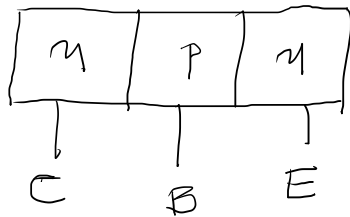
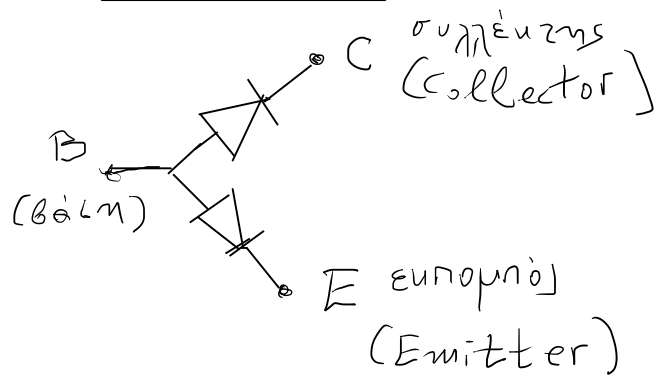


# Το διπολικό τρανζίστορ

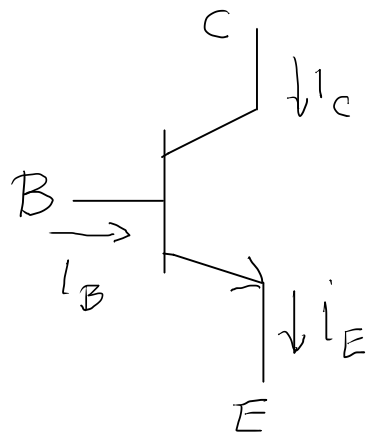
Εφευρέθηκε το 1945, αντικατέστησε τις λυχνίες στα ηλεκτρονικά κυκλώματα και άνοιξε τον δρόμο για τα ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Υπάρχουν δύο είδη διπολικών τρανζίστορ:

(α) NPN

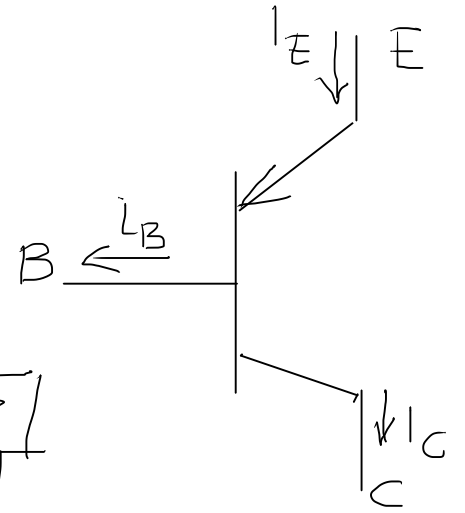
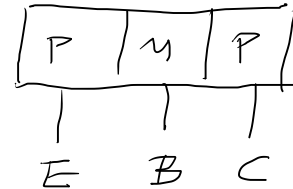
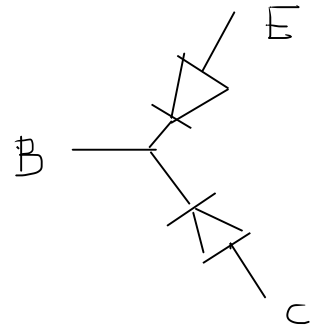


συμβολισμός



οι διευθύνσεις αναφοράς

(β) PNP



για τα ρεύματα  $I_B, I_C, I_E$  ουσιαστικώς με την συμβατική φορά των ρευμάτων

# Περιοχές λειτουργίας του τρανζίστορ:

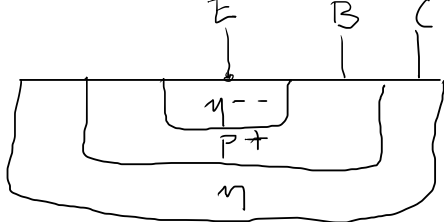
Περιοχή λειτουργίας	Δίοδος βάσης - Ευπορπύ Δίοδος BE	Δίοδος βάσης - Συλλέκτη Δίοδος BC
Ενεργός Κορεσμών Αποκοπής Ανάστροφη Ενεργός	Ορθά πορωφένη Ορθά πορωφένη Ανάστροφη πορωφένη Ανάστροφη πορωφένη	Ανάστροφη πορωφένη Ορθά πορωφένη Ανάστροφη πορωφένη Ορθά πορωφένη

