

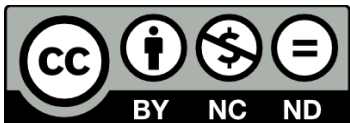


ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ Ι

Ενότητα 4: Πόλωση των FET - Ισοδύναμα κυκλώματα

Χατζόπουλος Αλκιβιάδης

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχ. Υπολογιστών



Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη 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.



Σχεδιασμός ενοτήτων:

- 1. Ημιαγωγική δίοδος
- 2. Ένωση pn
- 3. Τρανζίστορ FET
- 4. **Πόλωση των FET - Ισοδύναμα κυκλώματα**
- 5. Ενισχυτές με FET
- 6. Διπολικό τρανζίστορ (BJT)
- 7. Πόλωση των BJT - Ισοδύναμα κυκλώματα
- 8. Ενισχυτές με διπολικά τρανζίστορ
- 9. Ενισχυτές με ενεργό φορτίο
- 10. Κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων



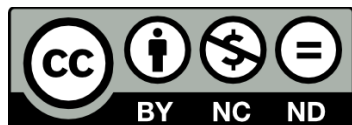


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΑΝΟΙΚΤΑ
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΑ
ΜΑΘΗΜΑΤΑ



ΠΟΛΩΣΗ ΤΩΝ FET - ΙΣΟΔΥΝΑΜΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



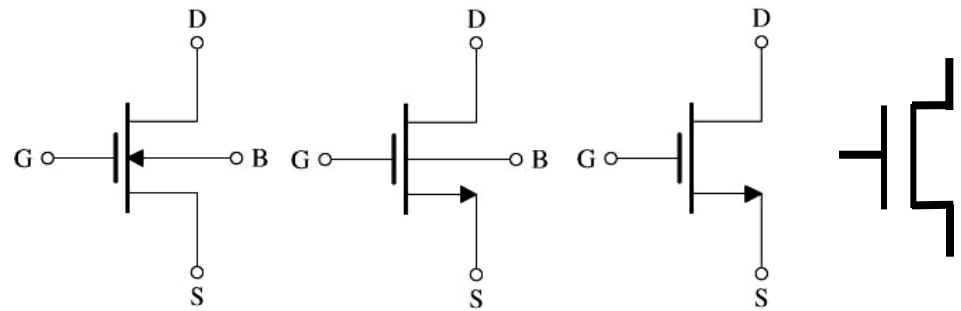
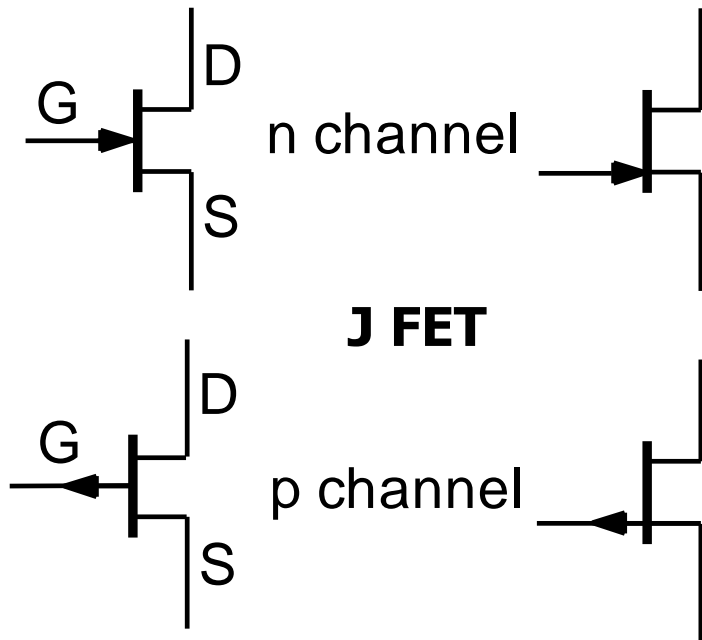
ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα ενότητας

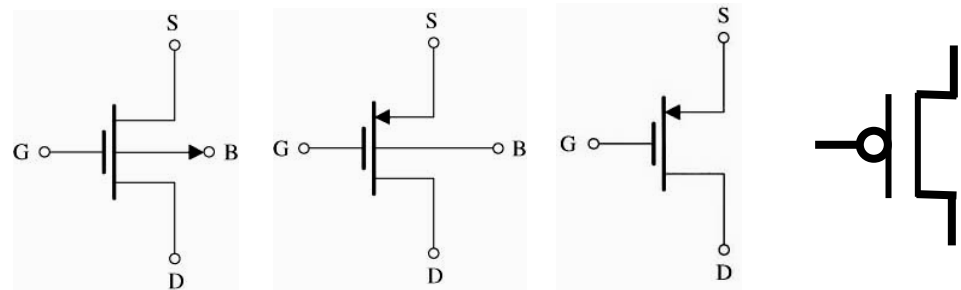
1. Εισαγωγή – πόλωση τρανζίστορ JFET (διαφ. 7- 11)
2. Πόλωση τρανζίστορ MOS (διαφ. 12- 14)
3. Καθρέπτες ρεύματος (διαφ. 15- 21)
4. Ισοδύναμα κυκλώματα (διαφ. 22-29)



Σύμβολα των FET



n-MOS πύκνωσης



p-MOS πύκνωσης



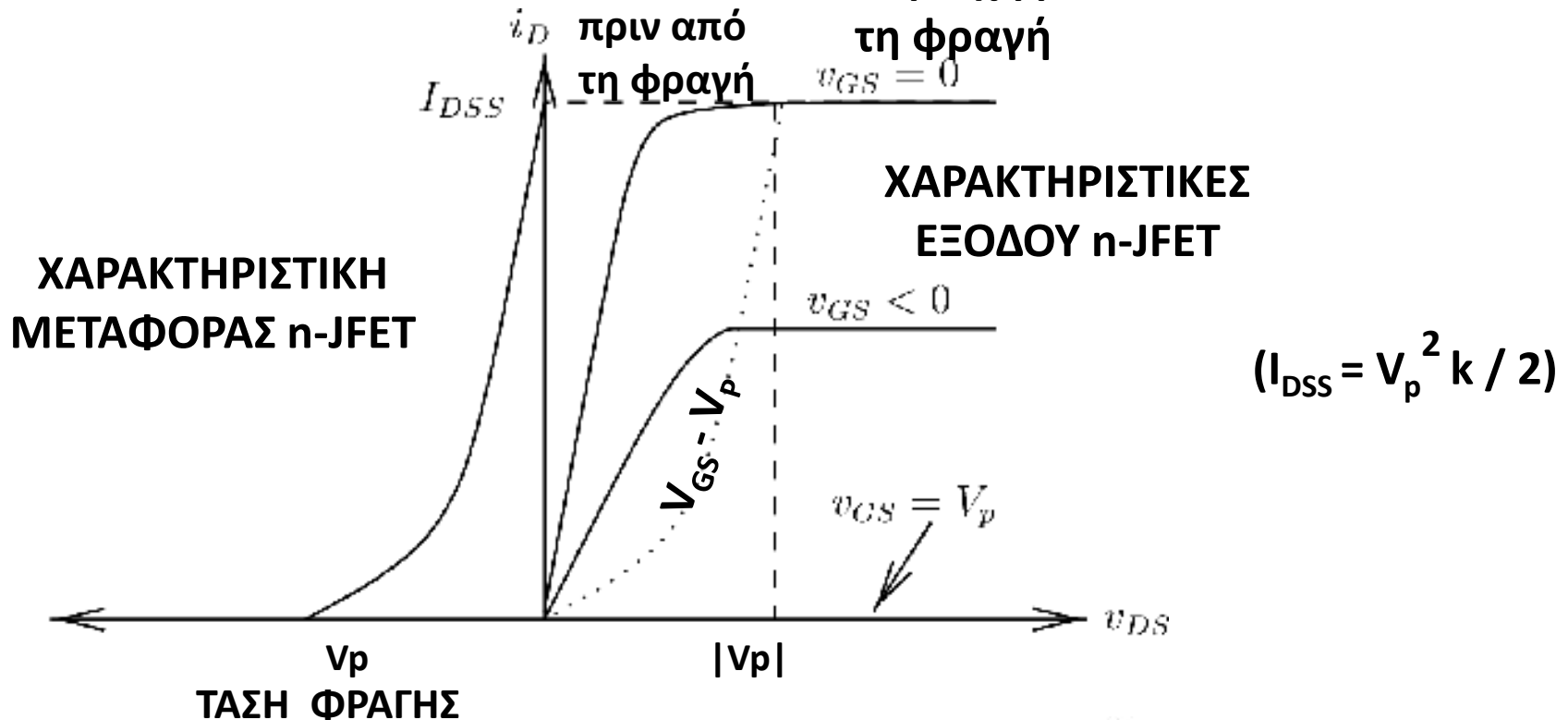
JFET (1/2)

