



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Ηλεκτρονική

Ενότητα 6: Η AC λειτουργία του διπολικού
τρανζίστορ

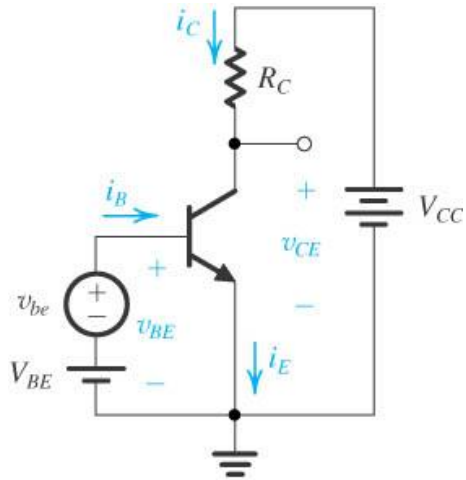
Αγγελική Αραπογιάννη
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

Περιεχόμενα ενότητας

- Το μοντέλο μικρού σήματος του τρανζίστορ. Οι παράμετροι μικρού σήματος και η σχέση τους με το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ.
- Το π-υβριδικό μοντέλο μικρού σήματος του τρανζίστορ και η σχέση του με το h υβριδικό κοινού εκπομπού.
- Χρήση των ισοδυνάμων κυκλωμάτων μικρού σήματος για την ανάλυση των κυκλωμάτων ενισχυτών με διπολικά τρανζίστορ.
- Γραφική ανάλυση μικρού σήματος των ενισχυτών με διπολικά τρανζίστορ.



Το τρανζίστορ ως ενισχυτής

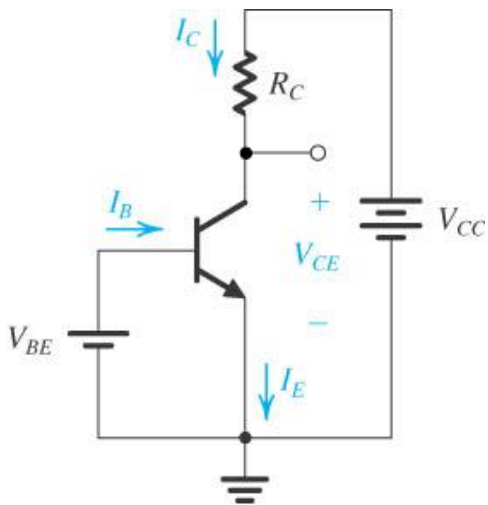


Επαλληλία της DC πόλωσης με το AC σήμα:

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

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:

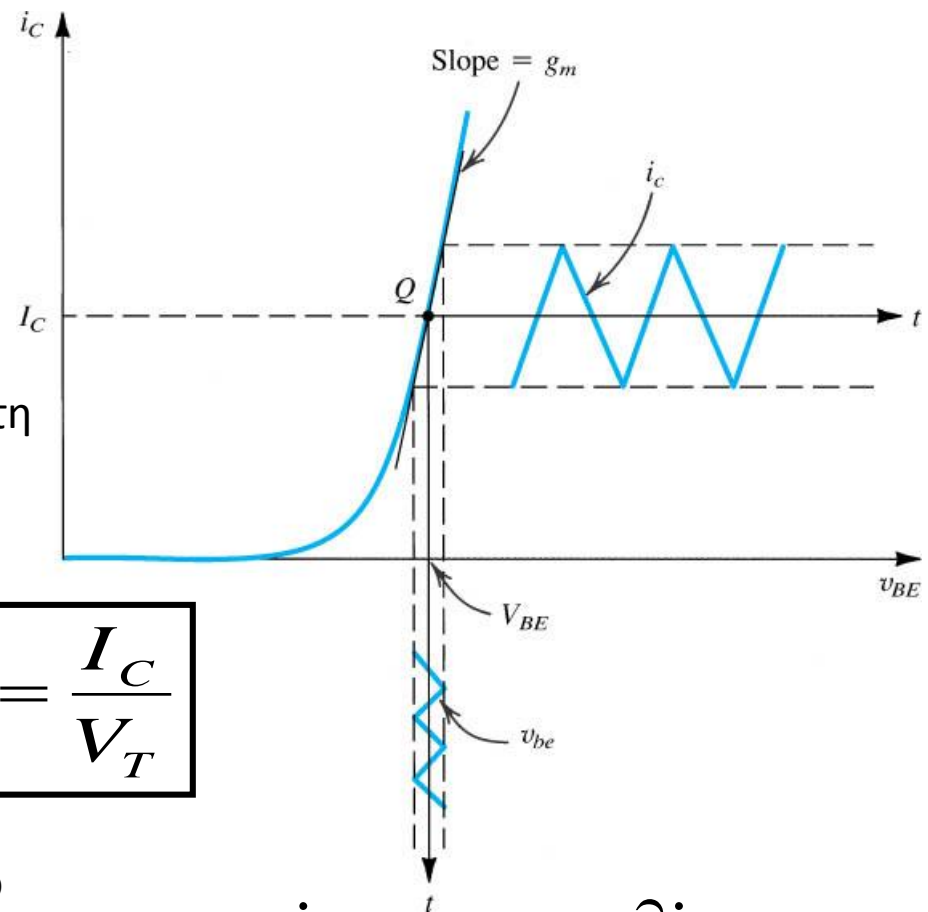
$$i_c = \frac{I_C}{V_T} v_{be}$$

Ορίζουμε:

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

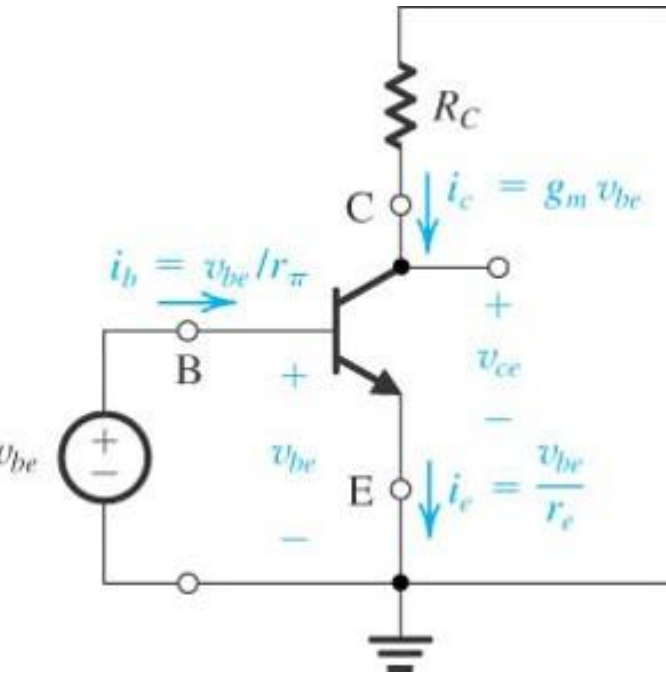
Το g_m ονομάζεται **διαγωγιμότητα μικρού σήματος**. Για σταθερό g_m απαιτείται σταθερό I_C .

Αναπαριστά την κλίση της χαρακτηριστικής i_c 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:

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

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

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:

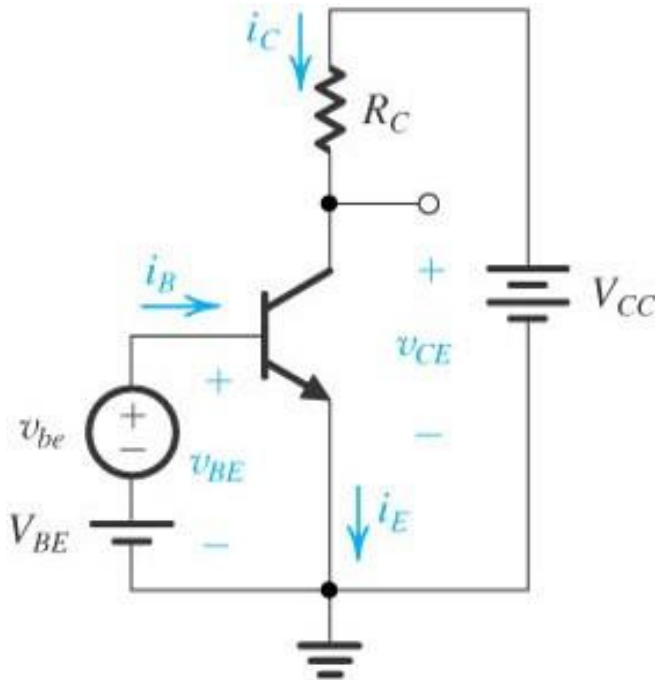
$$r_e \equiv \frac{v_{be}}{i_e} = \frac{a}{g_m} \quad \acute{\eta} \quad r_e = \frac{V_T}{I_E}$$

