

Το διπολικό τρανζίστορ επαφής

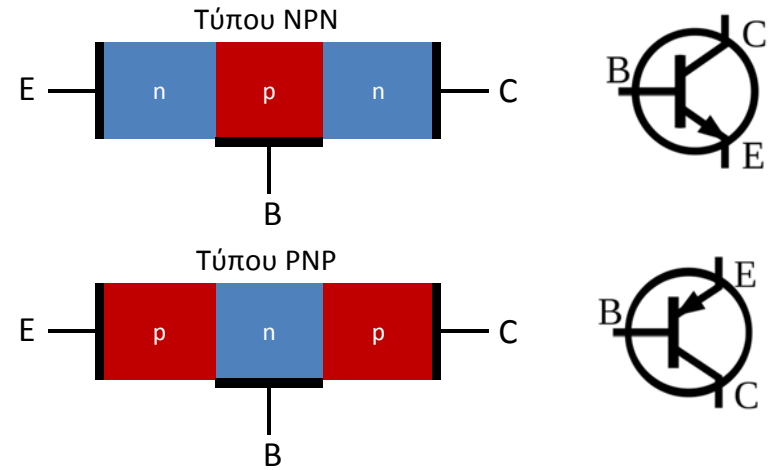
Bipolar Junction Transistor

Δ. Γ. Παπαγεωργίου
Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

dparageo@uoi.gr
<http://pc164.materials.uoi.gr/dparageo>

Τι είναι το διπολικό τρανζίστορ

Διπολική αγωγιμότητα: Στην αγωγιμότητα συμμετέχουν δύο ειδών φορείς (ηλεκτρόνια, οπές)



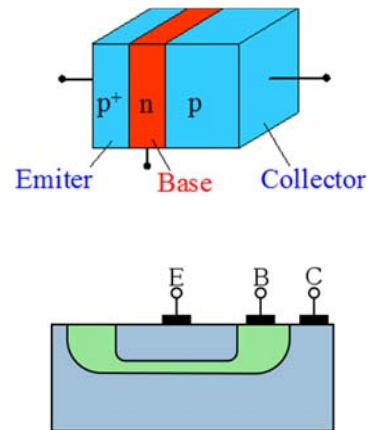
Τα τρία τμήματα ημιαγωγών

Το διπολικό τρανζίστορ αποτελείται από τρεις περιοχές με διαφορετική νόθευση:

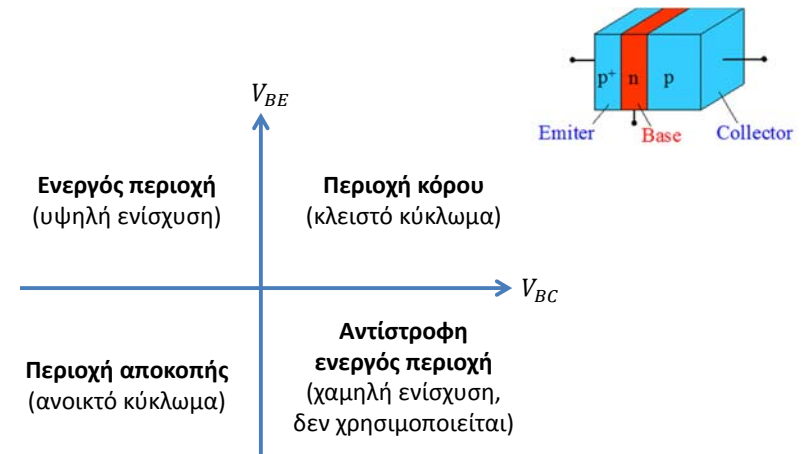
Εκπομπός (Emitter): Η περιοχή με την πιο ισχυρή νόθευση p^+

Βάση (Base): Ελαφρά νόθευση τύπου n, μικρό μήκος

Συλλέκτης (Collector): Νόθευση τύπου p (περίπου ίδια με τη Βάση)



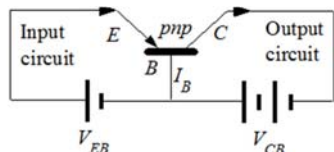
Περιοχές λειτουργίας



Συνδεσμολογία κοινής βάσης

Πόλωση σε συνδεσμολογία κοινής βάσης

- Αποτελείται από δύο κυκλώματα (εισόδου, εξόδου).
- Τα δύο κυκλώματα έχουν κοινή τη βάση.



Λειτουργία σε κανονικές συνθήκες στην ενεργό περιοχή

- Η επαφή βάσης-εκπομπού είναι ορθά πολωμένη με τάση V_{EB}
- Η επαφή βάσης-συλλέκτη είναι ανάστροφα πολωμένη με τάση V_{CB}

ΤΟ ΔΙΠΟΛΙΚΟ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ

Περιοχές απογύμνωσης

Επειδή ο εκπομπός έχει ισχυρή νόθευση η περιοχή απογύμνωσης εκτείνεται σχεδόν αποκλειστικά στη βάση.

Υπενθύμιση:

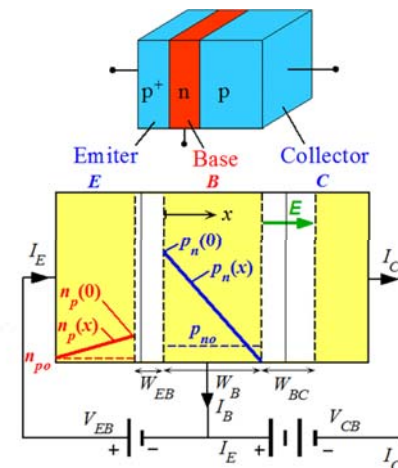
$$W_n = W \frac{N_a}{N_a + N_d}$$

$$W_p = W \frac{N_d}{N_a + N_d}$$

W_{EB} Περιοχή απογύμνωσης εκπομπού-βάσης (σχεδόν πλήρως μέσα στη βάση).

W_B Ουδέτερη περιοχή στη βάση.

W_{BC} Περιοχή απογύμνωσης βάσης-συλλέκτη (εκτείνεται στη βάση και στο συλλέκτη).



ΤΟ ΔΙΠΟΛΙΚΟ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ

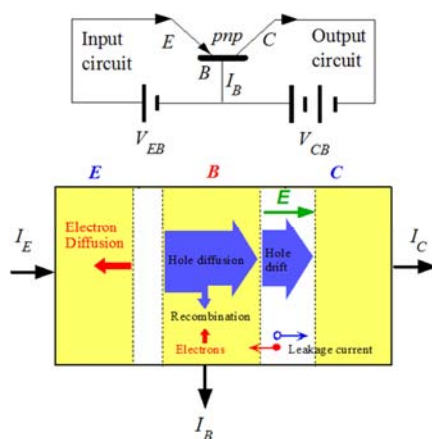
Βασική λειτουργία

Η επαφή EB είναι ορθά πολωμένη

- Οπές εκχέονται από τον εκπομπό στη βάση.
- Ηλεκτρόνια εκχέονται από τη βάση στον εκπομπό.
- Λόγω της υψηλής νόθευσης του εκπομπού οι οπές είναι πολύ περισσότερες από τα ηλεκτρόνια.
- Το ρεύμα του εκπομπού οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στις οπές.
- Οι οπές "εκπέμπονται" προς τη βάση.

Η επαφή CB είναι ανάστροφα πολωμένη

- Εντός της περιοχής απογύμνωσης BC αναπτύσσεται ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο.
- Οι οπές της βάσης ολισθαίνουν προς τον εκπομπό.



ΤΟ ΔΙΠΟΛΙΚΟ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ

Βασική λειτουργία

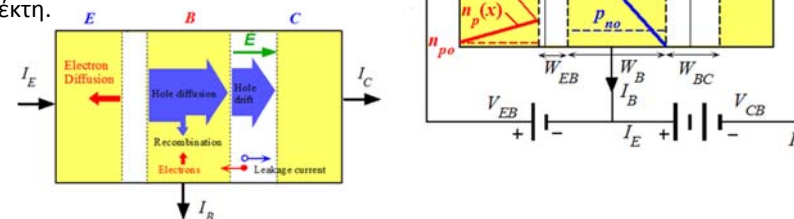
Εφαρμόζουμε το νόμο της επαφής στο αριστερό άκρο της W_B

$$p_n(0) = p_{no} e^{\frac{eV_{EB}}{kT}}$$

Εφαρμόζουμε το νόμο της επαφής στο δεξιό άκρο της W_B

$$p_n(0) = p_{no} e^{-\frac{eV_{CB}}{kT}} \approx 0$$

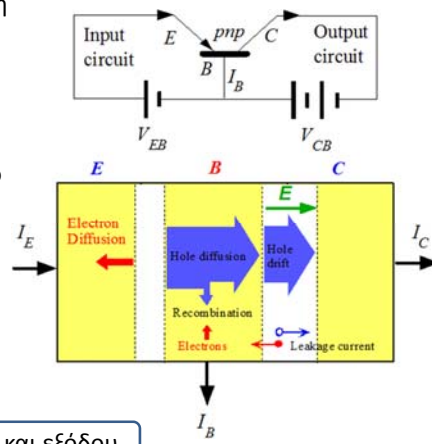
Υπάρχει βάρθρωση της συγκέντρωσης οπών στη βάση οπότε οι οπές διαχέονται από την επαφή του εκπομπού στην επαφή του συλλέκτη.



ΤΟ ΔΙΠΟΛΙΚΟ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ

Βασική λειτουργία

- Δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο στη βάση και η κίνηση των οπών οφείλεται αποκλειστικά στη διάχυση.
- Υποθέτουμε ότι δεν χάνονται οπές λόγω επανασύνδεσης στη βάση.
- Το ρεύμα στο συλλέκτη είναι ίσο με το ρεύμα στον εκπομπό $I_C \approx I_E$.
- Η τάση V_{EB} (είσοδος) είναι μικρότερη από την V_{CB} (έξοδος). Τυπικά $V_{EB} \approx 0.6 V$
- Ισχύς εισόδου $P_{in} = V_{EB} I_E$
- Ισχύς εξόδου $P_{out} = V_{CB} I_C$



Έχουμε κέρδος ισχύος μεταξύ εισόδου και εξόδου

Υπολογισμός ρεύματος εκπομπού I_E

Υπενθύμιση:

Πυκνότητα ρεύματος λόγω διάχυσης οπών

$$J_{D,h} = -eD_h \frac{dp}{dx}$$

Πυκνότητα ρεύματος λόγω διάχυσης ηλεκτρονίων

$$J_{D,e} = eD_e \frac{dn}{dx}$$

Υπολογισμός ρεύματος εκπομπού I_E

Το ρεύμα εξαιτίας διάχυσης οπών στη βάση είναι:

$$I_E = -eAD_h \frac{dp_n(x)}{dx}$$

Προσεγγίζουμε την $p_n(x)$ με μία ευθεία με κλίση

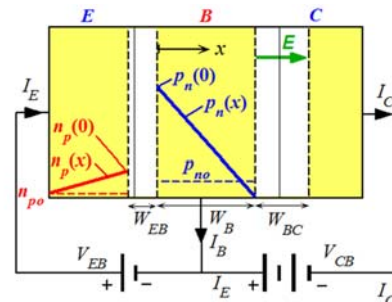
$$\frac{p_n(W_B) - p_n(0)}{W_B - 0} = \frac{0 - p_n(0)}{W_B - 0} = -\frac{p_n(0)}{W_B}$$

Συνεπώς

$$\frac{dp_n(x)}{dx} = -\frac{p_n(0)}{W_B}$$

Το ρεύμα εκπομπού γράφεται

$$I_E = eAD_h \frac{p_n(0)}{W_B}$$



Υπολογισμός ρεύματος εκπομπού I_E

Εφαρμόζουμε το νόμο της επαφής στο αριστερό άκρο της W_B

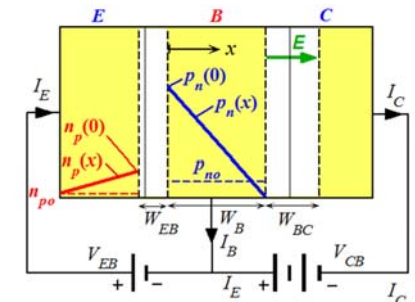
$$p_n(0) = p_{no} e^{\frac{eV_{EB}}{kT}}$$

Το ρεύμα συλλέκτη γίνεται

$$I_E = \frac{eAD_h}{W_B} p_{no} e^{\frac{eV_{EB}}{kT}}$$

Αν $I_C = I_E$ τότε

Η τάση V_{EB} στο κύκλωμα εισόδου ρυθμίζει το ρεύμα συλλέκτη στο κύκλωμα εξόδου



Κέρδος ρεύματος κοινής βάσης

Ορίζουμε ως συντελεστή κέρδους κοινής βάσης ή λόγο μεταφοράς ρεύματος

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

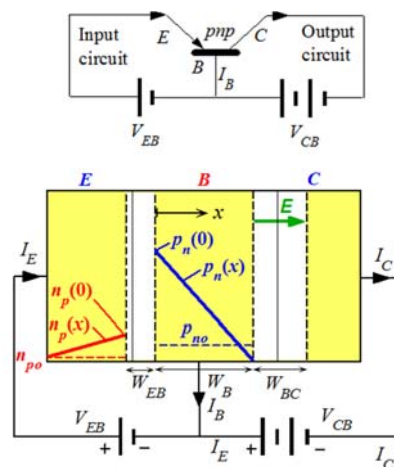
Τυπικές τιμές

$$\alpha = 0.99 \text{ έως } \alpha = 0.999$$

Όχι όμως $\alpha = 1$

Υπάρχουν δύο βασικοί λόγοι για αυτό:

- Έγχυση ηλεκτρονίων από τη βάση στον εκπομπό.
- Επανασύνδεση οπών-ηλεκτρονίων στη βάση.



Έγχυση ηλεκτρονίων από τη βάση στον εκπομπό

- Υποθέσαμε ότι οι οπές που εγχέονται από τον εκπομπό είναι υπεύθυνες για το ρεύμα I_E

- Ένας μικρός αριθμός ηλεκτρονίων εγχέεται από τη βάση στον εκπομπό

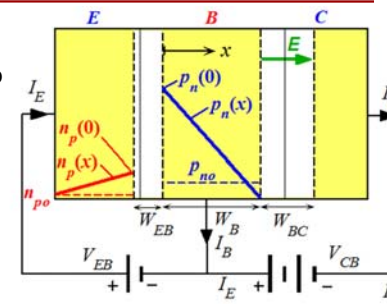
$$I_E = I_{E(h)} + I_{E(e)}$$

- Ορίζουμε ως απόδοση έγχυσης εκπομπού

$$\gamma = \frac{I_{E(h)}}{I_E} = \frac{I_{E(h)}}{I_{E(h)} + I_{E(e)}} = \frac{1}{1 + \frac{I_{E(e)}}{I_{E(h)}}}$$

- Θα θέλαμε $I_{E(h)} \gg I_{E(e)}$ δηλαδή $\gamma \rightarrow 1$

- Το γ μπορεί να υπολογιστεί από τις εξισώσεις για μια ορθά πολωμένη επαφή pn.



Επανασύνδεση στη βάση

- Μικρός αριθμός εγχόμενων οπών επανασυνδέεται στη βάση.

- Ορίζουμε το συντελεστή μεταφοράς βάσης

$$a_T = \frac{I_C}{I_{E(h)}}$$

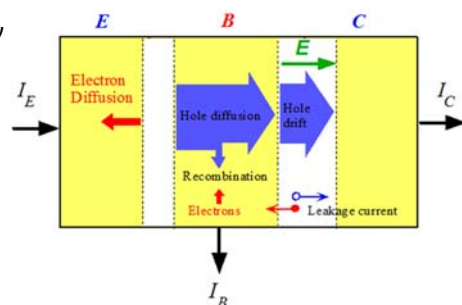
- Επειδή

$$\gamma = \frac{I_{E(h)}}{I_E} \Rightarrow I_{E(h)} = \gamma I_E$$

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

- Προφανώς στην ιδανική περίπτωση

$$a_T = a$$



Επανασύνδεση στη βάση

- Έστω τ_h ο χρόνος ζωής των οπών στη βάση.

- Τότε $1/\tau_h$ είναι η πιθανότητα ανά μονάδα χρόνου για να γίνει επανασύνδεση της οπής.

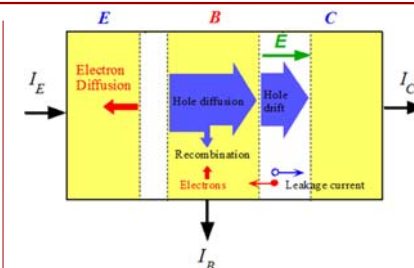
- Σε χρόνο t μια οπή διαχέεται σε απόσταση $x = \sqrt{2D_h t}$

- Συνεπώς ο χρόνος που απαιτείται για μια οπή να διαχυθεί σε απόσταση W_B είναι $\tau_t = \frac{W_B^2}{2D_h}$

Προφανώς $\tau_t < \tau_h$

- Η πιθανότητα επανασύνδεσης στη βάση στο χρόνο τ_t είναι τ_t/τ_h

- Η πιθανότητα μη επανασύνδεσης (και άρα η οπή να φτάσει στο συλλέκτη) είναι $1 - \tau_t/\tau_h$



Λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα οι οπές να μην επανασυνδεθούν:

$$a_T = \frac{I_C}{I_{E(h)}} = \frac{I_{E(h)} \left(1 - \frac{\tau_t}{\tau_h}\right)}{I_{E(h)}} \Rightarrow a_T = 1 - \frac{\tau_t}{\tau_h}$$

Το κέρδος ρεύματος κοινής βάσης γράφεται:

$$a = a_T \gamma = \left(1 - \frac{\tau_t}{\tau_h}\right) \gamma$$

Ρεύμα βάσης

- Η επανασύνδεση σπών με ηλεκτρόνια στη βάση, σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια της βάσης πρέπει να αναπληρωθούν από την πηγή V_{EB} .
- Επίσης η πηγή πρέπει να παρέχει τα ηλεκτρόνια που εκχέονται από τη βάση στον εκπομπό.
- Τα ανωτέρω δημιουργούν ένα μικρό ρεύμα βάσης:

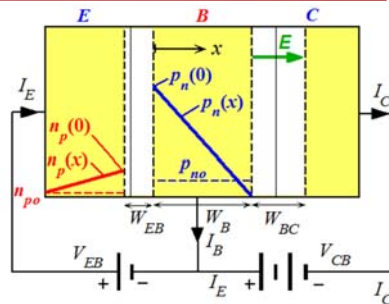
$$I_B = I_{E(\text{επανασυνδ})} + I_{E(\text{electron})} \Rightarrow$$

$$I_B = \gamma I_E \frac{\tau_t}{\tau_h} + (1 - \gamma) I_E \Rightarrow$$

$$I_B = \gamma \left(\frac{\tau_t}{\tau_h} - 1 \right) I_E + I_E$$

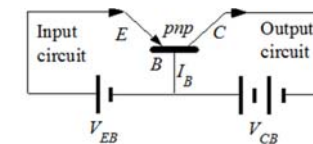
$$I_B = -a I_E + I_E \Rightarrow$$

$$I_B = -I_C + I_E$$



Ρεύμα βάσης

Η επανασύνδεση σπών με ηλεκτρόνια στη βάση, σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια της βάσης πρέπει να αναπληρωθούν από την πηγή.
Επίσης η μπαταρία πρέπει να παρέχει τα ηλεκτρόνια που injected από τη βάση στον εκπομπό.
Αυτό δημιουργεί ένα μικρό ρεύμα βάσης I_B



$$I_B = I_E (\text{επανασύνδεση σπών}) + I_{E(\text{electron})}$$

$$I_B = I_E (\text{hole}) \frac{\tau_t}{\tau_h} + I_{E(\text{electron})}$$

Επειδή $\gamma = \frac{I_E(\text{hole})}{I_E} \Rightarrow I_E(\text{hole}) = \gamma I_E$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{I_E(\text{electron})}{I_E(\text{hole})}} \Rightarrow \frac{I_E(\text{electron})}{I_E(\text{hole})} = \frac{1}{\gamma} - 1 \Rightarrow I_E(\text{electron}) = \left(\frac{1}{\gamma} - 1 \right) I_E(\text{hole})$$

Ρεύμα βάσης

$$I_{E(\text{electron})} = \left(\frac{1}{\gamma} - 1 \right) I_E(\text{hole}) = \left(\frac{1}{\gamma} - 1 \right) \gamma I_E = (1 - \gamma) I_E$$

$$I_B = I_E(\text{hole}) \frac{\tau_t}{\tau_h} + I_{E(\text{electron})} = \gamma I_E \frac{\tau_t}{\tau_h} + (1 - \gamma) I_E = \gamma I_E \left(\frac{\tau_t}{\tau_h} - 1 \right) + I_E$$

Όμως $a = \left(1 - \frac{\tau_t}{\tau_h} \right) \gamma$

$$I_B = -a I_E + I_E = I_E - I_C$$

Ανάστροφο ρεύμα διαρροής

Η επαφή συλλέκτη-βάσης είναι ανάστροφα πολωμένη.

- Δημιουργείται ένα ανάστροφο ρεύμα διαρροής εξαιτίας των θερμικά δημιουργούμενων ζευγών σπών-ηλεκτρονίων, στην περιοχή απογύμνωσης W_{BC} .
- Όταν $I_E = 0$ (ανοικτό κύκλωμα) το ρεύμα στο συλλέκτη θα είναι I_{CBO} ενώ στη βάση $-I_{CBO}$.

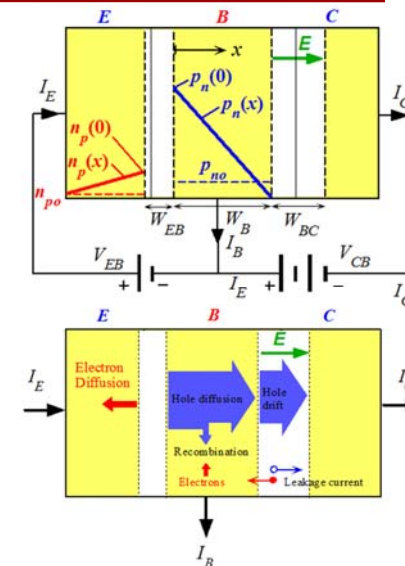
Ρεύμα συλλέκτη

$$I_C = a I_E + I_{CBO}$$

Ρεύμα βάσης

$$I_B = I_E - I_C - I_{CBO} \Rightarrow$$

$$I_B = (1 - a) I_E - I_{CBO}$$



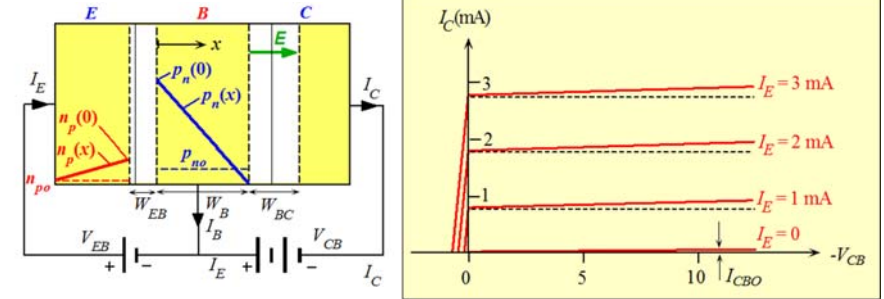
Δράση του τρανζίστορ

Τα ρεύματα I_C , I_B εξαρτώνται από το ρεύμα I_E , το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από την τάση V_{EB}



Δράση του τρανζίστορ

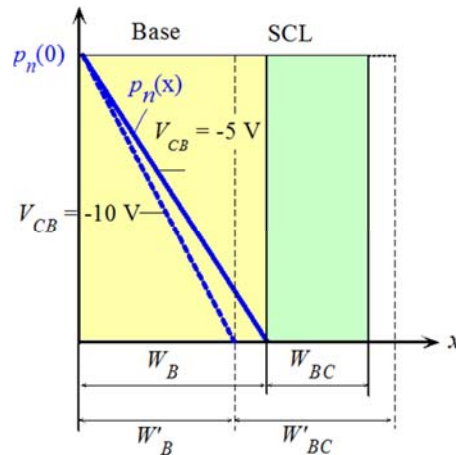
Χαρακτηριστικές DC



- Όταν $I_E = 0$ τότε $I_C = I_{CBO} < 1\mu\text{A}$
- Όσο ο συλλέκτης είναι πολωμένος αρνητικά σε σχέση με τη βάση $I_C \approx I_E$
- Αν αλλάξει πολικότητα η V_{CB} τότε η επαφή CB είναι ορθά πολωμένη και το ρεύμα αφαιρείται από αυτό της επαφής EB.
- Το I_C αυξάνεται ελαφρώς με αύξηση της V_{CB} καθώς αλλάζει το πλάτος της βάσης W_B (φαινόμενο Early).

Εξάρτηση του I_C από V_{CB} – Φαινόμενο Early

- Υποθέσαμε ότι το εύρος της βάσης W_B δεν εξαρτάται από το V_{CB}
- Εάν αυξήσουμε την V_{CB} τότε αυξάνει το εύρος της περιοχής απογύμνωσης W_{BC} και συνεπώς μειώνεται το W_B
- Ο χρόνος τ_t μειώνεται ελαφρώς
- $a_T = 1 - \frac{\tau_t}{\tau_h} \Rightarrow$ μεγαλώνει
- $a = a_T \gamma \Rightarrow$ μεγαλώνει
- Το φαινόμενο δεν είναι ιδιαίτερα έντονο, αλλά δίνει μικρή κλίση στις χαρακτηριστικές $I_C - V_{CB}$



Ενισχυτής τάσης κοινής βάσης

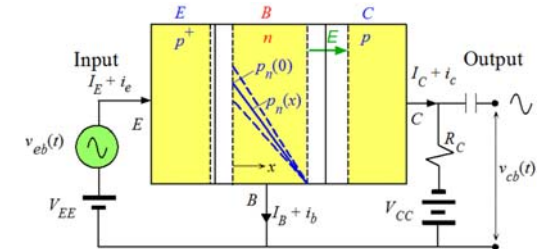
- Το I_E εξαρτάται από την V_{EB}

$$I_E = \frac{eADh}{W_B} p_{n0} e^{\frac{eV_{EB}}{kT}} \Rightarrow$$

$$I_E = I_{EO} e^{\frac{eV_{EB}}{kT}}$$
- Επίσης:

$$I_C = \alpha I_E + I_{CBO} \approx I_E$$
- Μικρές μεταβολές στην V_{EB} δίνουν μεγάλες μεταβολές στο I_C
- Η επαφή EB πολώνεται ορθά από την V_{EE} , η οποία διαμορφώνεται από το σήμα εισόδου $v_{eb}(t)$

$$V_{EB} = V_{EE} + v_{eb}$$



- Η επαφή CB πολώνεται ανάστροφα μέσω της R_C

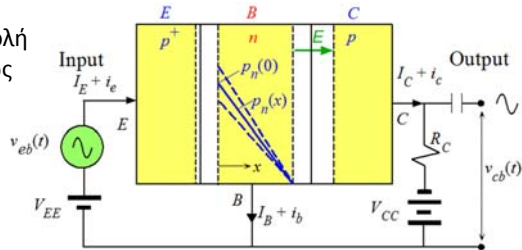
$$V_{CB} = -V_{CC} + R_C I_C$$
- Αύξηση του I_C προκαλεί αύξηση της V_{CB}

Ενισχυτής τάσης κοινής βάσης

- Θέλουμε να βρούμε τη μεταβολή του ρεύματος εκπομπού δI_E ως συνάρτηση της μεταβολής της τάσης δV_{EB}
- Σημείωση: $\delta V_{EB} = v_{eb}$
 $\delta V_{CB} = v_{cb}$
- Για μικρά δV_{EB} και δI_E

Παραγωγίζοντας:

$$\frac{\delta I_E}{\delta V_{EB}} = I_{E0} \frac{e}{kT} e^{\frac{eV_{EB}}{kT}} = \frac{e}{kT} I_E$$



Ενισχυτής τάσης κοινής βάσης

- Η αντίσταση εισόδου είναι

$$r_e = \frac{\delta V_{EB}}{\delta I_E} = \frac{kT}{eI_E}$$

- Το σήμα στην έξοδο είναι:

$$v_{cb} = R_C \delta I_C = R_C \delta I_E = R_C \frac{v_{eb}}{r_e}$$

- Ενίσχυση τάσης

$$A_V = \frac{v_{cb}}{v_{eb}} = \frac{R_C}{r_e}$$

- Προφανώς θα πρέπει $R_C > r_e$

