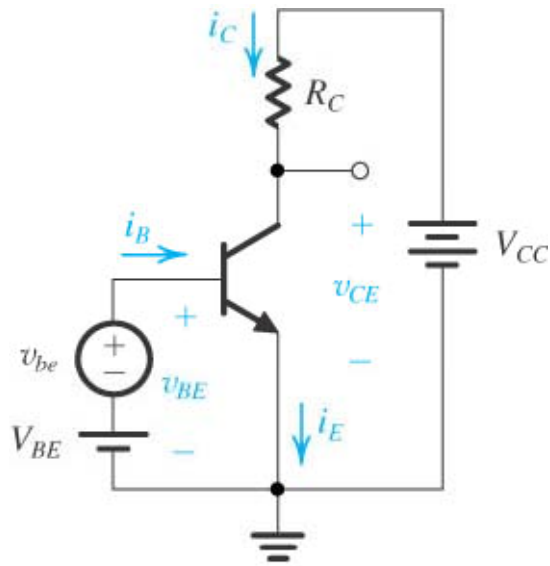


AC λειτουργία – Ισοδύναμα
κυκλώματα μικρού σήματος του
διπολικού τρανζίστορ

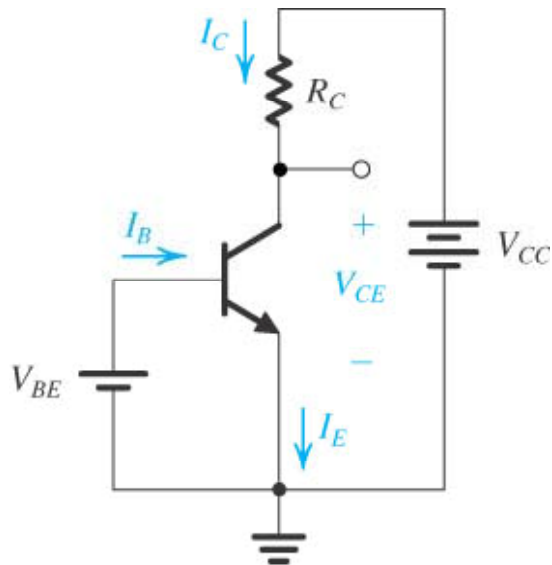
Το τρανζίστορ ως ενισχυτής



Επαλληλία της DC πόλωσης με το AC σήμα:

$$v_{BE} = V_{BE} + v_{be}$$

Το ρεύμα συλλέκτη γράφεται:



$$\begin{aligned} i_C &= I_S e^{(V_{BE} + v_{be})/V_T} \\ &= I_S e^{V_{BE}/V_T} e^{v_{be}/V_T} = I_C e^{v_{be}/V_T} \end{aligned}$$

Η διαγωγιμότητα μικρού σήματος

Για μικρό σήμα ας δηλ. $v_{be} \ll V_T$:

$$i_C = I_C e^{v_{be}/V_T} \cong I_C (1 + v_{be}/V_T)$$

$$= \underbrace{I_C}_{DC} + \underbrace{\frac{I_C}{V_T} v_{be}}_{AC}$$

Η ας συνιστώσα (σήμα) του ρεύματος συλλέκτη είναι:

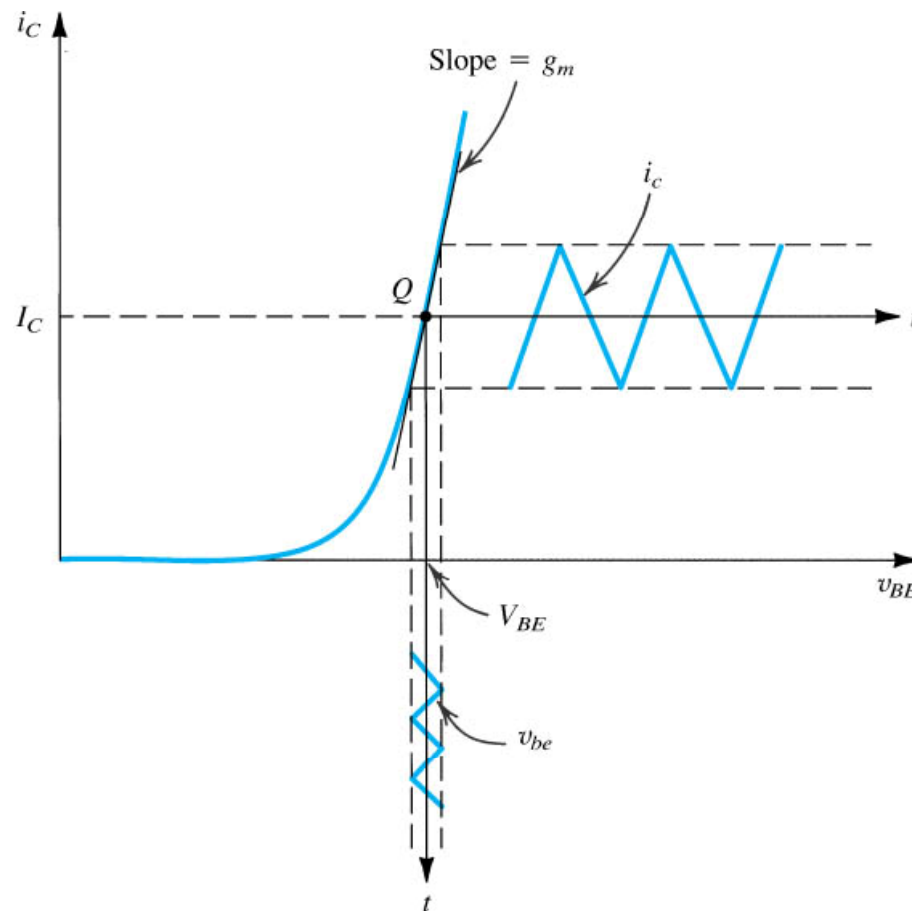
$$i_c = \frac{I_C}{V_T} v_{be}$$

Ορίζουμε:

$$g_m \equiv \frac{i_c}{v_{be}} = \frac{I_C}{V_T}$$

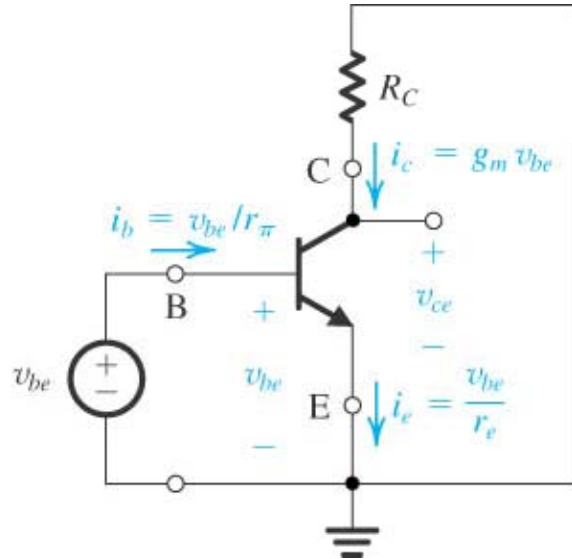
Το g_m ονομάζεται **διαγωγιμότητα** μικρού σήματος. Για σταθερό g_m απαιτείται σταθερό I_C .

Αναπαριστά την κλίση της χαρακτηριστικής i_C - v_{BE} στο σημείο ηρεμίας Q.



$$g_m \equiv \left. \frac{i_c}{v_{be}} \right|_{v_{be} \rightarrow 0} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{BE}} \right|_{i_C = I_C}$$

Το ρεύμα Βάσης και η Αντίσταση Εισόδου στη Βάση.



Το ολικό ρεύμα Βάσης:

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \underbrace{\frac{I_C}{\beta}}_{DC} + \underbrace{\frac{1}{\beta} \frac{I_C}{V_T}}_{AC} v_{be}$$

Η συνιστώσα μικρού σήματος του ρεύματος Βάσης:

$$i_b = \frac{1}{\beta} \frac{I_C}{V_T} v_{be} = \frac{g_m}{\beta} v_{be}$$

Ορίζουμε:

$$r_{\pi} \equiv \frac{v_{be}}{i_b} = \frac{\beta}{g_m} \quad \acute{\eta} \quad r_{\pi} = \frac{V_T}{I_B}$$

Το r_{π} είναι η **αντίσταση εισόδου** μικρού σήματος μεταξύ βάσης και εκπομπού όταν κοιτάζουμε από την Βάση.

Το ρεύμα Εκπομπού και η Αντίσταση Εισόδου στον Εκπομπό.

Το ολικό ρεύμα εκπομπού:

$$i_E = \frac{i_C}{a} = \frac{I_C}{\underbrace{a}_{DC}} + \frac{1}{a} \frac{I_C}{\underbrace{V_T}_{AC}} v_{be}$$

Η συνιστώσα μικρού σήματος του ρεύματος Εκπομπού:

$$i_e = \frac{1}{a} \frac{I_C}{V_T} v_{be} = \frac{I_E}{V_T} v_{be}$$

Ορίζουμε:

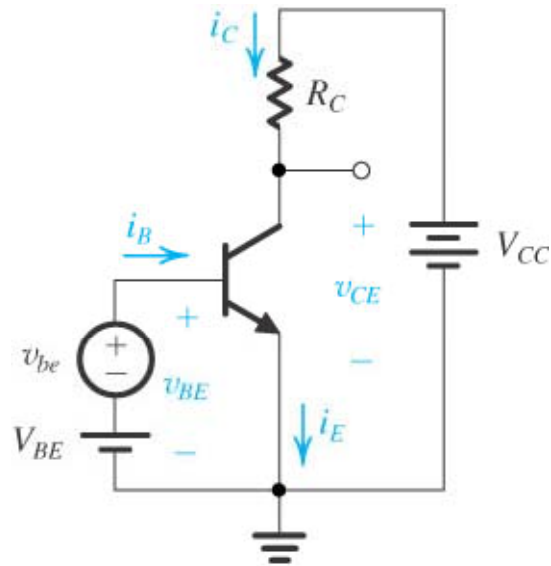
$$r_e \equiv \frac{v_{be}}{i_e} = \frac{a}{g_m} \quad \acute{\eta} \quad r_e = \frac{V_T}{I_E}$$

Το r_e είναι η **αντίσταση εισόδου** μικρού σήματος μεταξύ βάσης και εκπομπού όταν κοιτάζουμε από τον Εκπομπό.

Εύκολα μπορούμε να βρούμε ότι:

$$r_\pi = (i_e / i_b) r_e = (\beta + 1) r_e$$

Απολαβή (ενίσχυση) τάσης.



$$\begin{aligned}
 v_C &= V_{CC} - i_C R_C \\
 &= V_{CC} - (I_C + i_c) R_C \\
 &= \underbrace{(V_{CC} - I_C R_C)}_{DC} - \underbrace{i_c R_C}_{AC} = V_C - i_c R_C
 \end{aligned}$$

$$v_c = -i_c R_C = -g_m v_{be} R_C$$

$$\text{Απολαβή τάσης} \equiv \frac{v_c}{v_{be}} = -g_m R_C$$

Επειδή το g_m είναι ανάλογο του I_C , απαιτείται σταθερότητα του σημείου ηρεμίας για σταθερή απολαβή τάσης.

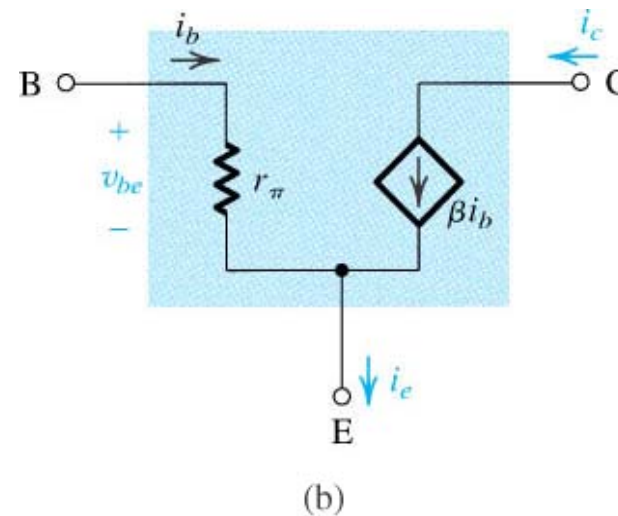
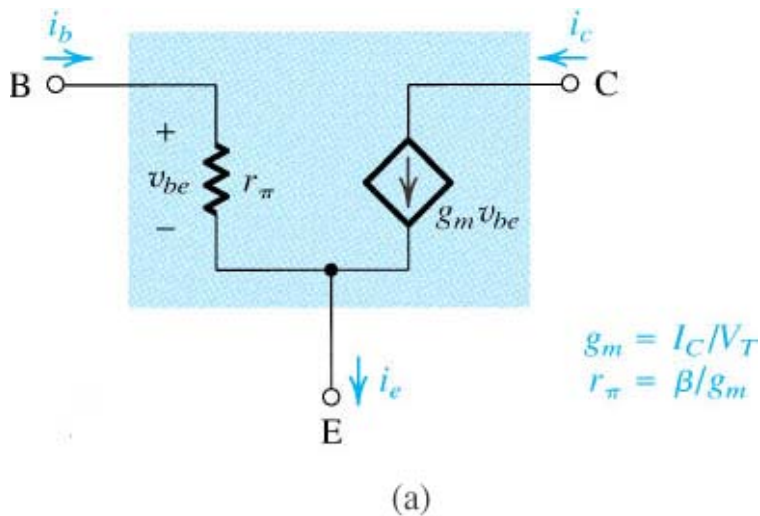
Ισοδύναμα κυκλώματα (μοντέλα) μικρού σήματος

