

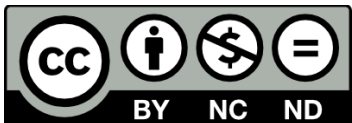


# ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΙΙ

Ενότητα 4: Ενισχυτές στις υψηλές συχνότητες

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





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΑΝΟΙΚΤΑ  
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΑ  
ΜΑΘΗΜΑΤΑ



# ΕΝΙΣΧΥΤΕΣ ΣΤΙΣ ΥΨΗΛΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



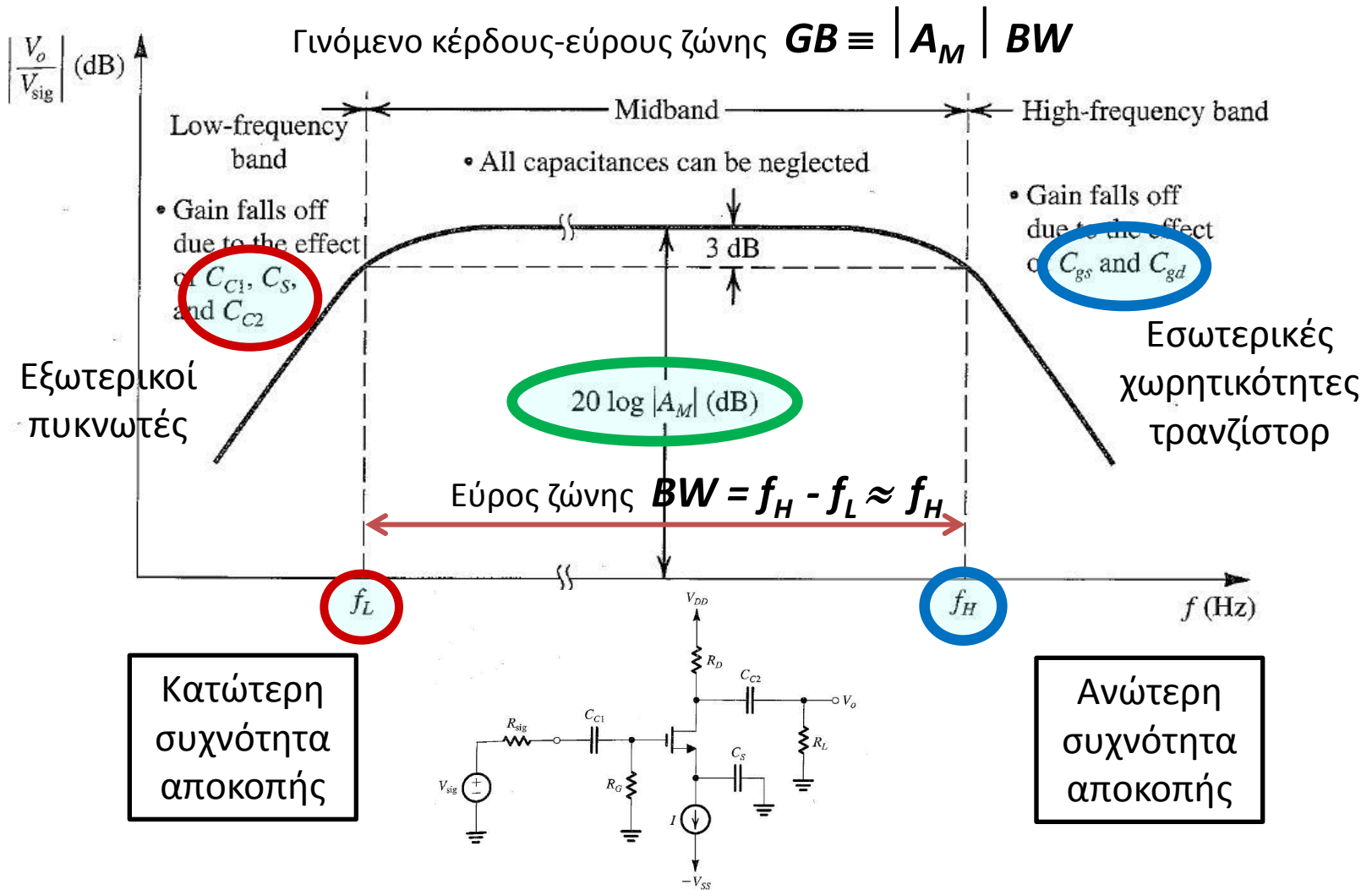
ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

# Περιεχόμενα ενότητας

1. Απόκριση συχνότητας- μέθοδοι υπολογισμού ανώτερης συχνότητας αποκοπής  $f_H$  – ισοδύναμα (διαφ. 7- 13)
2. Απόκριση ενισχυτή κοινής πηγής σε υψηλές συχνότητες (διαφ. 14- 25)
3. Απόκριση ενισχυτή κοινής πύλης και κοινής εκροής σε υψηλές συχνότητες (διαφ. 26- 28)
4. Απόκριση ενισχυτή κοινού εκπομπού σε υψηλές συχνότητες (διαφ. 29- 36)
5. Απόκριση ενισχυτή κοινού συλλέκτη σε υψηλές συχνότητες (διαφ. 37- 38)



# Απόκριση συχνότητας ενισχυτών



# Εύρεση συχνότητας αποκοπής $f_H$ με χρήση πόλων της συνάρτησης κέρδου

$$A(s) = A_M F_H(s) \quad F_H(s) = \frac{(1 + s/\omega_{Z1})(1 + s/\omega_{Z2}) \dots (1 + s/\omega_{Zn})}{(1 + s/\omega_{P1})(1 + s/\omega_{P2}) \dots (1 + s/\omega_{Pn})}$$

Υπαρξη επικρατούντος πόλου:  $F_H(s) \cong \frac{1}{1 + s/\omega_{P1}} \Rightarrow \omega_H \cong \omega_{P1}$

Μη ύπαρξη επικρατούντος πόλου: ανάλυση για 2 πόλους και 2 μηδενικά.

$$F_H(s) = \frac{(1 + s/\omega_{Z1})(1 + s/\omega_{Z2})}{(1 + s/\omega_{P1})(1 + s/\omega_{P2})}$$

$$|F_H(j\omega)|^2 = \frac{(1 + \omega^2/\omega_{Z1}^2)(1 + \omega^2/\omega_{Z2}^2)}{(1 + \omega^2/\omega_{P1}^2)(1 + \omega^2/\omega_{P2}^2)}$$

Για  $\omega = \omega_H$  είναι  $|F_H|^2 = 1/2$ , οπότε:

$$\frac{1}{2} = \frac{(1 + \omega_H^2/\omega_{Z1}^2)(1 + \omega_H^2/\omega_{Z2}^2)}{(1 + \omega_H^2/\omega_{P1}^2)(1 + \omega_H^2/\omega_{P2}^2)}$$

$$= \frac{1 + \omega_H^2 \left( \frac{1}{\omega_{Z1}^2} + \frac{1}{\omega_{Z2}^2} \right) + \omega_H^4 / \omega_{Z1}^2 \omega_{Z2}^2}{1 + \omega_H^2 \left( \frac{1}{\omega_{P1}^2} + \frac{1}{\omega_{P2}^2} \right) + \omega_H^4 / \omega_{P1}^2 \omega_{P2}^2} \Rightarrow \omega_H \cong 1 / \sqrt{\frac{1}{\omega_{P1}^2} + \frac{1}{\omega_{P2}^2} - \frac{2}{\omega_{Z1}^2} - \frac{2}{\omega_{Z2}^2}}$$

Προσέγγιση για πλήθος πόλων-μηδενικών:

$$\omega_H \cong 1 / \sqrt{\left( \frac{1}{\omega_{P1}^2} + \frac{1}{\omega_{P2}^2} + \dots \right) - 2 \left( \frac{1}{\omega_{Z1}^2} + \frac{1}{\omega_{Z2}^2} + \dots \right)}$$





# Εύρεση συχνότητας αποκοπής $f_H$ με χρήση σταθερών χρόνου ανοικτού κυκλώματος

$$A(s) = A_M F_H(s) \quad F_H(s) = \frac{(1 + s/\omega_{z1})(1 + s/\omega_{z2}) \dots (1 + s/\omega_{zn})}{(1 + s/\omega_{p1})(1 + s/\omega_{p2}) \dots (1 + s/\omega_{pn})}$$

Όταν πόλοι-μηδενικά δεν υπολογίζονται εύκολα τότε:

$$F_H(s) = \frac{1 + a_1 s + a_2 s^2 + \dots + a_n s^n}{1 + b_1 s + b_2 s^2 + \dots + b_n s^n}$$

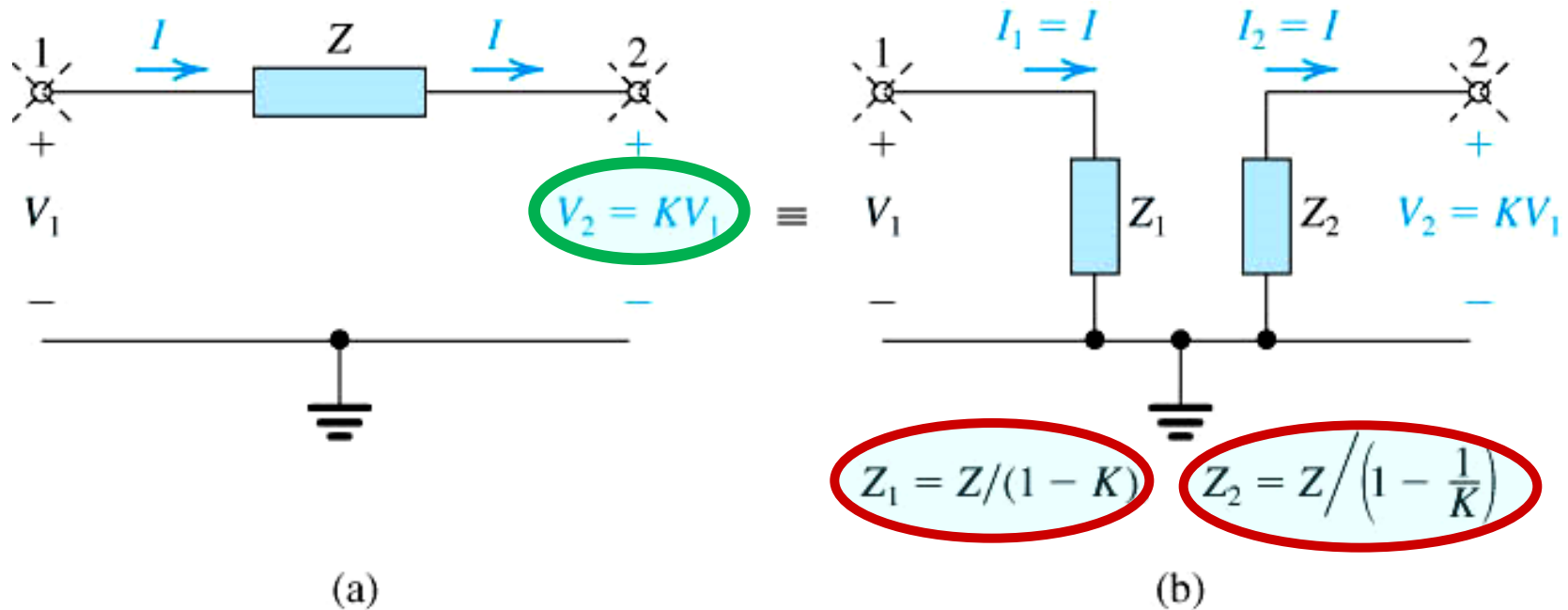
όπου: 
$$b_1 = \frac{1}{\omega_{p1}} + \frac{1}{\omega_{p2}} + \dots + \frac{1}{\omega_{pn}}$$

$$b_1 = \sum_{i=1}^n C_i R_{io}, \quad \text{όπου } C_i R_{io} \text{ οι σταθερές χρόνου ανοικτού κυκλώματος}$$

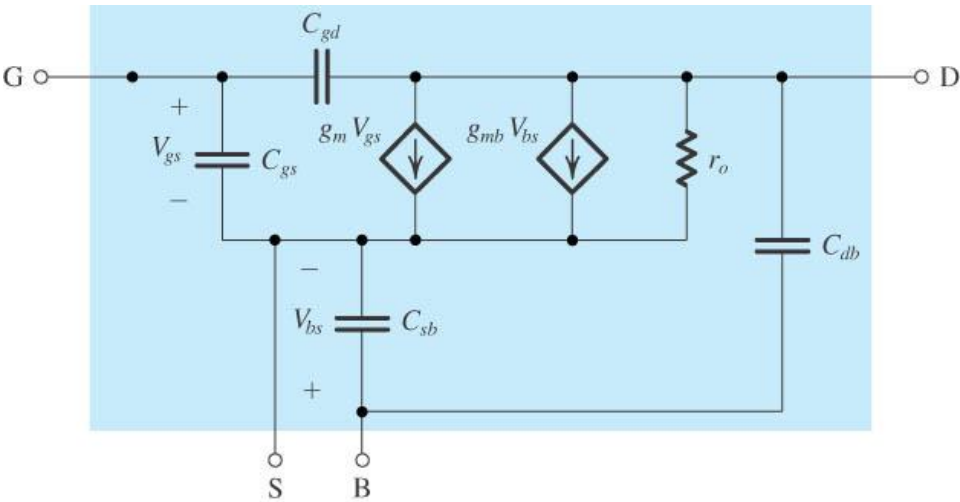
Προσέγγιση: 
$$b_1 \approx \frac{1}{\omega_{p1}} \Rightarrow \omega_H \approx \frac{1}{b_1} = \frac{1}{[\sum_i C_i R_{io}]}$$



