



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικό και Καποδιστριακό
Πανεπιστήμιο Αθηνών

HELLENIC REPUBLIC
National and Kapodistrian
University of Athens



ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ (VLSI)

Ενότητα Β – Κεφάλαιο 6.2

ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ MOS

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

Σχεδίαση Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων

Μέρος Α:

Τεχνολογία Κατασκευής
Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων

Μέρος Β:

Στοιχεία Ηλεκτρονικής Σχεδίασης
VLSI Κυκλωμάτων

Τα MOSFET στα αναλογικά κυκλώματα

Ο Διαφορικός Ενισχυτής με MOSFET

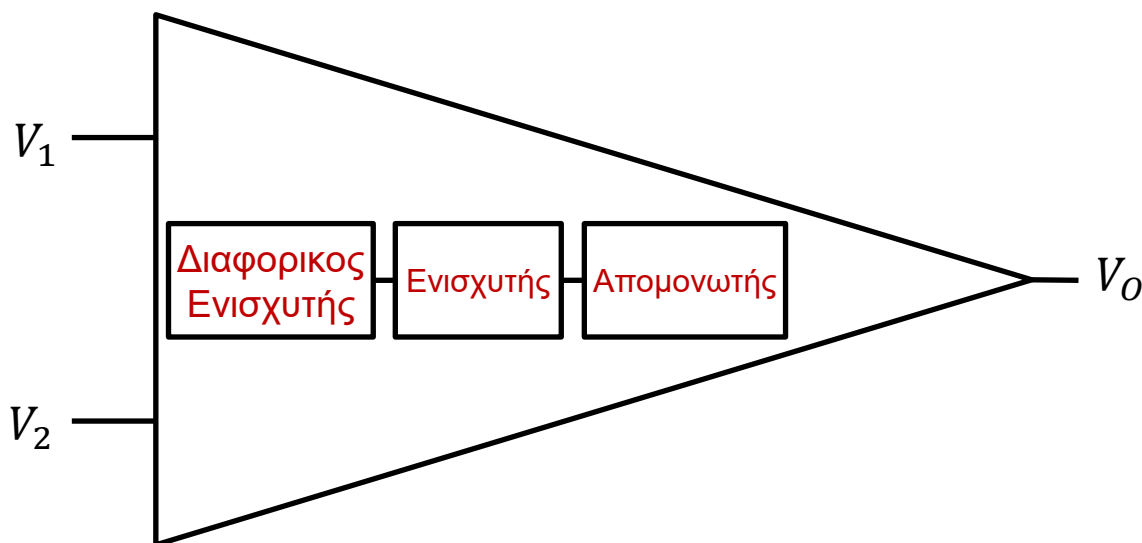
Ο Διαφορικός Ενισχυτής με MOSFET

Σε έναν ιδανικό διαφορικό ενισχυτή η τάση εξόδου θα δίνεται από τη σχέση: $V_{OUT} = V_O = K \cdot (V_1 - V_2)$

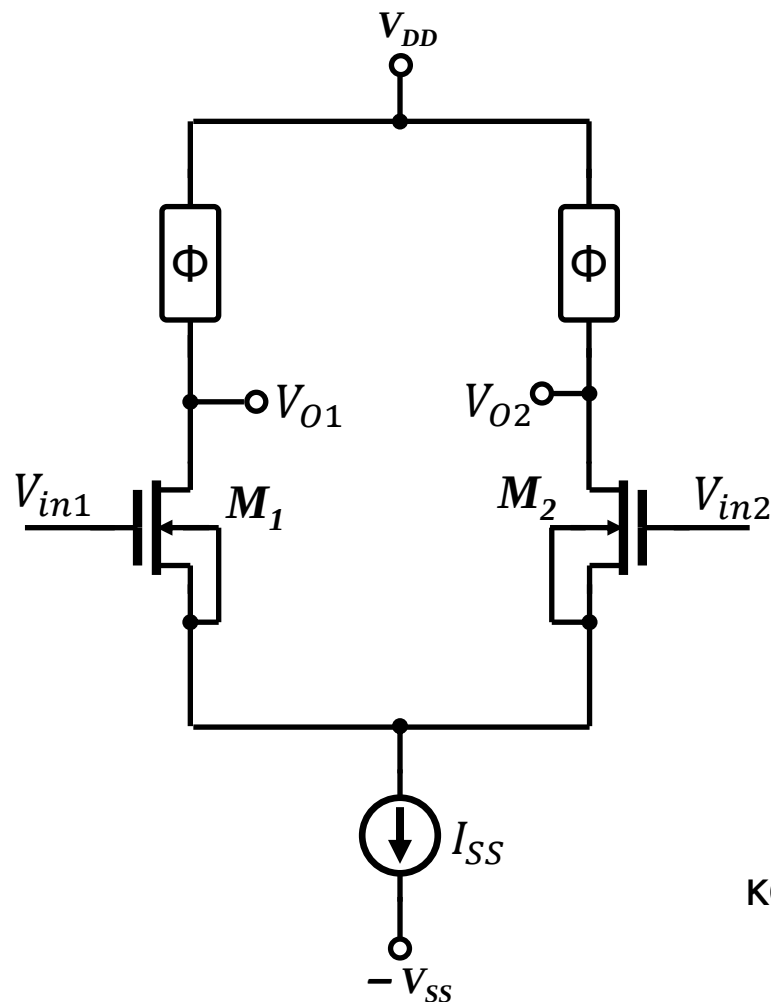
Είναι η πρώτη βαθμίδα του τελεστικού ενισχυτή.

Το K είναι η ενίσχυση του διαφορικού ενισχυτή (έχει μεγάλη τιμή).

Η αντίσταση εξόδου του τελεστικού ενισχυτή επιθυμούμε να είναι μηδέν.



Ο Διαφορικός Ενισχυτής με MOSFET



Οι δύο κλάδοι είναι τελείως συμμετρικοί.

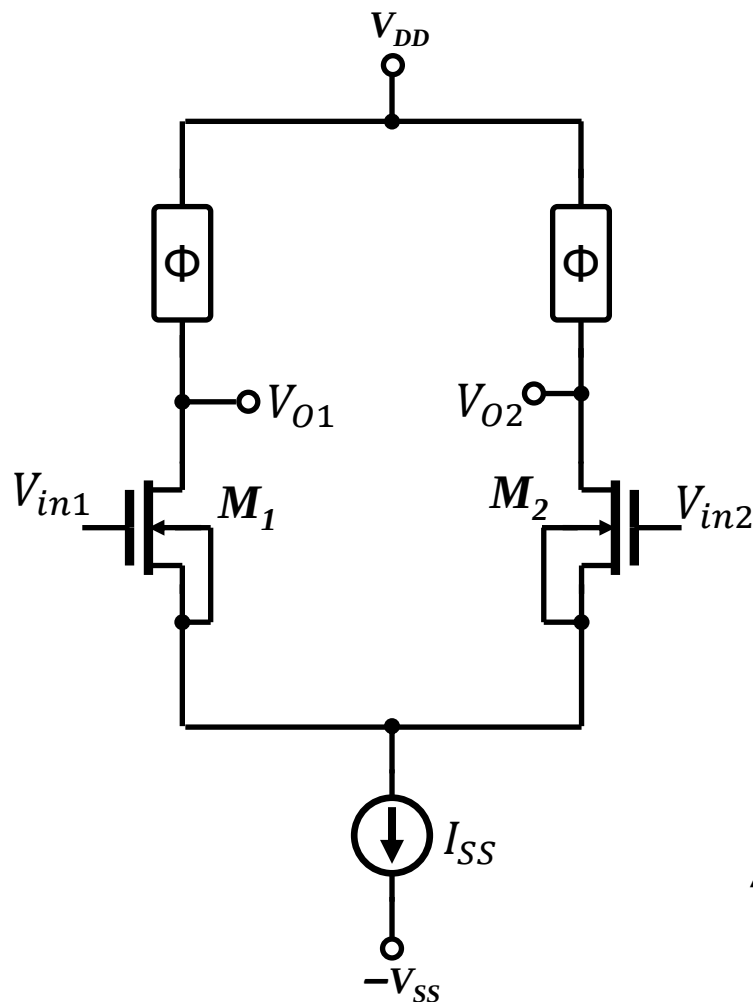
Ο Φόρτος Φ μπορεί να είναι ένα τρανζίστορ nMOS συνδεδεμένο ως δίοδος, ή nMOS στον κόρο, ή pMOS, ή ωμική αντίσταση.