$$I_D = k[(V_{GS} - V_p)V_{DS} - V_{DS}^2/2]$$

Περιοχή
πριν από
τη φραγή

$$I_D = I_{DSS}(1 - V_{GS} / V_p)^2$$

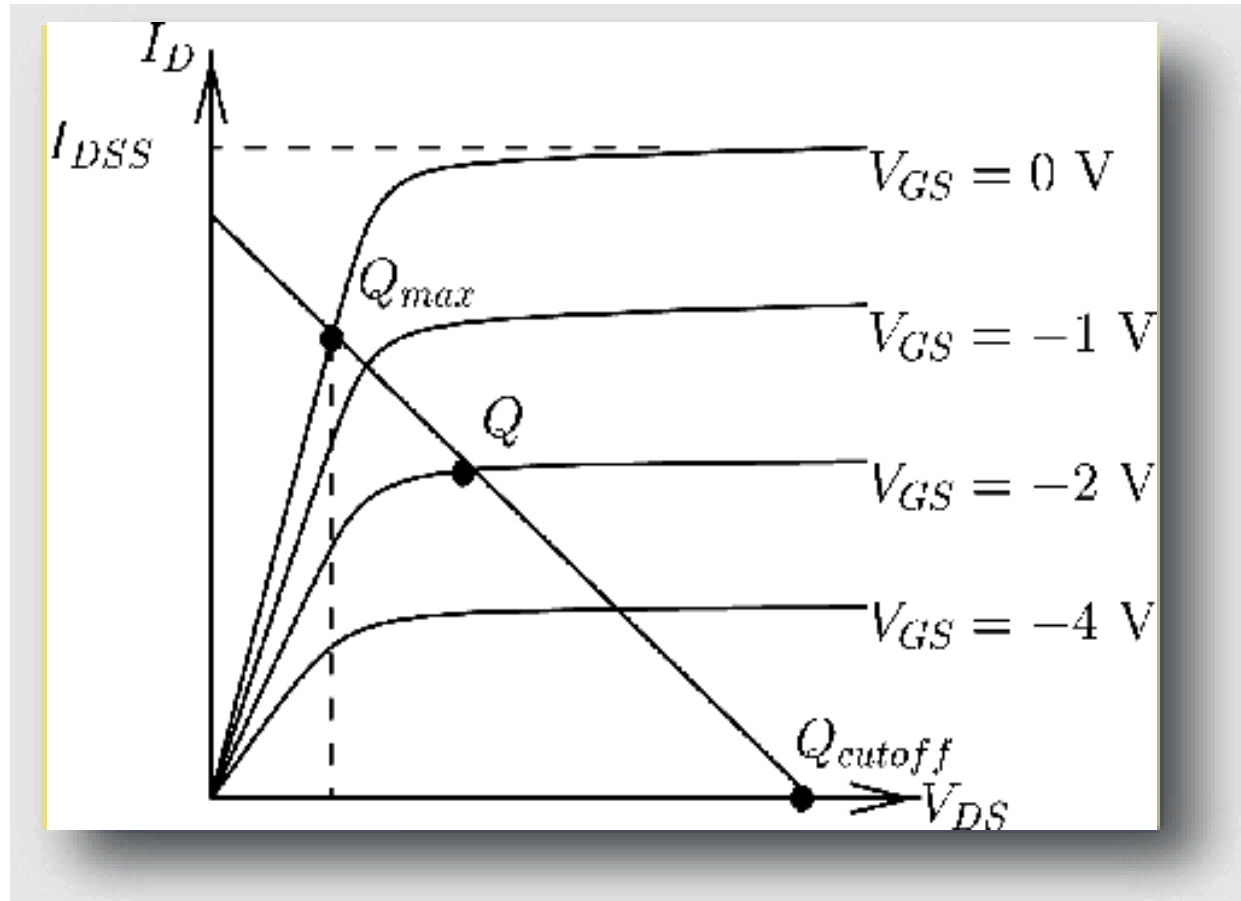
Περιοχή μετά
τη φραγή



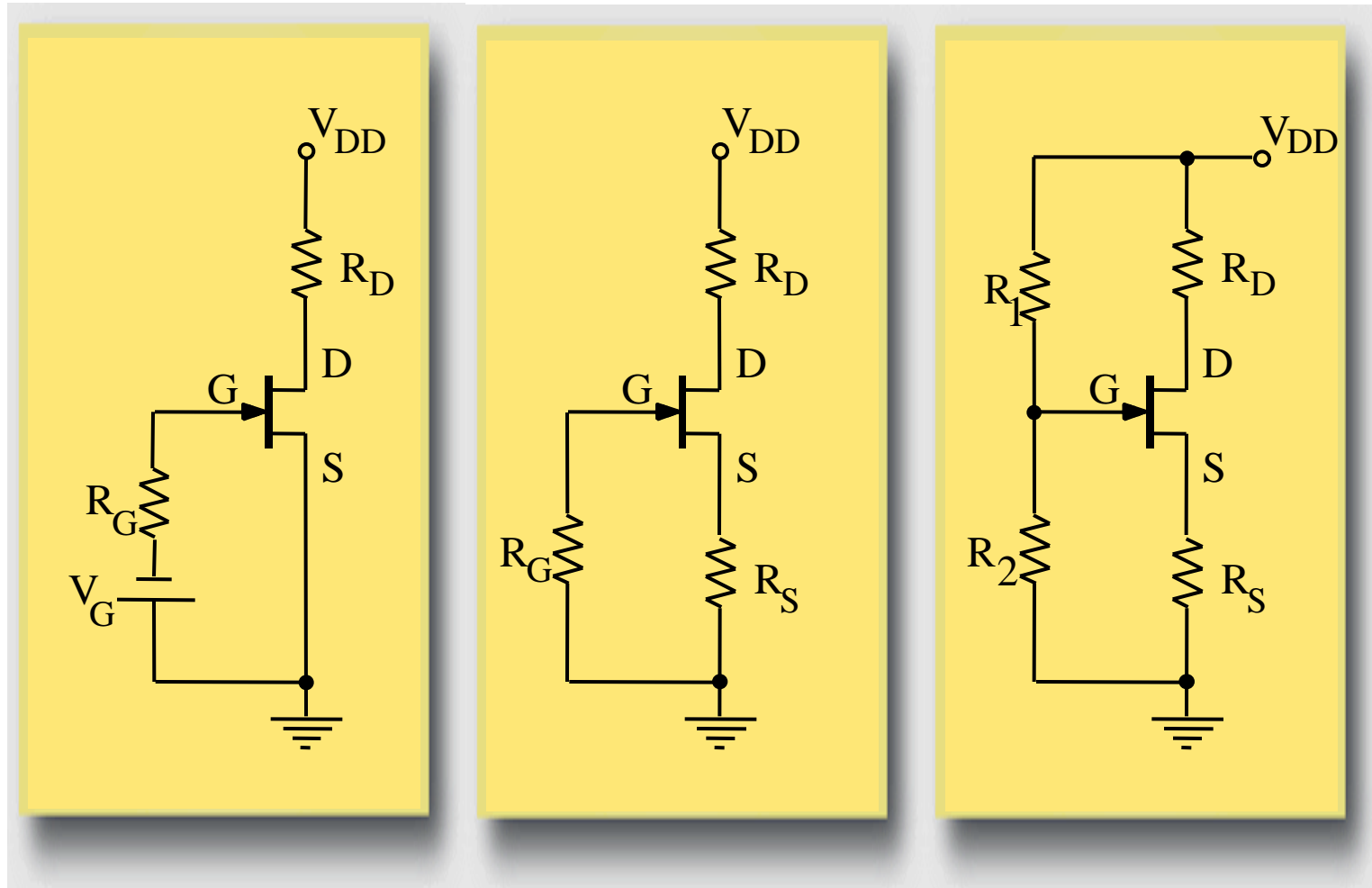
Επίδραση τάσης Early $V_A = 1 / \lambda$:
$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P}\right)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$



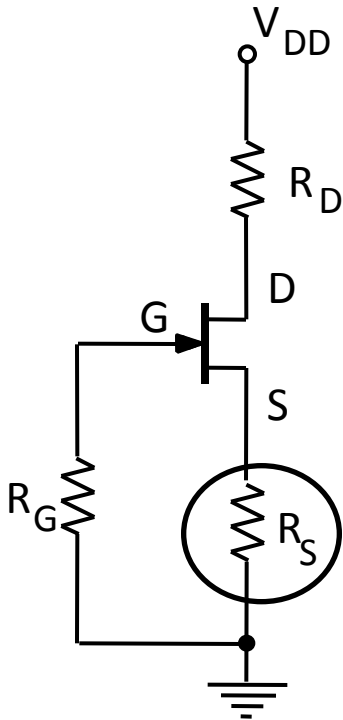
JFET (2/2)