# Θεώρημα Miller



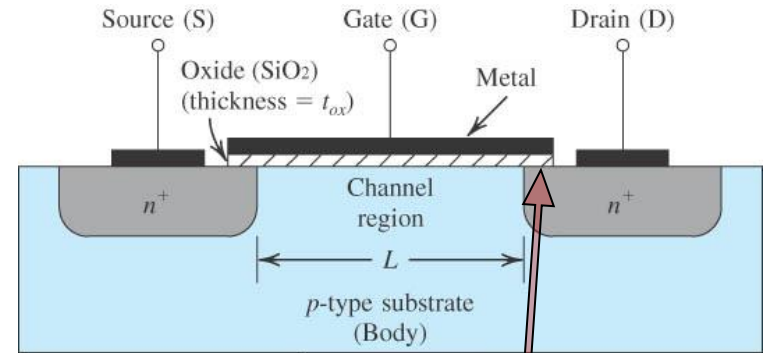
# Ισοδύναμο κύκλωμα του MOS στις υψηλές συχνότητες



$$C_{gs} = C_{gd} = \frac{1}{2}WL C_{ox} \quad \text{Τριοδική περιοχή}$$

$$\left. \begin{aligned} C_{gs} &= \frac{2}{3}WL C_{ox} \\ C_{gd} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{Περιοχή κορεσμού}$$

$$\left. \begin{aligned} C_{gs} &= C_{gd} = 0 \\ C_{gb} &= WL C_{ox} \end{aligned} \right\} \text{Περιοχή αποκοπής}$$



$$C_{ov} = WL_{ov} C_{ox}$$

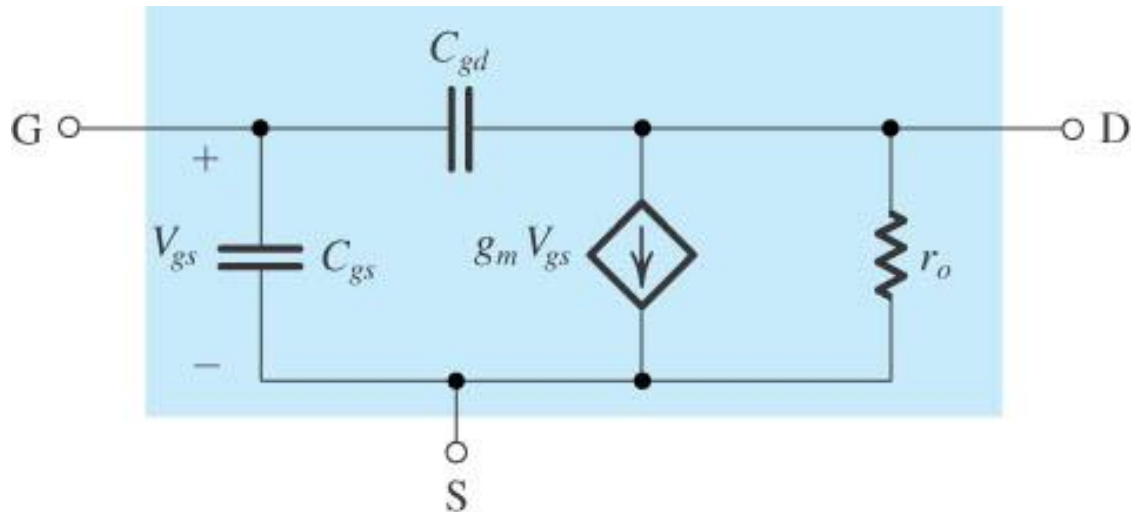
$$C_{sb} = \frac{C_{sb0}}{\sqrt{1 + \frac{V_{SB}}{V_0}}}$$

$$C_{db} = \frac{C_{db0}}{\sqrt{1 + \frac{V_{DB}}{V_0}}}$$

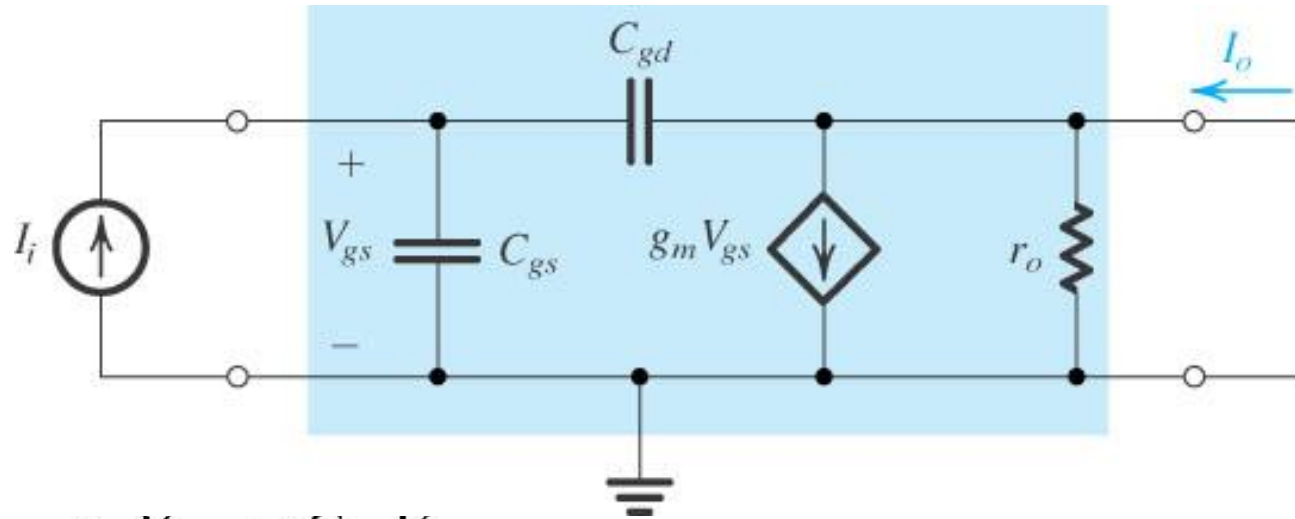


# Απλοποιημένο ισοδύναμο στις υψηλές συχνότητες

Για  $V_{SB} = 0$  και  $C_{db}$  αμελητέα:



# Συχνότητα μοναδιαίου κέρδους του MOS ( $f_T$ )



$$I_o = g_m V_{gs} - sC_{gd} V_{gs}$$

$$I_o \simeq g_m V_{gs}$$

$$V_{gs} = I_i / s(C_{gs} + C_{gd})$$

$$\frac{I_o}{I_i} = \frac{g_m}{s(C_{gs} + C_{gd})}$$

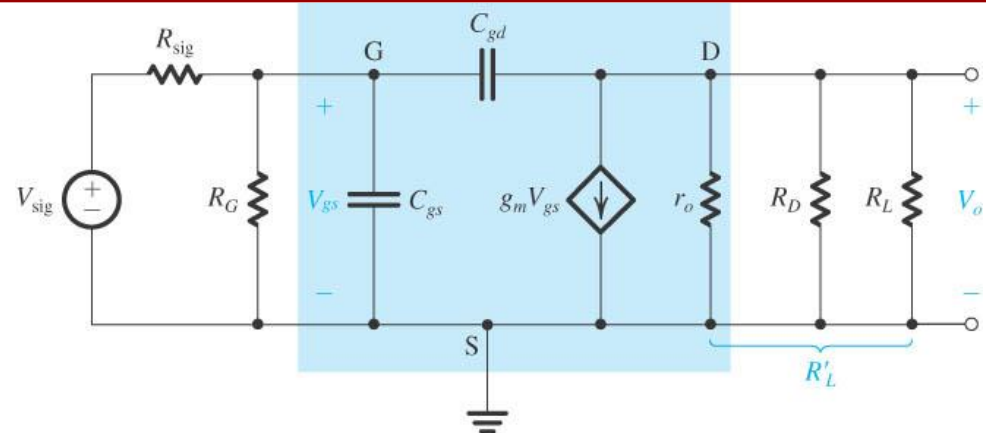
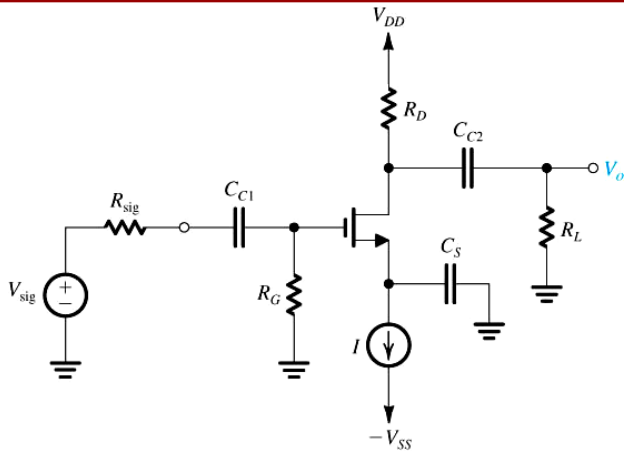
Για μοναδιαίο κέρδος ( $I_o/I_i=1$ ):

$$\omega_T = g_m / (C_{gs} + C_{gd})$$

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_{gs} + C_{gd})}$$



# Απόκριση ενισχυτή κοινής πηγής στις υψηλές συχνότητες (1/2)

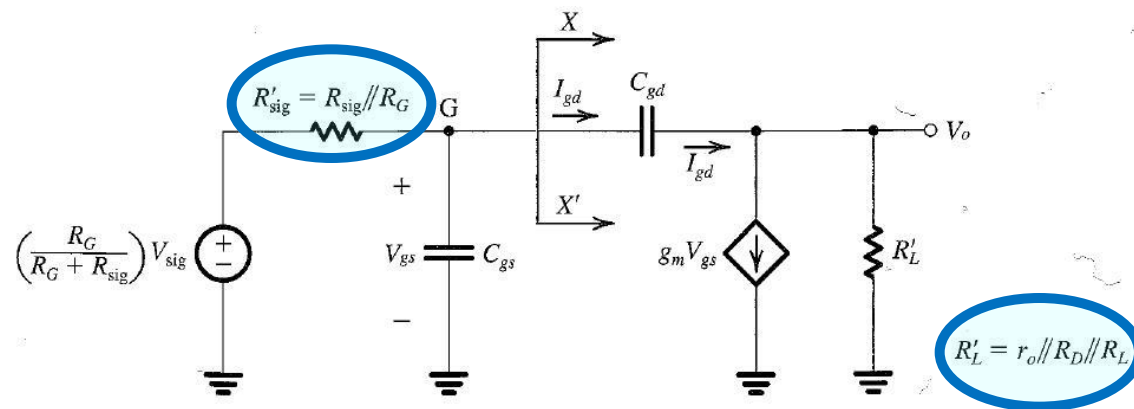


$$A_M \equiv \frac{V_o}{V_{sig}} = -\frac{R_G}{R_G + R_{sig}} g_m (r_o \parallel R_D \parallel R_L)$$

$$I_{gd} = sC_{gd}(V_{gs} - V_o)$$

$$= sC_{gd}[V_{gs} - (-g_m R'_L V_{gs})]$$

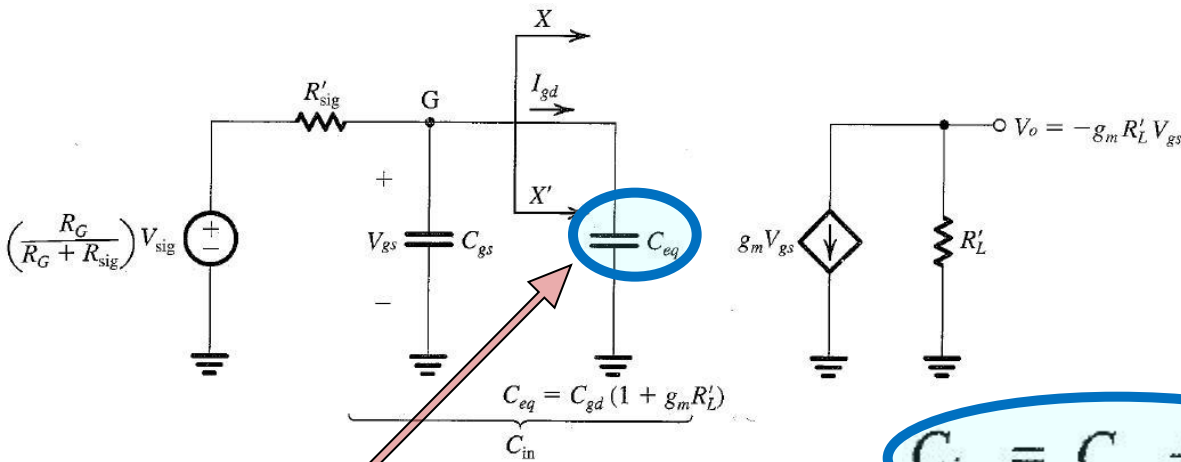
$$= sC_{gd}(1 + g_m R'_L)V_{gs}$$



$$V_o \cong -(g_m V_{gs})R'_L = -g_m R'_L V_{gs}$$



# Απόκριση ενισχυτή κοινής πηγής στις υψηλές συχνότητες (2/2)



$$C_{eq} = C_{gd}(1 + g_m R'_L)$$

$$V_{gs} = \left( \frac{R_G}{R_G + R_{sig}} V_{sig} \right) \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_0}}$$

$$\omega_0 = 1 / C_{in} R'_{sig}$$

$$C_{in} = C_{gs} + C_{eq} = C_{gs} + C_{gd}(1 + g_m R'_L)$$

Χωρητικότητα Miller

$$\frac{V_o}{V_{sig}} = - \left( \frac{R_G}{R_G + R_{sig}} \right) (g_m R'_L) \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_0}} = \frac{A_M}{1 + \frac{s}{\omega_H}}$$

