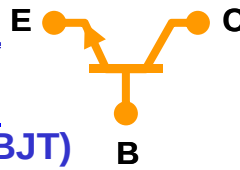


ΤΛ1001 Μάθημα-12



Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής (BJT)

- Δομή & Αρχή Λειτουργίας
- Περιοχές Πόλωσης Τρανζίστορ
- Βασικές Συνδεσμολογίες
- Ανάλυση κυκλώματος με τρανζίστορ

Λευτέρης Καπετανάκης



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

Ηλεκτρονικών Μηχανικών Τ.Ε.

Χειμώνας 2019

ΤΛ1001

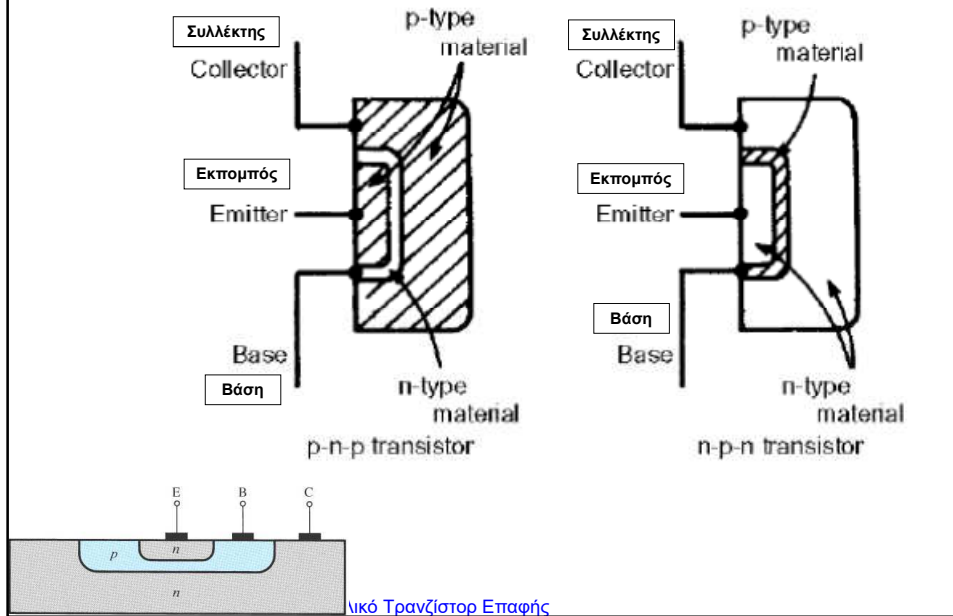
L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Στις διαφάνειες των διαλέξεων χρησιμοποιείται διδακτικό υλικό το οποίο έχει δανειστεί από διάφορα εκπαιδευτικά βιβλία και διαδικτυακές σελίδες. Ο εισηγητής δεν έχει καμιά αξίωση κατοχής του υλικού αυτού και το χρησιμοποιεί μόνο για λόγους διδασκαλίας εντός της τάξης. Οι εικόνες και οι πίνακες είναι κτήμα διαφόρων συγγραφέων και παρέχονται στον αντίστοιχο δικτυότοπό τους.

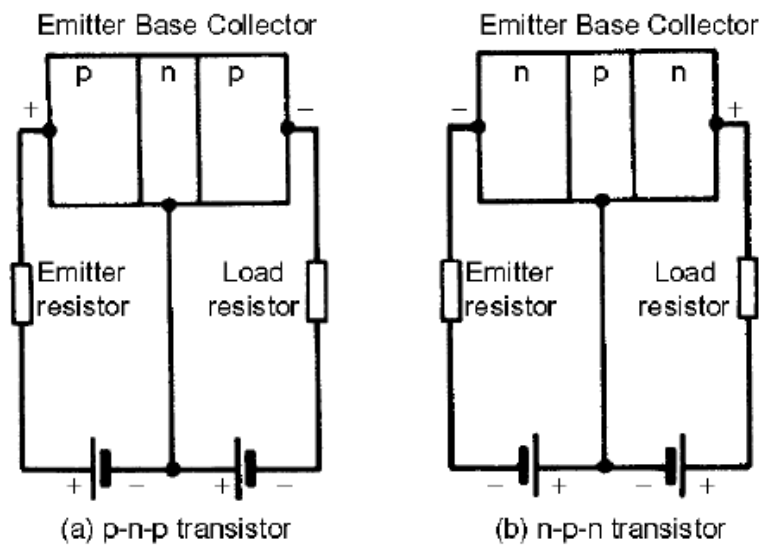
ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Εγκάρσια τομή τρανζίστορ



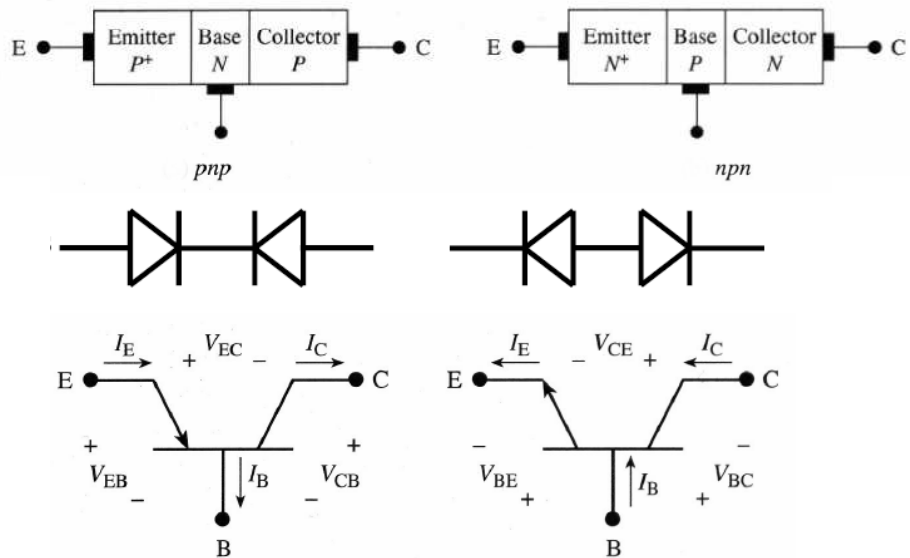
Δομή & Συνήθης Πόλωση



ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Σχηματική παράσταση του τρανζίστορ



ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Περιοχές Πόλωσης Τρανζίστορ

Περιοχή	EBJ	CBJ
Αποκοπή	Ανάστροφα	Ανάστροφα
Ενεργός	Ορθά	Ανάστροφα
Κόρος	Ορθά	Ορθά

Ενεργός: Είναι χρήσιμη στους ενισχυτές. Η πιο συνηθισμένη κατάσταση

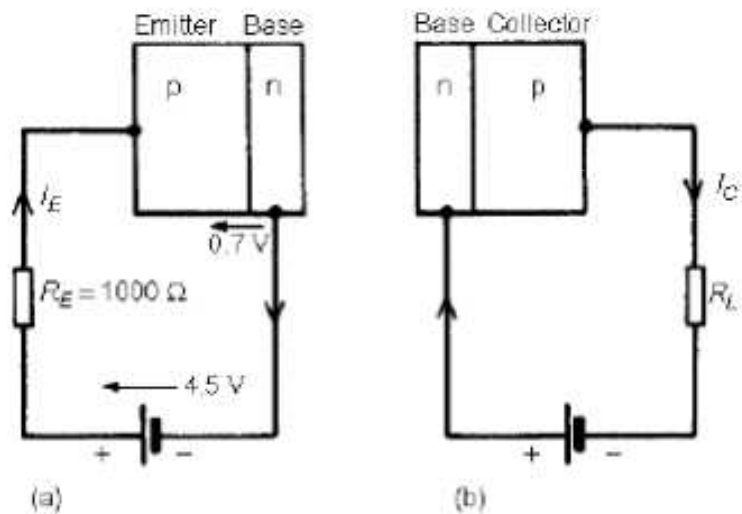
Κόρος: Ισοδύναμη με την κατάσταση «ON» όταν το τρανζίστορ χρησιμοποιείται ως διακόπτης

Αποκοπή: Ισοδύναμη με την κατάσταση «OFF» όταν το τρανζίστορ χρησιμοποιείται ως διακόπτης

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Ενεργός Περιοχή

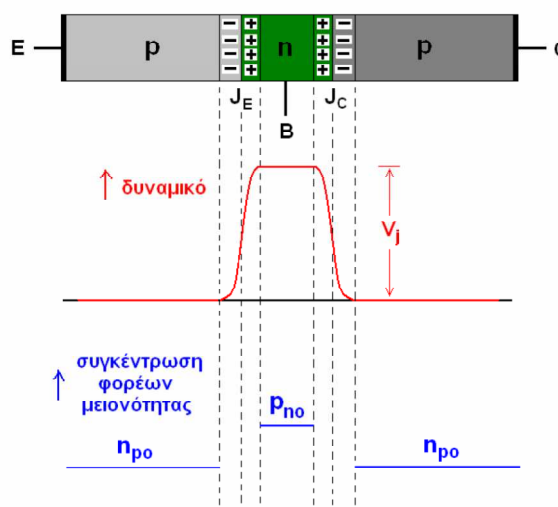


ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Το τρανζίστορ pnp σε Θερμική Ισορροπία

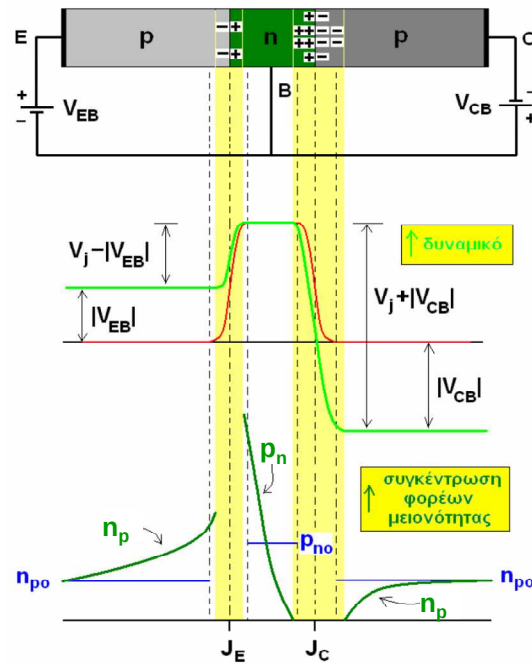
ΤΟ ΔΙΠΟΛΙΚΟ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΑΦΗΣ



ΤΛ1001

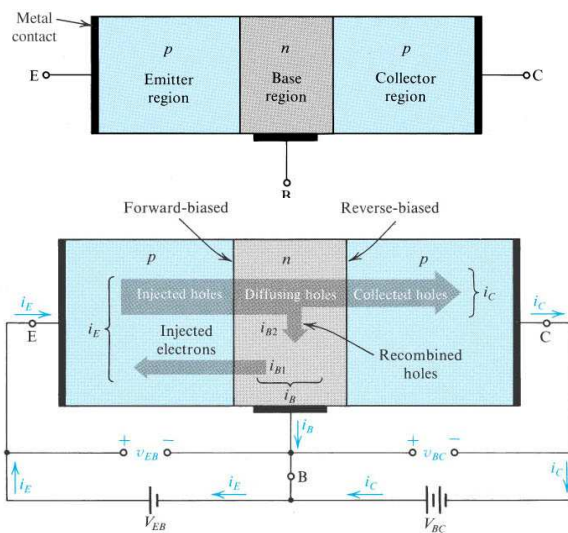
L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Το τρανζίστορ pnp στην ενεργό περιοχή



ΤΛ1001

Το τρανζίστορ pnp στην ενεργό περιοχή

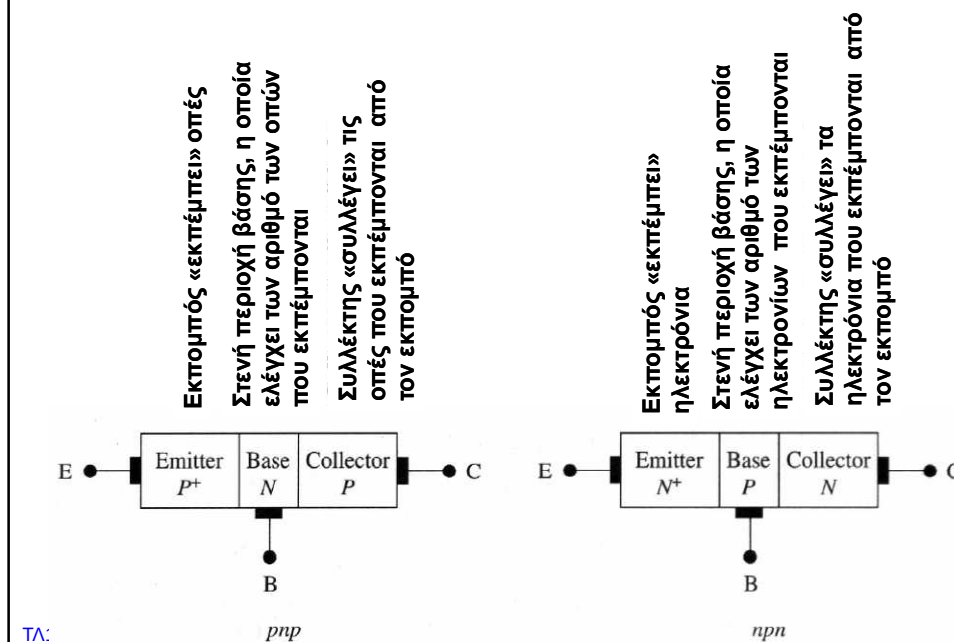


Τα ρεύματα του τρανζίστορ pnp στην ενεργό περιοχή.