Κυκλώματα πόλωσης JFET



Κύκλωμα αυτοπόλωσης με JFET



$$V_{DD} = i_D (R_D + R_S) + u_{DS} \Rightarrow$$

$$i_D = -u_{DS} / (R_D + R_S) + V_{DD} / (R_D + R_S)$$

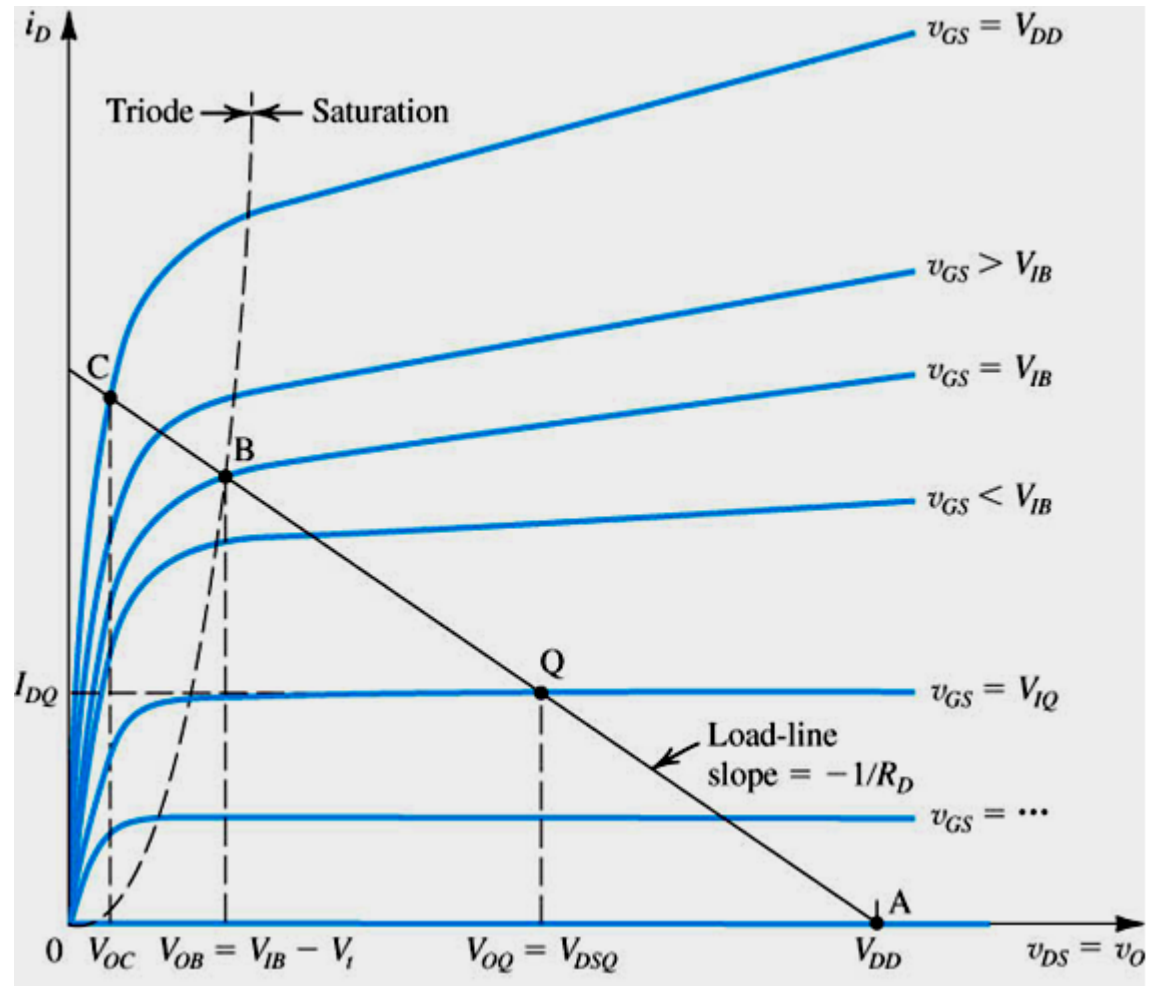
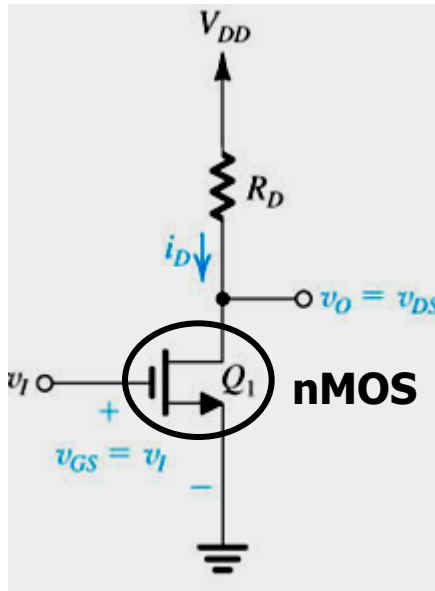
Ευθεία φόρτου DC

$$V_{GS} = -I_D R_S \quad (I_G = 0)$$

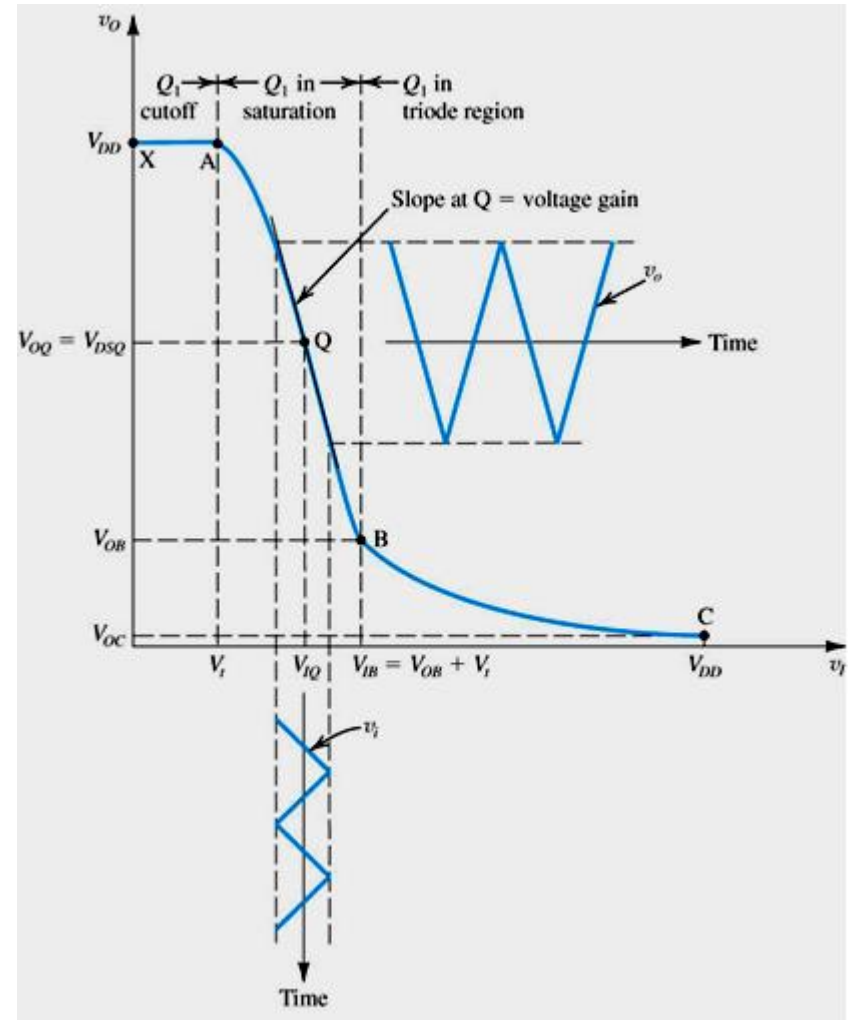
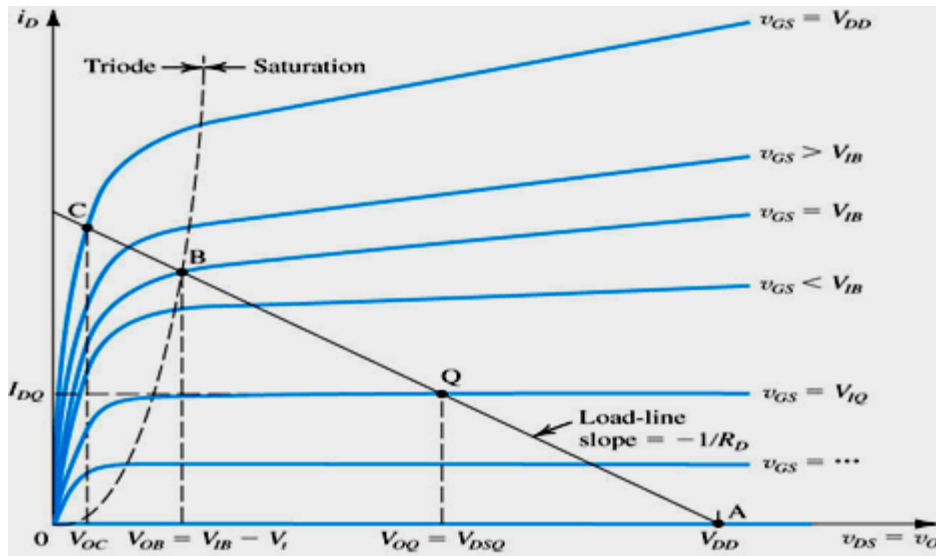
$$I_D = I_{DSS} (1 - V_{GS} / V_p)^2 = I_{DSS} (1 + I_D R_S / V_p)^2$$