Ορίζεται ως διαφορική τάση εισόδου την: $V_{inD} = V_{in1} - V_{in2}$

και ως τάση εισόδου κοινού τρόπου την:

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

Ο Διαφορικός Ενισχυτής με MOSFET



Με βάση την τάση κοινού τρόπου V_{inC} και διαφορικού τρόπου V_{inD} μπορούμε να γράψουμε τις τάσεις εισόδου ως εξής:

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

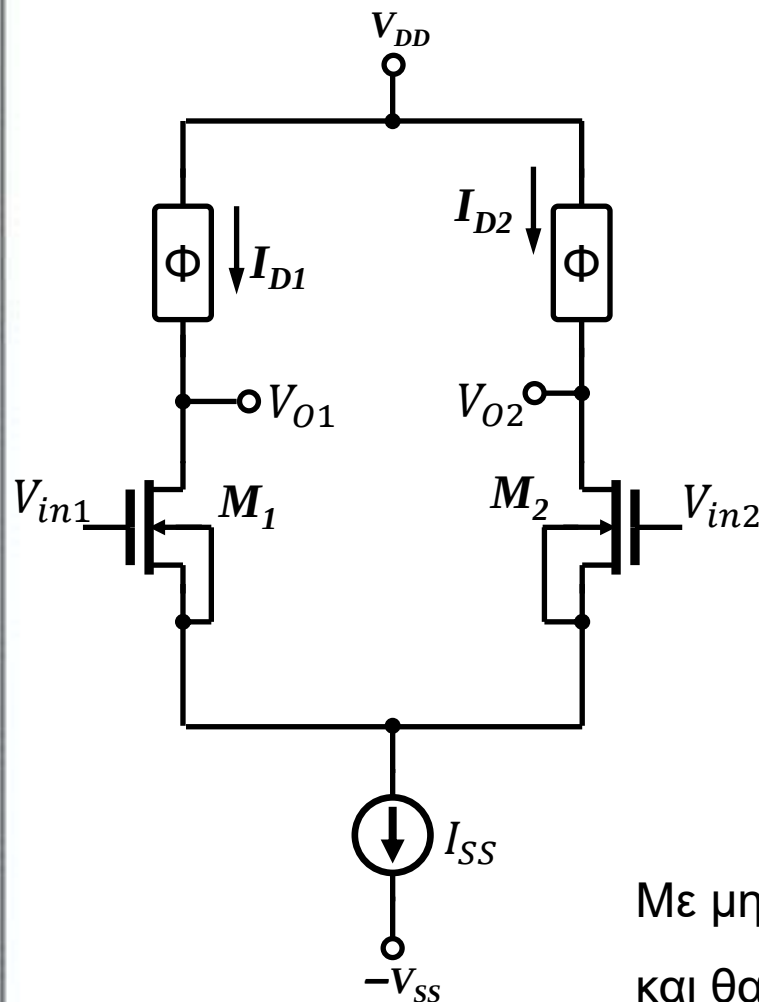
Όμοια για την τάση εξόδου ορίζεται η έξοδος κοινού τρόπου V_{OC} και η έξοδος διαφορικού τρόπου V_{OD} :

$$V_{OD} = V_{O1} - V_{O2} \quad V_{OC} = \frac{V_{O1} + V_{O2}}{2}$$

Όμοια οι τάσεις εξόδου γράφονται ως εξής:

$$V_{O1} = V_{OC} + \frac{V_{OD}}{2} \quad V_{O2} = V_{OC} - \frac{V_{OD}}{2}$$

Ο Διαφορικός Ενισχυτής με MOSFET



Ο διαφορικός ενισχυτής σχεδιάζεται έτσι ώστε για εισόδους $V_{in1} = V_{in2} = 0$ η διαφορική τάση εξόδου V_{OD} να είναι μηδέν, δηλαδή

$$V_{O1} = V_{O2}$$

Επομένως οι δύο κλάδοι θα πρέπει να είναι συμμετρικοί.

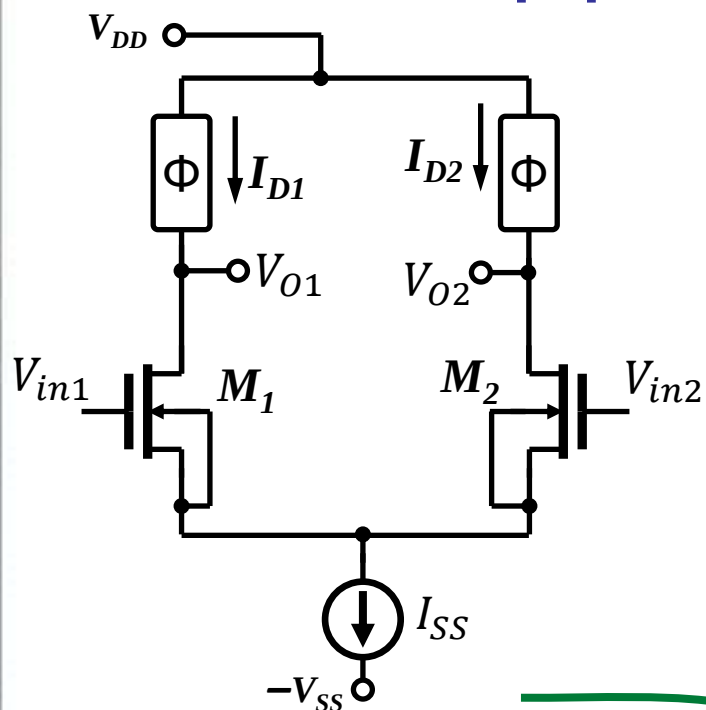
Για τα δύο ρεύματα των κλάδων I_{D1} και I_{D2} , το άθροισμά τους θα ισούται με:

$$I_{D1} + I_{D2} = I_{SS}$$

Με μηδενικές εισόδους τα δύο ρεύματα θα είναι ίσα και θα ισούνται με: $I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_{SS}}{2}$

Ο ιδανικός διαφορικός ενισχυτής είναι ανεξάρτητος από την τάση κοινού τρόπου

Ο Διαφορικός Ενισχυτής με MOSFET

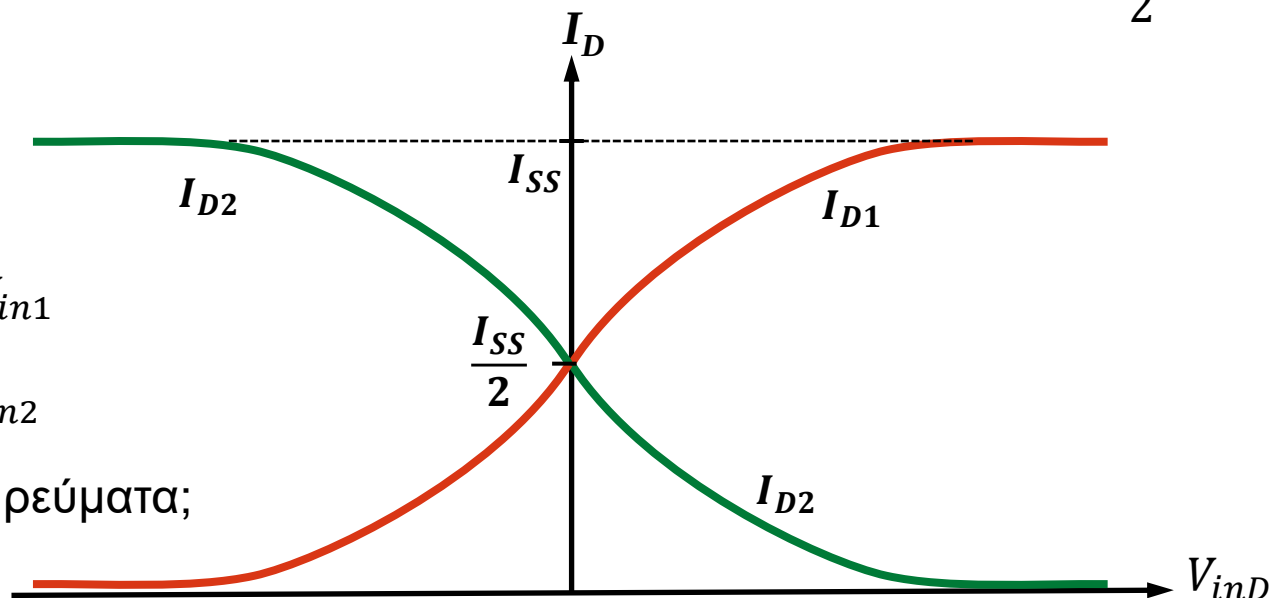


Όταν οι είσοδοι μεταβάλλονται, θα μεταβάλλεται και η διαφορική είσοδος V_{inD}

$$V_{inD} = V_{in1} - V_{in2}$$

Όταν οι είσοδοι είναι ίσες πόσο θα είναι το I_{D1} και το I_{D2} ;

$$I_{D1} = I_{D2} = \frac{I_{SS}}{2}$$

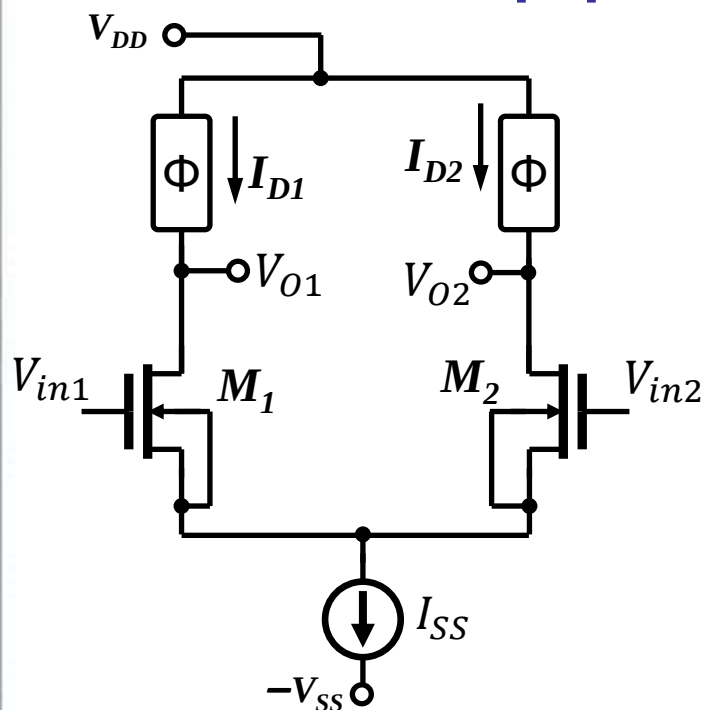


Όταν αυξάνεται το V_{in1}

Όταν αυξάνεται το V_{in2}

Τι τιμές παίρνουν τα ρεύματα;