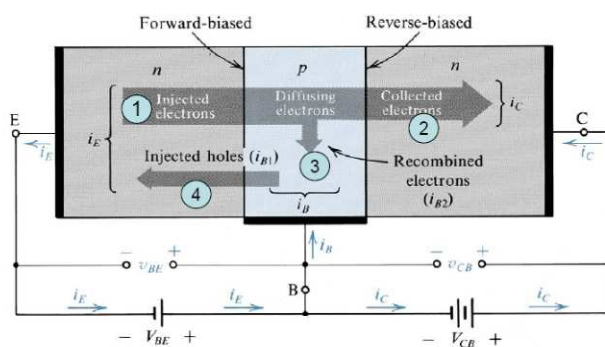
ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Δομή & Αρχή Λειτουργίας



Το τρανζίστορ npn στην ενεργό περιοχή

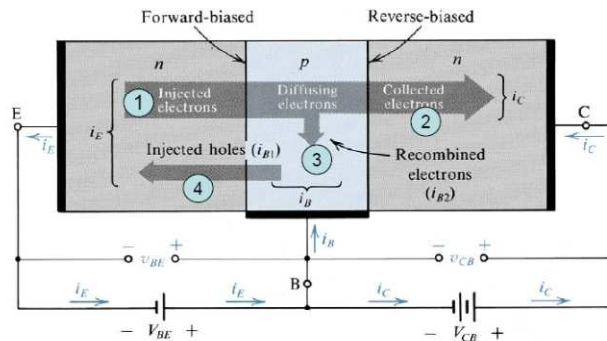


1. Η ορθή πόλωση της επαφής EB εγχέει ηλεκτρόνια από τον εκπομπό στη βάση.
2. Επειδή η περιοχή της βάσης είναι πολύ λεπτή, η πλειονότητα αυτών των ηλεκτρονίων διαχέεται προς την περιοχή απογύμνωσης της επαφής BC και κατόπιν σαρώνονται προς τον συλλέκτη από το ηλεκτρικό πεδίο της ανάστροφα πολωμένης επαφής BC.
3. Ένα μικρό ποσοστό από αυτά τα ηλεκτρόνια επανασυνδέονται με τις οπές στην περιοχή της βάσης.
4. Οπές εγχέονται από τη βάση στην περιοχή του εκπομπού, $(4) \ll (1)$.

ΤΑ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Το ρεύμα Βάσης



Το ρεύμα της βάσης αποτελείται από δύο συνιστώσες: i_{B1} και i_{B2}

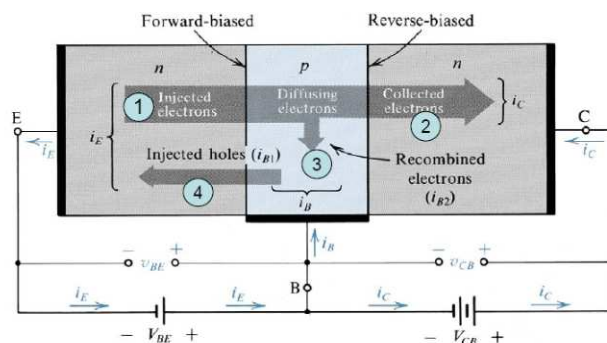
- το i_{B1} είναι εκθετική συνάρτηση του V_{BE} , λόγω της ορθής πόλωσης της επαφής ΕΒ
- Το i_{B2} , που οφείλεται στις επανασυνδέσεις, είναι ανάλογο προς τον αριθμό των ηλεκτρονίων που εγχέονται από τον εκπομπό, ο οποίος είναι εκθετική συνάρτηση του V_{BE} .

$$\Rightarrow i_B \propto e^{V_{BE}/V_T}$$

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Το ρεύμα Εκπομπού



Θεωρώντας το τρανζίστορ σαν ένα κόμβο, μπορούμε να γράψουμε:

$$i_E = i_B + i_C = \frac{1}{\beta} i_C + i_C = \frac{1 + \beta}{\beta} i_C \quad \text{ή} \quad i_C = \frac{\beta}{1 + \beta} i_E$$

$$i_C = \alpha i_E$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

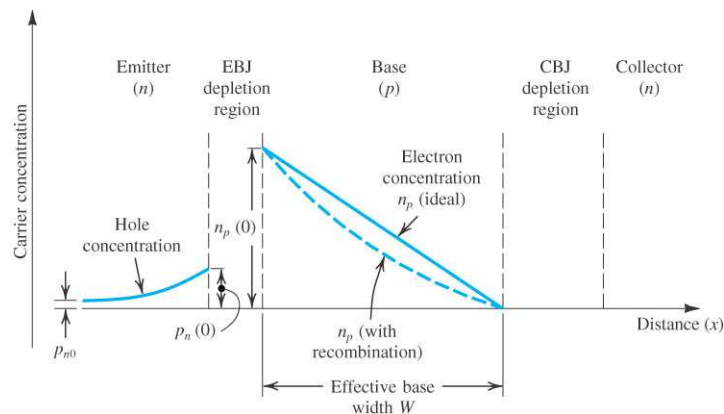
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Το α ονομάζεται **ενίσχυση ρεύματος κοινής βάσης** και είναι $\alpha < 1$ αλλά κοντά στο 1.

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Κατανομή των φορέων μειονότητας

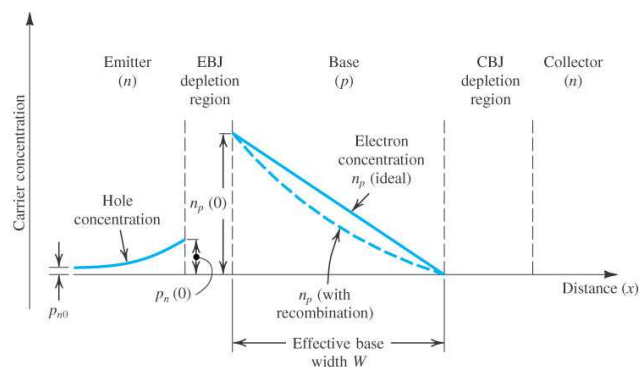


- Ρεύμα στο οποίο επικρατούν τα ηλεκτρόνια από τον εκπομπό στη βάση λόγω της ορθής πόλωσης και βαθμίδα συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας μέσα στη βάση.
 - Η μερική επανασύνδεση προκαλεί καμπύλωση της συγκέντρωσης στην περιοχή της βάσης.

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζιστορ Επαφής

Το ρεύμα διάχυσης μέσω της βάσης



- Η διάχυση ηλεκτρονίων μέσω της βάσης καθορίζεται από την κατανομή της συγκέντρωσής τους στην επαφή EB.

$$n_p(0) = n_{p0} e^{v_{BE} / V_T}$$

- Το ρεύμα διάχυσης των ηλεκτρονίων μέσω της βάσης είναι:

$$I_n = A_E q D_n \frac{dn_p(x)}{dx} = A_E q D_n \left(-\frac{n_p(0)}{W} \right)$$

- Το ρεύμα συλλέκτη είναι:

$$i_C = -I_n$$

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζιστορ Επαφής

Το ρεύμα Συλλέκτη

- Το ρεύμα συλλέκτη είναι:

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \quad \text{όπου} \quad I_S = \frac{qA_E D_n n_{p0}}{W} = \frac{qA_E D_n n_i^2}{N_A W}$$

- Το i_C είναι ανεξάρτητο από το v_{CE} .
- Το ρεύμα συλλέκτη ελέγχεται από την τάση των δύο άλλων ακροδεκτών: **πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση.**
- Το ρεύμα κόρου I_S είναι
 - Αντιστρόφως ανάλογο προς το W και ανάλογο προς το A_E .
 - Εξαρτάται από τη θερμοκρασία, λόγω του παράγοντα n_i^2 .

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Το βήτα (β)

- Μπορούμε να συνδέσουμε το i_C με το i_B με την παρακάτω σχέση:

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{I_S}{\beta} e^{v_{BE}/V_T}$$

- $\beta = i_C / i_B$
 - Το β είναι σταθερό για κάθε τρανζίστορ
 - Παίρνει τιμές μεταξύ 50 και 350 και ακόμη μεγαλύτερες
 - Ονομάζεται ενίσχυση ρεύματος κοινού εκπομπού
 - Συμβολίζεται επίσης και με β_F .

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Ρεύματα σε ένα BJT

$$I_C = I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

$$I_B = \frac{1}{\beta} I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

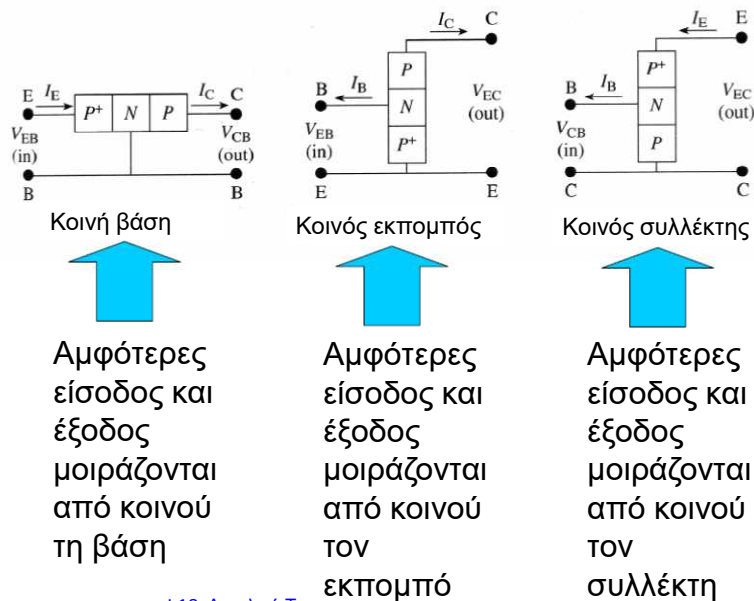
$$I_E = \frac{\beta + 1}{\beta} I_S \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

