

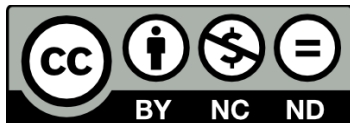


# ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ II

## Ενότητα 5: Πολυβάθμιοι ενισχυτές

Χατζόπουλος Αλκιβιάδης

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχ. Υπολογιστών



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# 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.



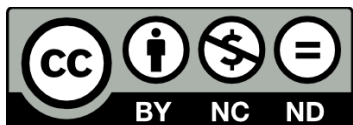
# Σχεδιασμός ενοτήτων:

- 1. Διαφορικός ενισχυτής (MOS)
- 2. Διαφορικός ενισχυτής (BJT)
- 3. Ενισχυτές στις χαμηλές συχνότητες
- 4. Ενισχυτές στις υψηλές συχνότητες
- **5. Πολυβάθμιοι ενισχυτές**
- 6. Ανάδραση
- 7. Τελεστικός ενισχυτής
- 8. Ταλαντωτές – Γεννήτριες σήματος





# ΠΟΛΥΒΑΘΜΙΟΙ ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ



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



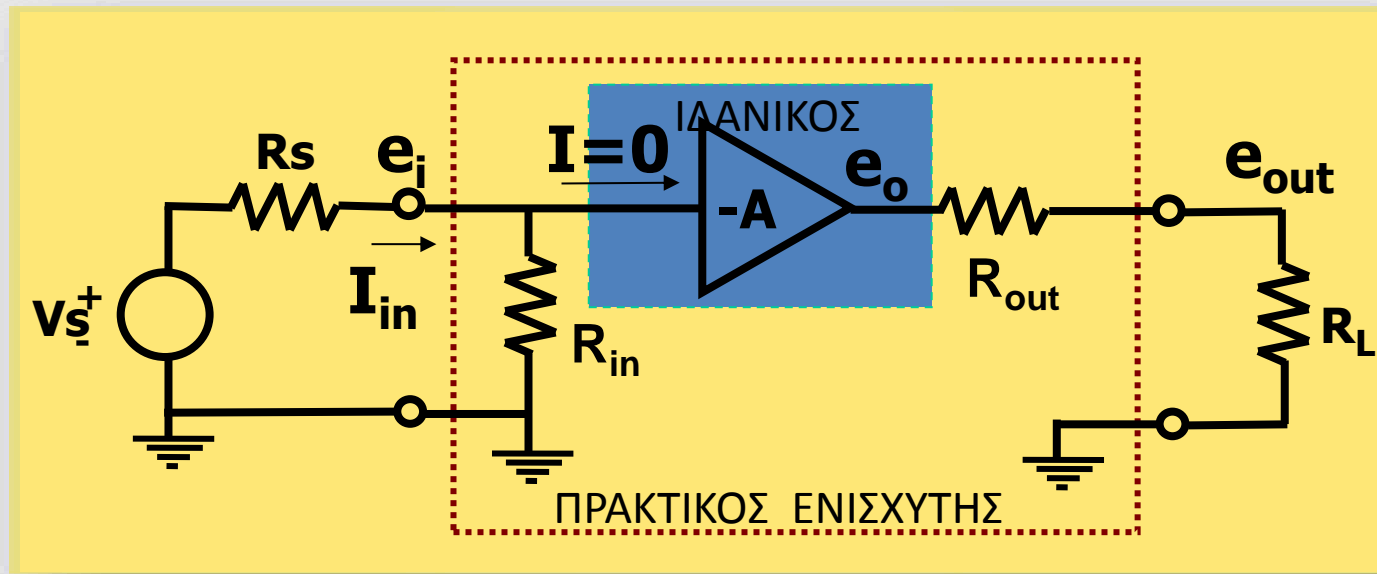
ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Περιεχόμενα ενότητας

1. Εισαγωγή – κέρδος και απόκριση συχνότητας (διαφ. 7 - 13)
2. Χρήσιμα ζεύγη βαθμίδων τρανζίστορ (διαφ. 14 - 26)
3. Κασκοδική συνδεσμολογία (διαφ. 27 - 36)
4. Ανάλυση τελεστικού ενισχυτή MOS με δύο βαθμίδες (διαφ. 37 – 44)



# Ενισχυτής μιας βαθμίδας στις μέσες συχνότητες (1/2)



ΠΡΑΚΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΜΙΑΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ

Αντίσταση εισόδου

$$R_{in} = e_i / I_{in}$$

Αντίσταση εξόδου

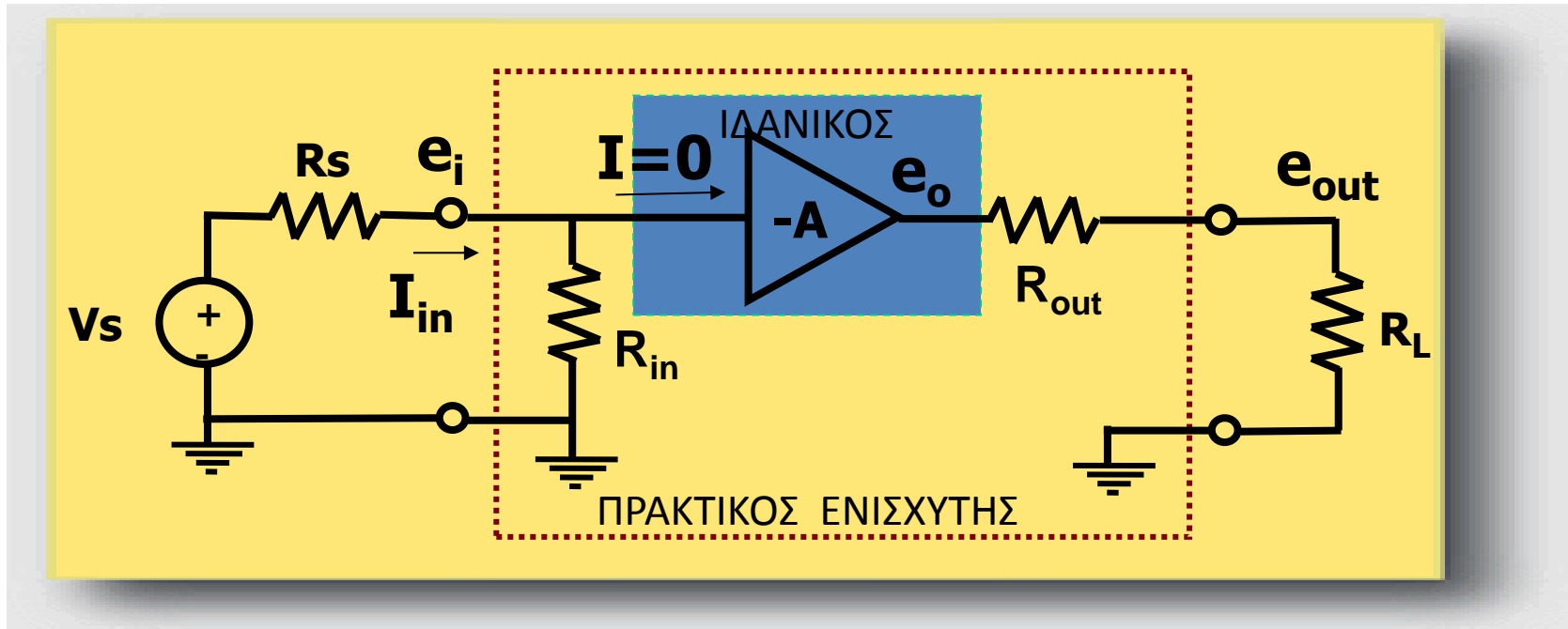
$$R_{out}$$

Κέρδος τάσης (ενίσχυση)

$$A_u = e_{out} / V_S$$



# Ενισχυτής μιας βαθμίδας στις μέσες συχνότητες (2/2)



ΠΡΑΚΤΙΚΟΣ ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ΜΙΑΣ ΒΑΘΜΙΔΑΣ

$$e_i = V_S R_{in} / (R_{in} + R_S)$$

$$e_{out} = e_o R_L / (R_L + R_{out})$$

Ενίσχυση:

$$A_v = e_{out} / V_S = -A \frac{R_{in}}{R_{in} + R_S} \frac{R_L}{R_L + R_{out}}$$





# Κέρδος πολυβάθμιου ενισχυτή στις μέσες συχνότητες

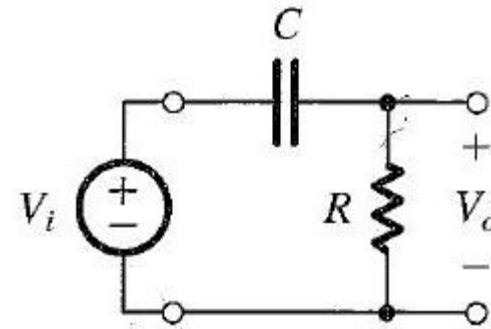
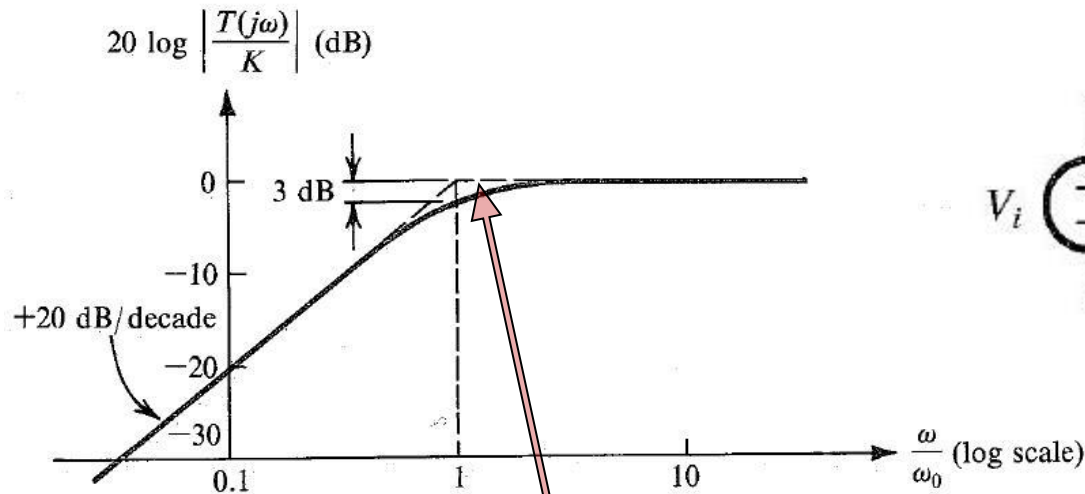
Ενίσχυση σήματος από πηγή ( $V_S, R_S$ ) και τελικό φορτίο  $R_L$  με πλήθος  $n$  ενισχυτικών βαθμίδων με χαρακτηριστικά

$(A_j, R_{in j}, R_{out j}), j = 1, \dots, n :$

$$A_v = e_{out} / V_S = A_1 A_2 \dots A_n \frac{R_{in1}}{R_{in1} + R_S} \frac{R_{in2}}{R_{in2} + R_{out1}} \dots \frac{R_L}{R_L + R_{outn}}$$



# Δικτυώματα μονής σταθεράς χρόνου (υψιπερατό)



High-Pass (HP)

$$\frac{Ks}{s + \omega_0}$$

$$\frac{K}{1 - j(\omega_0/\omega)}$$

$$|K|$$

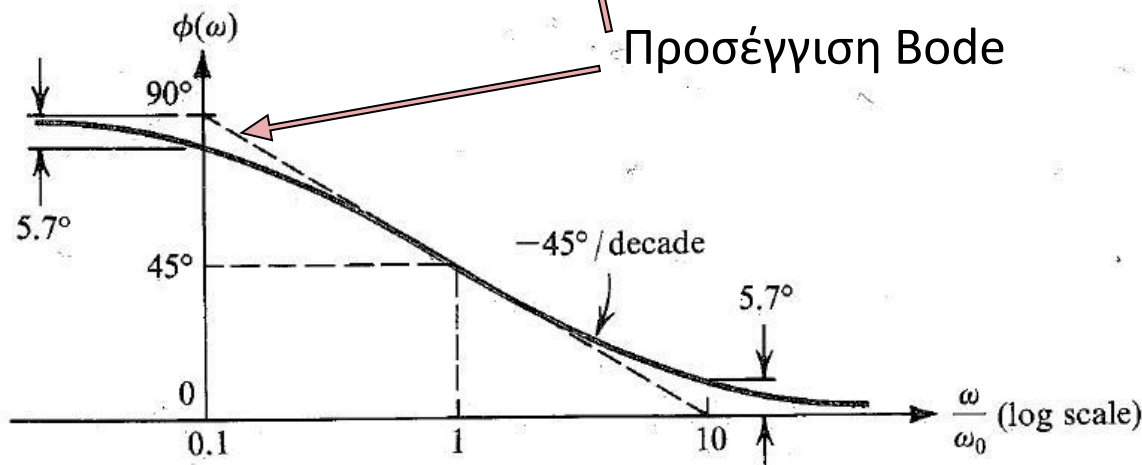
$$\sqrt{1 + (\omega_0/\omega)^2}$$

$$\tan^{-1}(\omega_0/\omega)$$

$$\omega_0 = 1/\tau; \tau \equiv \text{time constant}$$

$$\tau = CR \text{ or } L/R$$

Προσέγγιση Bode



# Απόκριση πολυβάθμιου ενισχυτή στις χαμηλές συχνότητες

Με  $n$  όμοιες βαθμίδες:

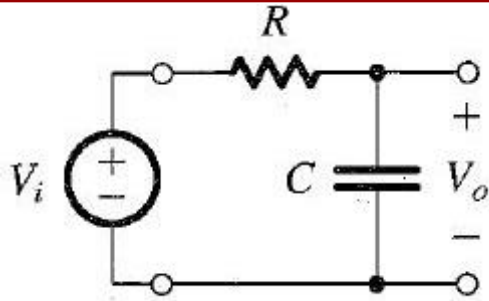
$$A_{nL}(j\omega) = \frac{K^n}{\left(1 - j\frac{\omega_o}{\omega}\right)^n} \Rightarrow \omega_{nL} = \frac{\omega_o}{\sqrt{2^{1/n} - 1}}$$

Με  $n$  βαθμίδες με  $f_{Lj}$ ,  $j = 1, \dots, n$ :

$$f_{nL} \approx 1.1 \sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + \dots + f_{Ln}^2}$$



# Δικτυώματα μόνης σταθεράς χρόνου (βαθυπερατό)



Low-Pass (LP)

$$\frac{K}{1 + (s/\omega_0)}$$

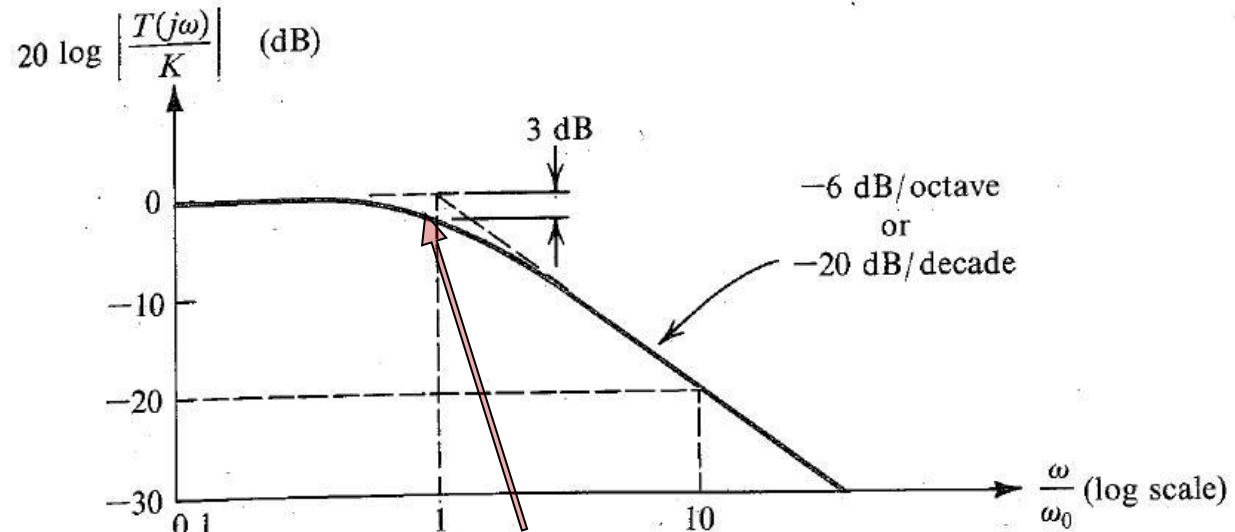
$$\frac{K}{1 + j(\omega/\omega_0)}$$

$$\frac{|K|}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_0)^2}}$$

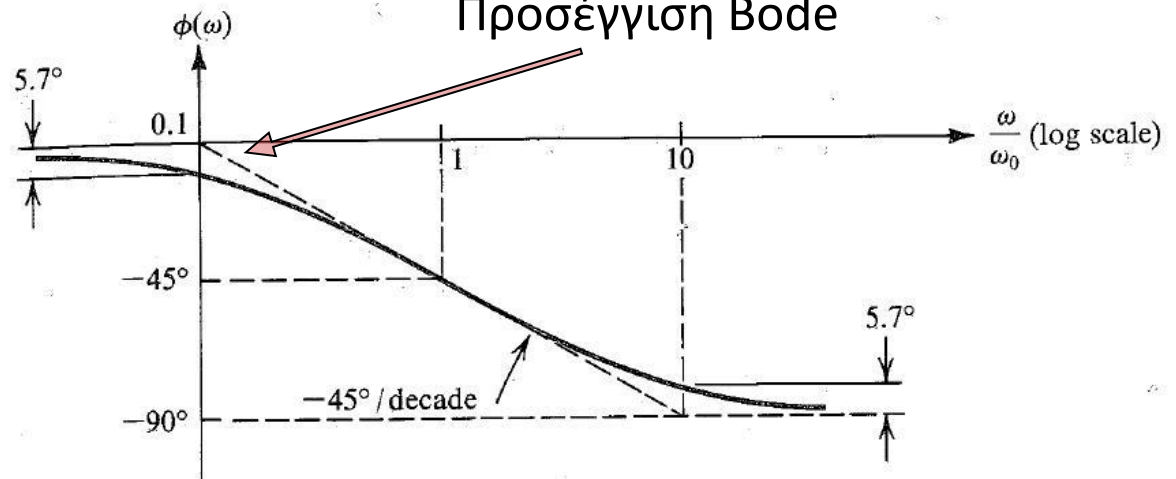
$$-\tan^{-1}(\omega/\omega_0)$$

$\omega_0 = 1/\tau$ ;  $\tau \equiv$  time constant

$\tau = CR$  or  $L/R$



Προσέγγιση Bode



# Απόκριση πολυβάθμιου ενισχυτή στις υψηλές συχνότητες

Με  $n$  όμοιες βαθμίδες:

$$A_{nH}(j\omega) = \frac{K^n}{\left(1 + j\frac{\omega}{\omega_0}\right)^n} \Rightarrow \omega_{nH} = \omega_0 \sqrt{2^{1/n} - 1}$$

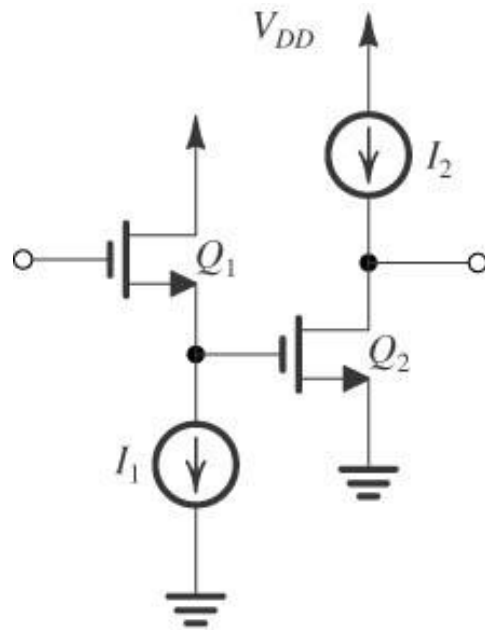
Με  $n$  βαθμίδες με  $f_{Hj}$ ,  $j = 1, \dots, n$ :

$$f_{nH} \approx \frac{1}{1.1 \sqrt{\frac{1}{f_{H1}^2} + \frac{1}{f_{H2}^2} + \dots + \frac{1}{f_{Hn}^2}}}$$



# Χρήσιμα ζεύγη βαθμίδων τρανζίστορ (1/3)

Βαθμίδες κοινής εκροής - κοινής πηγής:



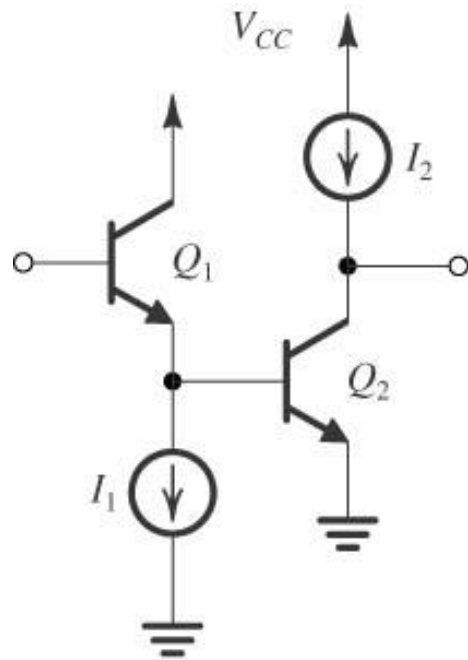
**Κέρδος τάσης** περίπου ίσο με της βαθμίδας κοινής πηγής (του  $Q_2$ ).

**Εύρος ζώνης** λειτουργίας πολύ μεγαλύτερο από της βαθμίδας κοινής πηγής (του  $Q_2$ ), αφού η χωρητικότητα εισόδου  $C_{in2}$  (Miller) «βλέπει» παράλληλα μια αντίσταση περίπου ίση με  $1 / (g_{m1} + g_{mb1})$  που είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση πηγής σήματος  $R_{sig}$ .



# Χρήσιμα ζεύγη βαθμίδων τρανζίστορ (2/3)

Βαθμίδες κοινού συλλέκτη - κοινού εκπομπού:



**Κέρδος τάσης** περίπου ίσο με της βαθμίδας κοινού εκπομπού (του  $Q_2$ ).

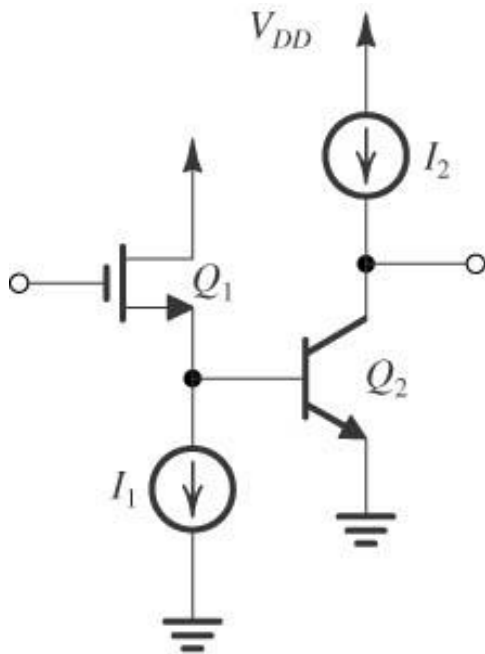
**Εύρος ζώνης** λειτουργίας πολύ μεγαλύτερο από της βαθμίδας κοινού εκπομπού (του  $Q_2$ ), αφού η χωρητικότητα εισόδου  $C_{\pi 2}$  «βλέπει» παράλληλα μια αντίσταση ίση με  $R_{out1} // R_{in2}$  που είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση πηγής σήματος  $R_{sig}$ .

**Αντίσταση εισόδου** αυξημένη κατά έναν παράγοντα  $(\beta_1 + 1)$ .



# Χρήσιμα ζεύγη βαθμίδων τρανζίστορ (3/3)

Βαθμίδες κοινής εκροής - κοινού εκπομπού (BiCMOS):



**Κέρδος τάσης** περίπου ίσο με της βαθμίδας κοινού εκπομπού (του  $Q2$ ), που είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο κοινής πηγής.

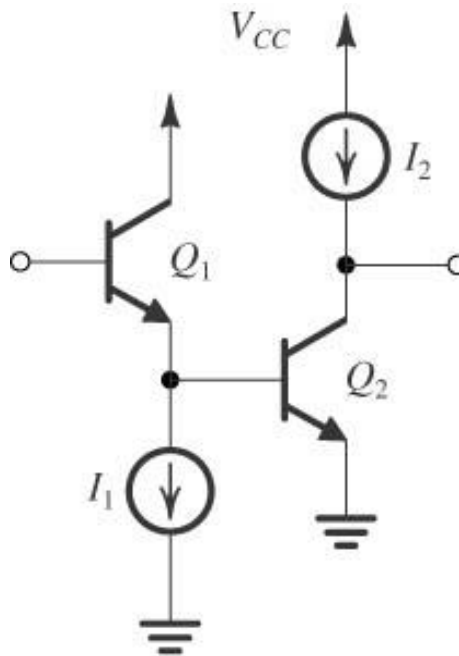
**Εύρος ζώνης** λειτουργίας πολύ μεγαλύτερο από της βαθμίδας κοινού εκπομπού (του  $Q2$ ), αφού η χωρητικότητα εισόδου  $C_{\pi 2}$  «βλέπει» παράλληλα μια αντίσταση περίπου ίση με  $1 / (g_{m1} + g_{mb1})$  που είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση πηγής σήματος  $R_{sig}$ .

**Αντίσταση εισόδου** άπειρη (στις μέσες συχνότητες).





## Παράδειγμα υπολογισμού κέρδους και συχνότητας αποκοπής $f_H$ ενισχυτή με ζεύγος βαθμίδων: κοινού συλλέκτη - κοινού εκπομπού (1/4)

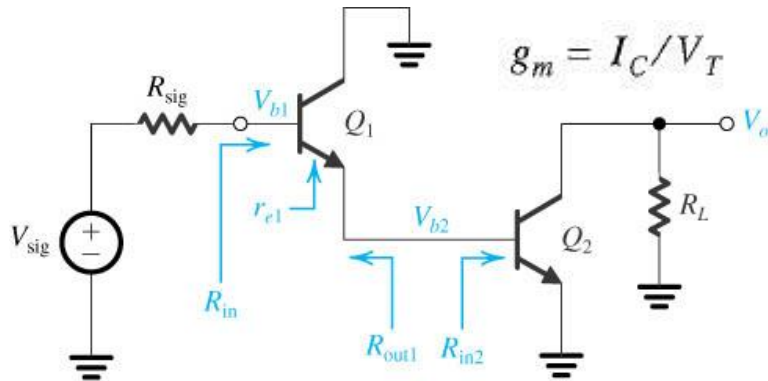


Στον ενισχυτή τα τρανζίστορ είναι όμοια με  $\beta=100$ ,  $f_T = 400$  MHz,  $C_\mu = 2$  pF και ισχύει  $I_1 = I_2 = 1$  mA,  $R_{sig} = 4$  k $\Omega$ ,  $R_L = 4$  k $\Omega$

Ζητείται το κέρδος  $A_M$  και η συχνότητα αποκοπής  $f_H$  με προσέγγιση σταθερών χρόνου ανοικτού κυκλώματος. Να συγκριθούν τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα απλού ενισχυτή κοινού εκπομπού με ίδιες συνθήκες. Αγνοείστε για απλότητα τις  $r_o$  και  $r_x$  (ή  $r_{bb'}$ ).