$$\frac{i_c}{v_{be}} = g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

$$\frac{v_{be}}{i_b} = r_\pi = \frac{V_T}{I_B}$$

$$\frac{v_{be}}{i_e} = r_e = \frac{V_T}{I_E}$$

Υβριδικό-π μοντέλο μικρού σήματος του διπολικού τρανζίστορ



$$g_m v_{be} = g_m (i_b r_\pi) = (g_m r_\pi) i_b = \beta i_b$$

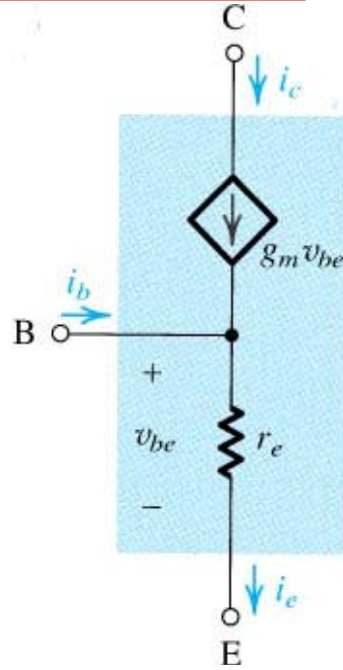
Το ισοδύναμο μικρού σήματος περιγράφει τη λειτουργία του τρανζίστορ σε ένα ορισμένο σημείο ηρεμίας αφού οι παράμετροι g_m και r_π εξαρτώνται από την τιμή του ρεύματος πόλωσης.

Μοντέλο T μικρού σήματος του διπολικού τρανζίστορ

$$\frac{i_c}{v_{be}} = g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

$$\frac{v_{be}}{i_b} = r_\pi = \frac{V_T}{I_B}$$

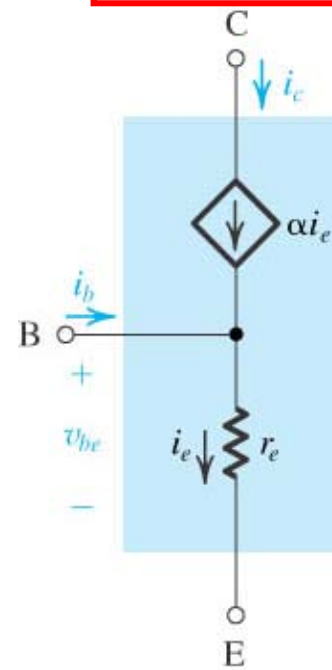
$$\frac{v_{be}}{i_e} = r_e = \frac{V_T}{I_E}$$



(a)

$$g_m = I_C / V_T$$

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = \frac{\alpha}{g_m}$$

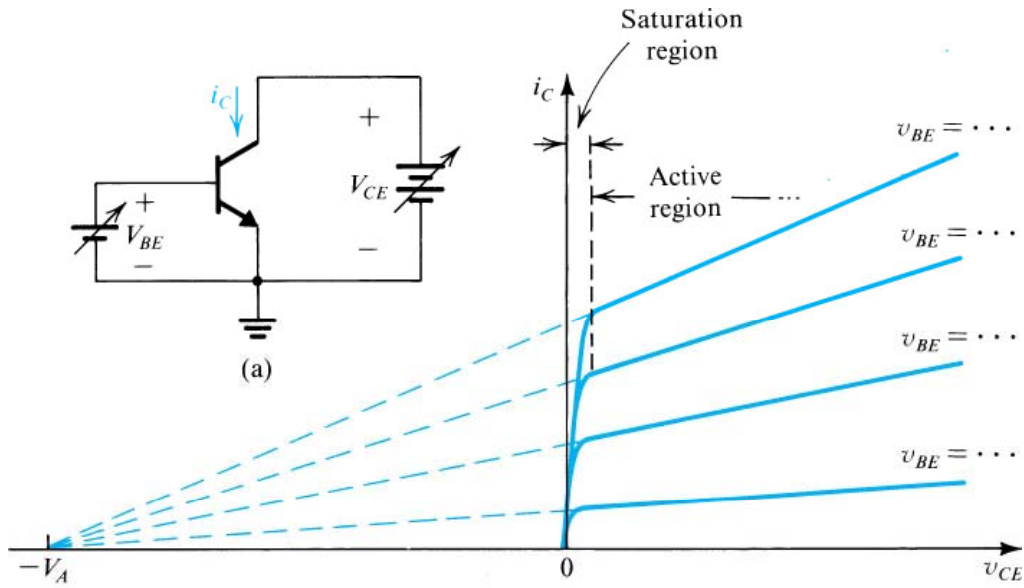


(b)

$$g_m v_{be} = g_m (i_e r_e) = (g_m r_e) i_e = \alpha i_e$$

Το μοντέλο αυτό είναι χρήσιμο σε συνδεσμολογίες κοινής βάσης.