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

Εύκολα μπορούμε να βρούμε ότι: $r_{\pi} = \left(\frac{i_e}{i_b}\right) r_e = (\beta + 1)r_e$



Απολαβή (ενίσχυση) τάσης



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

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

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

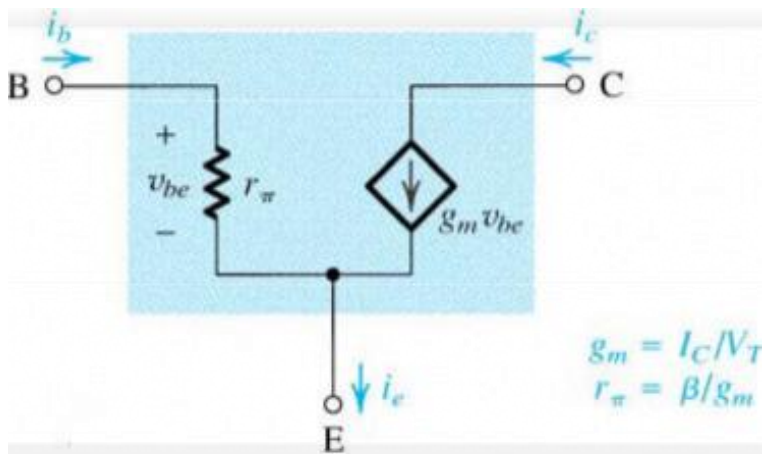
Ισοδύναμα κυκλώματα (μοντέλα) μικρού σήματος (1από5)

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

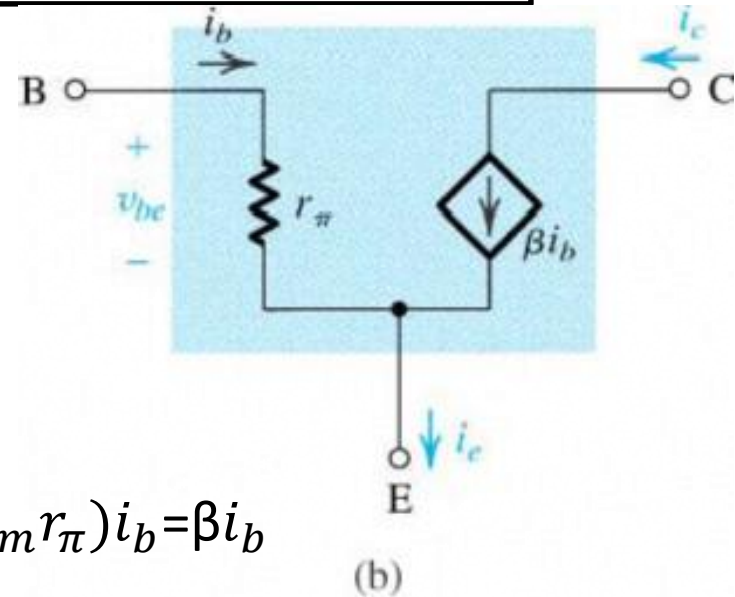
$$\frac{v_{be}}{i_b} = r_\pi = \frac{V_T}{I_B}$$

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

Υβριδικό-π μοντέλο μικρού σήματος του διπολικού τρανζίστορ



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



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.

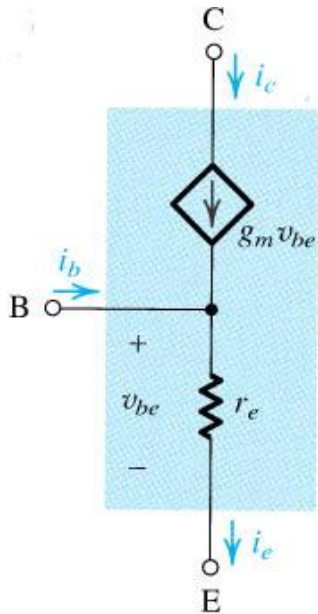
Ισοδύναμα κυκλώματα (μοντέλα) μικρού σήματος (2από5)

Μοντέλο T μικρού σήματος του διπολικού τρανζίστορ

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

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

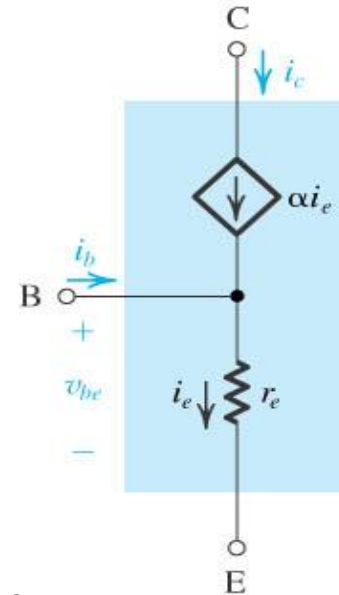
$$\frac{v_{be}}{i_e} = r_e = \frac{V_T}{I_E}$$



$$g_m = I_C/V_T$$

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

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



(a)