## Παράδειγμα υπολογισμού κέρδους και συχνότητας αποκοπής η ενισχυτή με ζεύγος βαθμίδων: κοινού συλλέκτη - κοινού εκπομπού (2/4)



$$g_m = 40 \text{ mA/V}$$

$$r_e = 25 \text{ } \Omega$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{100}{40} = 2.5 \text{ k}\Omega$$

$$C_\pi + C_\mu = \frac{g_m}{\omega_T} = \frac{g_m}{2\pi f_T}$$

$$= \frac{40 \times 10^{-3}}{2\pi \times 400 \times 10^6} = 15.9 \text{ pF}$$

$$C_\mu = 2 \text{ pF} \quad C_\pi = 13.9 \text{ pF}$$

$$R_{in2} = r_{\pi 2} = 2.5 \text{ k}\Omega$$

$$R_{in} = (\beta_1 + 1)(r_{e1} + R_{in2})$$

$$= 101(0.025 + 2.5) = 255 \text{ k}\Omega$$

$$\frac{V_{b1}}{V_{sig}} = \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} = \frac{255}{255 + 4} = 0.98 \text{ V/V}$$

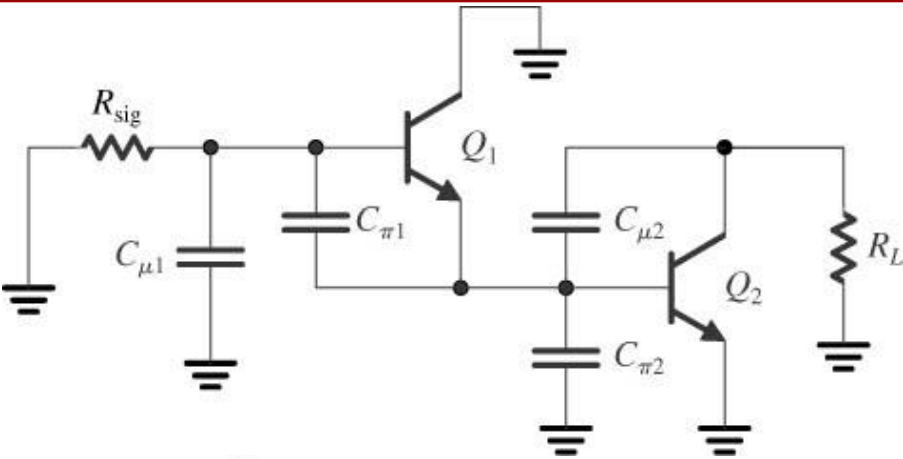
$$\frac{V_{b2}}{V_{b1}} = \frac{R_{in2}}{R_{in2} + r_{e1}} = \frac{2.5}{2.5 + 0.025} = 0.99 \text{ V/V}$$

$$\frac{V_o}{V_{b2}} = -g_{m2}R_L = -40 \times 4 = -160 \text{ V/V}$$

$$A_M = \frac{V_o}{V_{sig}} = -160 \times 0.99 \times 0.98 = -155 \text{ V/V}$$



## Παράδειγμα υπολογισμού κέρδους και συχνότητας αποκοπής $f_H$ ενισχυτή με ζεύγος βαθμίδων: κοινού συλλέκτη - κοινού εκπομπού (3/4)



$$R_{\mu 1} = R_{\text{sig}} \parallel R_{\text{in}}$$

$$= 4 \parallel 255 = 3.94 \text{ k}\Omega$$

$$R_{\pi 1} = \frac{R_{\text{sig}} + R_{\text{in}2}}{1 + \frac{R_{\text{sig}}}{r_{\pi 1}} + \frac{R_{\text{in}2}}{r_{e1}}}$$

$$= \frac{4000 + 2500}{1 + \frac{4000}{2500} + \frac{2500}{25}} = 63.4 \Omega$$

$$R_{\mu 2} = (1 + g_{m2}R_L)(R_{\text{in}2} \parallel R_{\text{out}1}) + R_L$$

$$= (1 + 40 \times 4) \left[ 2500 \parallel \left( 25 + \frac{4000}{101} \right) \right] + 4000$$

$$= 14,143 \Omega \cong 14.1 \text{ k}\Omega$$

$$R_{\pi 2} = R_{\text{in}2} \parallel R_{\text{out}1}$$

$$= r_{\pi 2} \parallel \left[ r_{e1} + \frac{R_{\text{sig}}}{\beta_1 + 1} \right]$$

$$= 2500 \parallel \left[ 25 + \frac{4000}{101} \right] = 63 \Omega$$

$$\tau_H = C_{\mu 1}R_{\mu 1} + C_{\pi 1}R_{\pi 1} + C_{\mu 2}R_{\mu 2} + C_{\pi 2}R_{\pi 2}$$

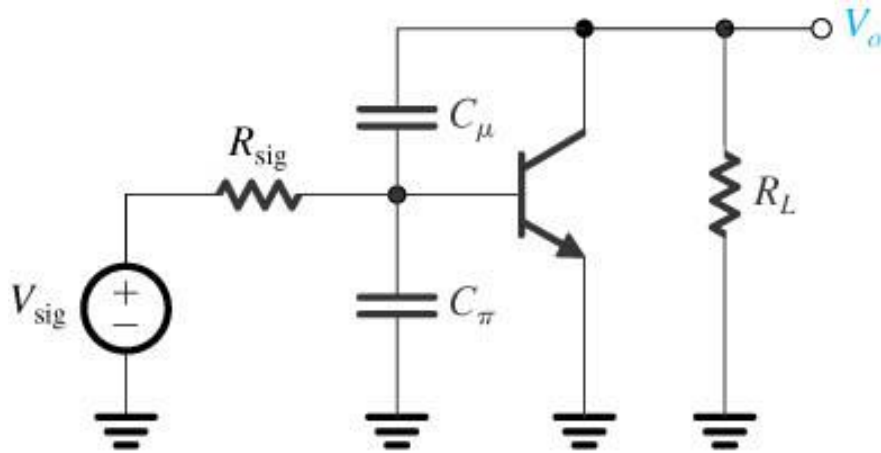
$$= 2 \times 3.94 + 13.9 \times 0.0634 + 2 \times 14.1 + 13.9 \times 0.063$$

$$= 7.88 + 0.88 + 28.2 + 0.88 = 37.8 \text{ ns}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H} = \frac{1}{2\pi \times 37.8 \times 10^{-9}} = 4.2 \text{ MHz}$$



# Παράδειγμα υπολογισμού κέρδους και συχνότητας αποκοπής $f_H$ ενισχυτή με ζεύγος βαθμίδων: κοινού συλλέκτη - κοινού εκπομπού (4/4)



$$\begin{aligned}
 A_M &= \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} (-g_m R_L) \\
 &= \left( \frac{r_\pi}{r_\pi + R_{sig}} \right) (-g_m R_L) \\
 &= \left( \frac{2.5}{2.5 + 4} \right) (-40 \times 4) \\
 &= -61.5 \text{ V/V}
 \end{aligned}$$

$$R_\pi = r_\pi \parallel R_{sig} = 2.5 \parallel 4 = 1.54 \text{ k}\Omega$$

$$\begin{aligned}
 R_\mu &= (1 + g_m R_L)(R_{sig} \parallel r_\pi) + R_L \\
 &= (1 + 40 \times 4)(4 \parallel 2.5) + 4 \\
 &= 251.7 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tau_H &= C_\pi R_\pi + C_\mu R_\mu \\
 &= 13.9 \times 1.54 + 2 \times 251.7 \\
 &= 21.4 + 503.4 = 524.8 \text{ ns}
 \end{aligned}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H} = \frac{1}{2\pi \times 524.8 \times 10^{-9}} = 303 \text{ kHz}$$

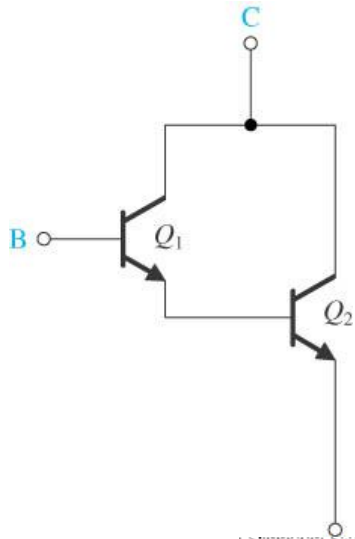
## Σύγκριση ενισχυτών:

κέρδος  $A_M$  : 61.5  $\Rightarrow$  155 (2.5 φορές)  
 συχνότητα αποκοπής  $f_H$  : 303 kHz  $\Rightarrow$  4.2 MHz (13.9 φορές)  
 γινόμενο κέρδος-εύρος ζώνης GB :  
 18.63 MHz  $\Rightarrow$  651 MHz (35 φορές)



# Χρήσιμα ζεύγη βαθμίδων τρανζίστορ

## Συνδεσμολογία Darlington (1/2)

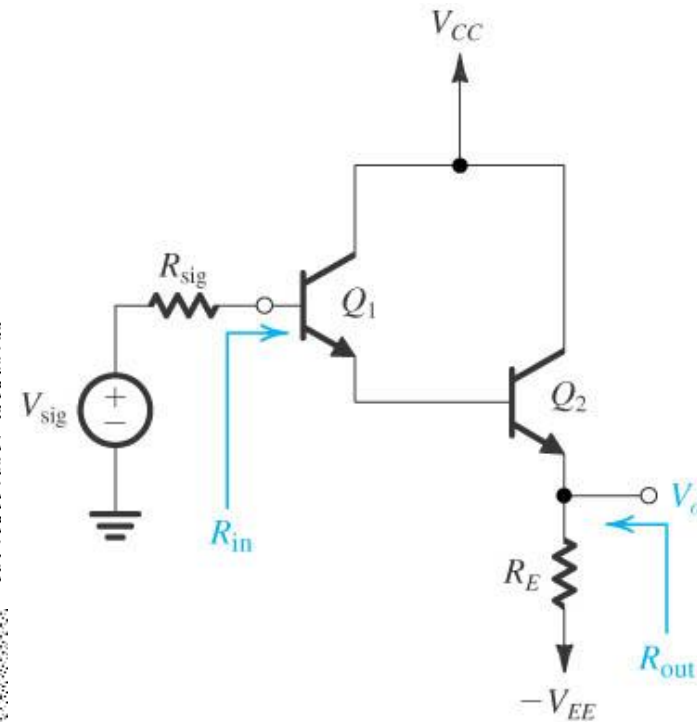


Κέρδος ρεύματος  $\beta = \beta_1 \beta_2$

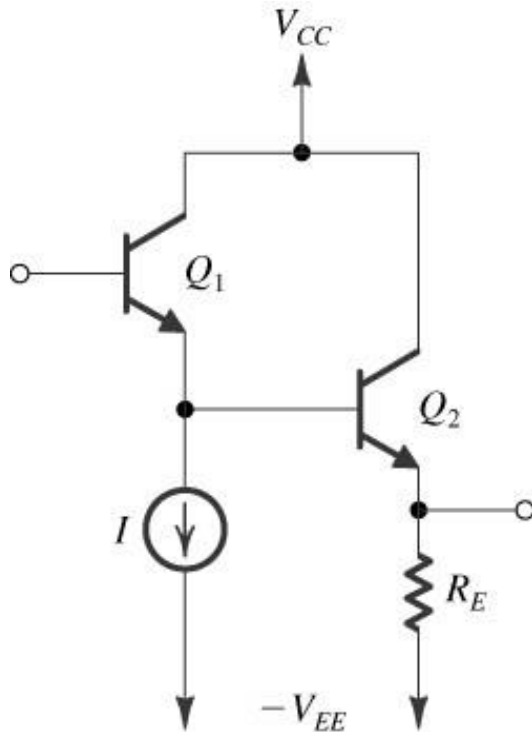
$$R_{in} = (\beta_1 + 1)[r_{e1} + (\beta_2 + 1)(r_{e2} + R_E)]$$

$$R_{out} = R_E \parallel \left[ r_{e2} + \frac{r_{e1} + [R_{sig}/(\beta_1 + 1)]}{\beta_2 + 1} \right]$$

$$\frac{V_o}{V_{sig}} = \frac{R_E}{R_E + r_{e2} + [r_{e1} + R_{sig}/(\beta_1 + 1)]/(\beta_2 + 1)}$$



# Χρήσιμα ζεύγη βαθμίδων τρανζίστορ Συνδεσμολογία Darlington (2/2)



Η πηγή ρεύματος ( $I$ ) εξασφαλίζει την σωστή πόλωση του  $Q_1$  και επομένως και τη μεγάλη (επιθυμητή) τιμή του  $\beta_1$ .

