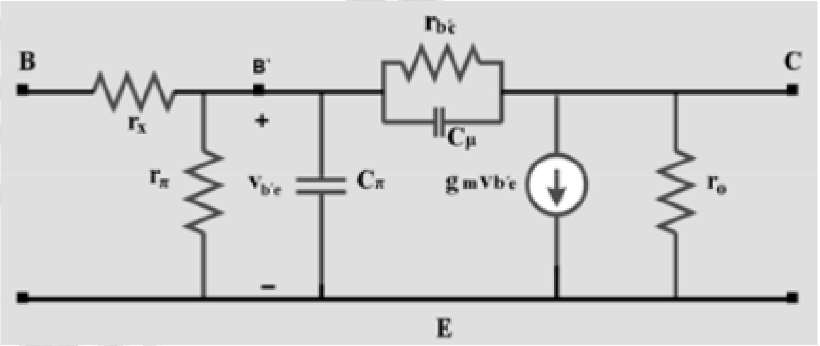
Το π-ισοδύναμο μοντέλο του BJT

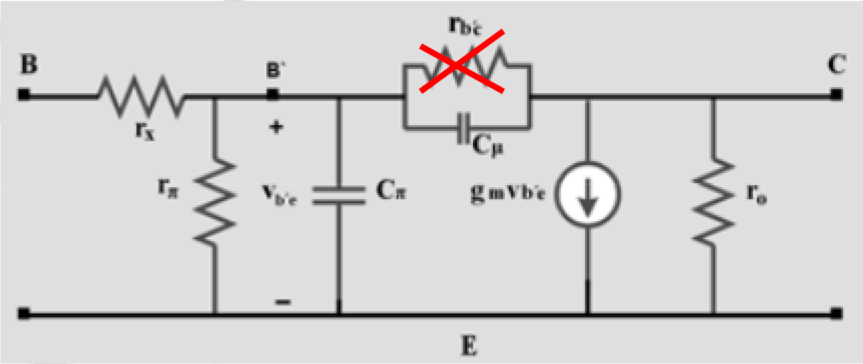
- C_μ : *Χωρητικότητα ανάστροφα πολωμένης επαφής B-C*
- $C_\pi = C_{BE}$: *Χωρητικότητα ορθά πολωμένης επαφής B-E*
- g_m : *Διαγωγιμότητα τρανζίστορ*
- $r_{b'c}$: *αντίσταση ανάστροφα πολωμένης επαφής B-C*
- r_π : *αντίσταση ορθά πολωμένης επαφής B-E*
- $r_x = r_b$: *αντίσταση περιοχής βάσης*
- r_o : *αντίσταση εξόδου βαθμίδας*



Σχ.2.4 – Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριταντης Γ.

Η $r_{b'c}$ ισούται με $r_{b'c} = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_B} = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} \cdot \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = r_o \cdot h_{fe}$ άρα λαμβάνει μια πολύ μεγάλη τιμή.

Μπορούμε λοιπόν να την αγνοήσουμε και να καταλήξουμε στο ισοδύναμο μοντέλο



Σχ.2.4 – Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριταντης Γ.

Συγκεντρωτικός πίνακας για π-ισοδύναμο

- C_μ : Χωρητικότητα ανάστροφα πολωμένης επαφής B-C
- $C_\pi = C_{BE}$: Χωρητικότητα ορθά πολωμένης επαφής B-E
- C_{de} : χωρητικότητα διάχυσης σε λειτουργία ασθενούς σήματος
- C_{je} : Χωρητικότητα ένωσης B-E ($\sim 2C_{je0}$)
- C_{je0} : Χωρητικότητα ένωσης B-E σε μηδενική τάση
- V_{0c} : εσωτερικό δυναμικό ένωσης C-B (τυπικά 0.75V)
- $C_{\mu 0}$: Χωρητικότητα ένωσης C-B σε μηδενική τάση
- τ_f = μέσος χρόνος διέλευσης βάσης (σε ορθή λειτουργία)
- m : συντελεστής διαβάθμισης ένωσης E-B
- V_A : Τάση Early
- V_T : θερμική τάση (~25mV σε θερμοκρασία περιβάλλοντος)
- g_m : Διαγωγιμότητα τρανζίστορ
- $r_{b'c}$: αντίσταση ανάστροφα πολωμένης επαφής B-C
- r_π : αντίσταση ορθά πολωμένης επαφής B-E
- $r_x = r_b$: αντίσταση περιοχής βάσης
- r_o : αντίσταση εξόδου βαθμίδας
- f_T : συχνότητα μοναδιαίας ενίσχυσης