Ο Διαφορικός Ενισχυτής με MOSFET



Θα σχεδιάσουμε και την τάση εξόδου του κάθε κλάδου για τις ίδιες μεταβολές της V_{inD}

Όταν οι είσοδοι είναι ίσες πόση θα είναι η V_{01} και η V_{02} (Υποθέτουμε ότι τα Φ είναι ωμικές αντιστάσεις R_{Φ});

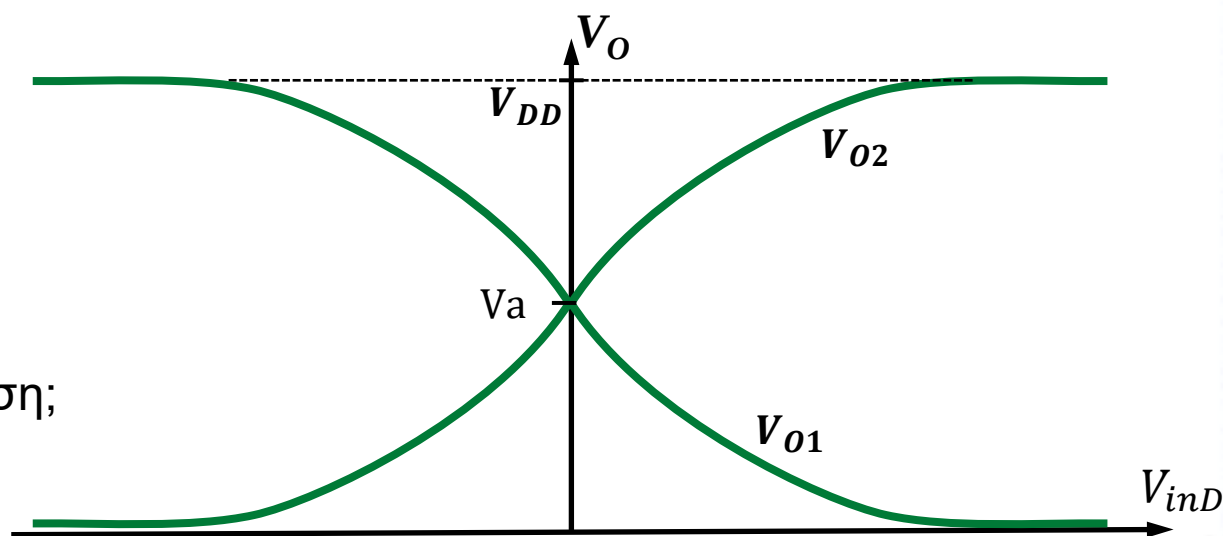
$$V_{01} = V_{DD} - I_{D1} \cdot R_{\Phi} =$$

$$V_{01} = V_{02} = V_{DD} - \frac{I_{SS}}{2} \cdot R_{\Phi} = V_a$$

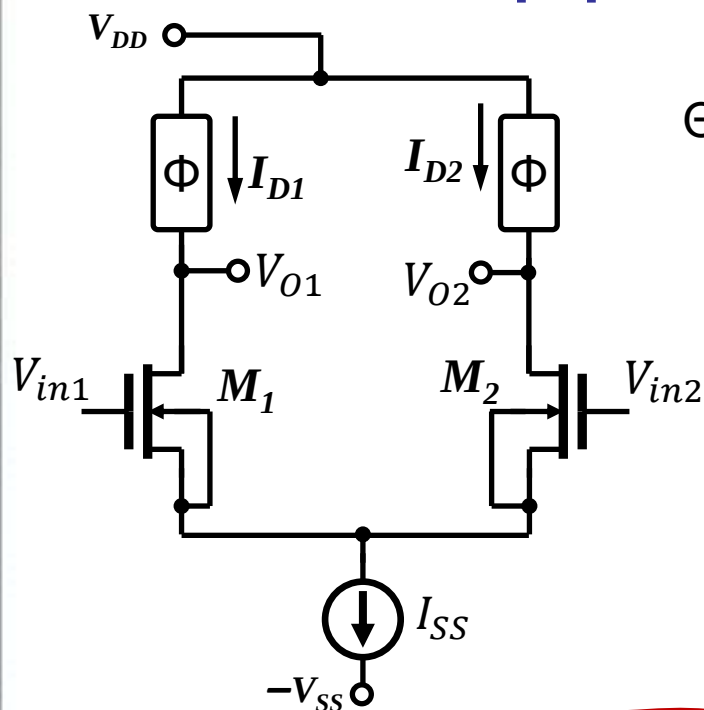
Όταν αυξάνεται το V_{in1}

Όταν αυξάνεται το V_{in2}

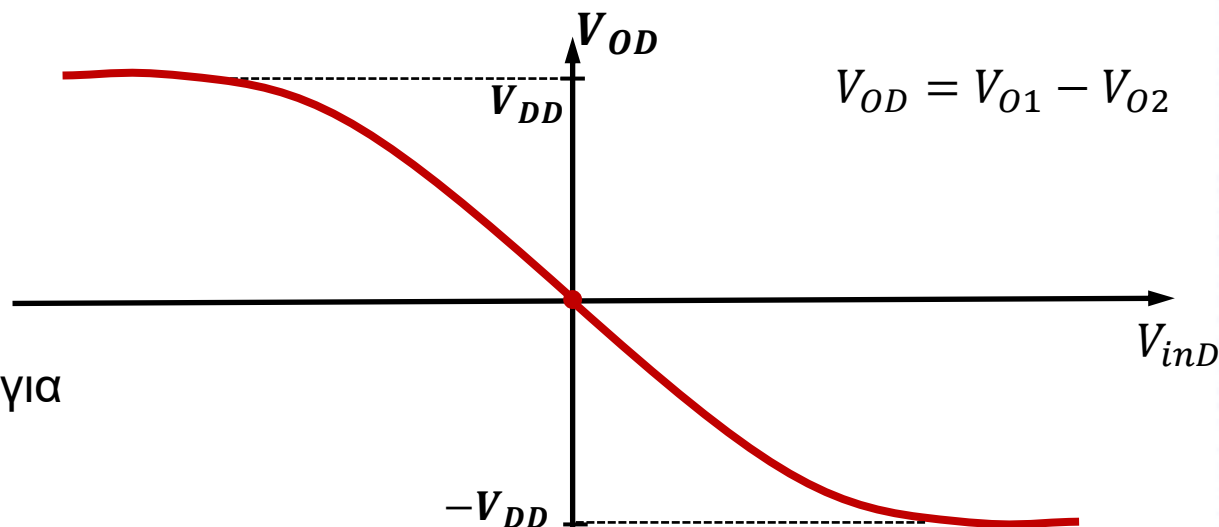
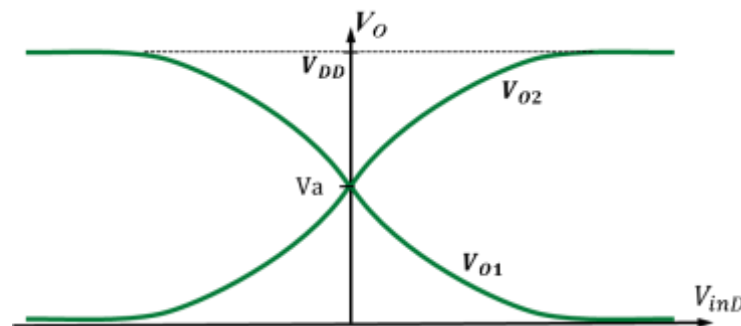
Ποια είναι η μέγιστη τάση;



Ο Διαφορικός Ενισχυτής με MOSFET



Θα σχεδιάσουμε την **διαφορική τάση εξόδου** V_{OD}
Όταν οι είσοδοι είναι ίσες πόση θα είναι η V_{OD} ;