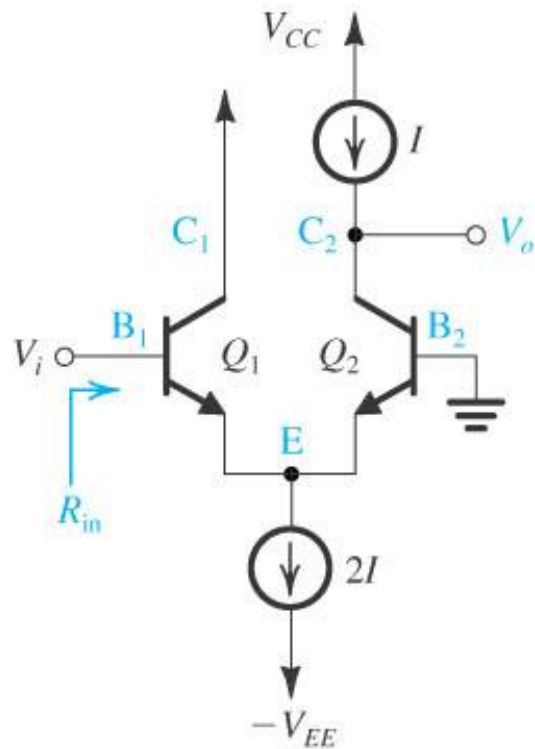




# Χρήσιμα ζεύγη βαθμίδων τρανζίστορ

## Βαθμίδες κοινού συλλέκτη – κοινής βάσης (1/3)

Κέρδος τάσης περίπου ίσο με της βαθμίδας κοινής βάσης (του Q2)



$$R_{in} = (\beta_1 + 1)(r_{e1} + r_{e2})$$

$$r_{e1} = r_{e2} = r_e$$

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta$$

$$\Rightarrow R_{in} = 2r_e$$

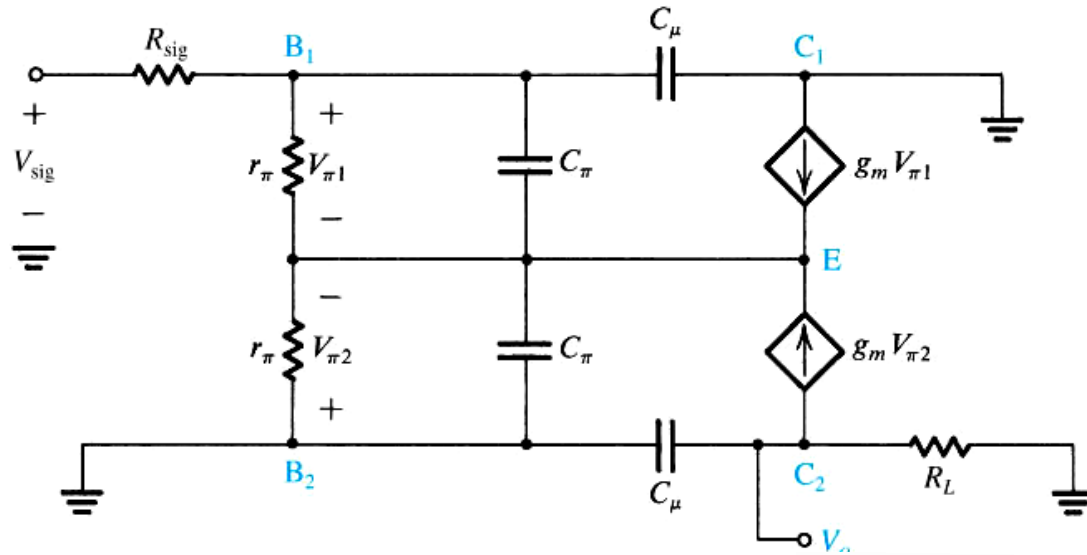
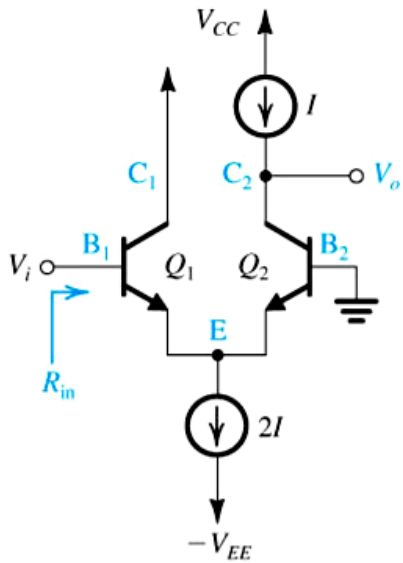
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\alpha_2 R_L}{r_{e1} + r_{e2}} = \frac{1}{2} g_m R_L$$

$$\frac{V_o}{V_{sig}} = \frac{1}{2} \left( \frac{R_{in}}{R_{in} + R_{sig}} \right) (g_m R_L)$$



# Χρήσιμα ζεύγη βαθμίδων τρανζίστορ

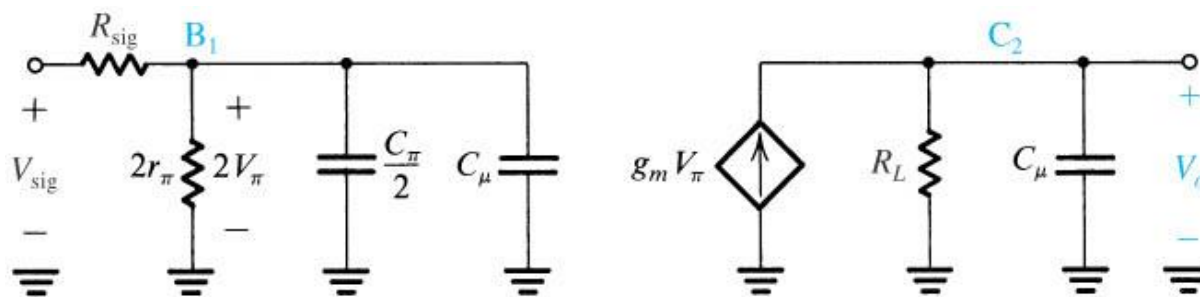
## Βαθμίδες κοινού συλλέκτη – κοινής βάσης (2/3)



$$f_{P1} = \frac{1}{2\pi \left( \frac{C_{\pi}}{2} + C_{\mu} \right) (R_{sig} \parallel 2r_{\pi})}$$

$$f_{P2} = \frac{1}{2\pi C_{\mu} R_L}$$

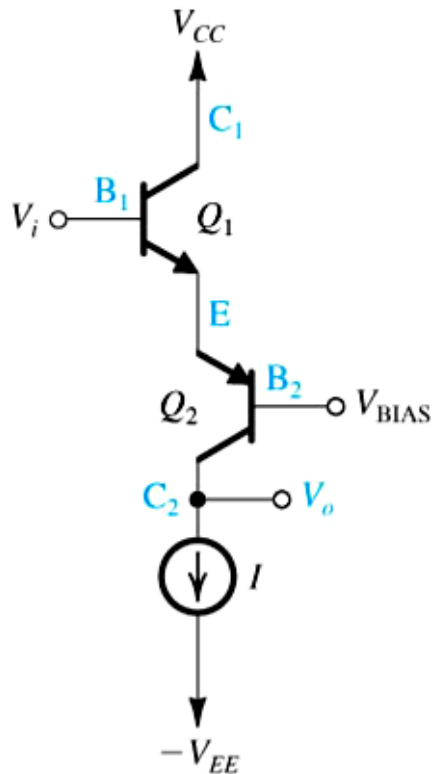
$$f_H \cong 1 / \sqrt{\frac{1}{f_{P1}^2} + \frac{1}{f_{P2}^2}}$$





# Χρήσιμα ζεύγη βαθμίδων τρανζίστορ

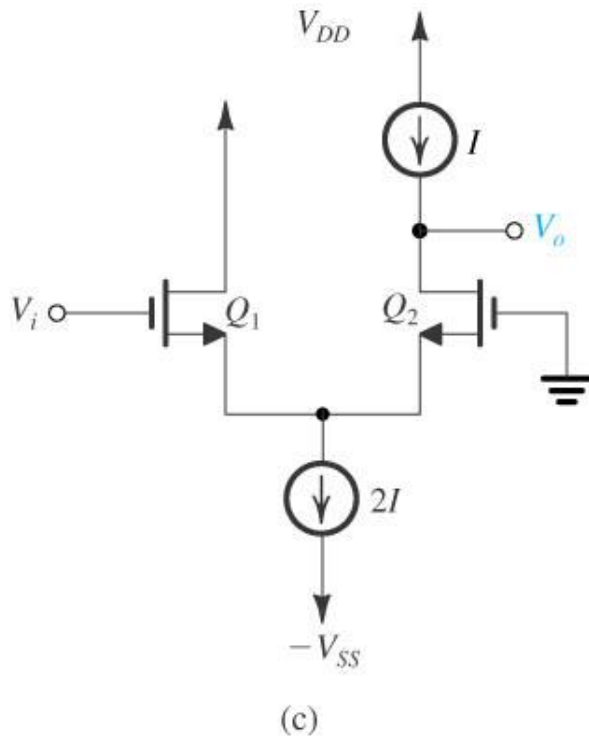
## Βαθμίδες κοινού συλλέκτη – κοινής βάσης (3/3)



Χρήση τρανζίστορ  $pnp$  ώστε η πόλωση να γίνει με μια μόνο πηγή ρεύματος και με σωστή επιλογή της τάσης  $V_{BIAS}$ .



# Χρήσιμα ζεύγη βαθμίδων τρανζίστορ Βαθμίδες κοινής εκροής - κοινής πύλης

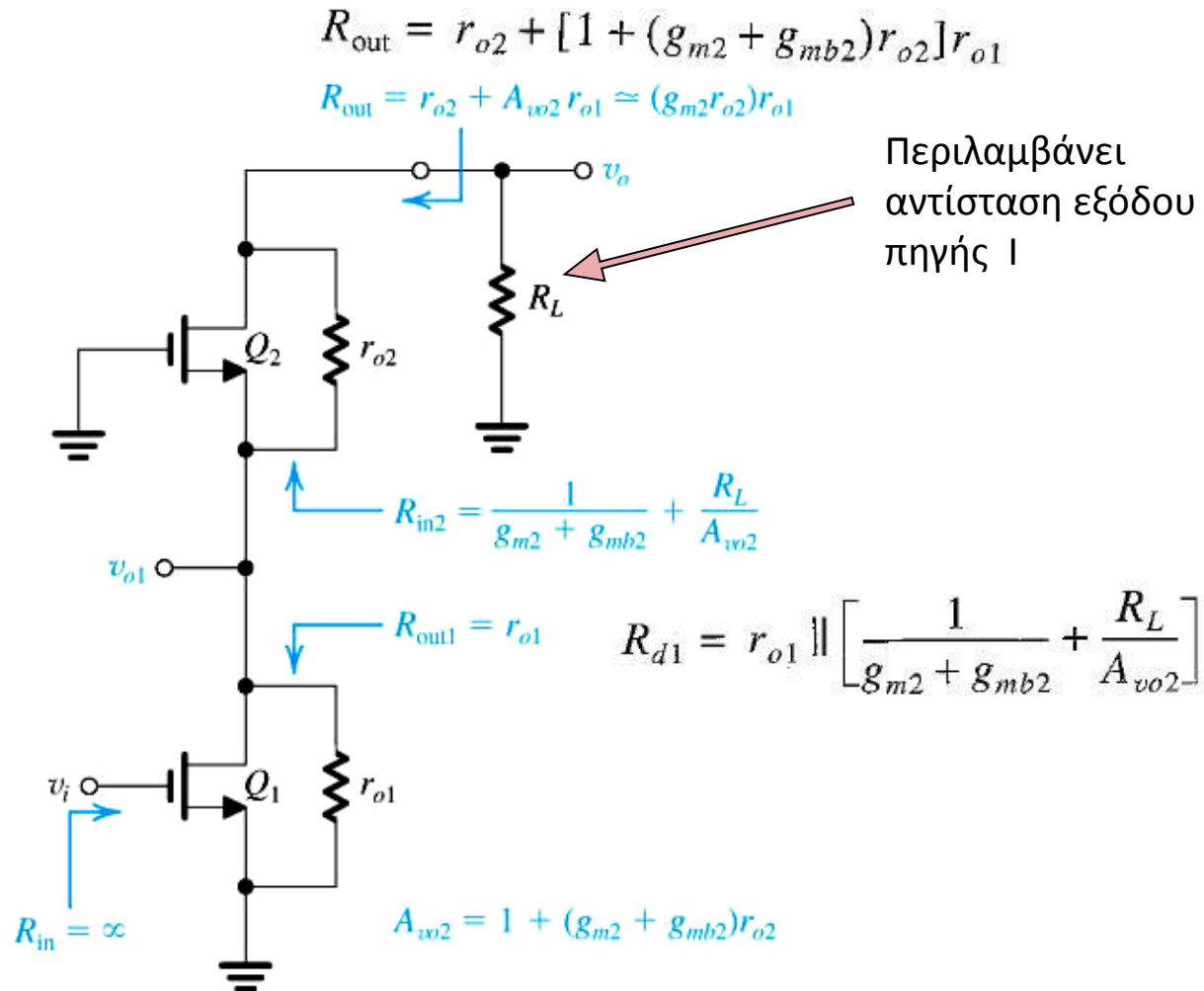
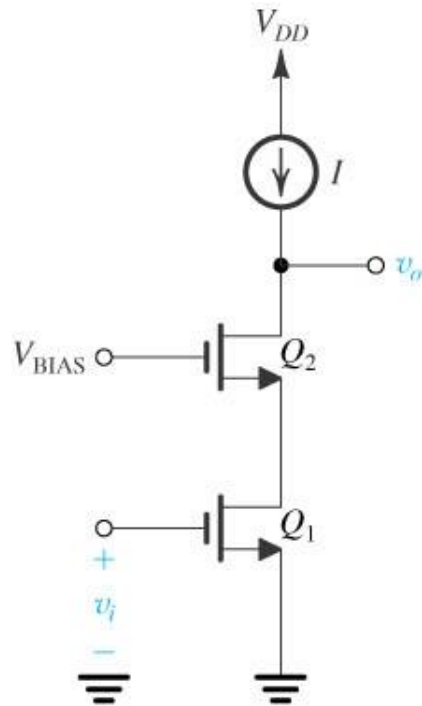