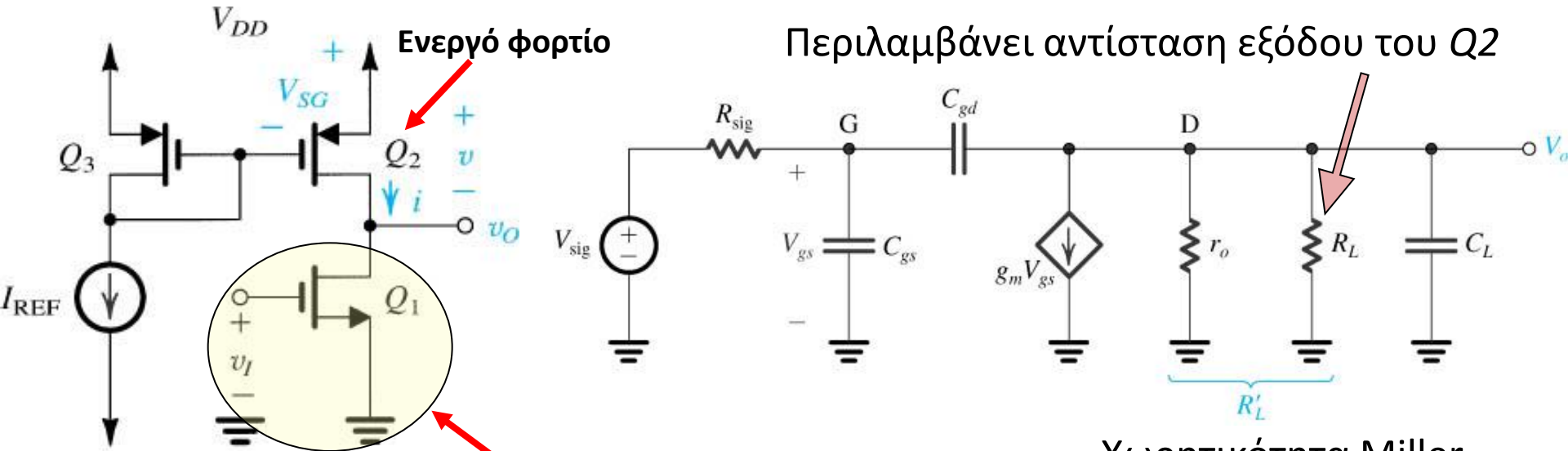
$$\omega_H = \omega_0 = \frac{1}{C_{in} R'_{sig}}$$

Επίδραση αντίστασης πηγής σήματος

$$f_H = \frac{\omega_H}{2\pi} = \frac{1}{2\pi C_{in} R'_{sig}}$$



# Απόκριση ενισχυτή κοινής πηγής με ενεργό φορτίο στις υψηλές συχνότητες (χρήση θεωρ. Miller)



Βαθμίδα ενισχυτή κοινής πηγής

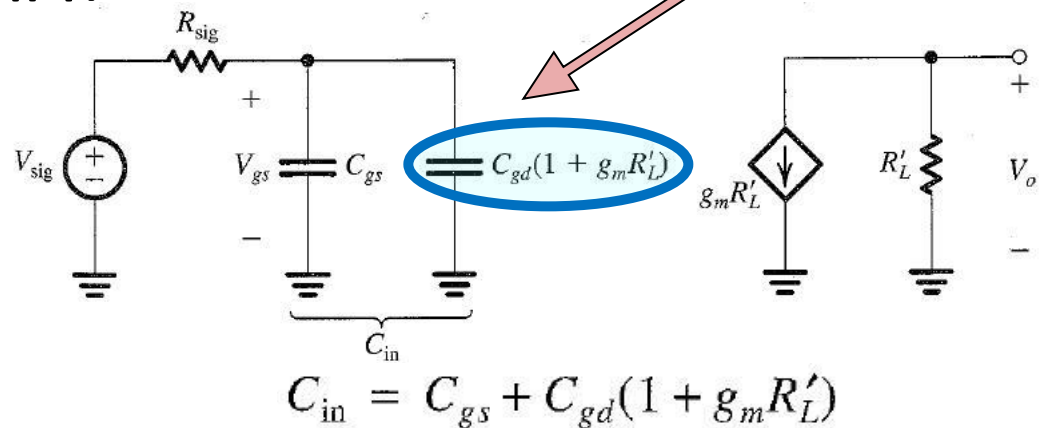
$$\frac{V_o}{V_{sig}} \cong \frac{A_M}{1 + \frac{s}{\omega_H}}$$

$$A_M = -g_m R'_L$$

$$f_H = \omega_H / 2\pi$$

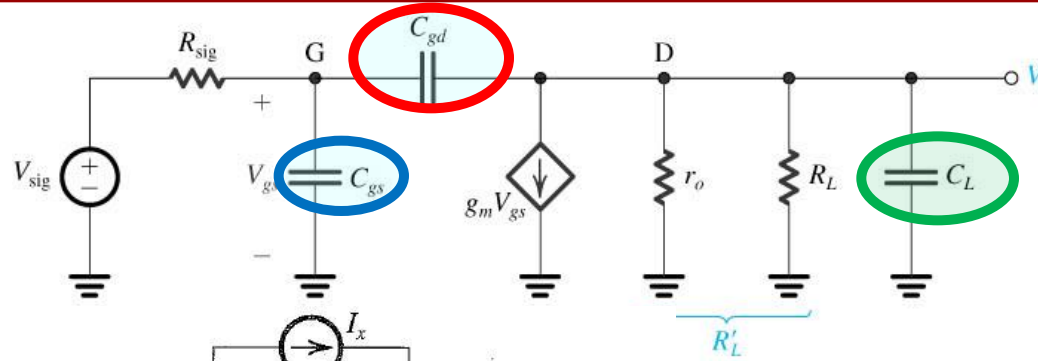
$$f_H = \frac{1}{2\pi C_{in} R_{sig}}$$

Χωρητικότητα Miller



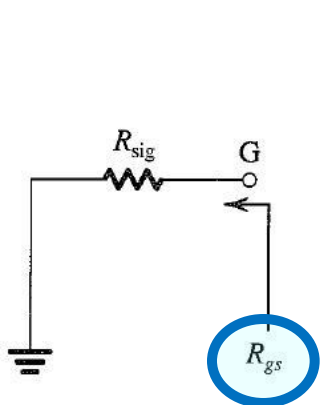


# Απόκριση ενισχυτή κ. πηγής με ενεργό φορτίο στις υψηλές συχνότητες (χρήση σταθερών χρόνου ανοικτού κυκλώματος)



$$\tau_H = C_{gs}R_{gs} + C_{gd}R_{gd} + C_L R_{C_L}$$

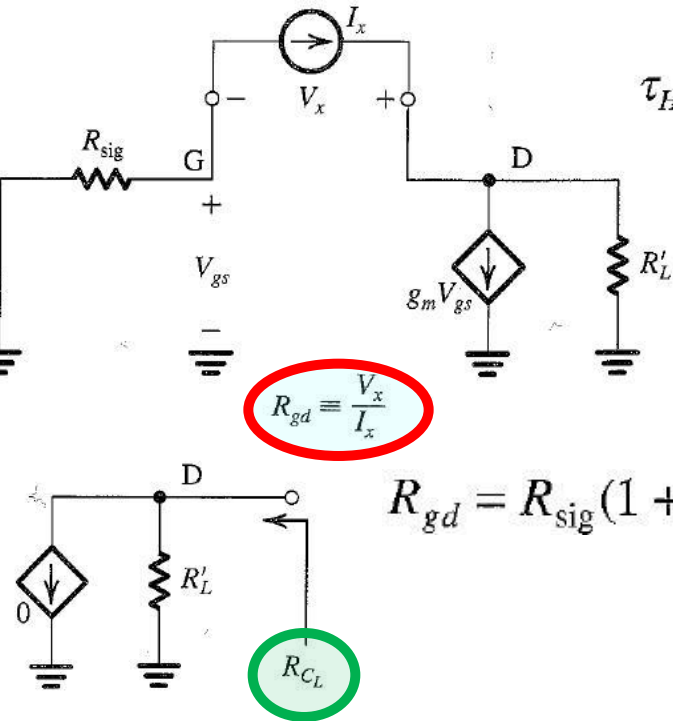
$$= C_{gs}R_{sig} + C_{gd}[R_{sig}(1 + g_m R'_L) + R'_L] + C_L R'_L$$



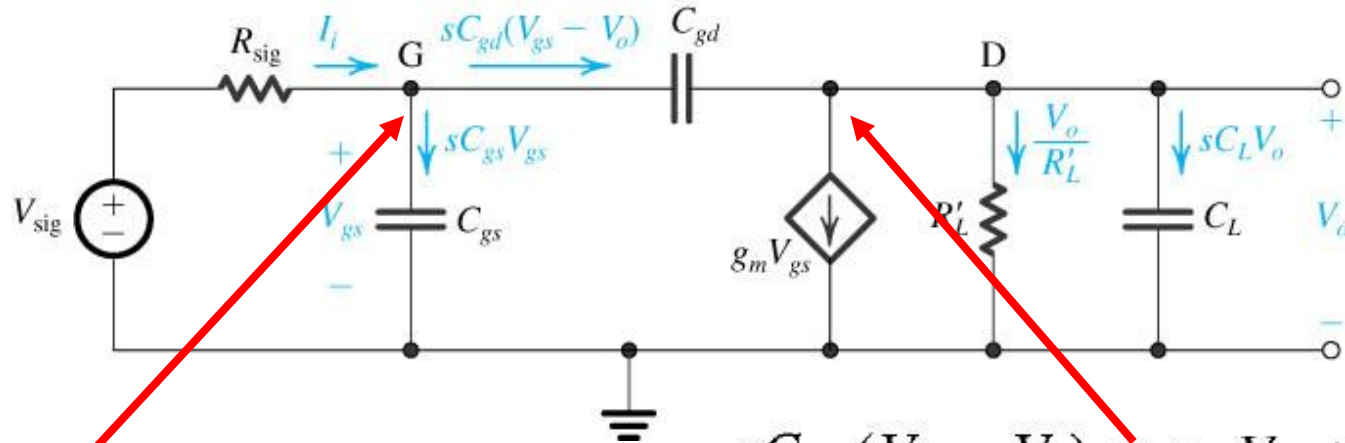
$$R_{gd} \equiv \frac{V_x}{I_x}$$

$$R_{gd} = R_{sig}(1 + g_m R'_L) + R'_L$$

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



# Απόκριση ενισχυτή κ. πηγής με ενεργό φορτίο στις υψηλές συχνότητες (χρήση πλήρους συνάρτησης μεταφοράς) (1/2)



$$sC_{gd}(V_{gs} - V_o) = g_m V_{gs} + \frac{V_o}{R'_L} + sC_L V_o$$

$$V_{sig} = I_i R_{sig} + V_{gs} \quad \text{and} \quad V_{gs} = \frac{-V_o}{g_m R'_L} \frac{1 + s(C_L + C_{gd})R'_L}{1 - sC_{gd}/g_m}$$

$$V_{sig} = V_{gs} [1 + s(C_{gs} + C_{gd})R_{sig}] - sC_{gd}R_{sig}V_o$$

$$\frac{V_o}{V_{sig}} = \frac{-(g_m R'_L) [1 - s(C_{gd}/g_m)]}{1 + s\{[C_{gs} + C_{gd}(1 + g_m R'_L)]R_{sig} + (C_L + C_{gd})R'_L\} + s^2[(C_L + C_{gd})C_{gs} + C_L C_{gd}]R_{sig}R'_L}$$



# Απόκριση ενισχυτή κ. πηγής με ενεργό φορτίο στις υψηλές συχνότητες (χρήση πλήρους συνάρτησης μεταφοράς) (2/2)

$$\frac{V_o}{V_{sig}} = \frac{-(g_m R'_L) [1 - s(C_{gd}/g_m)]}{1 + s\{[C_{gs} + C_{gd}(1 + g_m R'_L)]R_{sig} + (C_L + C_{gd})R'_L\} + s^2[(C_L + C_{gd})C_{gs} + C_L C_{gd}]R_{sig}R'_L}$$

Μηδενικό:  $s = s_Z = \frac{g_m}{C_{gd}}$   $\omega_Z = g_m / C_{gd}$

Πόλοι:  $D(s) = \left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{p2}}\right)$

Για  $\omega_{p2} \gg \omega_{p1}$  θα είναι:

$$= 1 + s \left( \frac{1}{\omega_{p1}} + \frac{1}{\omega_{p2}} \right) + \frac{s^2}{\omega_{p1} \omega_{p2}}$$

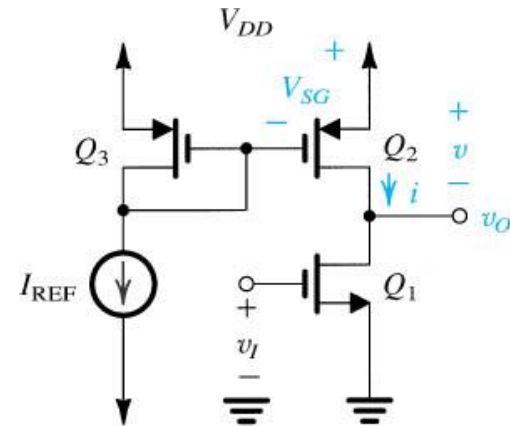
$$D(s) \cong 1 + \frac{s}{\omega_{p1}} + \frac{s^2}{\omega_{p1} \omega_{p2}}$$

$$\omega_{p1} \cong \frac{1}{[C_{gs} + C_{gd}(1 + g_m R'_L)]R_{sig} + (C_L + C_{gd})R'_L}$$

$$\omega_{p2} = \frac{[C_{gs} + C_{gd}(1 + g_m R'_L)]R_{sig} + (C_L + C_{gs})R'_L}{[(C_L + C_{gd})C_{gs} + C_L C_{gd}]R'_L R_{sig}}$$



# Παράδειγμα υπολογισμού συχνότητας αποκοπής $f_H$ ενισχυτή κοινής πηγής με ενεργό φορτίο (1/3)



Ο ενισχυτής έχει:  $W/L=7.2 \mu\text{m}/0.36\mu\text{m}$  για όλα τα Q,  $\mu_n C_{ox} = 387 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $\mu_p C_{ox} = 86 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $I_{REF} = 100 \mu\text{A}$ ,  $V'_{An} = 5 \text{ V}/\mu\text{m}$ ,  $|V'_{Ap}| = 6 \text{ V}/\mu\text{m}$ . Για το Q1 είναι:  $C_{gs} = 20 \text{ fF}$ ,  $C_{gd} = 5 \text{ fF}$ ,  $C_L = 25 \text{ fF}$ ,  $R_{sig} = 10 \text{ k}\Omega$ .