$$\alpha \equiv \frac{\beta}{\beta + 1}$$

ΤΛ1001

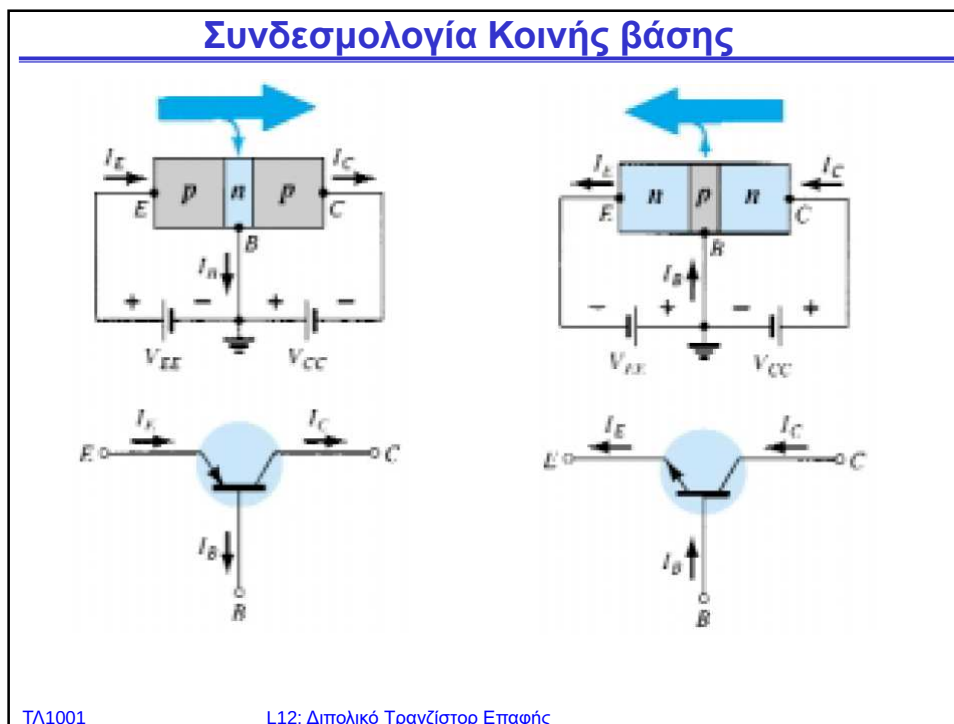
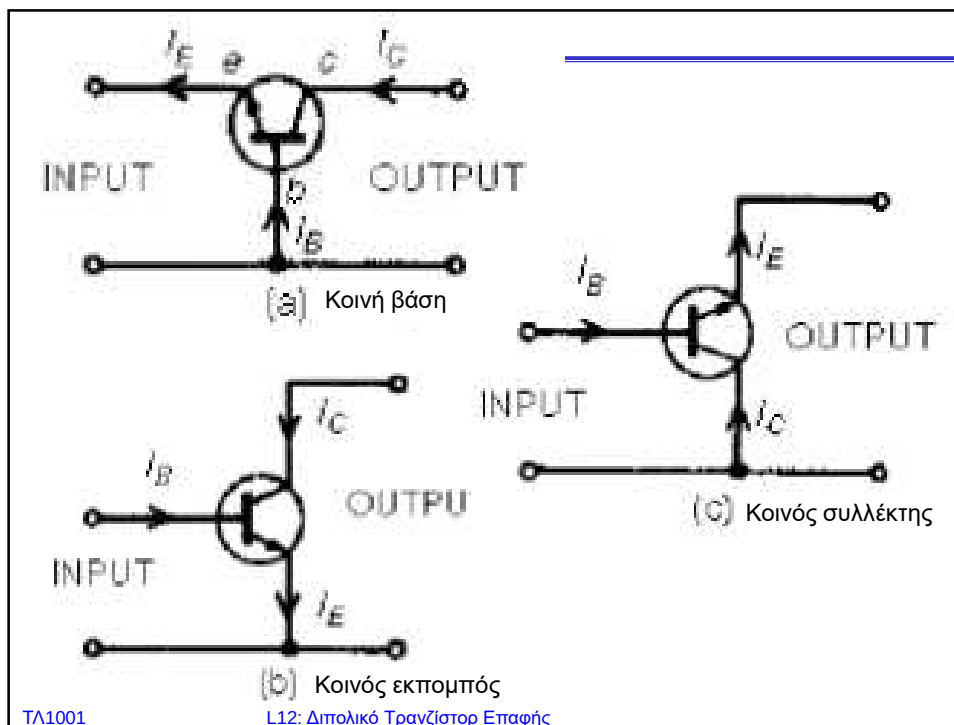
L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Βασικές Συνδεσμολογίες Διπολικών Τρανζίστορ Επαφής



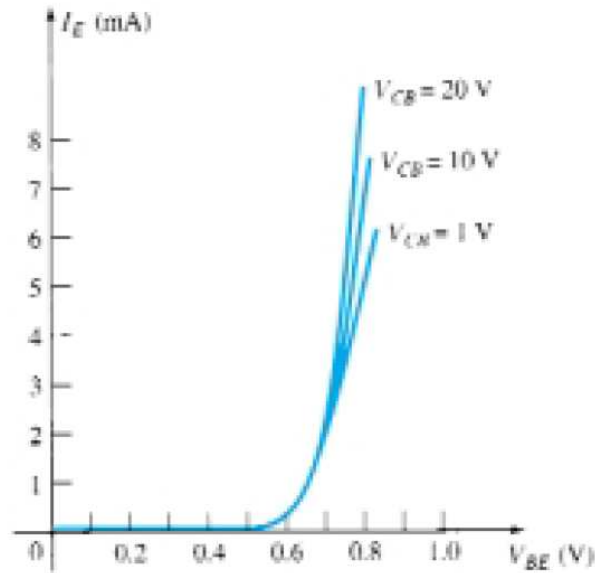
ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής



Συνδεσμολογία Κοινής βάσης:

Χαρακτηριστικές εισόδου

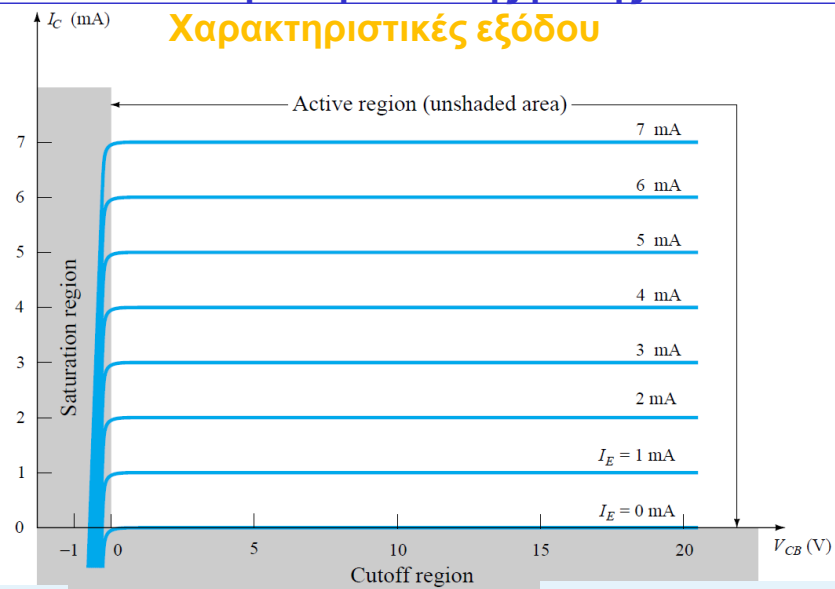


ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Συνδεσμολογία Κοινής βάσης:

Χαρακτηριστικές εξόδου



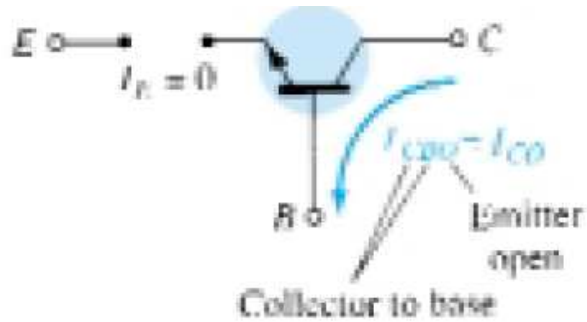
$$\alpha_{dc} = \frac{I_C}{I_E}$$

$$I_C \cong I_E$$

Τρανζίστορ Επαφής

$$\alpha_{ac} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \right|_{V_{CB} = \text{constant}}$$

Το ανάστροφο ρεύμα κόρου

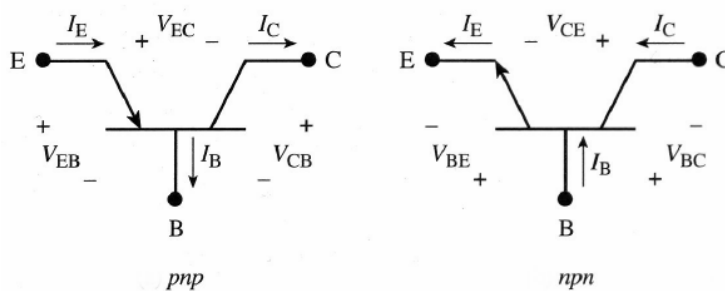


$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Σχέσεις Ρευμάτων / τάσεων σε ένα BJT



$$I_E = I_B + I_C$$

$$V_{EB} + V_{BC} + V_{CE} = 0$$

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Λειτουργία ενίσχυσης του τρανζίστορ

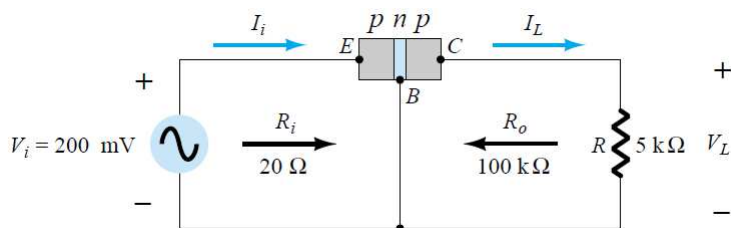
$$\alpha_{dc} = \frac{I_C}{I_E}$$

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$$

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Λειτουργία ενίσχυσης του τρανζίστορ



$$I_i = \frac{V_i}{R_i} = \frac{200 \text{ mV}}{20 \Omega} = 10 \text{ mA}$$

$$\alpha_{ac} = 1 \quad (I_c = I_e),$$

$$I_L = I_i = 10 \text{ mA}$$

$$V_L = I_L R$$

$$= (10 \text{ mA})(5 \text{ k}\Omega)$$

$$= 50 \text{ V}$$

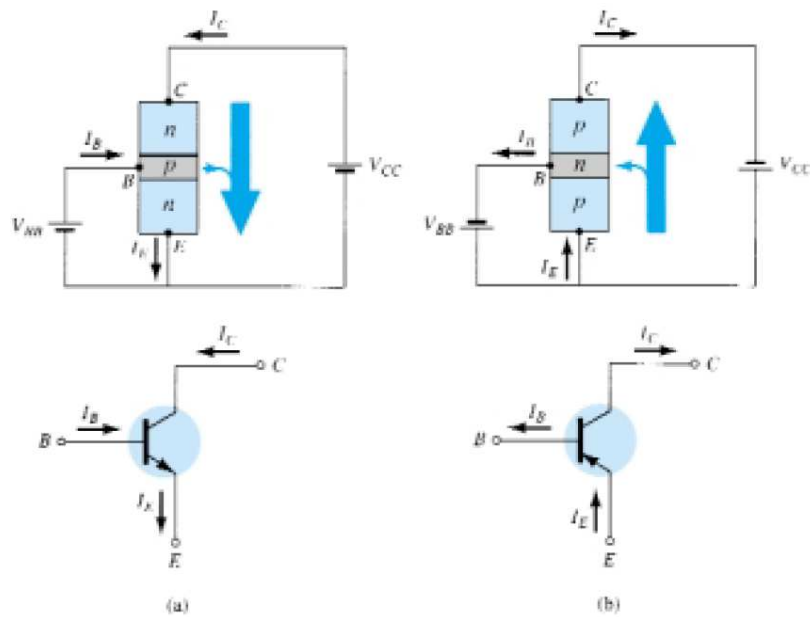
$$A_v = \frac{V_L}{V_i} = \frac{50 \text{ V}}{200 \text{ mV}} = 250$$

Η βασική ενισχυτική λειτουργία πραγματοποιήθηκε από τη μεταφορά (transfer) του ρεύματος πηγής I_i από ένα κύκλωμα χαμηλής αντίστασης προς ένα κύκλωμα υψηλής αντίστασης (resistor).

transfer + resistor → transistor

ΤΛ1001

Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

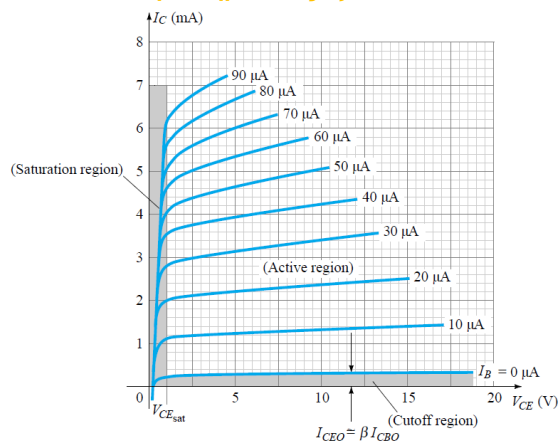


ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

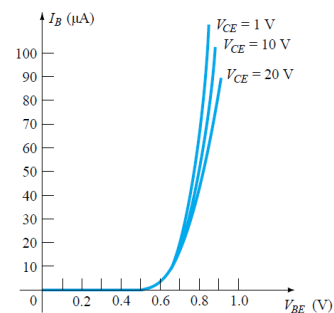
Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

Χαρακτηριστικές εξόδου



$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B}$$

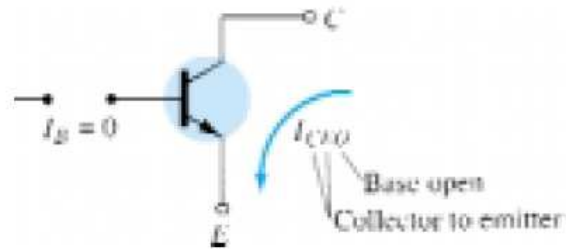
Χαρακτηριστικές εισόδου



$$\beta_{ac} = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \right|_{V_{CE} = \text{constant}}$$