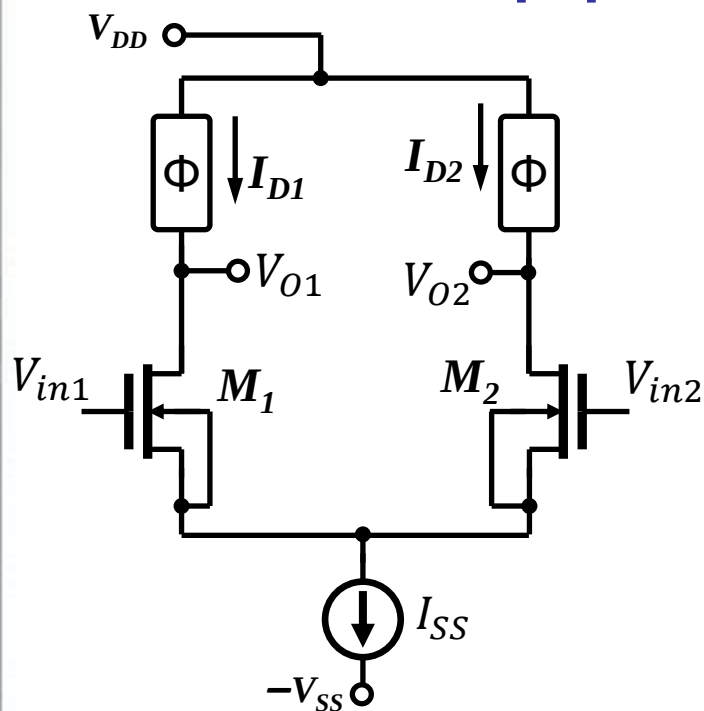


Όταν αυξάνεται το V_{in1}

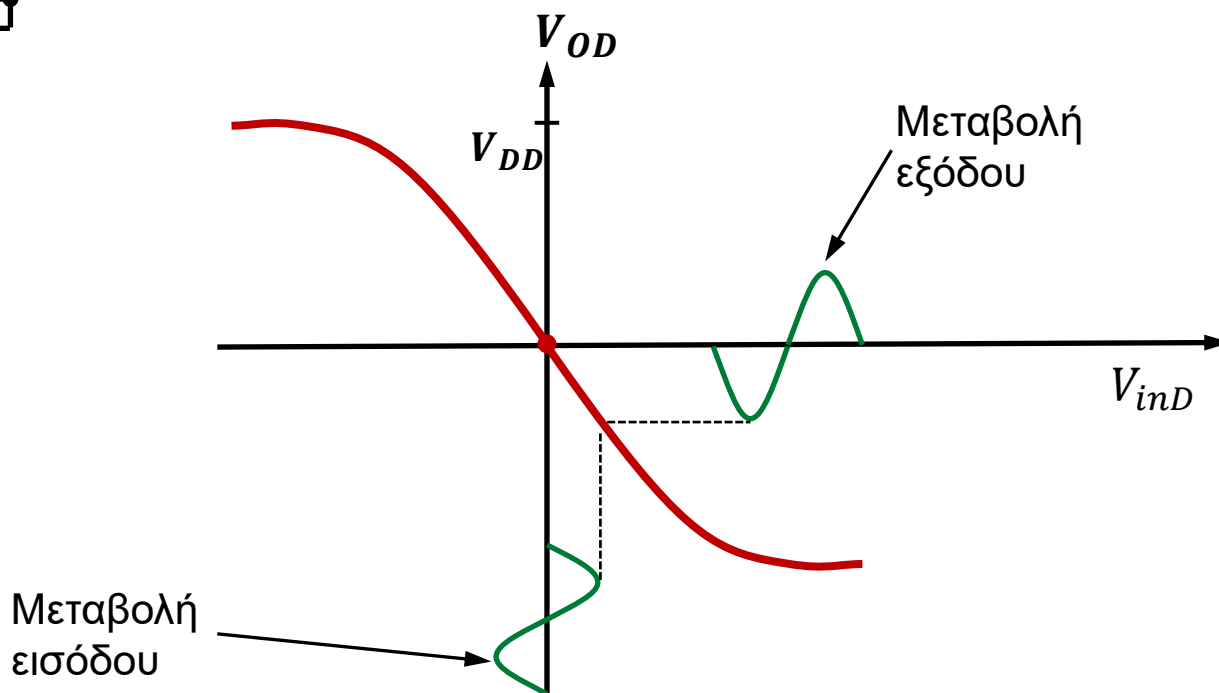
Όταν αυξάνεται το V_{in2}

Η έξοδος είναι γραμμική για
μεγάλο εύρος της V_{inD}

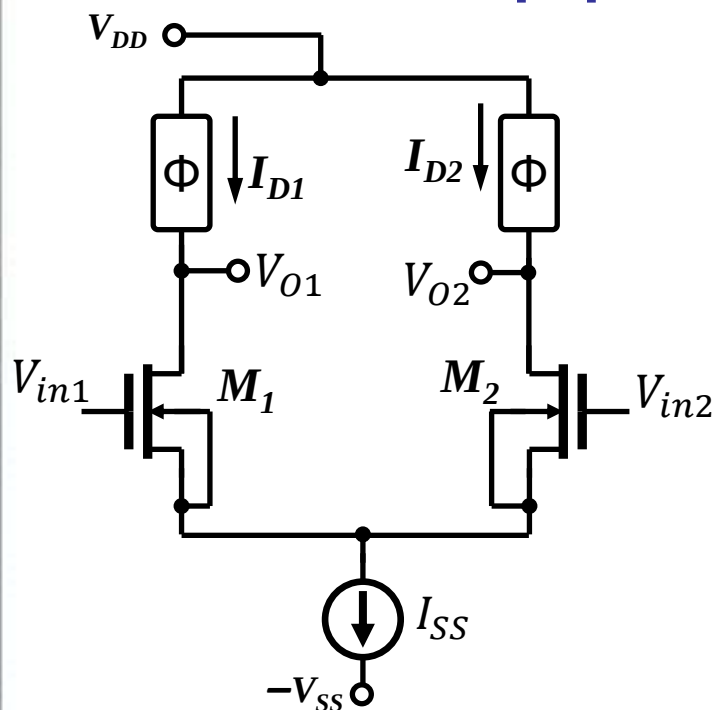
Ο Διαφορικός Ενισχυτής με MOSFET



Μέχρι στιγμής είδαμε τον διαφορικό ενισχυτή στην DC λειτουργία. Μας ενδιαφέρει να βρούμε την κλίση, δηλαδή την απολαβή, αν στην είσοδο έχουμε μεταβολές της V_{inD}

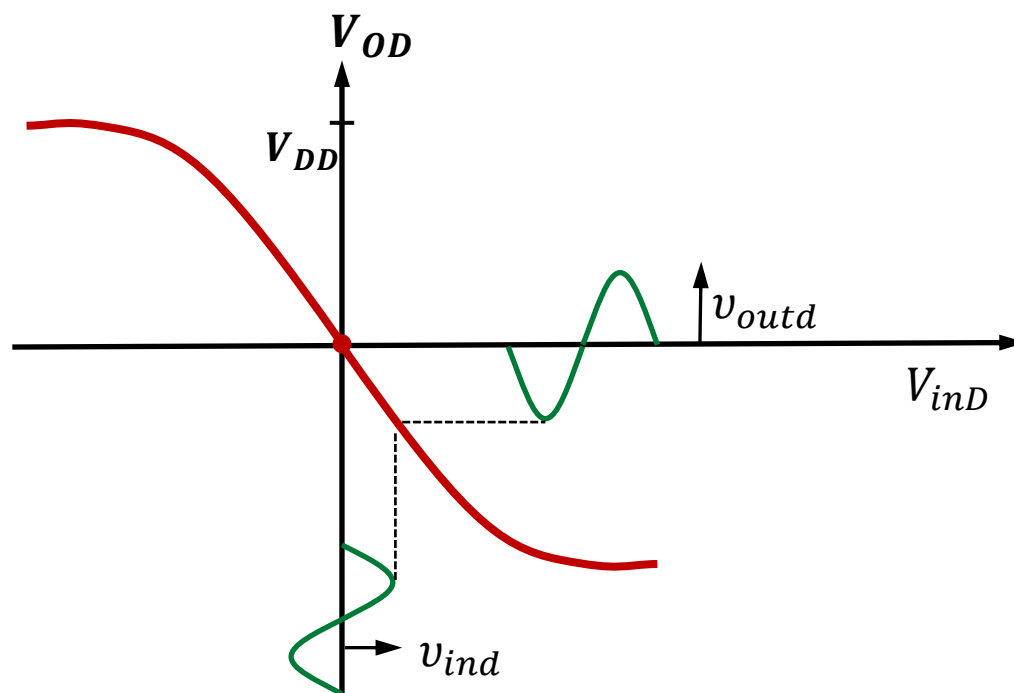


Ο Διαφορικός Ενισχυτής με MOSFET



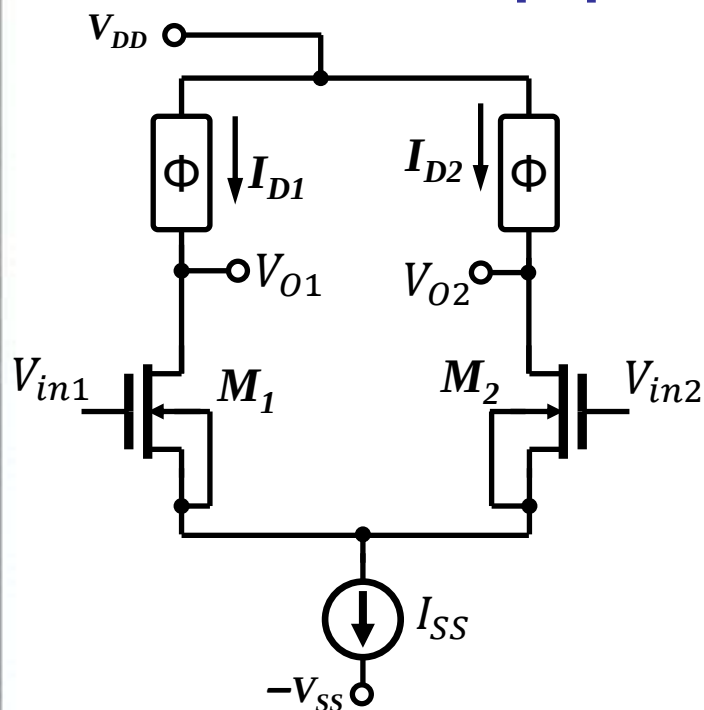
Η Διαφορική Απολαβή A_{dm} ισούται με το λόγο της μεταβολής της διαφορικής τάσης εξόδου v_{outd} , προς την μεταβολή της διαφορικής τάσης εισόδου v_{ind} .

$$\text{Διαφορική Απολαβή} = \frac{v_{outd}}{v_{ind}}$$



Η Απολαβή Κοινού Τρόπου A_{cm} ισούται με το λόγο της τάσης κοινού τρόπου εξόδου V_{oc} , προς την τάση κοινού τρόπου εισόδου V_{ic} .

Ο Διαφορικός Ενισχυτής με MOSFET



Στον **ιδανικό** διαφορικό ενισχυτή θέλουμε η Διαφορική Απολαβή A_{dm} να έχει μεγάλη τιμή ενώ η απολαβή Κοινού Τρόπου A_{cm} να είναι μηδέν.