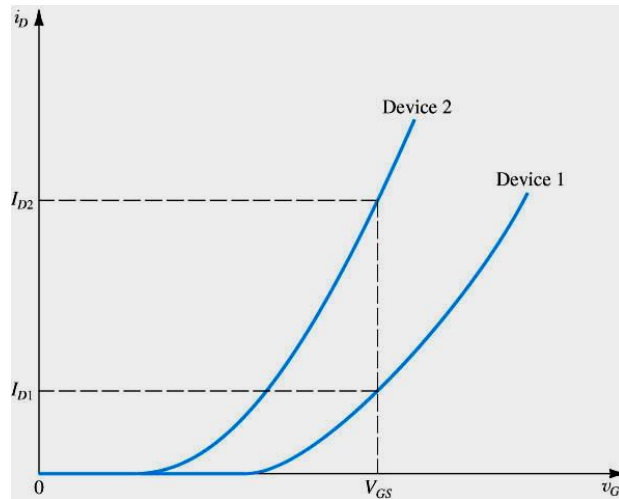
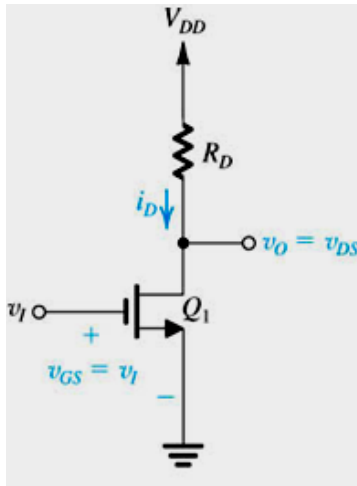
Πόλωση MOSFET (1/3)



Πόλωση MOSFET (2/3)

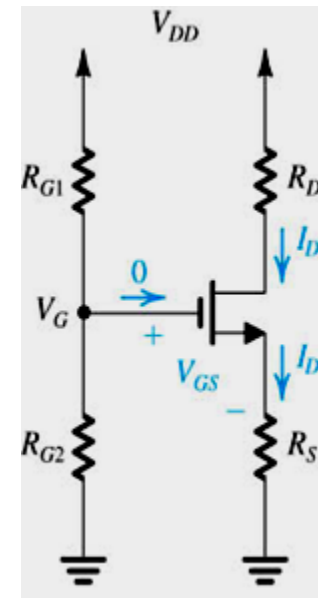
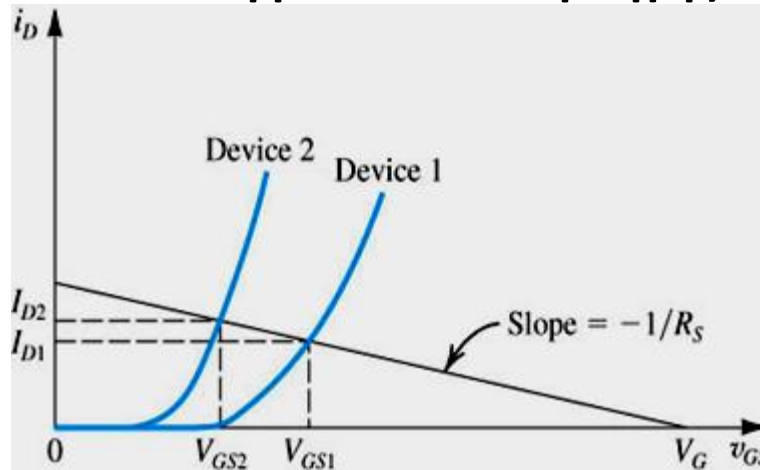
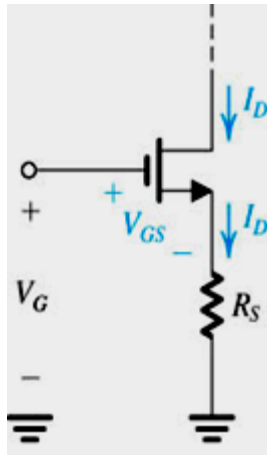


Πόλωση MOSFET (3/3)

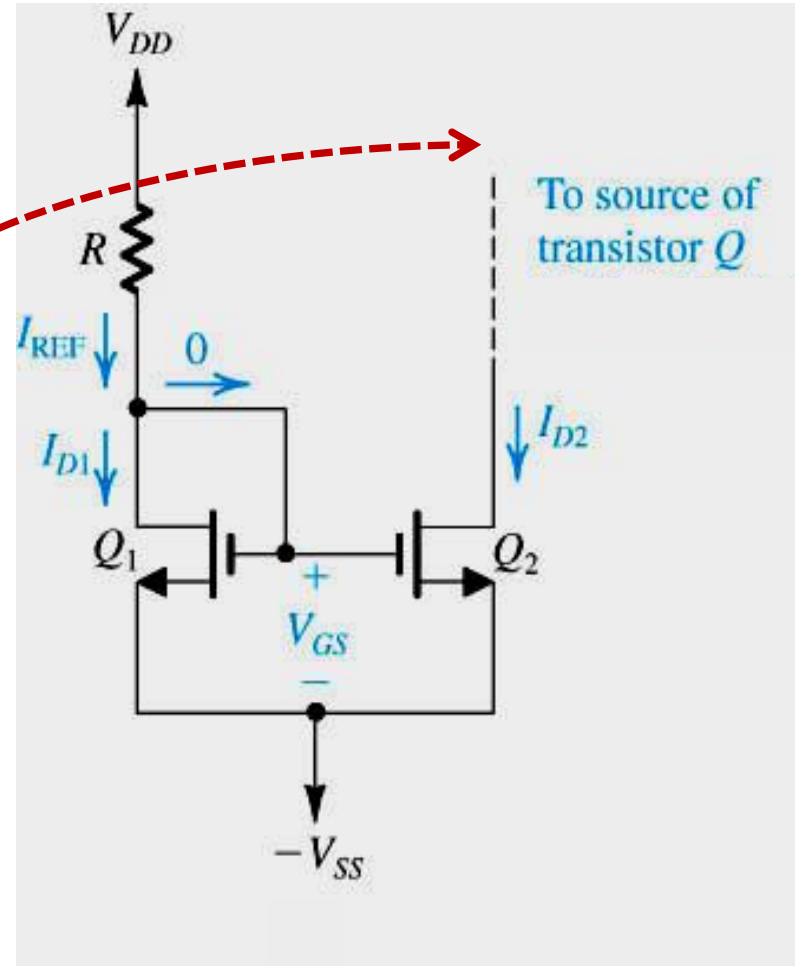
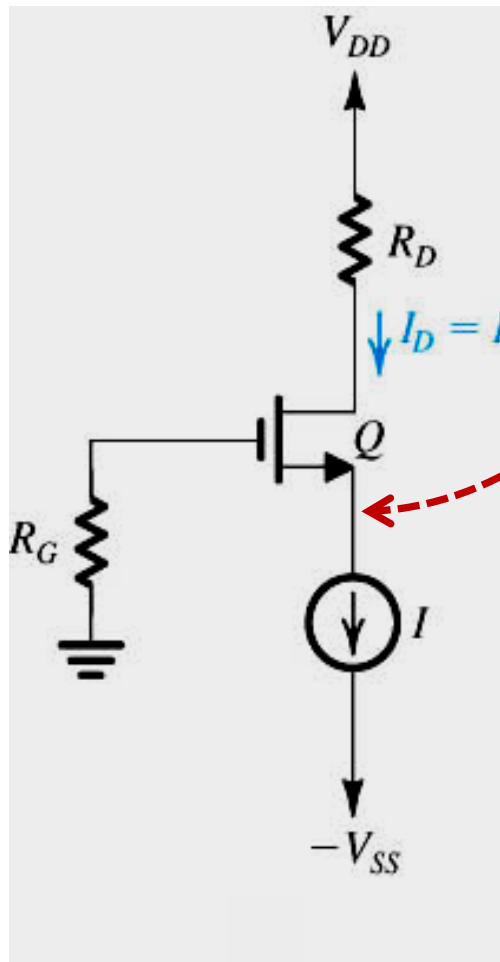


Πόλωση με σταθερή τάση V_{GS}

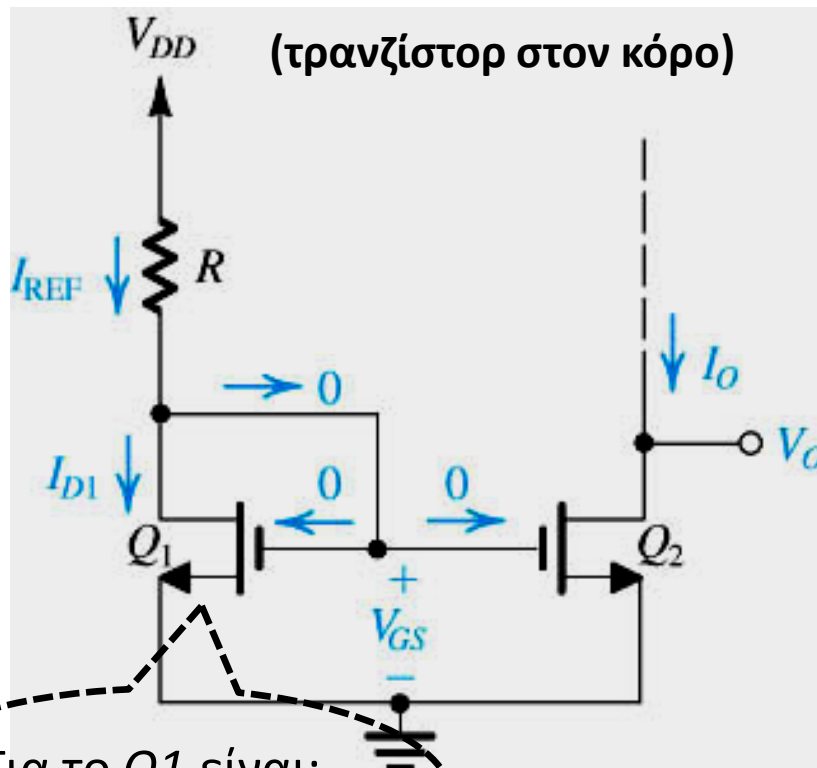
Πόλωση με αντίσταση πηγής R_S



Πόλωση MOSFET με καθρέπτη ρεύματος



Καθρέπτης ρεύματος με τρανζίστορ n-MOS



$$I_{D1} = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right)_1 (V_{GS} - V_{tn})^2$$

$$I_O = I_{D2} = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right)_2 (V_{GS} - V_{tn})^2$$