Κέρδος τάσης περίπου ίσο με της βαθμίδας κοινής πύλης (του  $Q_2$ )

$$f_H \cong 1 / \sqrt{\frac{1}{f_{P1}^2} + \frac{1}{f_{P2}^2}}$$



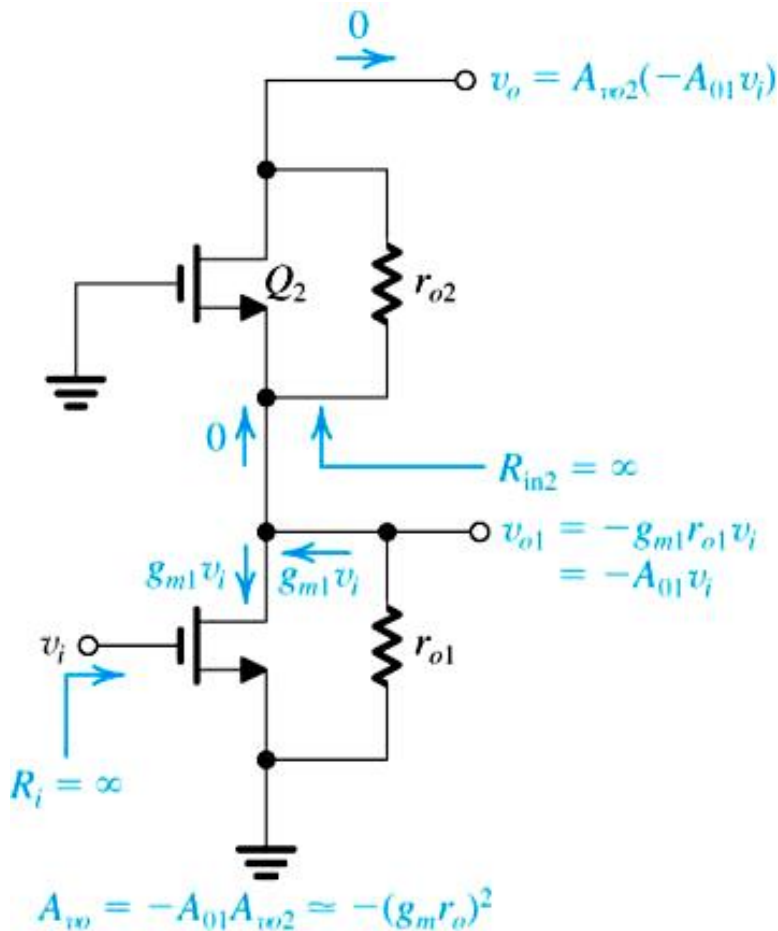
# Κασκοδική συνδεσμολογία: βαθμίδες κοινής πηγής - κοινής πύλης (1/4)



Cascode = **Cascaded**  
**Cathode**



# Κασκοδική συνδεσμολογία: βαθμίδες κοινής πηγής - κοινής πύλης (2/4)



$$\frac{v_{o1}}{v_i} = -g_{m1}r_{o1} = -A_{o1}$$

$$v_o = A_{vo2}v_{o1}$$

$$A_{vo} = -A_{o1}A_{o2}$$

$$\approx -A_{o1}A_{o2}$$

$$A_{vo} = -A_0^2 = -(g_m r_o)^2$$

$$A_{vo} = -G_m R_o$$

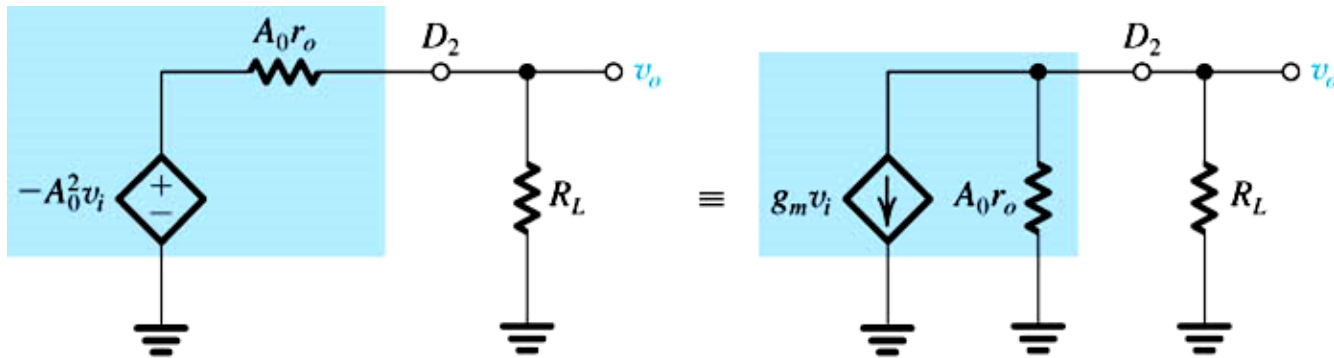
$$G_m = \frac{A_{o1}A_{vo2}}{r_{o2} + A_{vo2}r_{o1}}$$

$$= \frac{g_{m1}r_{o1}[1 + (g_{m2} + g_{mb2})r_{o2}]}{r_{o2} + [1 + (g_{m2} + g_{mb2})r_{o2}]r_{o1}}$$

$$\approx g_{m1}$$

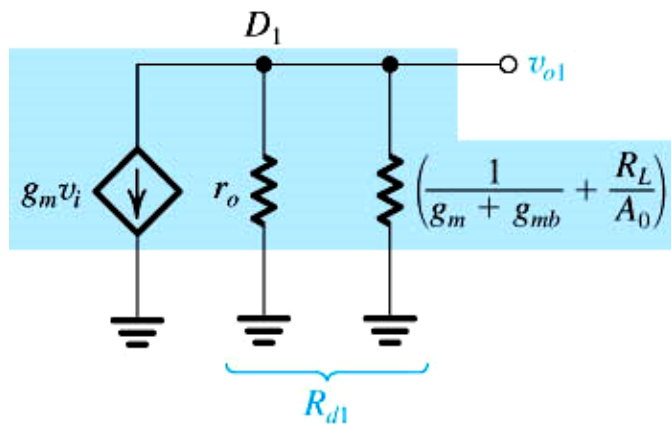


# Κασκοδική συνδεσμολογία: βαθμίδες κοινής πηγής - κοινής πύλης (3/4)



$$A_v = -A_0^2 \frac{R_L}{R_L + A_0 r_o}$$

Επιθυμητή  $R_L$  μεγάλη



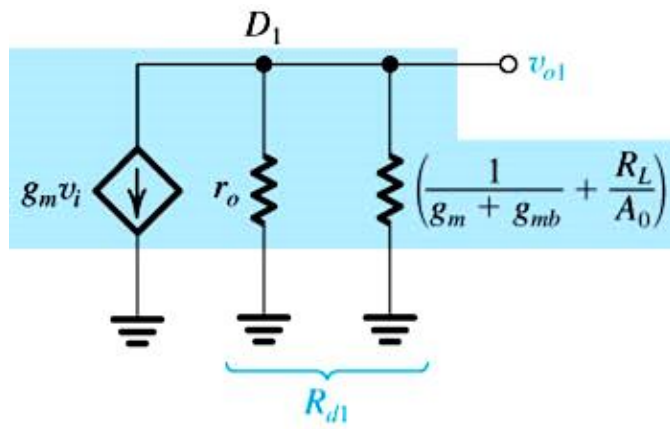
$$\frac{v_{o1}}{v_i} = -g_m \left[ r_o \parallel \left( \frac{1}{g_m} + \frac{R_L}{A_0} \right) \right]$$

$$R_L = A_0 r_o \Rightarrow \frac{v_{o1}}{v_i} = -g_m \left[ r_o \parallel \left( \frac{1}{g_m} + r_o \right) \right]$$

$$\cong -\frac{1}{2} g_m r_o = -\frac{1}{2} A_0$$



# Κασκοδική συνδεσμολογία: βαθμίδες κοινής πηγής - κοινής πύλης (4/4)



$$\frac{v_{o1}}{v_i} = -g_m \left[ r_o \parallel \left( \frac{1}{g_m} + \frac{R_L}{A_0} \right) \right]$$

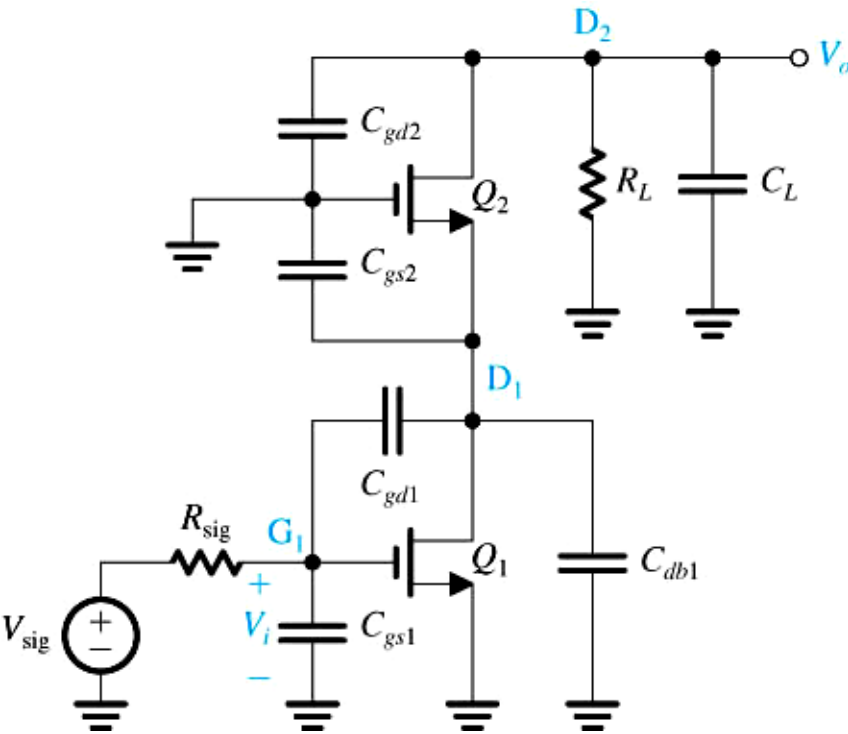
$$R_L = r_o \Rightarrow \frac{v_{o1}}{v_i} = -g_m \left[ r_o \parallel \left( \frac{1}{g_m} + \frac{1}{g_m} \right) \right] \cong -2 \text{ V/V}$$

$$A_v = -A_0^2 \frac{r_o}{r_o + A_0 r_o} \cong -A_0$$



# Κασκοδική συνδεσμολογία: βαθμίδες κοινής πηγής - κοινής πύλης

## Απόκριση συχνότητας (1/2)



$$R_{gd1} = (1 + g_{m1}R_{d1})R_{sig} + R_{d1}$$

$$\tau_H = C_{gs1}R_{sig} + C_{gd1}[(1 + g_{m1}R_{d1})R_{sig} + R_{d1}] + (C_{db1} + C_{gs2})R_{d1} + (C_L + C_{gd2})(R_L \parallel R_{out})$$

$$f_H \cong \frac{1}{2\pi\tau_H}$$

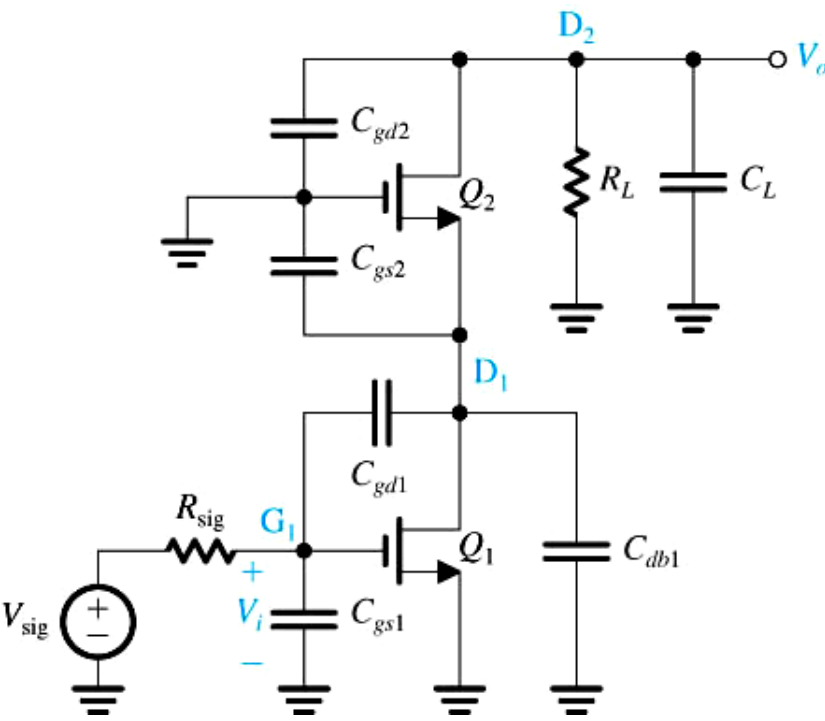
$$\tau_H = R_{sig}[C_{gs1} + C_{gd1}(1 + g_{m1}R_{d1})] + R_{d1}(C_{gd1} + C_{db1} + C_{gs2}) + (R_L \parallel R_{out})(C_L + C_{gd2})$$

Για μεγάλη τιμή  $R_{sig}$  : περίπου ίδιο κέρδος και μεγαλύτερο εύρος ζώνης

# Κασκοδική συνδεσμολογία: βαθμίδες κοινής πηγής - κοινής πύλης

## Απόκριση συχνότητας (2/2)

$$\tau_H = R_{sig} [C_{gs1} + C_{gd1}(1 + g_{m1}R_{d1})] + R_{d1}(C_{gd1} + C_{db1} + C_{gs2}) + (R_L \parallel R_{out})(C_L + C_{gd2})$$