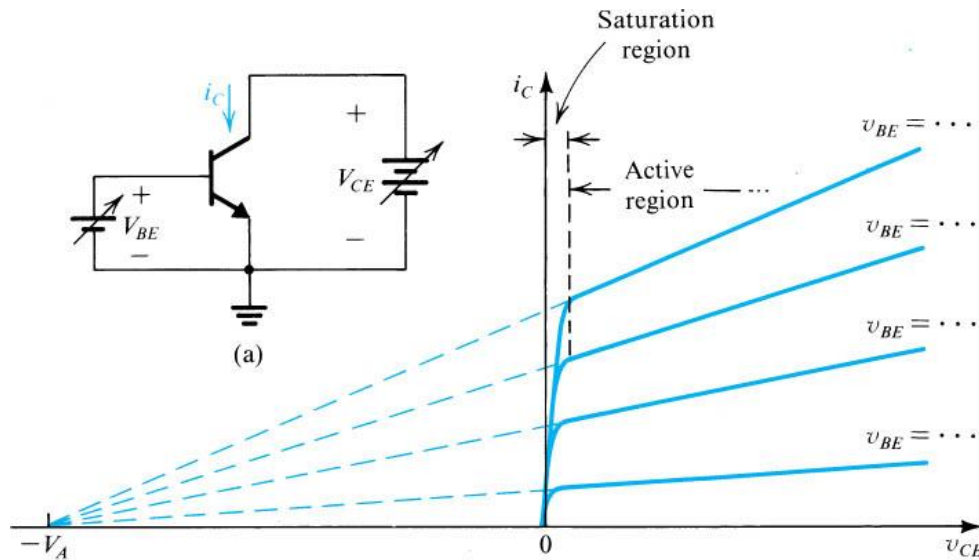
(b)

Το μοντέλο αυτό είναι χρήσιμο σε συνδεσμολογίες κοινής βάσης.



Ισοδύναμα κυκλώματα (μοντέλα) μικρού σήματος (3 από 5)

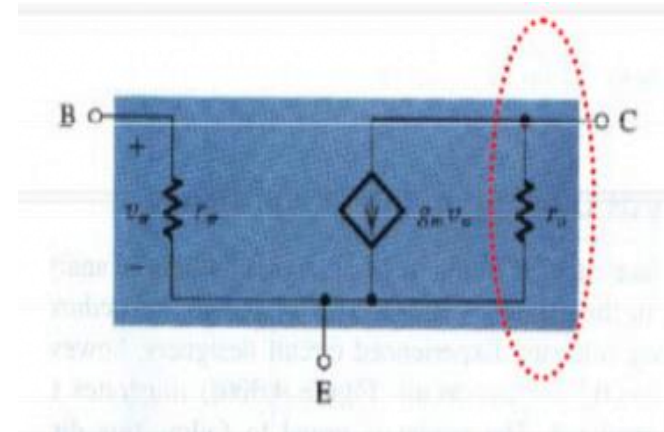
Υβρικό-π μοντέλο που περιλαμβάνει και το φαινόμενο Early



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

Ορίζουμε:

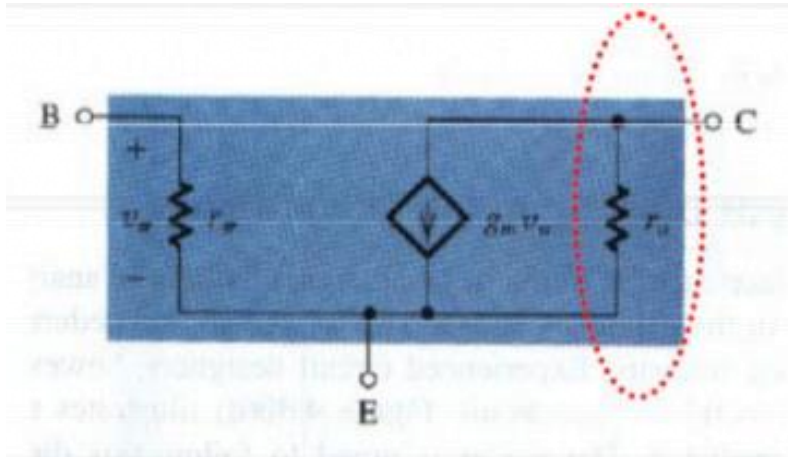
$$r_o = \left(\left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{\text{fixed } v_{BE}} \right)^{-1} = \frac{V_A + V_{CE}}{I_C} \approx \frac{V_A}{I_C}$$



