

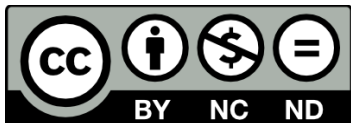


ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ Ι

Ενότητα 9: Ενισχυτές με ενεργό φορτίο

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



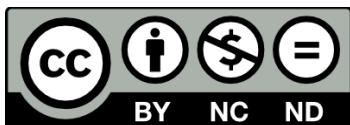


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΑΝΟΙΚΤΑ
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΑ
ΜΑΘΗΜΑΤΑ



ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΜΕ ΕΝΕΡΓΟ ΦΟΡΤΙΟ



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης

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 – σύγκριση τρανζίστορ (διαφ. 7- 9)
2. Καθρέπτες ρεύματος με MOS (διαφ. 10- 13)
3. Ενισχυτής κοινής πηγής, κοινής πύλης, κοινής εκροής με ενεργό φορτίο (διαφ. 14- 19)
4. Καθρέπτες ρεύματος με BJT (διαφ. 20- 21)
5. Ενισχυτής κοινού εκπομπού, κοινής βάσης, κοινού συλλέκτη με ενεργό φορτίο (διαφ. 22- 28)

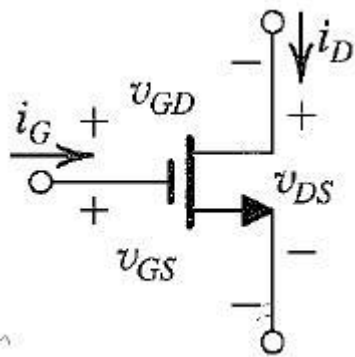


Εισαγωγή

- Σχεδίαση με **διακριτά εξαρτήματα** \Rightarrow **πλήθος** παθητικών στοιχείων (αντιστάσεων, πυκνωτών και πηνίων) και με **μεγάλες τιμές**.
- Σχεδίαση σε **ολοκληρωμένα κυκλώματα** \Rightarrow **ελάχιστα** παθητικά στοιχεία και με **μικρές τιμές**.
- Τεχνολογίες κατασκευής κυκλωμάτων σε ολοκληρωμένη μορφή: BJT, MOS, CMOS, BiCMOS, SiGe, TFT, SOI, GaAs (MESFET)
- Τεχνολογία CMOS = Complementary Συμπληρωματικού
Metal Μετάλλου
Oxide Οξειδίου
Semiconductor Ημιαγωγού
- *Αποτελείται από στοιχεία n-MOS και p-MOS.*



Σύγκριση τρανζίστορ n-MOS και npn (1/2)



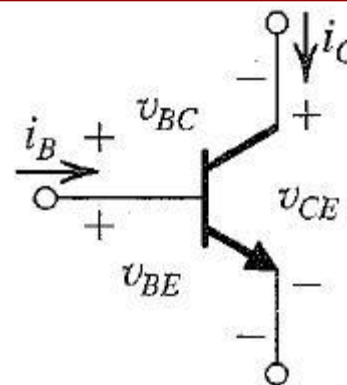
$$i_D = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 \left(1 + \frac{v_{DS}}{V_A} \right)$$

$$= \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} v_{OV}^2 \left(1 + \frac{v_{DS}}{V_A} \right)$$

$$g_m = (\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L} \right) V_{OV}$$

$$r_o = |V_A| / I_D = V_A' L / I_D$$

$$r_{in} = \infty \quad (\text{στο συνεχές})$$



$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right)$$

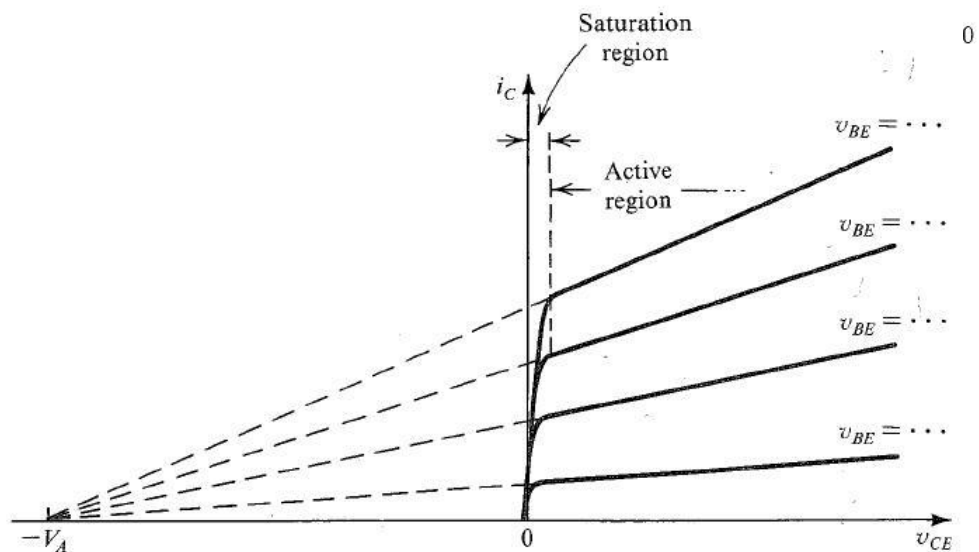
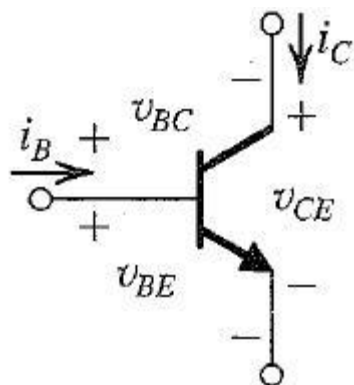
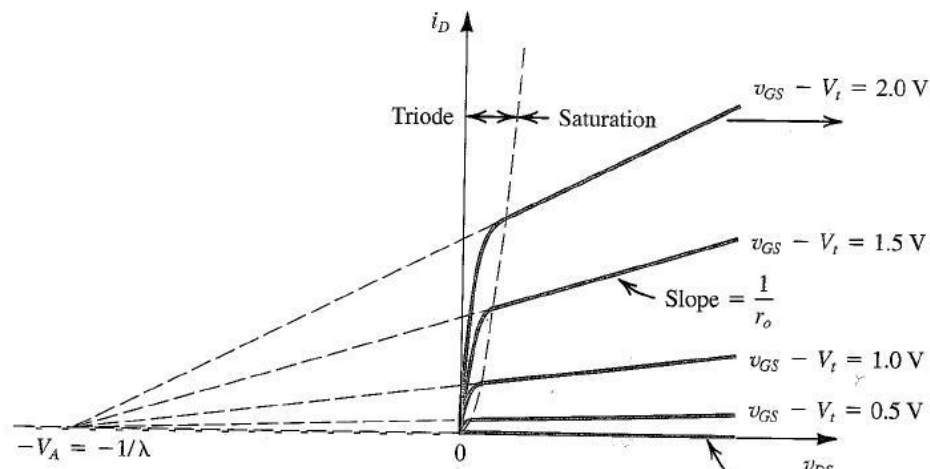
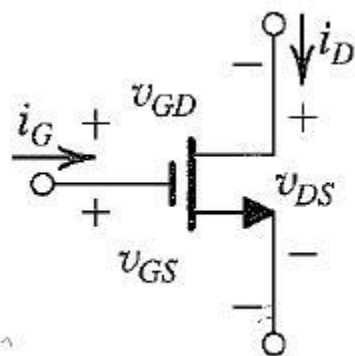
$$g_m = I_C / V_T$$

$$r_o = |V_A| / I_C$$

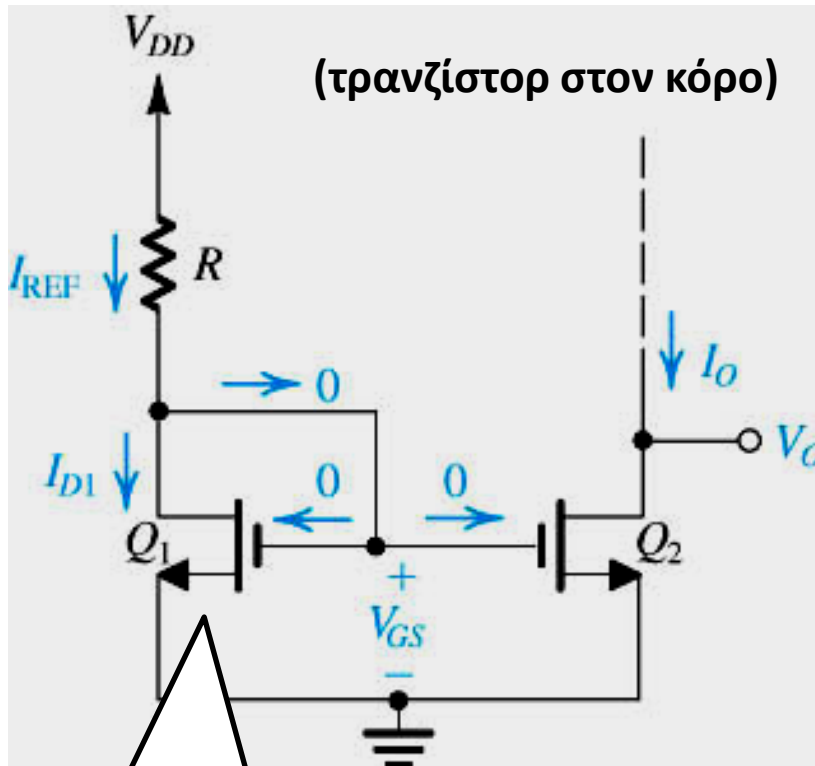
$$r_{in} = r_{bb'} + r_{b'e} \quad (\text{στο συνεχές})$$