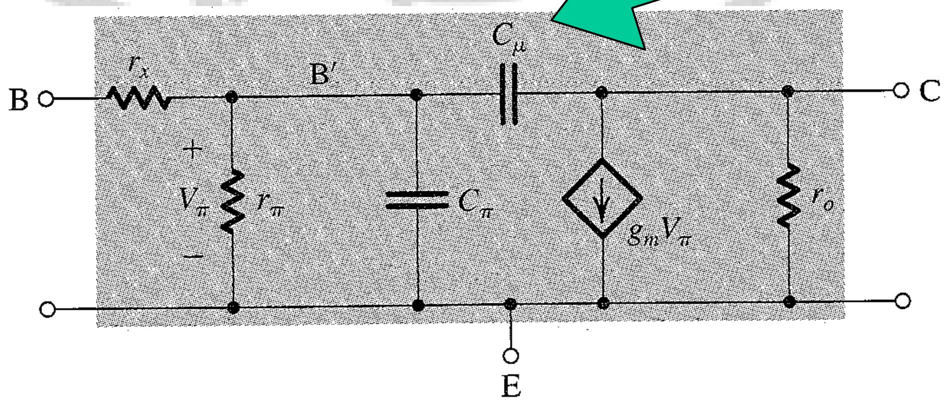
$$g_m = I_C/V_T \qquad r_o = |V_A|/I_C$$

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

$$C_{de} = \tau_F g_m \qquad C_{je} \cong 2C_{je0}$$

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

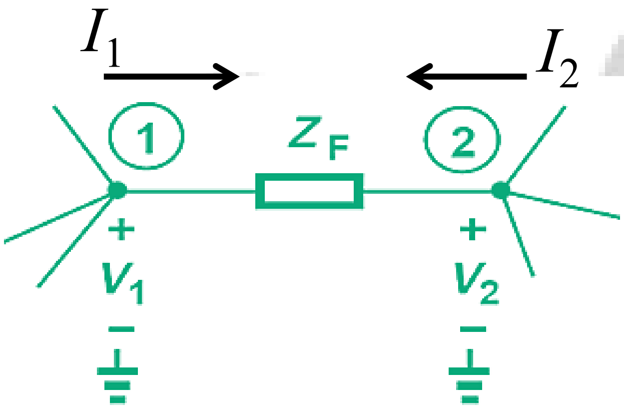
$$C_\mu = \frac{C_{\mu 0}}{\left(1 + \dfrac{V_{CB}}{V_{0c}}\right)^m}$$



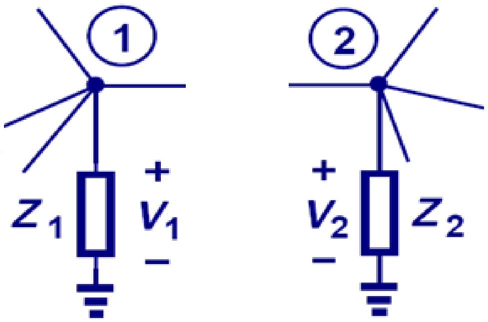
Θεώρημα Miller

Αν A_v είναι το κέρδος τάσης από τον κόμβο 1 στον κόμβο 2, τότε η εμπέδηση (πλωτή) Z_F μπορεί να μετατραπεί σε δύο εμπεδήσεις (γειωμένες) Z_1 and Z_2 ως εξής (ισοδυναμία ρευμάτων)

$$\frac{V_1 - V_2}{Z_F} = \frac{V_1}{Z_1} \Rightarrow Z_1 = Z_F \frac{V_1}{V_1 - V_2} = Z_F \frac{1}{1 - A_v} = \boxed{\frac{Z_F}{1 - A_v}}$$