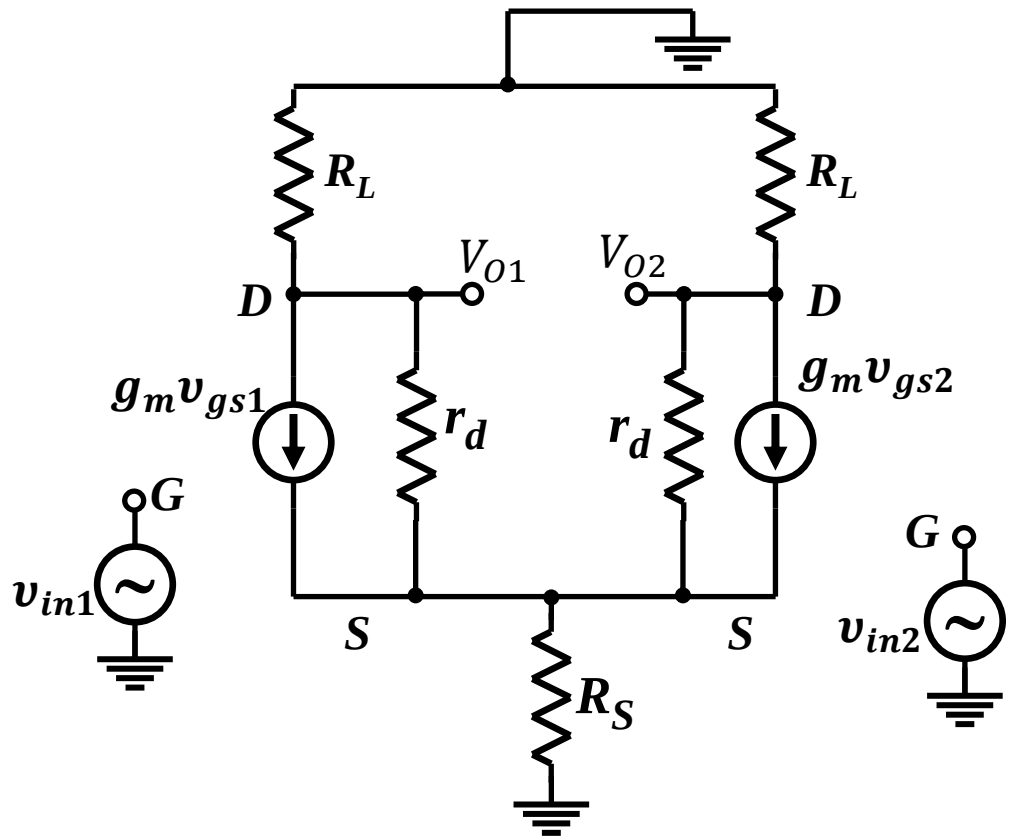
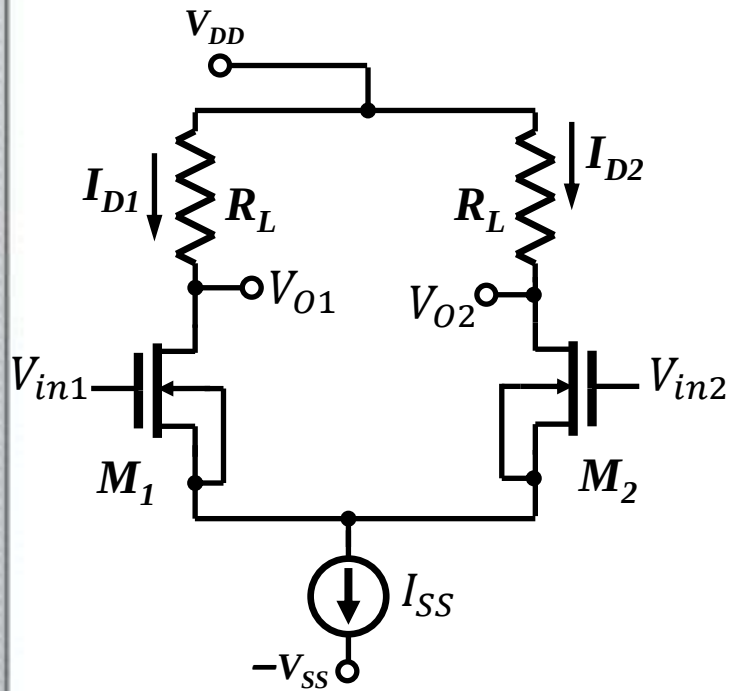
Σε ένα πραγματικό διαφορικό ενισχυτή ορίζεται ο λόγος απόρριψης κοινού τρόπου CMRR (Common Mode Rejection Ratio) ως εξής:

$$CMRR = \frac{A_{dm}}{A_{cm}}$$

Το CMRR θέλουμε να έχει μικρή τιμή ή μεγάλη τιμή; [Απ. μεγάλη τιμή]

Θα χρησιμοποιήσουμε το Ισοδύναμο Κύκλωμα Μικρών Σημάτων (**ΙΚΜΣ**) για τον υπολογισμό των απολαβών και του CMRR.

Υπολογισμός A_{dm} Διαφορικού Ενισχυτή



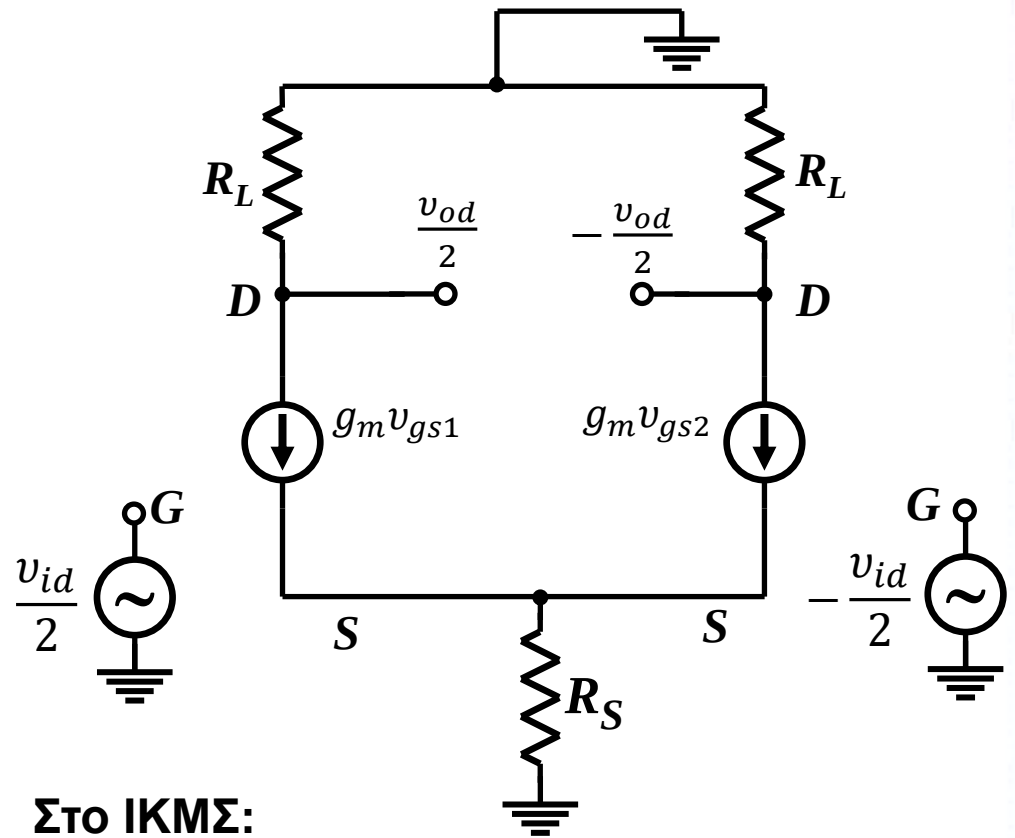
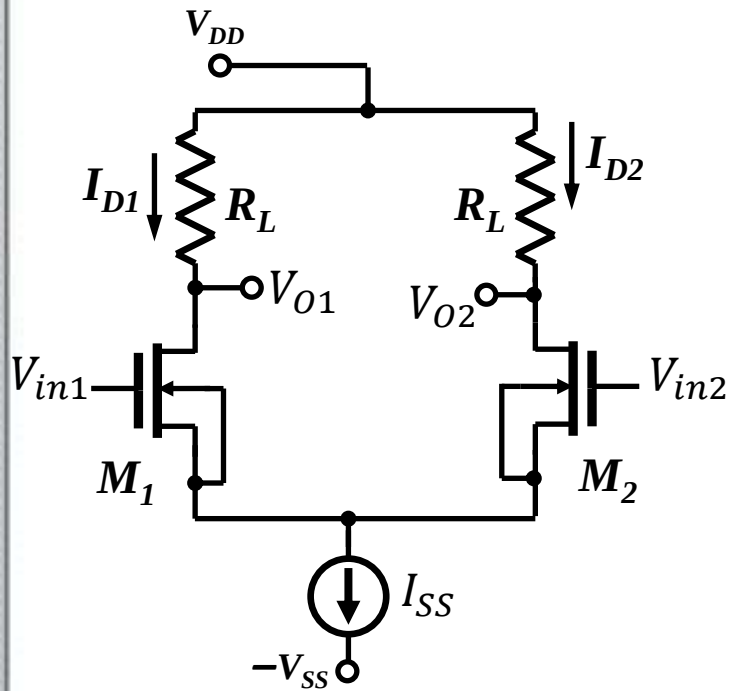
Στο ΙΚΜΣ:

Θεωρούμε ότι τα δύο τρανζίστορ είναι πολωμένα στο ίδιο σημείο και έχουν το ίδιο g_m .

Θεωρούμε την πηγή ρεύματος μη ιδανική με εσωτερική αντίσταση R_S .