Για τιμή  $R_{sig} = 0$  και μεγάλη τιμή  $R_L$  (τάξη μεγέθους  $A_0 r_o$ ) μεγαλύτερο κέρδος και μικρότερο εύρος ζώνης

$$\tau_H \cong (C_L + C_{gd2})(R_L \parallel R_{out})$$

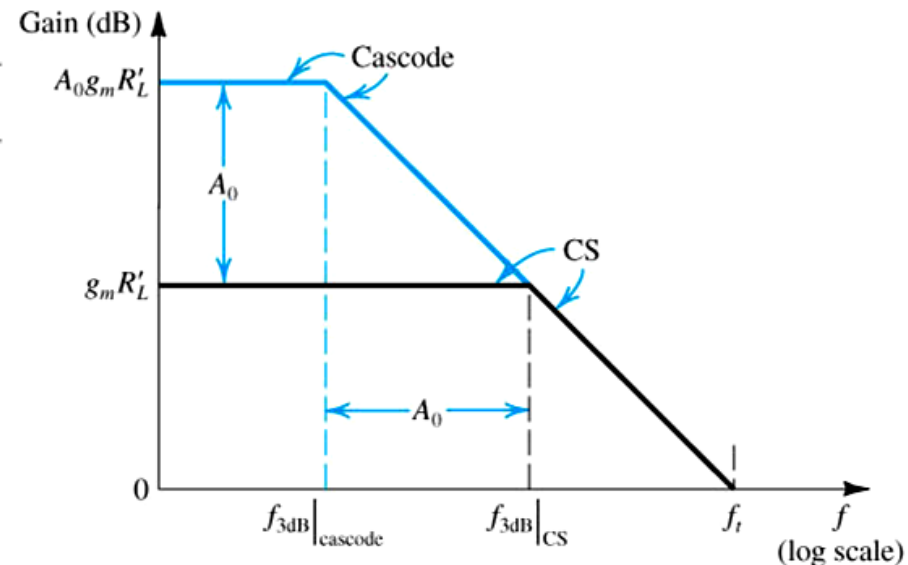
$$f_H = \frac{1}{2\pi(C_L + C_{gd2})(R_L \parallel R_{out})}$$

$$f_t \cong \frac{1}{2\pi} \frac{g_m}{C_L + C_{gd2}}$$

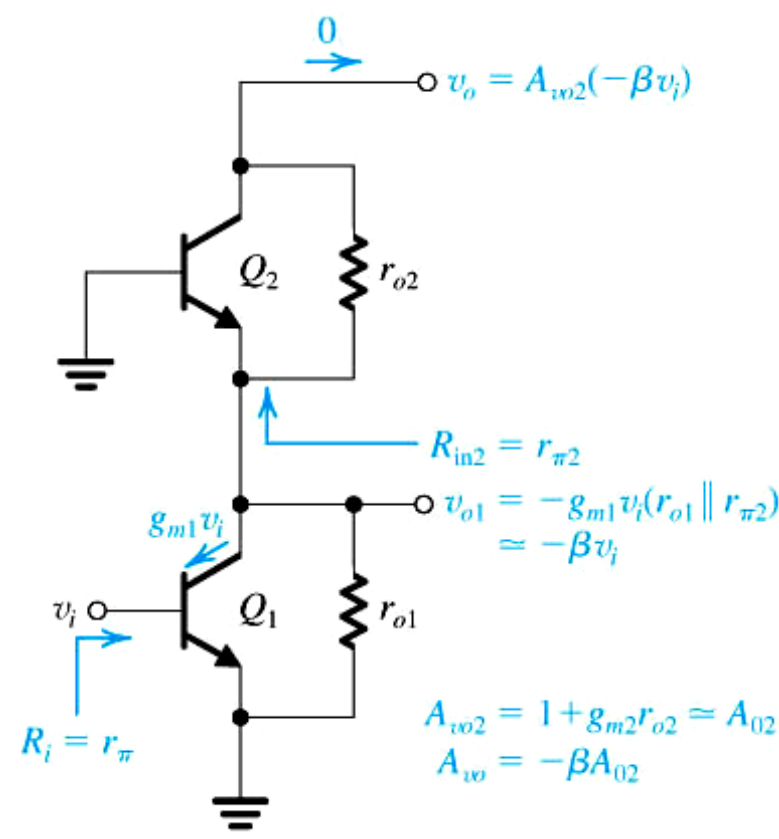
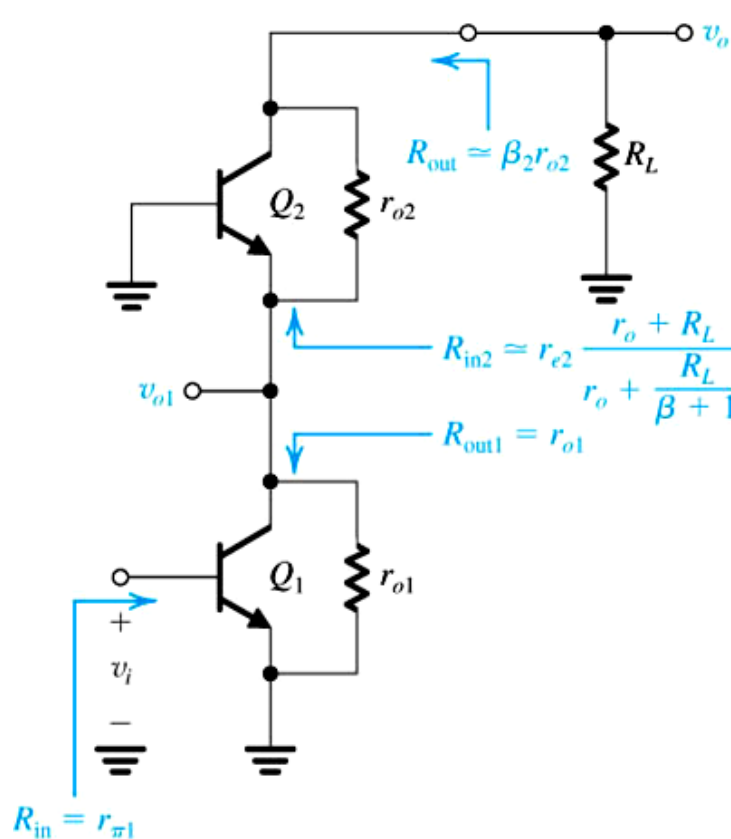
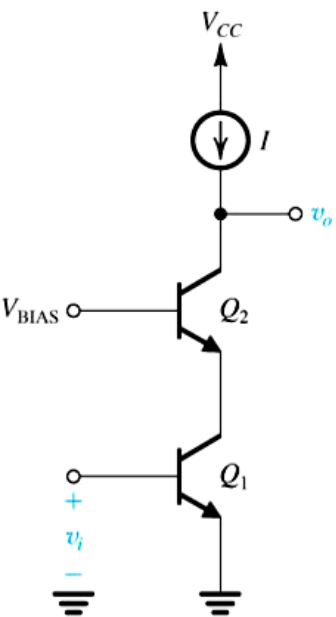


# Σύγκριση βαθμίδων κοινής πηγής και κασκοδικής για $R_{sig} = 0$

	Common Source	Cascode
Circuit		
DC Gain	$-g_m R'_L$	$-A_0 g_m R'_L$
$f_{3dB}$	$\frac{1}{2\pi(C_L + C_{gd})R'_L}$	$\frac{1}{2\pi(C_L + C_{gd})A_0 R'_L}$
$f_t$	$\frac{g_m}{2\pi(C_L + C_{gd})}$	$\frac{g_m}{2\pi(C_L + C_{gd})}$

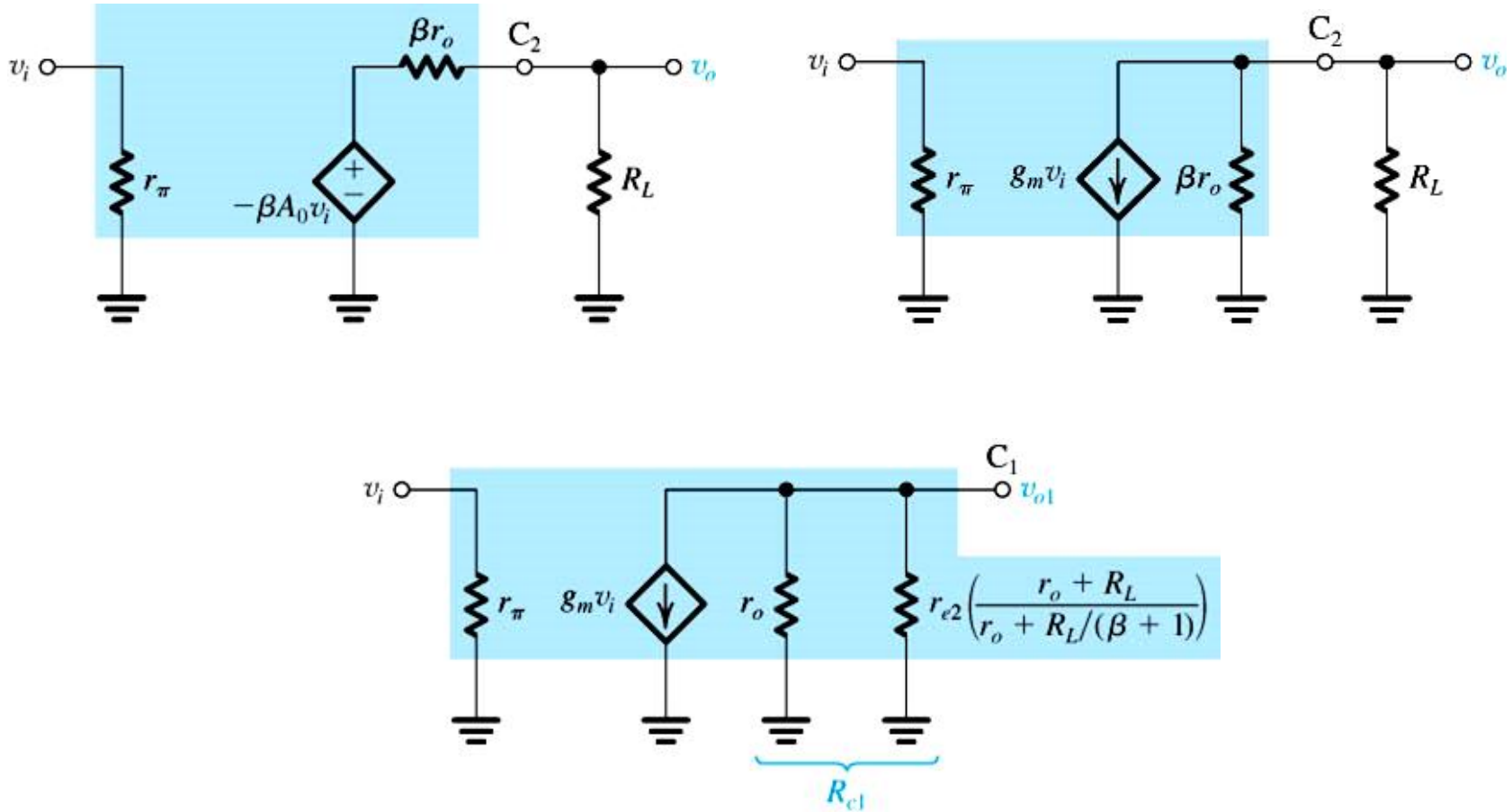


# Κασκοδική συνδεσμολογία: βαθμίδες κοινού εκπομπού - κοινής βάσης



# Κασκοδική συνδεσμολογία: βαθμίδες κοινού εκπομπού - κοινής βάσης

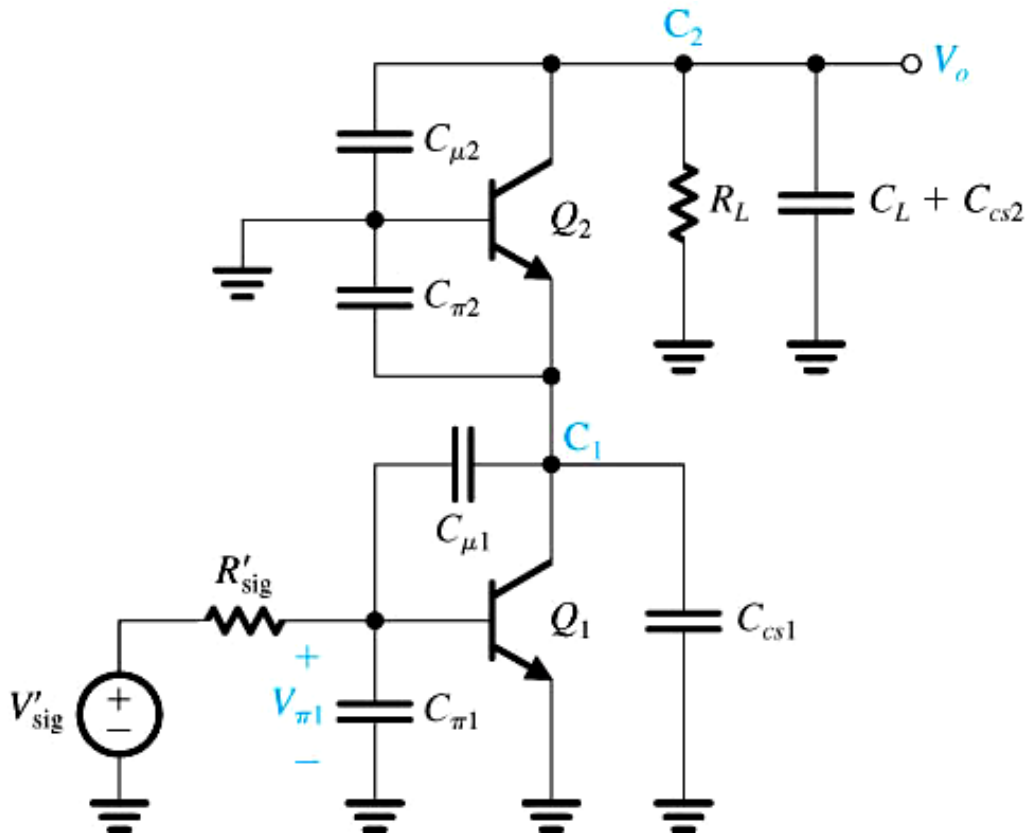
## Ισοδύναμα κυκλώματα



# Κασκοδική συνδεσμολογία: βαθμίδες κοινού εκπομπού

## - κοινής βάσης

### Απόκριση συχνότητας



$$R'_{sig} = r_{\pi 1} \parallel (r_{x1} + R_{sig})$$

$$R_{\pi 1} = R'_{sig}$$

$$R_{\mu 1} = R'_{sig}(1 + g_{m1}R_{c1}) + R_{c1}$$

$$R_{c1} = r_{o1} \parallel \left[ r_{e2} \left( \frac{r_{o2} + R_L}{r_{o2} + R_L / (\beta_2 + 1)} \right) \right]$$