$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1}$$

$$I_O = \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1} I_{REF} \left(1 + \frac{V_O - V_{GS}}{V_{A2}} \right)$$

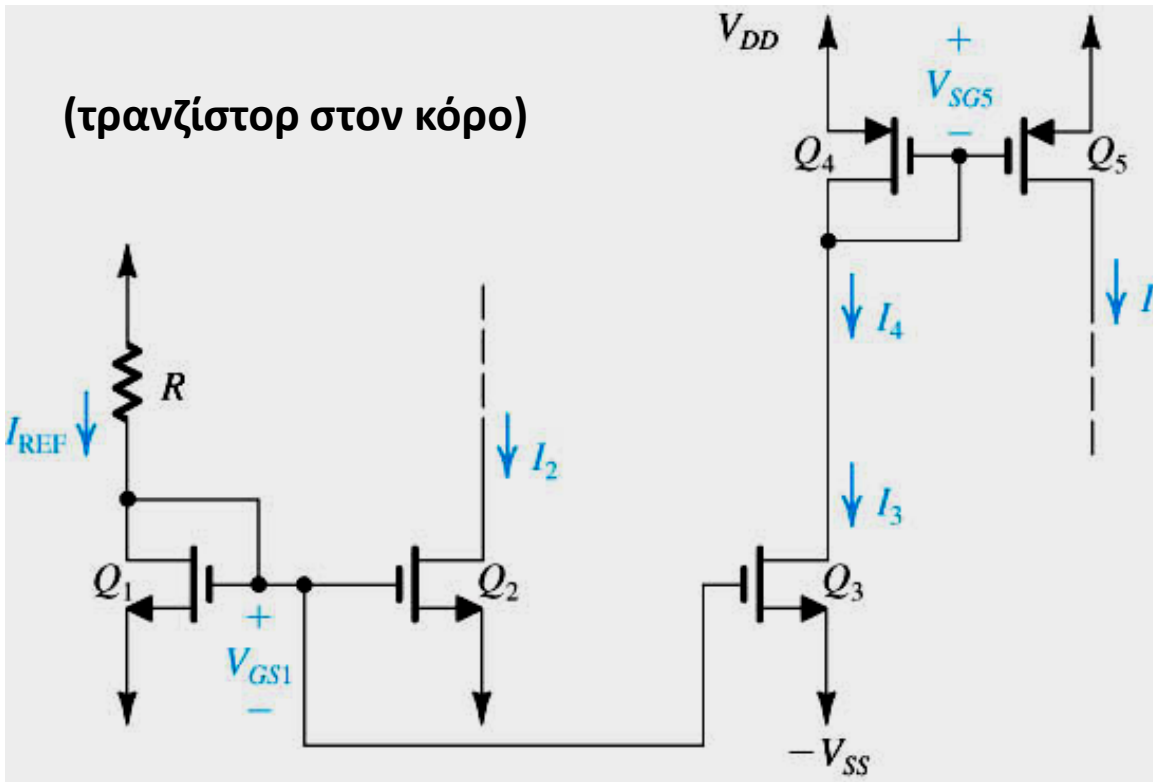
$$R_o \equiv \frac{\Delta V_O}{\Delta I_O} = r_{o2} = \frac{V_{A2}}{I_O}$$

Για το Q1 είναι:

$$V_{DS} = V_{GS} > V_{GS} - V_t$$



Καθρέπτες ρεύματος για απορρόφηση (sink) και παροχή (source) ρεύματος



$$I_2 = I_{REF} \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1}$$

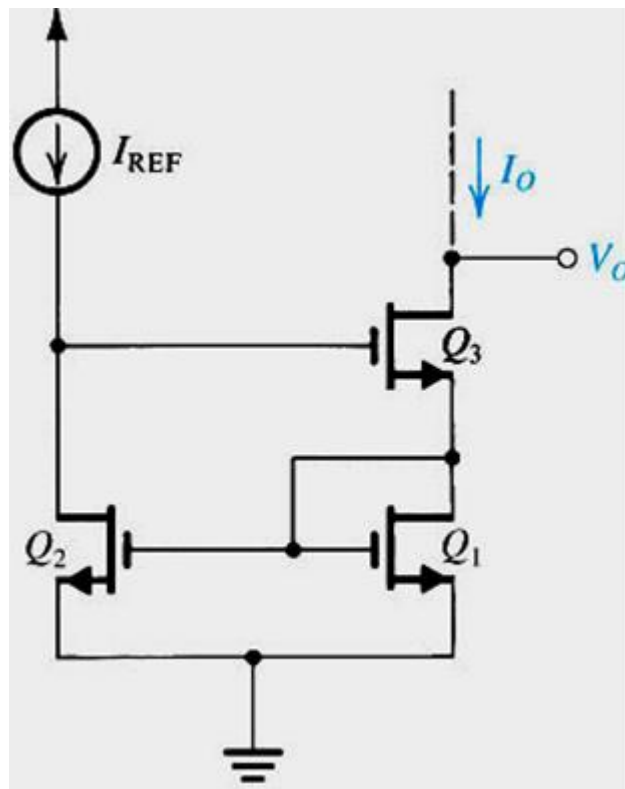
$$I_3 = I_{REF} \frac{(W/L)_3}{(W/L)_1}$$

$$I_5 = I_4 \frac{(W/L)_5}{(W/L)_4}$$



Καθρέπτης ρεύματος Wilson

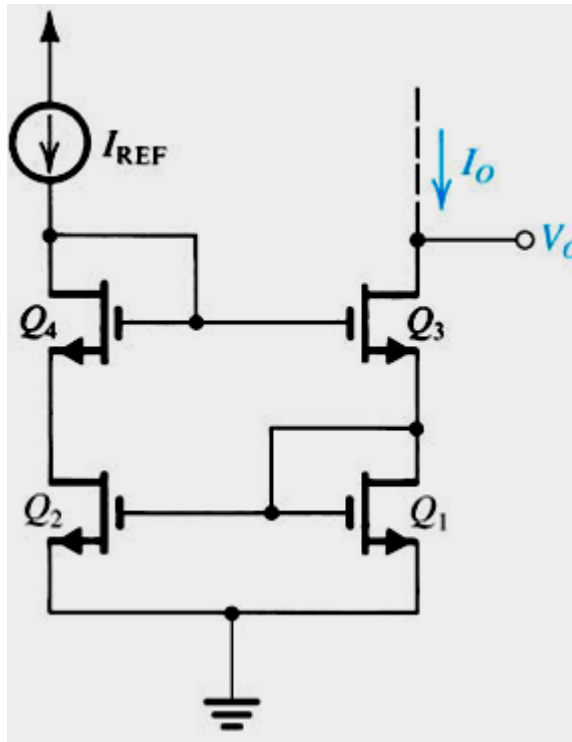
(τρανζίστορ στον κόρο)



$$R_o \cong r_{o3}(g_{m3}r_{o2} + 2)$$
$$\cong g_{m3}r_{o3}r_{o2}$$



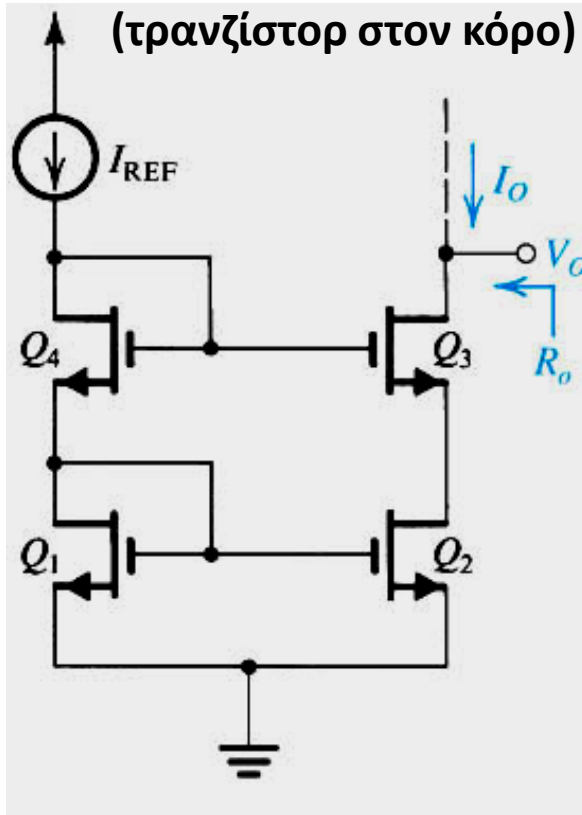
Τροποποιημένος καθρέπτης ρεύματος Wilson



Εξισορρόπηση της
διαφοράς V_{DS} μεταξύ των
 Q_1 και Q_2 του απλού
καθρέπτη Wilson.