Ζητείται η συχνότητα αποκοπής  $f_H$  με προσέγγιση Miller, προσέγγιση σταθερών χρόνου ανοικτού κυκλώματος και με τη χρήση της πλήρους συνάρτησης κέρδους.

$$I_D = I_{REF} = 100 \mu\text{A} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right) V_{OV}^2 \Rightarrow V_{OV} = 0.16 \text{ V}$$

$$g_m = \frac{I_D}{V_{OV}/2} = \frac{100 \mu\text{A}}{(0.16/2) \text{ V}} = 1.25 \text{ mA/V}$$

$$r_{o1} = \frac{V_{An}}{I_D} = \frac{5 \times 0.36}{0.1} = 18 \text{ k}\Omega$$

$$r_{o2} = \frac{|V_{Ap}|}{I_D} = \frac{6 \times 0.36}{0.1} = 21.6 \text{ k}\Omega$$

$$R'_L = r_{o1} \parallel r_{o2} = 18 \parallel 21.6 = 9.82 \text{ k}\Omega$$

$$A_M = -g_m R'_L = -1.25 \times 9.82 = -12.3 \text{ V/V}$$

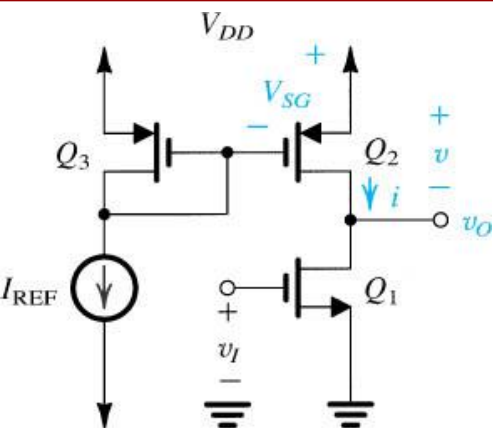
Προσέγγιση Miller :

$$C_{in} = C_{gs} + C_{gd}(1 + g_m R'_L) = 86.5 \text{ fF}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi C_{in} R_{sig}} = 184 \text{ MHz}$$



# Παράδειγμα υπολογισμού συχνότητας αποκοπής $f_H$ ενισχυτή κοινής πηγής με ενεργό φορτίο (2/3)



Ο ενισχυτής έχει:  $W/L=7.2 \mu\text{m}/0.36\mu\text{m}$  για όλα τα Q,  $\mu_n C_{ox} = 387 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $\mu_p C_{ox} = 86 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $I_{REF} = 100 \mu\text{A}$ ,  $V'_{An} = 5 \text{ V}/\mu\text{m}$ ,  $|V'_{Ap}| = 6 \text{ V}/\mu\text{m}$ . Για το Q1 είναι:  $C_{gs} = 20 \text{ fF}$ ,  $C_{gd} = 5 \text{ fF}$ ,  $C_L = 25 \text{ fF}$ ,  $R_{sig} = 10 \text{ k}\Omega$ .

Ζητείται η συχνότητα αποκοπής  $f_H$  με προσέγγιση Miller, προσέγγιση σταθερών χρόνου ανοικτού κυκλώματος και με τη χρήση της πλήρους συνάρτησης κέρδους.

Προσέγγιση σταθερών χρόνου ανοικτού κυκλώματος :

$$\tau_{gs} = C_{gs} R_{gs} = 20 \times 10^{-15} \times 10 \times 10^3 = 200 \text{ ps}$$

$$\tau_{gd} = C_{gd} R_{gd} = 5 \times 10^{-15} \times 142.8 \times 10^3 = 714 \text{ ps}$$

$$\tau_{C_L} = C_L R_{C_L} = 25 \times 10^{-15} \times 9.82 \times 10^3 = 246 \text{ ps}$$

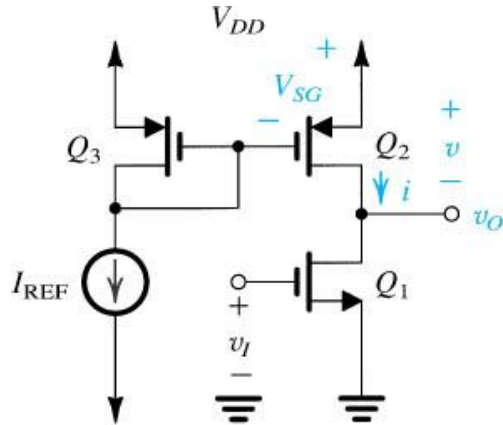
$$\tau_H = \tau_{gs} + \tau_{gd} + \tau_{C_L} = 1160 \text{ ps}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H} = \frac{1}{2\pi \times 1160 \times 10^{-12}} = 137 \text{ MHz}$$

-25% από την προσ. Miller, που αγνοεί την επίδραση της  $C_L$



# Παράδειγμα υπολογισμού συχνότητας αποκοπής $f_H$ ενισχυτή κοινής πηγής με ενεργό φορτίο (3/3)



Ο ενισχυτής έχει:  $W/L=7.2 \mu\text{m}/0.36\mu\text{m}$  για όλα τα Q,  $\mu_n C_{ox} = 387 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $\mu_p C_{ox} = 86 \mu\text{A}/\text{V}^2$ ,  $I_{REF} = 100 \mu\text{A}$ ,  $V'_{An} = 5 \text{ V}/\mu\text{m}$ ,  $|V'_{Ap}| = 6 \text{ V}/\mu\text{m}$ . Για το Q1 είναι:  $C_{gs} = 20 \text{ fF}$ ,  $C_{gd} = 5 \text{ fF}$ ,  $C_L = 25 \text{ fF}$ ,  $R_{sig} = 10 \text{ k}\Omega$ .

Ζητείται η συχνότητα αποκοπής  $f_H$  με προσέγγιση Miller, προσέγγιση σταθερών χρόνου ανοικτού κυκλώματος και με τη χρήση της πλήρους συνάρτησης κέρδους.

Ακριβής υπολογισμός με χρήση της συνάρτησης κέρδους:

Μηδενικό: 
$$f_z = \frac{1}{2\pi} \frac{g_m}{C_{gd}} = \frac{1}{2\pi} \frac{1.25 \times 10^{-3}}{5 \times 10^{-15}} = 40 \text{ GHz}$$

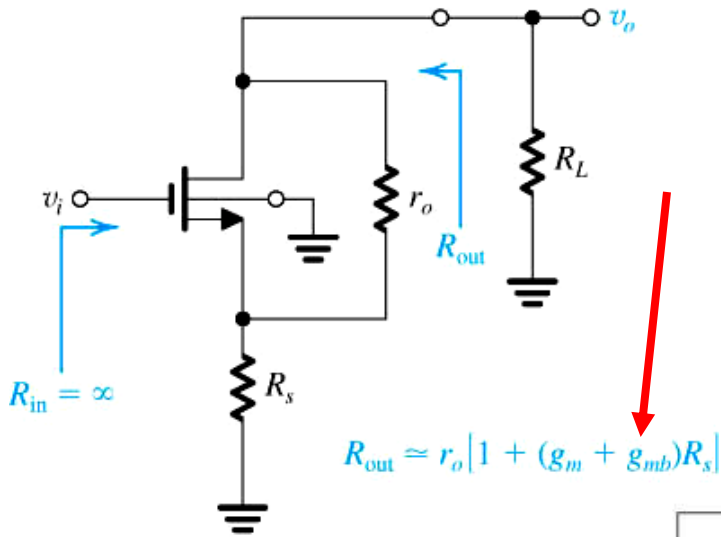
Πόλοι:  $f_{P1} = 145.3 \text{ MHz}$

$f_{P2} = 2.45 \text{ GHz}$

Μόνο 5% διαφορά από την προσ. με χρήση σταθερών χρόνου ανοικτού κυκλώματος



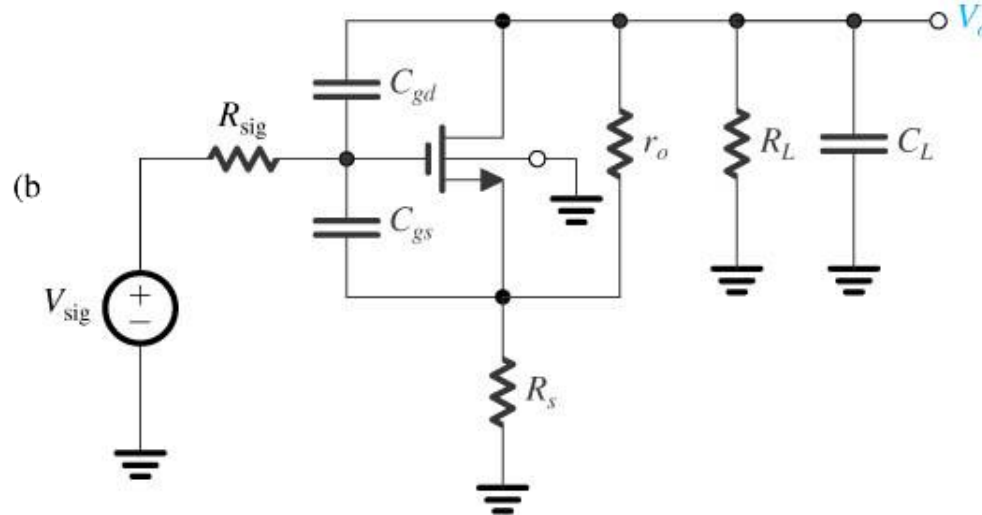
# Απόκριση ενισχυτή κ. πηγής με ενεργό φορτίο και αντίσταση πηγής $R_s$ στις υψηλές συχνότητες



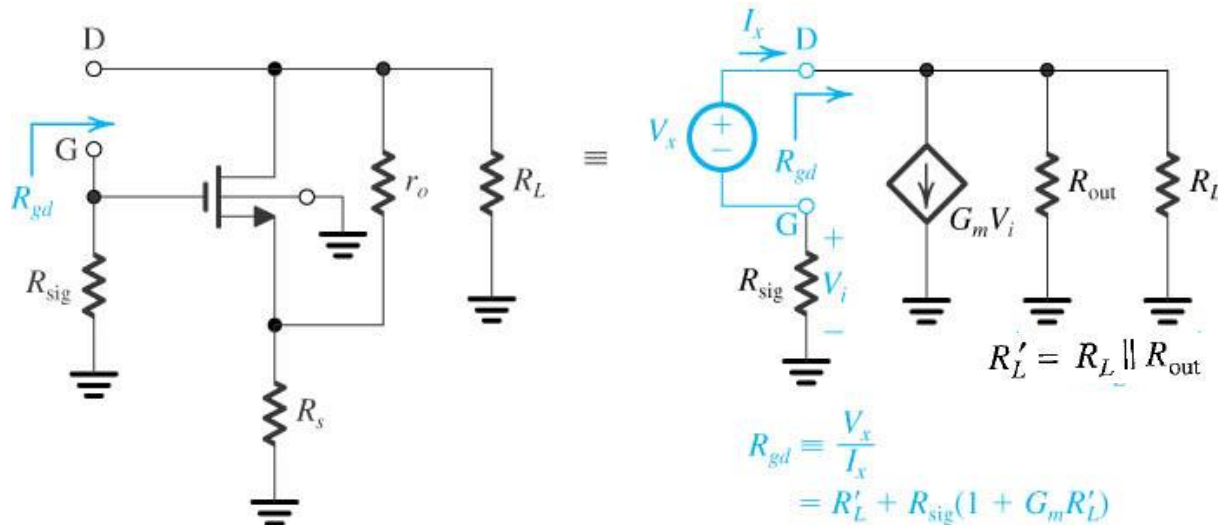
$$G_m = \frac{|A_{vo}|}{R_{out}} = \frac{g_m r_o}{r_o [1 + (g_m + g_{mb}) R_s]}$$

$$\frac{v_{gs}}{v_i} \cong \frac{1}{1 + (g_m + g_{mb}) R_s} \frac{R_L \parallel R_{out}}{R_L \parallel r_o}$$