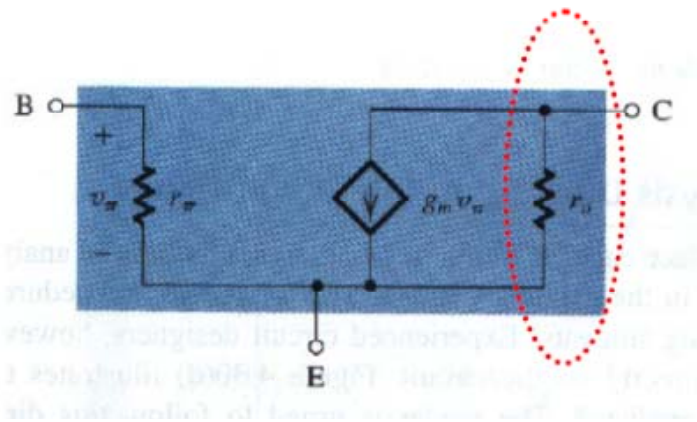
Υβρδικό-π μοντέλο που περιλαμβάνει και το φαινόμενο Early



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

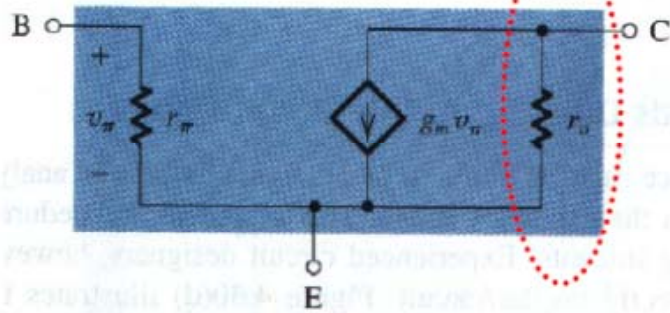
Ορίζουμε:

$$r_o = \left(\frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \Big|_{\text{fixed } v_{BE}} \right)^{-1} = \frac{V_A + V_{CE}}{I_C} \approx \frac{V_A}{I_C}$$



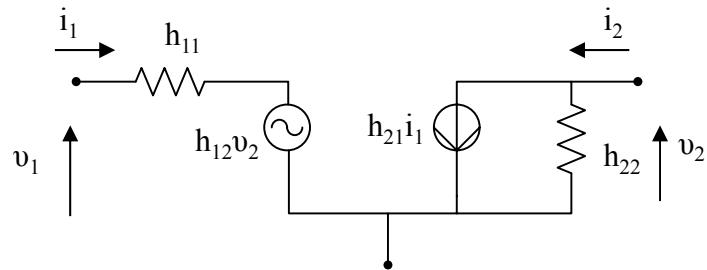
Σχέση μεταξύ π-υβριδικού και h-υβριδικού μοντέλου κοινού εκπομπού του διπολικού τρανζίστορ.

Το π-υβριδικό κοινού εκπομπού ενός τρανζίστορ



$$g_m v_{be} = g_m (i_b r_\pi) = (g_m r_\pi) i_b = \beta i_b$$

Το h-υβριδικό ενός τετραπόλου

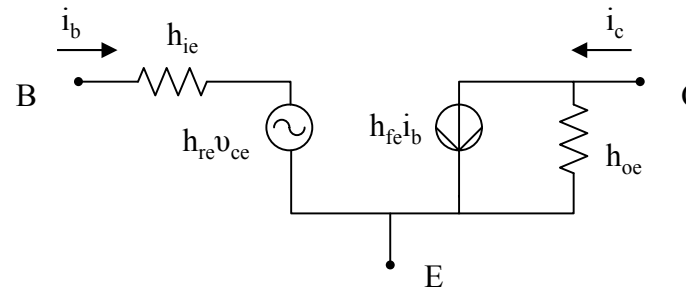


Αντιστοιχία των γενικευμένων h-παραμέτρων με τις h-παραμέτρους του τρανζίστορ κοινού εκπομπού

$$\begin{aligned} h_{11} &= h_{ie} & v_1 &= v_{be} \\ h_{12} &= h_{re} & v_2 &= v_{ce} \\ h_{21} &= h_{fe} & i_1 &= i_b \\ h_{22} &= h_{oe} & i_2 &= i_c \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_{be} &= h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \\ i_c &= h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \end{aligned}$$