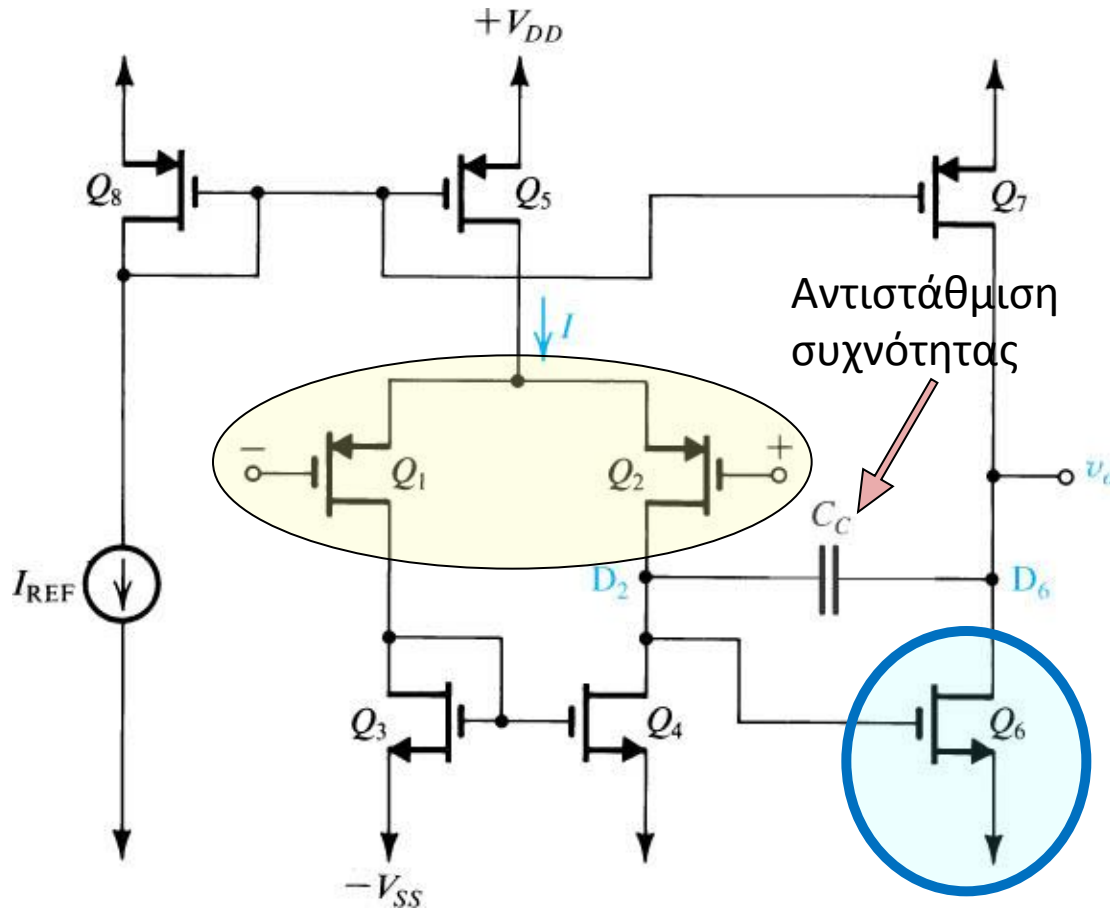
$$\tau_H = C_{\pi 1}R_{\pi 1} + C_{\mu 1}R_{\mu 1} + (C_{cs1} + C_{\pi 2})R_{c1} + (C_L + C_{cs2} + C_{\mu 2})(R_L \parallel R_{out})$$

$$f_H \approx \frac{1}{2\pi\tau_H}$$

$$A_M = -\frac{r_{\pi}}{r_{\pi} + r_x + R_{sig}} g_m(\beta r_o \parallel R_L)$$



# Τελεστικός ενισχυτής MOS δύο βαθμίδων



Αντίσταση εξόδου  $r_{o6} // r_{o7}$

Αντιστάθμιση  
συχνότητας

Κέρδος τάσης

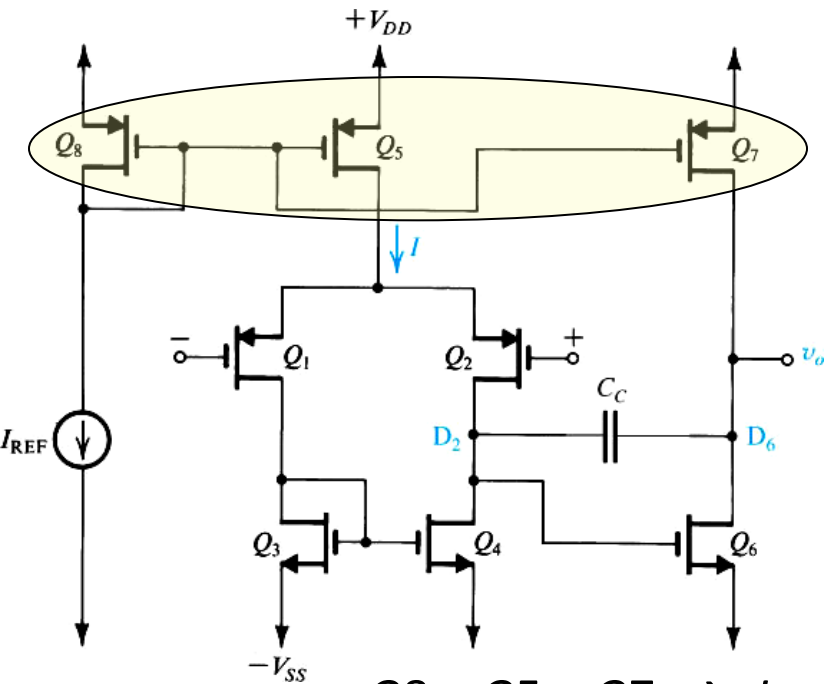
$$A_1 = -g_{m1}(r_{o2} // r_{o4})$$

$$A_2 = -g_{m6}(r_{o6} // r_{o7})$$



# Παράδειγμα ανάλυσης τελεστικού ενισχυτή MOS (1/3)

$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$	$Q_8$
20/0.8	20/0.8	5/0.8	5/0.8	40/0.8	10/0.8	40/0.8	40/0.8



$$I_{REF} = 90 \mu\text{A}, V_{tn} = 0.7 \text{ V}, V_{tp} = -0.8 \text{ V},$$

$$\mu_n C_{ox} = 160 \mu\text{A/V}^2, \mu_p C_{ox} = 40 \mu\text{A/V}^2,$$

$$|V_A| = 10 \text{ V}, V_{DD} = V_{SS} = 2.5 \text{ V}.$$

Ζητούνται για όλα τα τρανζίστορ τα  $I_D$ ,  $|V_{OV}|$ ,  $|V_{GS}|$ ,  $g_m$  και  $r_o$ . Να υπολογιστούν επίσης τα κέρδη  $A_1$ ,  $A_2$ , το dc κέρδος τάσης ανοικτού βρόχου  $A_0$ , η περιοχή κοινού σήματος εισόδου και το εύρος τάσης εξόδου. Να αγνοηθεί η επίδραση της  $V_A$  στο ρεύμα πόλωσης.

$$Q_8 = Q_5 = Q_7 \Rightarrow I = I_{REF} = I_{D7} = I_{D6} = 90 \mu\text{A}$$

$$I_D = \frac{1}{2} (\mu C_{ox}) (W/L) V_{OV}^2$$

$$|V_{GS}| = |V_t| + |V_{OV}|$$

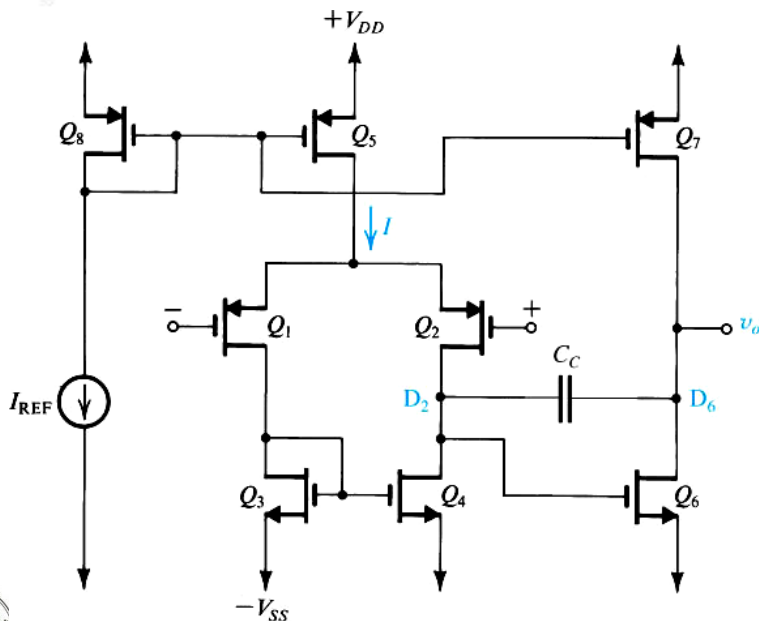
$$g_m = 2I_D / |V_{OV}|$$

$$r_o = |V_A| / I_D$$



# Παράδειγμα ανάλυσης τελεστικού ενισχυτή MOS (2/3)

	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$	$Q_8$
$I_D$ ( $\mu\text{A}$ )	45	45	45	45	90	90	90	90
$ V_{OV} $ (V)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
$ V_{GS} $ (V)	1.1	1.1	1	1	1.1	1	1.1	1.1
$g_m$ (mA/V)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6
$r_o$ (k $\Omega$ )	222	222	222	222	111	111	111	111



$$A_1 = -g_{m1}(r_{o2} \parallel r_{o4})$$

$$= -0.3(222 \parallel 222) = -33.3 \text{ V/V}$$

$$A_2 = -g_{m6}(r_{o6} \parallel r_{o7})$$

$$= -0.6(111 \parallel 111) = -33.3 \text{ V/V}$$

$$A_0 = A_1 A_2 = (-33.3) \times (-33.3) = 1109 \text{ V/V}$$

$$20 \log 1109 = 61 \text{ dB}$$



# Παράδειγμα ανάλυσης τελεστικού ενισχυτή MOS (3/3)

	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>
I <sub>D</sub> (μA)	45	45	45	45	90	90	90	90
V <sub>OV</sub>   (V)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
V <sub>GS</sub>   (V)	1.1	1.1	1	1	1.1	1	1.1	1.1
g <sub>m</sub> (mA/V)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6
r <sub>o</sub> (kΩ)	222	222	222	222	111	111	111	111

Για την είσοδο:

$$V_{D1} = V_{SS} + V_{GS3} = -2.5 + 1 = -1.5 \text{ V}$$

Για παραμονή του Q1 στον κορεσμό πρέπει:

$$V_{DS1} < V_{GS1} - V_{tp} \Rightarrow V_{D1} < V_{G1} - V_{tp} \Rightarrow u_{iCMmin} = V_{D1} + V_{tp} = -1.5 - 0.8 = -2.3 \text{ V.}$$

Για παραμονή του Q5 στον κορεσμό πρέπει:

$$V_{SD5} \geq V_{OV5} \Rightarrow V_{D5} \leq 2.5 - 0.3 = 2.2 \text{ V} \Rightarrow u_{iCMmax} = V_{D5max} - V_{GS1} = 2.2 - 1.1 = 1.1 \text{ V.}$$

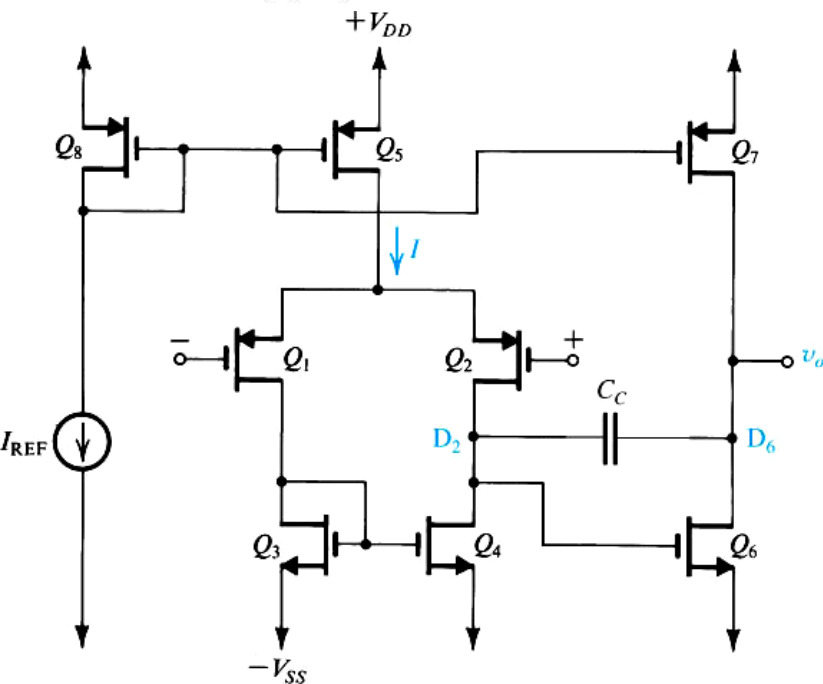
Για την έξοδο:

Για παραμονή του Q7 στον κορεσμό πρέπει:

$$V_{SD7} \geq V_{OV7} \Rightarrow V_{D7} \leq 2.5 - 0.3 = 2.2 \text{ V}$$

Για παραμονή του Q6 στον κορεσμό πρέπει:

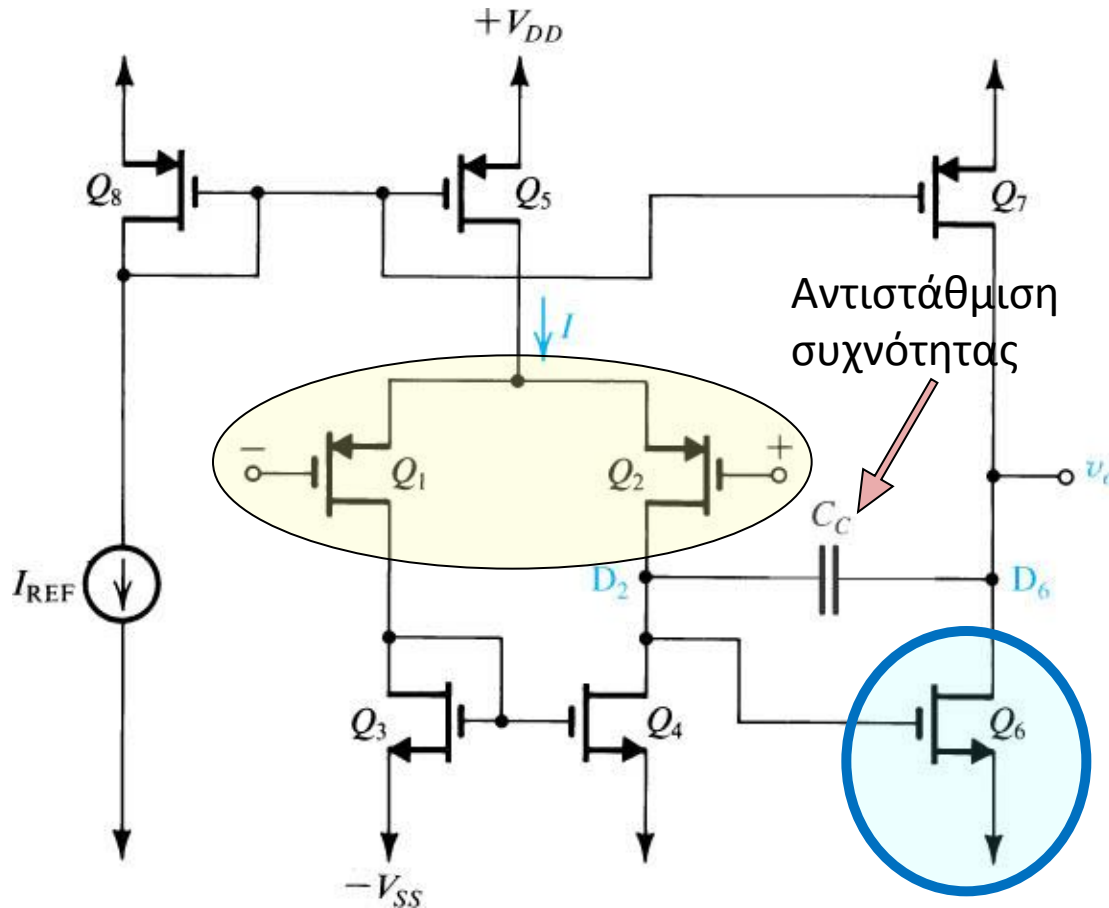
$$V_{DS6} \geq V_{OV6} \Rightarrow V_{D6} \geq -2.5 + 0.3 = -2.2 \text{ V}$$





# Τελεστικός ενισχυτής δύο βαθμίδων

## Τάση εκτροπής εισόδου



Για γειωμένες εισόδους:

$$I_6 = \frac{(W/L)_6}{(W/L)_4} (I/2)$$

$$I_7 = \frac{(W/L)_7}{(W/L)_5} I$$

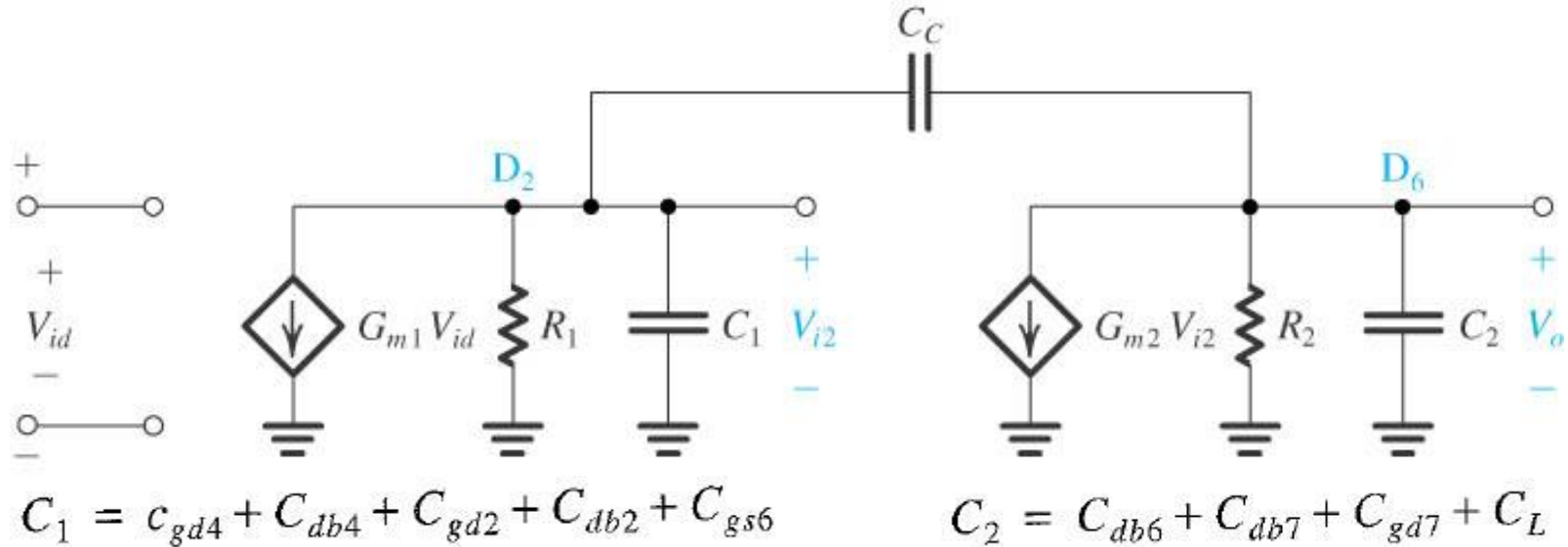
Πρέπει  $I_6 = I_7$  άρα:

$$\frac{(W/L)_6}{(W/L)_4} = 2 \frac{(W/L)_7}{(W/L)_5}$$



# Τελεστικός ενισχυτής δύο βαθμίδων

## Απόκριση συχνότητας (1/2)



$$G_{m1} V_{id} + \frac{V_{i2}}{R_1} + sC_1 V_{i2} + sC_C (V_{i2} - V_o) = 0 \quad G_{m2} V_{i2} + \frac{V_o}{R_2} + sC_2 V_o + sC_C (V_o - V_{i2}) = 0$$

$$\frac{V_o}{V_{id}} = \frac{G_{m1} (G_{m2} - sC_C) R_1 R_2}{1 + s[C_1 R_1 + C_2 R_2 + C_C (G_{m2} R_1 R_2 + R_1 + R_2)] + s^2 [C_1 C_2 + C_C (C_1 + C_2)] R_1 R_2}$$



# Τελεστικός ενισχυτής δύο βαθμίδων

## Απόκριση συχνότητας (2/2)

$$\frac{V_o}{V_{id}} = \frac{G_{m1}(G_{m2} - sC_C)R_1R_2}{1 + s[C_1R_1 + C_2R_2 + C_C(G_{m2}R_1R_2 + R_1 + R_2)] + s^2[C_1C_2 + C_C(C_1 + C_2)]R_1R_2}$$

Μηδενικό:  $\omega_Z = \frac{G_{m2}}{C_C}$

Πόλοι:  $D(s) = \left(1 + \frac{s}{\omega_{P1}}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_{P2}}\right)$

$$= 1 + s\left(\frac{1}{\omega_{P1}} + \frac{1}{\omega_{P2}}\right) + \frac{s^2}{\omega_{P1}\omega_{P2}}$$

$$\omega_{P1} = \frac{1}{C_1R_1 + C_2R_2 + C_C(G_{m2}R_2R_1 + R_1 + R_2)}$$

$$= \frac{1}{R_1[C_1 + C_C(1 + G_{m2}R_2)] + R_2(C_2 + C_C)}$$

$$\cong \frac{1}{R_1[C_1 + C_C(1 + G_{m2}R_2)]} \cong \frac{1}{R_1C_CG_{m2}R_2}$$

Για  $\omega_{P2} \gg \omega_{P1}$  θα είναι:

$$D(s) \cong 1 + \frac{s}{\omega_{P1}} + \frac{s^2}{\omega_{P1}\omega_{P2}}$$

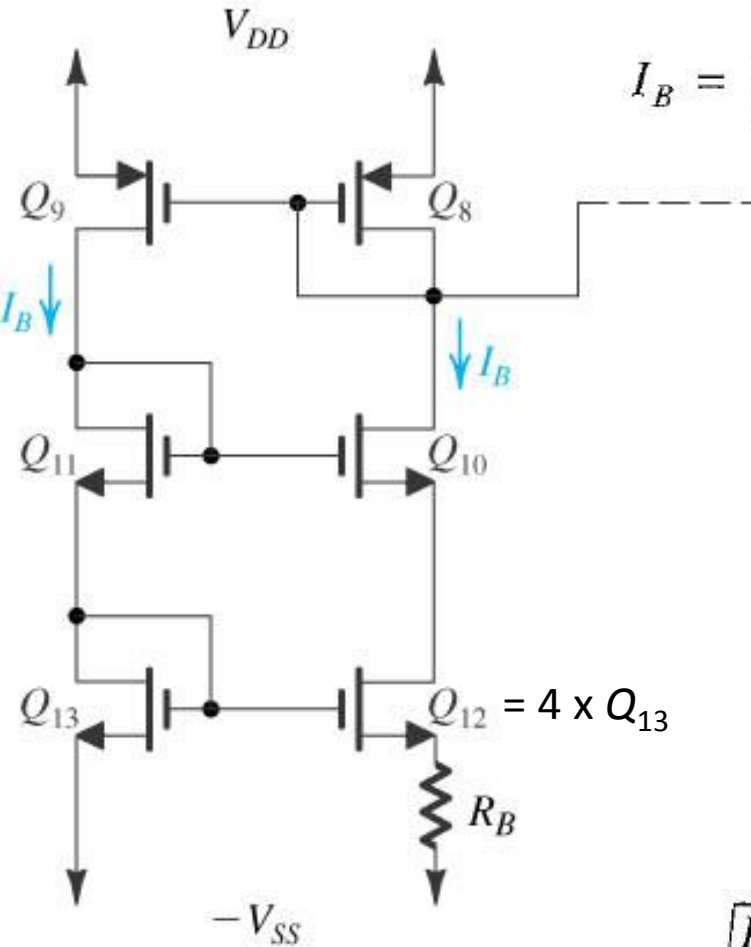
$$\omega_{P2} = \frac{G_{m2}C_C}{C_1C_2 + C_C(C_1 + C_2)} \cong \frac{G_{m2}}{C_2}$$

$$\omega_t = (G_{m1}R_1G_{m2}R_2)\omega_{P1} = \frac{G_{m1}}{C_C}$$

Επιλογή  $C_C$  ώστε  $\omega_t < \omega_Z, \omega_{P2}$



# Κύκλωμα πόλωσης του τελεστικού ενισχυτή



$$I_B = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right)_{12} (V_{GS12} - V_t)^2 = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right)_{13} (V_{GS13} - V_t)^2$$

$$V_{GS13} = V_{GS12} + I_B R_B$$

$$\sqrt{\frac{2I_B}{\mu_n C_{ox} (W/L)_{13}}} = \sqrt{\frac{2I_B}{\mu_n C_{ox} (W/L)_{12}}} + I_B R_B$$

$$I_B = \frac{2}{\mu_n C_{ox} (W/L)_{12} R_B^2} \left( \sqrt{\frac{(W/L)_{12}}{(W/L)_{13}}} - 1 \right)^2$$

$$R_B = \frac{2}{\sqrt{2\mu_n C_{ox} (W/L)_{12} I_B}} \left( \sqrt{\frac{(W/L)_{12}}{(W/L)_{13}}} - 1 \right)$$

$$g_{m12} = \frac{2}{R_B} \left( \sqrt{\frac{(W/L)_{12}}{(W/L)_{13}}} - 1 \right)$$

$$g_{mi} = g_{m12} \sqrt{\frac{I_{Di} (W/L)_i}{I_B (W/L)_{12}}}$$

$$g_{mi} = g_{m12} \sqrt{\frac{\mu_p I_{Di} (W/L)_i}{\mu_n I_B (W/L)_{12}}}$$



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Χατζόπουλος Αλκιβιάδης. «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΙΙ, Πολυβάθμιοι ενισχυτές». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: [http://opencourses.auth.gr/eclass\\_courses](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



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



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.