Παραλείπουμε την r_d γιατί είναι πολύ μεγαλύτερη από την R_L .

Υπολογισμός Adm Διαφορικού Ενισχυτή



Στο ΙΚΜΣ:

Τα δύο τρανζίστορ έχουν το ίδιο g_m .

Για τον υπολογισμό της τάσης διαφορικού τρόπου θέτουμε στην 1^η είσοδο

$v_{in1} = \frac{v_{id}}{2}$ και στην 2^η $v_{in2} = -\frac{v_{id}}{2}$, δηλαδή παραλείπουμε την V_{inc} ,

επομένως στην έξοδο έχουμε τις τάσεις διαφορικού τρόπου $\pm \frac{v_{od}}{2}$.

Υπολογισμός A_{dm} Διαφορικού Ενισχυτή

Υπολογισμός $A_{dm} = \frac{v_{od}}{v_{id}}$

Κόμβος K1: $\frac{v_{od}}{2} = -g_m v_{gs1} \cdot R_L$

$$v_{gs1} = v_g - v_s = \frac{v_{id}}{2} - v_s$$

$$\frac{v_{od}}{2} = -g_m \left(\frac{v_{id}}{2} - v_s \right) R_L \quad (1)$$

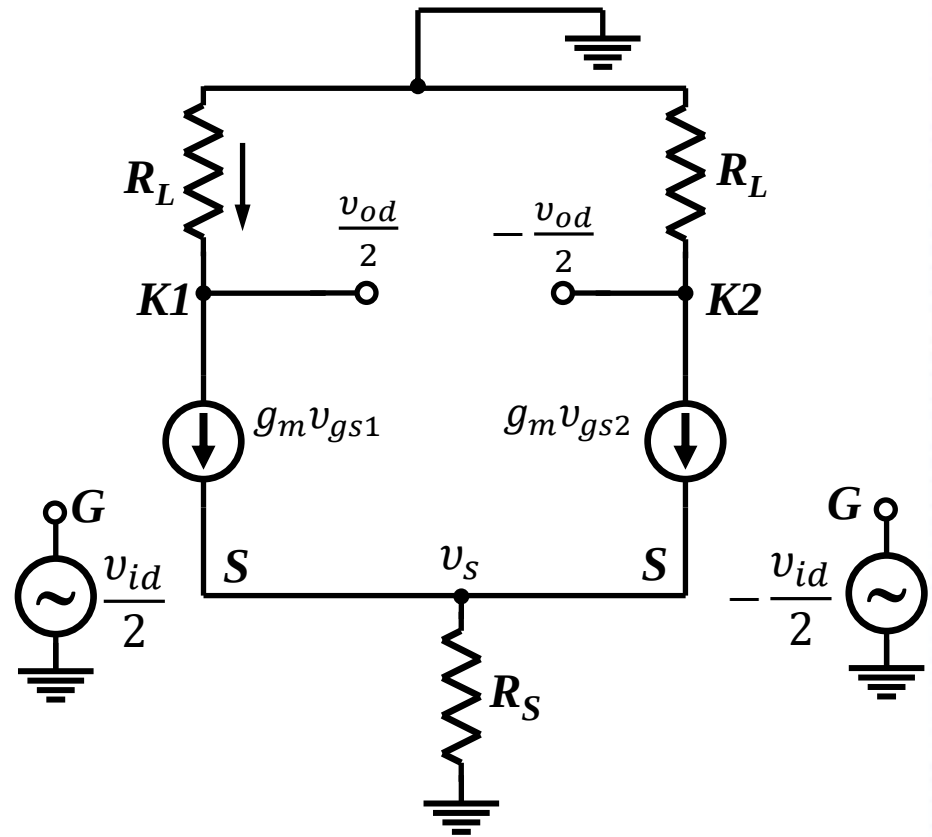
Κόμβος K2: $-\frac{v_{od}}{2} = -g_m v_{gs2} \cdot R_L,$

$$v_{gs2} = -\frac{v_{id}}{2} - v_s$$

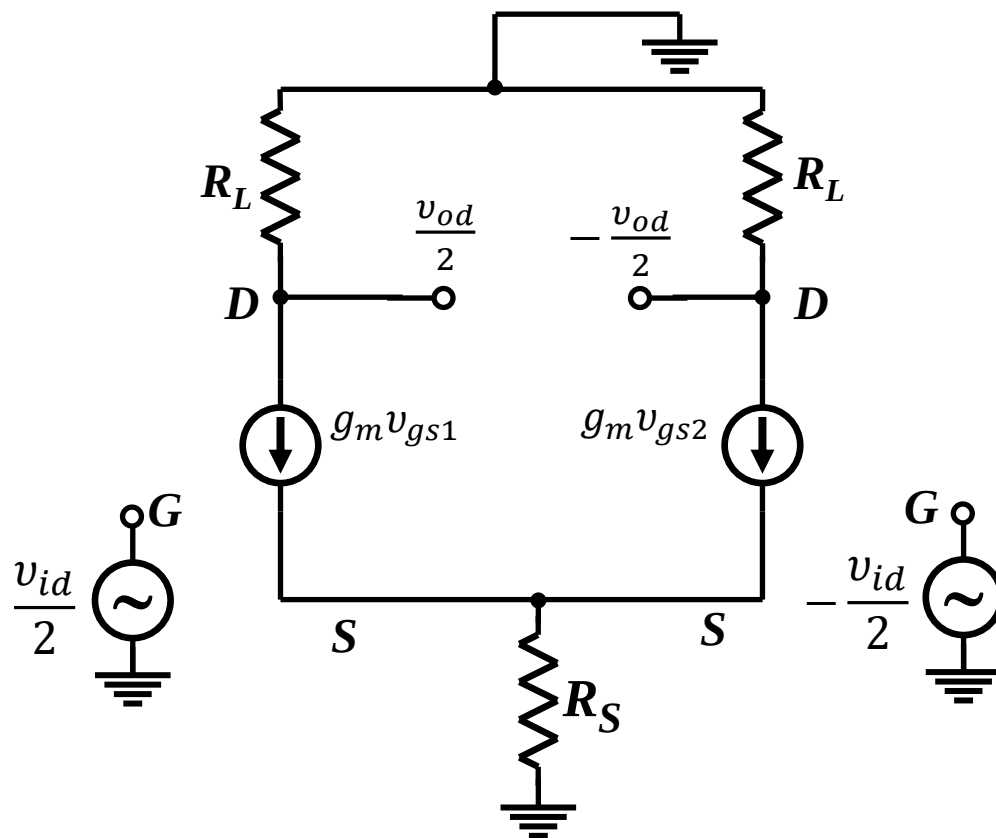
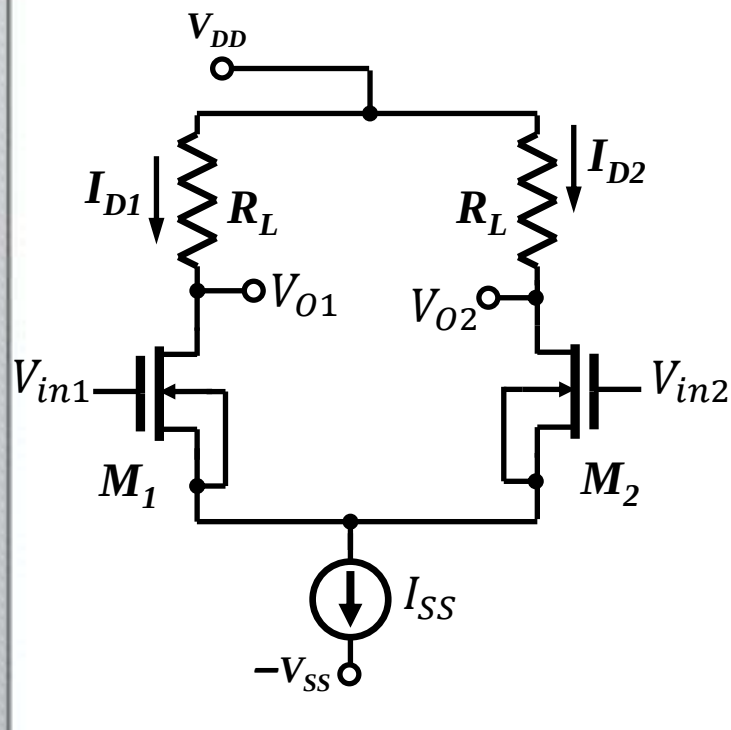
$$-\frac{v_{od}}{2} = g_m \left(\frac{v_{id}}{2} + v_s \right) R_L \quad (2)$$

Αφαιρώντας (1) και (2): $\frac{v_{od}}{2} + \frac{v_{od}}{2} = -g_m \frac{v_{id}}{2} R_L + g_m v_s R_L - g_m \frac{v_{id}}{2} R_L - g_m v_s R_L$

$$v_{od} = -g_m v_{id} R_L \Rightarrow A_{dm} = \frac{v_{od}}{v_{id}} = -g_m R_L \text{ (απολαβή ενισχυτή κοινής πηγής)}$$