Σχ.13.17 – Prof. Liu, UC Berkeley



Σχ.13.17 – Prof. Liu, UC Berkeley

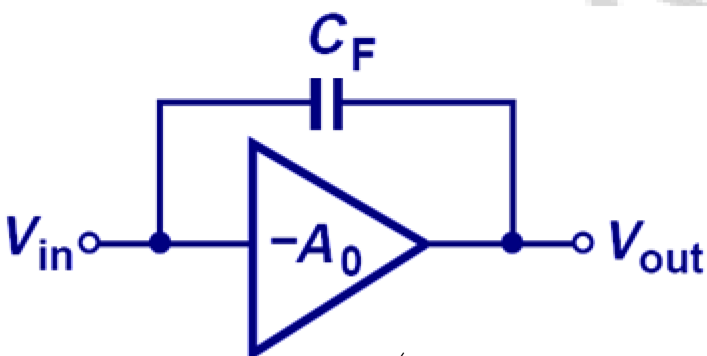
$$\frac{V_1 - V_2}{Z_F} = -\frac{V_2}{Z_2} \Rightarrow Z_2 = -Z_F \frac{V_2}{V_1 - V_2} = Z_F \frac{1}{1 - \frac{1}{A_v}} = \boxed{\frac{Z_F A_v}{A_v - 1}}$$

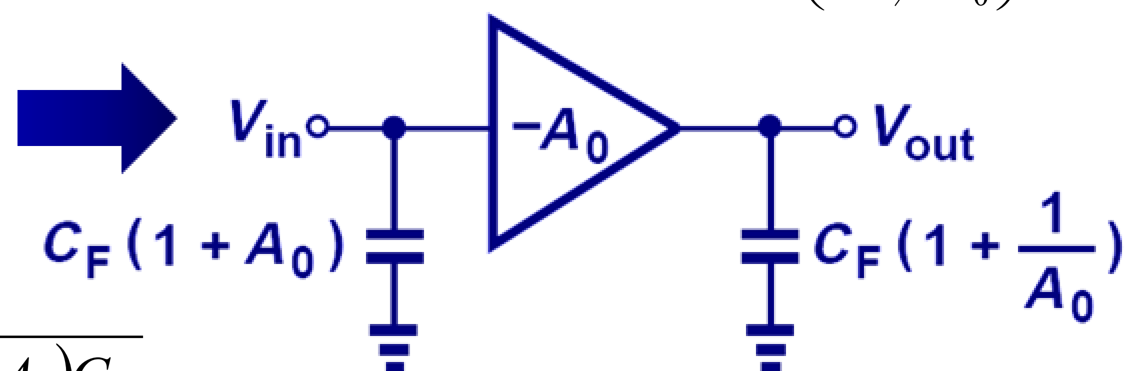
Πολλαπλασιασμός Miller

- ✓ Η εφαρμογή του θεωρήματος Miller μας επιτρέπει να μετατρέψουμε μια πλωτή (floating) χωρητικότητα μεταξύ εισόδου-εξόδου σε δύο γειωμένες χωρητικότητες (μία στην είσοδο και μία στην έξοδο).
- ✓ Η γειωμένη χωρητικότητα εισόδου είναι **ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ** από την πλωτή χωρητικότητα (φαινόμενο ή πολλαπλασιασμός Miller).

$$A_0 \equiv -A_v = k$$

$$Z_2 = \frac{Z_F}{1-\frac{1}{A_v}} = \frac{\frac{1}{j\omega C_F}}{1+\frac{1}{A_0}} = \frac{1}{j\omega\left(1+\frac{1}{A_0}\right)C_F}$$



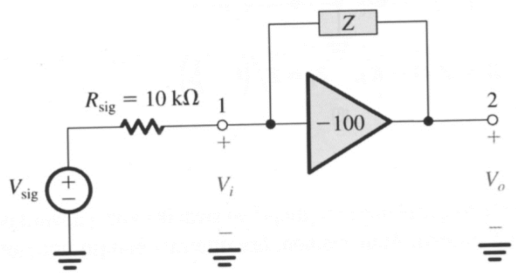


$$Z_1 = \frac{Z_F}{1-A_v} = \frac{\frac{1}{j\omega C_F}}{1+A_0} = \frac{1}{j\omega(1+A_0)C_F}$$

Σχ.13.18 – Prof. Liu, UC Berkeley

Παράδειγμα

Το Σχήμα 6.16(α) παρουσιάζει έναν ιδανικό ενισχυτή τάσης με κέρδος -100 V/V, με μια σύνθετη αντίσταση Z συνδεδεμένη μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου και εισόδου του. Βρείτε το ισοδύναμο κύκλωμα Miller όταν η Z είναι (α) μια αντίσταση 1 MΩ και (β) μια χωρητικότητα 1 pF. Σε κάθε περίπτωση, χρησιμοποιήστε το ισοδύναμο κύκλωμα για τον καθορισμό του V_o/V_{sig}.