Σύγκριση τρανζίστορ n-MOS και npn (2/2)



Καθρέπτης ρεύματος με Τρανζίστορ n-MOS



Για το $Q1$ είναι:

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

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

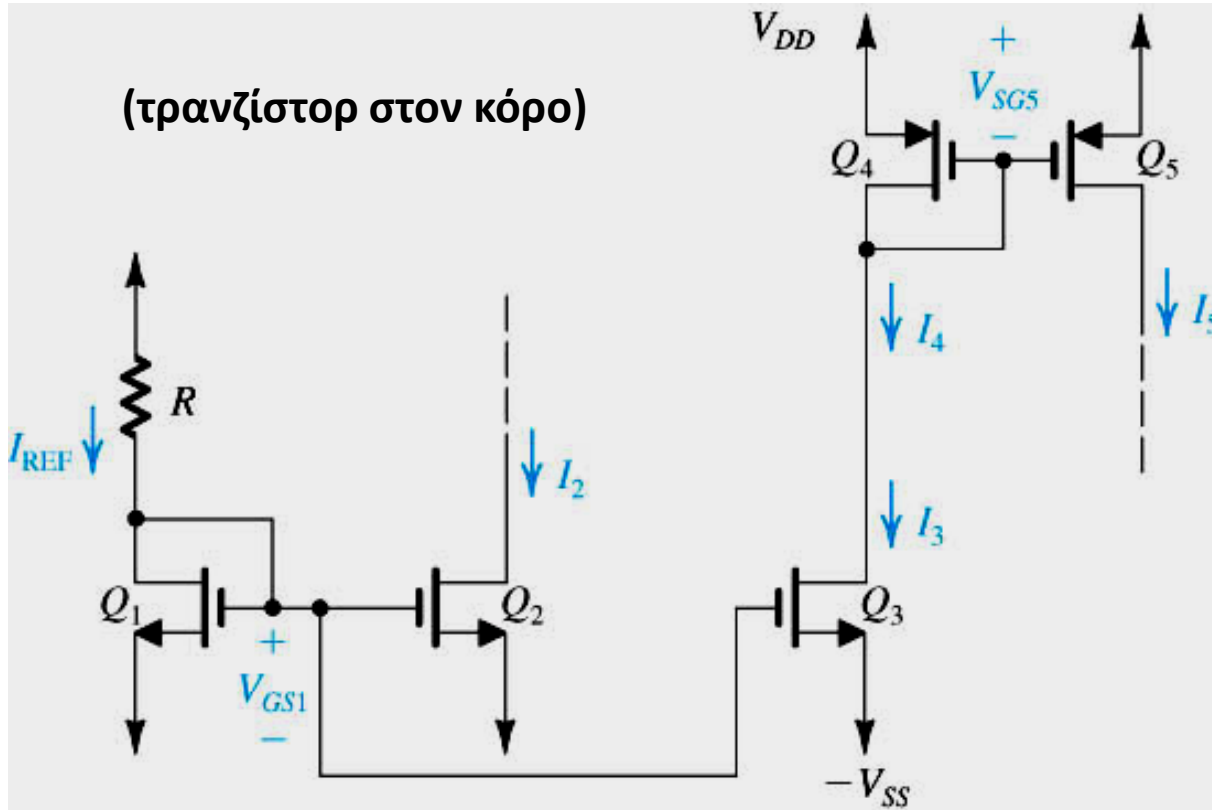
$$I_O = I_{D2} = \frac{1}{2} k'_n \left(\frac{W}{L} \right)_2 (V_{GS} - V_{tn})^2$$

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

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

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

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



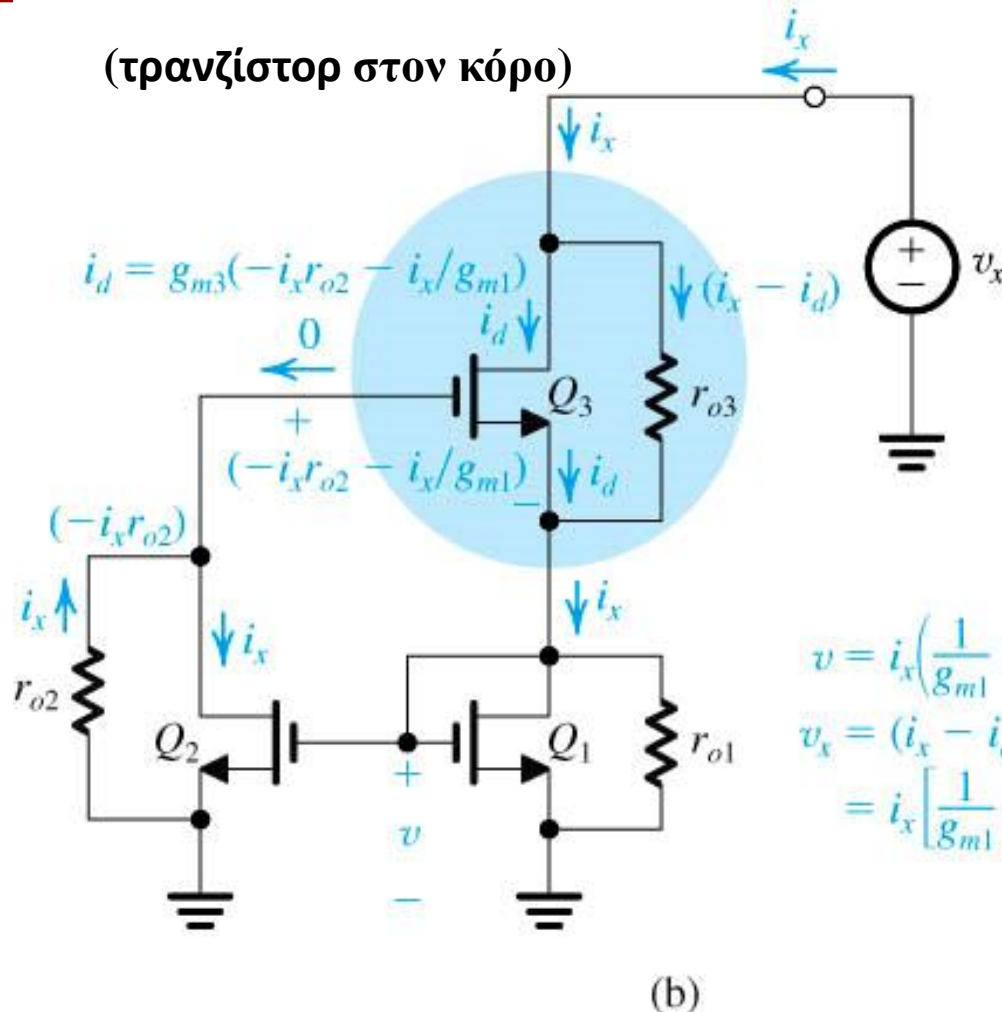
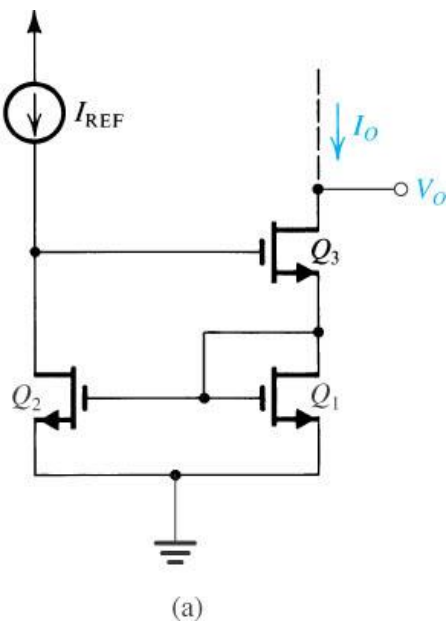
$$I_2 = I_{REF} \frac{(W/L)_2}{(W/L)_1}$$