Υπολογισμός Adm Διαφορικού Ενισχυτή



Γιατί να χρησιμοποιήσουμε τον διαφορικό ενισχυτή και όχι τον πιο απλό ενισχυτή κοινής πηγής που έχει την ίδια απολαβή:

$$A = -g_m R_L$$

1° το σημείο λειτουργίας ρυθμίζεται αποκλειστικά από την πηγή ρεύματος

2° μεγάλη γραμμική περιοχή λειτουργίας, 3° σταθερότητα σημείου ηρεμίας

Υπολογισμός Απολαβής Κοινού Τρόπου A_{cm}

Υπολογισμός $A_{cm} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}}$

Εφαρμόζουμε και στις δύο εισόδους την ίδια τάση v_{ic}

Και στις δύο εξόδους έχουμε την ίδια τάση v_{oc}

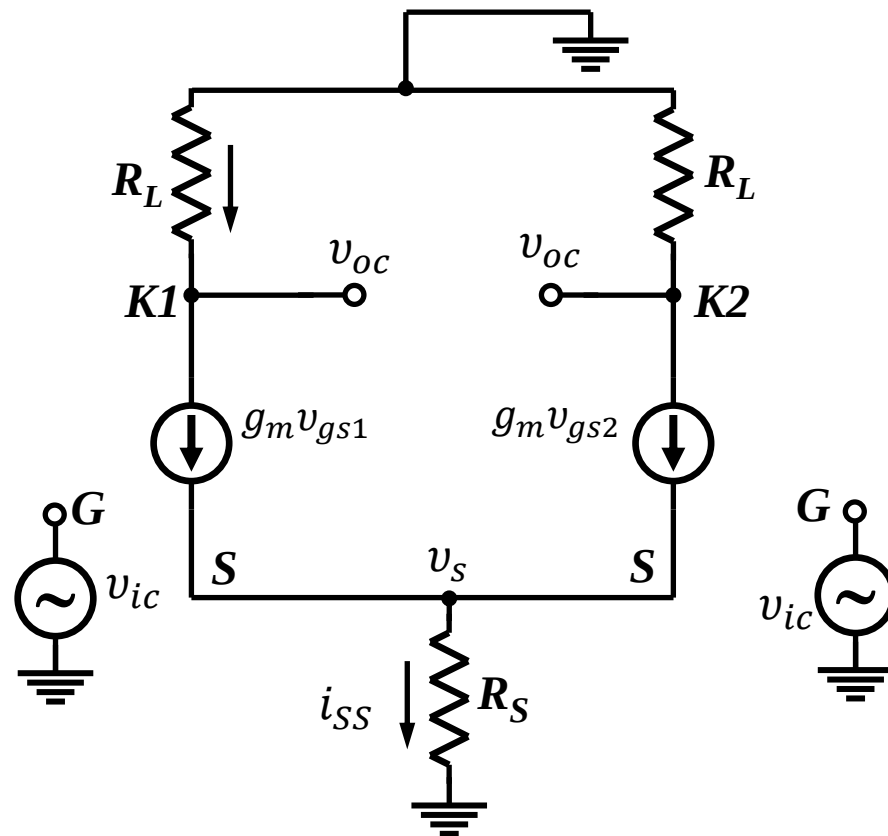
Στον ιδανικό διαφορικό ενισχυτή η τάση v_{oc} πρέπει να είναι ανεξάρτητη από την v_{ic} όταν οι τάσεις εισόδου είναι ίσες. Λόγω της αντίστασης R_S της μη ιδανικής πηγής ρεύματος αυτό δεν συμβαίνει.

Κόμβος K1: $v_{oc} = -g_m v_{gs1} \cdot R_L$

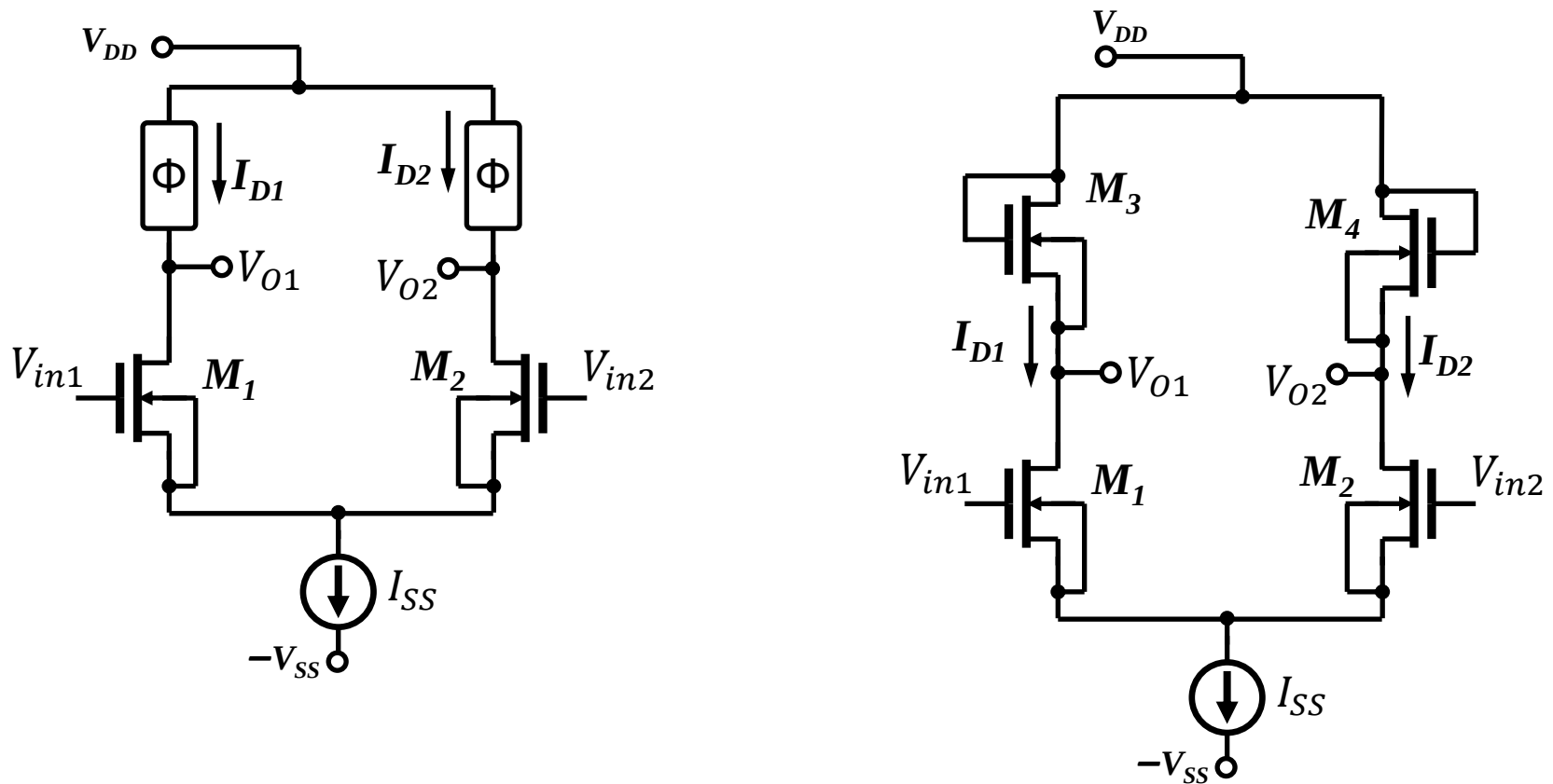
$$v_{gs1} = v_g - v_s = v_{ic} - v_s \quad v_s = i_{SS} \cdot R_S = 2g_m v_{gs1} \cdot R_S$$

$$v_{gs1} = v_{ic} - 2g_m v_{gs1} \cdot R_S \Rightarrow v_{gs1} = \frac{v_{ic}}{1 + 2g_m R_S} \Rightarrow A_{cm} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}} = -\frac{g_m R_L}{1 + 2g_m R_S}$$