Ισοδύναμα κυκλώματα (μοντέλα) μικρού σήματος (4από5)

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

Το π-υβριδικό κοινού εκπομπού ενός τρανζίστορ

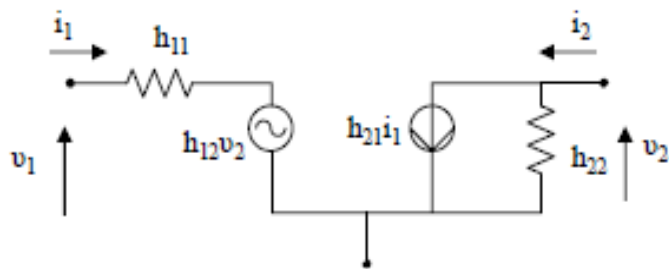


$$g_m v_{be} = g_m (i_b r_{\pi}) = (g_m r_{\pi}) i_b = \beta i_b$$

Ισοδύναμα κυκλώματα (μοντέλα) μικρού σήματος (5από5)

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

Το h-υβριδικό ενός τετραπόλου



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

$$h_{11} = h_{ie} \quad v_1 = v_{be}$$

$$h_{12} = h_{re} \quad v_2 = v_{ce}$$

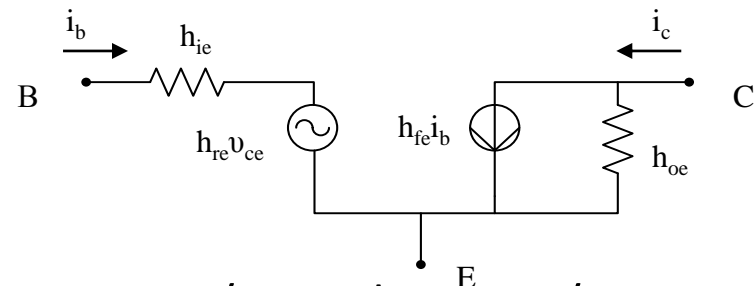
$$h_{21} = h_{fe} \quad i_1 = i_b$$

$$h_{22} = h_{oe} \quad i_2 = i_c$$

$$v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce}$$

$$i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce}$$

Το h-υβριδικό κοινού εκπομπού ενός τρανζίστορ



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

$$h_{ie} = r_{\pi}$$

$$h_{re} \approx 0$$

$$h_{fe} = \beta$$

$$h_{oe} = \frac{1}{r_o}$$



Χρήση των ισοδύναμων κυκλωμάτων μικρού σήματος

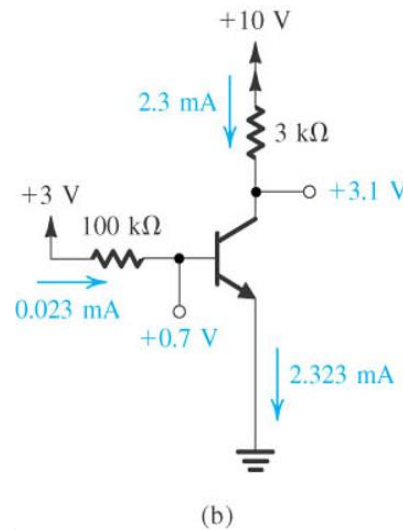
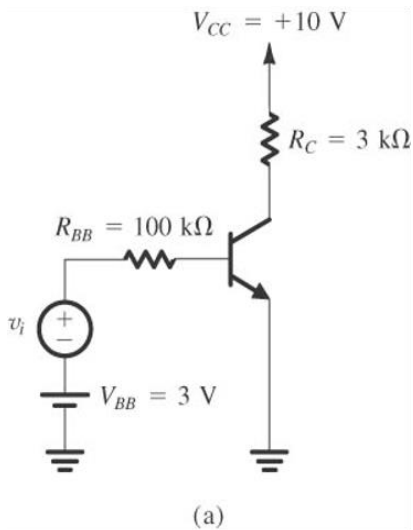
Βήματα για την ανάλυση μικρού σήματος:

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 ανοιχτό κύκλωμα.
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 (1 από 2)

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



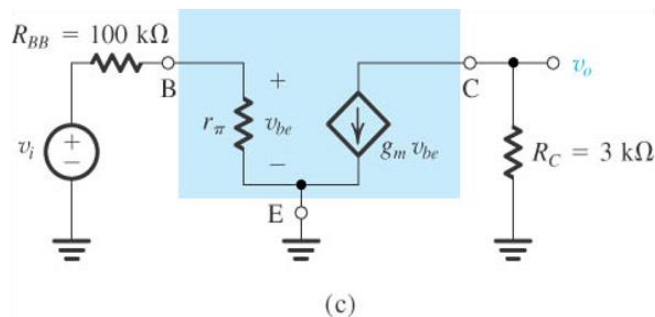
DC ανάλυση

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

$$I_C = \beta I_B = 2.3 \text{ mA}$$

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

Υπολογισμός των παραμέτρων μικρού σήματος

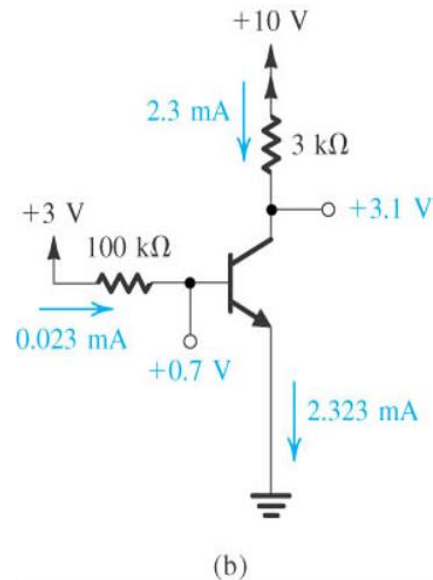
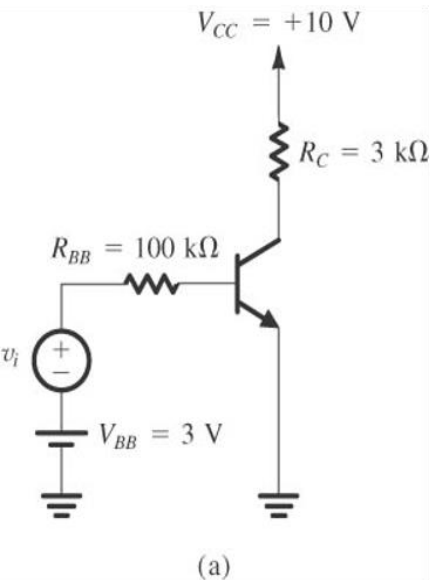


$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = 10.8 \Omega$$

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

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

Παράδειγμα (2 από 2)