→ **Χρήσιμες περιοχές λειτουργίας**

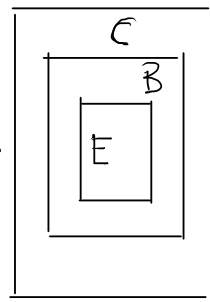
Η δίοδος βάσης ευπορπύ είναι πολύ διαφορετική από την δίοδο βάσης συλλέκτη.

Παράδειγμα «κιάδετσας» διαπραγματιών  
Τρανζίστορ στο Si (σινιτίτιο)

Κάθετη τομή:



Από πάνω:



Παράδειγμα νόθευσης:

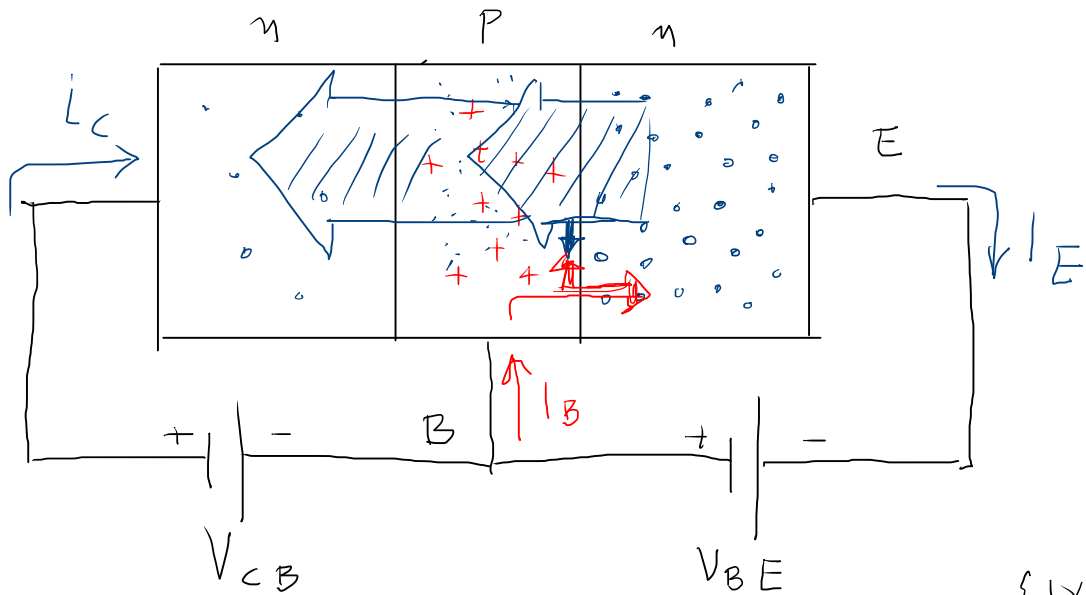
$$n^- = 5 \cdot 10^{18} / \text{cm}^3$$

(συμπύκνωση ελευθέρων ηλεκτρονίων  
ν/ων - νοθεύσεων των  
ευπορπύ)