Παρατηρούμε ότι όταν $R_S \rightarrow \infty$ τότε $A_{cm} \rightarrow 0$

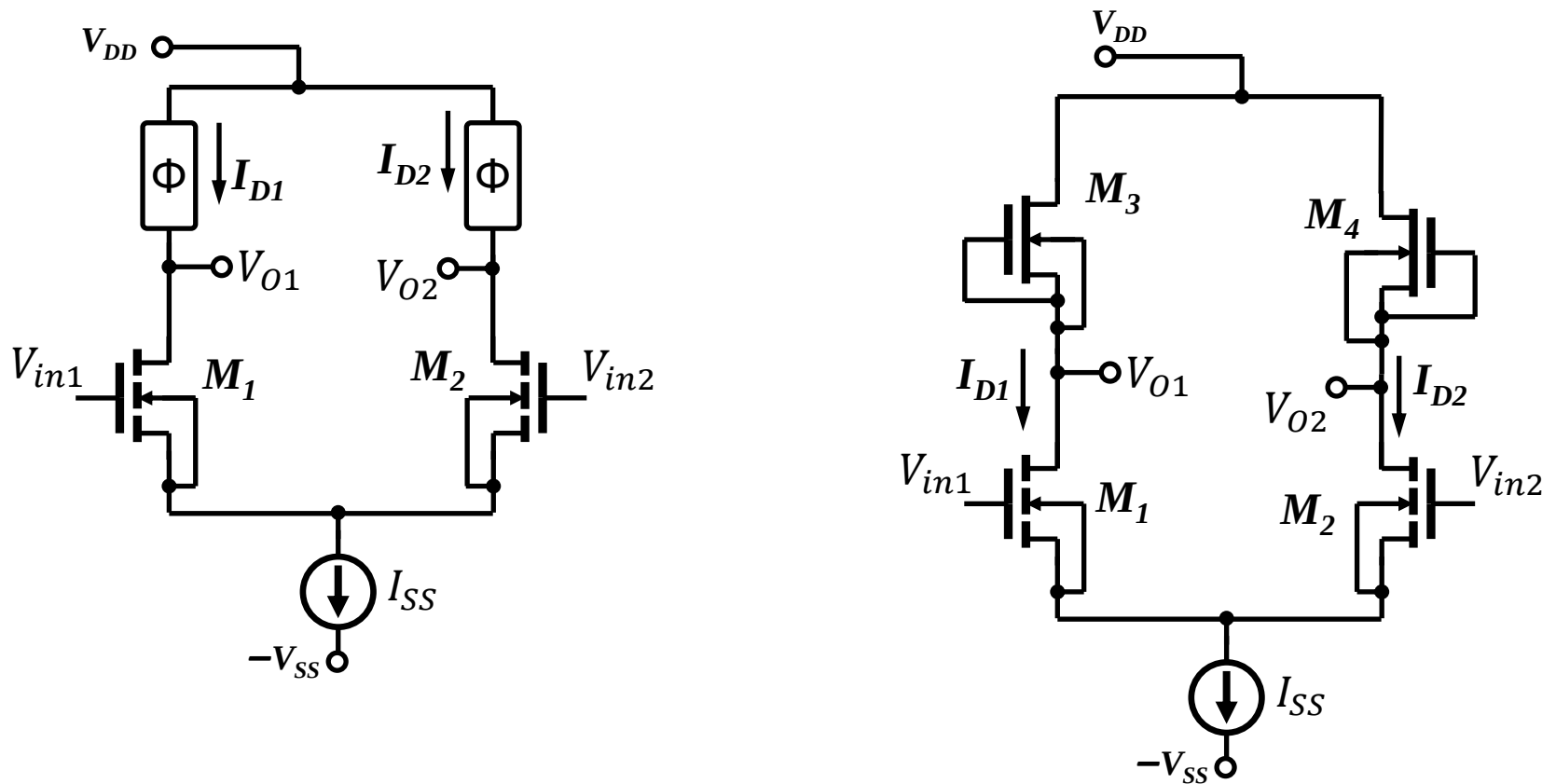


Ο Διαφορικός Ενισχυτής με MOSFET



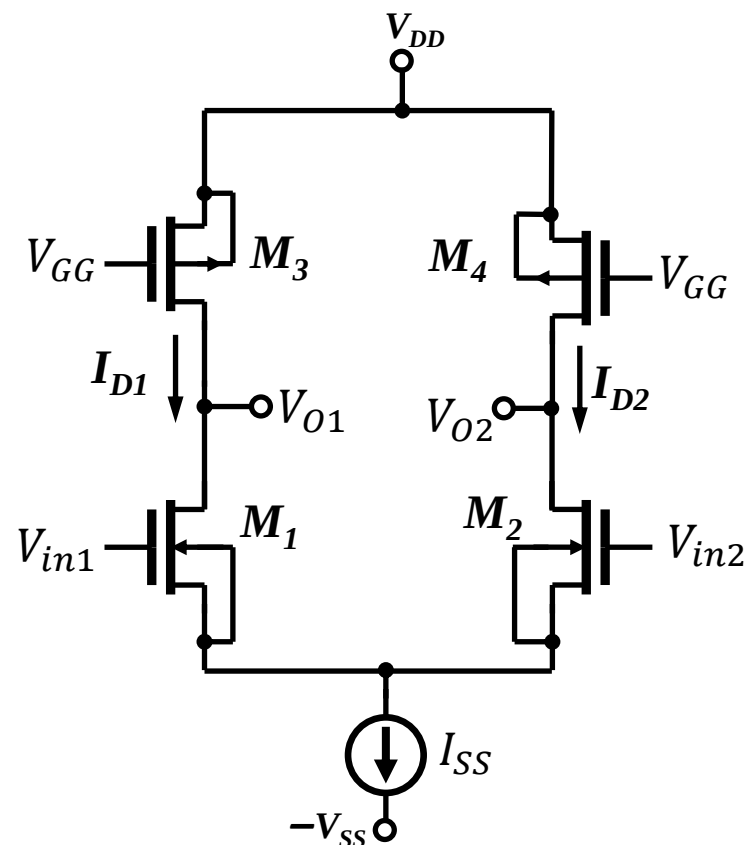
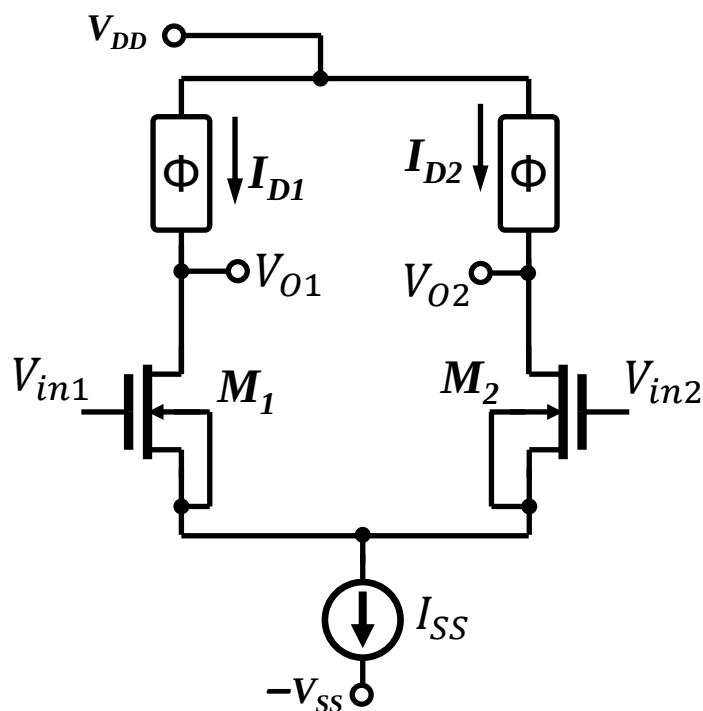
Οι ωμικές αντιστάσεις (Φ) μπορούν να αντικατασταθούν με τρανζίστορ συνδεδεμένα ως διόδους (M_3 & M_4).

Ο Διαφορικός Ενισχυτής με MOSFET



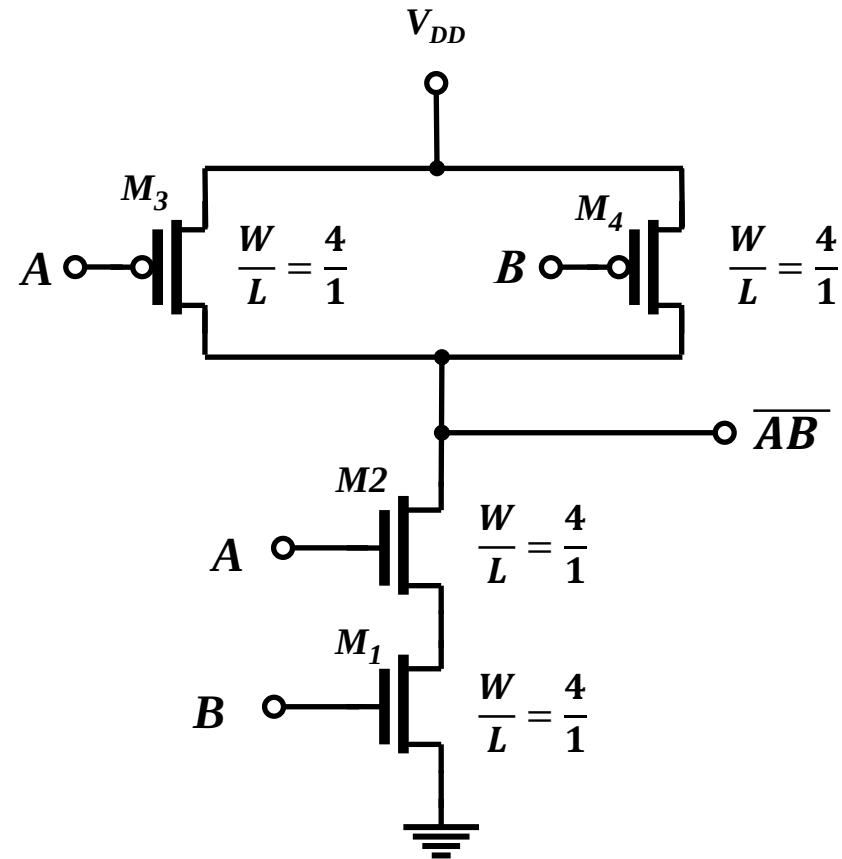
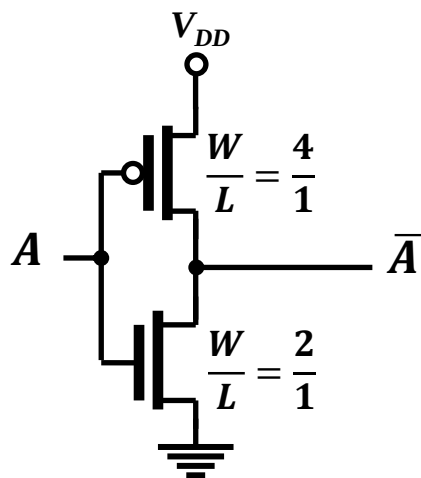
Οι ωμικές αντιστάσεις μπορούν να αντικατασταθούν με τρανζίστορ απογύμνωσης (M_3 & M_4).

Ο Διαφορικός Ενισχυτής με MOSFET



Οι ωμικές αντιστάσεις (Φ) μπορούν να αντικατασταθούν με τρανζίστορ pMOS (M_3 & M_4) συνδεδεμένα ώστε να άγουν πάντα (πηγές ρεύματος).

Πύλες με CMOS



Τι τιμές έχουν οι διαστάσεις των τρανζίστορ σε σχέση με τον αναστροφέα ώστε η πύλη NAND να παρέχει ίδιο ρεύμα με τον αναστροφέα; Να εξεταστεί και η πύλη NOR

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/>.



Τέλος Ενότητας