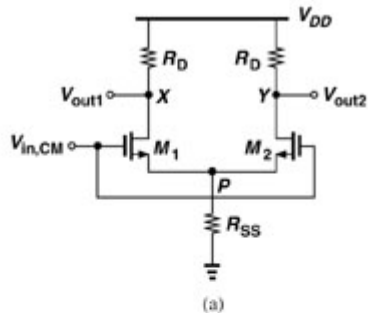
$$V_{in2} = \frac{V_{in2} - V_{in1}}{2} + \frac{V_{in1} + V_{in2}}{2}$$



# Ποσοτική ανάλυση-Απόκριση κοινού τρόπου (1 από 2)

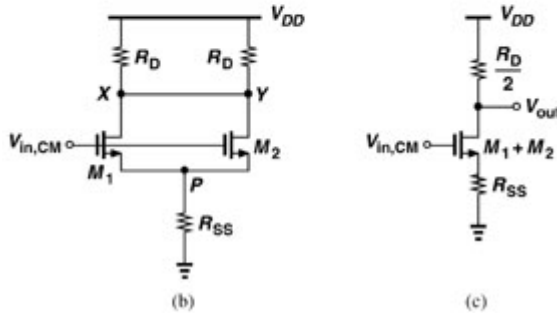
Μη ιδανική πηγή ρεύματος

Ασυμμετρία του κυκλώματος



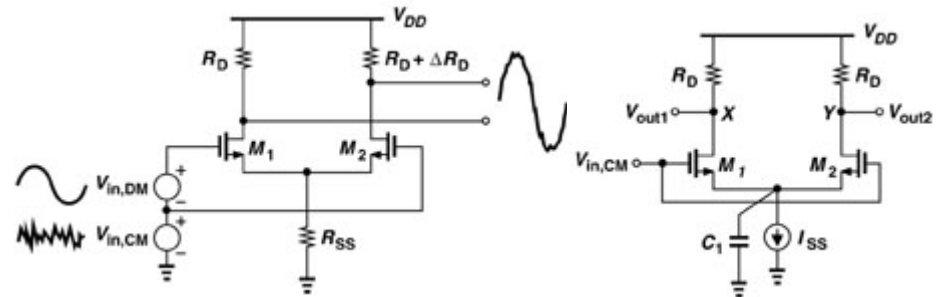
$$\Delta V_X = \Delta V_{in,CM} \frac{g_m}{1 + 2g_m R_{SS}} R_D.$$

$$\Delta V_Y = \Delta V_{in,CM} \frac{g_m}{1 + 2g_m R_{SS}} (R_D + \Delta R_D).$$



$$A_{V,CM} = \frac{V_{out}}{V_{in,CM}} = -\frac{R_D / 2}{1 / (2g_m) + R_{SS}}$$

(απολαβή κοινού τρόπου)



(μετατροπή κοινού τρόπου σε διαφορικό)



# Ποσοτική ανάλυση-Απόκριση κοινού τρόπου (2 από 2)

Ασυμμετρία μεταξύ των M1 και M2

$$V_X = -g_{m1}(V_{in,CM} - V_p)R_D = \frac{-g_{m1}}{(g_{m1} + g_{m2})R_{SS} + 1} R_D V_{in,CM}$$

$$V_Y = -g_{m2}(V_{in,CM} - V_p)R_D = \frac{-g_{m2}}{(g_{m1} + g_{m2})R_{SS} + 1} R_D V_{in,CM}$$

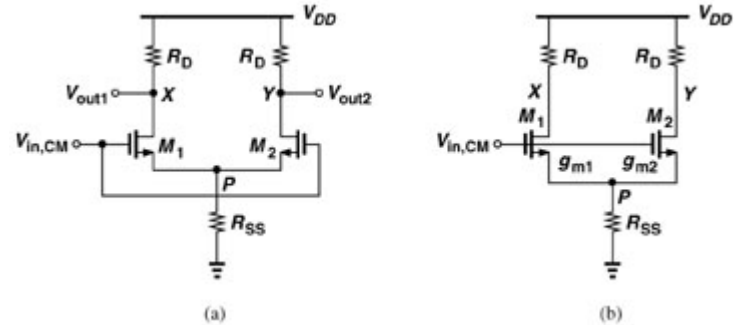
$$V_X - V_Y = -\frac{g_{m1} - g_{m2}}{(g_{m1} + g_{m2})R_{SS} + 1} R_D V_{in,CM}$$

$$CMRR = \frac{A_{DM}}{A_{CM-DM}} \quad A_{CM-DM} = -\frac{\Delta g_m R_D}{(g_{m1} + g_{m2})R_{SS} + 1}$$

$$|A_{DM}| = \frac{R_D}{g_{m1}^{-1} + g_{m2}^{-1}} = \frac{g_{m1}g_{m2}}{g_{m1} + g_{m2}} R_D$$