$$p^+ = 1 \cdot 10^{17} / \text{cm}^3 \text{ (συμπύκνωση σπών στην Β)}$$

$$n = 10^{15} / \text{cm}^3 \text{ (συμπύκνωση ελευθέρων ηλεκτρονίων στην C)}$$

# Λειτουργία στην ενεργό περιοχή

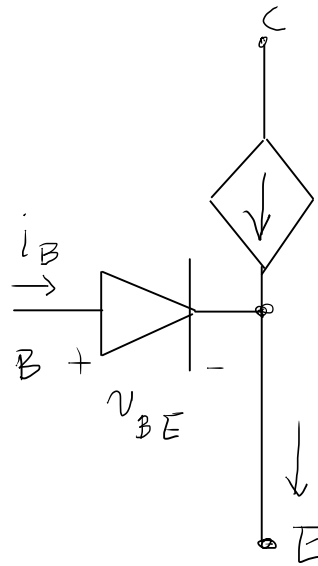


Δίοδος ΒΕ ορθά πολωμένη  
 Δίοδος ΒC ανάστροφα πολωμένη.  
 Αρα η Δίοδος ΒΕ είναι ορθά  
 πολωμένη  
 ελεύθερα ηλεκτρόνια από τον ευνοημένο  
 περνούν στην βάση, όπως από  
 την βάση περνούν στον ευνοημένο.  
 Κάποιες φορές + ελεύθερα ηλεκτρόνια  
 επαναοξειδώνεται, αλλά επειδή  
 η συγκέντρωση των οπών της βάσης

είναι σημαντικά μικρότερη από την  
 συγκέντρωση ελεύθερων ηλεκτρονίων στον ευνοημένο, το  $I_B$  (ρεύμα βάσης)  
 θα είναι πολύ μικρότερο από το ρεύμα  $I_E$ . Όπως δεν μπαίνουν στον συλλέκτη  
 γιατί η Δίοδος ΒC είναι ανάστροφα πολωμένη. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του  
 ευνοημένου που «ετρίψνυχοντα» στη βάση, περνούν στον συλλέκτη, γιατί  
 (α) ο συλλέκτης έχει πολύ χίρα ελεύθερα ηλεκτρόνια και (β) έχει δευτερεύουσα  
 τάση σε σχέση με την βάση, οπότε έχει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια.

$$I_E = I_C + I_B$$

Αναλ. το τρανζίστορ χειτουμεί ειν μία εξκρημένη πηγή  
 ρεύματος ελεγχόμενη από την τάση της  
 ορθά ποικωμένης διαόδου BE



$$I_C = I_S \left( e^{\frac{V_{BE}}{kT/q_c}} - 1 \right)$$

$$I_E = I_C + I_B$$

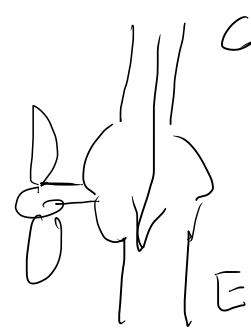
Η σχέση ρεύματος-τάσης στον  
 συλλέκτη είναι

$$I_C = I_S \left( e^{\frac{V_{BE}}{kT/q_c}} - 1 \right) \left( 1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right)$$

Επίσης το  $I_B = \frac{I_C}{\beta}$

$$I_E = I_B + I_C$$

(το  $I_B$  είναι «αγρόμα» του ρεύματος του  
 εμπορεύ και άρα και του συλλέκτη)



«Υδραυλικό  
 ανίλογο»  
 Όταν υπερνάτε  
 του διακώου  
 της βάνας  
 περνάει νερό  
 από κωών.

Τον ρόλο του διακώου  
 τον παίλει το ρεύμα της  
 βάνας.



Γιατί υπάρχει η εξάρτηση του  $I_c$  από το  $V_{CE}$ ,

Όταν αυξάνεται η τάση ανάβρογης πόρωσης της διόδου Βάσης-Συλλέκτη, αυξάνεται η περιοχή αποχύμωσης βάσης-συλλέκτη και έρχοι ο ίδιος αριθμός ηλεκτρονίων που περνούν από τον ευνοημένο στην βάση, "στριμώχνεται", σε μικρότερο χώρο στην βάση με αποτέλεσμα να μεγαλώνει το  $\frac{dI_c}{dV_{CE}}$  δηλ. η μεταβολή της συχνότητας των ελεύθερων ηλεκτρονίων στην βάση. Το ρεύμα εξασίας της διαχύσεως των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι ανάλογο του  $\frac{dI_c}{dV_{CE}}$ .