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

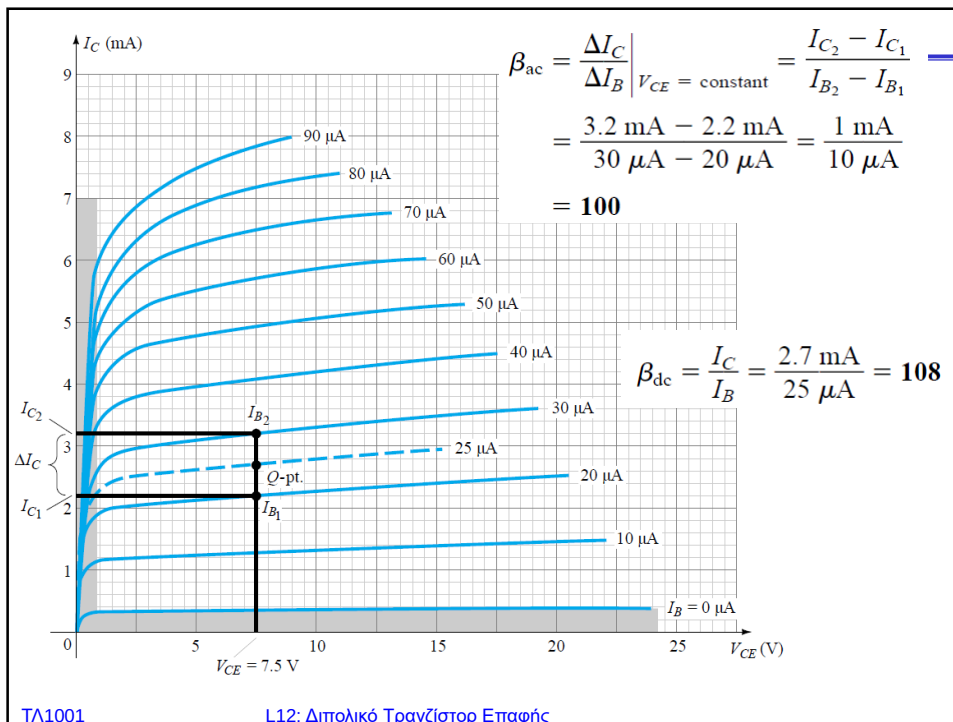


$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \quad I_C = \alpha(I_C + I_B) + I_{CBO} \quad I_C = \frac{\alpha I_B}{1 - \alpha} + \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha}$$

$$I_{CEO} = \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha} \Big|_{I_B = 0 \mu A}$$

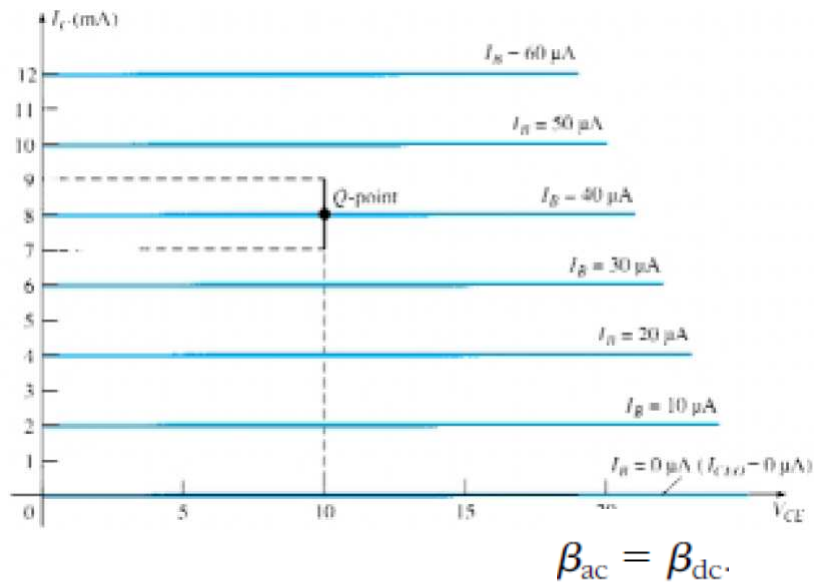
ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής



ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής



ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

$$I_E = I_C + I_B$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

$$\frac{I_C}{\alpha} = I_C + \frac{I_C}{\beta}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

$$I_C = \frac{\alpha I_B}{1 - \alpha} + \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha}$$

$$I_{CEO} = (\beta + 1)I_{CBO}$$

$$I_{CEO} = \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha}$$

$$I_{CEO} \cong \beta I_{CBO}$$

$$\frac{1}{1 - \alpha} = \beta + 1$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$\begin{aligned} I_E &= I_C + I_B \\ &= \beta I_B + I_B \end{aligned}$$

$$I_E = (\beta + 1)I_B$$

ΤΛ1001

L12: Διπολ

Το βήτα (β)

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CBO}$$

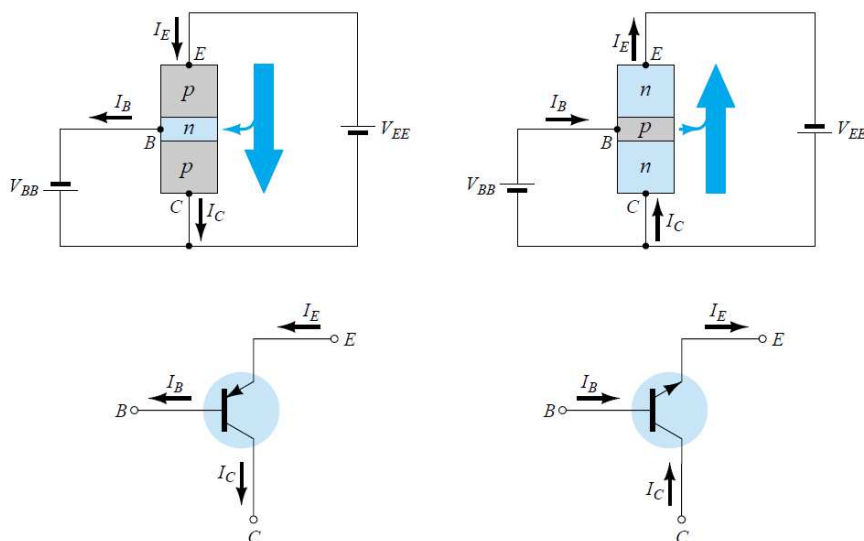
I_{CBO} ρεύμα ανάστροφης πόλωσης της επαφής βάσης-συλλέκτη με φορά από το συλλέκτη προς τη βάση, όταν ο εκπομπός είναι ανοικτός.

Δεδομένου ότι, το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης του I_{CBO} είναι κατά πολύ μικρότερο του I_B ,

$$I_C \approx \beta I_B$$

Το β του τρανζίστορ αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως h_{FE} . Οι συνήθεις τιμές του β , που συναντώνται σε τρανζίστορ, κυμαίνονται από 50 έως 350. Στην πράξη, το βήτα του τρανζίστορ προσδιορίζεται με πειραματικό τρόπο και όχι βάσει θεωρητικών υπολογισμών.

Συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη



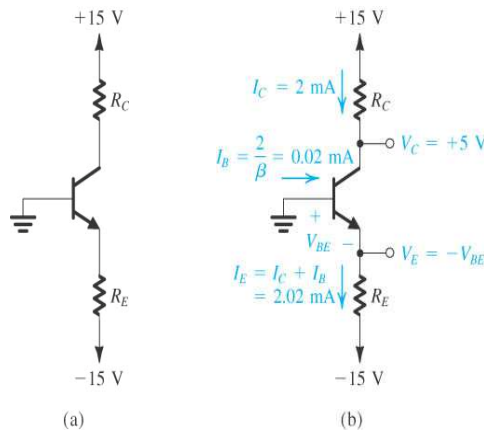
ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα

Δίνονται: $\beta=100$ και $v_{BE}=0,7V$ όταν $i_C=1mA$

Να σχεδιαστεί το κύκλωμα έτσι ώστε $I_C=2mA$ και $V_C=5V$.



$$R_C = \frac{V_{CC} - V_C}{I_C} = 5k\Omega$$

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

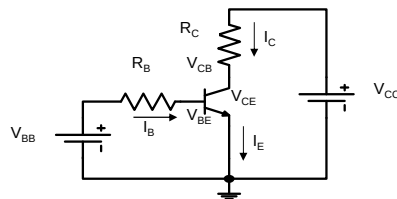
$$v_{BE1} = v_{BE2} + V_T \ln \frac{i_{C1}}{i_{C2}} = 0,717V$$

$$R_E = \frac{V_E - V_{EE}}{I_E} = 7,07k\Omega$$

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Υπολογισμός ρευμάτων και τάσεων



$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{I_S}{\beta} e^{v_{BE}/V_T}$$

$$V_{BE} \approx 0,7V$$

$$V_{BB} = I_B R_B + V_{BE} \Rightarrow I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$I_E = \frac{I_C}{\alpha}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

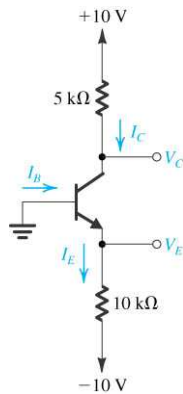
$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$$

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Υπολογισμός ρευμάτων και τάσεων

Άσκηση: Αν $V_E = -0,7V$ και $\beta = 50$, να υπολογιστούν τα: I_E , I_B , I_C και V_C .



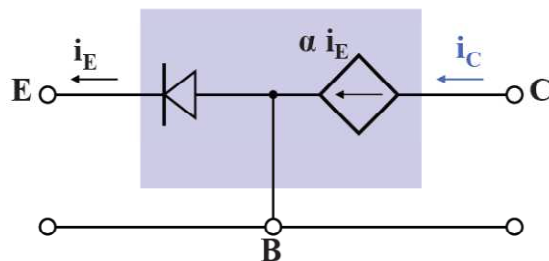
ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Ισοδύναμο Κυκλωματικά Μοντέλα (I)

*Μοντέλο Κοινής Βάσης ηρη Μεγάλου Σήματος
για Λειτουργία στην Ενεργό Περιοχή*

npn



Πηγή Ρεύματος Ελεγχόμενη από Ρεύμα

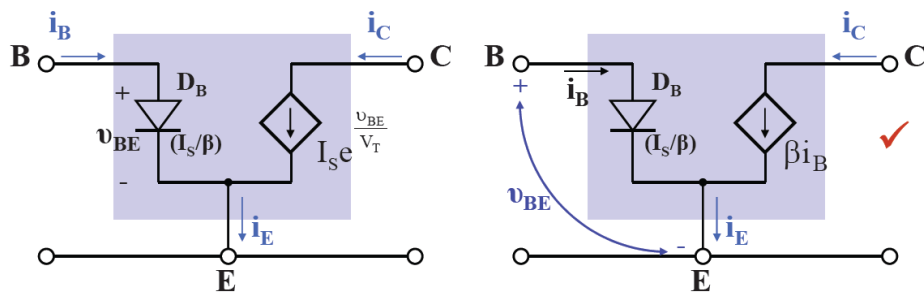
ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Ισοδύναμα Κυκλωματικά Μοντέλα (II)

*Μοντέλο Κοινού Εκπομπού nnp Μεγάλου Σήματος
για Λειτουργία στην Ενεργό Περιοχή*

nnp



Αναπαράσταση με χρήση Δίθυρων Δικτυωμάτων

Πηγή Ρεύματος Ελεγχόμενη από Τάση

Πηγή Ρεύματος Ελεγχόμενη από Ρεύμα

ΤΛ1001

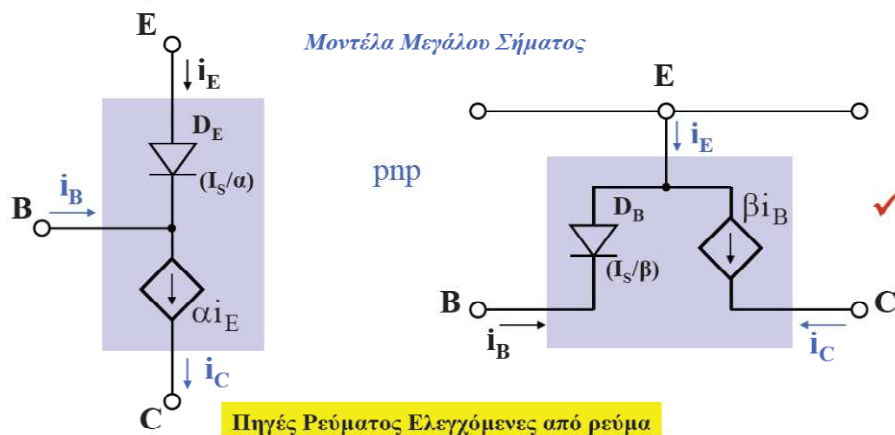
L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Ισοδύναμα Κυκλωματικά Μοντέλα (III)