(α)

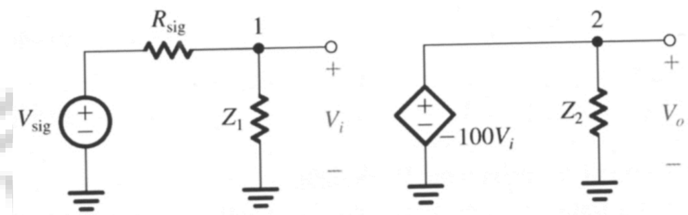
Σχ.6.16 – Μικροηλεκτρονικά κυκλώματα – Sedra/Smith

$$Z_1 = \frac{Z}{1-K} = \frac{1000\ k\Omega}{1+100} = 9.9\ k\Omega$$

$$Z_2 = \frac{Z}{1-\frac{1}{K}} = \frac{1\ M\Omega}{1+\frac{1}{100}} = 0.99\ M\Omega$$

$$\frac{V_o}{V_{sig}} = \frac{V_o}{V_i}\frac{V_i}{V_{sig}} = -100 \times \frac{Z_1}{Z_1 + R_{sig}}$$

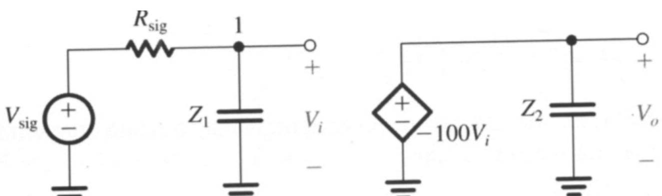
$$= -100 \times \frac{9.9}{9.9+10} = -49.7\ V/V$$



(β)

Σχ.6.16 – Μικροηλεκτρονικά κυκλώματα – Sedra/Smith

η Z είναι μια χωρητικότητα 1 pF – δηλαδή, $Z = 1/sC = 1/s \times 1 \times 10^{-12}$



(γ)

Σχ.6.16 – Μικροηλεκτρονικά κυκλώματα – Sedra/Smith

$$Z_1 = \frac{Z}{1-K} = \frac{1/sC}{1+100} = 1/s(101C)$$

$$Z_2 = \frac{Z}{1-\frac{1}{K}} = \frac{1}{1.01}\frac{1}{sC} = \frac{1}{s(1.01C)}$$

$$\frac{V_o}{V_{sig}} = \frac{V_o}{V_i}\frac{V_i}{V_{sig}} = -100\frac{1/sC_1}{1/(sC_1)+R_{sig}}$$

$$= \frac{-100}{1+sC_1R_{sig}}$$

$$= \frac{-100}{1+s\times 101\times 1\times 10^{-12}\times 10\times 10^{3}}$$

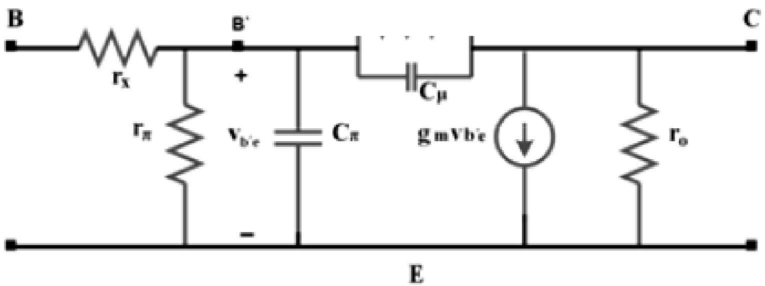
$$= \frac{-100}{1+s\times 1.01\times 10^{-6}}$$

Αυτό σημαίνει ότι η Z_1 είναι μια χωρητικότητα $101C$ = 101 pF και η Z_2 είναι μια χωρητικότητα $1.01C$ = 1.01

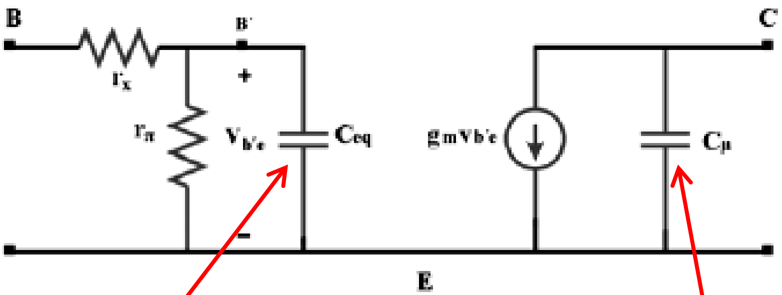
παρατηρούμε ότι η αντικατάσταση, βάσει του θεωρήματος Miller, μιας αντίστασης ανάδρασης (ή γεφύρωσης) έχει ως αποτέλεσμα, για αρνητικές τιμές του K, μικρότερη αντίσταση [κατά ένα συντελεστή (1-K)] στην είσοδο. Εάν το στοιχείο ανάδρασης είναι μια χωρητικότητα, η τιμή του πολλαπλασιάζεται επί (1-K) για να πάρουμε την ισοδύναμη χωρητικότητα στην πλευρά εισόδου.