Το h-υβριδικό κοινού εκπομπού ενός τρανζίστορ



Αντιστοιχία των h-παραμέτρων με τις π-παραμέτρους του τρανζίστορ κοινού εκπομπού

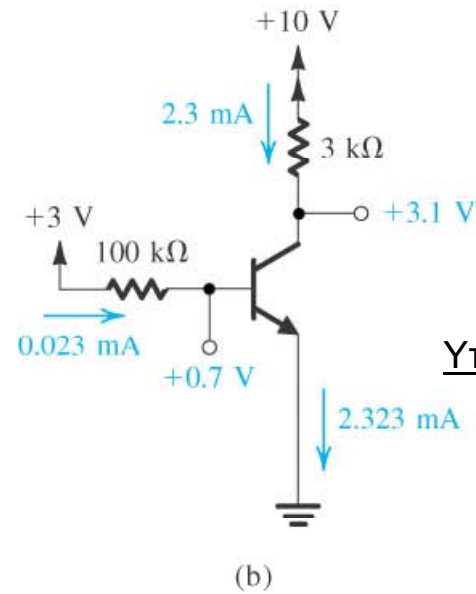
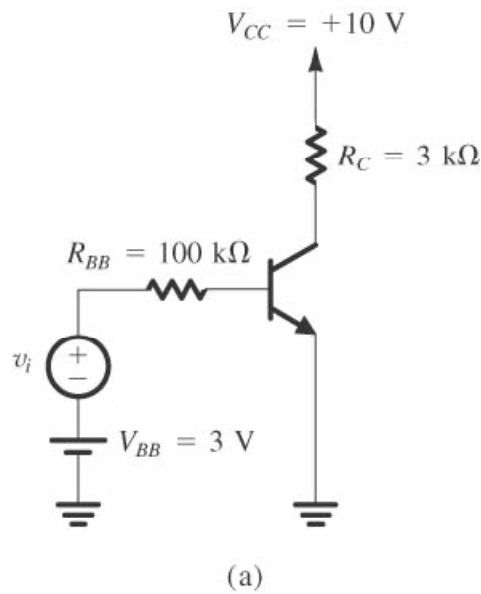
$$\begin{aligned} h_{ie} &= r_\pi \\ h_{re} &\approx 0 \\ h_{fe} &= \beta \\ h_{oe} &= \frac{1}{r_o} \end{aligned}$$

Χρήση των ισοδύναμων κυκλωμάτων μικρού σήματος

Βήματα για την ανάλυση μικρού σήματος:

1. Προσδιορίζουμε το DC σημείο λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ.
 - Ειδικότερα το ρεύμα Συλλέκτη.
2. Υπολογίζουμε τις παραμέτρους του μοντέλου μικρού σήματος: g_m , r_π , r_e
3. Απαλείφουμε τις DC πηγές.
 - Αντικαθιστούμε τις πηγές τάσης από βραχυκύκλωμα και τις πηγές ρεύματος από ανοιχτοκύκλωμα.
4. Αντικαθιστούμε τα τρανζίστορ από τα ισοδύναμα μοντέλα μικρού σήματος.
 - Επιλέγουμε το πιο βολικό μοντέλο σε συμφωνία με το υπόλοιπο κύκλωμα.
5. Αναλύουμε το γραμμικό κύκλωμα που προκύπτει.

Παράδειγμα: Να υπολογιστεί η απολαβή μικρού σήματος του ενισχυτή με τρανζίστορ.
Υποθέτουμε $\beta=100$.



DC ανάλυση:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_{BB}} = 0.023mA$$

$$I_C = \beta I_B = 2.3mA$$

$$V_C = V_{CC} - I_C R_C = 3.1V$$

Υπολογισμός των παραμέτρων μικρού σήματος:

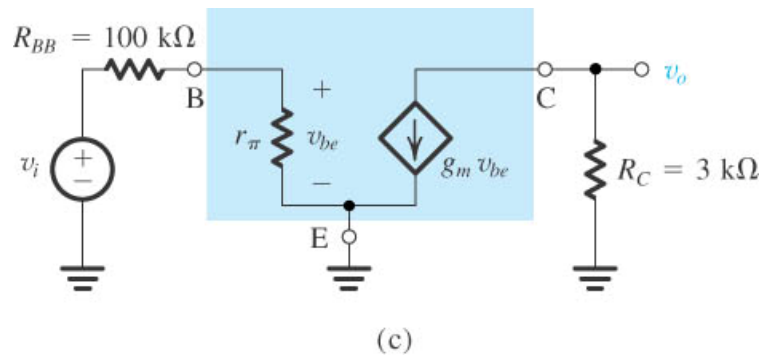
$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = 10.8\Omega$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} = 92mA/V$$