*Μοντέλο Κοινής Βάσης pnp
για Ενεργό Περιοχή*

*Μοντέλο Κοινού Εκπομπού pnp
για Ενεργό Περιοχή*

Μοντέλα Μεγάλου Σήματος



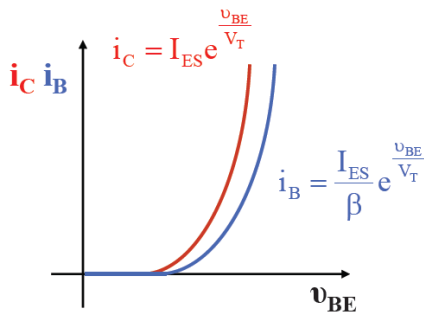
Πηγές Ρεύματος Ελεγχόμενες από ρεύμα

ΤΛ1001

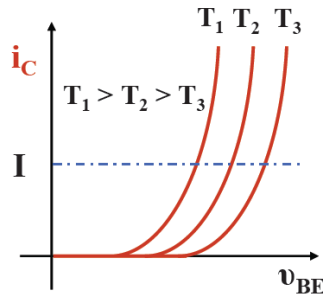
L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Χαρακτηριστικές Τρανζίστορ (I)

*Ενεργός Περιοχή
ηρη*



$i_B - v_{BE}$ Χαρακτηριστική Εισόδου
και
 $i_C - v_{BE}$ Χαρακτηριστική

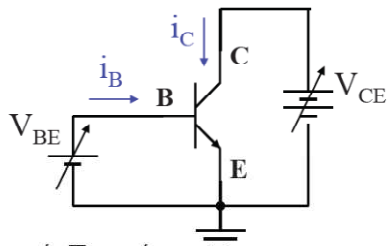


Θερμοκρασιακή επίδραση στη
 $i_C - v_{BE}$ χαρακτηριστική.
Για σταθερό $i_E \cong i_C = I$, η v_{BE}
μεταβάλλεται κατά $-2mV/^{\circ}C$

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Χαρακτηριστικές Τρανζίστορ (II)



Ενεργός Περιοχή:

EBJ ορθά - CBJ ανάστροφα

$i_B > 0 \Rightarrow i_C \cong \beta i_B$

Περιοχή Κόρου:

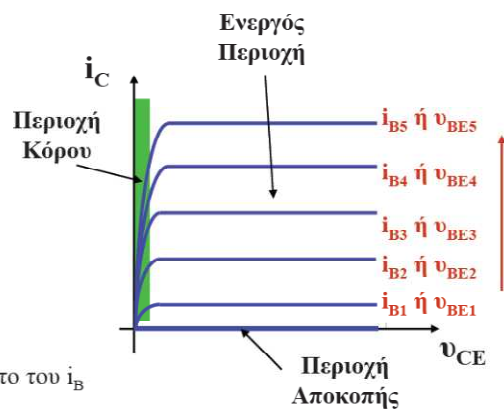
EBJ ορθά - CBJ ορθά

v_{CE} κοντά στο 0 τότε i_C σχεδόν ανεξάρτητο του i_B

Περιοχή Αποκοπής:

EBJ ανάστροφα - CBJ ανάστροφα

$i_B \approx 0$ και $i_E \approx 0$ τότε $i_C \approx I_{CB0}$

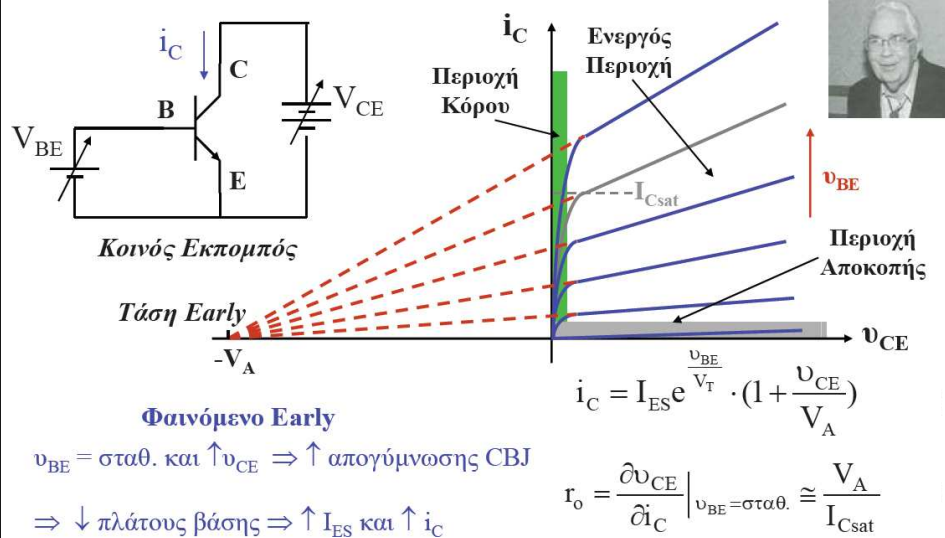


$i_C - v_{CE}$ Χαρακτηριστική Εξόδου
ηρη τρανζίστορ

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

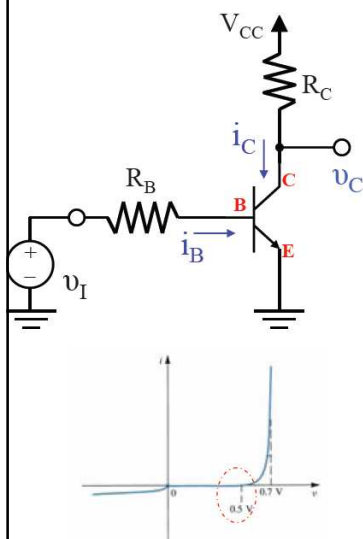
Φαινόμενο Early – Τάση Early



ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Λειτουργία στην Αποκοπή

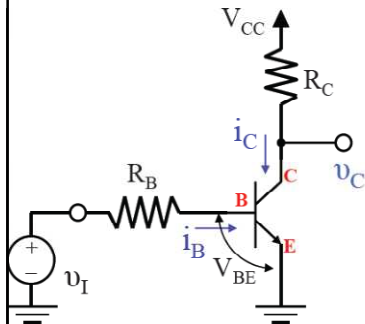


Για να λειτουργεί το τρανζίστορ στην αποκοπή θα πρέπει η τάση εισόδου v_I να είναι μικρότερη του **0.5V**. Σε αυτή την περίπτωση από την επαφή BEJ περνάει ένα αμελητέο ρεύμα που μπορεί να θεωρηθεί μηδενικό. Καθώς όλες οι επαφές είναι ανάστροφα πολωμένες ($V_{CC} \gg$) θα ισχύει:

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Λειτουργία στην Ενεργό Περιοχή (I)



Για να άγει το τρανζίστορ θα πρέπει να αυξήσουμε το v_I πάνω από τα $0.7V$ (με τη θεώρηση ότι $V_{BE} \approx 0.7V \equiv$ τάση αποκοπής).

Συνεπώς για $v_I > 0.7V$ θα ισχύει:

$$i_B = \frac{v_I - V_{BE}}{R_B} \approx \frac{v_I - 0.7}{R_B}$$

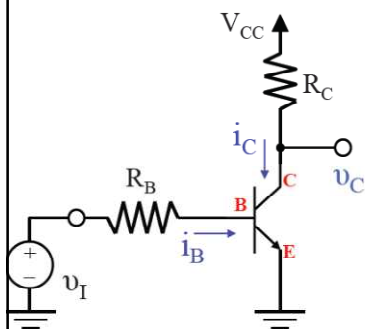
Όμως, επειδή δεν έχουμε κάνει κάποια άλλη υπόθεση, δεν γνωρίζουμε εάν είμαστε στην ενεργό περιοχή ή στον κόρο. Για αυτό το λόγο **υποθέτουμε** αρχικά ότι είμαστε στην **ενεργό περιοχή** και συνεχίζουμε τους υπολογισμούς μας. Αν η επιλογή αποδειχθεί σωστή έχει καλώς, αλλιώς θα γνωρίζουμε ότι ήμαστε στον κόρο.

Στην ενεργό περιοχή ισχύει: $i_C = \beta i_B$

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Λειτουργία στην Ενεργό Περιοχή (II)



Με χρήση του KVL υπολογίζουμε τη v_C :

$$v_C = V_{CC} - R_C i_C$$

και ελέγχουμε αν το $v_{CB} \geq 0$ ή όχι. Πιο απλά ελέγχουμε αν το $v_C > 0.7V$ ή όχι.

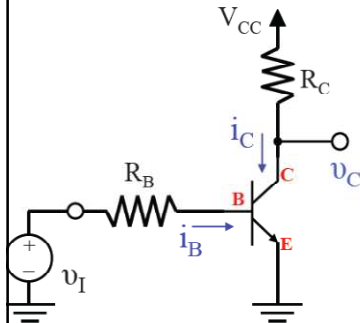
- Αν **ναι** η αρχική υπόθεση **ενεργού περιοχής** είναι σωστή και τα αποτελέσματα **αποδεκτά!**
- Αν **όχι** συνεχίζουμε με την ανάλυση για λειτουργία στον **κόρο**.

Αν είμαστε στην **ενεργό περιοχή** και αρχίσουμε να αυξάνουμε την v_I τότε θα αυξηθεί το i_B και συνεπώς το i_C με αποτέλεσμα να μειωθεί η v_C . Τελικά, κάποια στιγμή, η v_C θα γίνει μικρότερη από την $v_B = 0.7V$ και το τρανζίστορ θα περάσει στην περιοχή του κόρου καθώς η επαφή CBJ θα πολωθεί ορθά.

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Λειτουργία στην Περιοχή του Κόρου (I)



Το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να δεχτεί ο συλλέκτης χωρίς να εγκαταλείψει την ενεργό περιοχή είναι εκείνο όπου η $v_{CB} \approx 0$ (ή $v_C = 0.7V_{BE}$). Το ρεύμα αυτό δίνεται από τη σχέση (νόμος Ohm):

$$\hat{I}_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C} \cong \frac{V_{CC} - 0.7}{R_C}$$

Ακριβώς σε αυτό το όριο μεταξύ της ενεργού περιοχής και του κόρου θα εξακολουθεί να ισχύει:

$$\hat{I}_B = \frac{\hat{I}_C}{\beta}$$

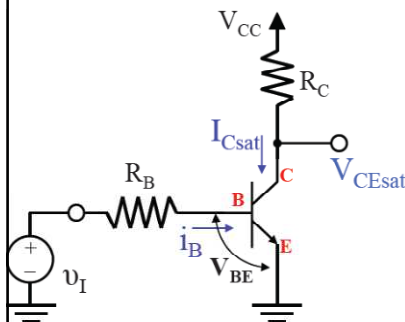
Και συνεπώς η αντίστοιχη τιμή της v_I προκύπτει από τη σχέση ως ακολούθως:

$$\hat{V}_I \cong R_B \cdot \hat{I}_B + 0.7V$$

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Λειτουργία στην Περιοχή του Κόρου (II)



Αν το i_B αυξηθεί πάνω από την τιμή ορίου που υπολογίστηκε νωρίτερα, τότε η τάση στο συλλέκτη θα πέσει κάτω από αυτή της βάσης και η CBJ θα πολωθεί ορθά (με τάση πόλωσης 0.4V-0.5V). Η κατάσταση αναφέρεται σαν **κορεσμός** επειδή περαιτέρω αύξηση του ρεύματος της βάσης επιφέρει ασήμαντη αύξηση στο ρεύμα του συλλέκτη. Το επιπλέον ρεύμα θα περάσει από τον ακροδέκτη του εκπομπού.

$$\beta_{sat} < \beta$$

Καθώς η $v_{BC} \geq 0.4V$ & $v_{BE} = 0.7V \Rightarrow v_{CE} = v_{CB} + v_{BE} \leq 0.3V$. Η τάση V_{CEsat} αποτελεί ένα δεύτερο κριτήριο ελέγχου για την λειτουργία στην ενεργό περιοχή ή στον κόρο.