Η εξάρτηση είναι «μικρή» στον όρο  $\left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right)$  το  $V_A$  είναι π.χ. 100V οπότε για  $V_{CE} = 2V$  το  $1 + \frac{V_{CE}}{V_A} = 1 + 0,02$

$$I_c = I_s \left( e^{\frac{V_{BE}}{kT/q_e}} - 1 \right) (1,02)$$

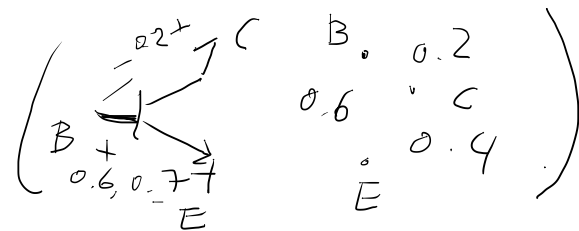
Από μοντέλο λειτουργίας ΤΗ Τρανζίστορ βγην ενεργό περιοχή

Προϋποθέσεις για να ισχύει το μοντέλο;

(α) Η διόδος Β-Ε ορθά ημωμένη, δηλ  $V_{BE} \approx 0.6 - 0.7 \text{ V}$

(β) Η διόδος Β-Σ είτε ανήκερφα ημωμένη, είτε σε μικρή δυναμική τάση (π.χ.  $0.2 \text{ V}$ )

Αυτό βγηνει ότι το  $V_{CE} > 0.4 \text{ V}$



Τότε  $I_C = \beta I_B$ . Το  $\beta$  ονομάζεται dc κέρδος ρεύματος κοινού ευποπού, έχει μια ωπή τιμή περίπου 100, αλλά μεταβάλλεται έντονα ανάλογα με την θερμοκρασία, την  $V_{CE}$ , κλπ και για το ίδιο είδος τρανζίστορ μπορεί να είναι διαφορετικό και τρανζίστορ σε τρανζίστορ. Επομένως δεν μπορούμε να βασιστούμε στην τιμή του όπως το  $\frac{\beta}{\beta+1} \approx 1$  για μεγάλες διακυμάνσεις του  $\beta$

π.χ. για  $\beta = 50$  το  $\frac{\beta}{\beta+1} = \frac{50}{51} \approx 1$  ΕΤΘ

για  $\beta = 250$  το  $\frac{\beta}{\beta+1} = \frac{250}{251} \approx 1$

$$\text{To } i_E = i_C + i_B = i_C + \frac{i_C}{\beta} = i_C \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = i_C \cdot \frac{\beta + 1}{\beta} \Rightarrow$$

$$i_C = \frac{\beta}{\beta + 1} i_E \quad , \quad \text{για } \beta \gg 1 \quad i_C \approx i_E \quad (\text{για } \beta \gg 1)$$

Θυμίζω ότι το κέρδος λειτουργίας του τρανζίστορ στην ενεργή περιοχή δίνει ότι  
 πριν από

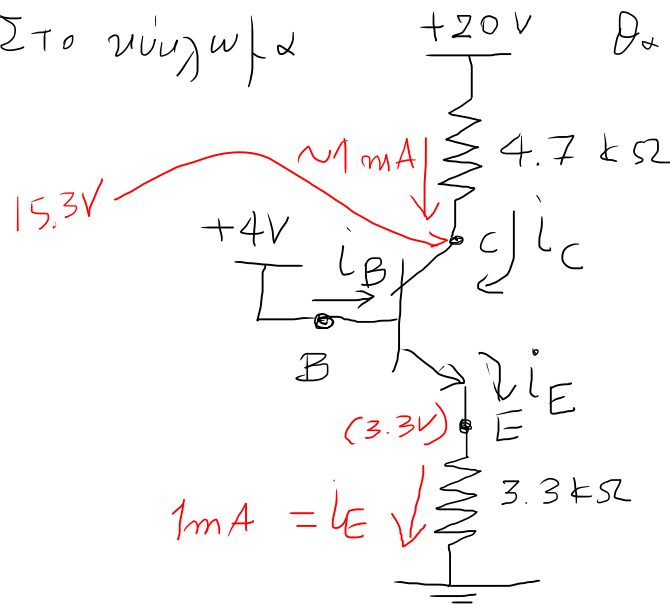
$$V_{BE} (V_{EB}) \approx 0.6 - 0.7 V, \quad I_C = \alpha I_E \quad \alpha \approx 1 \quad I_C \approx I_E$$

Το  $\beta$  είναι «μεγάλο» (π.χ.  $\beta = 100$ ) αλλά δεν το εμπνέω εύκολα.