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = 1.09k\Omega$$

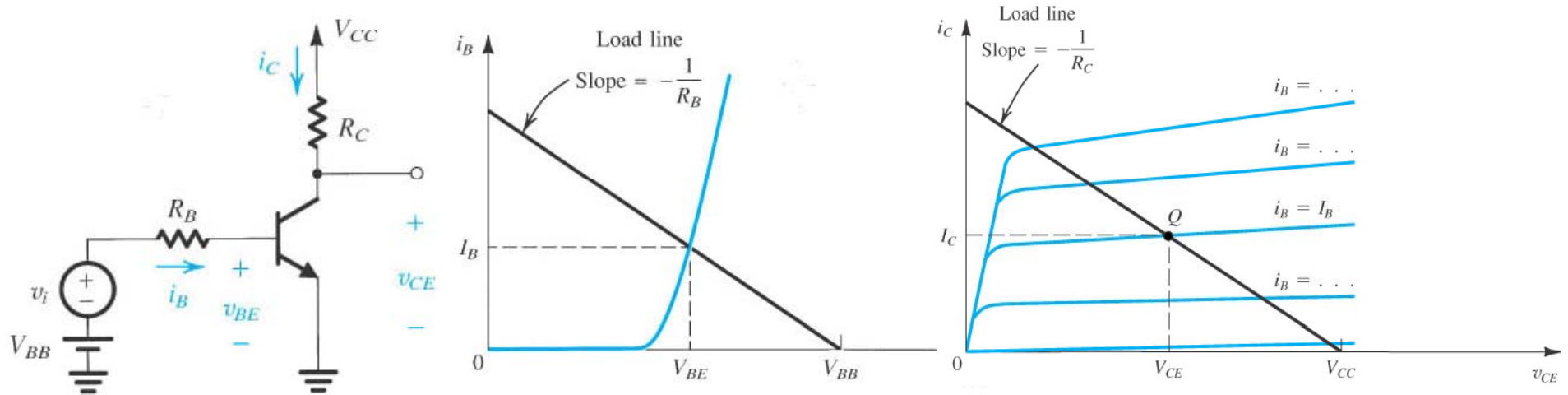
AC ανάλυση:

$$v_{be} = v_i \frac{r_\pi}{r_\pi + R_{BB}} = 0.011v_i$$



$$v_o = -g_m v_{be} R_C = -3.04v_i \Rightarrow \frac{v_o}{v_i} = -3.04$$

Γραφική Ανάλυση



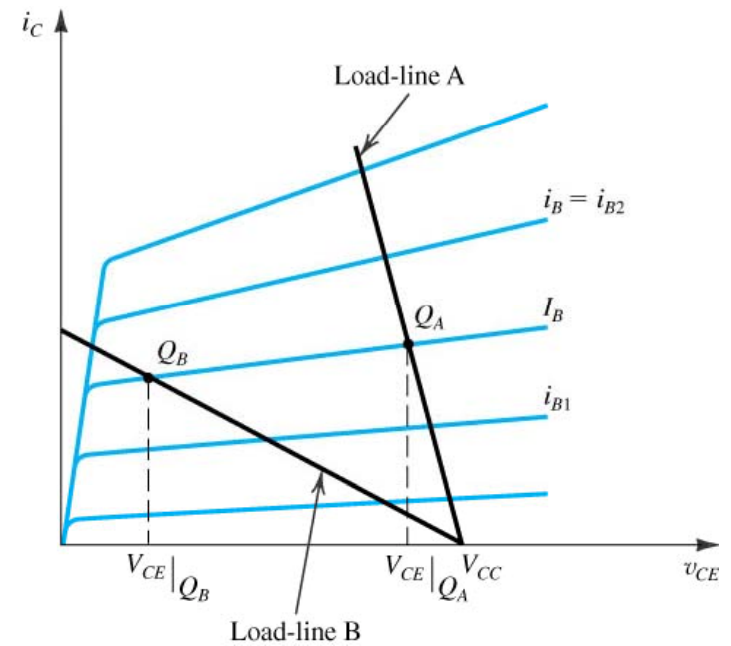
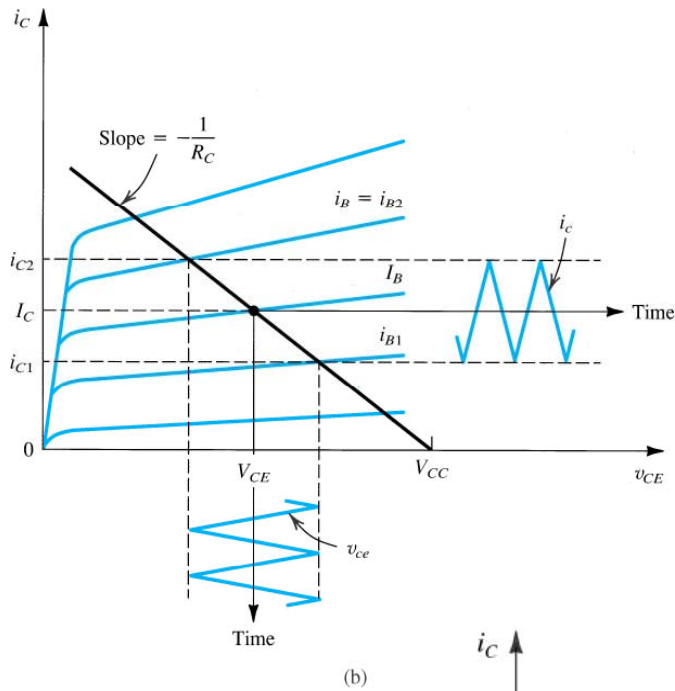
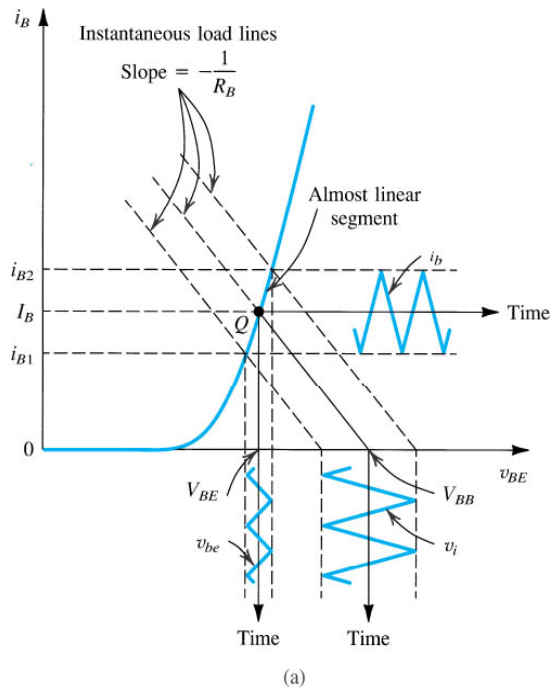
1. Προσδιορίζουμε το DC ρεύμα Βάσης του διπολικού τρανζίστορ.
 - Ευθεία φόρτου εισόδου:

$$v_{BE} = V_{BB} - R_B i_B$$

2. Προσδιορίζουμε το DC ρεύμα Συλλέκτη του διπολικού τρανζίστορ.
 - Ευθεία φόρτου εξόδου:

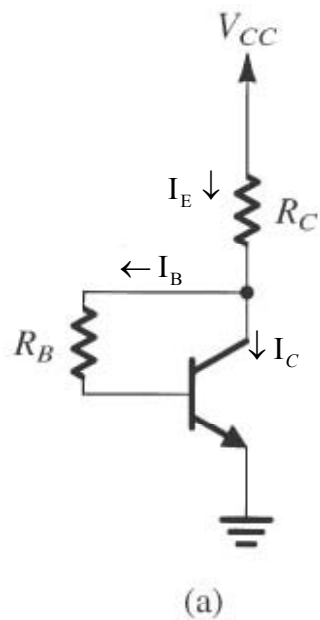
$$v_{CE} = V_{CC} - i_C R_C \Rightarrow i_C = \frac{V_{CC}}{R_C} - \frac{1}{R_C} v_{CE}$$

Εφαρμογή μικρού σήματος



Άσκηση: Να σχεδιαστεί το κύκλωμα του παρακάτω σχήματος για $V_{CC}=9V$ έτσι ώστε να έχουμε ρεύμα εκπομπού $I_E=1mA$ και να εξασφαλίζεται μεταβολή σήματος στο συλλέκτη $\pm 2V$.

Δίνεται $\beta=100$.



$$V_{CC} = \underbrace{(I_C + I_B)}_{I_E} R_C + \underbrace{I_B}_{I_E/\beta+1} R_B + V_{BE} \Rightarrow$$

$$V_{CC} - V_{BE} = I_E \left(R_C + \frac{R_B}{1 + \beta} \right) \Rightarrow$$

$$I_E = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + \frac{R_B}{1 + \beta}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Θελουμε } \frac{R_B}{1 + \beta} \ll R_C \text{ (για σταθερότητα)} \\ \text{Επισης } V_C > V_B = V_{BE} = 0.7V \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$V_{CQ} = 2V + 0.7V = 2.7V = V_{CB} + V_{BE}$$

$$V_{CB} = I_B R_B = 2V \Rightarrow R_B = \frac{V_{CB}}{I_E} (\beta + 1) = 202k\Omega,$$

$$V_{CC} = (I_C + I_B) R_C + V_{CE} \Rightarrow$$

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C + I_B} k\Omega = \frac{9 - 2.7}{1} k\Omega = 6.3k\Omega$$