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



# Απόκριση ενισχυτή κ. πηγής με ενεργό φορτίο και αντίσταση πηγής $R_s$ (χρήση σταθερών χρόνου ανοικτού κυκλώματος)



$$R_{gs} \cong \frac{R_{sig} + R_s}{1 + (g_m + g_{mb})R_s \left( \frac{r_o}{r_o + R_L} \right)}$$

$$R_{C_L} = R_L \parallel R_{out} = R'_L$$

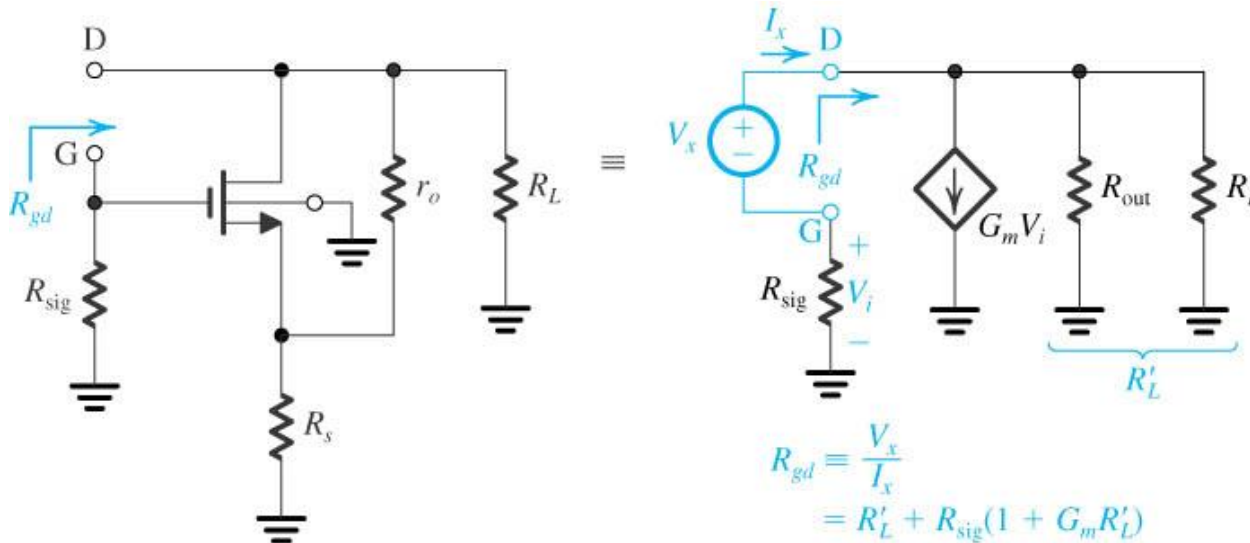
$$\tau_H = C_{gs} R_{gs} + C_{gd} R_{gd} + C_L R_{C_L} \cong C_{gd} R_{gd}$$

$$f_H \cong \frac{1}{2\pi C_{gd} R_{gd}}$$





# Απόκριση ενισχυτή κοινής πηγής με ενεργό φορτίο και αντίσταση πηγής $R_s$ (γινόμενο κέρδους-εύρους ζώνης)

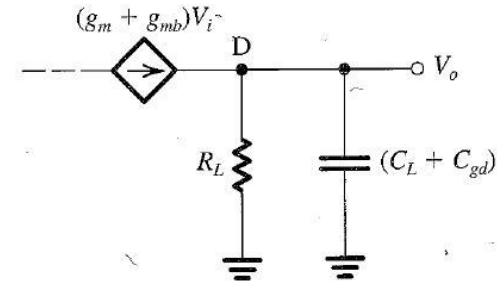
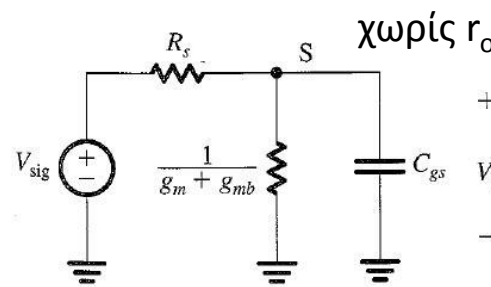
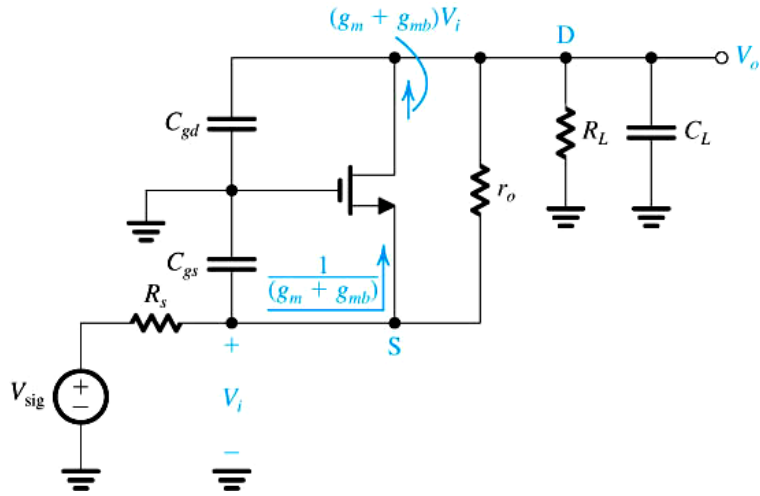


$$\left. \begin{array}{l} G_m R'_L \gg 1 \\ G_m R_{sig} \gg 1 \end{array} \right\} R_{gd} \cong G_m R'_L R_{sig} = |A_M| R_{sig}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi C_{gd} R_{sig} |A_M|}$$

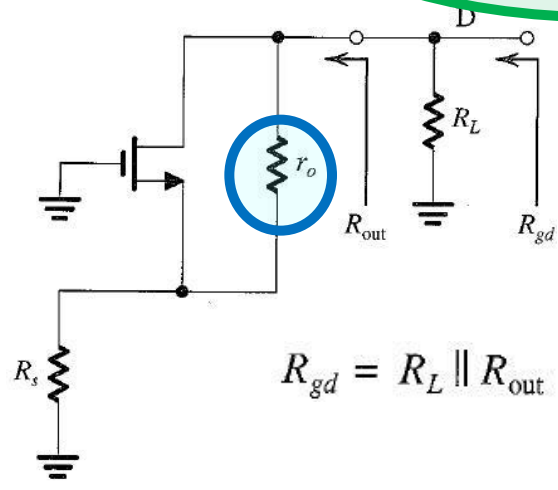
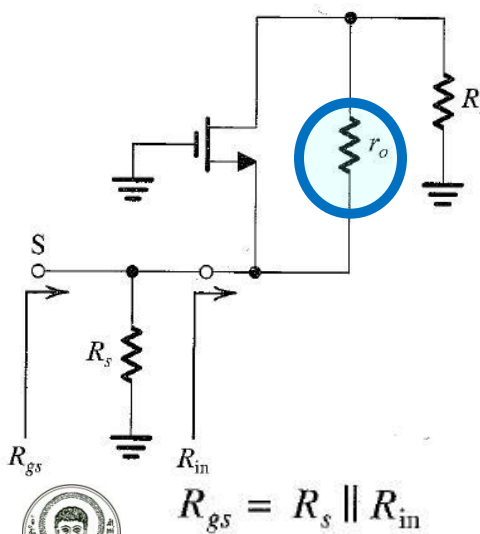
$$|A_M| f_H = \frac{1}{2\pi C_{gd} R_{sig}}$$

# Απόκριση ενισχυτή κοινής πύλης με ενεργό φορτίο στις υψηλές συχνότητες



$$f_{P1} = \frac{1}{2\pi C_{gs} \left( R_s \parallel \frac{1}{g_m + g_{mb}} \right)}$$

$$f_{P2} = \frac{1}{2\pi (C_{gd} + C_L) R_L}$$



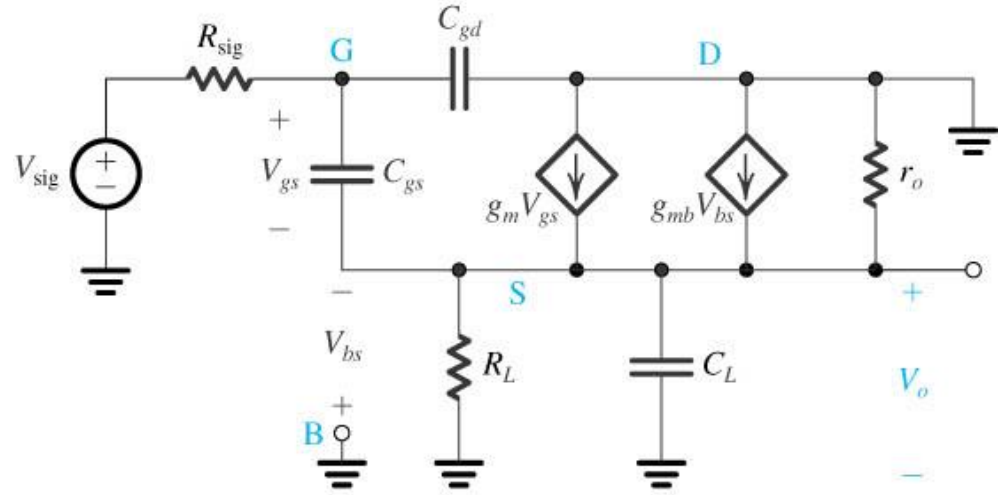
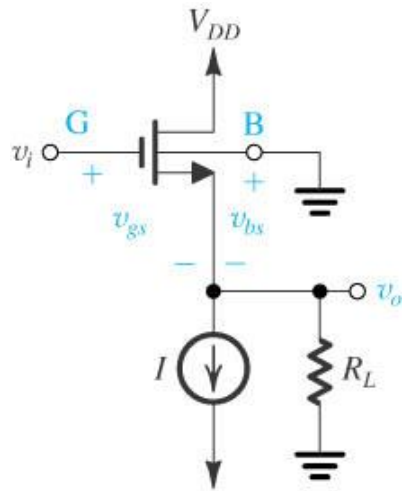
$$f_H = \frac{1}{2\pi [C_{gs} R_{gs} + (C_{gd} + C_L) R_{gd}]}$$

$$R_{gd} = R_L \parallel R_{out}$$

$$R_{gs} = R_s \parallel R_{in}$$



# Απόκριση ενισχυτή κοινής εκροής (ακόλουθος πηγής) με ενεργό φορτίο στις υψηλές συχνότητες (1/2)

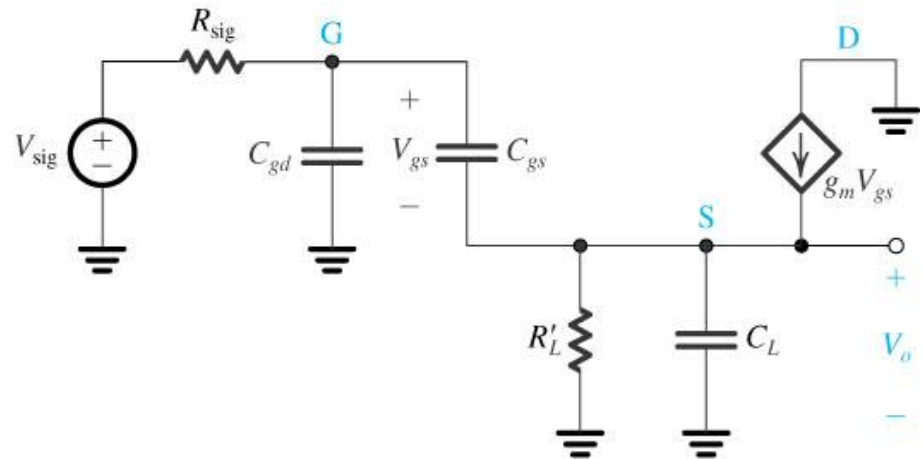


Μηδενικό (για  $V_o = 0$ ):

$$(g_m + s C_{gs}) V_{gs} = 0 \Rightarrow s_Z = -\frac{g_m}{C_{gs}}$$

$$\omega_Z = \frac{g_m}{C_{gs}}$$

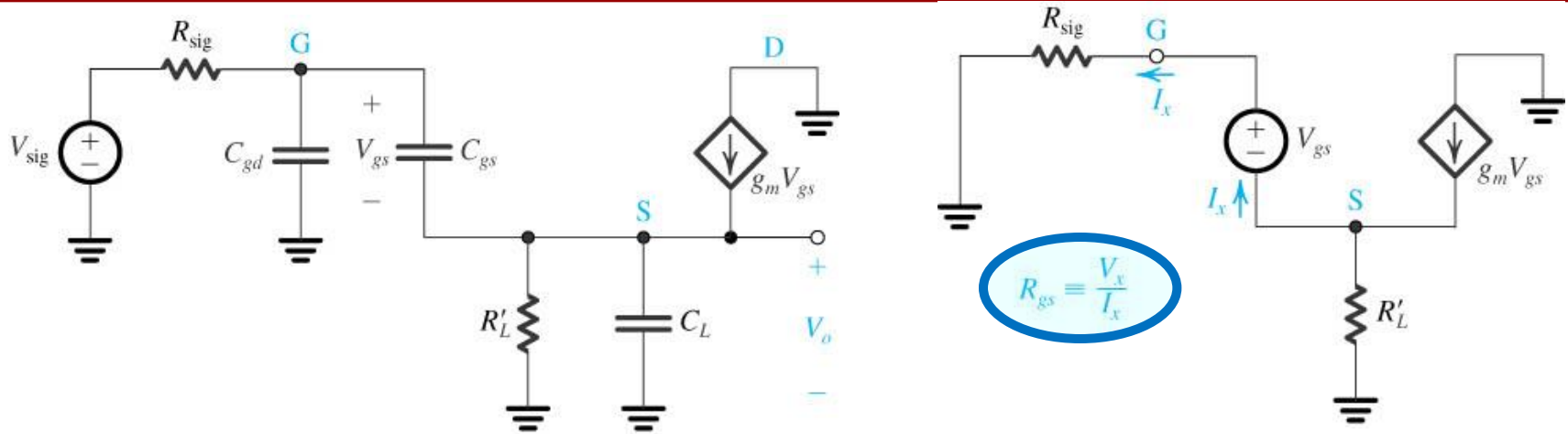
$$\left. \begin{array}{l} \omega_T = g_m / (C_{gs} + C_{gd}) \\ C_{gd} \ll C_{gs} \end{array} \right\} \Rightarrow f_Z \cong f_T$$