$V_{CE} > V_{CEsat} = 0.3V \Rightarrow$ Ενεργός Περιοχή ενώ $V_{CE} < V_{CEsat} = 0.3V \Rightarrow$ Κόρος

$$I_{Csat} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_C}$$

και

$$I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta}$$

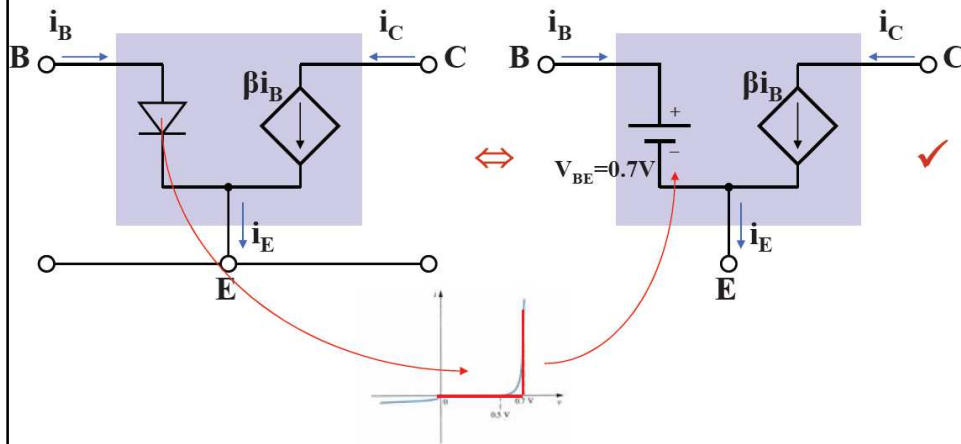
ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Μοντέλο Τρανζίστορ στην Ενεργό Περιοχή

npn

Μοντέλο Μεγάλου Σήματος npn



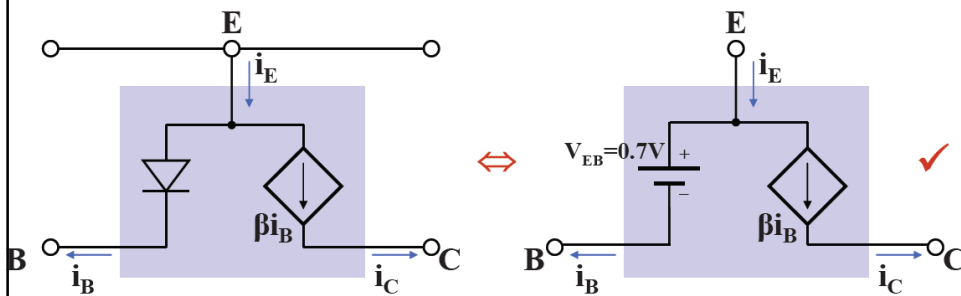
ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Μοντέλο Τρανζίστορ στην Ενεργό Περιοχή

pnp

Μοντέλο Μεγάλου Σήματος pnp

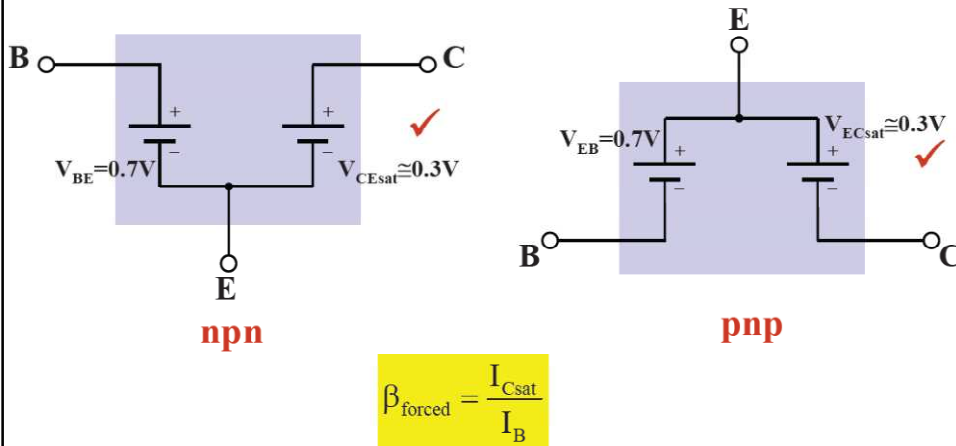


ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Μοντέλο Τρανζίστορ στον Κόρο

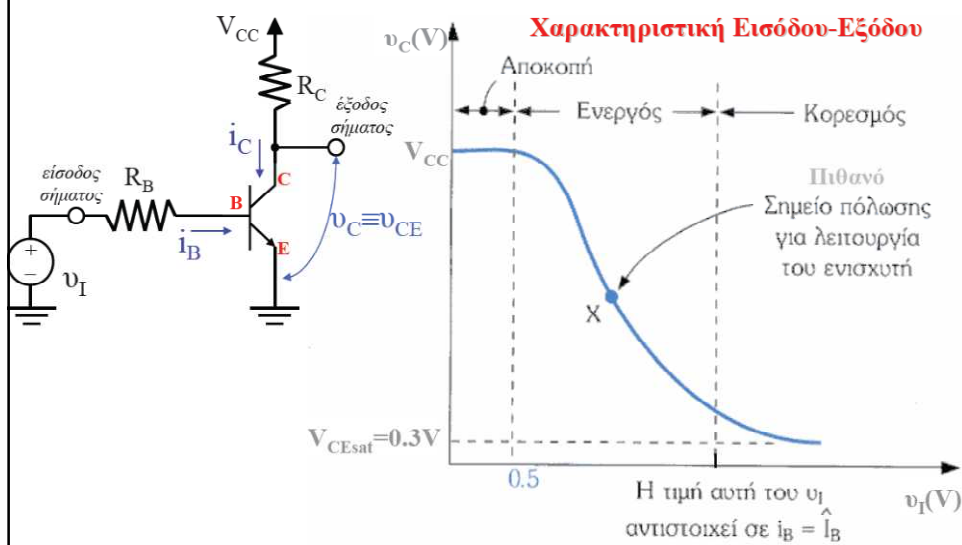
Μοντέλα Μεγάλου Σήματος



ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Χαρακτηριστική Μεταφοράς

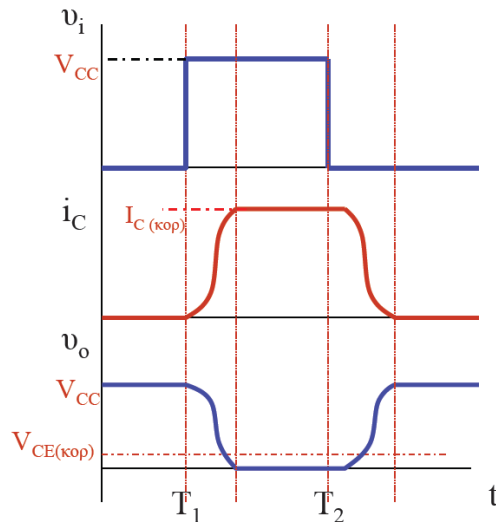
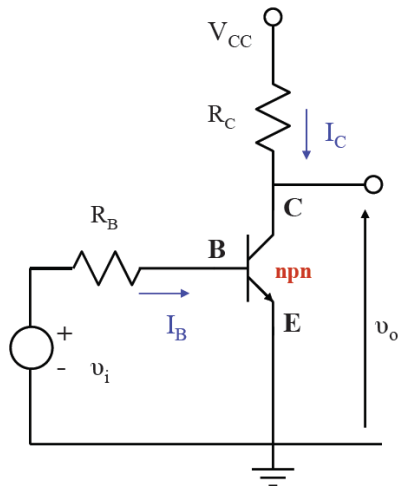


ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Το Διπολικό Τρανζίστορ ως Διακόπτης

Ψηφιακή πύλη NOT !



ΤΛ1001

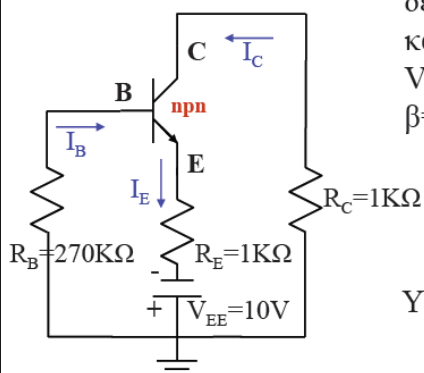
L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 1 (I)

Στο κύκλωμα του σχήματος να προσδιοριστεί η περιοχή λειτουργίας με δεδομένο ότι η ενεργός περιοχή καθορίζεται για BEJ ορθά πολωμένη και $V_{CE} > 0.3V$. Επιπρόσθετα δίδεται ότι $\beta = 100$ και στην ενεργό περιοχή ισχύει:

$$V_{BE(\text{ενεργ.})} = 0.7V$$

Υπολογίστε τις τιμές των: I_B , I_C και V_{CE} .

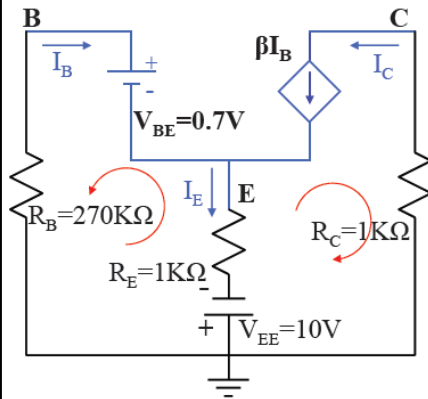


ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 1 (II)

Το τρανζίστορ βρίσκεται είτε στην ενεργό περιοχή λειτουργίας είτε στον κόρο.



Θεωρούμε αρχικά ότι βρίσκεται στην ενεργό περιοχή λειτουργίας και χρησιμοποιούμε το αντίστοιχο μοντέλο.

KVL στο βρόχο B-E:

$$I_B R_B + V_{BE} + I_E R_E - V_{EE} = 0 \quad (1)$$

KCL : $I_E - (I_B + I_C) = 0$

Επιπλέον: $I_C = \beta I_B$

Χρήση Μοντέλου Κοινού Εκπομπού Ενεργού Περιοχής

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 1 (III)

$$(1) \Rightarrow I_B [R_B + (1 + \beta) R_E] + V_{BE} - V_{EE} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E} = 0.0251 \text{ mA}$$

KVL στο βρόχο C-E:

$$I_C R_C + V_{CE} + I_E R_E - V_{EE} = 0 \quad (2)$$

Παρόμοια:

$$(2) \Rightarrow \beta I_B R_C + V_{CE} + (1 + \beta) I_B R_E - V_{EE} = 0 \Rightarrow$$

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 1 (IV)

$$\Rightarrow V_{CE} = V_{EE} - \beta I_B \left(R_C + \frac{1+\beta}{\beta} R_E \right) = 4.96V$$

Καθώς $V_{CE} > 0.3V$ επιβεβαιώνεται η αρχική υπόθεση ότι
βρισκόμαστε στην ενεργό περιοχή λειτουργίας ✓

Συνεπώς:

$$I_C = \beta I_B = 2.51mA$$

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 2 (I)

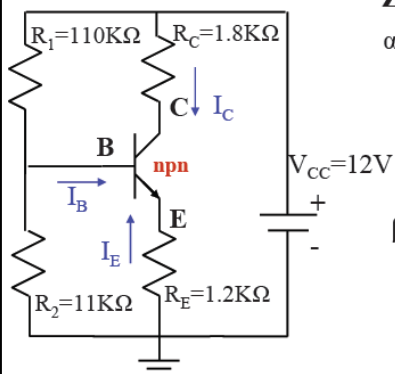
Δεδομένα:

$$V_{BE(\text{ενεργ.})} = 0.7V, \quad \beta = 150$$

Ζητούμενα:

α) Ποιο είναι το σημείο λειτουργίας του κυκλώματος, δηλ. οι τιμές I_C και V_{CE} ;

β) Ποια η $R_{C\max}$ για την οποία το BJT είναι μόλις στην ενεργό περιοχή; Δίδεται ότι η ενεργός περιοχή καθορίζεται για BEJ ορθά πολωμένη και $V_{CE} > 0.3V$.