Τροποποιημένο κατά Miller π-ισοδύναμο

π-ισοδύναμο μοντέλο



Τροποποιημένο κατά Miller π-ισοδύναμο μοντέλο



Σχ.2.6 – Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριταντης Γ.

C_π : χωρητικότητα ορθά πολωμένης επαφής B-E

C_μ : χωρητικότητα ανάστροφα πολωμένης επαφής B-C

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

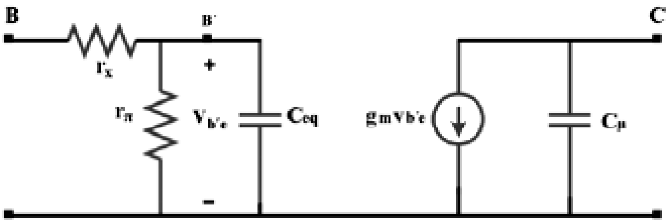
$$C_{eq,out} = \frac{C_\mu k}{k-1} = C_\mu \frac{A_v}{A_v - 1} \approx C_\mu$$

$$\upsilon_o = -g_m R'_L v_{b'e} = A_v v_{b'e} = k v_{b'e}$$

$$k = A_v = -g_m R'_L \qquad R'_L = R_L // r_o$$

Το τρανζίστορ στις υψηλές συχνότητες

Η ενίσχυση ρεύματος του τρανζίστορ περιορίζεται στις υψηλές συχνότητες λόγω της δράσης των παρασιτικών χωρητικοτήτων



Σχ.2.6 – Ηλεκτρονικά ΙΙ, Χαριταντης Γ.

$$i_1 = i_{r_\pi} + i_{C_{eq}} = \frac{v_{b'e}}{r_\pi} + \frac{v_{b'e}}{Z_{C_{eq}}} \Rightarrow v_{b'e} = \frac{r_\pi}{1 + j\omega r_\pi (C_\pi + C_\mu)} i_i$$

$$i_o = g_m V_{b'e} = \frac{g_m r_\pi}{1 + j r_\pi (C_\pi + C_\mu)\omega} i_i$$

$$\beta_o = g_m r_\pi$$

$$\beta(j\omega) = \frac{i_o}{i_i} = \frac{\beta_o}{1+jr_\pi(C_\pi+C_\mu)\omega} = \frac{\beta_o}{1+j\frac{\omega}{\omega_\beta}}$$

$$\omega_\beta = \frac{1}{r_\pi(C_\pi+C_\mu)} \quad \text{όταν} \quad \frac{\beta_o}{j(\omega/\omega_\beta)} = 1 \Rightarrow \omega = \beta_o \cdot \omega_\beta = \frac{\beta_o}{r_\pi(C_\pi+C_\mu)} = \frac{g_m}{C_\pi+C_\mu} = \omega_T$$

Στις υψηλές συχνότητες ($\omega >> \omega_\beta$)ο φανταστικός όρος του παρανομαστή είναι πολύ μεγαλύτερος του 1

$$\frac{\beta_o}{j(\omega/\omega_\beta)} = 1 \Rightarrow \omega = \beta_o \cdot \omega_\beta = \frac{\beta_o}{r_\pi(C_\pi+C_\mu)} = \frac{g_m}{C_\pi+C_\mu} = \omega_T$$