Το  $\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$  είναι «ελαφρώς» για μεγάλα  $\beta$  και το εμπνέω.

πρόσεξτε.

Παράδειγμα: Στο κύκλωμα



θα βρούμε τα  $I_C, I_E, I_B, V_C, V_E$   
 θεωρώντας ότι  $\beta = 100$   
 και ότι  $V_{BE} \approx 0.7 V$

$$\text{Από } V_{BE} = 0.7 V \text{ το } V_E = V_B - V_{BE} = 4V - 0.7V = 3.3V$$

$$I_E = \frac{3.3V - 0V}{3.3 k\Omega} = 1 mA$$

$$I_C = \alpha I_E \approx I_E \text{ εφόσον}$$

$$I_C \approx 1 mA \text{ και}$$

$$\text{και } V_C = 20V - I_C \cdot 4.7k\Omega = 20V - 1mA \cdot 4.7k\Omega = 20V - 4.7V = 15.3V.$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1mA}{100} = 10\mu A$$

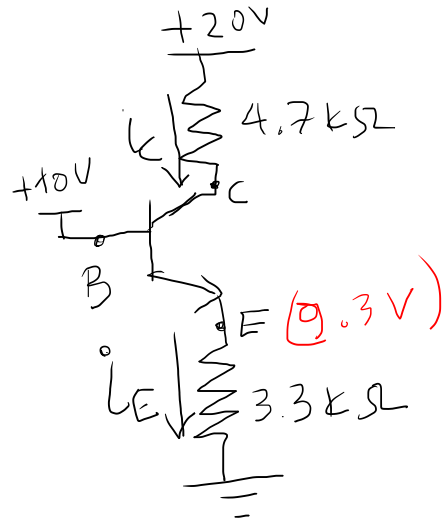
Για να βρω τις τάσεις και τα ρεύματα υπέθεσα ότι το τρανζίστορ είναι στην ενεργό περιοχή, που είναι η προϋπόθεση για να χρησιμοποιήσω το απλό μοντέλο.

Η υπόθεση αυτή επιβεβαιώθηκε από τους υπολογισμούς, γιατί το

$V_C$  βγήκε ίσο με  $V_C = 15.3V$ . Δηλ. η διόδος

BC είναι ανάστροφα προσημειωμένη

Θα χρησιμοποιήσω το ίδιο κύκλωμα βάζοντας  $V_B = +10V$



Υποθέτω ότι το τρανζίστορ λειτουργεί στην ενεργό περιοχή!

$$\text{Άρα } V_E = V_B - 0.7V = 10V - 0.7V = 9.3V$$

$$I_E = \frac{V_E - 0}{3.3k\Omega} = \frac{9.3V}{3.3k\Omega} \approx 2.82mA$$

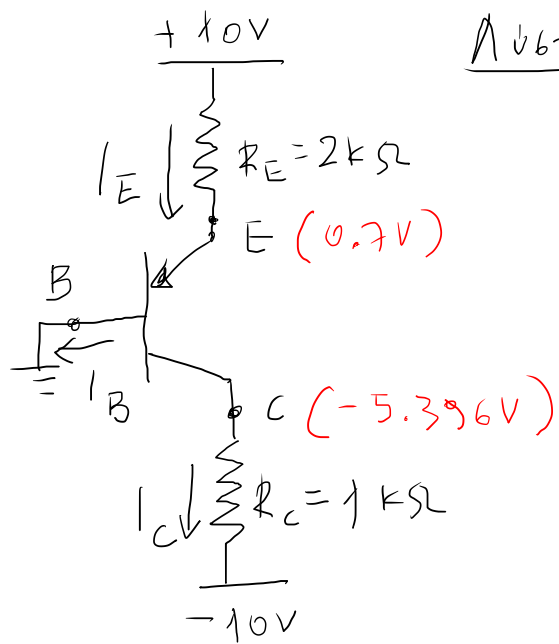
$I_C \approx I_E$  ή αλλιώς η πτώση τάσης επάνω στην

αντίσταση  $4.7k\Omega$  θα είναι  $2.82mA \cdot 4.7k\Omega = 13.25V$  έτσι

το  $V_C = 20V - 13.25V = 6.75V$  Παρατηρούμε ότι  $V_C < V_B, V_E$

δηλ. ότι η αρχική μας υπόθεση ότι το τρανζίστορ είναι στην ενεργό περιοχή δεν ισχύει. Και άρα δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε το απλό μοντέλο.

Παράδειγμα: Να βρεθούν οι τάξεις και τα ρεύματα στο παρακάτω κύκλωμα αν  $\beta = 100$



Λύση Υπόθετω λειτουργία στην ενεργό περιοχή. Τότε

$$V_{EB} = 0.7V \text{ και } V_E = 0.7V \text{ (αφού } V_B = 0V) \text{ άρα}$$

$$I_E = \frac{10V - 0.7V}{2k\Omega} = 4.65 \text{ mA}$$

$$I_C \approx I_E \text{ θα μπορούσα να βάλω και } I_C = \alpha \cdot I_E = \frac{100}{100+1} I_E$$

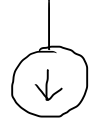
$$\text{όμω } I_C = 4.604 \text{ mA και } I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{4.604 \text{ mA}}{100} \Rightarrow$$

$$I_B = 46 \mu A$$

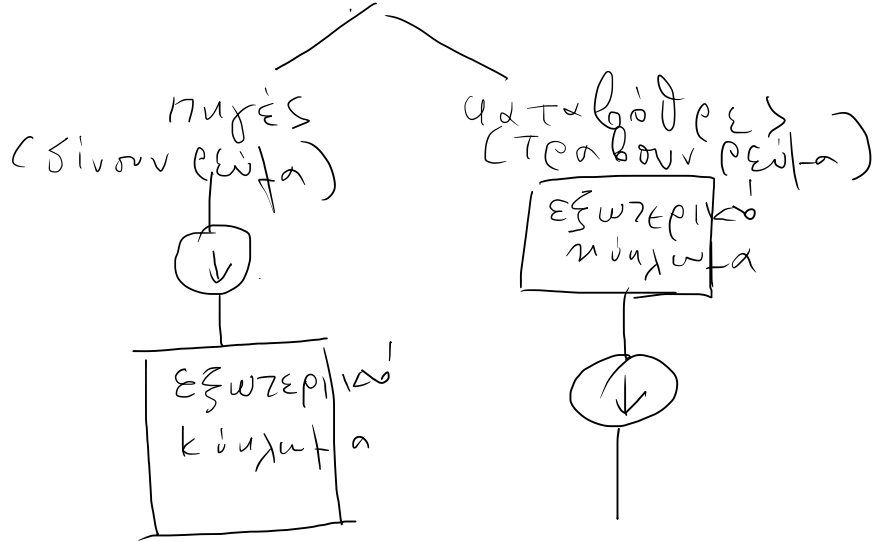
$$V_C - (-10V) = I_C \cdot R_C \text{ όμω } V_C = I_C \cdot R_C - 10V = 4.604 \text{ mA} \cdot 1k\Omega - 10V = -5.396V$$

Παρατηρώ ότι η διαφορά συλλέκτη - βάσης είναι ανάποδα πολωμένη και επομένως η υπόθεση ότι το τρανζίστορ βρίσκεται στην ενεργό περιοχή είναι λανθασμένη.

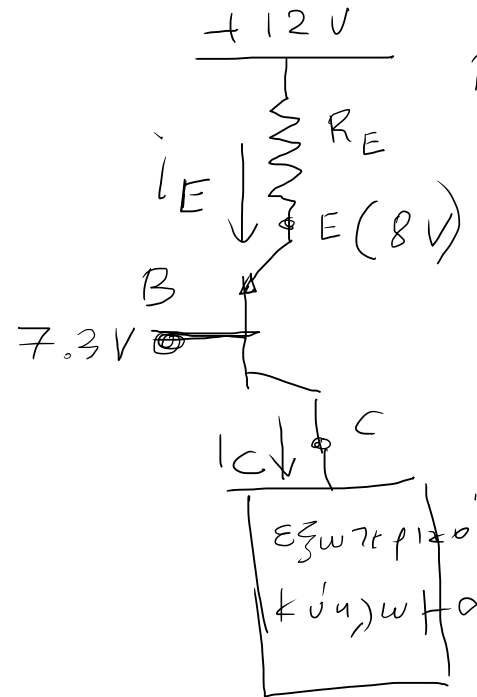
# Το τρανζίστορ βαν πυκνή ρεύματος

Θυμίζω ότι, ισανυκή πυκνή ρεύματος  είναι το υψύχω δύνo κυροδεύων, τόν οποίον το ρεύτα πω τo διαρρίξει δεν εξαρτάται από τυν τάβη κώτρεα βτουν κυροδέυεις) τυν.

## Πυκνές ρεύματος



## Υλοποίηση πυκνής ρεύματος:



Για να είναι το τρανζίστορ βτουν ενεργό περιοχή πρέπει η διοδο) E-B να είναι ορθά πωγωφένη. Αρα το VE πρέπει να είναι 8V. και  $I_E = \frac{12V - 8V}{R_E}$   
 Δηλ  $I_E = \frac{4V}{R_E}$   
 $I_C \approx I_E$ ,  $\delta \eta \lambda \approx \delta \eta$



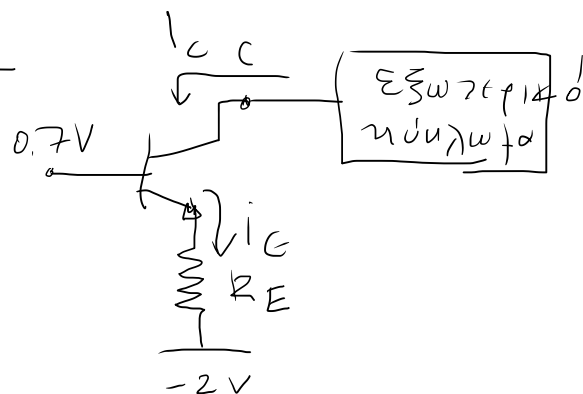
Το τρανζίστορ δίνει ρεύμα περίπου  $\frac{4V}{R_E}$  στο εξωτερικό κύκλωμα, όπου και να είναι (π.χ. θα μπορούσε να είναι αντιστάση  $1\Omega$  ή  $10\Omega$  ή  $100\Omega$ ) φτάνει η διαφορά CB να μην πολλαπλασιαστεί, δηλαδή να μην φέρει το τρανζίστορ από την ενεργό περιοχή.

Αν ήθελα να δώσω στο εξωτερικό κύκλωμα  $1mA$ , θα έπρεπε

Το  $R_E = 4k\Omega$ . Αν ήθελα να δώσω  $2mA$ , θα έπρεπε

Το  $R_E = 2k\Omega$

Καταβόθρα ρεύματος:



$$V_E = V_B - 0.7V = 0V$$

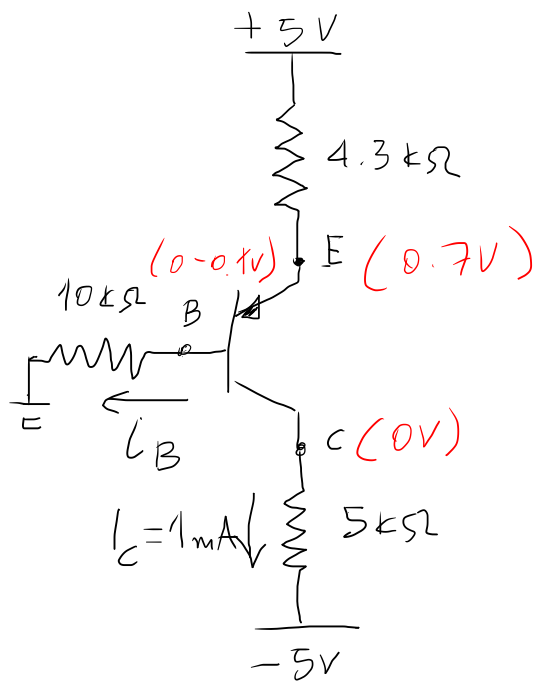
$$I_E = \frac{0V - (-2V)}{R_E} = \frac{2V}{R_E}$$

$$I_C = \alpha_0 I_E \approx I_E$$

Οιτι και να έχω στο εξωτερικό κύκλωμα  
 Το  $I_C \approx \frac{2V}{R_E}$  φτάνει η διαφορά BC να μην πολλαπλασιαστεί

### Παράδειγμα

Στο κύκλωμα:



Να βρεθούν τα ρεύματα  
και οι τάσεις που  
δεν δίνονται.

$$\text{Αφού } I_C = 1\text{mA} \quad V_C = 1\text{mA} \cdot 5\text{k}\Omega = -5\text{V} \Rightarrow V_C = 1\text{mA} \cdot 5\text{k}\Omega - 5\text{V} \Rightarrow$$

$$V_C = 5\text{V} - 5\text{V} = 0\text{V}$$

Εφόσον  $\beta \approx 1$   $I_E \approx I_C = 1\text{mA}$ . Άρα

$$V_E = 5\text{V} - 4.3\text{k}\Omega \cdot 1\text{mA} = 5\text{V} - 4.3\text{V} = 0.7\text{V}$$

Αν δεχθούμε ότι το  $V_{EB} = 0.7\text{V}$  τότε το

$$V_B = 0\text{V} \text{ και το } I_B = 0$$

Αν δεχθούμε ότι  $V_{EB} = 0.6\text{V}$  τότε το  $V_B = V_E - 0.6\text{V}$

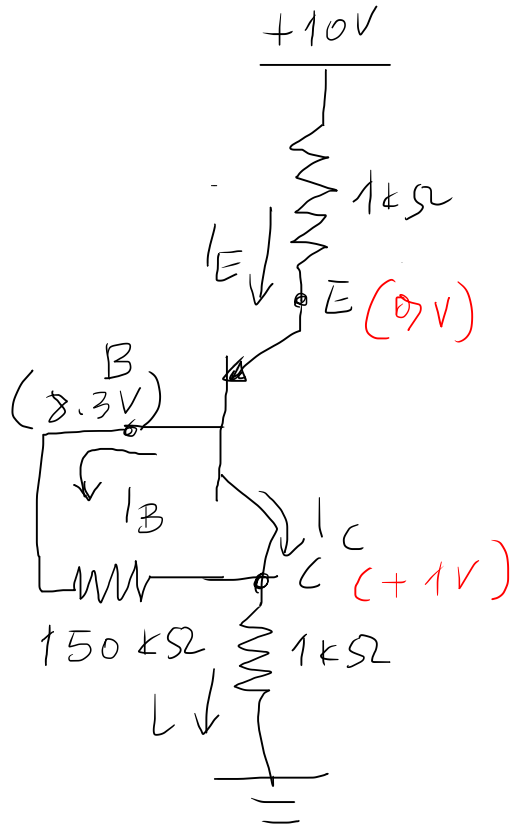
$$V_B = 0.1\text{V} \text{ και } I_B = \frac{0.1\text{V}}{10\text{k}\Omega} = \frac{10^{-1}\text{V}}{10^4\Omega} = 10^{-5}\text{A} = 10\mu\text{A}$$

Η διαφορά συλλεκτη βάσης δεν είναι ορθά negligible.

Παράδειγμα:

Να βρεθούν τα  $I_E, I_B, I_C, \beta$

για το παρακάτω κύκλωμα:



Θεωρώ πτώση τάσης  $V_{EB} = 0.7V$ . Άρα  $V_E = 9V$

$$I_E = \frac{10V - 9V}{1k\Omega} = 1mA$$

Στον κόμβο C έρχονται τα  $I_C$  και  $I_B$  και φεύγει το  $I$  στην  $L$ .

$$I = I_C + I_B \text{ όπως και } I_E = I_C + I_B \text{ άρα } I = I_E$$

$$\text{δηλ. } I = 1mA. \quad V_C - 0 = 1mA \cdot 1k\Omega = 1V$$

$$\text{άρα } V_C = 1V$$

$$I_B = \frac{V_B - V_C}{150k\Omega} = \frac{8.3V - 1V}{150k\Omega} = \frac{7.3V}{150k\Omega} = 0.0487mA$$

$$I_C = I_E - I_B = 1mA - 0.0487mA = 0.9513mA \text{ και } \beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{0.9513}{0.0487} = 19.53$$