Αν λάβουμε υπόψη μόνο την αστοχία του  $g_m$

$$CMRR = \frac{\frac{g_{m1}g_{m2}}{g_{m1} + g_{m2}} R_D}{\frac{\Delta g_m R_D}{1 + (g_{m1} + g_{m2})R_{SS}}} = \frac{g_{m1}g_{m2}}{(g_{m1} + g_{m2})\Delta g_m} [1 + (g_{m1} + g_{m2})R_{SS}]$$



$$I_{D1} = g_{m1}(V_{in,CM} - V_p) \text{ και } I_{D2} = g_{m2}(V_{in,CM} - V_p)$$

$$(g_{m1} + g_{m2})(V_{in,CM} - V_p)R_{SS} = V_p \Rightarrow$$

$$V_p = \frac{(g_{m1} + g_{m2})R_{SS}}{(g_{m1} + g_{m2})R_{SS} + 1} V_{in,CM}$$

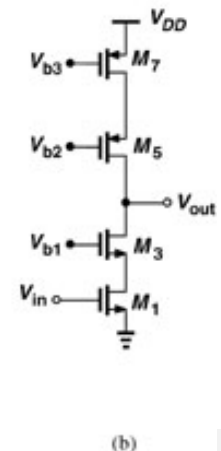
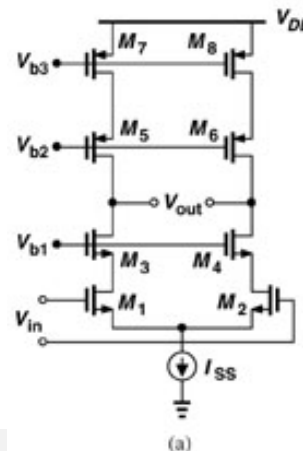
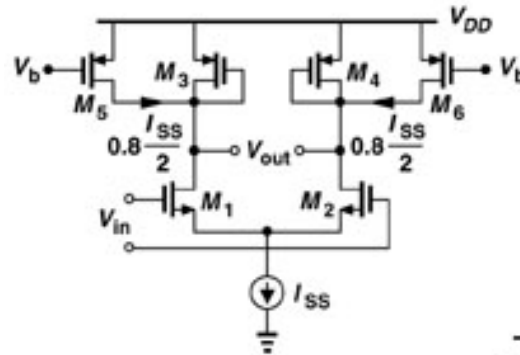
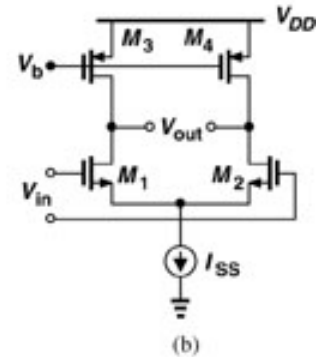
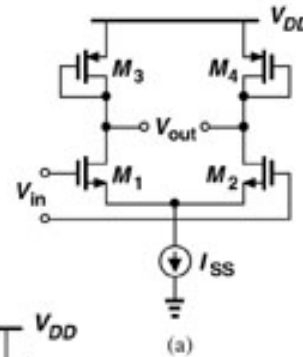


# Ποσοτική ανάλυση-Διαφορικό ζεύγος με φόρτους MOS

$$A_V = -g_{mN} \left( \frac{1}{g_{mP}^{-1} \parallel r_{ON} \parallel r_{OP}} \right) \approx -\frac{g_{mN}}{g_{mP}}$$

$$A_V \approx -\sqrt{\frac{\mu_n (W/L)_N}{\mu_p (W/L)_p}}$$

$$A_V = -g_{mN} (r_{ON} \parallel r_{OP})$$



$$|A_V| \approx g_{m1} \left[ (g_{m3} r_{o3} r_{o1}) \parallel (g_{m5} r_{o5} r_{o7}) \right]$$



# Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης





# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

# Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Αραπογιάννη Αγγελική 2015. «Σχεδίαση Μεικτών VLSI Κυκλωμάτων. Διαφορικοί ενισχυτές.». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/DI101/>.



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

Οι εικόνες και τα διαγράμματα που χρησιμοποιούνται είναι από το βιβλίο:

Behzad Razavi. 2000. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits* (1 ed.). McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA ©2000.