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

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



Καθρέπτης ρεύματος Wilson



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

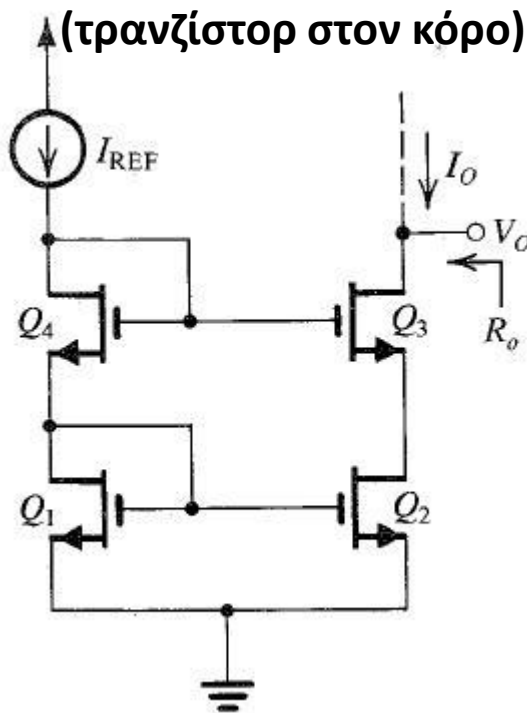
$$\cong g_{m3}r_{o3}r_{o2}$$

$$v = i_x \left(\frac{1}{g_{m1}} + r_{o1} \right) \cong i_x / g_{m1}$$

$$v_x = (i_x - i_d)r_{o3} + v$$

$$= i_x \left[\frac{1}{g_{m1}} + r_{o3} \left(1 + \frac{g_{m3}}{g_{m1}} + g_{m3}r_{o2} \right) \right]$$

Κασκοδικός καθρέπτης ρεύματος



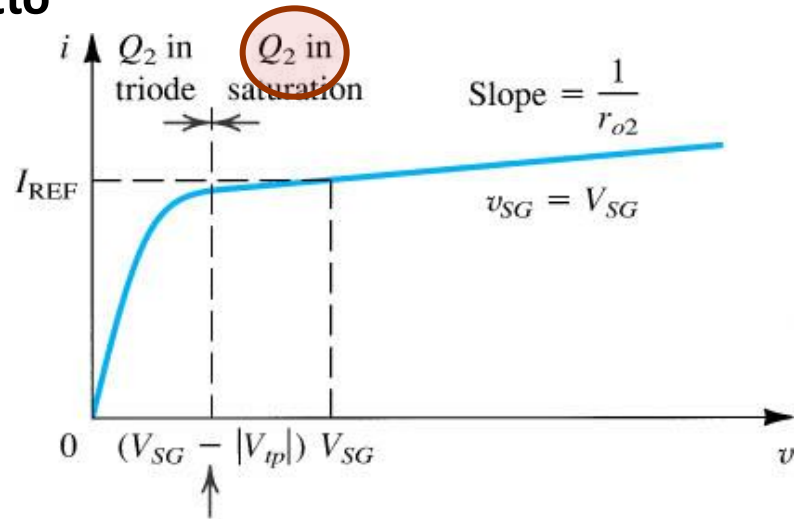
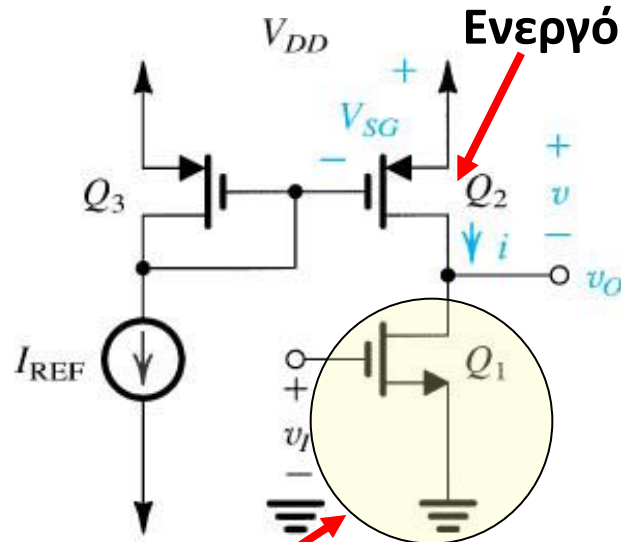
➤ Αντίσταση εξόδου αυξημένη κατά 10 έως 100 φορές σε σύγκριση με τον απλό καθρέπτη ρεύματος.

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

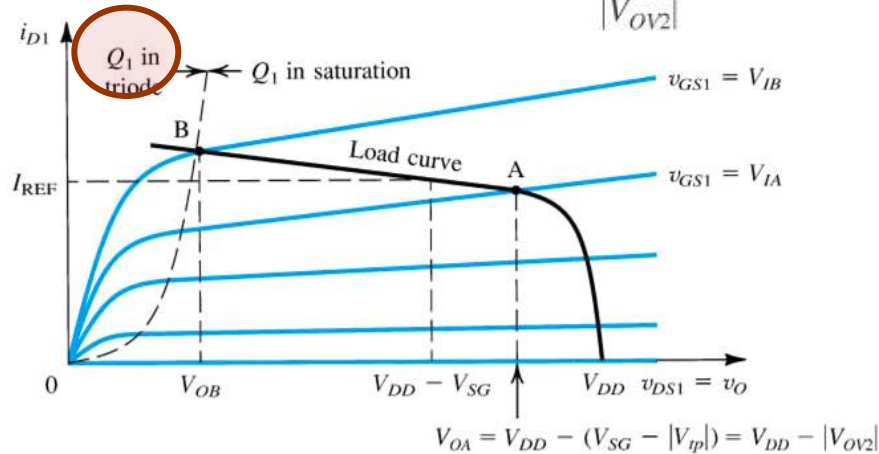
$$R_o = r_{o3} + [1 + (g_{m3} + g_{mb3})r_{o3}]r_{o2}$$
$$\cong g_{m3}r_{o3}r_{o2}$$



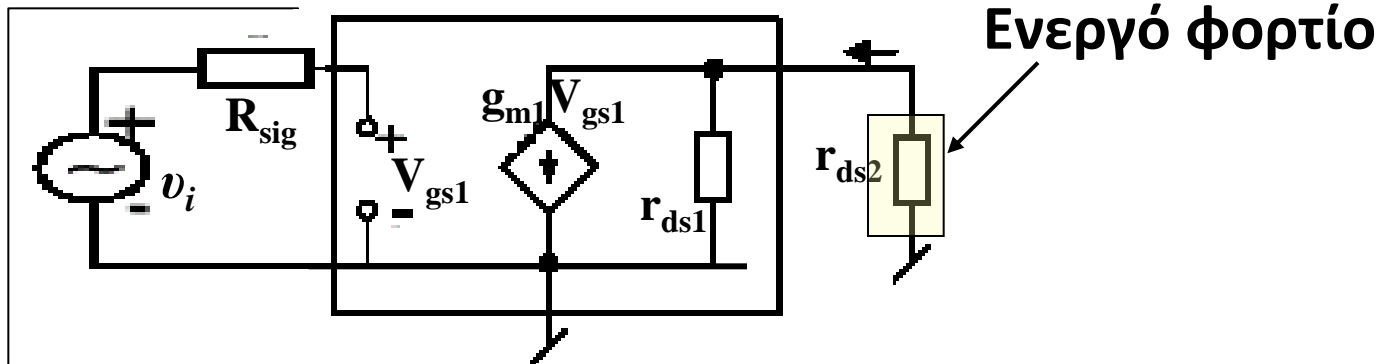
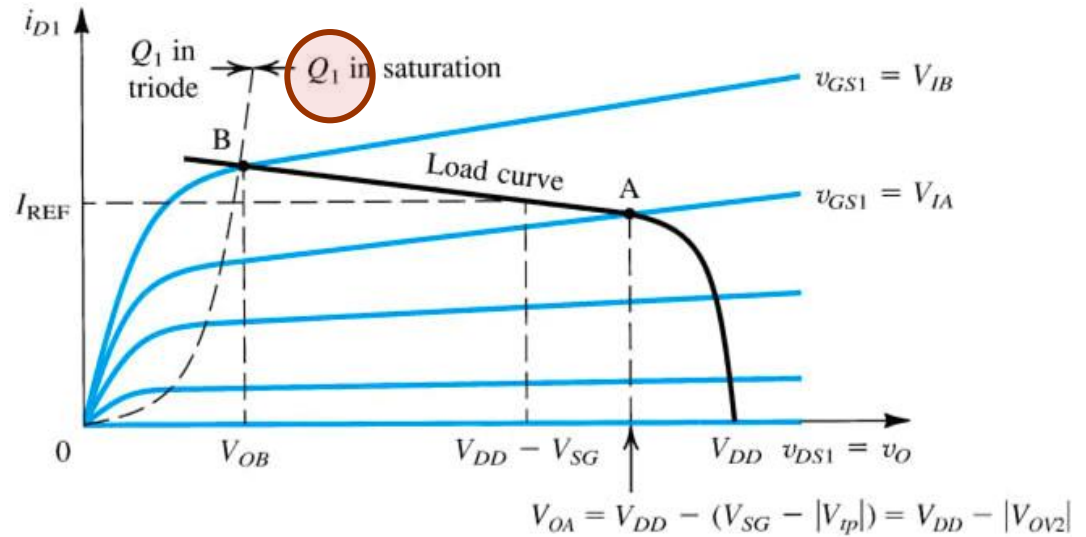
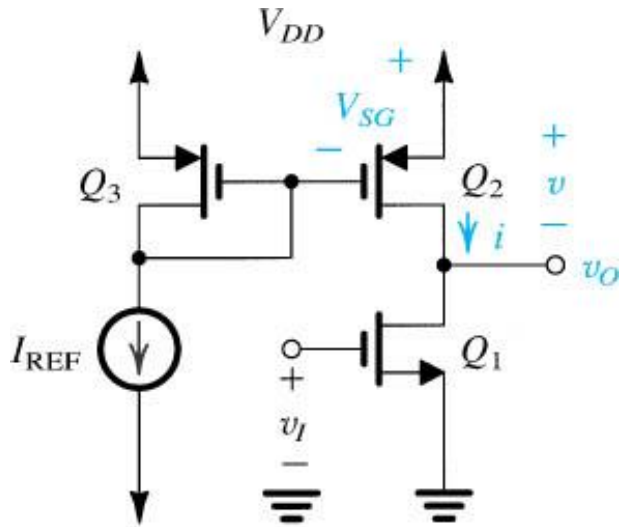
Ενισχυτής κοινής πηγής (source) με ενεργό φορτίο (1/3)