$$f_T = \frac{\omega_T}{2\pi}$$

Συχνότητα μοναδιαίας ενίσχυσης

Το τρανζίστορ στις υψηλές συχνότητες

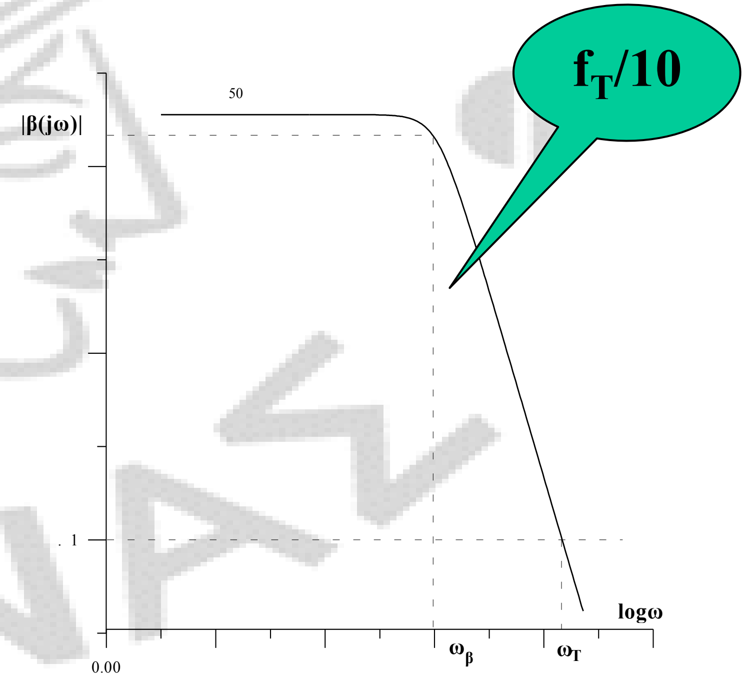
Μέτρο ενίσχυσης ρεύματος (dB): $20 \cdot \log|\beta(j\omega)| = 20log\left(\dfrac{\beta_o}{\sqrt{1^2 + \left(\dfrac{\omega}{\omega_\beta}\right)^2}}\right)$

<u>Διερεύνηση</u>

$\omega = 0 \Longrightarrow |\beta(j\omega)| = \beta_o \Longrightarrow 20 \cdot \log\beta_o \, dB$

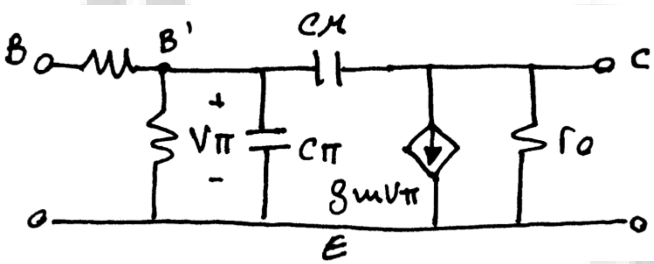
$\omega = \omega_\beta \Longrightarrow |\beta(j\omega)| = \dfrac{\beta_o}{\sqrt{2}} \Longrightarrow (20 \cdot \log\beta_o - 3)dB$

$\omega = \omega_T \Longrightarrow |\beta(j\omega)| = 1 \Longrightarrow 0dB$



Παράδειγμα

Ένα npn τρανζίστορ λειτουργεί σε I_c=0.5mA και V_{CB}=2V. Οι παράμετροι του είναι : β_0=100, V_A=50V, τ_F=30ps, C_{je0}=20fF, $C_{\mu 0}$=30fF, V_{0c}=0.75V, m_{CBJ}=0.5 και r_x=100Ω. Σχεδιάστε το πλήρες υβριδικο-π μοντέλο του και καθορίστε τιμές για όλα τα στοιχεία του. Επίσης να βρείτε τη συχνότητα f_T



$$r_x = \underline{100\Omega}$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = \frac{0.5mA}{25mV} = \underline{\underline{20\,mA/V}}$$

$$r_\pi = \frac{\beta_0}{g_m} = \frac{100}{20} = \underline{\underline{5K\Omega}}$$

$$r_o = \frac{V_A}{I_C} = \frac{50V}{0.5mA} = \underline{\underline{100K\Omega}}$$

$$C_\mu = \frac{C_{\mu 0}}{\left(1+\frac{V_{CB}}{V_{0c}}\right)^{0.5}} = \frac{30}{\left(1+\frac{2}{0.75}\right)^{0.5}} = \underline{\underline{15.7}}\,fF$$

$$C_{je} \simeq 2C_{je0} = 2\times 20 = 40fF$$

$$C_{de} = \tau_F\, g_m = 30\times 10^{-12}\times 20\times 10^{-3} = 600fF$$

$$C_\pi = C_{je} + C_{de} = \underline{\underline{0.640}}\,pF$$

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi(C_\pi + C_\mu)} = \frac{20\times 10^{-3}}{2\pi(0.64+0.016)\times 10^{-12}}$$
$$= \underline{\underline{4.85\,GHz}}$$