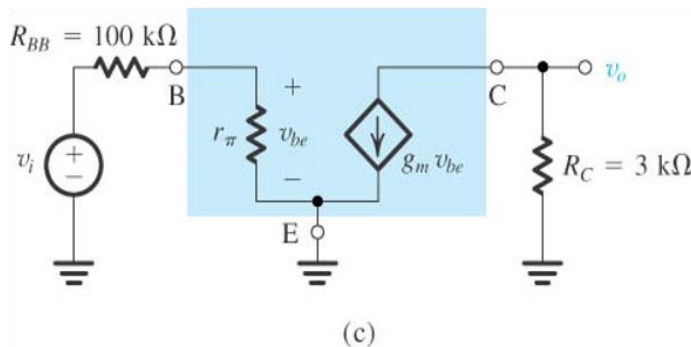


AC ανάλυση

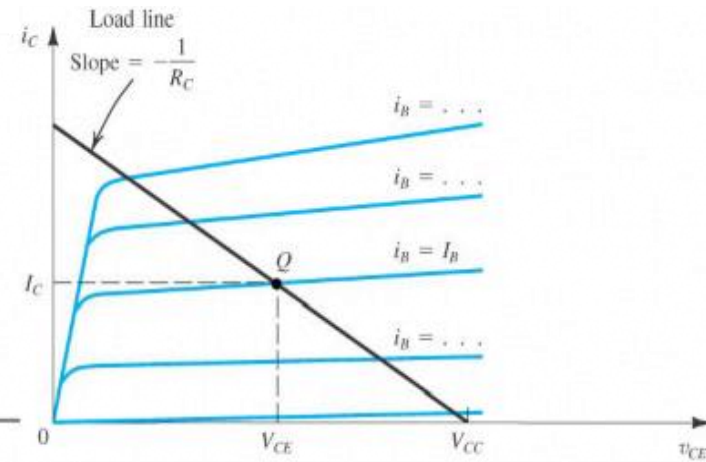
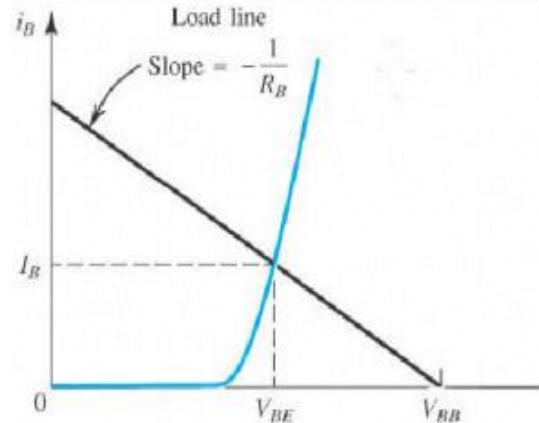
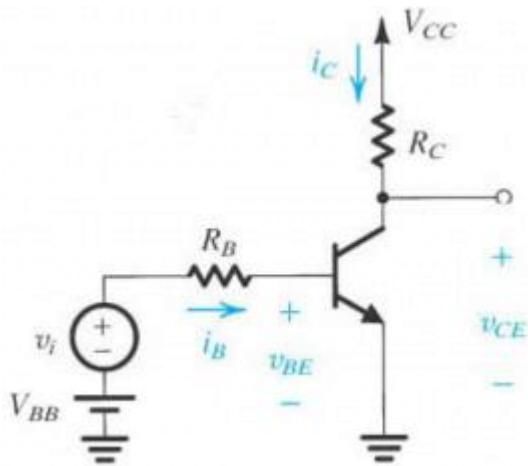
$$v_{be} = v_i \frac{r_{\pi}}{r_{\pi} + R_{BB}} = 0.011v_i$$

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

$$\Rightarrow \boxed{\frac{v_o}{v_i} = -3.04}$$



Γραφική Ανάλυση



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

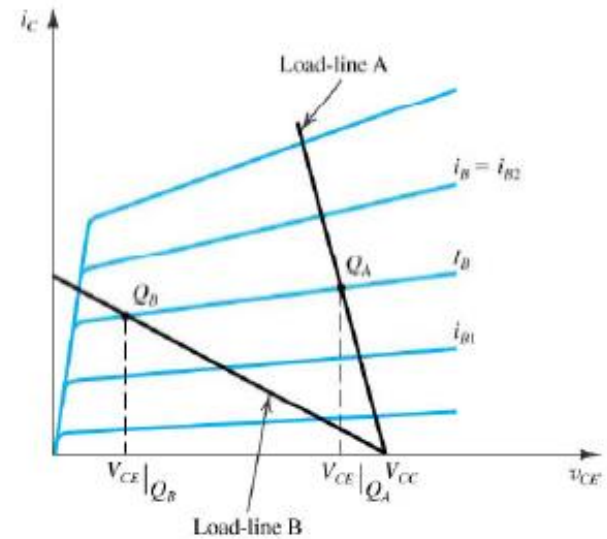
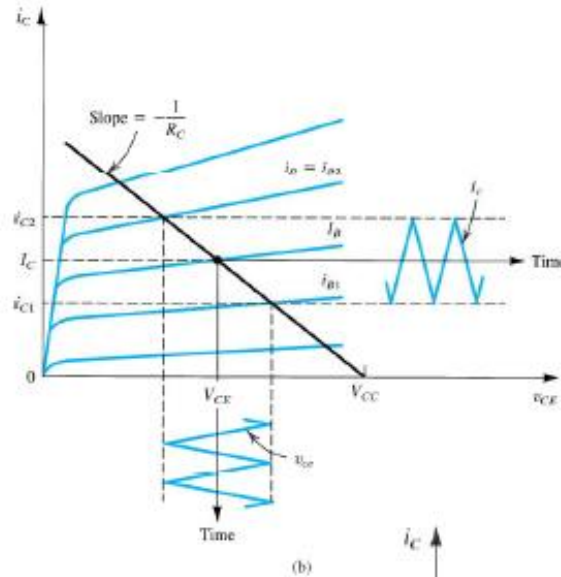
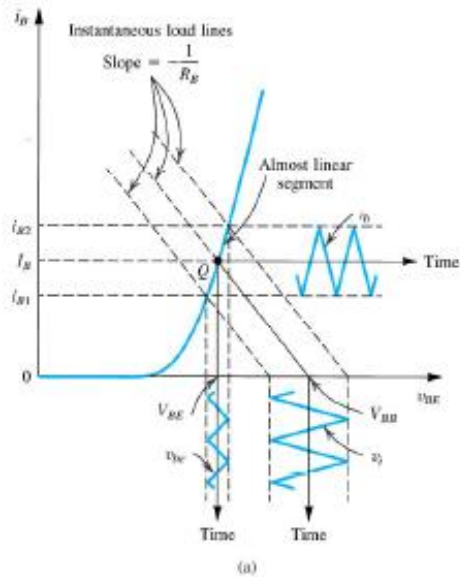
$$v_{BE} = V_{BB} - R_B i_B$$