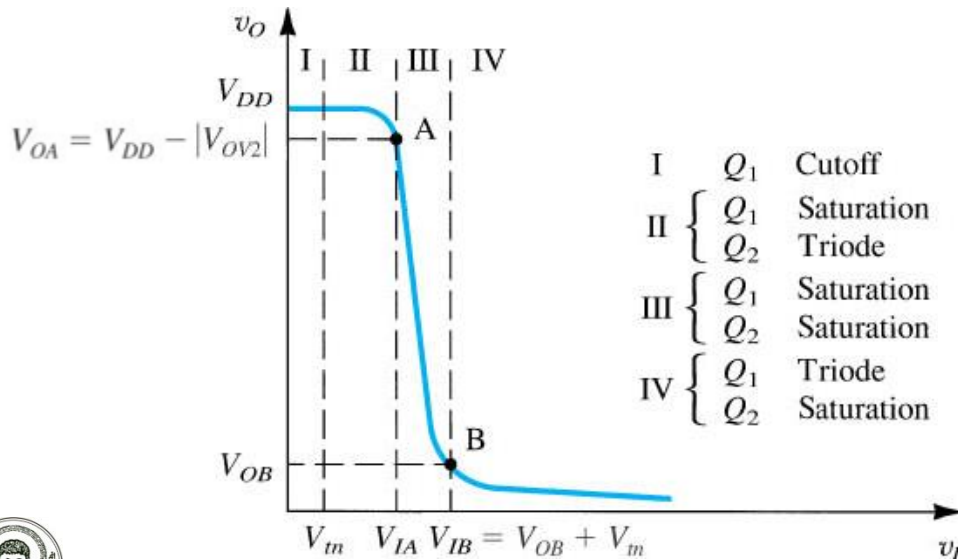
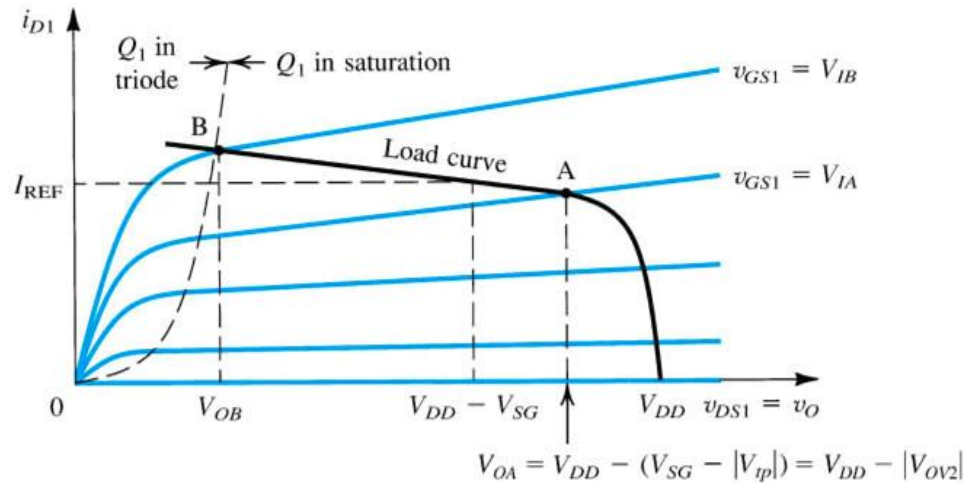
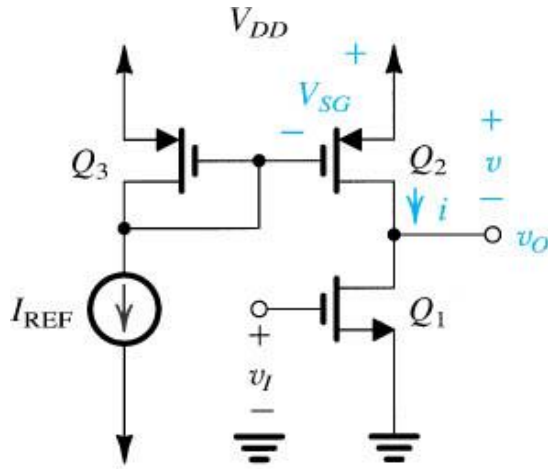
Βαθμίδα ενισχυτή κοινής πηγής



Ενισχυτής κοινής πηγής (source) με ενεργό φορτίο (2/3)



Ενισχυτής κοινής πηγής (source) με ενεργό φορτίο (3/3)

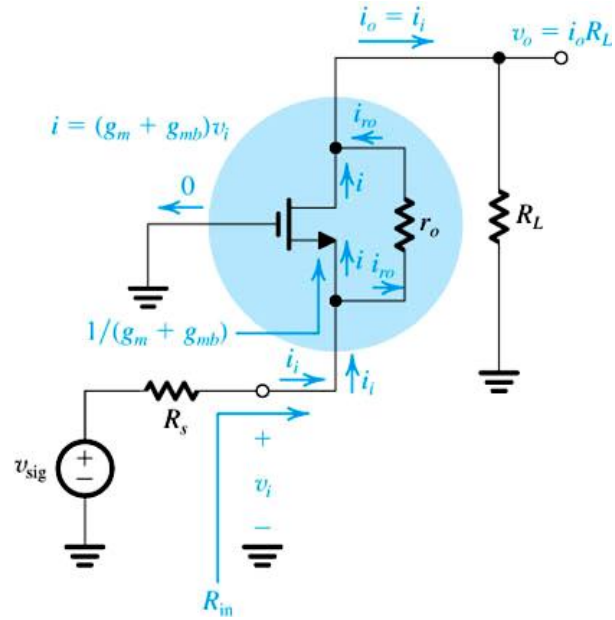
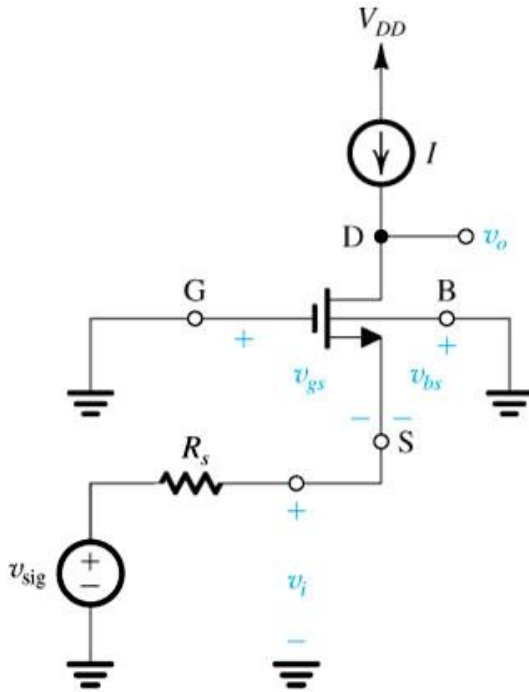


$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i} = A_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_o}$$

$$A_v = -(g_{m1} r_{o1}) \frac{r_{o2}}{r_{o2} + r_{o1}} = -g_{m1} (r_{o1} \parallel r_{o2})$$