Το δεύτερο μηδενικό (του  $C_L$ ) είναι στο άπειρο



# Απόκριση ενισχυτή κοινής εκροής (ακόλουθος πηγής) με ενεργό φορτίο στις υψηλές συχνότητες (2/2)

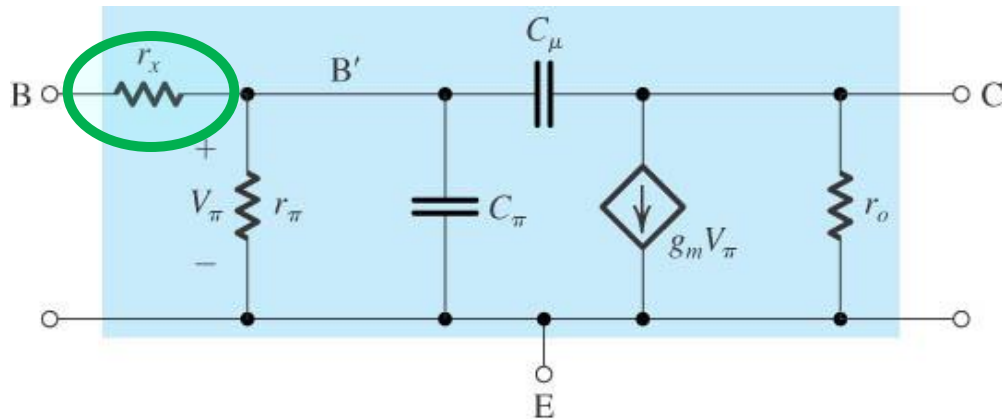
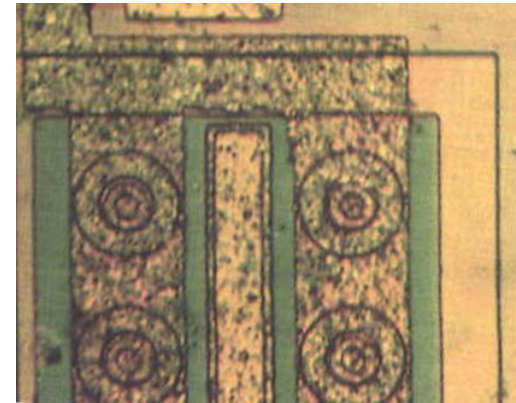
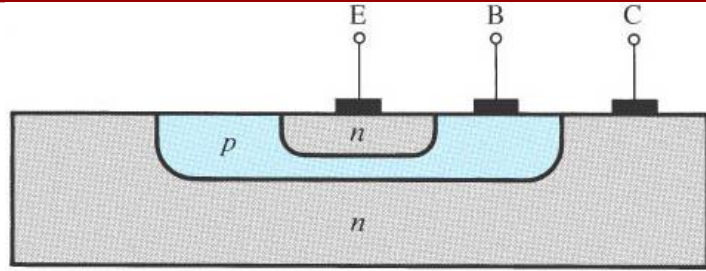


Πόλοι (μέθοδος σταθερών χρόνου):

$$\left. \begin{aligned}
 R_{gd} &= R_{sig} \\
 R_{gs} &= \frac{R_{sig} + R'_L}{1 + g_m R'_L} \\
 R_{C_L} &= R_L \parallel R_o
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H} = 1/2\pi(C_{gd}R_{sig} + C_{gs}R_{gs} + C_LR_{C_L})$$



# Ισοδύναμο κύκλωμα του BJT στις υψηλές συχνότητες



Μέσος χρόνος διέλευσης βάσης σε ορθή πόλωση

$$g_m = I_C / V_T$$

$$r_o = |V_A| / I_C$$

$$r_\pi = \beta_0 / g_m$$

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

$$C_\pi = C_{de} + C_{je}$$

$$C_{de} = \tau_F g_m$$

$$C_{je} \cong 2C_{je0}$$

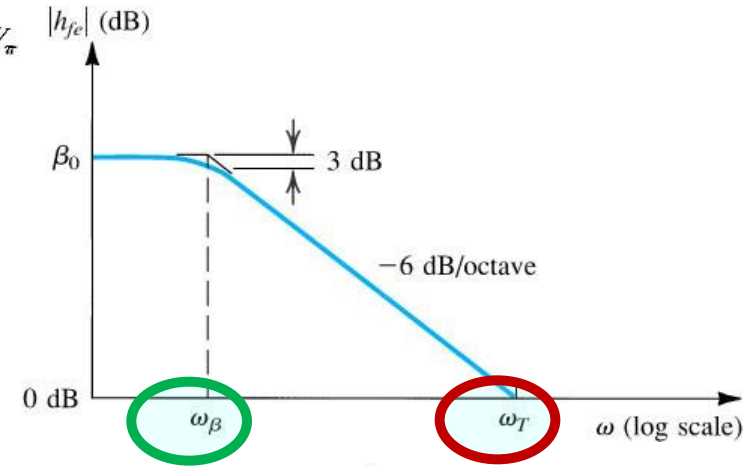
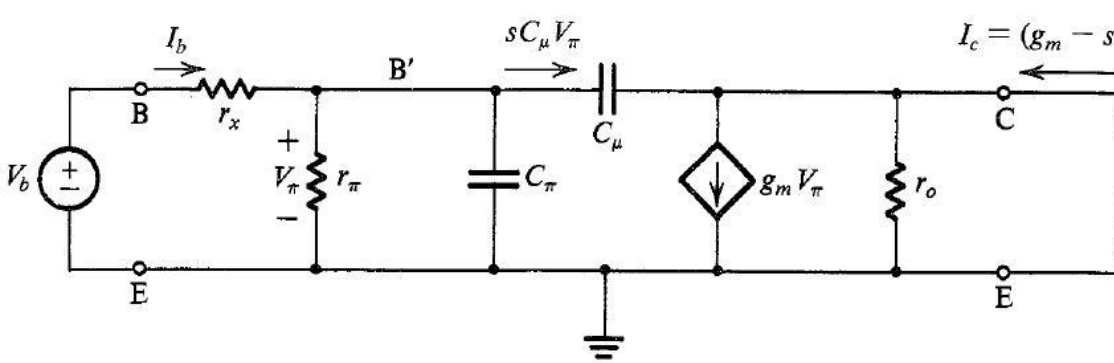
Χωρητικότητα στρώματος αραιώσης B-E

$$C_\mu = C_{jc0} / \left(1 + \frac{V_{CB}}{V_{0c}}\right)^m, \quad m \cong 0.3-0.5$$

Χωρητικότητα διάχυσης ασθενούς σήματος



# Συχνότητα μοναδιαίου κέρδους του BJT ( $f_T$ )



$$I_c = (g_m - sC_\mu)V_\pi$$

$$V_\pi = I_b(r_\pi \parallel C_\pi \parallel C_\mu) = \frac{I_b}{1/r_\pi + sC_\pi + sC_\mu}$$

$$h_{fe} \equiv \frac{I_c}{I_b} = \frac{g_m - sC_\mu}{1/r_\pi + s(C_\pi + C_\mu)}$$

$$h_{fe} \approx \frac{g_m r_\pi}{1 + s(C_\pi + C_\mu)r_\pi} = \frac{\beta_0}{1 + s(C_\pi + C_\mu)r_\pi}$$

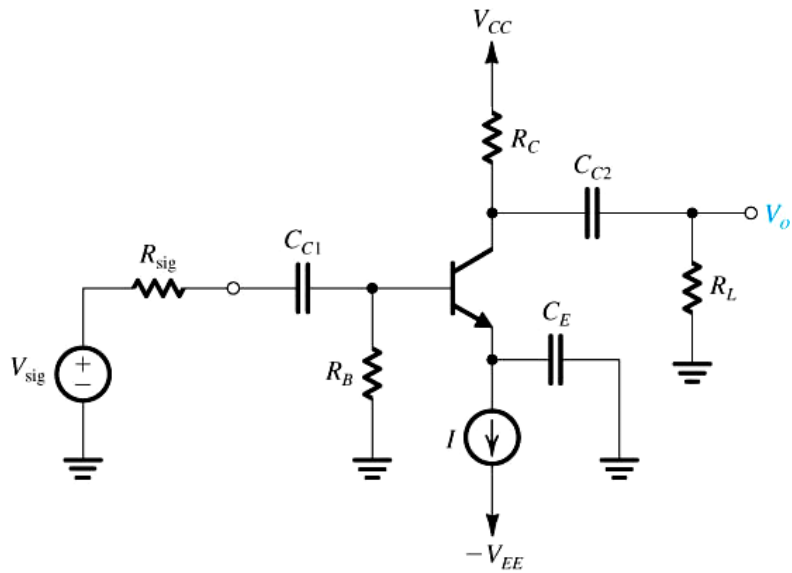
$$\omega_\beta = \frac{1}{(C_\pi + C_\mu)r_\pi}$$

$$\omega_T = \beta_0 \omega_\beta = \frac{g_m}{C_\pi + C_\mu}$$

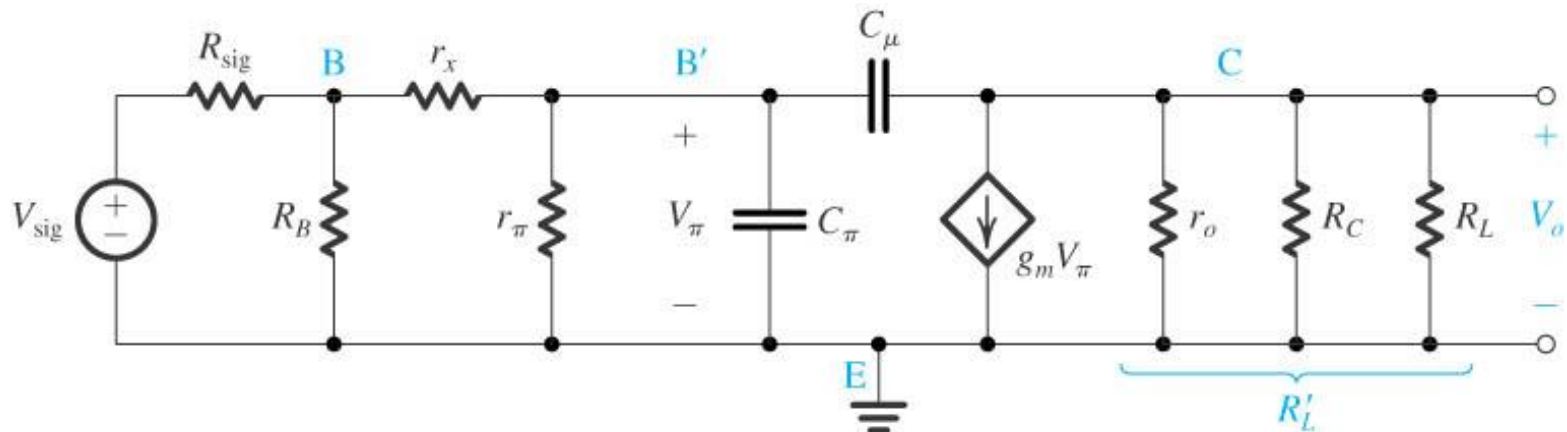
$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_\pi + C_\mu)}$$



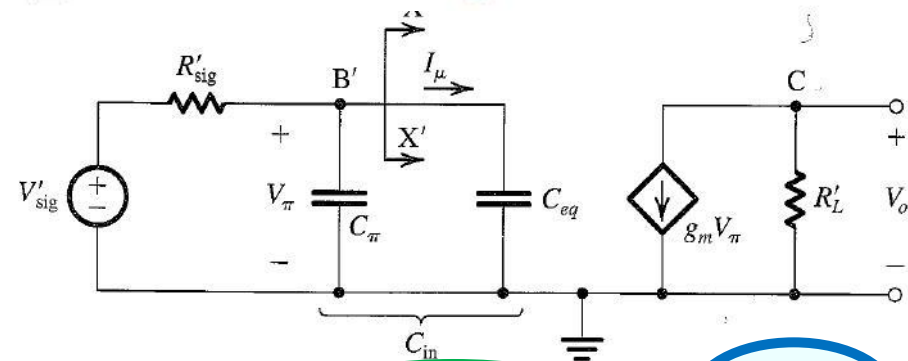
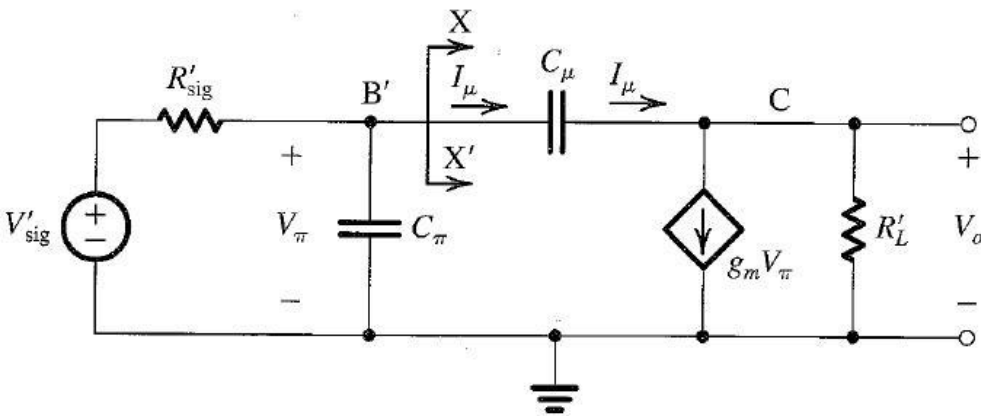
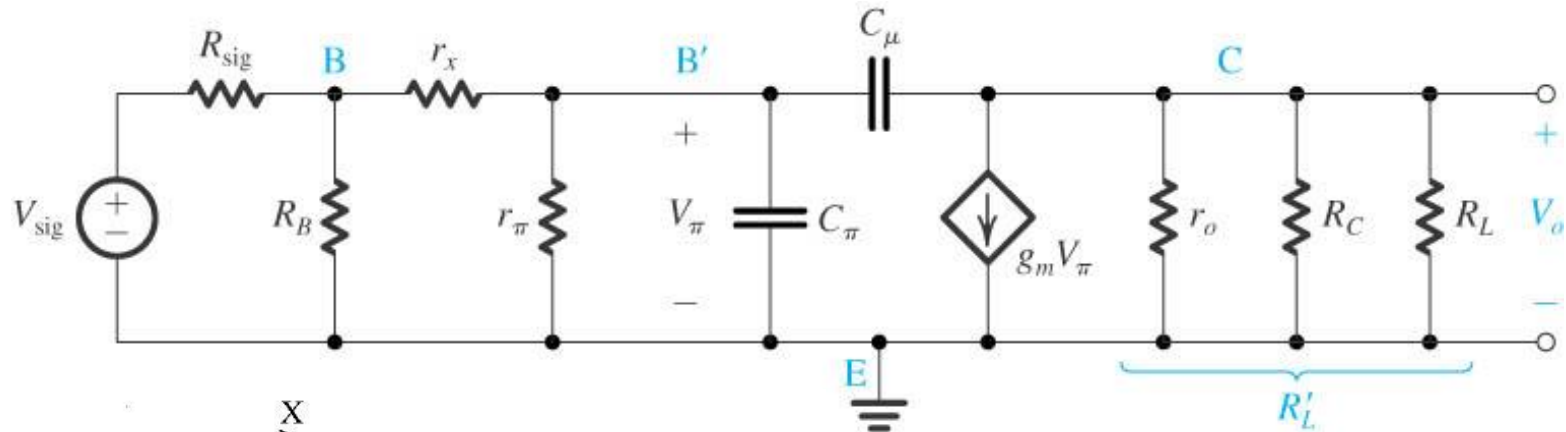
# Απόκριση ενισχυτή κοινού εκπομπού στις υψηλές συχνότητες (1/3)



$$A_M = \frac{V_o}{V_{sig}} = -\frac{(R_B \parallel r_\pi)}{(R_B \parallel r_\pi) + R_{sig}} g_m (r_o \parallel R_C \parallel R_L)$$



# Απόκριση ενισχυτή κοινού εκπομπού στις υψηλές συχνότητες (2/3)



$$V'_{sig} = V_{sig} \frac{R_B}{R_B + R_{sig}} \frac{r_{\pi}}{r_{\pi} + r_x + (R_{sig} // R_B)}$$

$$R'_L = r_o // R_C // R_L$$

$$C_{in} = C_{\pi} + C_{eq} = C_{\pi} + C_{\mu}(1 + g_m R'_L)$$

$$V_o = -g_m R'_L V_{\pi}$$

$$R'_{sig} = r_{\pi} // [r_x + (R_B // R_{sig})]$$

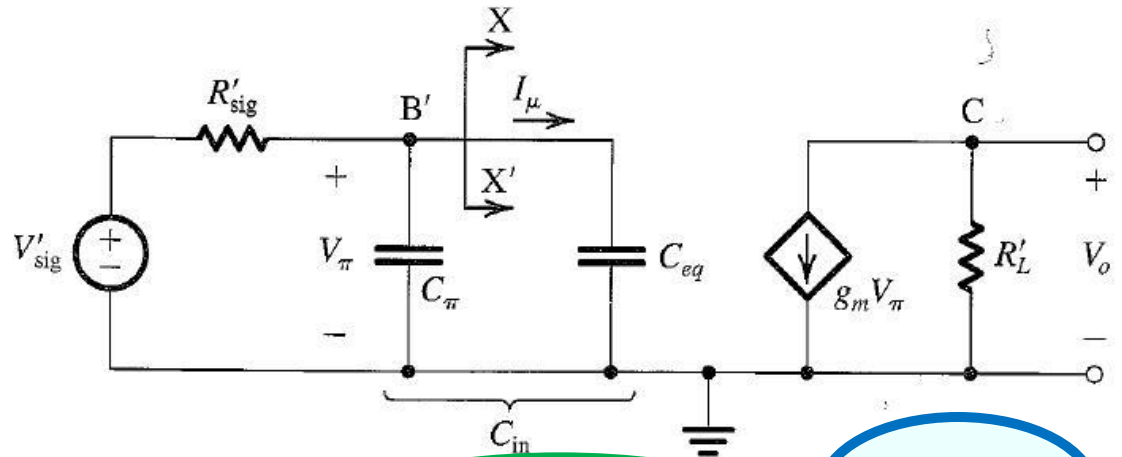




# Απόκριση ενισχυτή κοινού εκπομπού στις υψηλές συχνότητες (3/3)

$$V_{\pi} = V'_{\text{sig}} \frac{1}{1 + s/\omega_0}$$

$$\omega_0 = 1/C_{\text{in}} R'_{\text{sig}}$$



$$C_{\text{in}} = C_{\pi} + C_{\text{eq}} = C_{\pi} + C_{\mu}(1 + g_m R'_L)$$

$$V_o = -g_m R'_L V_{\pi}$$

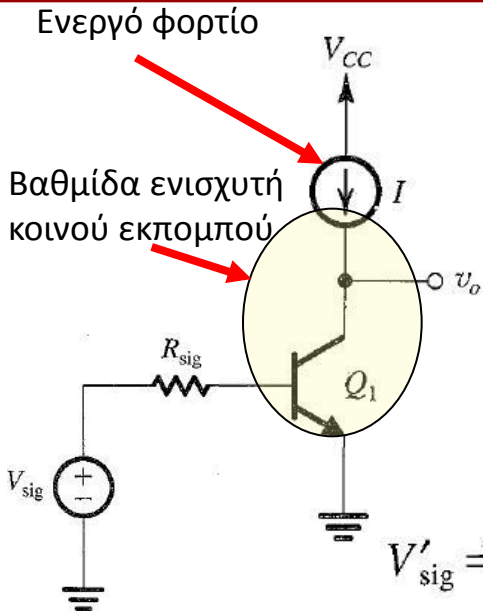
$$\frac{V_o}{V_{\text{sig}}} = - \left[ \frac{R_B}{R_B + R_{\text{sig}}} \frac{r_{\pi} \cdot g_m R'_L}{r_{\pi} + r_x + (R_{\text{sig}} \parallel R_B)} \right] \left( \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_0}} \right)$$

$$\frac{V_o}{V_{\text{sig}}} = \frac{A_M}{1 + \frac{s}{\omega_0}}$$

$$f_H = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi C_{\text{in}} R'_{\text{sig}}}$$



# Απόκριση ενισχυτή κοινού εκπομπού με ενεργό φορτίο στις υψηλές συχνότητες

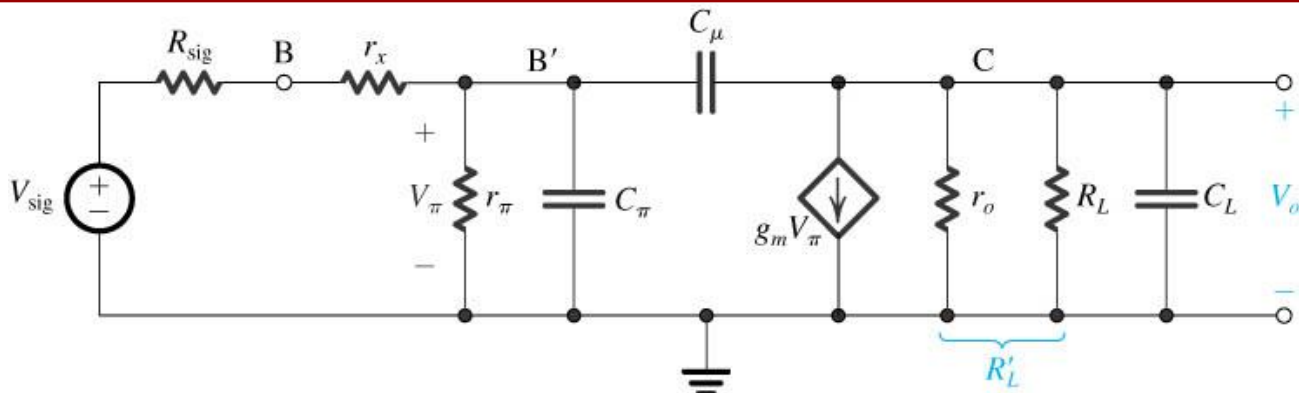


$$V'_{sig} = V_{sig} \frac{r_{\pi}}{R_{sig} + r_x + r_{\pi}}$$

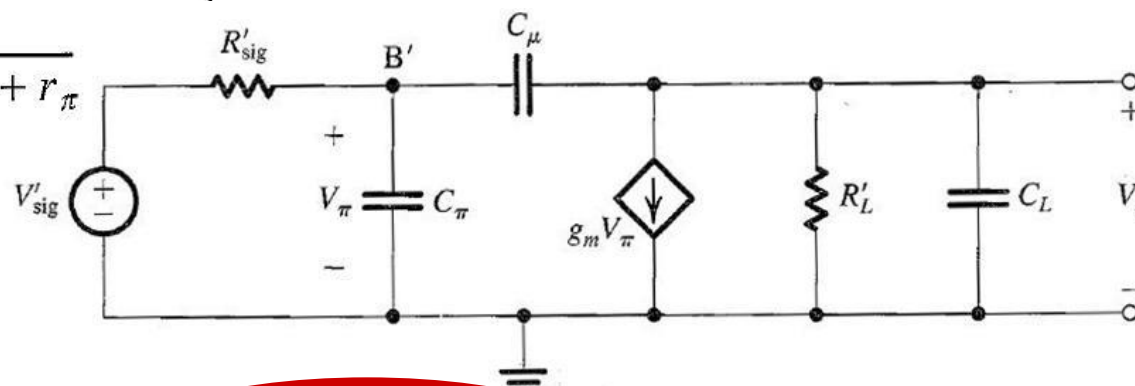
$$A_M = - \frac{r_{\pi}}{R_{sig} + r_x + r_{\pi}} (g_m R'_L)$$

$$C_{in} = C_{\pi} + C_{\mu}(1 + g_m R'_L)$$

Χωρητικότητα Miller



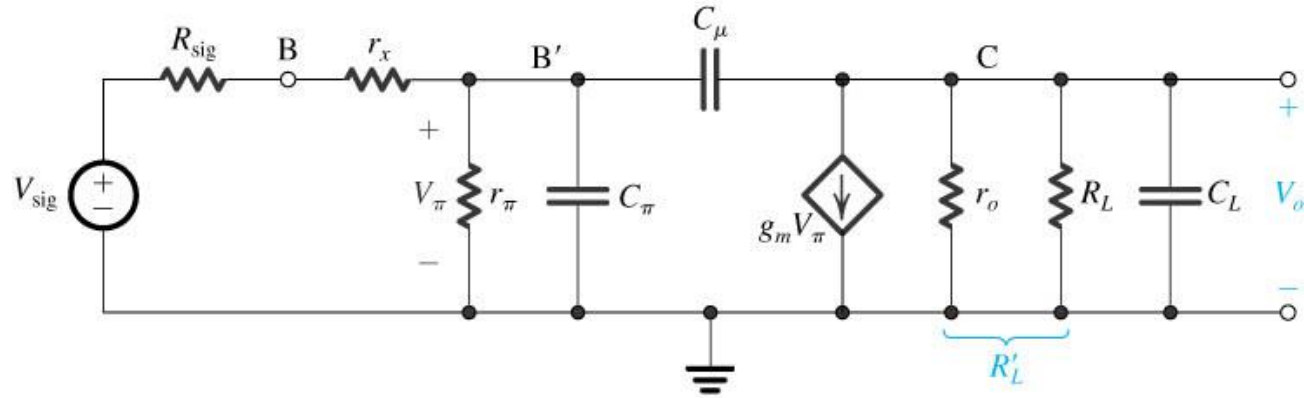
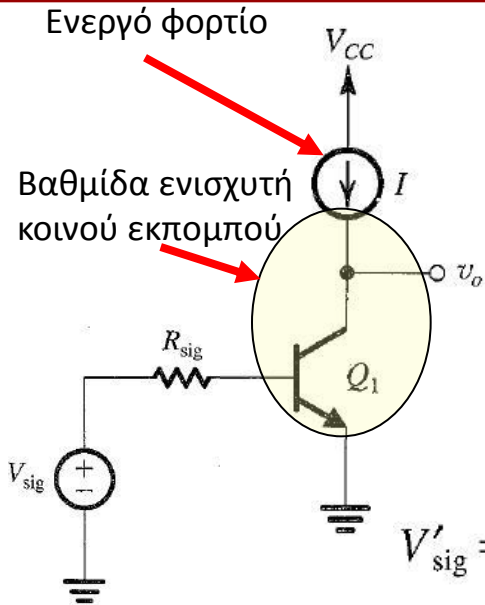
$$R'_{sig} = r_{\pi} \parallel (R_{sig} + r_x)$$



$$f_H \cong \frac{1}{2\pi C_{in} R'_{sig}}$$



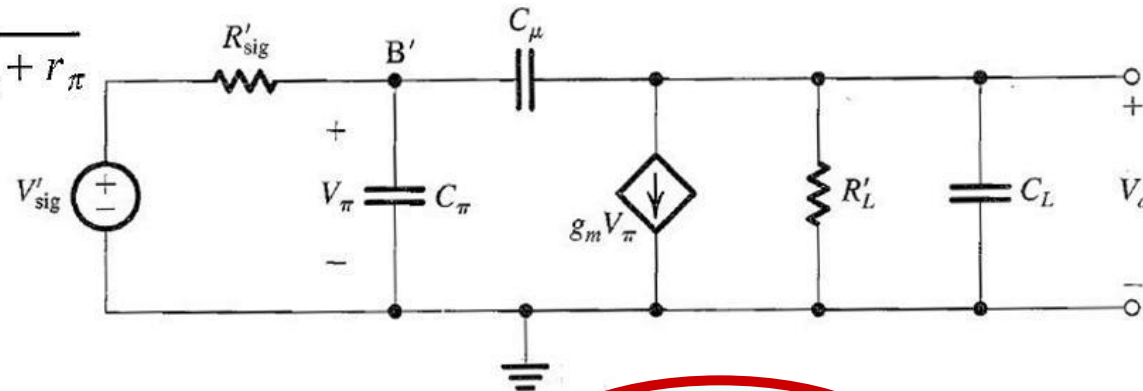
# Απόκριση ενισχυτή κ. εκπομπού με ενεργό φορτίο στις υψηλές συχνότητες (χρήση σταθερών χρόνου ανοικτού κυκλώματος)