Κασκοδικός καθρέπτης ρεύματος



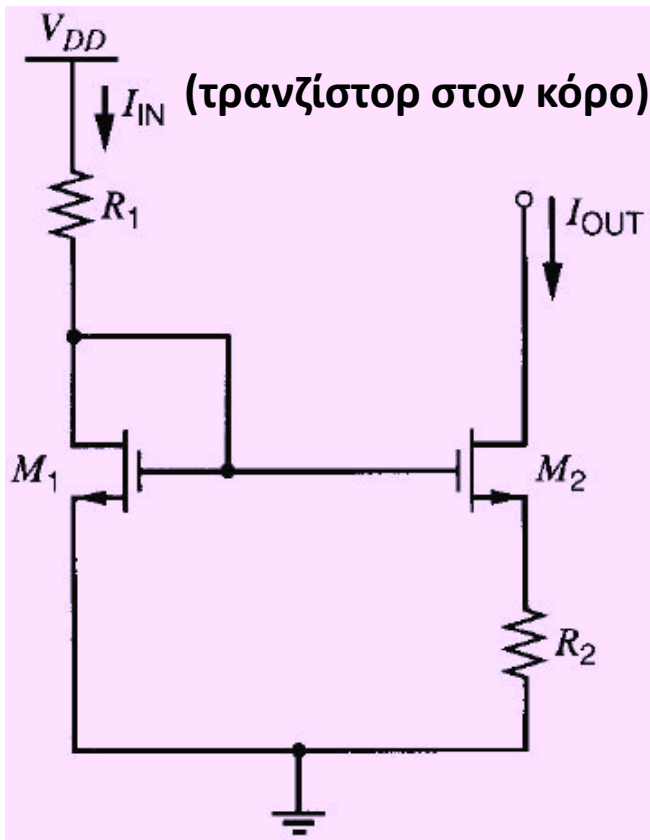
➤ Αντίσταση εξόδου αυξημένη κατά 10 έως 100 φορές σε σύγκριση με τον απλό καθρέπτη ρεύματος.

➤ **Μειονέκτημα** : μείωση του πλάτους διακύμανσης της εξόδου, διότι τα τρανζίστορ μπορεί να εισέλθουν στην γραμμική περιοχή λειτουργίας ($V_o > 2 V_{ov} + V_{tn}$).

$$R_o = r_{o3} + [1 + (g_{m3} + g_{mb3})r_{o3}]r_{o2}$$
$$\cong g_{m3}r_{o3}r_{o2}$$



Πηγή ρεύματος Widlar



$$V_{GS1} - V_{GS2} - I_{OUT}R_2 = 0$$

$$I_{OUT}R_2 + V_{ov2} - V_{ov1} = 0$$

$$I_{OUT}R_2 + \sqrt{\frac{2I_{OUT}}{k'(W/L)_2}} - V_{ov1} = 0$$

$$\sqrt{I_{OUT}} = \frac{-\sqrt{\frac{2}{k'(W/L)_2}} \pm \sqrt{\frac{2}{k'(W/L)_2} + 4R_2V_{ov1}}}{2R_2}$$

$$V_{ov1} = \sqrt{2I_{IN}/[k'(W/L)_1]}$$

$$\sqrt{I_{OUT}} = \frac{-\sqrt{\frac{2}{k'(W/L)_2}} + \sqrt{\frac{2}{k'(W/L)_2} + 4R_2V_{ov1}}}{2R_2}$$

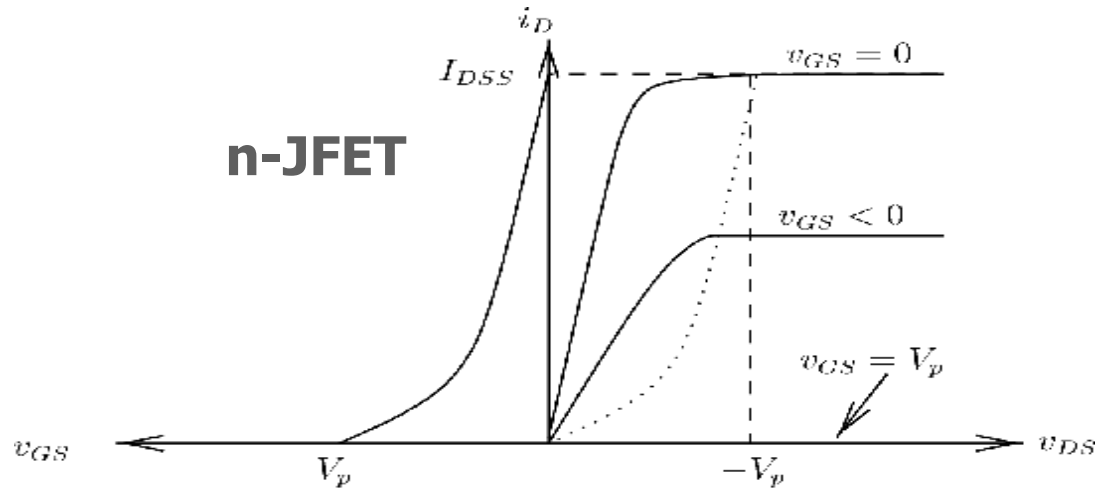
Χρησιμοποιείται για μικρά ρεύματα.

Υλοποιείται με μικρές τιμές αντιστάσεων, κατάλληλες για

ολοκληρωμένα κυκλώματα.



Συνθήκες και εξισώσεις λειτουργίας J-FET



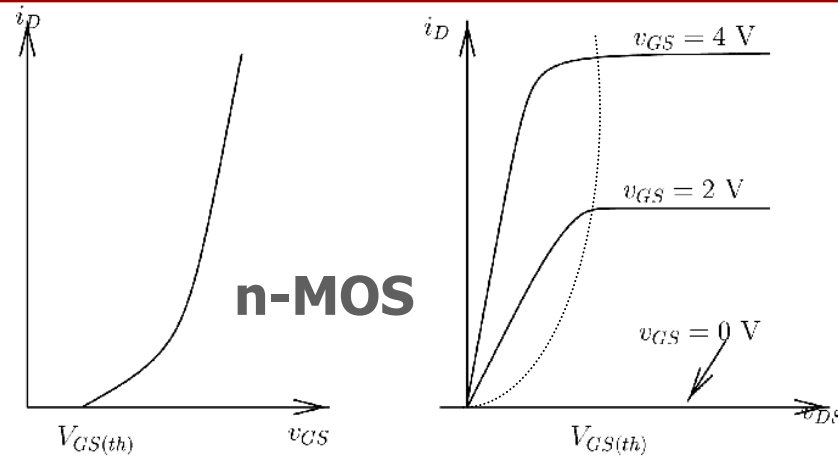
$$I_{DSS} = V_p^2 k / 2$$

$$\text{ή } k = 2 I_{DSS} / V_p^2$$

Δίαυλος	Ωμική περιοχή	Περιοχή μετά τη φραγή
p	$V_{DS} \geq V_{GS} - V_p$ $0 \geq V_{GS} - V_p$	$V_{DS} < V_{GS} - V_p$ $0 > V_{GS} - V_p$
n	$V_{DS} \leq V_{GS} - V_p$ $0 \leq V_{GS} - V_p$	$V_{DS} > V_{GS} - V_p$ $0 < V_{GS} - V_p$
	$R_{SD} = L / \sigma A$ $I_D = k[(V_{GS} - V_p)V_{DS} - V_{DS}^2/2]$	$I_D = I_{DSS}(1 - V_{GS}/V_p)^2$ $g_m = -(2I_{DSS}/V_p)(1 - V_{GS}/V_p)$