Ενισχυτής κοινής πύλης (gate) με ενεργό φορτίο (1/2)



$$i_i = (g_m + g_{mb})v_i + i_{ro}$$

$$i_{ro} = \frac{v_i - v_o}{r_o} = \frac{v_i - i_i R_L}{r_o}$$

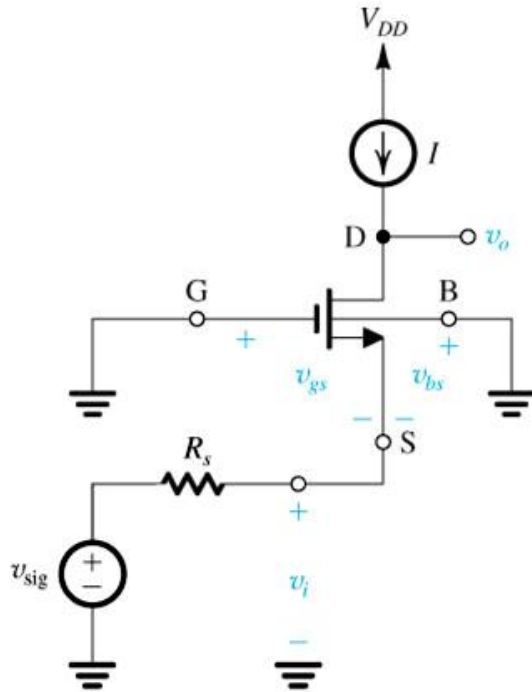
$$R_{in} \equiv \frac{v_i}{i_i} = \frac{r_o + R_L}{1 + (g_m + g_{mb})r_o}$$

Για $R_L = \infty \Rightarrow R_i = \infty$

και $A_{vo} = 1 + (g_m + g_{mb})r_o$
 οπότε $R_{in} = \frac{r_o + R_L}{A_{vo}}$

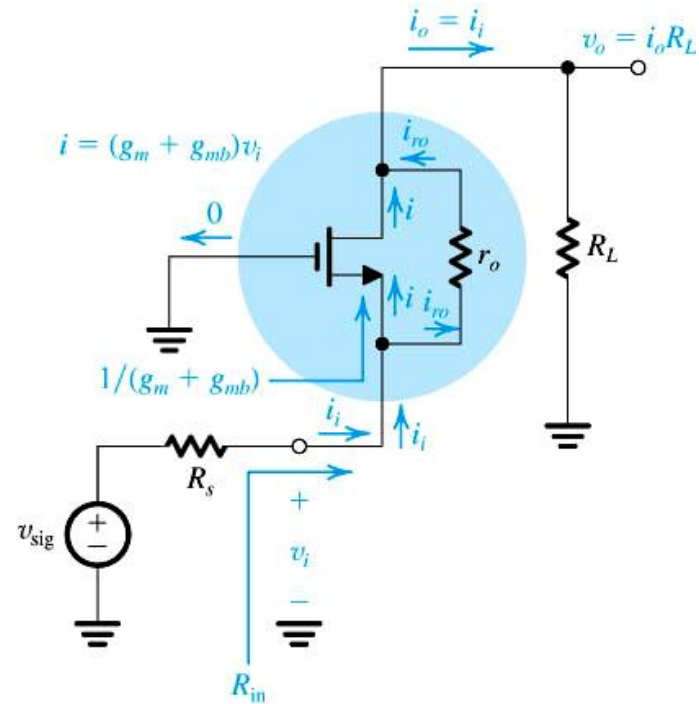


Ενισχυτής κοινής πύλης (gate) με ενεργό φορτίο (2/2)



$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_L}{R_{in}} = A_{vo} \frac{R_L}{R_L + r_o}$$

$$G_v = \frac{R_L}{R_s + R_{in}} = A_{vo} \frac{R_L}{R_L + r_o + A_{vo} R_s}$$



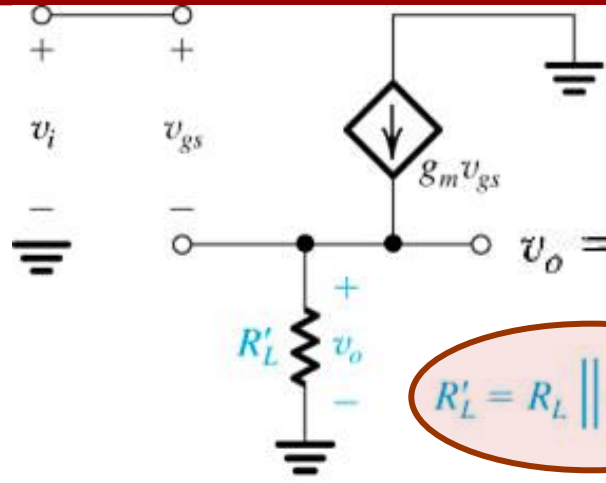
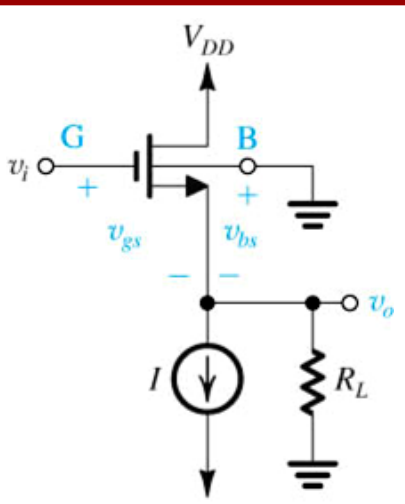
$$R_o = r_o$$

$$R_{out} = r_o + [1 + (g_m + g_{mb})r_o]R_s$$

$$= r_o + A_{vo}R_s$$



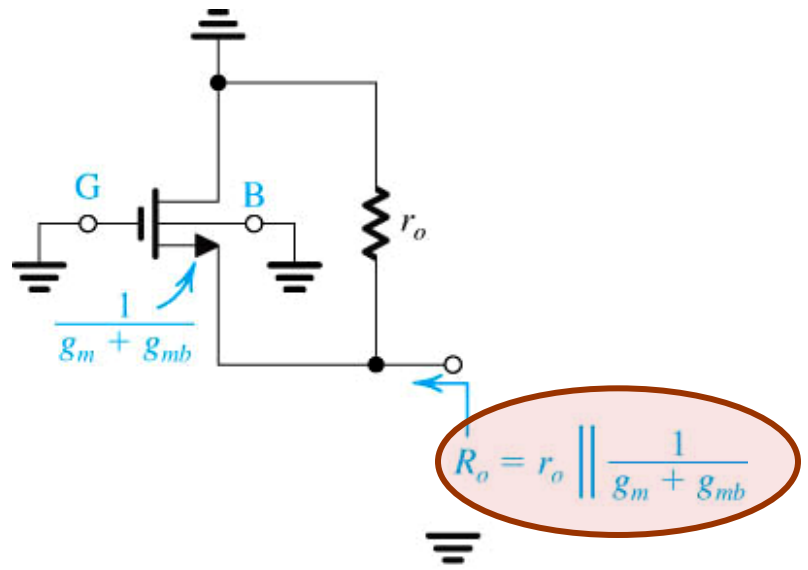
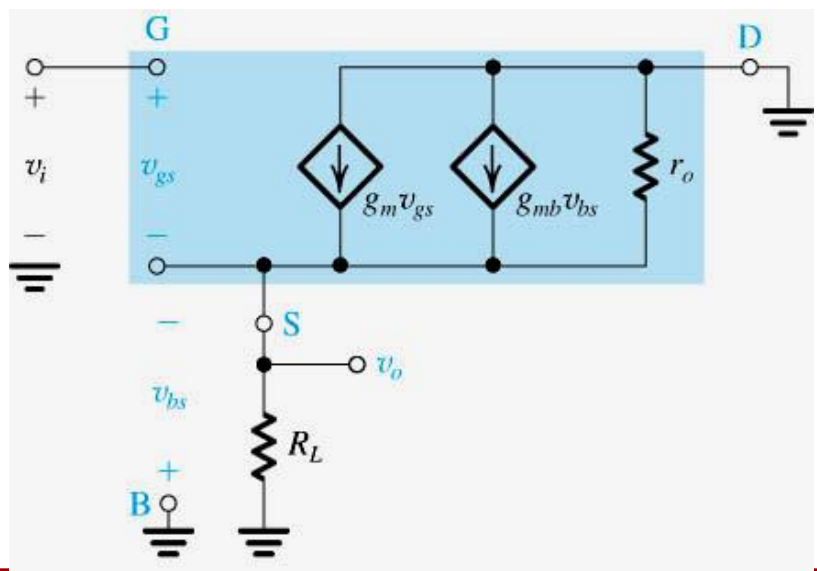
Ενισχυτής κοινής εκροής (drain) με ενεργό φορτίο



$$A_v \equiv \frac{v_o}{v_i} = \frac{g_m R'_L}{1 + g_m R'_L}$$

$$A_{vo} = \frac{g_m r_o}{1 + (g_m + g_{mb}) r_o}$$

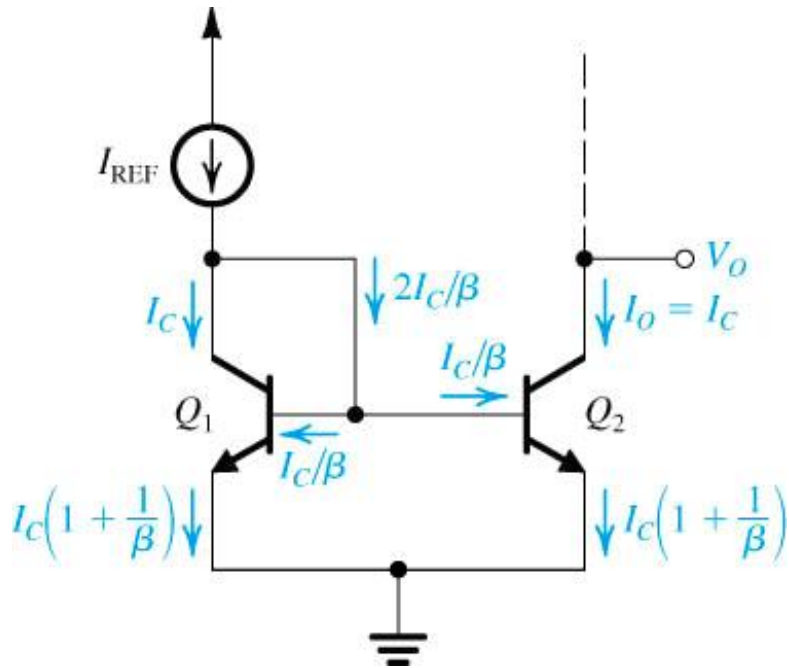
$$R'_L = R_L \parallel r_o \parallel \frac{1}{g_{mb}}$$



$$R_o = r_o \parallel \frac{1}{g_m + g_{mb}}$$



Καθρέπτης ρεύματος με τρανζίστορ ηρη



$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{I_C}{I_C \left(1 + \frac{2}{\beta}\right)} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta}}$$