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

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

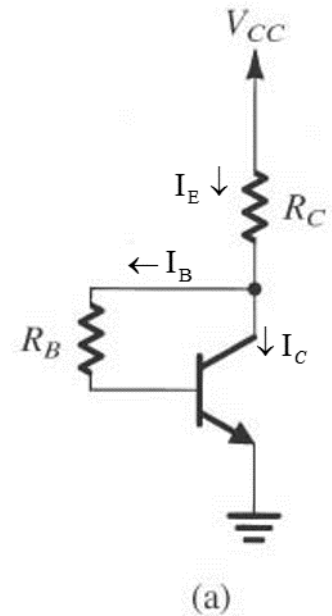


Εφαρμογή μικρού σήματος



Άσκηση (1 από 2)

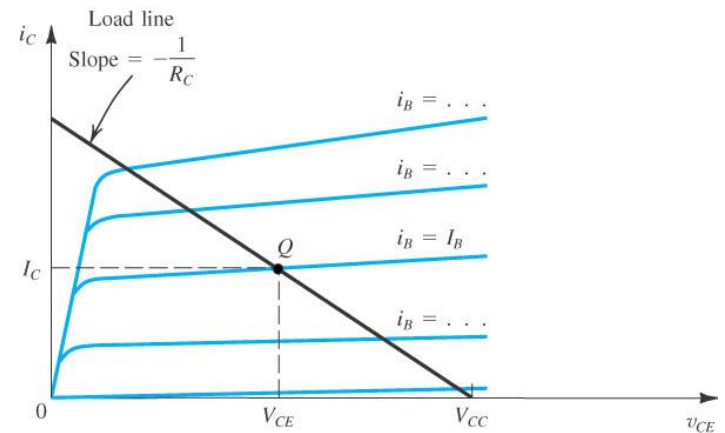
Να σχεδιαστεί το κύκλωμα του παρακάτω σχήματος για $V_{CC}=9V$ έτσι ώστε να έχουμε ρεύμα εκπομπού $I_E=1mA$ και να εξασφαλίζεται μεταβολή σήματος στο συλλέκτη $\pm 2V$.
Δίνεται $\beta=100$.



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

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

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



Άσκηση (2 από 2)

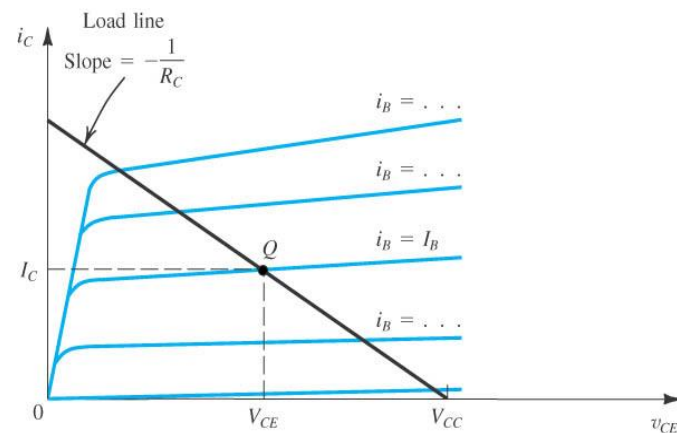
Θελούμε $\frac{R_B}{1+\beta} \ll R_C$ (για σταθερότητα)

Επισης $V_C > V_B = V_{BE} = 0.7V$

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

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

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



Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



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.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Αραπογιάννη Αγγελική 2014. «Ηλεκτρονική. Ενότητα 6: Η AC λειτουργία του διπολικού τρανζίστορ». Έκδοση: 1.01. Αθήνα 2014.

Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:

<http://opencourses.uoa.gr/courses/DI4/>



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» 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.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