Συνθήκες και εξισώσεις λειτουργίας MOSFET πύκνωσης



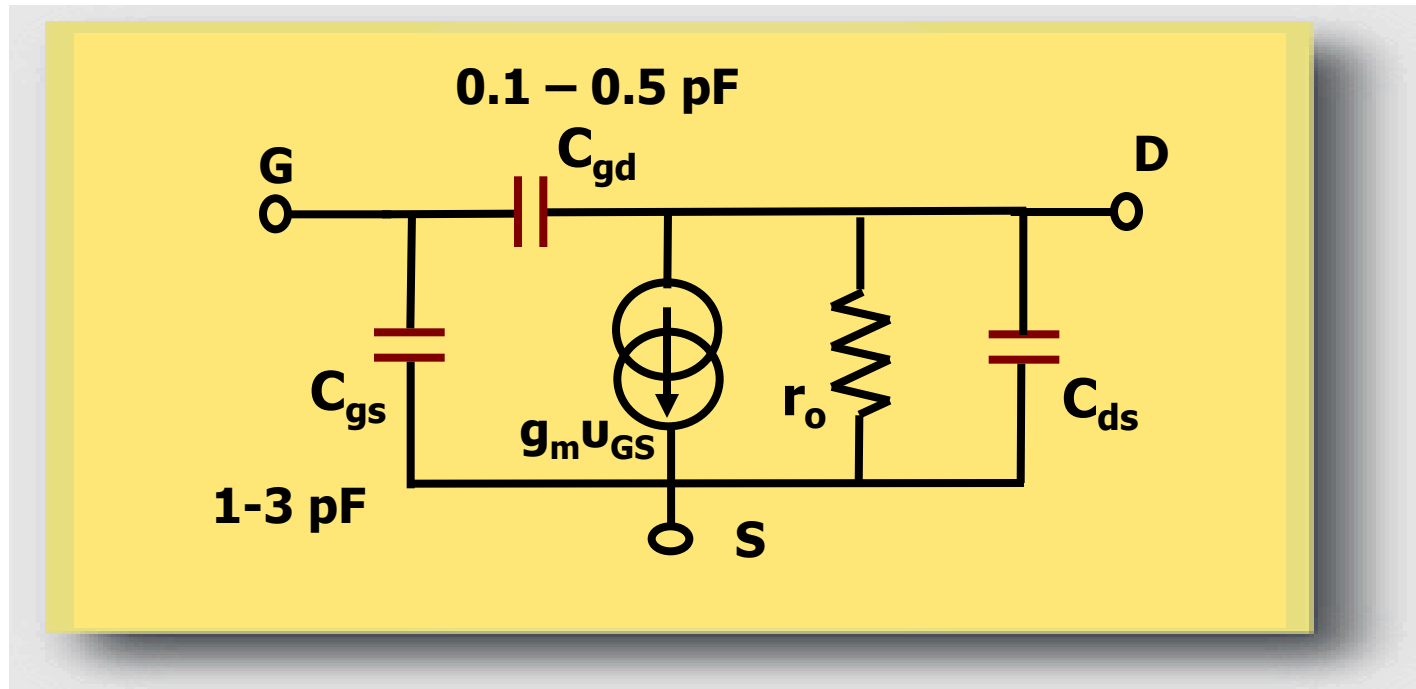
$$k'_n = \mu_n C_{ox}$$

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

Δίαυλος	Ωμική περιοχή	Περιοχή κορεσμού
p	$V_{DS} \geq V_{GS} - V_t$ $0 \geq V_{GS} - V_t$	$V_{DS} < V_{GS} - V_t$ $0 > V_{GS} - V_t$
n	$V_{DS} \leq V_{GS} - V_t$ $0 \leq V_{GS} - V_t$	$V_{DS} > V_{GS} - V_t$ $0 < V_{GS} - V_t$
	$I_D = k'_n (W/L) [(V_{GS} - V_t)V_{DS} - V_{DS}^2/2]$	$I_D = (\frac{1}{2})k'_n (W/L)(V_{GS} - V_t)^2$ $g_m = k'_n (W/L)(V_{GS} - V_t) = 2I_D/V_{ov}$



Υβριδικό – π ισοδύναμο του JFET (1/2)

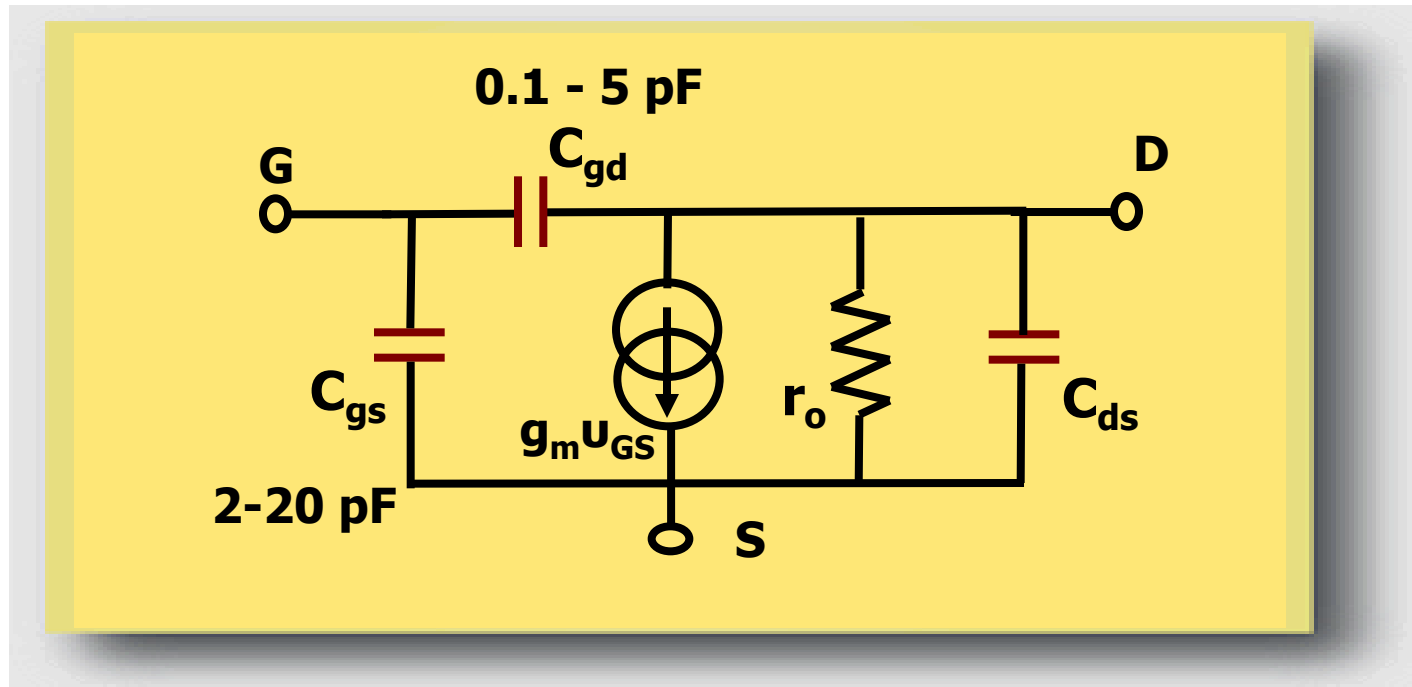


$$g_m = \left(\frac{2I_{DSS}}{|V_P|} \right) \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right) = \left(\frac{2I_{DSS}}{|V_P|} \right) \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}}$$

$$r_o = \frac{|V_A|}{I_D}$$



Υβριδικό – π ισοδύναμο του JFET (2/2)



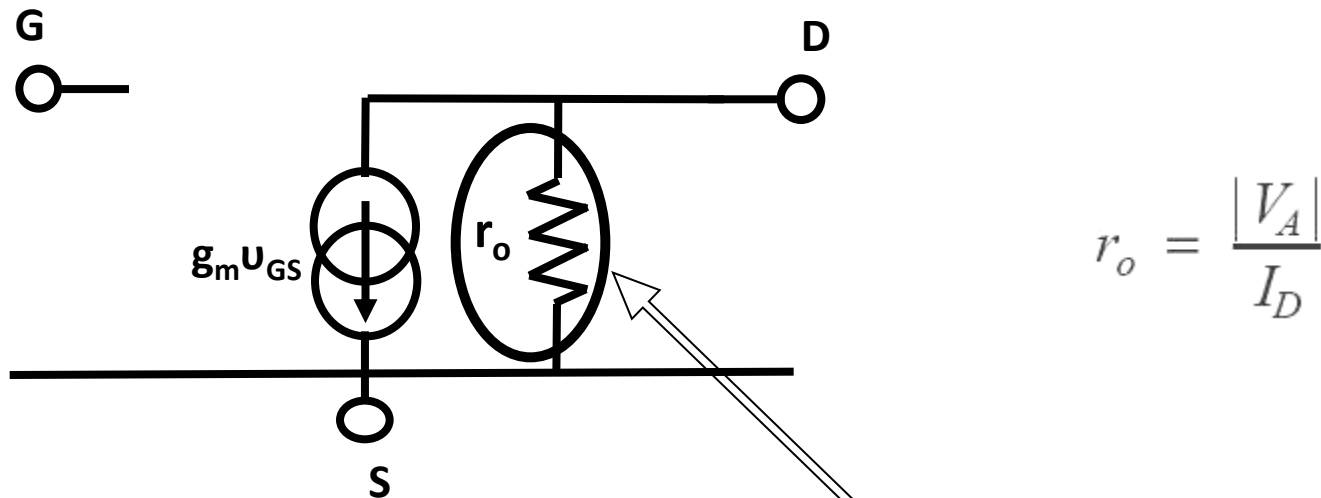
$$g_m = k'_n (W/L) (V_{GS} - V_i) = k'_n (W/L) V_{OV}$$

$$r_o = \frac{|V_A|}{I_D}$$

$$g_m = \sqrt{2k'_n} \sqrt{W/L} \sqrt{I_D}$$



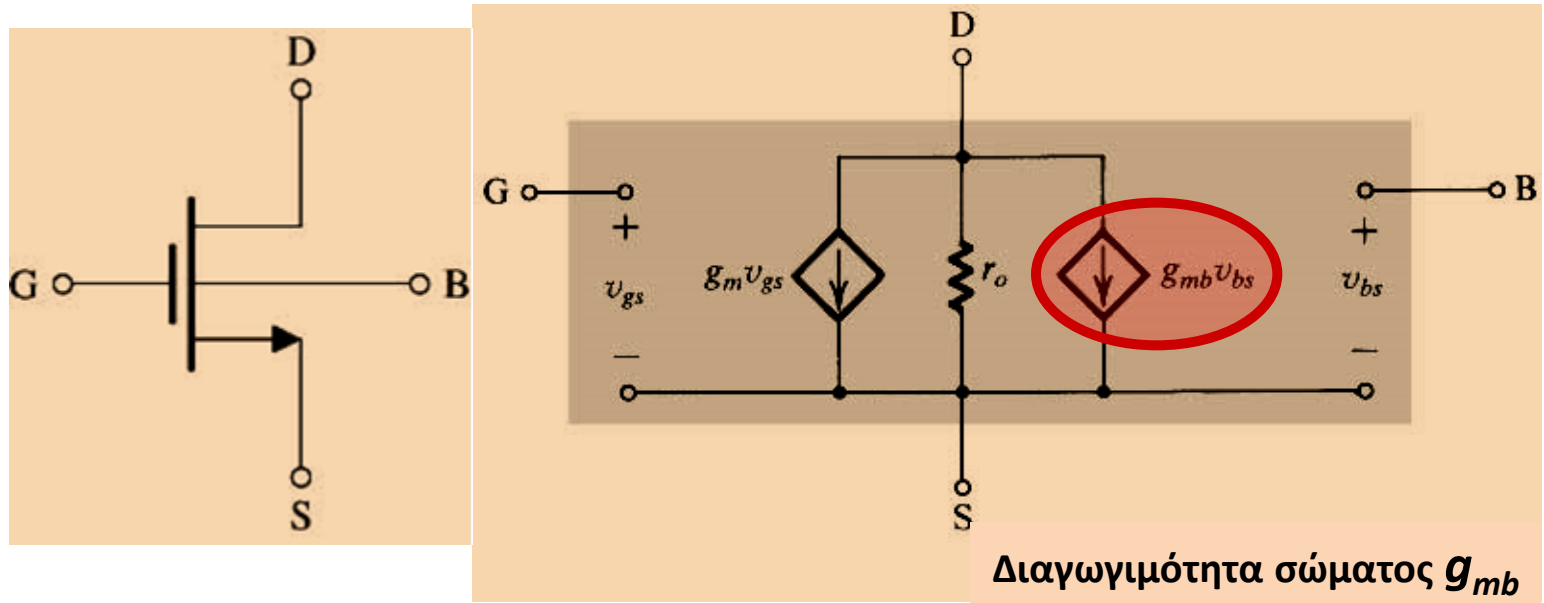
Υβριδικό – π ισοδύναμο των FET στις μέσες συχνότητες



Μόνο όταν λαμβάνεται υπόψη
το φαινόμενο διαμόρφωσης μήκους καναλιού.



Μοντελοποίηση του φαινομένου σώματος των MOSFET



$$g_{mb} \equiv \left. \frac{\partial i_D}{\partial v_{BS}} \right|_{\substack{v_{GS} = \text{constant} \\ v_{DS} = \text{constant}}}$$

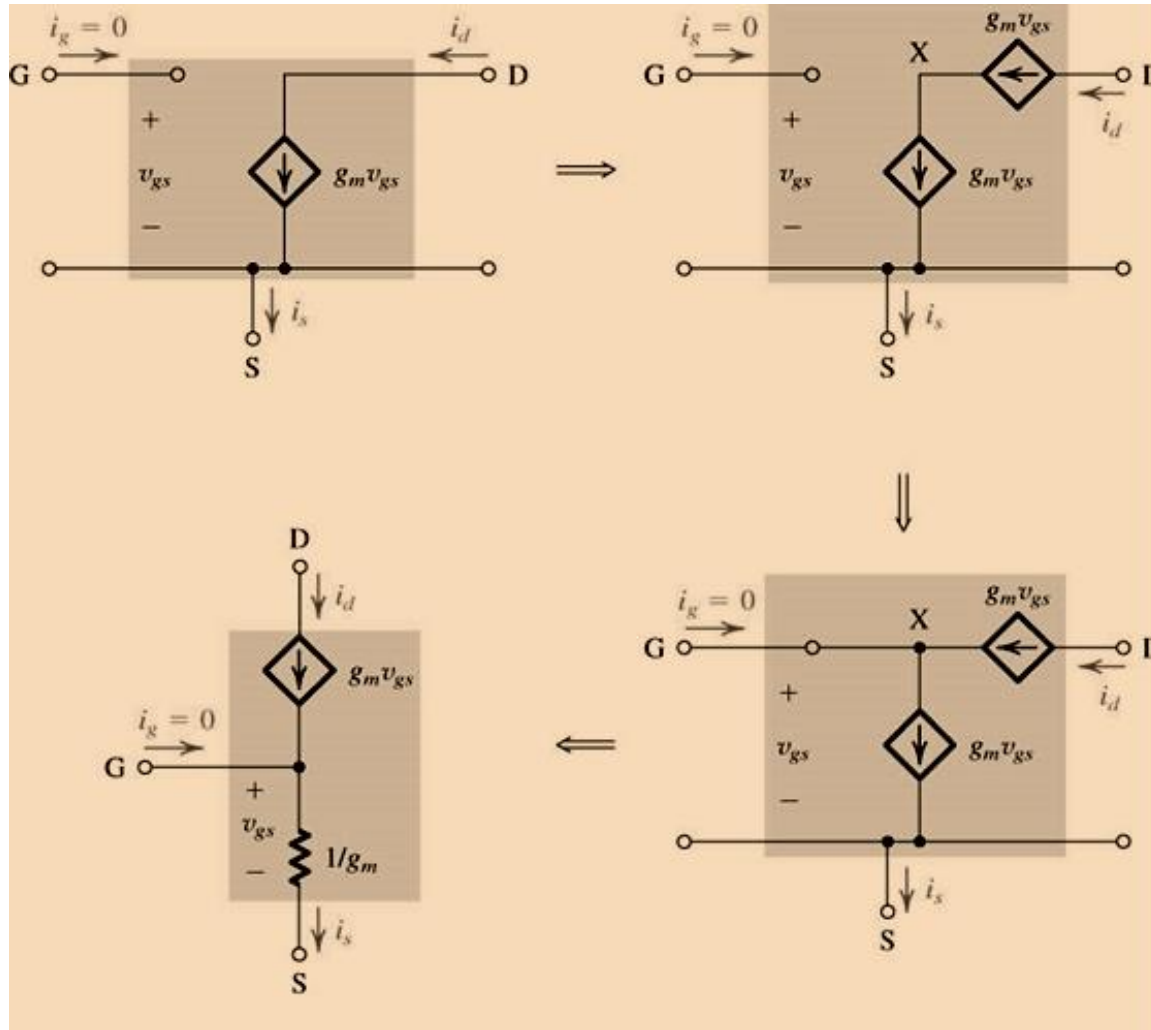
$$V_t = V_{t0} + \gamma [\sqrt{2\phi_f + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_f}]$$

$$g_{mb} = \chi g_m$$

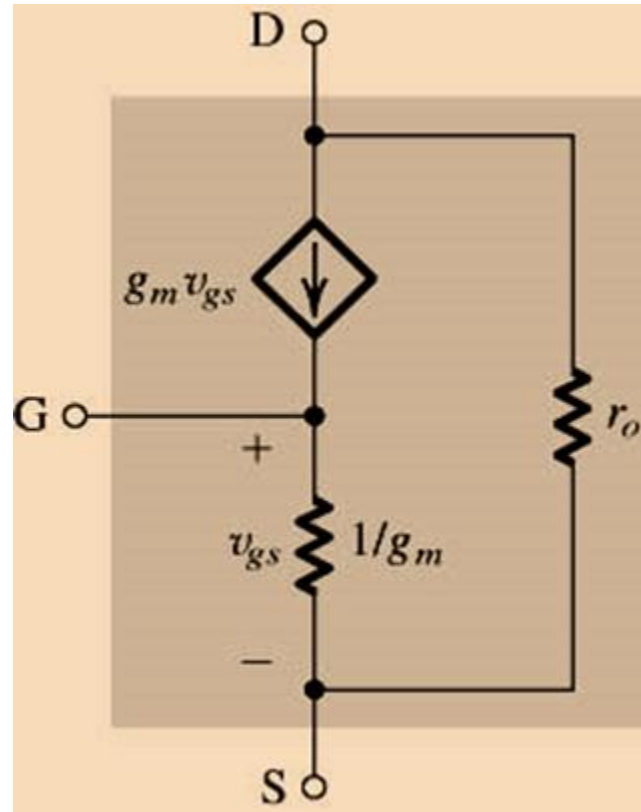
$$\chi \equiv \frac{\partial V_t}{\partial V_{SB}} = \frac{\gamma}{2\sqrt{2\phi_f + V_{SB}}}$$



Ισοδύναμο μοντέλο T



Ισοδύναμο μοντέλο T με αντίσταση r_o



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Χατζόπουλος Αλκιβιάδης. «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ Ι, Πόλωση των FET - Ισοδύναμα κυκλώματα». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015 Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: http://opencourses.auth.gr/eclass_courses.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 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».



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

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

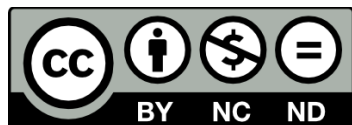
[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα
Θεσσαλονίκη, χειμερινό εξάμηνο 2014-2015





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Σημειώματα

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.