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

$$I_{S2} = I_{S1}$$

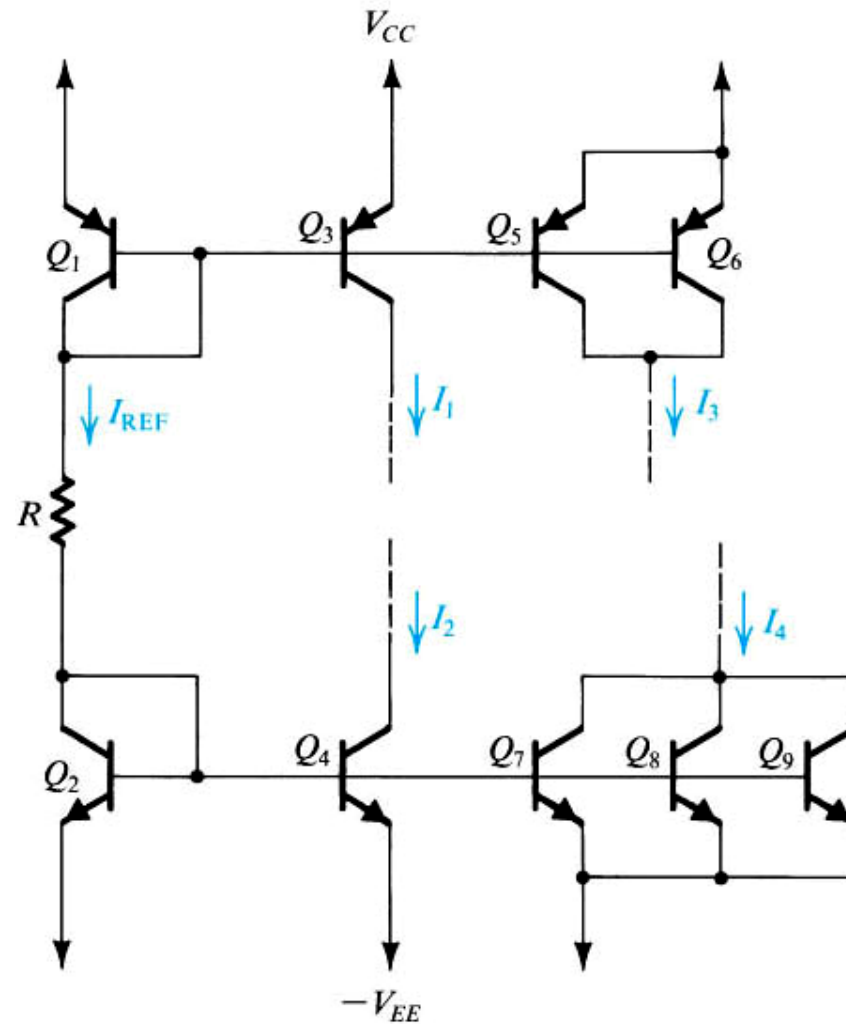
$$I_{S2} = m I_{S1}$$

$$\frac{I_O}{I_{REF}} = \frac{m}{1 + \frac{m+1}{\beta}}$$

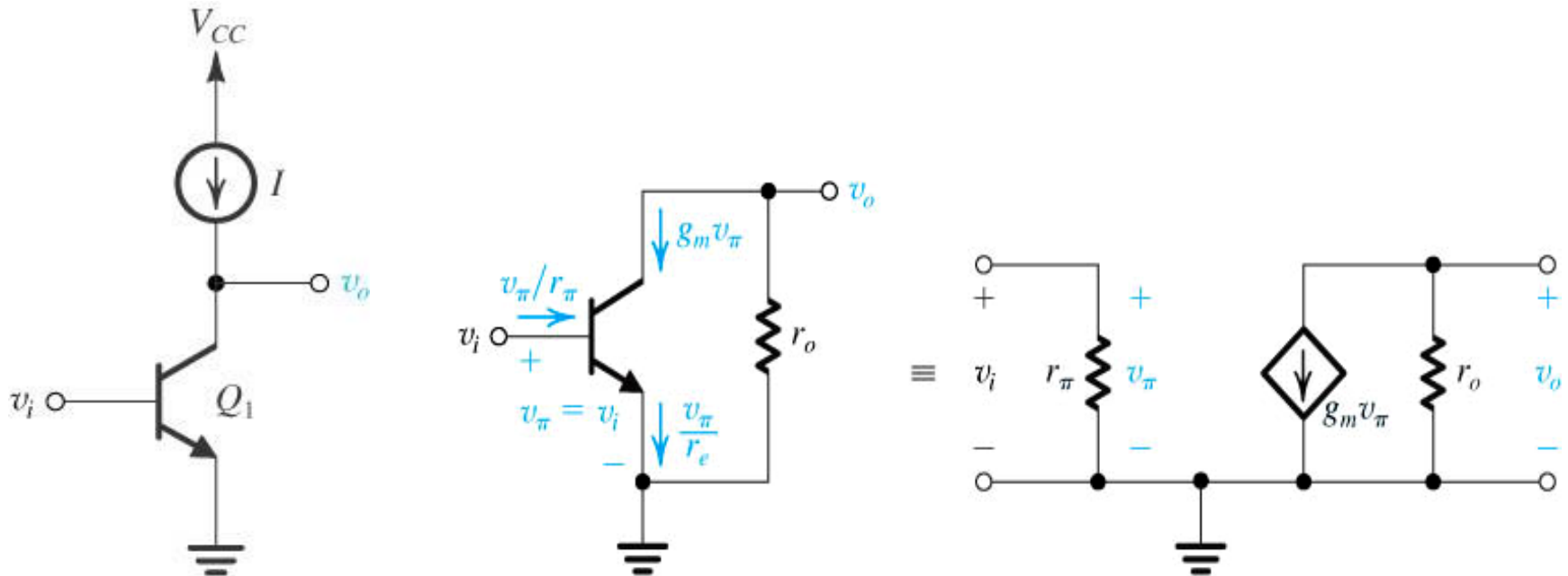
$$I_O = I_{REF} \left(\frac{m}{1 + \frac{m+1}{\beta}} \right) \left(1 + \frac{V_O - V_{BE}}{V_{A2}} \right)$$