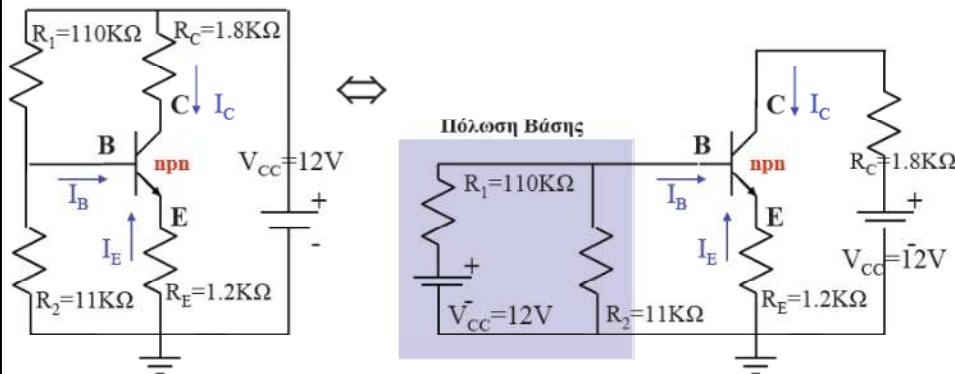


ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 2 (II)

Αρχικά επανασχεδιάζουμε το κύκλωμα σε μια ισοδύναμη τοπολογία, συμβατή με προηγούμενες περιπτώσεις, για απλοποίηση. Προφανώς αυτό το βήμα δεν είναι απαραίτητο!



ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 2 (III)

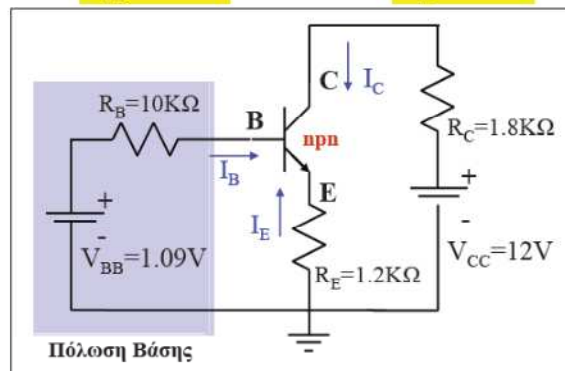
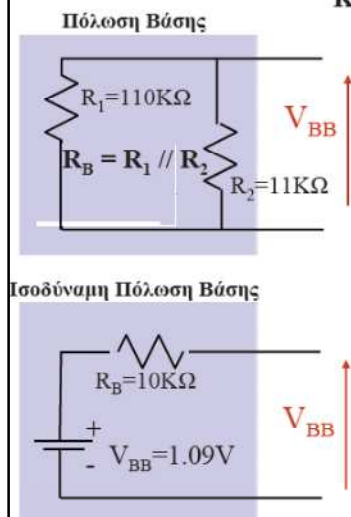
Κατά Thevenin ισοδύναμο κύκλωμα πόλωσης βάσης:

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC}$$

$$V_{BB} = 1.09V$$

$$R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_B = 10K\Omega$$

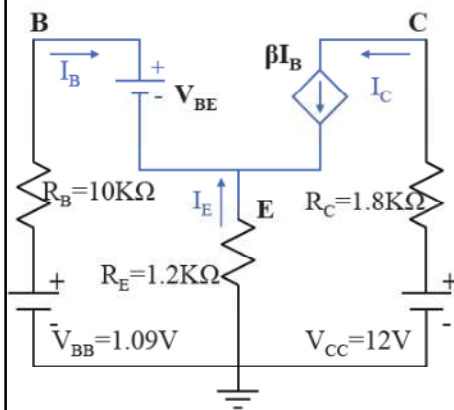


ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 2 (IV)

(a)



Χρήση Μοντέλου Κοινού Εκπομπού Ενεργού Περιοχής

Καθώς το B είναι σε θετικότερο δυναμικό από το E $\Rightarrow$ BEJ ορθά πολωμένη.

Συνεπώς το τρανζίστορ βρίσκεται είτε στην ενεργό περιοχή λειτουργίας είτε στον κόρο.

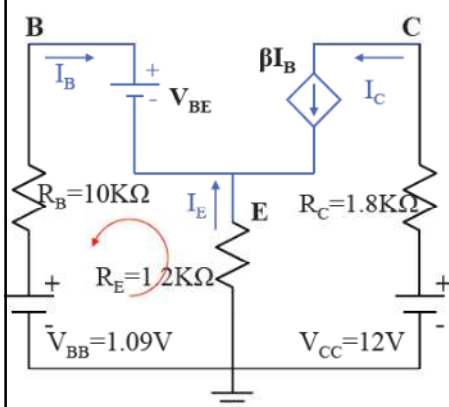
Υποθέτουμε ότι είναι στην ενεργό περιοχή λειτουργίας.

Η υπόθεση είναι ισχυρή καθώς το C είναι σε πολύ υψηλό δυναμικό και η επαφή CBJ πρέπει να είναι ανάστροφα πολωμένη.

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 2 (V)



Χρήση Μοντέλου Κοινού Εκπομπού Ενεργού Περιοχής

KVL στο βρόχο B-E:

$$I_B R_B + V_{BE} - I_E R_E - V_{BB} = 0$$

KCL: $I_E + (I_B + I_C) = 0$

Επιπλέον: $I_C = \beta I_B$

Άρα:

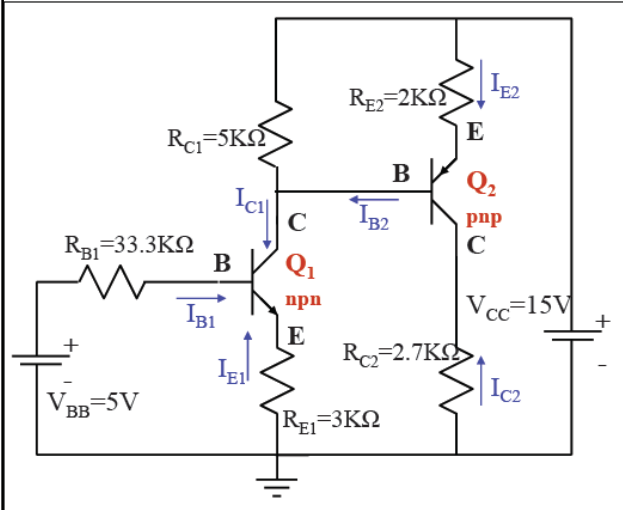
$$I_B [R_B + (1 + \beta) R_E] + V_{BE} - V_{BB} = 0$$

$$\Rightarrow I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B + (1 + \beta) R_E} = 2.04 \mu A$$

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 3 (I)



Δεδομένα:

$$V_{BE(\text{ενεργ.})} = 0.7\text{V}$$

$$\beta_1 = \beta_2 = \beta = 100$$

Ζητούμενα:

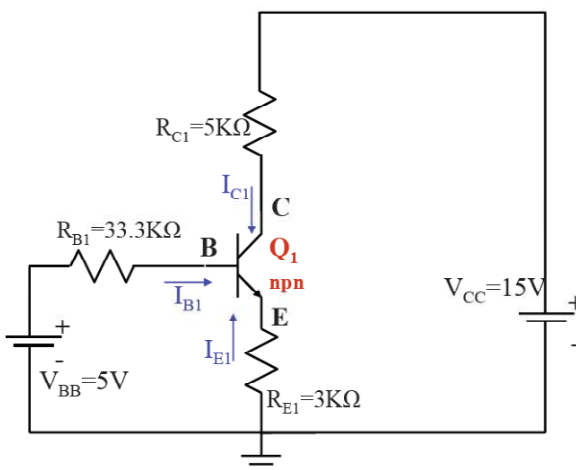
Τάσεις και ρεύματα.

Δίδεται ότι η ενεργός περιοχή καθορίζεται για BEJ ορθά πολωμένη και $V_{CE} > 0.3\text{V}$.

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 3 (II)



Καθώς το I_{B2} αναμένεται μικρό εργαζόμαστε αρχικά σαν να μην υπήρχε το Q2.

Καθώς το B είναι σε θετικότερο δυναμικό από το E $\Rightarrow$ BEJ ορθά πολωμένη. Το τρανζίστορ Q1 βρίσκεται είτε στην ενεργό περιοχή λειτουργίας είτε στον κόρο.

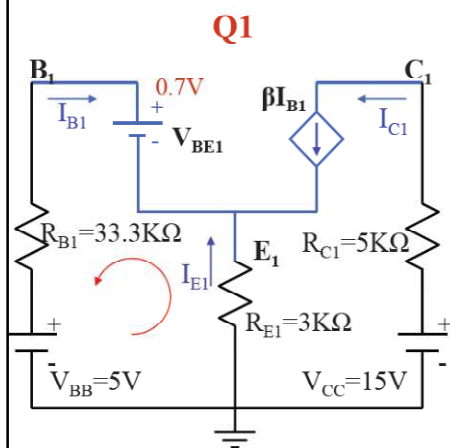


Υποθέτουμε ότι το Q1 λειτουργεί στην ενεργό περιοχή και χρησιμοποιούμε το αντίστοιχο μοντέλο.

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 3 (III)



Μοντέλο Ενεργού Περιοχής πριν

KVL στο βρόχο B-E:

$$I_{B1}R_{B1} + V_{BE1} - I_{E1}R_{E1} - V_{BB} = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{KCL:} \quad I_{E1} + (I_{B1} + I_{C1}) = 0 \\ \text{Επιπλέον:} \quad I_{C1} = \beta I_{B1} \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_{E1} = -(1+\beta)I_{B1}$$

Συνεπώς:

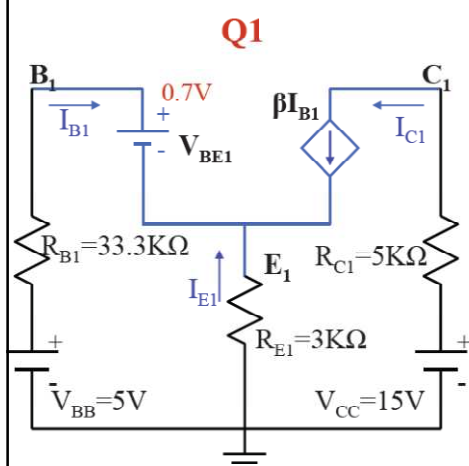
$$I_{B1}[R_B + (1+\beta)R_{E1}] + V_{BE1} - V_{BB} = 0$$

$$I_{B1} = \frac{V_{BB} - V_{BE1}}{R_B + (1+\beta)R_{E1}} = 0.0128\text{mA}$$

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 3 (IV)



Μοντέλο Ενεργού Περιοχής πριν

Επιπρόσθετα:

$$I_{E1} = -(\beta + 1)I_{B1} = -1.29\text{mA}$$

✕

Στο βρόχο BE ισχύει:

$$V_{B1} = V_{BB} - R_{B1}I_{B1} = 4.57\text{V}$$

✕

Στην ενεργό περιοχή ισχύει:

$$I_{C1} = \beta I_{B1} = 1.28\text{mA}$$

άρα:

$$V_{C1} = V_{CC} - R_{C1}I_{C1} = 8.6\text{V}$$

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 3 (V)

Q1

KVL στο βρόχο C-E :

$$I_{C1}R_{C1} + V_{CE1} - I_{E1}R_{E1} - V_{CC} = 0$$

$$\beta I_{B1}R_{C1} + V_{CE1} + (1+\beta)I_{B1}R_{E1} - V_{CC} = 0$$

$$\Rightarrow V_{CE1} = V_{CC} - \beta I_{B1} \left(R_{C1} + \frac{1+\beta}{\beta} R_{E1} \right)$$

$$V_{CE1} = 4.72V \gg 0.3V \quad \checkmark \text{ ενεργός}$$

Επιπλέον: $V_{BC1} = V_{B1} - V_{C1} = -4.03V$

Μοντέλο Ενεργού Περιοχής npn

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 3 (VI)

Q1

Τέλος σε ότι αφορά το Q1:

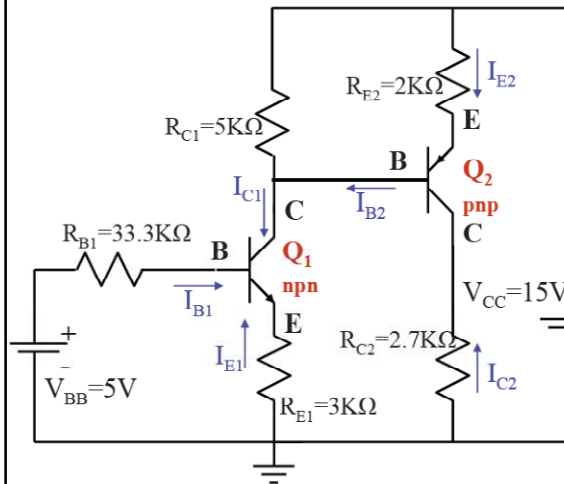
$$V_{E1} = -R_{E1}I_{E1} = 3.87V$$

Μοντέλο Ενεργού Περιοχής npn

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 3 (VII)



Προσθέτοντας το Q2, τα μεγέθη που δεν επηρεάζονται στους προηγούμενους υπολογισμούς μας (αν το Q1 παραμένει στην ενεργό περιοχή) είναι:

$$V_{B1}=4.57V, \quad I_{B1}=0.0128mA \\ I_{E1}=1.29mA, \quad I_{C1}=1.28mA$$

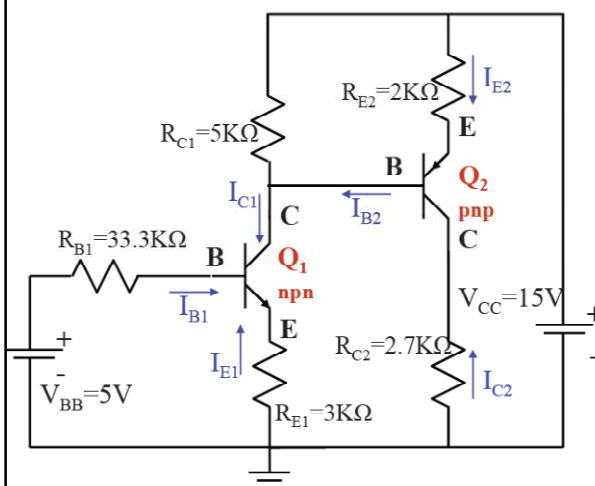
Λεν ισχύει το ίδιο όμως και για το V_{C1} καθώς μέρος του ρεύματος I_{C1} προέρχεται από τη βάση του Q2.