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

$$V'_{sig} = V_{sig} \frac{r_{\pi}}{R_{sig} + r_x + r_{\pi}}$$

$$A_M = - \frac{r_{\pi}}{R_{sig} + r_x + r_{\pi}} (g_m R'_L)$$



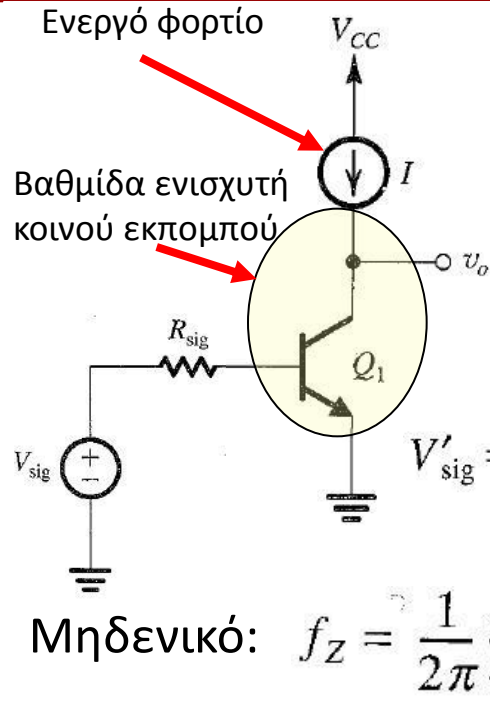
$$\tau_H = C_{\pi} R_{\pi} + C_{\mu} R_{\mu} + C_L C_L$$

$$= C_{\pi} R'_{sig} + C_{\mu} [(1 + g_m R'_L) R'_{sig} + R'_L] + C_L R'_L$$

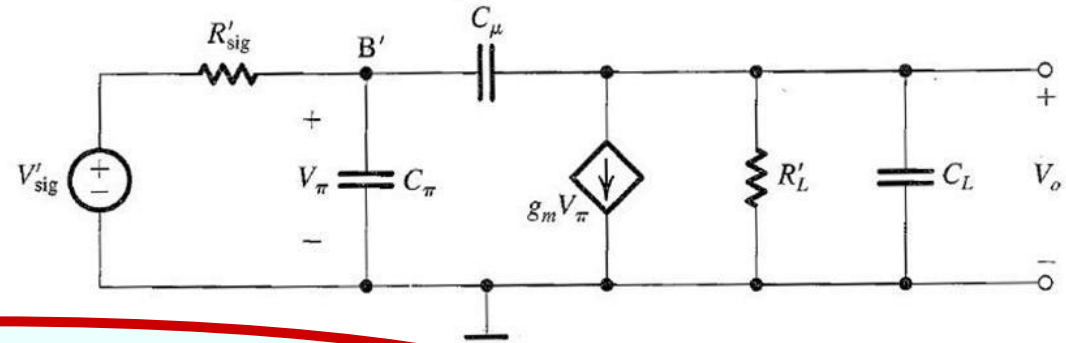
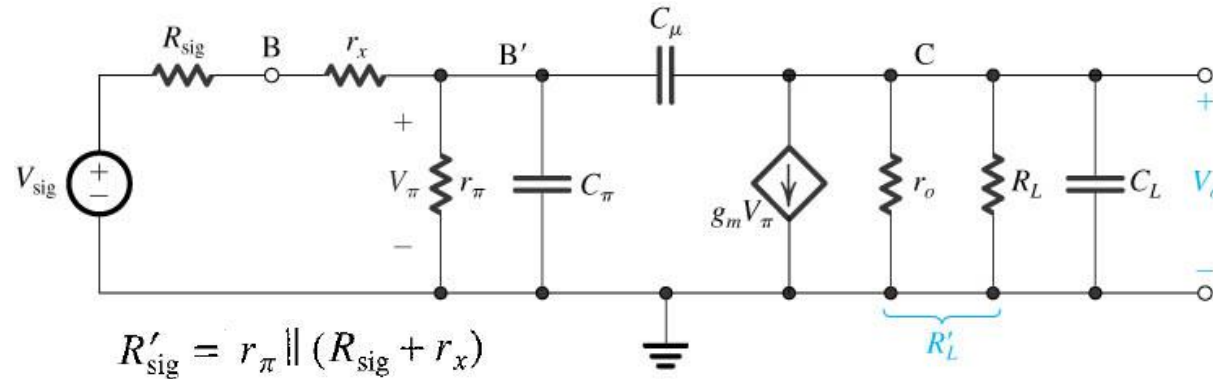
$$f_H \cong \frac{1}{2\pi\tau_H}$$



# Απόκριση ενισχυτή κ. εκπομπού με ενεργό φορτίο στις υψηλές συχνότητες (χρήση πλήρους συνάρτησης μεταφοράς)



$$V'_{sig} = V_{sig} \frac{r_\pi}{R_{sig} + r_x + r_\pi}$$



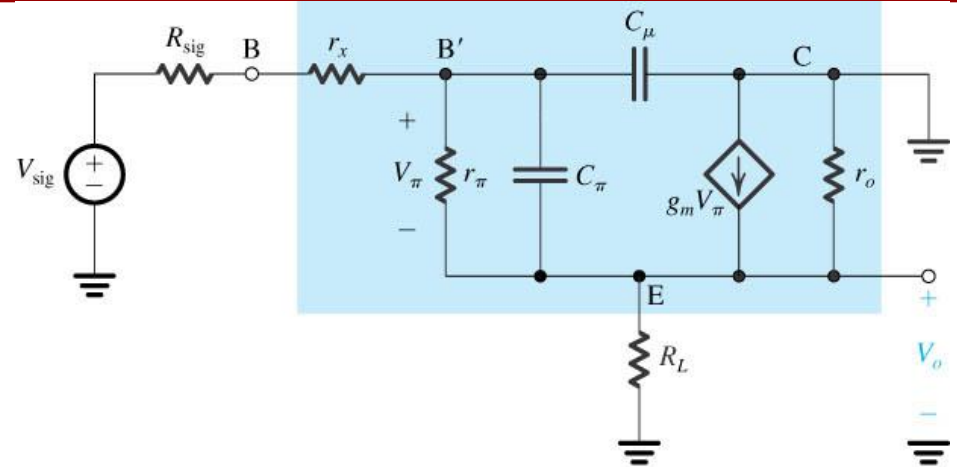
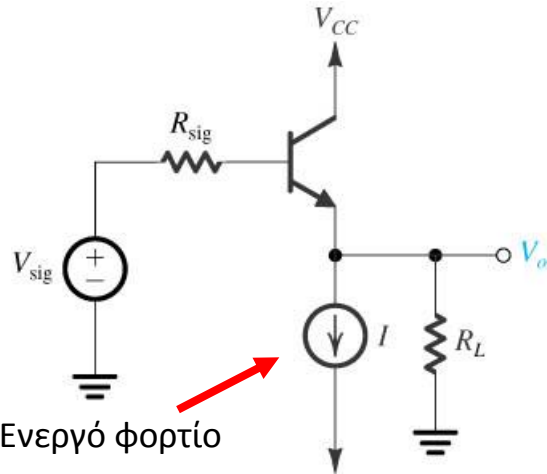
Πόλοι:  $f_{p1} \cong \frac{1}{2\pi} \frac{1}{[C_\pi + C_\mu (1 + g_m R'_L)] R'_{sig} + (C_L + C_\mu) R'_L}$

$$f_{p2} \cong \frac{1}{2\pi} \frac{[C_\pi + C_\mu (1 + g_m R'_L)] R'_{sig} + (C_L + C_\mu) R'_L}{[C_\pi (C_L + C_\mu) + C_L C_\mu] R'_{sig} R'_L}$$

Για  $\omega_Z, \omega_{p2} \gg \omega_{p1}$   
θα είναι:  $f_H = f_{p1}$



# Απόκριση ενισχυτή κοινού συλλέκτη (ακόλουθος εκπομπού) με ενεργό φορτίο στις υψηλές συχνότητες (1/2)

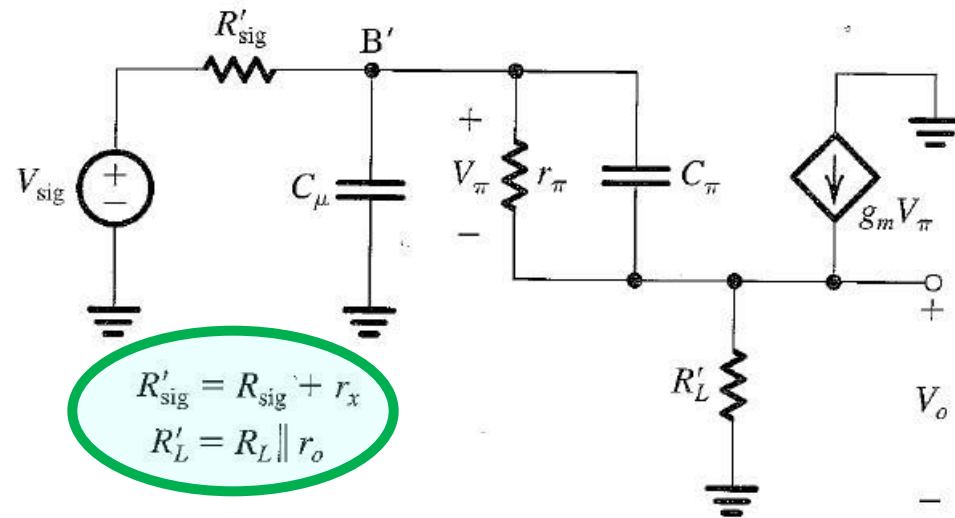


Μηδενικό (για  $V_o = 0$ ):

$$g_m V_\pi + \frac{V_\pi}{r_\pi} + s_Z C_\pi = 0$$

$$\Rightarrow s_Z = -\frac{g_m + (1/r_\pi)}{C_\pi} = -\frac{1}{C_\pi r_e}$$

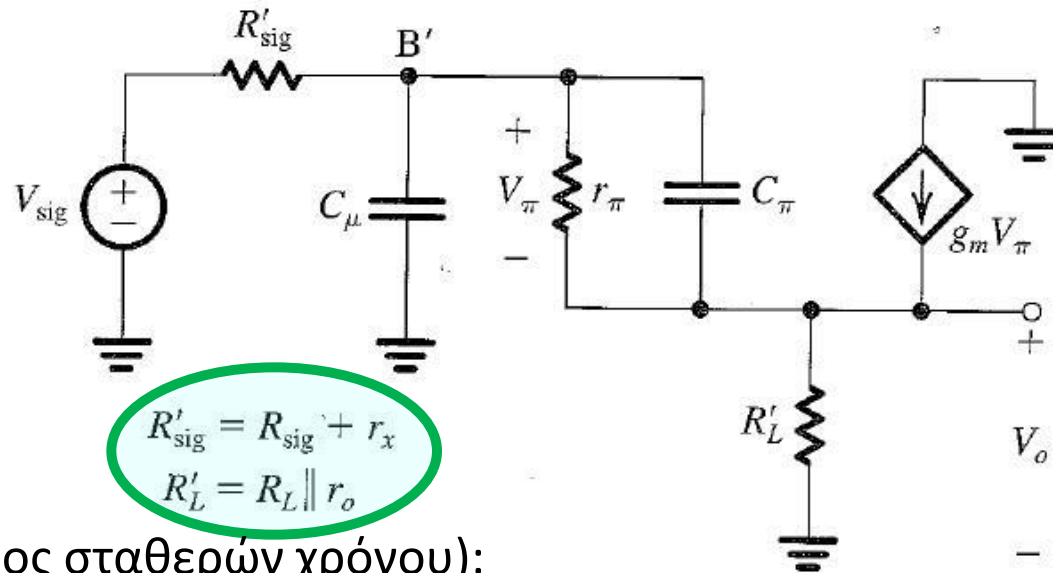
$$\Rightarrow \omega_Z = \frac{1}{C_\pi r_e} \quad f_Z \cong f_T$$



Το δεύτερο μηδενικό (του  $C_\mu$ ) είναι στο άπειρο



# Απόκριση ενισχυτή κοινού συλλέκτη (ακόλουθος εκπομπού) με ενεργό φορτίο στις υψηλές συχνότητες (2/2)



Πόλοι (μέθοδος σταθερών χρόνου):

$$R_\mu = R'_{sig} \parallel [r_\pi + (\beta + 1)R'_L]$$

$$R_\pi = \frac{R'_{sig} + R'_L}{1 + \frac{R'_{sig}}{r_\pi} + \frac{R'_L}{r_e}}$$

$$\Rightarrow f_H = 1/2\pi [C_\mu R_\mu + C_\pi R_\pi]$$



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Χατζόπουλος Αλκιβιάδης. «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΙΙ, Ενισχυτές στις υψηλές συχνότητες». 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.