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



Ενισχυτής κοινού εκπομπού με ενεργό φορτίο



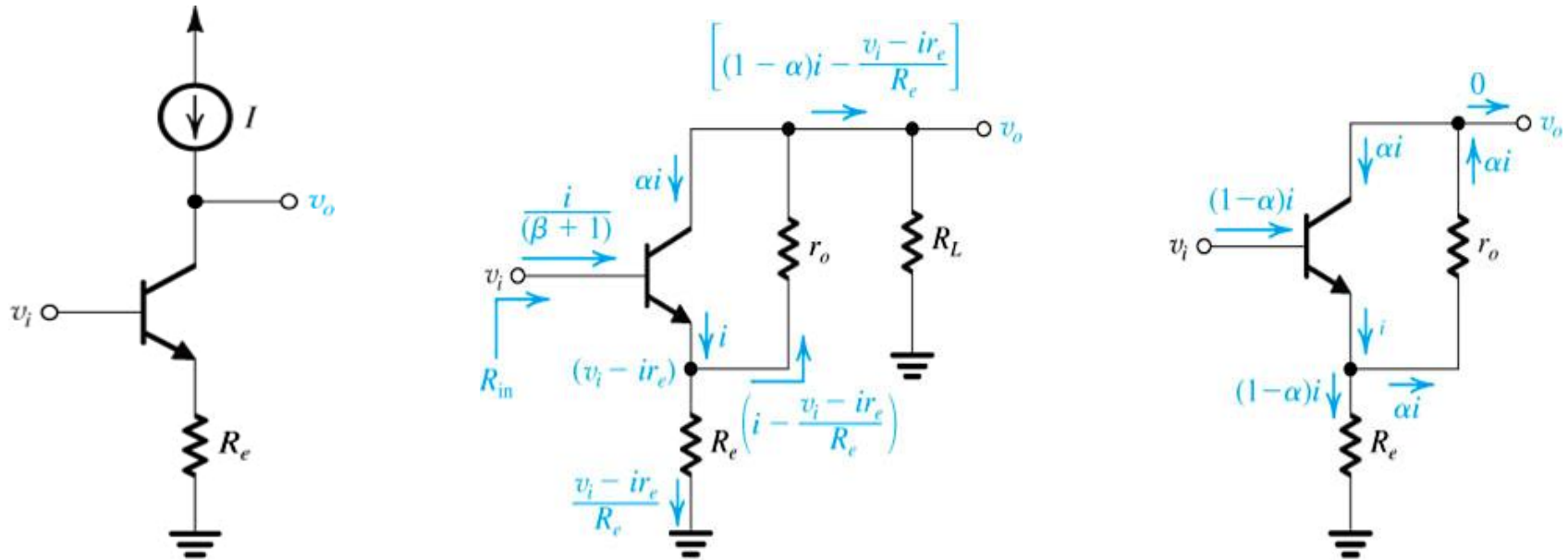
$$R_i = r_\pi$$

$$A_{vo} = -g_m r_o$$

$$R_o = r_o$$



Ενισχυτής κοινού εκπομπού με ενεργό φορτίο και αντίσταση εκπομπού R_e (1/2)



$$R_{in} = \frac{v_i}{i/(\beta + 1)}$$

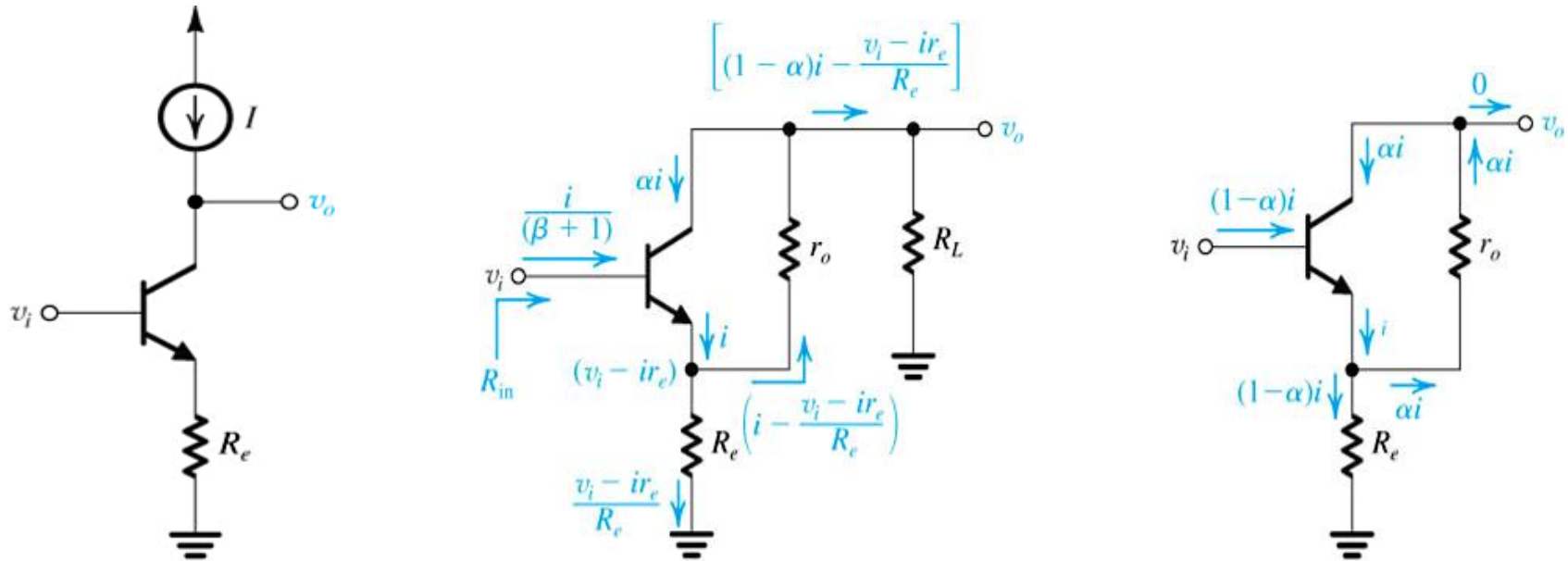
$$= (\beta + 1)r_e + (\beta + 1)R_e \frac{r_o + \frac{R_L}{\beta + 1}}{r_o + R_L + R_e}$$

$$R_L/(\beta + 1) \ll r_o \quad R_e \ll r_o$$

$$R_{in} \cong (\beta + 1)r_e + (\beta + 1)R_e \frac{1}{1 + R_L/r_o}$$



Ενισχυτής κοινού εκπομπού με ενεργό φορτίο και αντίσταση εκπομπού R_e (2/2)



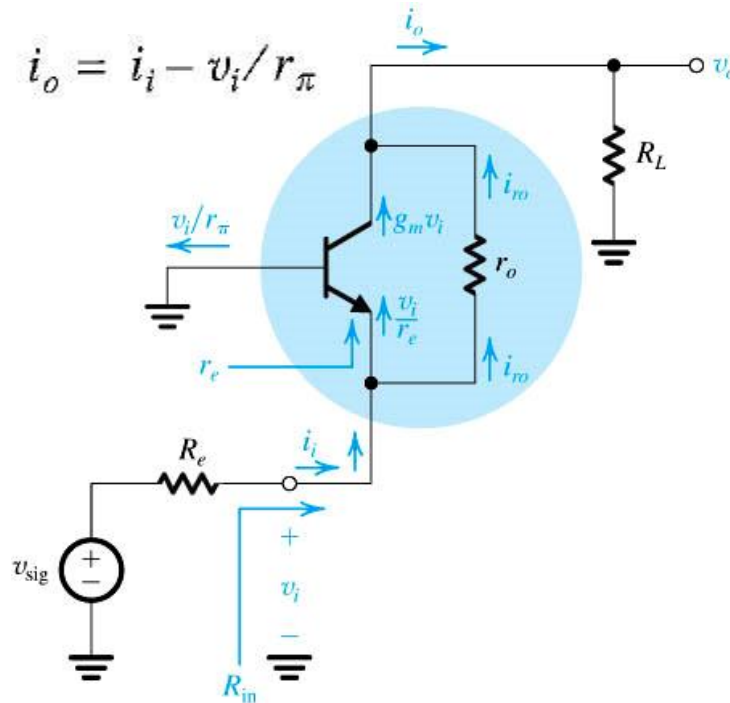
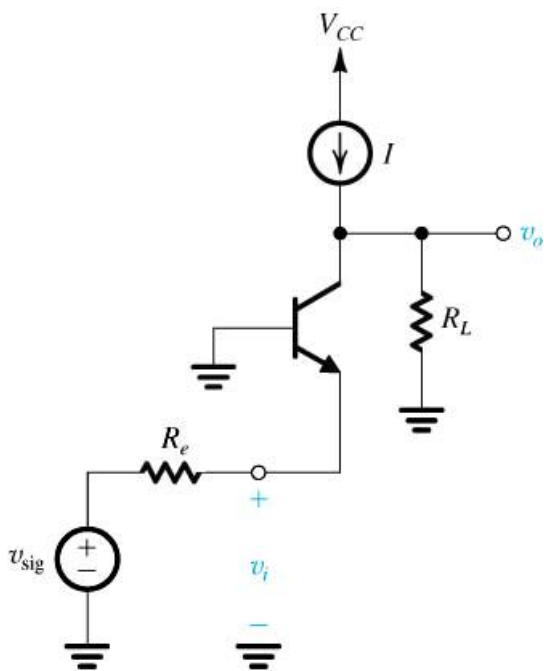
$$A_{vo} \cong -g_m r_o$$

$$R_o \cong r_o (1 + g_m R_e') \cong r_o (1 + g_m R_e)$$

$$G_m = -\frac{A_{vo}}{R_o} = \frac{g_m}{1 + g_m R_e}$$



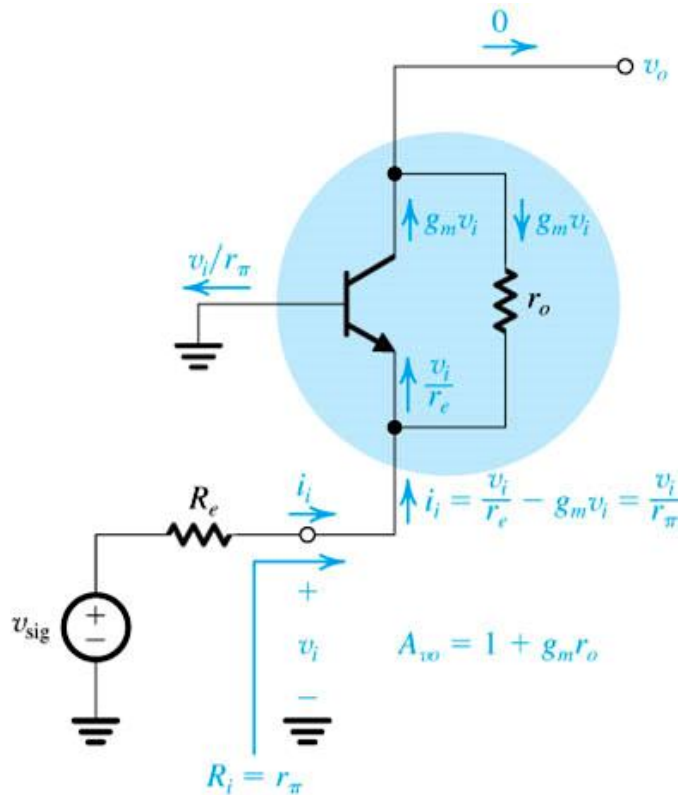
Ενισχυτής κοινής βάσης με ενεργό φορτίο (1/3)



$$R_{in} = \frac{r_o + R_L}{1 + \frac{r_o}{r_e} + \frac{R_L}{(\beta + 1)r_e}} \cong r_e \frac{r_o + R_L}{r_o + R_L / (\beta + 1)}$$

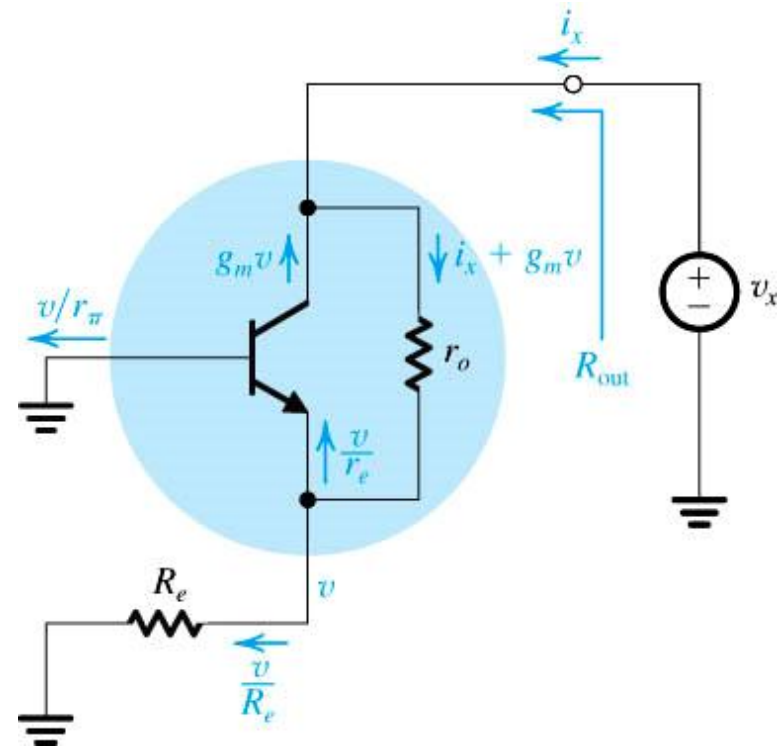


Ενισχυτής κοινής βάσης με ενεργό φορτίο (2/3)



$$A_{vo} = 1 + g_m r_o = 1 + A_0$$

$$R_i = r_\pi \quad R_o = r_o$$

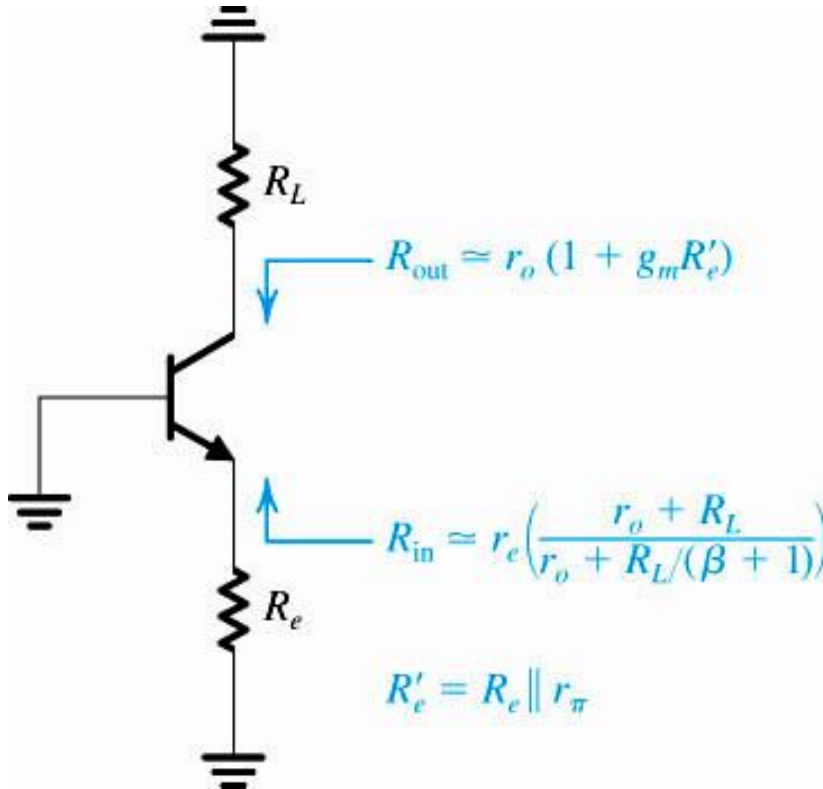


$$R_{out} = r_o + (1 + g_m r_o) R'_e = r_o + A_{vo} R'_e$$

$$R_{out} = R'_e + (1 + g_m R'_e) r_o \cong (1 + g_m R'_e) r_o$$

$$R_e \ll r_\pi \quad R_{out} \cong (1 + g_m R_e) r_o$$

Ενισχυτής κοινής βάσης με ενεργό φορτίο (3/3)

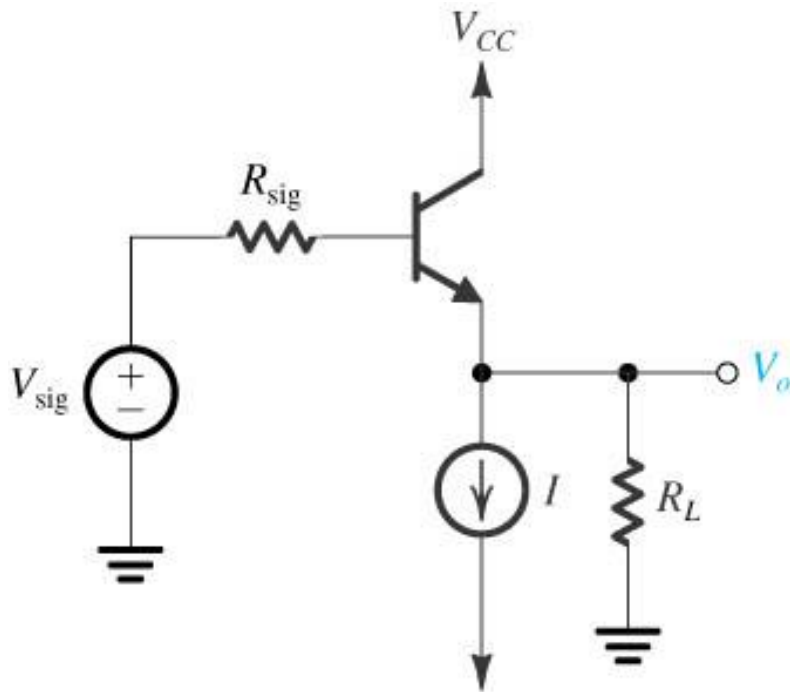


$$G_v = G_{vo} \frac{R_L}{R_L + R_{out}}$$

$$G_{vo} = \frac{R_i}{R_i + R_e} A_{vo} = \frac{r_\pi}{r_\pi + R_e} A_{vo}$$



Ενισχυτής κοινού συλλέκτη με ενεργό φορτίο



$$R_{in} = (\beta + 1)[r_e + (r_o \parallel R_L)]$$

$$A_v = \frac{(r_o \parallel R_L)}{(r_o \parallel R_L) + r_e}$$

$$R_{out} = r_o \parallel \left[r_e + \frac{R_{sig}}{\beta + 1} \right]$$

$$G_v = \frac{(r_o \parallel R_L)}{\frac{R_{sig}}{\beta + 1} + r_e + (r_o \parallel R_L)}$$

$$A_{is} \equiv \beta + 1$$



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Χατζόπουλος Αλκιβιάδης. «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ Ι, Ενισχυτές με ενεργό φορτίο». 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

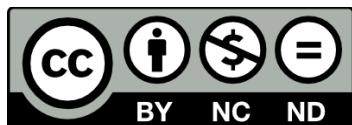
[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα
Θεσσαλονίκη, Εαρινό εξάμηνο 2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