Δεν υπάρχει συνεπώς εγγύηση ότι το Q1 παραμένει στην ενεργό περιοχή.

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζιστορ Επαφής

Παράδειγμα 3 (VIII)



Επειδή αναμένουμε το I_{B2} πολύ μικρό, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι όλο το I_{C1} διέρχεται μέσω της R_{C1} και συνεπώς $V_{C1} \approx 8.6V$ και το Q1 είναι στην ενεργό περιοχή!

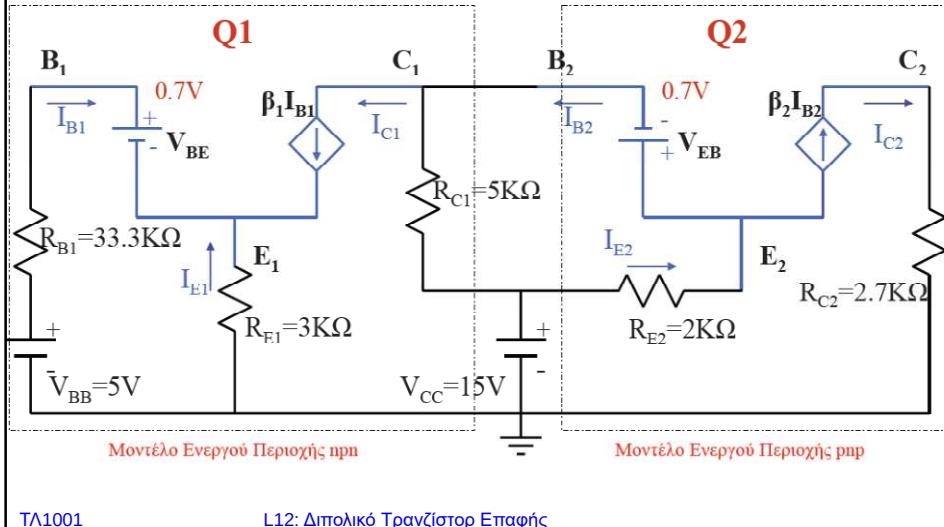
Σχετικά με το Q2 ο εκπομπός συνδέεται μέσω της R_{E2} στα 15V ενώ η βάση είναι στα 8.6V και συνεπώς μπορούμε να υποθέσουμε ότι EBJ ορθά πολωμένη. Άρα το Q2 είναι είτε στην ενεργό περιοχή είτε στον κόρο.

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζιστορ Επαφής

Παράδειγμα 3 (IX)

Επιπλέον καθώς ο συλλέκτης C_2 συνδέεται μέσω της R_{C2} στη γη είναι πολύ πιθανό το Q2 να βρίσκεται στην ενεργό περιοχή και αυτή την ένδειξη υιοθετούμε.



Παράδειγμα 3 (X)

Στο βρόχο BE ισχύει:

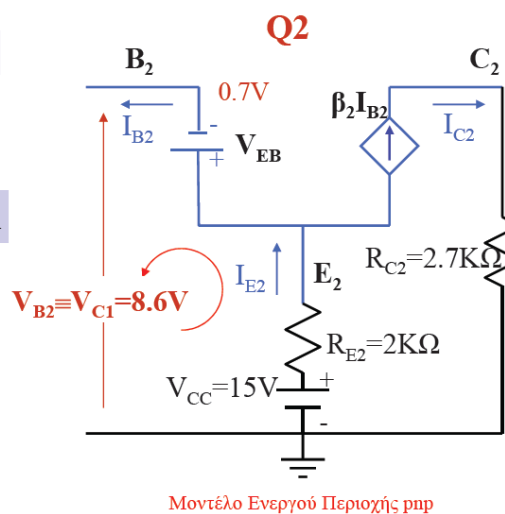
$$V_{E2} = V_{C1} + V_{EB|Q2} \cong 9.3V$$

συνεπώς:

$$I_{E2} = \frac{V_{CC} - V_{E2}}{R_{E2}} = 2.85mA$$

$$\alpha_2 = \frac{\beta_2}{\beta_2 + 1} = 0.99$$

$$I_{C2} = \alpha_2 I_{E2} = 2.82mA$$



Παράδειγμα 3 (XI)

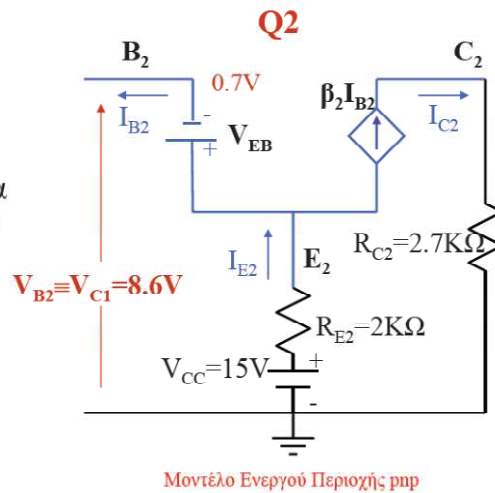
Στο βρόχο CE ισχύει:

$$V_{C2} = I_{C2} R_{C2} = 7.62V$$

✓ Καθώς $V_{B2} = V_{C1} = 8.6V$ και $V_{C2} = 7.62V \Rightarrow$ BCJ ανάστροφα πολωμένη και συνεπώς το Q2 είναι στην ενεργό περιοχή.

Τέλος:

$$I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta_2} = 0.028mA$$



TL1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 3 (XII)

Καθώς $I_{B2} = 0.028mA$ και $I_{C1} = 1.28mA$, παρατηρούμε ότι η αρχική μας υπόθεση ότι το I_{B2} δεν συνεισφέρει ουσιαστικά στο ρεύμα μέσα από την αντίσταση R_{C1} ήταν σωστή.

Το σφάλμα που εισήχθη με αυτή την υπόθεση μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

Με $I_{B2} = 0.028mA$ οι νέες τιμές στο δικτύωμα είναι οι ακόλουθες:

$$I_{RC1} = I_{C1} - I_{B2} = 1.252mA \Rightarrow V_{C1} = V_{CC} - I_{RC1} R_{C1} = 8.74V$$

$$V_{E2} = V_{C1} + V_{EB|Q2} = 9.44V \Rightarrow I_{E2} = \frac{V_{CC} - V_{E2}}{R_{E2}} = 2.78mA$$

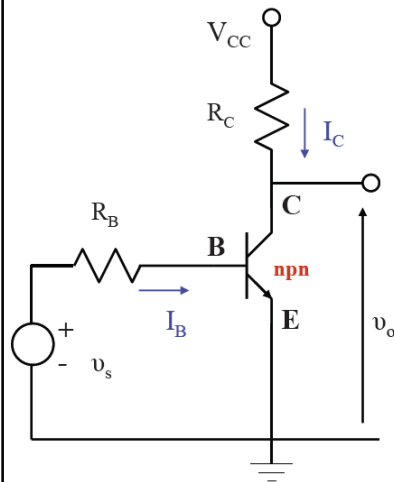
$$I_{C2} = \alpha_2 I_{E2} = 2.75mA \Rightarrow V_{C2} = I_{C2} R_{C2} = 7.43V$$

$$I_{B2} = \frac{I_{E2}}{\beta_2 + 1} = 0.0275mA$$

TL1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 4 (I)

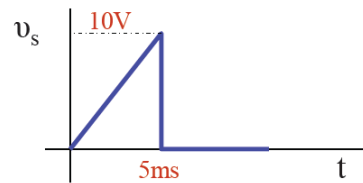


Δεδομένα:

Στο κύκλωμα του σχήματος ισχύει:
 $V_{CC}=10V$, $R_C=500\Omega$, και $R_B=47K\Omega$.

Ζητούμενα:

Να δοθεί η κυματομορφή εξόδου του κυκλώματος $v_o=f(v_s)$ και η χαρακτηριστική μεταφοράς αν η είσοδος έχει την κυματομορφή που ακολουθεί.

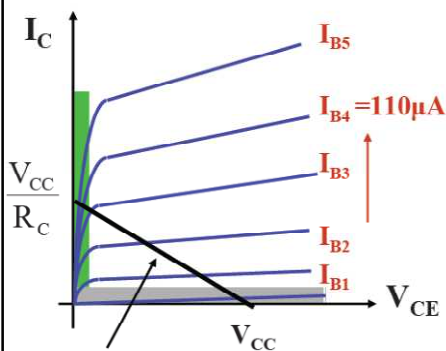


ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 4 (II)

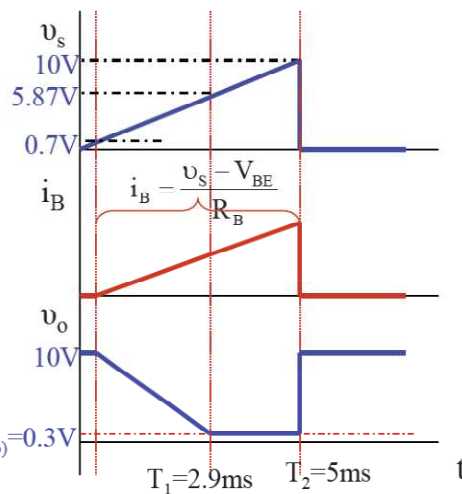
Η I_C-V_{CE} χαρακτηριστική θεωρείται δεδομένο του προβλήματος!



Ευθεία Φόρτον

$$110\mu A = \frac{v_s - 0.7V}{47K\Omega} \Rightarrow v_s = 5.87V$$

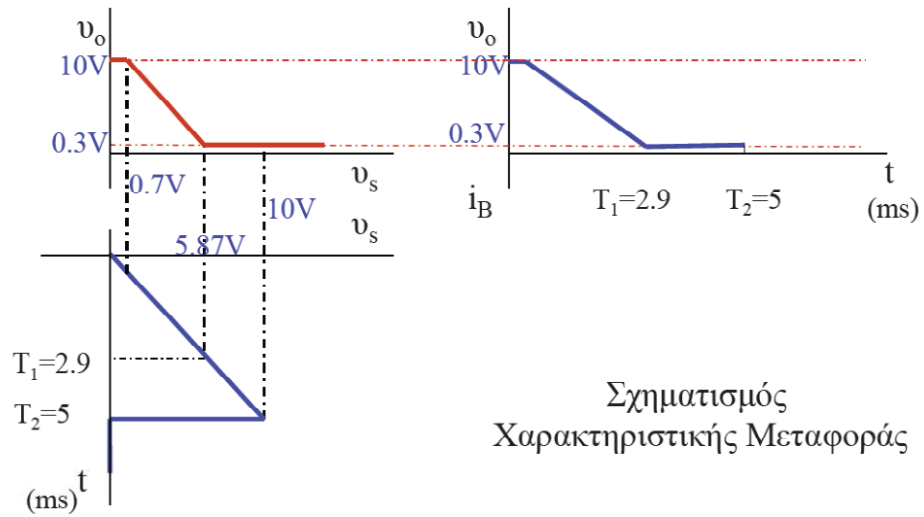
$$V_{CE(κορ)} = 0.3V$$



ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής

Παράδειγμα 4 (III)



Σχηματισμός
Χαρακτηριστικής Μεταφοράς

ΤΛ1001

L12: Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής