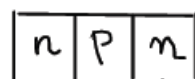


## Το διπολικό τρανζίστορ (Bipolar Junction Transistor - BJT)

Εφευρέθηκε το 1945, αντικατέστησε τις λυχνίες και άνοιξε τον δρόμο για τα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Αποτελείται από δύο διόδους με μια περιοχή κοινή. Οι δύο διόδοι είναι πολύ διαφορετικές μεταξύ τους. Υπάρχουν δύο είδη BJT:

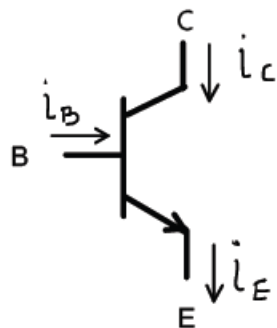
npn (κοινή περιοχή τύπου p)



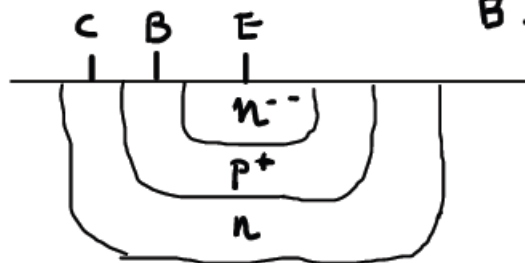
C B E

C: συλλέκτης (Collector)  
B: Βάση (Base)  
E: Εκπομπός (Emitter)

κυκλωματικό σύμβολο:



Αν δούμε την "κάθετη τομή" ενός npn "κάθετου" διπολικού τρανζίστορ στο πυρίτιο:



νόθευση εκπομπού

νόθευση βάσης

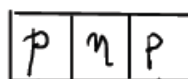
νόθευση συλλέκτη

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

$$p^+ \approx 10^{17} / \text{cm}^3$$

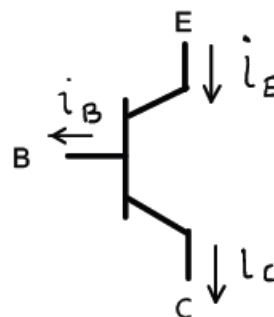
$$n \approx 10^{15} / \text{cm}^3$$

pnp (κοινή περιοχή τύπου n)

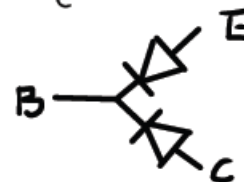


E B C

κυκλωματικό σύμβολο:



Οι διευθύνσεις αναφοράς ρεύματος που έχουμε βάλει στα κυκλωματικά σύμβολα του npn και του pnp συμπίπτουν με τη συμβατική φορά του ρεύματος

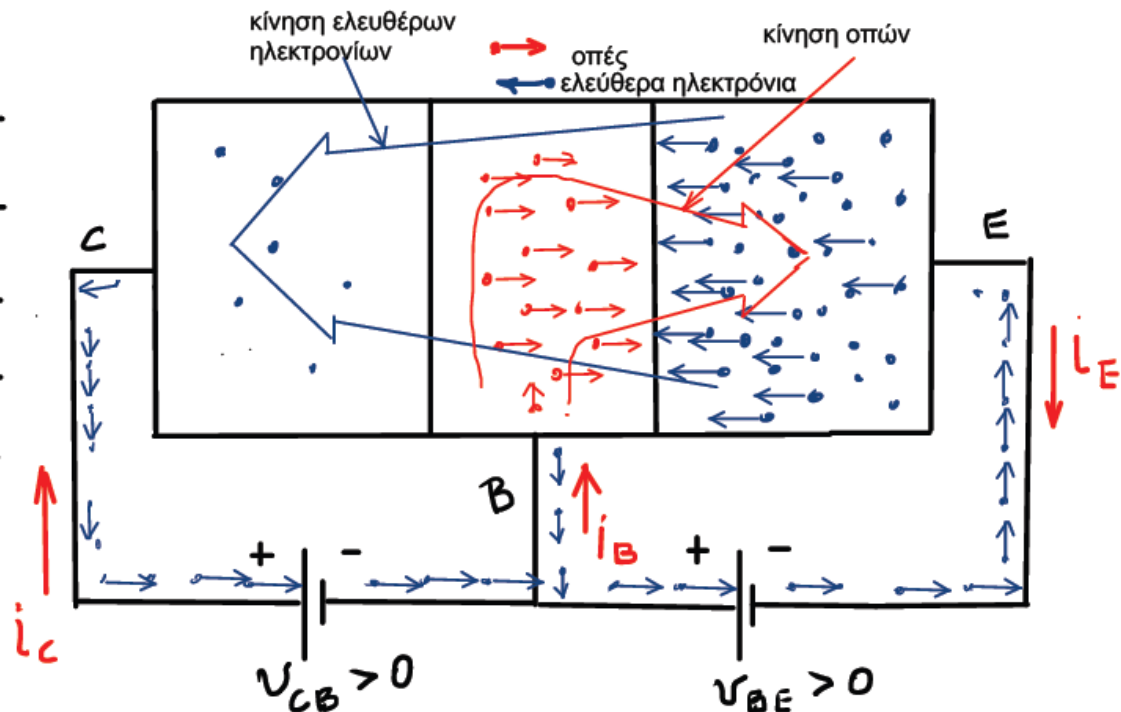


καταλαβαίνουμε γιατί η διόδος Βάσης - Εκπομπού και η διόδος Βάσης - Συλλέκτη είναι πολύ διαφορετικές μεταξύ τους. Η συγκέντρωση ελεύθερων ηλεκτρονίων στον εκπομπό είναι 50000 φορές μεγαλύτερη από την συγκέντρωση ηλεκτρονίων στο συλλέκτη και 50 φορές μεγαλύτερη από την συγκέντρωση οπών στη βάση. Το εμβαδόν διεπαφής B-E είναι μικρότερο από το εμβαδός της B-C.

# Περιοχές λειτουργίας BJT τρανζίστορ

| Δίοδος BE          | Δίοδος BC          | Περιοχή           |
|--------------------|--------------------|-------------------|
| ορθά πολωμένη      | ανάστροφα πολωμένη | Ενεργός Περιοχή   |
| ορθά πολωμένη      | ορθά πολωμένη      | Περιοχή Κορεσμού  |
| ανάστροφα πολωμένη | ανάστροφα πολωμένη | Περιοχή Αποκοπής  |
| ανάστροφα πολωμένη | ορθά πολωμένη      | Ανάστροφη ενεργός |

την ανάστροφη ενεργό περιοχή δεν την χρησιμοποιούμε. Θα καταλάβουμε γιατί αν δούμε πως λειτουργεί το BJT



Στο σχήμα βλέπουμε την λειτουργία του ηρη τρανζίστορ στην ενεργό περιοχή:

Η δίοδος B-E είναι ορθά πολωμένη: Οπές από την βάση εισέρχονται στον εκπομπό και ηλεκτρόνια από τον εκπομπό εισέρχονται στη βάση. Η δίοδος B-C είναι ανάστροφα πολωμένη: Τα ηλεκτρόνια του συλλέκτη ΔΕΝ εισέρχονται στη βάση και οι οπές της βάσης ΔΕΝ εισέρχονται στον συλλέκτη. Τα ηλεκτρόνια του εκπομπού που εισέρχονται στην βάση είναι (α) πολύ περισσότερα από τα ηλεκτρόνια του συλλέκτη και (β) έλκονται από την υψηλότερη τάση του συλλέκτη σε σχέση με αυτή της βάσης. Για τους λόγους αυτούς τα ηλεκτρόνια που προέρχονται από τον εκπομπό περνούν στον συλλέκτη (ο συλλέκτης τα συλλέγει).

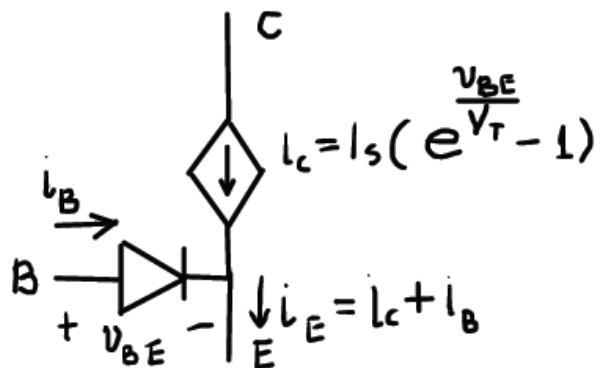
Στο σχήμα βλέπετε την κίνηση των ηλεκτρονίων, την κίνηση των οπών και την συμβατική φορά του ρεύματος

Το ρεύμα της βάσης είναι πολύ μικρότερο από το ρεύμα του εκπομπού γιατί οι οπές της βάσης έχουν μικρότερη συγκέντρωση από τα ηλεκτρόνια του εκπομπού και μικρότερη ταχύτητα (μικρότερη ευκινησία).

Τα ηλεκτρόνια του εκπομπού που περνούν στον συλλέκτη είναι κάπως λιγότερα από τα ηλεκτρόνια του εκπομπού γιατί μερικά από τα ηλεκτρόνια του εκπομπού επανασυνδέονται με οπές της βάσης καθώς συναντιούνται με αυτές στην διεπαφή εκπομπού βάσης.

Προφανώς 
$$I_E = I_C + I_B$$

Όταν το τρανζίστορ είναι στην ενεργό περιοχή, έχει μια εξαρτημένη πηγή ρεύματος στον συλλέκτη που εξαρτάται από την τάση της διόδου βάσης εκπομπού



Το ρεύμα της βάσης  $I_B$  είναι κλάσμα του ρεύματος του συλλέκτη

$$I_B = \frac{I_c}{\beta}$$

Το  $\beta$  είναι "μεγάλο". Μπορεί να έχει τιμή από 50 ως 250. Εξαρτάται από την θερμοκρασία, από την τάση  $V_{CE}$ . Ακόμη και για ίδιο είδος τρανζίστορ για ίδιες τάσεις το  $\beta$  μπορεί να είναι διαφορετικό



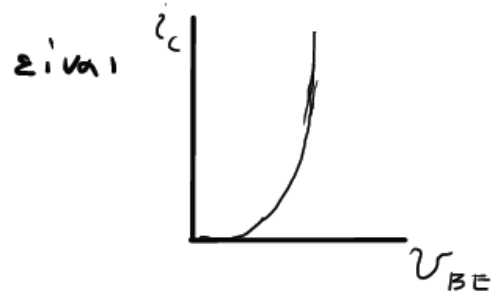
ένα απλό "υδραυλικό ανάλογο" για το τρανζίστορ είναι μια βρύση που το ρεύμα βάσης λειτουργεί ως ο διακόπτης που αφήνει το νερό να τρέξει

Η σχέση ρεύματος τάσης για το  $I_c$  έχει και έναν όρο που εξαρτάται από το  $V_{CE}$ :

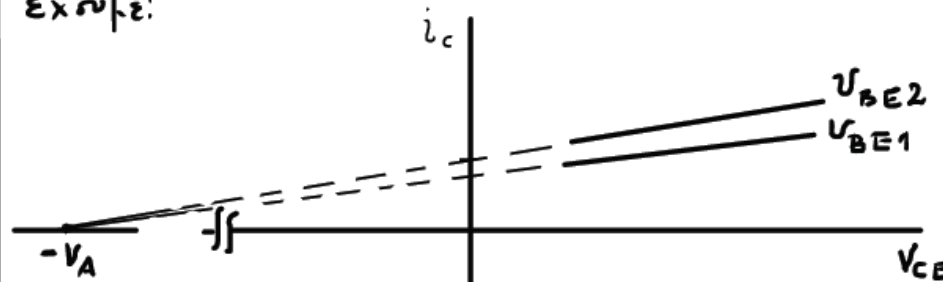
$$I_c = I_s \left( e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \left( 1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right), \quad V_T = \frac{kT}{q_e}$$

$$I_B = \frac{I_c}{\beta} \quad I_E = I_B + I_c$$

για μια συγκεκριμένη τιμή του  $V_{CE}$  η γραφική παράσταση  $I_c = f(V_{BE})$



Ενώ για κάθε συγκεκριμένη τιμή του  $V_{BE}$  έχουμε:



Η εξάρτηση του  $I_C$  από το  $V_{CE}$  εξηγείται:

Όταν αυξάνεται η τάση ανάστροφης πόλωσης της διόδου B-C, μεγαλώνει η περιοχή απογύμνωσης της. Επομένως τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του εκπομπού που περνούν στην περιοχή της βάσης (λόγω της ορθής πόλωσης της διόδου B-E) βρίσκονται σε μικρότερο όγκο και αυξάνεται η συγκέντρωσή τους.

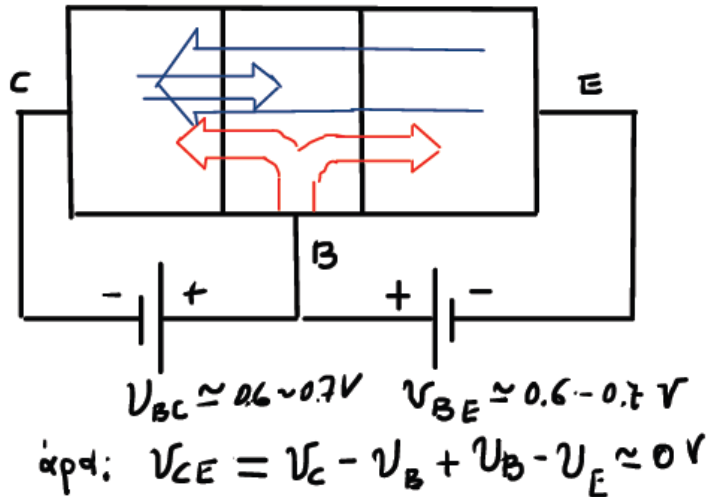
Αυτό σημαίνει ότι αυξάνεται η διαφορά συγκέντρωσης ανάμεσα στα ελεύθερα ηλεκτρόνια που είναι στην βάση και σε αυτά που είναι στον συλλέκτη. Μεγαλύτερη διαφορά συγκέντρωσης σημαίνει μεγαλύτερο  $dn/dx$  δηλαδή μεγαλύτερη ταχύτητα διάχυσης από τον εκπομπό στο συλλέκτη.

Η εξάρτηση του  $I_C$  από το  $V_{CE}$  δεν είναι έντονη.

Το  $V_A$  έχει τυπική τιμή 80-100 V. Π.χ. για  $V_A = 100 V$  ο όρος:

$$\left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A}\right) = (1 + 0.01 \cdot V_{CE})$$

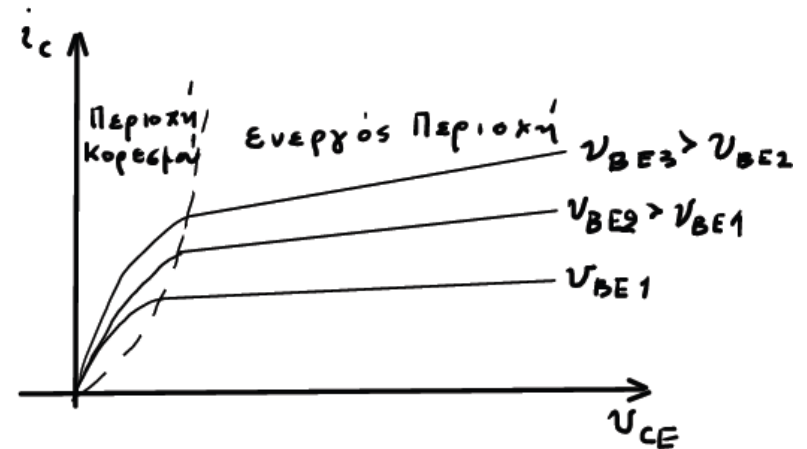
Το τρανζίστορ στην περιοχή κορεσμού



Στην περιοχή κορεσμού οι δύο διόδους B-E και B-C είναι ορθά πολωμένες.  
 Οπότε κινούνται από την βάση και προς τον εκπομπό και προς τον συλλέκτη.  
 Επομένως το ρεύμα βάσης αυξάνεται  
 Ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται και από τον εκπομπό προς την βάση και από  
 τον συλλέκτη προς την βάση.  
 Τα ηλεκτρόνια του εκπομπού είναι 50000 φορές περισσότερα από τα  
 ηλεκτρόνια του συλλέκτη. Άρα τα ηλεκτρόνια του εκπομπού που παίρνουν  
 στη βάση διαχέονται στον συλλέκτη.  
 Επομένως το ρεύμα του συλλέκτη μειώνεται  
 Είναι προφανές ότι ο λόγος

$$\beta = \frac{i_c}{i_b} \text{ μειώνεται πολύ}$$

Η γραφική παράσταση  $i_c = f(v_{CE})$



## Απλό μοντέλο για την λειτουργία του τρανζίστορ

Όταν το τρανζίστορ είναι στην ενεργό περιοχή μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα απλό μοντέλο για την λειτουργία του:

Η δίοδος βάσης - εκπομπού έχει πτώση τάσης περίπου 0.6 - 0.7 V

Το ρεύμα συλλέκτη είναι:

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

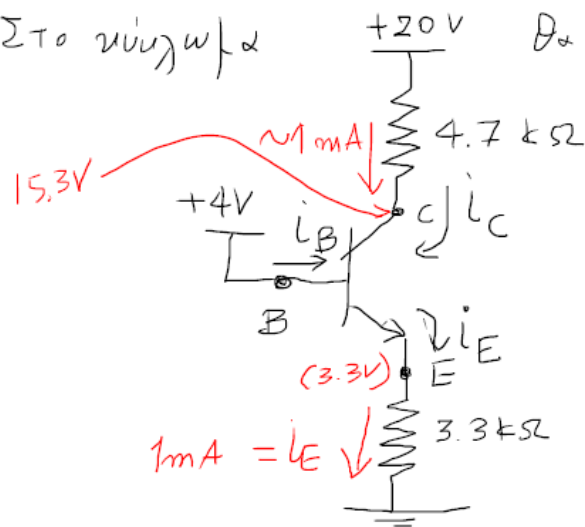
$$\text{αφού: } I_E = I_C + I_B = I_C + \frac{I_C}{\beta} = I_C \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = I_C \cdot \left(\frac{\beta + 1}{\beta}\right) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_C = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot I_E \quad \text{Το } \frac{\beta}{\beta + 1} \approx 1 \text{ (και λίγο μικρότερο)}$$

Παρατηρούμε ότι παρά το ότι το  $\beta$  μπορεί να έχει μεγάλη διακύμανση π.χ.  $\beta = 50, 100, 250$

το  $\alpha$  έχει πολύ μικρή διακύμανση  $\alpha = \frac{50}{51}, \alpha = \frac{100}{101}, \alpha = \frac{250}{251}$

Παράδειγμα: Στο κύκλωμα



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

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

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

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

$$I_C \approx 1mA \text{ και}$$

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

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

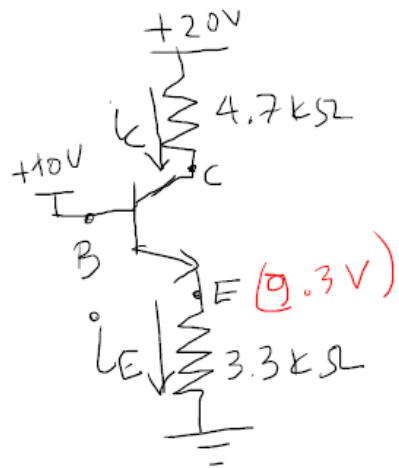
Για να βρω τις τάσεις και τα ρεύματα υπέθεσα ότι το τρανζίστορ είναι στην ενεργό περιοχή, που είναι η προϋπόθεση για να χρησιμοποιήσω το αηγό φορξέο.

Η υπόθεση αυτή επιβεβαιώθηκε από τους υπολογισμούς, γιατί το

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

BC είναι ανάστροφα πολωμένη

Θ α χρησιμοποιήσω το ίδιο κύκλωμα βάζοντας  $V_B = +10V$



Υποθέτω ότι το τρανζίστορ λειτουργεί στην ενεργό περιοχή!

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

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

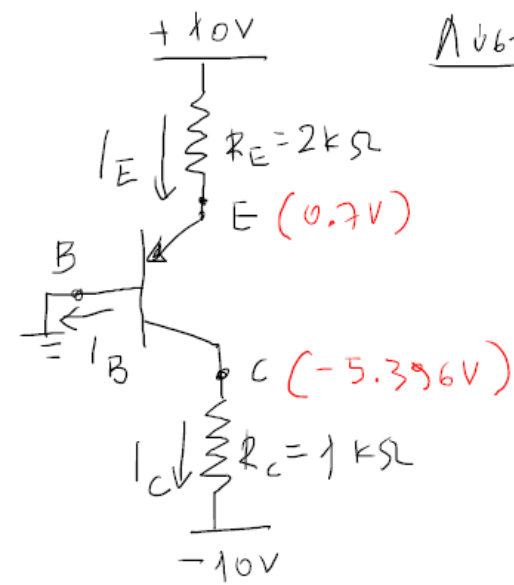
$$I_C \approx I_E \quad \text{ήδη η πτώση τάσης είναι στην}$$

$$\text{αντίσταση } 4.7k\Omega \quad \text{θα είναι } 2.82mA \cdot 4.7k\Omega = 13.25V \quad \text{έτσι}$$

$$\text{Το } V_C = 20V - 13.25V = 6.75V \quad \text{Παρατηρούμε ότι } V_C < V_B, V_E$$

§ ηγ. ότι η αρχική μας υπόθεση ότι το τρανζίστορ είναι στην ενεργό περιοχή δεν ισχύει, και άρα δεν μπορούμε να εφαρμόσουμε το αγγό μοντέλλο.

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



Λύση Υποθέτω λειτουργία στην ενεργό περιοχή. Τότε

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

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

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

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

$$I_B = 46\mu A$$

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

Παρατηρώ ότι η διοδος συλλέκτη - βάσης είναι ανάστροφα προσωφέννη και επομένως η υπόθεση ότι το τρανζίστορ βρίσκεται στην ενεργό περιοχή επαληθεύεται.