

**ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΣΤΟ**  
**ΜΑΘΗΜΑ**  
**ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΙΙ**

## ΑΜΦΙΠΟΛΙΚΟ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΑΦΩΝ

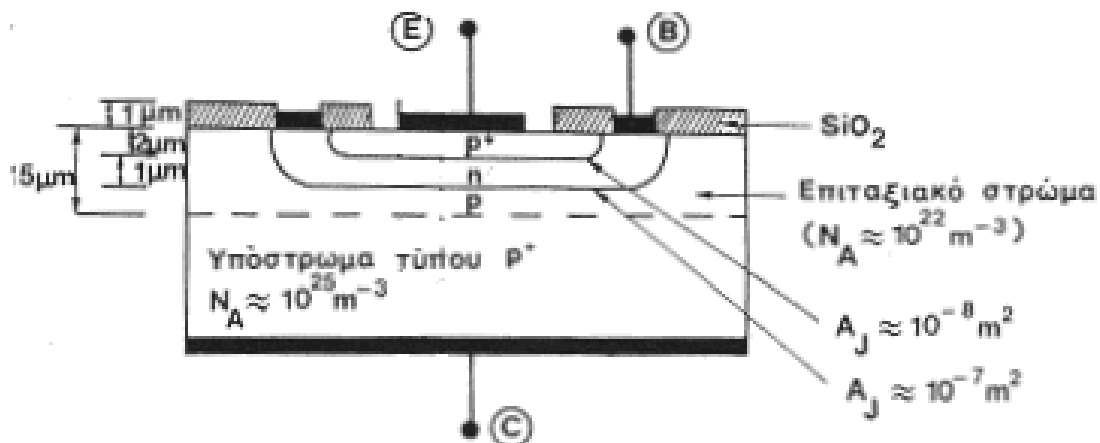
### Δομή του αμφιπολικού τρανζίστορ επαφών

Το αμφιπολικό (ή διπολικό) τρανζίστορ αποτελείται από τρία διαδοχικά εναλλασσόμενα στρώματα ημιαγωγικού υλικού (μονοκρυσταλλικό πυρίτιο) εμπλουτισμένα με προσμίξεις. Υπάρχουν δύο είδη τρανζίστορ ανάλογα με τη σειρά διαδοχής: Στο τρανζίστορ pnp η σειρά διαδοχής των στρωμάτων είναι: στρώμα τύπου p+ έντονα εμπλουτισμένο με αποδέκτες υψηλής συγκέντρωσης  $N_{aE}$ , ονομαζόμενο **εκπομπός (E)**, στρώμα τύπου n εμπλουτισμένο με δότες μικρότερης συγκέντρωσης  $N_{dB}$  **η βάση (B)**, στρώμα τύπου p εμπλουτισμένο με αποδέκτες χαμηλής συγκέντρωσης  $N_{aC}$  **ο συλλέκτης (C)**,  $N_{aE} > N_{dB} > N_{aC}$

Στο τρανζίστορ npn η σειρά διαδοχής των στρωμάτων είναι: στρώμα τύπου n + **εκπομπός (E)**, στρώμα τύπου p **η βάση (B)**, στρώμα τύπου n **ο συλλέκτης (C)**. Η συγκέντρωση προσμίξεων στα στρώματα είναι:  $N_{dE} > N_{aB} > N_{dC}$

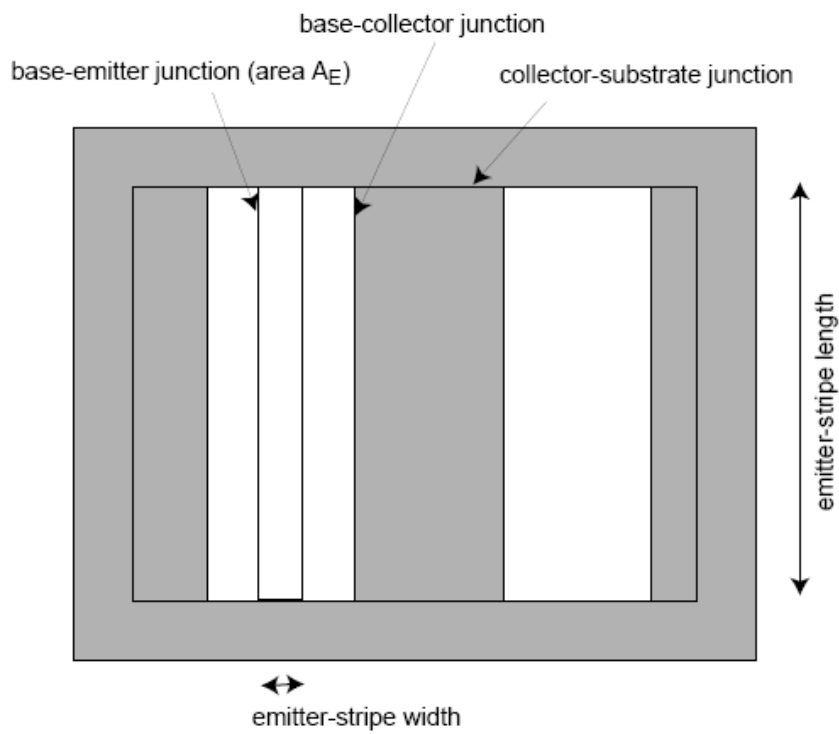
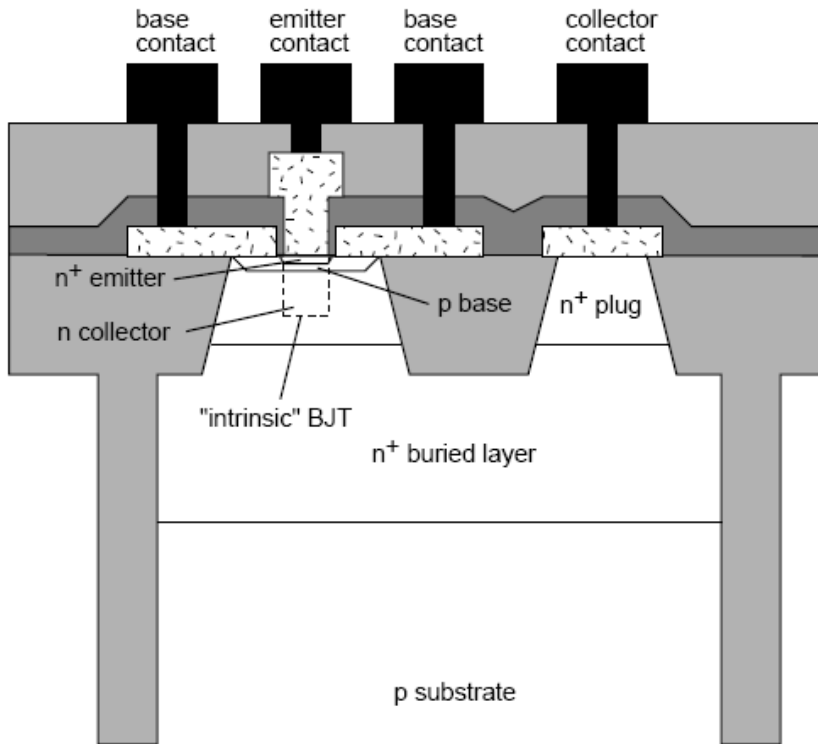
Ο εκπομπός εκπέμπει φορείς ηλεκτρισμού (ηλεκτρόνια για τρανζίστορ npn ή οπές για τρανζίστορ pnp), η βάση είναι λεπτή (0,1-10μm) για να επιτρέψει τη διέλευση των φορέων προς το συλλέκτη, όπου συλλέγονται και αποτελεί περιοχή κατανάλωσης ισχύος και για αυτό έχει το μεγαλύτερο εύρος.

Η τεχνολογία κατασκευής του τρανζίστορ pnp είναι πιο απλή από του npn. Το τρανζίστορ npn κυριαρχεί στις ηλεκτρονικές εφαρμογές λόγω των λειτουργικών πλεονεκτημάτων



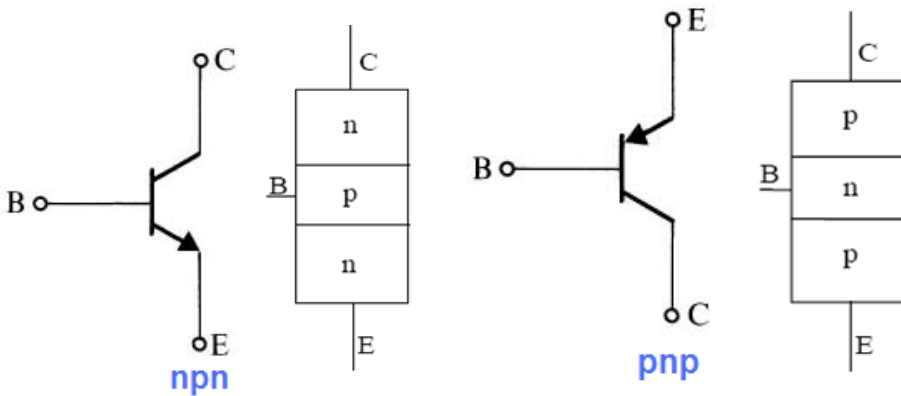
Εγκάρσια τομή αμφιπολικού τρανζίστορ επαφών pnp με συνήθειες τιμές για τις διάφορες παραμέτρους (μη ακριβής κλίμακα).

- ✓ ονομάζεται **Επίπεδο επιταξιακό τρανζίστορ διπλής διάχυσης**, γιατί έχει κατασκευαστεί με την επίπεδη τεχνολογία με διπλή διάχυση προσμίξεων για την υλοποίηση της βάσης (n) και του εκπομπού (p+) σε επιταξιακό ντοπαρισμένο στρώμα (p+), που είναι ο συλλέκτης). Το υπόστρωμα τύπου (p) χρησιμεύει σαν μηχανικό στήριγμα
- ✓ Η ενεργός περιοχή του τρανζίστορ καλύπτει μικρή περιοχή της συνολικής του λόγω των επιμεταλλώσεων και των απομονώσεων με  $\text{SiO}_2$



Τρανζίστορ npn **υψηλής ταχύτητας** (C. C. SODINI)

## Συμβολισμοί, ονοματολογία και πόλωση των διπολικών τρανζίστορ



Σύμβολο και σχηματικά διαγράμματα τρανζίστορ npn και pnp (το βέλος βρίσκεται στην πλευρά του εκπομπού, και δείχνει τη συμβατική φορά του ρεύματος για κανονική λειτουργία του τρανζίστορ)

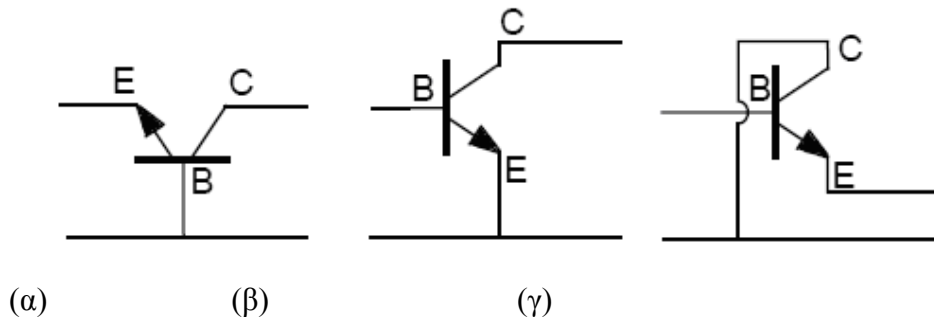
-Τρεις ακροδέκτες: Εκπομπός (E), Βάση (B), Συλλέκτης (C)

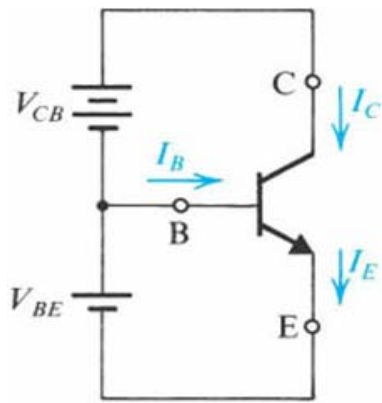
-Δύο επαφές: Επαφή εκπομπού (επαφή εκπομπού-βάσης), Επαφή συλλέκτη (επαφή συλλέκτη-βάσης)

-Τρία ρεύματα  $I_E$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  για τα οποία ισχύει ο νόμος του Kirchhoff  $I_E + I_B + I_C = 0$

- ✓ Σε τρανζίστορ npn το ρεύμα οφείλεται κυρίως σε κίνηση ηλεκτρονίων, ενώ στο τρανζίστορ pnp οφείλεται κυρίως σε κίνηση οπών
- ✓ Η ροή των οπών και το ρεύμα (συμβατικό) είναι στην ίδια κατεύθυνση (πιο εύκολη κατανόηση μηχανισμών μεταφοράς φορτίου). Η ροή των ηλεκτρονίων και το ρεύμα (συμβατικό) είναι αντίθετης κατεύθυνσης

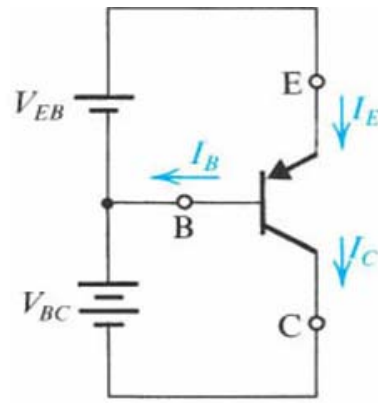
Για τη συνδεσμολογία του τρανζίστορ σε κύκλωμα πρέπει ο ένας από τους τρεις ακροδέκτες να είναι κοινός στην είσοδο και στην έξοδο. Τρεις τρόποι συνδεσμολογίας: α) κοινής βάσης (common base CB), β) κοινού εκπομπού (common emitter CE), κοινού συλλέκτη (common collector, CC)





$$I_E = I_C + I_B$$

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



$$I_E = I_C + I_B$$

$$V_{EC} = V_{BC} + V_{EB}$$

τρανζίστορ npn και pnp σε συνδεσμολογία κοινής βάσης

Στο τρανζίστορ pnp το ρεύμα του εκπομπού  $I_E$  εισέρχεται στον ακροδέκτη E του τρανζίστορ, ενώ εξέρχονται από τους ακροδέκτες B και C τα ρεύματα βάσης  $I_B$  και συλλέκτη  $I_C$ . Το αντίθετο ισχύει για το τρανζίστορ npn

### Συμβολισμοί τάσεων και δυναμικών

Δυναμικό ακροδέκτη σε σχέση με το κοινό σημείο (γείωση):  $V_E, V_B, V_C$   
 π.χ.  $V_C$ : Δυναμικό συλλέκτη ως προς το κοινό σημείο

Διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο ακροδεκτών:

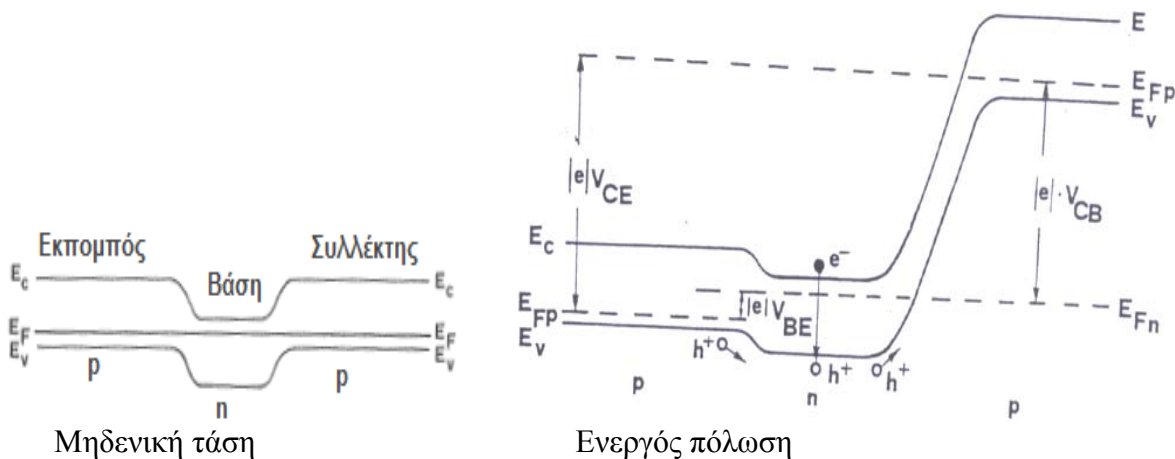
π.χ.  $V_{BE}$ : τάση μεταξύ βάσης-εκπομπού

$V_{CB}$ : τάση μεταξύ συλλέκτη-βάσης

## Αρχή λειτουργίας

### Ενεργειακά διαγράμματα τρανζίστορ pnp στην ενεργό περιοχή λειτουργίας

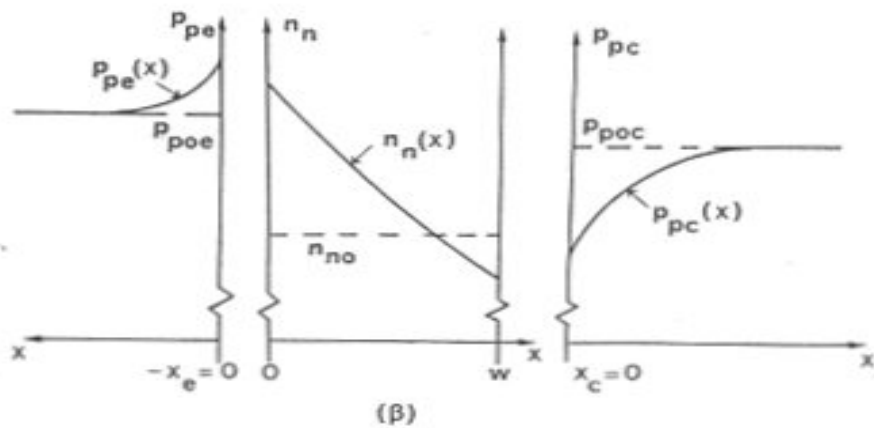
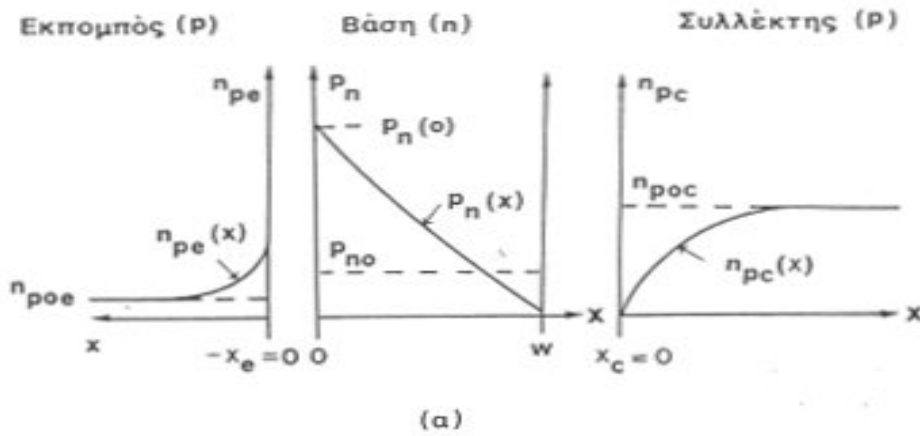
Όταν η επαφή εκπομπού-βάσης είναι ορθά πολωμένη  $V_{EB} > 0$  και η επαφή συλλέκτη-βάσης είναι ανάστροφα πολωμένη  $V_{CB} < 0$ , το τρανζίστορ λειτουργεί στον "ενεργό τρόπο (active mode)" γιατί ενεργεί σαν ενισχυτής ισχύος όπως θα δούμε παρακάτω



### Δράση τρανζίστορ

1. Έχουμε μείωση του δυναμικού  $qV_{EB}$  λόγω της ορθής πόλωσης και αύξηση του δυναμικού  $qV_{CB}$  λόγω της ανάστροφης πόλωσης
2. Η ορθά πολωμένη επαφή E-B εγχείει οπές στη βάση και ηλεκτρόνια στο εκπομπό (που αποτελούν τις συνιστώσες του ρεύματος εκπομπού  $I_{hE}$ ,  $I_{eE}$  αντίστοιχα)
3. επειδή η βάση είναι πολύ λεπτή (δηλ. ουδέτερη περιοχή βάσης  $w \ll L_h$  μήκος διάχυσης οπών ( $L_h = (D_h \tau_h)^{1/2}$ ), οι περισσότερες οπές που έχουν εγχυθεί στη βάση (φορείς μειοψηφίας) διαχέονται κατά μήκος της βάσης, εισέρχονται στην περιοχή άντλησης του συλλέκτη, όπου επιταχύνονται από το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο (ανάστροφα πολωμένη η επαφή C-B) και συλλέγονται στο συλλέκτη (**transistor effect**)
4. Το ποσοστό οπών που επανασυνδέονται με τα ηλεκτρόνια της βάσης είναι μικρό γιατί αφενός το εύρος της βάσης είναι πολύ μικρό, επομένως ελάχιστοι φορείς θα προλάβουν να επανασυνδεθούν και αφετέρου η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στη βάση είναι μικρή λόγω της μικρής συγκέντρωσης σε προσμίξεις, πράγμα που επίσης περιορίζει την επανασύνδεση
5. Το ποσοστό ηλεκτρονίων που εγχέονται από τη βάση στον εκπομπό είναι πολύ μικρό εφόσον η συγκέντρωση προσμίξεων στη βάση είναι μικρότερη σε σχέση με τον εκπομπό (κατά δύο τάξεις μεγέθους τουλάχιστον).

**Συγκεντρώσεις (κατανομή) των φορέων στον ενεργό τρόπο λειτουργίας τρανζίστορ pnp ( $V_{EB}>0$  και  $V_{CB}<0$ )**



Συγκέντρωση των φορέων α) μειοψηφίας β) πλειοψηφίας

**Παρατήρηση**

Η συγκέντρωση των φορέων μειοψηφίας (που έχουν εγχυθεί) στις ακμές της περιοχής άντλησης εκατέρωθεν της ορθά πολωμένης επαφής εκπομπού δίνεται από τη σχέση διόδου επαφής pn, π.χ.

από την πλευρά του εκπομπού για  $x = -x_e = 0$  
$$n_{pe} = n_{poe} \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right)$$

και στη πλευρά της βάσης για  $x = 0$ , 
$$p_n = p_{no} \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right)$$

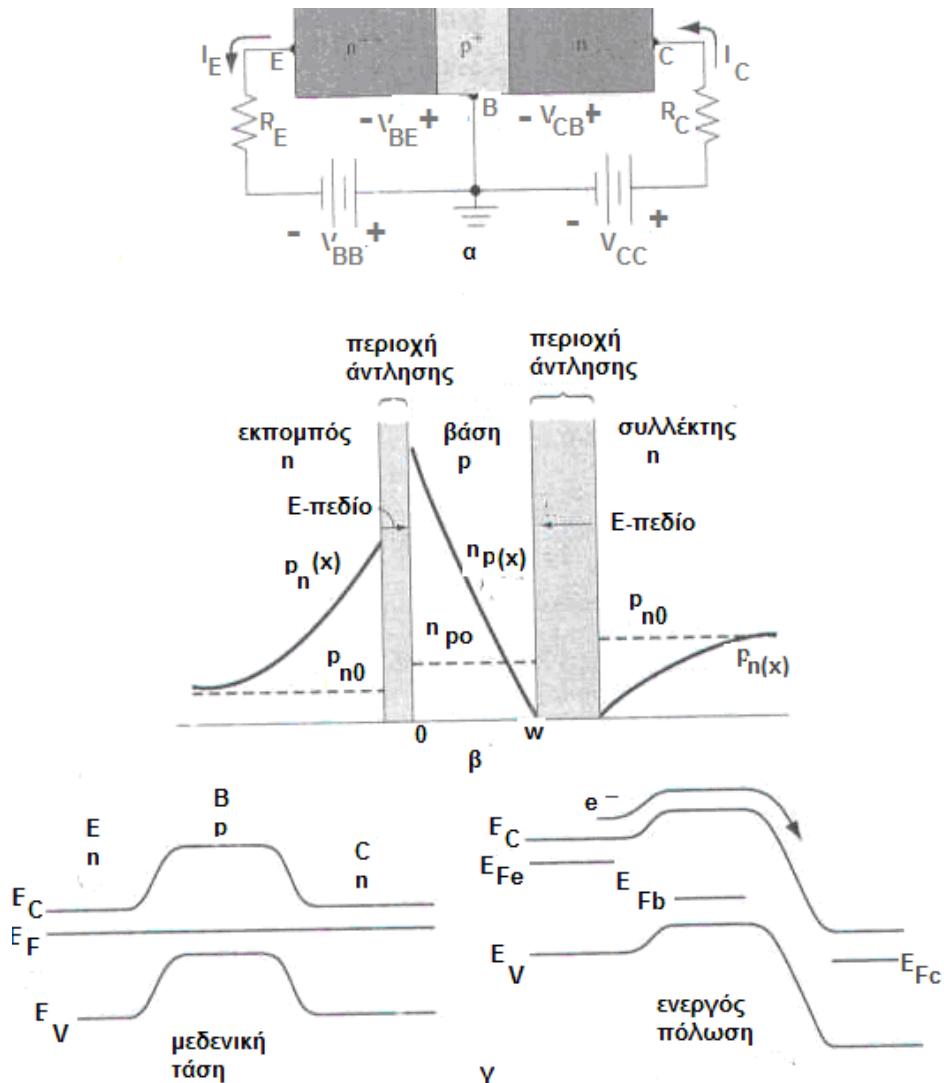
**Κατανομή συγκέντρωσης φορέων μειοψηφίας στη βάση:**

Η κατανομή των εγχεόμενων οπών στην ουδέτερη περιοχή της βάσης είναι γραμμική συνάρτηση της θέσης  $x$  λόγω του μικρού πλάτους της, επειδή ένα πολύ μικρό ποσοστό των οπών εξαφανίζονται σε ανασύζευξη (επανασύνδεση) με ηλεκτρόνια βάσης, σταθερό ρεύμα διάχυσης οπών φθάνει στο συλλέκτη, με καλή προσέγγιση η κλίση συγκέντρωσης οπών είναι σταθερή (γραμμική μεταβολή)

$$I_E \propto \frac{dp_n(x)}{dx}, \quad p_n(x) = ax$$

Η κατανομή της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων στον εκπομπό  $n_{pe}$  (στα όρια της περιοχής άντλησης,  $-x_e = 0$ ) είναι εκθετική όπως σε μία επαφή pn ορθά πολωμένη

**Το τρανζίστορ npn στην ενεργό περιοχή λειτουργίας**  
**Ενεργειακά διαγράμματα και κατανομή συγκέντρωσης των φορέων μειοψηφίας**



- α) Πόλωση τρανζίστορ npn σε σύνδεση κοινής βάσης στον ενεργό τρόπο λειτουργίας
- β) Κατανομή συγκέντρωσης φορέων μειοψηφίας
- γ) Ενεργειακά διαγράμματα

**Ρεύμα διάχυσης μέσω της βάσης -Το ρεύμα συλλέκτη**

Το ρεύμα στο τρανζίστορ καθορίζεται πρωταρχικά από τη μεταφορά των φορέων μειοψηφίας δια μέσου της περιοχής της βάσης. Το ρεύμα του συλλέκτη είναι ίσο με την πυκνότητα του ρεύματος διάχυσης των ηλεκτρονίων στη βάση πολλαπλασιαζόμενο με το εμβαδόν της επαφής βάσης.-εκπομπού. Η διάχυση ηλεκτρονίων μέσω της βάσης καθορίζεται από την κατανομή της συγκέντρωσής τους στην ουδέτερη περιοχή της, εύρους  $w$ , η οποία είναι γραμμική. Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στη βάση για  $x=0$  (όρια της περιοχής άντλησης της επαφής εκπομπού-βάσης από την πλευρά της βάσης) είναι:

$$n_{pB}(0) = n_{p0} \exp \frac{qV_{BE}}{kT} = n_{p0} \exp \frac{V_{BE}}{V_T}$$

Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στη βάση για  $x=w$  είναι σχεδόν μηδενική



Το ρεύμα διάχυσης των ηλεκτρονίων μέσω της βάσης είναι:

$$I_{diff} = -J_{nBdiff} A_{BE} = A_{BE} q D_e \frac{dn_{pB}(x)}{dx} = A_{BE} q D_e \left[ \frac{n_{pB}(0) - 0}{0 - w} \right] =$$

$$\frac{-A_{BE} q D_e n_{p0}}{w} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$$

η ροή των ηλεκτρονίων είναι στην κατεύθυνση +x, ενώ το συμβατικό ρεύμα είναι στην κατεύθυνση -x, έτσι έχουμε:

$$I_C = -I_{diff} = I_s \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right),$$

**Το ρεύμα στον ακροδέκτη του συλλέκτη ελέγχεται από την τάση των δύο άλλων ακροδεκτών, βασική δράση του τρανζίστορ.** Δηλαδή το ρεύμα του συλλέκτη είναι ανεξάρτητο της  $V_{CB}$ , το τρανζίστορ δρα σαν πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση

το ρεύμα κορεσμού του τρανζίστορ είναι 
$$I_s = \frac{A_{BE} q D_e n_{p0}}{w} = \frac{A_{BE} q D_e n_i^2}{w \cdot N_{aB}}$$

Όπου  $N_{aB}$  η συγκέντρωση προσμίξεων στη βάση. Η ευκινησία όπως και η σταθερά διάχυσης των ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερη από αυτή των οπών και άρα το τρανζίστορ πηρ θα άγει μεγαλύτερο ρεύμα από το τρανζίστορ pnp

**Το ρεύμα διάχυσης των οπών είναι το ρεύμα βάσης  $I_B$  το οποίο διασχίζει την επαφή εκπομπού:**

$$I_B = -J_{pEdiff} A_{BE} = -A_{BE} q D_h \frac{dp_{nE}(x)}{dx}, \quad \text{όπου } p_{nE}(0) = p_{no} \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$$

$$\frac{A_{BE} q D_h p_{n0}}{L_h} \left[ \left( \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right) \right]$$

**Το ρεύμα του εκπομπού  $I_E = -(I_B + I_C) = -(-J_{nBdiff} + -J_{pEdiff}) =$**

$$-\left[ \left( \frac{q D_e n_{p0} A_{BE}}{W_B} \right) + \left( \frac{q D_h p_{n0} A_{BE}}{L_h} \right) \right] \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right)$$

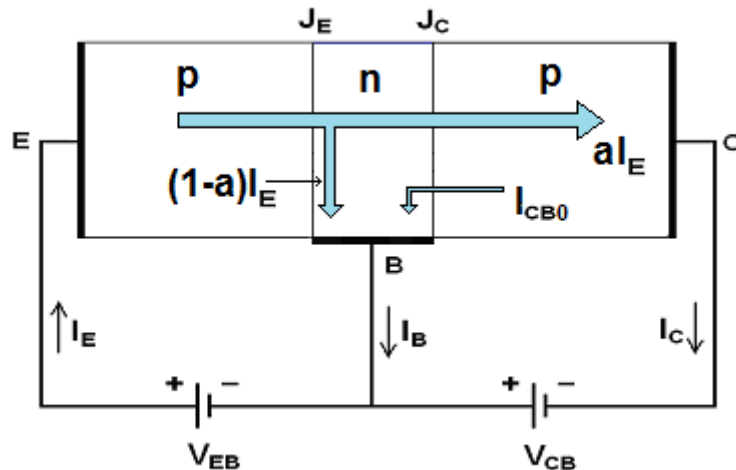
**Ο λόγος του ρεύματος συλλέκτη προς το ρεύμα του εκπομπού (dc ρεύματα) ορίζεται σαν κέρδος ρεύματος  $a_F$  κοινής βάσης**

$$a_F = \frac{I_C}{-I_E} = \frac{\left( \frac{q D_e n_{p0} A_{BE}}{W_B} \right)}{\left( \frac{q D_e n_{p0} A_{BE}}{W_B} \right) + \left( \frac{q D_h p_{n0} A_{BE}}{L_h} \right)}$$

## Κέρδος ρεύματος α - κέρδος ρεύματος β τρανζίστορ για μεγάλα σήματα

Το διπολικό τρανζίστορ χαρακτηρίζεται από δύο παραμέτρους για μεγάλα σήματα : κέρδος ρεύματος (ή ενίσχυση ρεύματος) α για σύνδεση κοινής βάσης και κέρδος ρεύματος β (ή ενίσχυση ρεύματος) για σύνδεση κοινού εκπομπού

Το ρεύμα του εκπομπού  $I_E$  στο τρανζίστορ pnp είναι ρεύμα οπών. Το ρεύμα του συλλέκτη είναι  $I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$ , δηλαδή το άθροισμα του μεγαλύτερου ποσοστού ρεύματος εκπομπού,  $\alpha I_E$  και ενός μικρού ρεύματος  $I_{CBO}$  (που είναι το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού του συλλέκτη με τον εκπομπό ανοικτό, ανεξάρτητο της τάσης  $V_{CB}$ )



Σύμφωνα με τις φορές ρευμάτων για τον κόμβο του συλλέκτη ισχύει:

$$I_C + \alpha I_E - I_{CBO} = 0 \Rightarrow I_C = -\alpha I_E + I_{CBO}$$

### 1. κέρδος ρεύματος α για σύνδεση κοινής βάσης

$$\alpha = \frac{-I_C + I_{CBO}}{I_E} = -\frac{I_C - I_{CBO}}{I_E - 0}$$

(επειδή τα  $I_C$ ,  $I_E$  έχουν αντίθετα πρόσημα και για τους δύο τύπους τρανζίστορ pnp και npn, το α ορίζεται ως θετικό πάντοτε)

Δηλαδή η παράμετρος α είναι η αύξηση του ρεύματος συλλέκτη πάνω από την τιμή αποκοπής (στην αποκοπή  $I_C = I_{CBO}$ ) προς την αύξηση του ρεύματος εκπομπού πάνω από την τιμή αποκοπής (στην αποκοπή  $I_E = 0$ ). Το άλφα λέγεται **κέρδος ή ενίσχυση ρεύματος για μεγάλα σήματα** στη συνδεσμολογία κοινής βάσης

Αν θεωρηθεί αμελητέα η τιμή του ανάστροφου ρεύματος κορεσμού  $I_{CBO}$

$$I_C \cong \alpha I_E, \quad I_{CBO} \rightarrow 0$$

$$\alpha \cong \frac{I_C}{I_E} = h_{FB}$$

παρατήρηση: τα ρεύματα στους ακροδέκτες του τρανζίστορ  $I_E$ ,  $I_B$ ,  $I_C$  θεωρούνται ότι είναι θετικά όταν η ροή (συμβατική) του φορτίου γίνεται προς το εσωτερικό του τρανζίστορ και αρνητικά όταν εξέρχονται από αυτό

Η παράμετρος  $h_{FB}$  λέγεται **κέρδος ή ενίσχυση ρεύματος DC**, είναι περίπου ίση με το κέρδος ρεύματος για μεγάλα σήματα,  $a$ , και συχνά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υπολογισμούς το ένα μέγεθος αντί του άλλου.

## 2. κέρδος ρεύματος $\beta$ για σύνδεση κοινού εκπομπού

Θεωρώντας το τρανζίστορ σαν ένα κόμβο

$$KCL : I_E - I_C - I_B = 0 \Rightarrow I_B = I_E - I_C = (1-a)I_E - I_{CBO}$$

$$= \frac{(1-a)}{a} I_C - \frac{I_{CBO}}{a}$$

Ο λόγος  $\frac{a}{(1-a)}$  ορίζεται ως ο συντελεστής  $\beta = \frac{a}{(1-a)}$

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

$$\beta = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B - I_{CBO}}$$

Στη σχέση αυτή το  $\beta$  εκφράζει το πηλίκο της αύξησης του ρεύματος συλλέκτη πάνω από την τιμή  $I_{CBO}$  προς την αύξηση του ρεύματος βάσης πάνω απ' αυτή την τιμή. Η έκφραση αυτή προσδιορίζει το  $\beta$  σαν **κέρδος ή ενίσχυση ρεύματος για μεγάλα σήματα**.

για τρανζίστορ πυριτίου το  $I_{CBO}$  είναι αμελητέο, οπότε

$$\beta \cong \frac{I_C}{I_B} = h_{FE}$$

Η παράμετρος  $h_{FE}$  επειδή ορίζεται από το λόγο δυο τιμών ρεύματος πόλωσης, λέγεται **κέρδος ή ενίσχυση ρεύματος DC**, είναι περίπου ίση με την ενίσχυση ρεύματος  $\beta$  για μεγάλα σήματα και συχνά μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε υπολογισμούς το ένα μέγεθος αντί του άλλου. Η ενίσχυση ρεύματος DC εξαρτάται από το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ και κυρίως από το ρεύμα πόλωσης  $I_C$  (όπως θα δούμε στη συνέχεια)

Σχέση μεταξύ των παραμέτρων  $a$  και  $\beta$ :

$$\beta = \frac{a}{(1-a)} \quad \text{και} \quad a = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

-Τιμές του  $a$  μεταξύ 0,90 -0,995,

-Τιμές του  $\beta$  μεγαλύτερες του 100.

-Οι παράμετροι  $a$  και  $\beta$  συμβολίζονται επίσης και με το  $\alpha_F, \beta_F$

- ✓ Υψηλής τεχνολογίας ολοκληρωμένα κυκλώματα (ICs) BJTs: τιμές ρεύματος συλλέκτη  $\approx 0,1-1$  mA, τιμές  $\beta \approx 50-300$
- ✓ Το κέρδος ρεύματος  $\beta$  ελέγχεται δύσκολα κατασκευαστικά, στόχος είναι ο σχεδιασμός IC μη ευαίσθητων σε μεταβολή

## AC ρεύματα στο τρανζίστορ

Όταν εφαρμοστεί σε σειρά με τη DC τάση πόλωσης  $V_{BE}$  και μία εναλλασσόμενη τάση το τρανζίστορ διαρρέεται από χρονικά μεταβαλλόμενα ρεύματα. Ισχύουν παρόμοιες σχέσεις: για τα ολικά ρεύματα σε συλλέκτη και εκπομπό θα έχουμε:

$$\beta_{dc} = h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}, \quad \beta_{ac} = h_{fe} = \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{v_{CE}} = \text{σταθ.}$$

$$i_C = a i_E + I_{CB0}$$

$$i_C = I_C + i_{C(AC)} = a(I_E + i_{E(AC)}) + I_{CB0}$$

$$i_{C(AC)} = a i_{E(AC)}$$

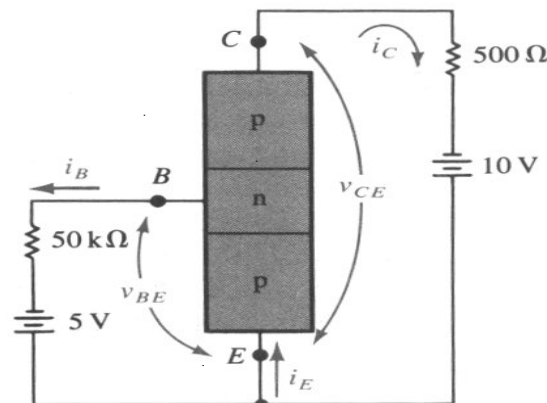
$$i_{C(AC)} = \beta i_{B(AC)}$$

## Ενισχυτική δράση του τρανζίστορ - Ποιοτική ερμηνεία

Όταν προστεθεί μία πηγή AC χαμηλού σήματος και μικρής συχνότητας στο ρεύμα ελέγχου της βάσης,  $i_b$ , μπορούμε να πάρουμε πολύ μεγάλες μεταβολές στο AC ρεύμα του συλλέκτη  $i_c$  για μικρές μεταβολές του AC ρεύματος της βάσης  $i_b$ . Το χρονικά μεταβαλλόμενο ρεύμα του συλλέκτη θα είναι  $i_c = h_{fe} \cdot i_b$

Έτσι στο παράδειγμα το AC ρεύμα του συλλέκτη  $i_c$  μεταβάλλεται περίπου κατά 5mA από την τιμή του DC  $I_C$ , για μία μεταβολή του  $i_b$  περίπου κατά 0,05mA από την τιμή του DC,

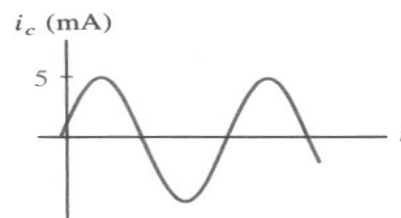
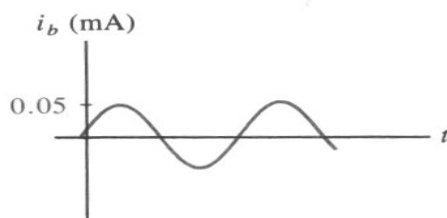
$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \approx \frac{V_{BB}}{R_B} = \frac{5V}{50K\Omega} = 0,1mA$$



$$\beta = \frac{i_C}{i_B} = 100$$

$$I_B = \frac{5V}{50k\Omega} = 0.1mA$$

$$I_C = \beta I_B = 10mA$$

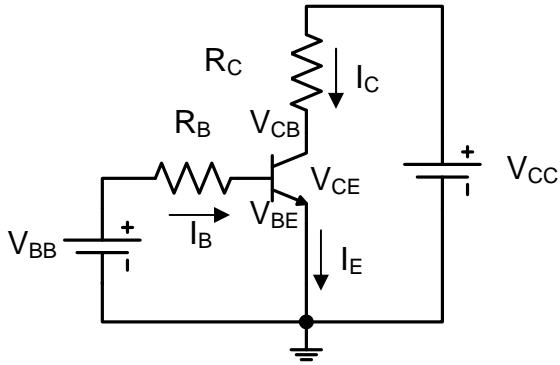


α) Τρανζίστορ σε σύνδεση κοινού εκπομπού στον ενεργό τρόπο λειτουργίας

β) Το ασθενές εναλλασσόμενο ρεύμα της βάσης  $i_b$  στο κύκλωμα εισόδου ενισχύεται  $\beta$  ( $h_{fe}$ ) φορές από το τρανζίστορ και περνάει από την αντίσταση  $R_L$  ως  $i_c = h_{fe} \cdot i_b$  στο κύκλωμα εξόδου.

Αυτός ο τύπος της ενίσχυσης που ελέγχεται από το ρεύμα είναι τυπικός στα διπολικά τρανζίστορ και χρησιμοποιείται ευρέως στα κυκλώματα τρανζίστορ

## Υπολογισμός ρευμάτων και τάσεων σε κύκλωμα τρανζίστορ σε σύνδεση κοινού εκπομπού



$$V_{BE(ON)} \cong 0,7V$$

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

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

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

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

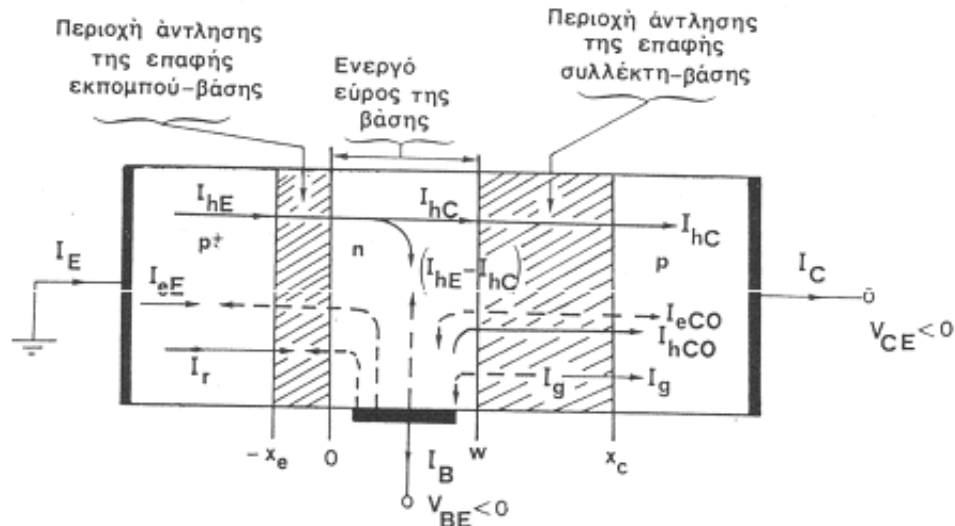
$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$$

$$i_C = I_s \exp(v_{BE} / V_T)$$

$$i_C = \beta \cdot i_B$$

## Συνιστώσες ρευμάτων του τρανζίστορ -Αναλυτικότερη περιγραφή

Για την κατανόηση της εσωτερικής λειτουργίας του τρανζίστορ πρέπει να συσχετίσουμε τα ρεύματα στους ακροδέκτες με τις διάφορες συνιστώσες των ρευμάτων που οφείλονται στους μηχανισμούς διάχυσης, γένεσης και ανασύζευξης φορέων στις περιοχές του εκπομπού, βάσης και συλλέκτη, καθώς και στις περιοχές άντλησης των δύο επαφών του τρανζίστορ



- ✓  $I_{hE}$  ρεύμα διάχυσης οπών (λόγω έγχυσης οπών από τον εκπομπό στη βάση)
- ✓  $I_{eE}$  ρεύμα διάχυσης ηλεκτρονίων (λόγω έγχυσης ηλεκτρονίων από τη βάση στον εκπομπό)
- ✓  $I_{hC}$  ρεύμα διάχυσης οπών που φθάνει στον συλλέκτη,
- ✓  $I_{hE} - I_{eE}$  ρεύμα που τροφοδοτεί το κύκλωμα βάσης για να αναπληρώσει τα ηλεκτρόνια της βάσης που καταναλώνονται σε ανασύζευξη με τις εγχόμενες οπές
- ✓  $I_r$ , οφείλεται στη ανασύζευξη ηλεκτρονίου-οπής στην περιοχή άντλησης της ορθά πολωμένης επαφής E-B και
- ✓  $I_g$ , οφείλεται στη γένεση ηλεκτρονίου-οπής στην περιοχή άντλησης της ανάστροφα πολωμένης επαφής B-C
- ✓  $I_{eCO}$ ,  $I_{hCO}$ , ρεύματα διάχυσης των φορέων μειοψηφίας (ανάστροφο ρεύμα κορεσμού) της ανάστροφα πολωμένης επαφής B-C

Οι συνιστώσες  $I_g$ ,  $I_{eCO}$ ,  $I_{hCO}$  είναι πολύ μικρές και συνδυάζονται σε μία ολική συνιστώσα τη  $I_{CO}$ , που είναι το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού του συλλέκτη που παρατηρείται αν αφήσουμε ανοικτό το κύκλωμα του εκπομπού και διατηρήσουμε ανάστροφα πολωμένη την επαφή βάσης-συλλέκτη.

Τα ρεύματα στους ακροδέκτες είναι:

$$I_E = I_{hE} + I_{eE} + I_r$$

$$-I_C = I_{hC} + I_{CO}$$

$$-I_B = I_{eE} + (I_{hE} - I_{hC}) + I_r - I_{CO}$$

## Υπολογισμός του κέρδους ρεύματος α

Σε σχέση με τους διάφορους μηχανισμούς μέσα στο τρανζίστορ το κέρδος ρεύματος  $\alpha_F$  του τρανζίστορ είναι ένα μέτρο της απόδοσης της έγχυσης του εκπομπού ( $\gamma$ ) και του παράγοντα μεταφοράς της βάσης  $\alpha_T$  (θεωρούμε ότι οι επαφές εκπομπού και συλλέκτη είναι ιδανικές, δηλαδή αμελητέα ρεύματα γένεσης-ανασύζευξης, συνθήκη ασθενούς έγχυσης φορέων),

Το κέρδος ρεύματος α εκφράζεται από τη σχέση  
 $\alpha = \gamma \alpha_T$

**γ ο συντελεστής απόδοσης του εκπομπού δίνεται από τη σχέση**

$$\gamma = \frac{\text{εγγεόμενο ρεύμα φορέων μειοψηφίας στη θέση } x=0 \text{ της επαφής E-B}}{\text{ολικό ρεύμα στον ακροδέκτη εκπομπού}}$$

$$= \frac{J_h(x=0)}{J_h(x=0) + J_e(x=-x_e)}$$

Τα ρεύματα οπών  $J_h(x=0)$  και ηλεκτρονίων  $J_e(x=-x_e)$  είναι ρεύματα διάχυσης και είναι ανάλογα της κλίσης συγκέντρωσης στη βάση και στον εκπομπό, αντίστοιχα. Στη βάση η κλίση εκτείνεται για απόσταση  $w$  και στον εκπομπό  $L_{eE}$  (μήκος διάχυσης ηλεκτρονίων στον εκπομπό και είναι η μέση απόσταση που διανύει ένα ηλεκτρόνιο πριν να επανασυνδεθεί με φορείς πλειοψηφίας)

$$L_{eE} = \sqrt{D_e \tau_e}, \text{ και } D_e = \frac{kT}{q} \mu_e$$

$D_e$  και  $\tau_e$  είναι αντίστοιχα ο συντελεστής διάχυσης και ο χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων στον εκπομπό. Μία πλήρης ανάλυση αποδεικνύει ότι η κλίση για τις οπές στη βάση είναι ανάλογη του  $p_{n0}/w$  και για τα ηλεκτρόνια στον εκπομπό του  $n_{p0E}/L_{eE}$ , οπότε

$$\gamma = \frac{1}{1 + \left( \frac{n_{p0E}}{p_{n0}} \cdot \frac{D_{eE}}{D_h} \cdot \frac{L_h}{L_{eE}} \right) \cdot \tanh\left(\frac{w}{L_h}\right)}$$

Ο συντελεστής  $\gamma$  λαμβάνει υπόψη το ρεύμα διάχυσης ηλεκτρονίων στον εκπομπό, το οποίο δεν συμμετέχει στο ρεύμα του συλλέκτη.

**Ο παράγοντας μεταφοράς στη βάση  $\alpha_T$ :**

$$\alpha_T = \frac{\text{ρεύμα φορέων μειοψηφίας που φθάνουν στο συλλέκτη}}{\text{ρεύμα φορέων μειοψηφίας στη θέση } x=0 \text{ που οφείλονται σε έγχυση από τον E}}$$

$$= \frac{J_h(x=w)}{J_h(x=0)}$$

Λαμβάνει υπόψη φαινόμενα ανασύζευξης της περισσειας των φορέων μειοψηφίας με του φορείς πλειοψηφίας στη βάση

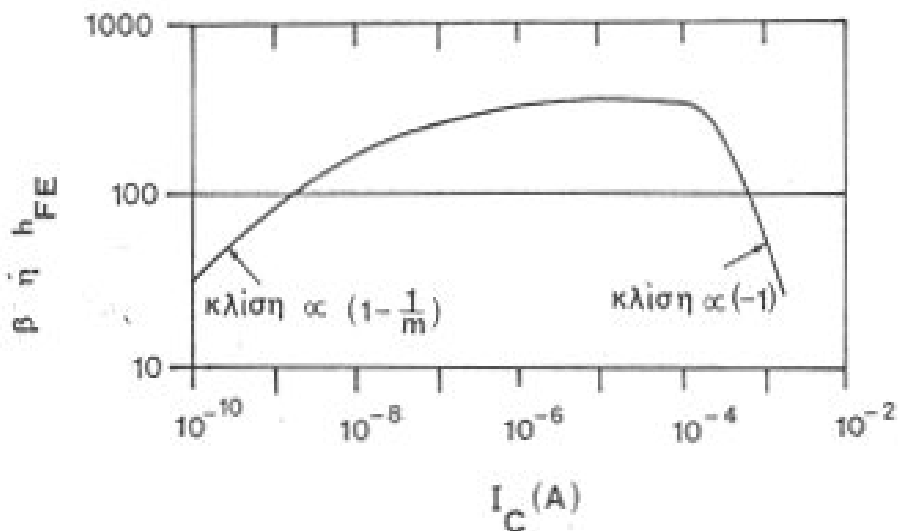
$$a_T = 1 - \frac{w^2}{2L_h^2} \text{ για } w < 0,1L_h \Rightarrow a_T > 0,995 \Rightarrow a_T \approx 1 \Rightarrow$$

$$\beta = h_{FE} = \frac{\gamma}{1-\gamma} \approx \left( \frac{p_{n0}}{n_{p0E}} \right) \cdot \left( \frac{1}{w} \right) \approx \left( \frac{N_{aE}}{N_{dB}} \right) \cdot \left( \frac{1}{w} \right)$$

## Εξάρτηση του $\beta$ από το $I_C$

Σύμφωνα με τη σχέση  $\alpha = \gamma \alpha_T$  το κέρδος ρεύματος  $\alpha$  είναι ανεξάρτητο από την πυκνότητα ρεύματος στον ακροδέκτη του εκπομπού, γιατί θεωρήσαμε ότι οι επαφές εκπομπού και συλλέκτη του τρανζίστορ είναι ιδανικές. Στην πράξη όμως το κέρδος ρεύματος εξαρτάται από την τιμή του συνεχούς ρεύματος  $I_E$  και τελικά από το  $I_C$

1. Για μικρό  $I_C$  κυριαρχεί το ρεύμα γένεσης-ανασύζευξης στην περιοχή άντλησης της επαφής εκπομπού και επιφανειακές διαρροές
2. κυριαρχεί το χρήσιμο ρεύμα διάχυσης της περίσσειας των φορέων μειοψηφίας κατά μήκος της βάσης
3. Συνθήκη ισχυρής έγχυσης φορέων, η συγκέντρωση της εγχέομενης περίσσειας των φορέων μειοψηφίας στη βάση πλησιάζει τη συγκέντρωση των φορέων πλειοψηφίας, οπότε οι εγχέομενοι φορείς αυξάνουν "στην ουσία" τη συγκέντρωση των προσμίξεων στη βάση, προκαλείται μείωση του συντελεστή απόδοσης του εκπομπού  $\gamma$ , οπότε μειώνεται το κέρδος ρεύματος  $\beta$ . **Η μείωση του  $\beta$  με την αύξηση του  $I_C$  είναι γνωστή σαν φαινόμενο του Webster**



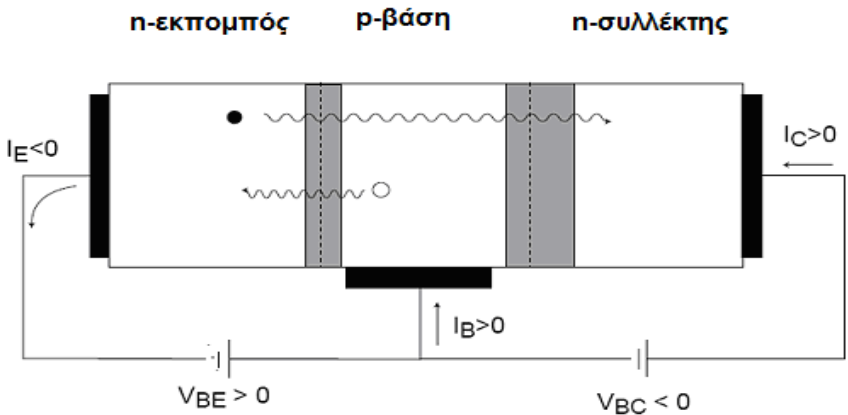


## ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΝΡΝ

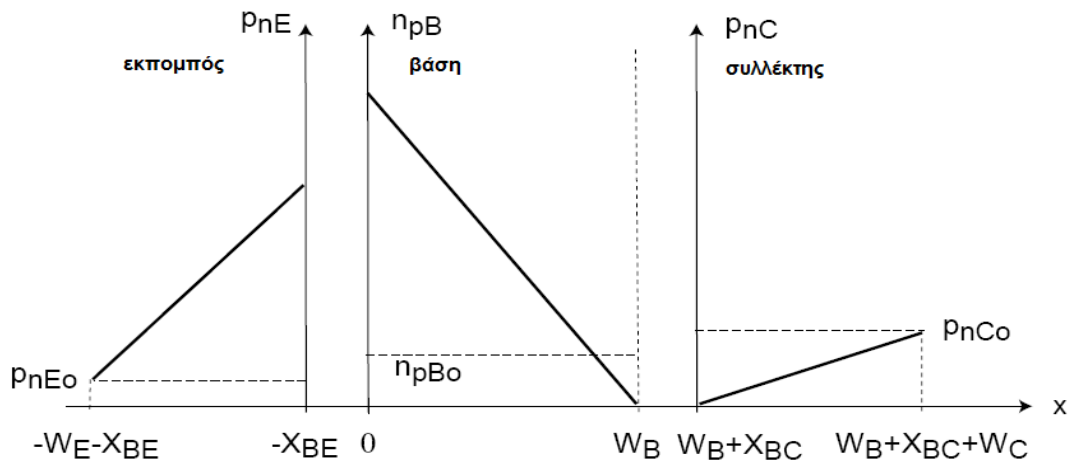


- **Κανονική ή ενεργός περιοχή (forward active):** επαφή B-E ορθά πολωμένη, επαφή B-C ανάστροφα πολωμένη, το τρανζίστορ παρουσιάζει υψηλό κέρδος ρεύματος (καλός ενισχυτής), πολύ χρήσιμη περιοχή
- **Κορεσμός (saturation):** και οι δύο επαφές ορθά πολωμένες ( $V_{CE} \approx V_{CE(SAT)}=0,1$  ή  $0,2V$ ), και το τρανζίστορ φαίνεται σαν ένας κλειστός διακόπτης. Στη βάση του συσσωρεύονται φορείς μειοψηφίας, οπότε απαιτείται αρκετός χρόνος για να βγεί από τον κορεσμό  
Το όριο μεταξύ περιοχής κορεσμού και ενεργούς περιοχής :  
 $V_{CE} \approx V_{CE(SAT)}=0,1$  ή  $0,2V$  και  $I_B > 0$
- **Αντίστροφη περιοχή:** επαφή B-E ανάστροφα πολωμένη, επαφή B-C ορθά πολωμένη,  $V_{BC}=0,7V$ ,  $V_{CE} < 0$ ) το τρανζίστορ έχει μικρό κέρδος ρεύματος (κακός ενισχυτής), δεν είναι χρήσιμη περιοχή
- **Αποκοπή (cut-off):** =Αμελητέο ρεύμα, σχεδόν ανοικτό κύκλωμα (ανοικτός διακόπτης), χρήσιμη περιοχή

**Ενεργός (forward active) ή κανονική περιοχή  $V_{BE}>0, V_{BC}<0$  ( $V_{BE ON}=0,7V$ )**



**Κατανομές των φορέων μειοψηφίας**



Ο εκπομπός εγχέει ηλεκτρόνια στη βάση, ο συλλέκτης συλλέγει ηλεκτρόνια από τη βάση. Το ρεύμα εισέρχεται από το συλλέκτη, διασχίζει την στενή περιοχή της βάσης και εξέρχεται του εκπομπού. Το ρεύμα  $I_C$  έχει τη μορφή του ρεύματος μιας ιδανικής διόδου pn. Το  $I_s$  είναι το ρεύμα κόρου της επαφής E-B και είναι ανάλογο με την επιφάνεια της διατομής της ενεργού περιοχής της βάσης

$$I_C = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right]$$

Η βάση εγχέει οπές στον εκπομπό, που επανασυνδέονται με τα ηλεκτρόνια. Το ρεύμα βάσης διασχίζει την επαφή E-B

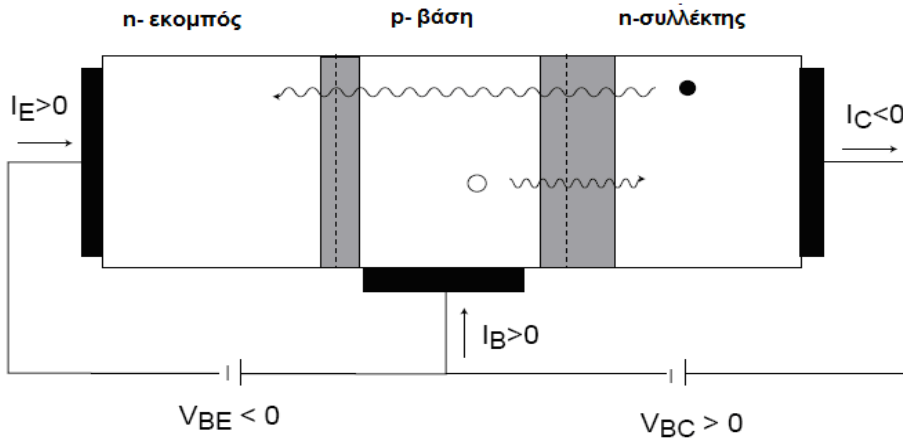
$$I_B = \frac{I_s}{\beta_F} \left[ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right]$$

Ρεύμα εκπομπού

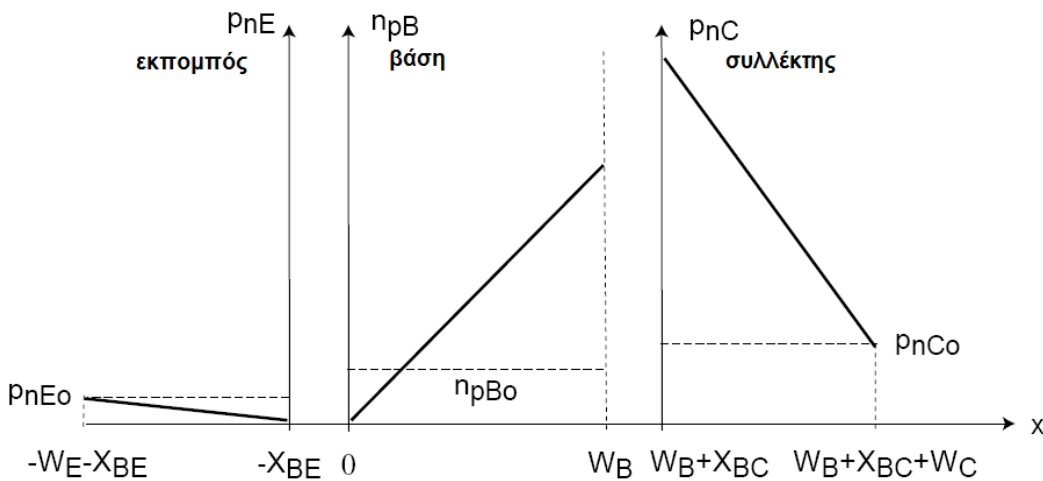
$$I_E = -I_C - I_B = -I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right] - \frac{I_s}{\beta_F} \left[ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right] = \frac{I_s}{a_F} \left[ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right]$$

- ✓ Υψηλής τεχνολογίας IC BJTs:  $I_C \approx 0,1-1 \text{ mA}$ ,  $\beta \approx 50-300$
- ✓  $\beta$ : δύσκολα ελέγχεται, σχεδιασμός τρανζίστορ με  $I_C$  μη ευαίσθητων σε μεταβολή του  $\beta$

## Αντίστροφη (reverse) περιοχή $V_{BE} < 0$ , $V_{BC} > 0$ ( $V_{BC} ON=0,5V$ , $V_{CE} < 0$ )



### Κατανομές των φορέων μειοψηφίας



Ο συλλέκτης εγγεί ηλεκτρόνια στη βάση, ο εκπομπός συλλέγει ηλεκτρόνια από τη βάση. Το ρεύμα εισέρχεται από τον εκπομπό, διασχίζει την στενή περιοχή της βάσης και εξέρχεται του συλλέκτη. Το  $I_E$  έχει τη μορφή του ρεύματος μιας ιδανικής διόδου pn. Το  $I_S$  είναι το ρεύμα κόρου της επαφής C-B και είναι ανάλογο με την επιφάνεια της διατομής της ενεργού περιοχής της βάσης

$$I_E = I_S \left[ \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right] = -I_R$$

Η βάση εγγεί οπές στο συλλέκτη όπου επανασυνδέονται με τα ηλεκτρόνια. Το ρεύμα βάσης διασχίζει την επαφή C-B

$$I_B = \frac{I_S}{\beta_R} \left[ \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right]$$

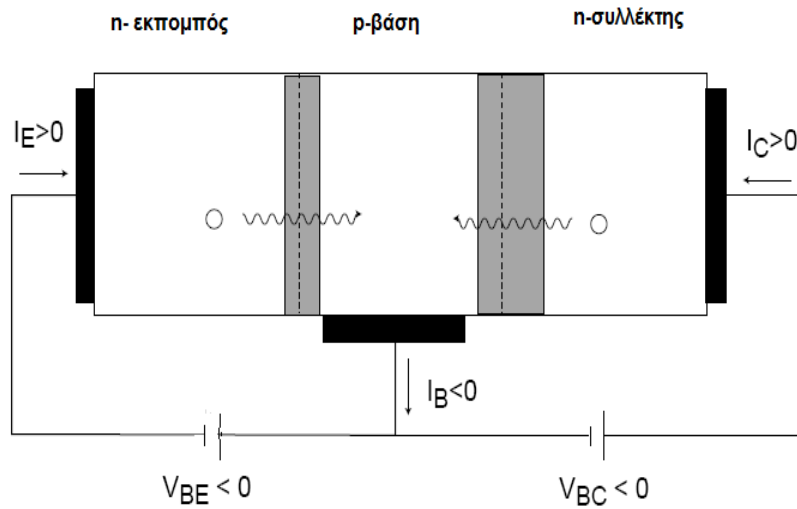
Ρεύμα συλλέκτη

$$I_C = -I_E - I_B = -I_S \left[ \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right] - \frac{I_S}{\beta_R} \left[ \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right]$$

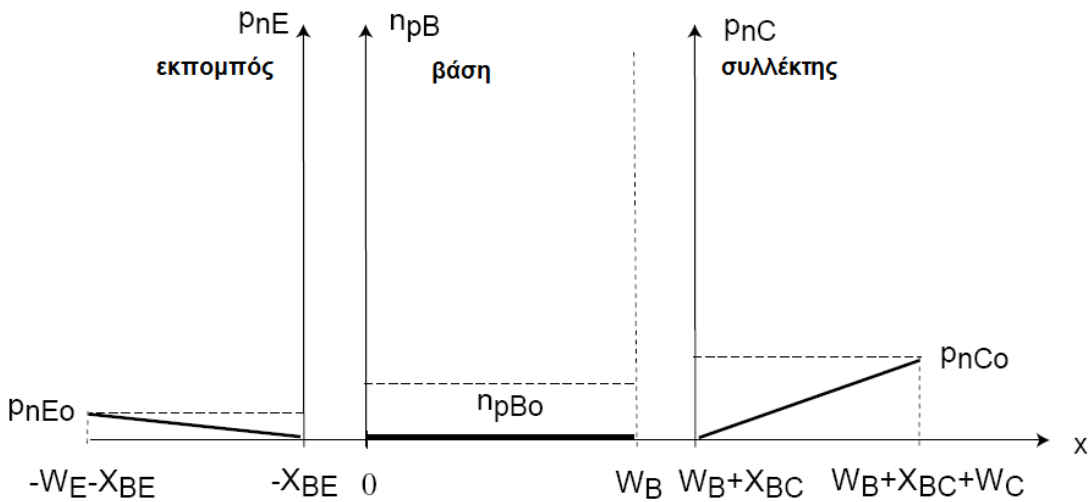
Μικρές τιμές για το κέρδος ρεύματος  $\beta_R$  για αντίστροφη πόλωση

Τυπικές τιμές του  $\beta_R \approx 0,1-5 \ll \beta_F$

- Αποκοπή (cut-off)  $V_{BE} < 0, V_{BC} < 0$



### Κατανομές των φορέων μειοψηφίας

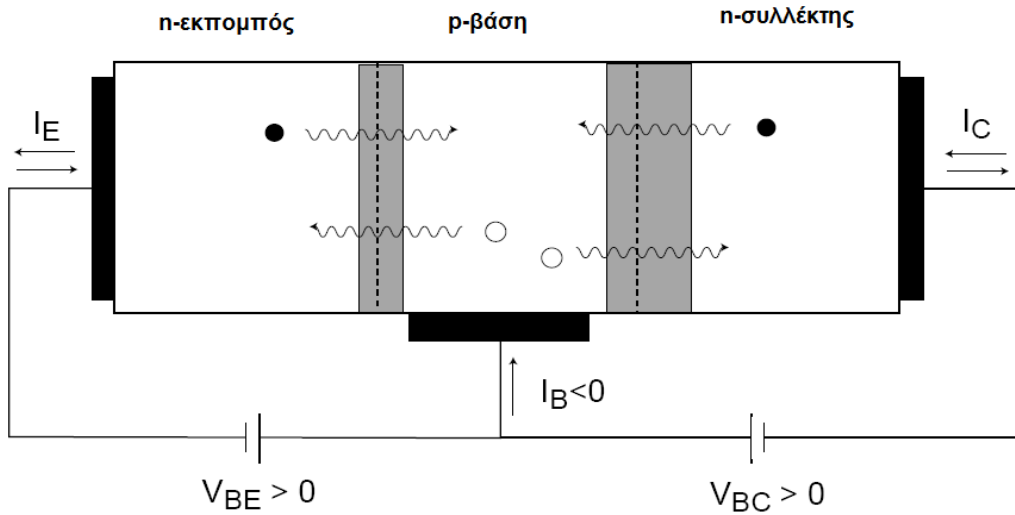


Τα ρεύματα στους ακροδέκτες  $-I_C$ ,  $I_E$  και  $I_B$  είναι όλα σταθερά και τυπικά είναι μικρότερα από το ρεύμα κορεσμού  $I_s$  του τρανζίστορ.

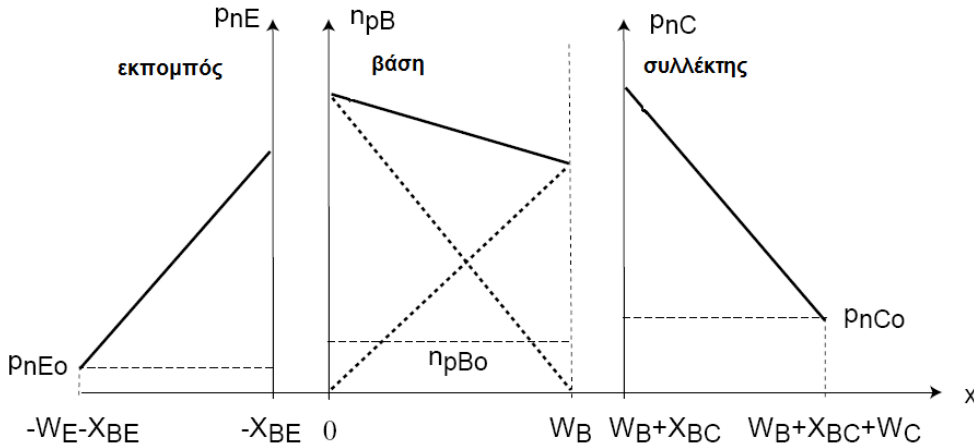
$$I_C = \frac{I_s}{\beta_R} \quad I_E = -\frac{I_s}{\beta_F} \quad I_B = -\frac{I_s}{\beta_F} - \frac{I_s}{\beta_R}$$

Στην αποκοπή μόνο πολύ μικρά ρεύματα διαρροής εμφανίζονται στους ακροδέκτες, που συνήθως είναι αμελητέα ( $\approx 10^{-12}$  A) και μπορούν να θεωρηθούν μηδενικά. Θεωρούμε ότι το τρανζίστορ είναι σε κατάσταση μη αγωγής (off). Η περιοχή αποκοπής αναπαριστά ένα ανοιχτό διακόπτη και συχνά χρησιμοποιείται σαν μία από τις δύο καταστάσεις που απαιτούνται στα λογικά κυκλώματα.

**Κορεσμός (saturation)  $V_{BE} > 0, V_{BC} > 0, (V_{CE sat.} = 0, 2V)$**



**Κατανομές των φορέων μειοψηφίας-**



Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων είναι θετική σε όλα τα σημεία της βάσης γιατί και οι δύο επαφές εγγέουν ηλεκτρόνια στη βάση. Τα συνεχή ρεύματα στους ακροδέκτες αναλύονται σε δύο συνιστώσες, κανονική + αντίστροφη συνιστώσα, δηλ. αντιστοιχούν στην κανονική λειτουργία και στην αντίστροφη λειτουργία του τρανζίστορ

$$I_C = I_S \left( \exp \frac{qV_{BE}}{kT} - \exp \frac{qV_{BC}}{kT} \right) - \frac{I_S}{\beta_R} \exp \left( \frac{qV_{BC}}{kT} - 1 \right)$$

$$I_B = \frac{I_S}{\beta_F} \left( \exp \frac{qV_{BE}}{kT} - 1 \right) + \frac{I_S}{\beta_R} \exp \left( \frac{qV_{BC}}{kT} - 1 \right)$$

$$I_E = -\frac{I_S}{\beta_F} \left( \exp \frac{qV_{BE}}{kT} - 1 \right) - I_S \left( \exp \frac{qV_{BE}}{kT} - \exp \frac{qV_{BC}}{kT} \right)$$

Το πρόσημο των  $I_C, I_E$  εξαρτάται από το σχετικό μέγεθος των  $V_{BE}, V_{BC}$   $\beta_F, \beta_R$ . Η διάταξη πλημμυρίζεται από φορείς μειοψηφίας, απαιτείται χρόνος για την κένωση αυτών

Τα  $I_C, I_B$  εξαρτώνται από το εξωτερικό κύκλωμα και όχι από την  $V_{CE}$  (κορεσμός στα 0, 1-0, 2V)

## Χαρακτηριστικές εισόδου και εξόδου σε σύνδεση κοινής βάσης (τρανζίστορ pnp)

Τα τέσσερα μεγέθη που καθορίζουν τη συμπεριφορά του τρανζίστορ είναι το ρεύμα εκπομπού  $I_E$ , το ρεύμα συλλέκτη  $I_C$ , η τάση εκπομπού - βάσης  $V_{EB}$ , και η τάση συλλέκτη - βάσης  $V_{CB}$ .

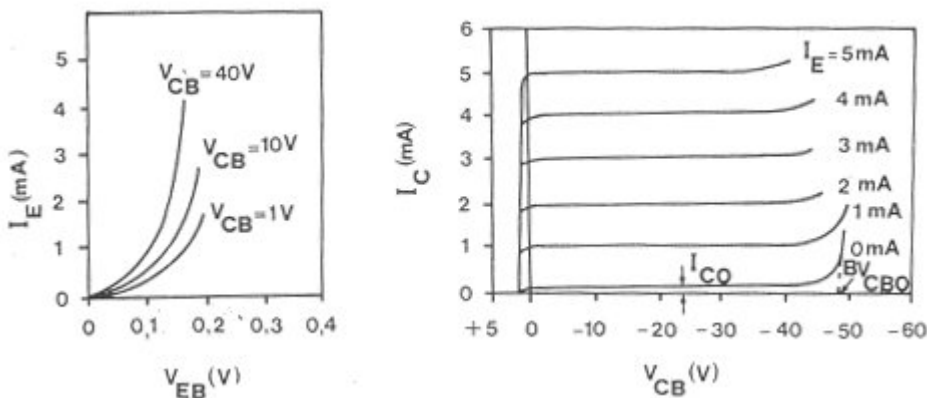
### Χαρακτηριστικές εισόδου $I_E=f(V_{EB})$ για σταθερό $V_{CB}$

εκφράζουν την εξάρτηση της έντασης  $I_E$  από την τάση  $V_{EB}$  σε μια επαφή p-n ορθά πολωμένη, όπου η συγκέντρωση  $p_n$  (για  $\chi=0$ ) στη βάση αυξάνει εκθετικά με την τάση  $V_{EB}$  (σχήμα α)

Η τάση αγωγής  $V_{EB}$  (τάση κατωφλίου), κάτω της οποίας το ρεύμα  $I_E$  είναι πολύ μικρό, είναι περίπου 0,7V για τρανζίστορ πυριτίου και 0,3V για τρανζίστορ γερμανίου.

Οι χαρακτηριστικές εισόδου εξαρτώνται από την τάση  $V_{CB}$  για δεδομένη  $V_{EB}$ , λόγω του **φαινομένου Early**.

**Φαινόμενο Early**, οφείλεται στη **διαμόρφωση του εύρους της βάσης  $w$**  από την τάση της ανάστροφα πολωμένης επαφής C-B. Ειδικότερα, η αύξηση της  $V_{CB}$  προκαλεί αύξηση της περιοχής άντλησης και ιδιαίτερα στην πλευρά της βάσης λόγω της μικρότερης συγκέντρωσης προσμίξεων. Μειώνεται το ενεργό εύρος της βάσης (σχήμα β επόμενης σελίδας), προκαλείται μια μικρή αύξηση στην κλίση συγκέντρωσης μειωνηφίας, και άρα μικρή αύξηση στο ρεύμα διάχυσης φορέων που είναι περίπου το ρεύμα εκπομπού.



### Χαρακτηριστικές εξόδου $I_C=f(V_{CB})$ για σταθερό $I_E$

#### Αποκοπή

Από το συλλέκτη δεν θα διέρχεται ρεύμα παρά μόνο το ελάχιστο ανάστροφο ρεύμα κόρου  $I_{CBO}$ , το οποίο είναι ένα από τα χαρακτηριστικά του κάθε τρανζίστορ και οι κατασκευαστές το δίνουν σαν ρεύμα μεταξύ συλλέκτη - βάσης όταν το κύκλωμα εκπομπού είναι ανοικτό (σχήμα στ).

$$I_{CBO} = I_{CO}$$

#### Ενεργός ή γραμμική περιοχή

το ρεύμα που διαρρέει το συλλέκτη είναι

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

Η σχεδόν γραμμική εξάρτηση του ρεύματος εξόδου από το ρεύμα εισόδου σημαίνει τη λειτουργία του τρανζίστορ σαν γραμμική διάταξη μέσα σ' αυτή την περιοχή.

Υπάρχει μια μικρή ανοδική κλίση στο  $I_C$  από την τάση  $V_{CB}$ , λόγω του **φαινομένου Early**. Σύμφωνα μ' αυτό το φαινόμενο η αύξηση της ανάστροφης τάσης της επαφής του συλλέκτη προκαλεί μικρή αύξηση του  $\alpha$  άρα και του ρεύματος  $I_C$ .

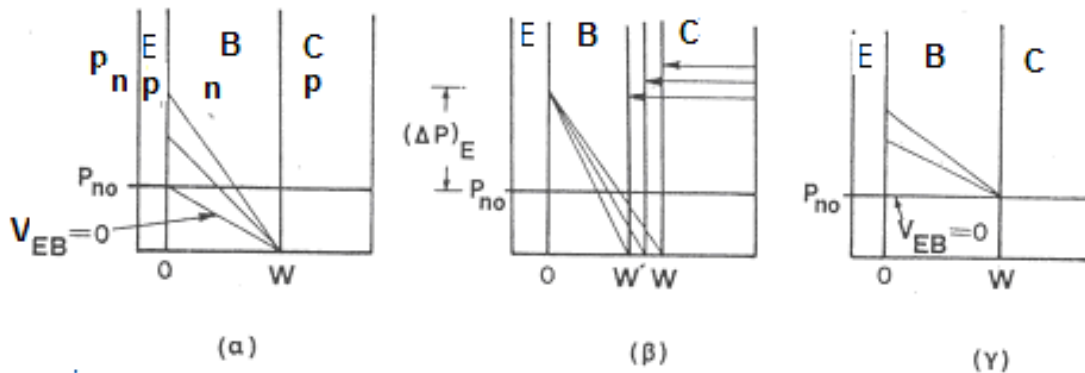
**Κορεσμός**

Το ρεύμα συλλέκτη μηδενίζεται  $I_C = 0$ , όταν  $V_{CBsat} \approx 1V$ , η συγκέντρωση των οπών στη θέση  $x=0$  είναι ίση με αυτή στη θέση  $x=w$ , δηλ. έχουμε μηδενική κλίση συγκέντρωσης στη βάση (σχήμα δ)

**Διάτρηση**

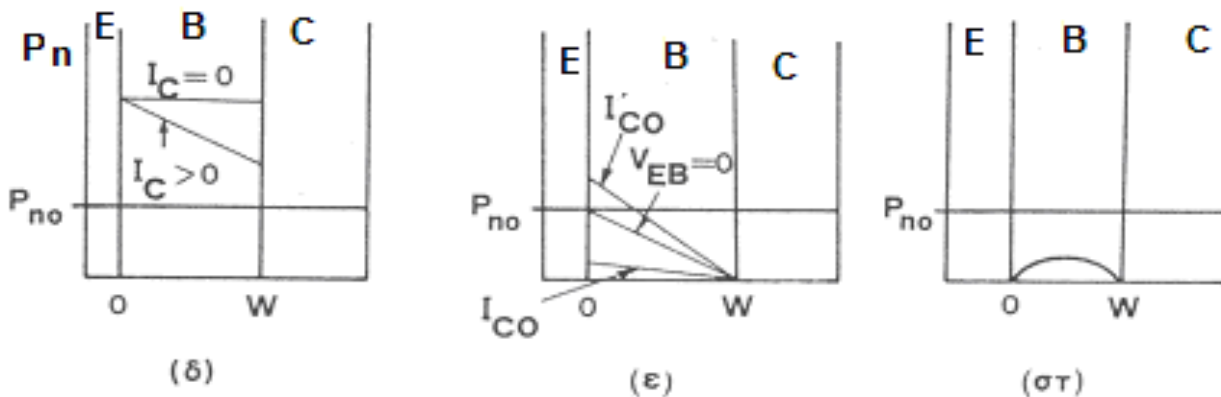
1. Αν η  $V_{CB}$  φθάσει τη χαρακτηριστική τιμή  $BV_{CB0}$ , τάση διάτρησης με ανοικτό εκπομπό, το ρεύμα αυξάνει απότομα λόγω διάτρησης της επαφής συλλέκτη με το φαινόμενο χιονοστιβάδας.
2. Αν το εύρος  $W$  της βάσης είναι πολύ μικρό, όταν αυξηθεί η  $V_{CB}$ , οι επαφές συλλέκτη και εκπομπού θα έλθουν κοντά (θα βραχυκυκλώσουν), οπότε έχουμε το φαινόμενο της γρονθοδιάτρησης (punchthrough)

Παρακάτω δίνονται η κατανομή της συγκέντρωσης των φορέων μειοψηφίας στη βάση για διάφορες συνθήκες λειτουργίας που ήδη περιγράψαμε.



**Κατανομή της συγκέντρωσης της περίσσειας των φορέων μειοψηφίας  $p_n$  στην βάση (είναι η περιοχή από 0 έως  $W$  στα σχήματα) για διάφορες συνθήκες πόλωσης.**

- α)** κανονικές πολικότητες:  $V_{CB} = \text{σταθερή}$ ,  $V_{EB} = \text{μεταβλητή}$  (εκθετική εξάρτηση της συγκέντρωσης  $p_n$  από την ορθή τάση  $V_{EB}$  στην θέση  $x=0$ ), **β)** κανονικές πολικότητες:  $V_{EB} = \text{σταθερή}$ ,  $V_{CB} = \text{μεταβλητή}$  (διαμόρφωση του εύρους της βάσης  $w$  -φαινόμενο Early), **γ)**  $V_{EB} > 0$ ,  $V_{CB} = 0$



- δ)**  $V_{EB} > 0$ ,  $V_{CB} > 0$   $I_C = 0$ ,  $V_{CB} = 1V$  (περιοχή κορεσμού), **ε)** ακροδέκτης εκπομπού ανοιχτός, ανάστροφο ρεύμα  $I_{CO} = I_{CBO}$  ακροδέκτης βάσης ανοιχτός, ανάστροφο ρεύμα  $I'_{CO} = I_{CBO}$

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

- στ)** και οι δύο επαφές ανάστροφα πολωμένες (Περιοχή αποκοπής)

## Χαρακτηριστικές εισόδου και εξόδου τρανζίστορ σε σύνδεση κοινού εκπομπού με παράμετρο το $I_B$

### Χαρακτηριστικές εισόδου $I_B=f(V_{BE})$ για σταθερό $V_{CE}$

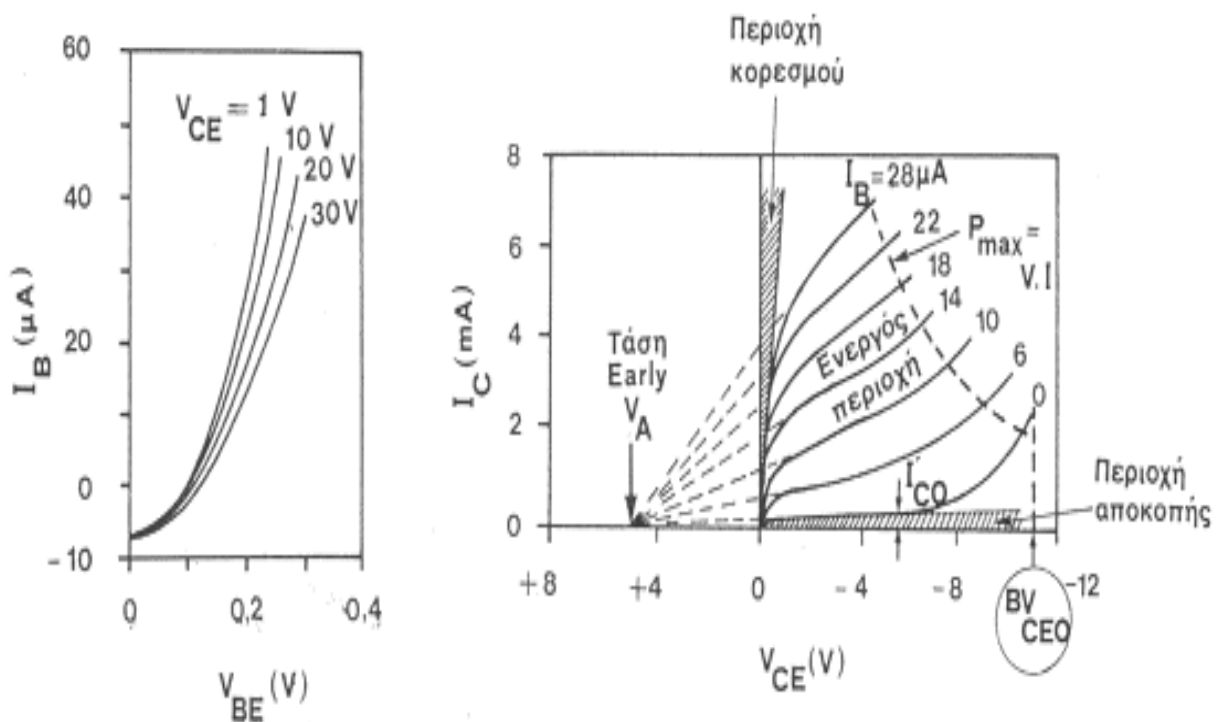
Το ρεύμα βάσης  $I_B$  δίνεται από τη σχέση:

$$I_B = I_E - I_C = I_E - (I_{CO} + \alpha I_E) = (1 - \alpha)I_E - I_{CO}$$

Και αποτελείται από δύο συνιστώσες :

1. Το ρεύμα  $(1 - \alpha)I_E$  : οφείλεται στη ροή ηλεκτρονίων από τη βάση για να αναπληρώσουν τα ηλεκτρόνια που χάθηκαν εξαιτίας της ανασύζευξής τους με τις εγγεόμενες οπές και αυτά που έχουν έγχυθεί στον εκπομπού
2. το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού  $I'_{CO}$  ή  $I_{CEO}$  της επαφής συλλέκτη με τη βάση ανοικτή ( $I_B = 0$ ), και ορίζεται σαν

$I'_{CO} = I_{CB0}/1 - \alpha = \beta \cdot I_{CB0}$ , όπου  $I_{CB0}$  το ρεύμα κορεσμού για σύνδεση κοινής βάσης με τον εκπομπού ανοικτό



### Χαρακτηριστικές εξόδου $I_C=f(V_{CE})$ για σταθερό $I_B$

διακρίνονται οι περιοχές λειτουργίας:

1. περιοχή κόρου (saturation), οι δύο επαφές είναι ορθά πολωμένες
2. περιοχή αποκοπής (cut-off), οι δύο επαφές είναι ανάστροφα πολωμένες
3. ενεργός περιοχή γραμμικής λειτουργίας, η επαφή E-B είναι ορθά πολωμένη, ενώ η επαφή C-B είναι ανάστροφα πολωμένη ( $V_{BE} \approx 0,7V$  για το πυρίτιο,  $0,2-0,3V$  για το γερμάνιο)



### Ενεργός ή γραμμική περιοχή

Το ρεύμα του συλλέκτη είναι  $I_C = \beta I_B + (\beta+1)I_{CO}$

Επειδή  $I_B \gg I_{CO}$ , η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί κατά προσέγγιση

$$I_C \cong \beta I_B$$

εκφράζει τη γραμμική εξάρτηση ανάμεσα σε είσοδο  $I_B$  και έξοδο  $I_C$ .

το ρεύμα  $I_C$  δεν εξαρτάται από την τάση  $V_{CE}$ , και επομένως αναμένεται οι καμπύλες I-V να είναι ευθείες οριζόντιες. Στην πραγματικότητα υπάρχει μια μικρή κλίση προς τα πάνω λόγω του **φαινομένου Early**: με την αύξηση της  $V_{CE}$  αυξάνει το εύρος της περιοχής άντλησης της επαφής συλλέκτη από τη μεριά της βάσης, μειώνεται η ουδέτερη περιοχή της βάσης  $w$ , οπότε αυξάνει το ρεύμα  $I_E$  και μειώνεται σε μικρό βαθμό το  $I_B$ , άρα αυξάνει το  $\alpha$ , όπως το  $\beta$  και το  $I_C$

- ✓ Λόγω του **φαινομένου Early** η αντίσταση εξόδου είναι μικρότερη από ότι στην σύνδεση κοινής βάσης.

### Περιοχή αποκοπής: $I_B=0$ ,

Το ρεύμα συλλέκτη είναι πάρα πολύ μικρό, σχεδόν αμελητέο σε σχέση με τις τιμές των άλλων ρευμάτων. Οι κατασκευαστές δίνουν σαν χαρακτηριστικό του κάθε τρανζίστορ το ρεύμα μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού όταν το κύκλωμα της βάσης είναι ανοικτό ( $I_{CEO}$ )

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

Σε οποιαδήποτε τάση η αντίσταση που εμφανίζεται ανάμεσα στους ακροδέκτες C και E είναι πάρα πολύ μεγάλη γεγονός που καθιστά το τρανζίστορ ισοδύναμο με ανοικτό διακόπτη.

### Κορεσμός:

Επαφές βάσης-εκπομπού και συλλέκτη-βάσης ορθά πολωμένες για οποιαδήποτε τιμή της παραμέτρου  $I_B$ , η τάση  $V_{CE}$  διατηρείται περίπου σταθερή και άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ενιαία τιμή, που λέγεται **τάση κόρου**  $V_{EC(SAT)}$  που παίρνει τιμές 0.2V περίπου για το Si και 0.1V για το Ge.

$$(V_{EC} = V_{BE, ON} - V_{BC} \approx 0,2V, \quad V_{BE, ON} = 0,7V)$$

Η αντίσταση εξόδου είναι πολύ μικρή και το τρανζίστορ δρα ως "κλειστός διακόπτης"

Τα ρεύματα  $I_B$ ,  $I_C$  εξαρτώνται από το εξωτερικό κύκλωμα

### Τάση διάτρησης

Η τάση διάτρησης της ανάστροφα πολωμένης επαφής συλλέκτη κατά το φαινόμενο της χιονοστιβάδας είναι:

$$BV_{CE0} = E_{\max} \cdot \frac{W_{CE}}{2} \text{ και έχει μικρότερη τιμή από την } BV_{CB0}.$$

### **Χρήση του τρανζίστορ**

Ενισχυτής: ενεργός περιοχή ή γραμμική

Διακόπτης: το τρανζίστορ σαν διακόπτης που θα ελέγχεται από το ρεύμα  $I_B$  εφ' όσον είναι δυνατό το τρανζίστορ να μετάγεται από την περιοχή κόρου στην περιοχή αποκοπής και αντίστροφα

### Περιοχές λειτουργίας τρανζίστορ ηρη κοινού εκπομπού

| περιοχή                                   | Επαφή ΒΕ              | Επαφή ΒC              | Ρεύματα $I_B$ ,  | παρατηρήσεις  |
|---|-----------------------|-----------------------|--|---|
| ενεργή<br>forward active                  | ορθά πολωμένη         | ανάστροφα<br>πολωμένη | $I_C = \beta_F I_B$  | $\beta_F$ : συντελεστής κέρδους<br>ρεύματος   |
| αποκοπή<br>(cutoff)                       | ανάστροφα<br>πολωμένη | ανάστροφα<br>πολωμένη | $I_B = 0,$<br>$I_C = I_{CEO}$  | $I_{CEO}$ : ανάστροφο<br>ρεύμα κορεσμού<br>συλλέκτη                                 |
| κορεσμός<br>saturation                    | ορθά πολωμένη         | ορθά πολωμένη         | $I_C < \beta_F I_B$<br><br>$I_B \geq I_{CS} / \beta_F =$<br>$V_{CC} - V_{CEs} / \beta_F$ | Τάση μεταξύ<br>συλλέκτη και εκπομπού<br>$V_{CE} \approx 0,2V$ ή<br>και χαμηλότερη   |
| αντίστροφη<br>λειτουργία<br>reversed mode | ανάστροφα<br>πολωμένη | ορθά πολωμένη         | $I_E = \beta_R I_B$  | $\beta_R$ : συντελεστής κέρδους<br>αντίστροφης λειτουργίας<br>$\beta_R \ll \beta_F$ |

### Κυκλωματικό πρότυπο ισχυρού σήματος Ebers-Moll του BJT (Bipolar Junction Transistor)

Το κυκλωματικό πρότυπο Ebers-Moll μοντελοποιεί το τρανζίστορ βάση της αρχής: μπορεί να θεωρηθεί ένα ζευγάρι από ιδανικές επαφές ηρη που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους

- ισχύει και για τους τέσσερις τρόπους λειτουργίας του τρανζίστορ

οι εξισώσεις του χρησιμοποιούν το ρεύμα που διαρρέει κάθε μία από τις δύο διόδους (εκπομπού, συλλέκτη). Περιγράφουν δηλαδή τα ρεύματα  $I_E, I_C$  σε σχέση με τις τάσεις των διόδων του εκπομπού,  $V_{EB}$  και του συλλέκτη  $V_{CB}$

#### Εξισώσεις Ebers-Moll ( σύμβολα N και I: N $\equiv$ Normal, I $\equiv$ Inverted modes)

$$I_E = I_{EN} + I_{EI} = I_{ES} \left( \exp \frac{qV_{EB}}{kT} - 1 \right) - a_R I_{CS} \left( \exp \frac{qV_{CB}}{kT} - 1 \right)$$

$$I_C = I_{CN} + I_{CI} = -a_F I_{ES} \left( \exp \frac{qV_{EB}}{kT} - 1 \right) + I_{CS} \left( \exp \frac{qV_{CB}}{kT} - 1 \right)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις Ebers-Moll ισχύουν για το τρανζίστορ επαφών ηρη. Ισχύουν και για το τρανζίστορ ηρη αλλάζοντας στα ρεύματα τα πρόσημα

- $I_{ES}$  ανάστροφο ρεύμα κορεσμού της επαφής εκπομπού-βάσης όταν η επαφή συλλέκτη-βάσης είναι βραχυκυκλωμένη,  $a_F$  κέρδος ρεύματος για σύνδεση κοινής βάσης στον ενεργό τρόπο λειτουργίας
- $I_{CS}$  ανάστροφο ρεύμα κορεσμού της επαφής συλλέκτη-βάσης όταν η επαφή εκπομπού-βάσης είναι βραχυκυκλωμένη,  $a_R$  κέρδος ρεύματος για σύνδεση κοινής βάσης στον αντίστροφο τρόπο λειτουργίας

- ✓ τα ρεύματα  $I_{EI}, I_{CI}$  είναι αρνητικά γιατί αναφέρονται σε ροή οπών αντίθετη στις αρχικές συμβάσεις για τα ρεύματα  $I_E, I_C$

✓ Τα  $I_{ES}$ ,  $I_{CS}$ ,  $a_F$ ,  $a_R$  εξαρτώνται από τους συντελεστές διάχυσης, τα μήκη διάχυσης, τις συγκεντρώσεις των φορέων μειοψηφίας στην κατάσταση ισορροπίας και από το εμβαδόν και το εύρος της ουδέτερης περιοχής της βάσης.

Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να γραφτούν:

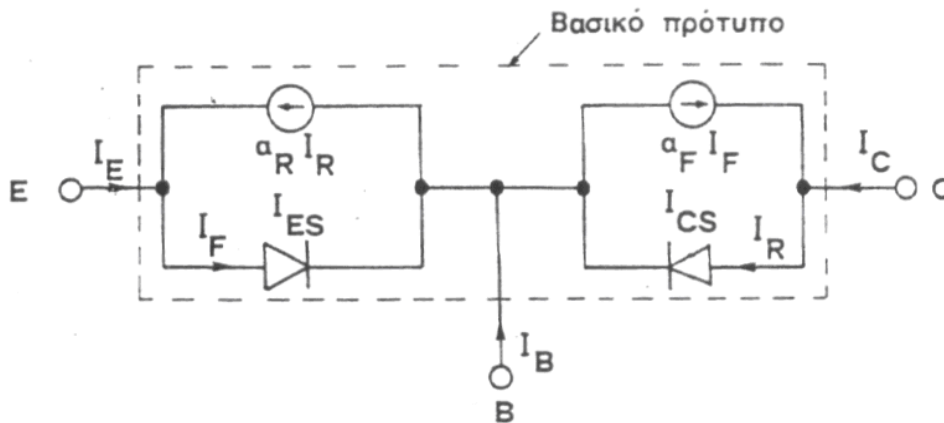
$$I_E = I_F - a_R I_R, \quad \text{όπου } I_F = I_{ES} \left( \exp \frac{qV_{EB}}{kT} - 1 \right) \text{ δίοδος με } I_s = I_{ES}$$

$$I_C = -a_F I_F + I_R, \quad \text{όπου } I_R = I_{CS} \left( \exp \frac{qV_{CB}}{kT} - 1 \right) \text{ δίοδος με } I_s = I_{CS}$$

Το μοντέλο Ebers-Moll έχει 4 παραμέτρους  $a_F$ ,  $I_{ES}$ ,  $a_R$ ,  $I_{CS}$  που συνδέονται με τη σχέση αντιστρεπτότητας:

$$a_R I_{CS} = a_F I_{ES}$$

Το σύστημα των εξισώσεων Ebers-Moll που περιγράφει τις στατικές χαρακτηριστικές ή χαρακτηριστικές ισχυρού σήματος του εξιδανικευμένου αμφιπολικού τρανζίστορ παραστένεται με το βασικό κυκλωματικό πρότυπο που αποτελείται από δύο ιδανικές διόδους συνδεμένες σε αντίθεση και δύο εξαρτημένες γεννήτριες ρεύματος



α) Βασικό Κυκλωματικό πρότυπο Ebers-Moll για το τρανζίστορ επαφών npn,

Εξήγηση προτύπου: Τα ρεύματα στους ακροδέκτες εκπομπού και συλλέκτη αναλύονται σε δύο συνιστώσες: **1).** ρεύμα που περνάει **από την πρώτη ιδανική δίοδο** που οφείλεται στην έγχυση φορέων μειοψηφίας από την επαφή εκπομπού **2).** ρεύμα που δίνει **η πρώτη πηγή** που οφείλεται στην έγχυση φορέων μειοψηφίας από την επαφή συλλέκτη και στη μεταφορά αυτών κατά μήκος της βάσης στην επαφή εκπομπού όπου συλλέγονται

Είναι χρήσιμο συχνά να συνδέονται τα ρεύματα στον ακροδέκτη εκπομπού και στον ακροδέκτη συλλέκτη μεταξύ τους καθώς και με τα ανάστροφα ρεύματα κορεσμού  $I_{EO}$  (με ανοικτό τον ακροδέκτη συλλέκτη),  $I_{CO}$  (με ανοικτό τον ακροδέκτη εκπομπού). Οι εξισώσεις Ebers-Moll έχουν τη μορφή:

$$I_E = I_{EN} + I_{EI} = I_{EO} \left( \exp \frac{qV_{EB}}{kT} - 1 \right) - a_R I_C$$

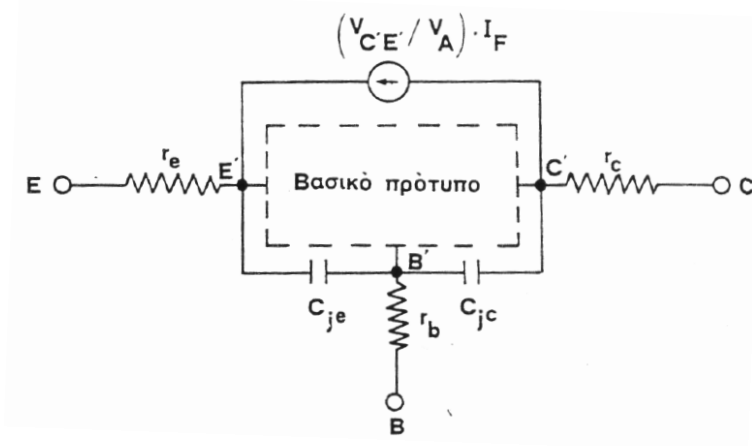
$$I_C = I_{CN} + I_{CI} = -a_F I_E + I_{CO} \left( \exp \frac{qV_{CB}}{kT} - 1 \right)$$

Τα ρεύματα  $I_{ES}$  και  $I_{CS}$  συνδέονται με τα  $I_{EO}$ ,  $I_{CO}$  αντίστοιχα με τις παρακάτω σχέσεις

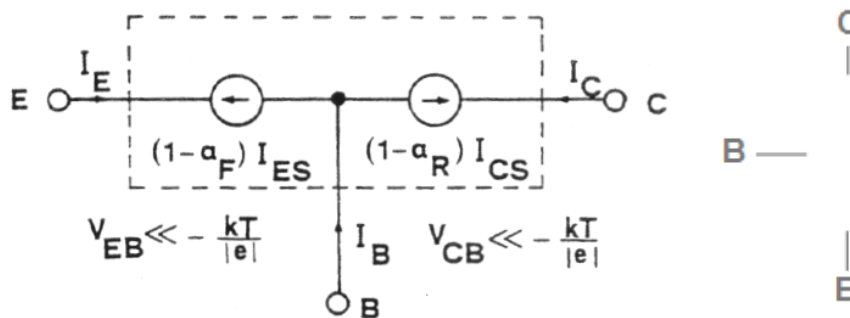
$$I_{ES} = \frac{I_{EO}}{1 - a_F a_R} \quad I_{CS} = \frac{I_{CO}}{1 - a_F a_R}$$

**Κυκλωματικό πρότυπο Ebers-Moll για το τρανζίστορ επαφών pnp που περιλαμβάνει επιπλέον:**

- τις αντιστάσεις σε σειρά που σχετίζονται με τις ουδέτερες περιοχές εκπομπού, βάσης και συλλέκτη
- τις χωρητικότητες που σχετίζονται με τις περιοχές άντλησης των επαφών εκπομπού και συλλέκτη
- μια επιπλέον γεννήτρια ρεύματος εξαιτίας του φαινομένου του Early, εισάγει την τάση Early  $V_A$  για να μοντελοποιήσει την αύξηση στο ρεύμα  $I_C$



Απλοποιημένο Ebers-Moll στην περιοχή αποκοπής

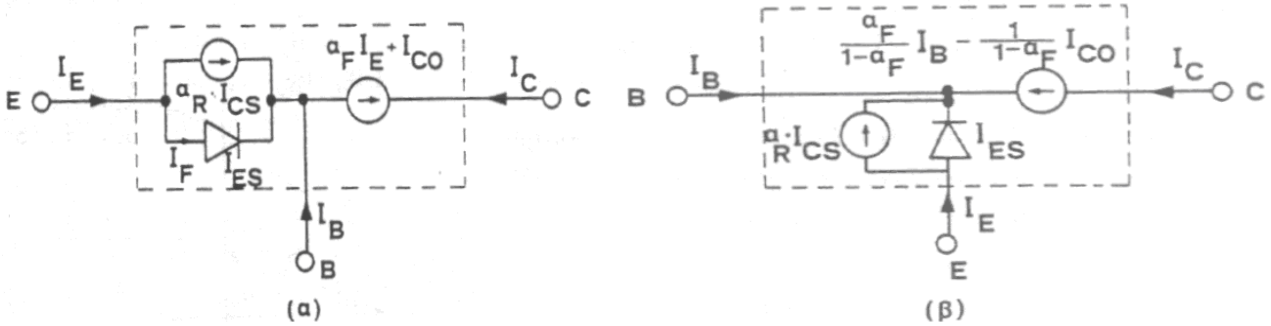


$$I_E = I_{ES} - a_R I_{CS} = (1 - a_F) I_{ES}$$

$$I_C = I_{CS} - a_F I_{ES} = (1 - a_R) I_{CS}$$

Τα ανάστροφα ρεύματα κορεσμού  $I_{ES}$ ,  $I_{CS}$  είναι μικρά και  $a_R$ ,  $a_F$  είναι σχεδόν ίσα με τη μονάδα, τα ρεύματα αυτά είναι αμελητέα και η περιοχή αποκοπής προσεγγίζεται με την κατάσταση off ενός ιδανικού διακόπτη

Απλοποιημένο Ebers-Moll στην κανονική περιοχή



Απλοποιημένο Ebers-Moll α) κοινής βάσης, β) κοινού εκπομπού

α) σύνδεση κοινής βάσης

$$I_E = I_{ES} \left( \exp \frac{qV_{EB}}{kT} - 1 \right) + a_R I_{CS}$$

$$I_C = -a_F I_{ES} \left( \exp \frac{qV_{EB}}{kT} - 1 \right) + I_{CS} + a_F a_R I_{CS} - a_F a_R I_{CS} = -(1 - a_F a_R) I_{CS} - a_F I_E \Rightarrow$$

$$I_C = I_{CO} + a_F I_E$$

$I_{CO}$  είναι το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού του συλλέκτη όταν ο εκπομπός είναι ανοιχτός

β) για σύνδεση κοινού εκπομπού παρόμοια προκύπτει

$$I_E = I_{ES} \left( \exp \frac{qV_{EB}}{kT} - 1 \right) + a_R I_{CS}$$

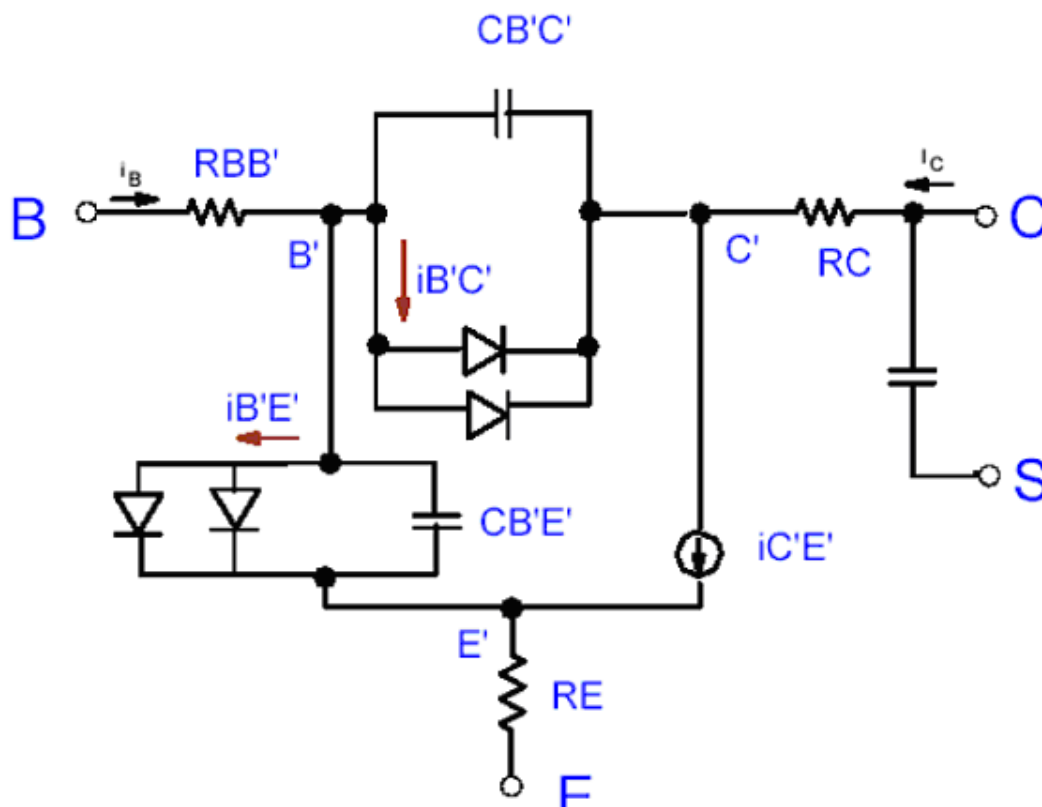
$$I_C = \beta I_E - \beta I_{CO}$$

## Μοντέλο εξομοίωσης διπολικού τρανζίστορ στο SPICE

Για την προσομοίωση του διπολικού τρανζίστορ, το SPICE χρησιμοποιεί μια πιο περιεκτική έκδοση του κλασσικού μοντέλου Gummel-Poon. Το μοντέλο αυτό αποτελεί μια προέκταση του μοντέλου Ebers-Moll, καθορίζοντας τις κατάλληλες παραμέτρους και περιλαμβάνει μια σειρά από φαινόμενα τα οποία δεν έχουν ληφθεί υπ' όψιν στο απλό μοντέλο Ebers-Moll.

### Μοντέλο Gummel-Poon

Το μοντέλο Ebers-Moll δεν λαμβάνει υπ' όψιν πολλά σημαντικά φαινόμενα δευτέρας τάξης που παρουσιάζονται στα πραγματικά τρανζίστορ. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι τα φαινόμενα του χαμηλού ρεύματος και του υψηλού επιπέδου έκχυσης. Το φαινόμενο χαμηλού ρεύματος οφείλεται στο πρόσθετο ρεύμα βάσης που προκύπτει από την επανασύνδεση φορέων, η οποία ελαττώνει την απολαβή ρεύματος ( $i_C/i_B$ ). Το φαινόμενο υψηλού επιπέδου έκχυσης επίσης ελαττώνει την απολαβή ρεύματος και επιπλέον προκαλεί αύξηση των χρόνων διέλευσης (transit time). Για την προσομοίωση του διπολικού τρανζίστορ, το SPICE χρησιμοποιεί το μοντέλο Gummel-Poon, το οποίο φαίνεται στο σχήμα και το οποίο λαμβάνει υπ' όψιν τα προαναφερθέντα φαινόμενα.



Το στατικό μοντέλο Gummel-Poon

### 2.1.3. Παράμετροι μοντέλου Gummel-Poon BJT :

|    | name | parameter   | units    | default  | example | area |
|----|------|---|----------|----------|---------|------|
| 1  | IS   | transport saturation current  | A        | 1.0e-16  | 1.0e-15 | *    |
| 2  | BF   | ideal maximum forward beta  | -        | 100      | 100     |      |
| 3  | NF   | forward current emission coefficient                                  | -        | 1.0      | 1       |      |
| 4  | VAF  | forward Early voltage   | V        | infinite | 200     |      |
| 5  | IKF  | corner for forward beta high current roll-off                         | A        | infinite | 0.01    | *    |
| 6  | ISE  | B-E leakage saturation current  | A        | 0        | 1.0e-13 | *    |
| 7  | NE   | B-E leakage emission coefficient                                      | -        | 1.5      | 2       |      |
| 8  | BR   | ideal maximum reverse beta  | -        | 1        | 0.1     |      |
| 9  | NR   | reverse current emission coefficient                                  | -        | 1        | 1       |      |
| 10 | VAR  | reverse Early voltage   | V        | infinite | 200     |      |
| 11 | IKR  | corner for reverse beta high current roll-off                         | A        | infinite | 0.01    | *    |
| 12 | ISC  | leakage saturation current  | A        | 0        |         | 8    |
| 13 | NC   | leakage emission coefficient  | -        | 2        | 1.5     |      |
| 14 | RB   | zero bias base resistance   | $\Omega$ | 0        | 100     | *    |
| 15 | IRB  | current where base resistance falls halfway to its min value          | A        | infinte  | 0.1     | *    |
| 16 | RBM  | minimum base resistance at high currents                              | $\Omega$ | RB       | 10      | *    |
| 17 | RE   | emitter resistance  | $\Omega$ | 0        | 1       | *    |
| 18 | RC   | collector resistance  | $\Omega$ | 0        | 10      | *    |
| 19 | CJE  | B-E zero-bias depletion capacitance                                   | F        | 0        | 2pF     | *    |
| 20 | VJE  | B-E built-in potential  | V        | 0.75     | 0.6     |      |
| 21 | MJE  | B-E junction exponential factor                                       | -        | 0.33     | 0.33    |      |
| 22 | TF   | ideal forward transit time  | sec      | 0        | 0.1ns   |      |
| 23 | XTF  | coefficient for bias dependence of TF                                 | -        | 0        |         |      |
| 24 | VTF  | voltage describing VBC dependence of TF                               | V        | infinite |         |      |
| 25 | ITF  | high-current parameter for effect on TF                               | A        | 0        |         | *    |
| 26 | PTF  | excess phase at freq=1.0/(TF*2PI) Hz                                  | deg      | 0        |         |      |
| 27 | CJC  | B-C zero-bias depletion capacitance                                   | F        | 0        | 2pF     | *    |
| 28 | VJC  | B-C built-in potential  | V        | 0.75     | 0.5     |      |
| 29 | MJC  | B-C junction exponential factor                                       | -        | 0.33     | 0.5     |      |
| 30 | XCJC | fraction of B-C depletion capacitance connected to internal base node | -        | 1        |         |      |
| 31 | TR   | ideal reverse transit time  | sec      | 0        | 10ns    |      |
| 32 | CJS  | zero-bias collector-substrate capacitance                             | F        | 0        | 2pF     | *    |
| 33 | VJS  | substrate junction built-in potential                                 | V        | 0.75     |         |      |
| 34 | MJS  | substrate junction exponential factor                                 | -        | 0        | 0.5     |      |
| 35 | XTB  | forward and reverse beta temperature exponent                         | -        | 0        |         |      |
| 36 | EG   | energy gap for temperature effect on IS                               | eV       | 1.11     |         |      |
| 37 | XTI  | temperature exponent for effect on IS                                 | -        | 3        |         |      |
| 38 | KF   | flicker-noise coefficient   | -        | 0        |         |      |
| 39 | AF   | flicker-noise exponent  | -        | 1        |         |      |
| 40 | FC   | coefficient for forward-bias depletion capacitance formula            | -        | 0.5      |         |      |
| 41 | TNOM | Parameter measurement temperature                                     | C        | 27       | 50      |      |

## Χρόνος διάβασης της βάσης

Για τη λειτουργία του τρανζίστορ σε ασθενές σήμα, ο χρόνος διάβασης της βάσης, η χρήσιμη συχνότητα λειτουργίας, η διακοπτική ταχύτητα και η χωρητικότητα –αντίσταση της ενεργού περιοχής της βάσης είναι σημαντικές παράμετροι. Ο χρόνος διάβασης της βάσης αντιπροσωπεύει τη σταθερά χρόνου που συσχετίζεται με την αποθήκευση φορτίου  $Q$  στη βάση και ορίζεται ως

$$\tau_F = \frac{Q_B}{I_C} \quad \text{όπου} \quad Q_B = -\int_0^{W_B} -qA_{BE}W_B n_{pB0} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) = \frac{1}{2} qA_{BE}W_B n_{pB0} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$

$$I_C = \frac{qA_{BE}D_{eB}n_{pB0}}{W_B} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ο χρόνος διάβασης

$$\tau_F = \frac{W_B^2}{2D_{eB}} = \frac{W_B^2}{2V_T\mu_e}$$

Ο χρόνος διάβασης θέτει ανώτατο όριο στη χρήσιμη συχνότητα λειτουργίας  $f_t$

$$f_t \leq \frac{1}{2\pi\tau_F}$$

1. Ένα τρανζίστορ ηρη είναι 2 μέχρι και 2,5 φορές ταχύτερο από το ηρη για δεδομένη γεωμετρία και συγκέντρωση προσμίξεων.

2. Επιθυμητή η ελάττωση του  $W_B$  της βάσης όσο περισσότερο είναι δυνατό.

## Χωρητικότητα φόρτισης της βάσης ή Χωρητικότητα διάχυσης

Για να μεταβληθεί η  $V_{BE}$  όπως και το  $I_C$  πρέπει να μεταβληθεί και το αποθηκευμένο φορτίο στη βάση. Η χωρητικότητα φόρτισης της βάσης (χωρητικότητα διάχυσης) στην ενεργό περιοχή λειτουργίας ορίζεται ως

$$C_{DB} = \left. \frac{dQ}{dv_{BE}} \right|_{\text{σημείο } Q} \cong \frac{I_C}{V_T} \tau_F$$

## Διαγωγιμότητα (transconductance)

Είναι μία σημαντική παράμετρος που σχετίζει τις μεταβολές στο  $I_C$  που προκαλούνται από τις μεταβολές στην  $v_{BE}$  και ορίζεται ως

$$g_m = \left. \frac{di_C}{dv_{BE}} \right|_{\text{σημείο } Q}$$

Για σημεία  $Q$  στην ενεργό περιοχή λειτουργίας χρησιμοποιώντας το ρεύμα του συλλέκτη προκύπτει:

$$g_m = \left. \frac{d}{dv_{BE}} \left[ I_s \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right) \right] \right|_{\text{σημείο } Q} = \frac{I_C}{V_T}$$

Η παραπάνω σχέση της διαγωγιμότητας δείχνει ότι είναι ανάλογη με το ρεύμα του συλλέκτη, οπότε αυτό χρησιμοποιείται στη σχεδίαση διπολικών κυκλωμάτων. Με βάση τη σχέση της διαγωγιμότητας η χωρητικότητα διάχυσης  $C_{DB}$  ορίζεται ως

$$C_{DB} = g_m \tau$$



## Το διπολικό τρανζίστορ επαφών ως διακόπτης

Το τρανζίστορ μπορεί να λειτουργεί σαν ηλεκτρονικός διακόπτης και να επιτρέπει ή όχι τη ροή ρεύματος στο κύκλωμα εξόδου (φορτίο), όταν λειτουργεί εναλλακτικά στον κόρο (κατάσταση on) και στην αποκοπή (κατάσταση off).

Ιδανικός διακόπτης:

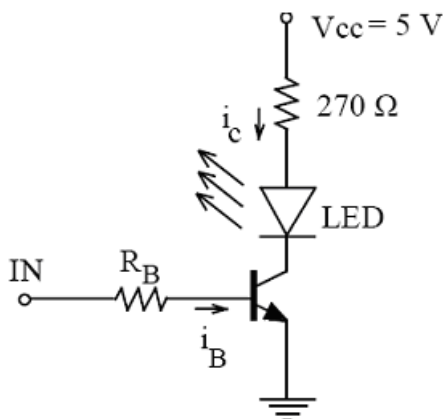
- σε κατάσταση αποκοπής δεν επιτρέπει τη ροή ρεύματος
- σε κατάσταση αγωγής έχει μηδενική τάση στα άκρα του
- ο χρόνος μετάβασης μεταξύ των δύο καταστάσεων είναι μηδενικός

Χαρακτηριστικά πραγματικών ηλεκτρονικών διακοπτών (διπολικά τρανζίστορ, τρανζίστορ MOSFET, Δίοδος pn κ.λ.π):

1. Ρεύμα διαρροής: ρεύμα που διαρρέει τον διακόπτη σε κατάσταση αποκοπής
2. Τάση αποκοπής: μέγιστη τάση που μπορεί να εφαρμοστεί στα άκρα του σε κατάσταση αποκοπής
3. Ρεύμα αγωγής: μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα του διακόπτη σε κατάσταση αγωγής
4. Τάση αγωγής: Πτώση τάσης στα άκρα του διακόπτη σε κατάσταση αγωγής
5. χρόνος μετάβασης οι χρόνοι για τη μετάβαση του διακόπτη από την κατάσταση αγωγής στην κατάσταση αποκοπής και το αντίστροφο

Πιο σημαντικές παράμετροι: κέρδος ρεύματος και χρόνος εναλλαγής του διακόπτη τρανζίστορ: είναι ο χρόνος μετάβασης από την κατάσταση on (κλειστός διακόπτης) στην κατάσταση off (ανοικτός διακόπτης)

Το διπολικό τρανζίστορ σαν διακόπτης χρησιμοποιείται συνήθως σε σύνδεση κοινού εκπομπού. Παρακάτω δίνεται παράδειγμα λειτουργίας τρανζίστορ npn ως διακόπτη.

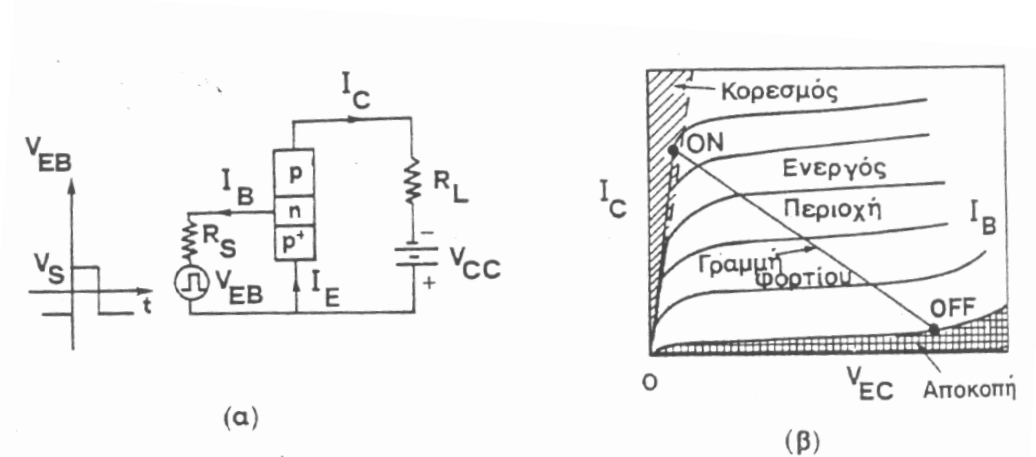


Κύκλωμα npn τρανζίστορ διακόπτη σε σύνδεση κοινού εκπομπού

όταν το  $I_B=0$ , το τρανζίστορ είναι σε αποκοπή και η LED (Light emitting diode) δεν φωτίζει. Αν δώσουμε κατάλληλη τάση στην είσοδο  $V_{IN}$ , το τρανζίστορ λειτουργεί στην περιοχή κόρου και η LED ανάβει. Η τάση  $V_{CE}$  στον κόρο είναι 0,2V.

## Μελέτη λειτουργίας του διακόπτη τρανζίστορ

Στο κύκλωμα ενός pnp τρανζίστορ διακόπτη, εφαρμόζεται τετραγωνικός παλμός (σχήμα α), τότε το ρεύμα του συλλέκτη θα μεταβληθεί στην προσπάθεια να ακολουθήσει τη διέγερση που προκαλεί ο παλμός.



α) Κύκλωμα pnp τρανζίστορ διακόπτη σε σύνδεση κοινού εκπομπού

β) λειτουργία τρανζίστορ κατά μήκος της γραμμής φορτίου από την περιοχή αποκοπής (off) όπου και οι δυο επαφές είναι ανάστροφα πολωμένες μέχρι να φτάσει στον κορεσμό (on) όπου και οι δυο επαφές είναι ορθά πολωμένες

$$\text{γραμμή φορτίου } V_{EC} = V_{CC} - I_C R_L$$

1. Αρχικά το ρεύμα του συλλέκτη είναι πολύ μικρό γιατί και η επαφή εκπομπού και η επαφή συλλέκτη είναι ανάστροφα πολωμένες, το τρανζίστορ είναι σε αποκοπή ;  $I_B=0, I_C=0, V_{EB}=0$ , αλλά  $V_{EC}=V_{CC}$  (υψηλή λογική στάθμη)
2. Αν το  $V_{EB}$  αυξηθεί στα 0,6V η επαφή εκπομπού πολώνεται ορθά, το τρανζίστορ βρίσκεται στο όριο αγωγής και τα  $I_B, I_C$  αρχίζουν να γίνονται μεγαλύτερα από το 0
3. όταν το  $V_{EB}$  φθάσει στα 0,7V το τρανζίστορ εισέρχεται στην ενεργή περιοχή :  $I_C=\beta \cdot I_B$
4. Περαιτέρω αύξηση του  $V_{EB}$  το τρανζίστορ βρίσκεται σε κορεσμό

## Χαρακτηριστικές διακόπτη-Χρόνοι μετάβασης on-off

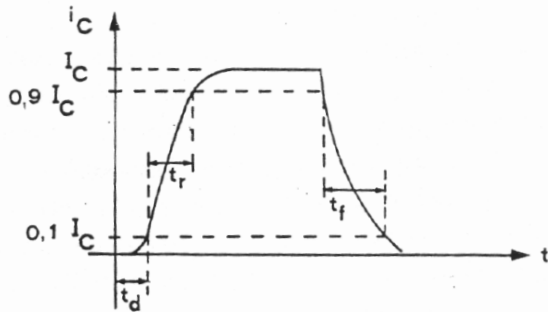
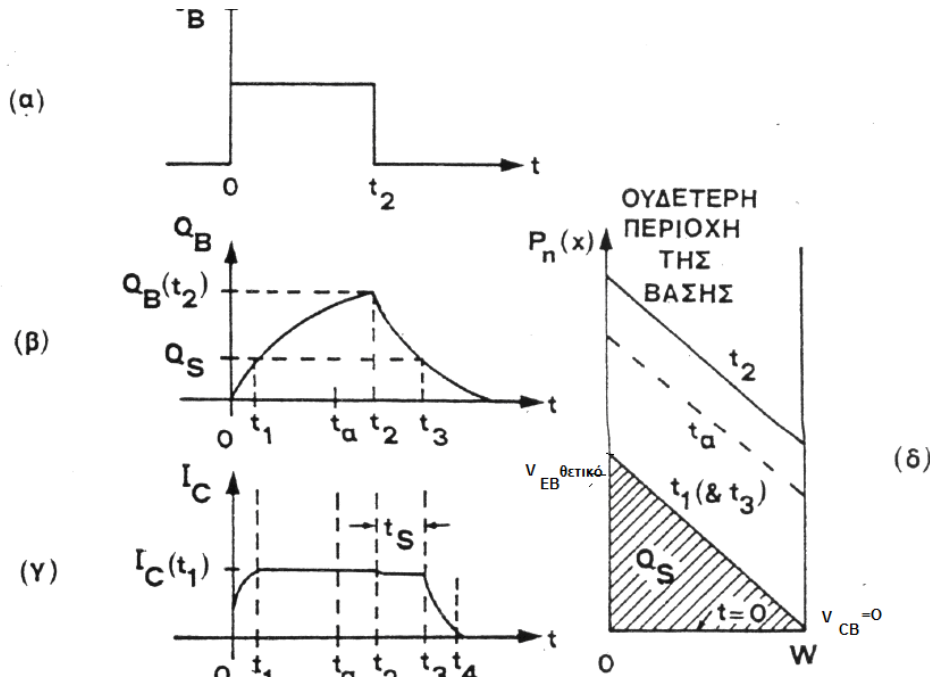
Από τη στιγμή που η τάση παλμού από  $V_L$  μεταπηδά σε  $V_H$  μέχρι τη στιγμή που το  $i_c$  φθάσει το 10% της μέγιστης τιμής του ( $i_{csat} \cong \frac{V_{CC}}{R_L}$ ), μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα που λέγεται

χρόνος καθυστέρησης  $t_d$  (delay time) και ο χρόνος που μεσολαβεί μέχρι το ρεύμα να φτάσει στο 90% της μέγιστης τιμής λέγεται χρόνος ανόδου  $t_r$  (rise time). Οι δύο χρόνοι μαζί αποτελούν το χρόνο ανοίγματος (turn-on time),  $t_{on}=t_d+t_r$

Από τη στιγμή που η τάση παλμού από  $V_H$  μεταπηδά σε  $V_L$  μεσολαβεί χρονικό διάστημα μέχρι το ρεύμα  $i_c$  να αρχίσει να ελαττώνεται για να φθάσει στο 90% της μέγιστης τιμής. Ο χρόνος αυτός  $t_s$  λέγεται χρόνος αποθήκευσης (storage time). Το χρονικό διάστημα που το  $i_c$  θα φτάσει στο 10% της μέγιστης τιμής λέγεται χρόνος καθόδου (fall time)  $t_f$ . Οι χρόνοι αποθήκευσης και καθόδου μαζί αποτελούν το χρόνο διακοπής  $t_{off}$  (turn-off time).

- **$t_d$ : χρόνος καθυστέρησης (delay time)**

οφείλεται στο χρόνο φόρτισης της χωρητικότητας της ανάστροφα πολωμένης επαφής B-E από φορείς μειοψηφίας, στο χρόνο που χρειάζεται για να διαβούν οι φορείς την περιοχή της βάσης και στο χρόνο που χρειάζεται για να αυξηθεί το  $i_C$  στο 10% της μέγιστης τιμής του.



- **Χρόνος ανόδου  $t_r$**

Για  $t_d \leq t \leq t_1$ , το ρεύμα βάσης προμηθεύει φορτίο στη βάση που αυξάνει την τάση της επαφής από σχεδόν αποκοπή σε σχεδόν κορεσμό ( $V_{CB}=0$ ). Η κλίση της περίσσειας φορέων μειοψηφίας αυξάνει, οπότε αυξάνει το ρεύμα του συλλέκτη. Ο χρόνος  $t_r = t_1$  (στο παραπάνω σχήμα) υπολογίζεται από τη σχέση που συνδέει το  $I_B$  με το ολικό φορτίο της περίσσειας φορέων μειοψηφίας στη βάση  $Q_B$

$$i_B = \frac{dQ_B(t)}{dt} + \frac{Q_B(t)}{\tau_h} \Rightarrow \frac{dQ_B(t)}{dt} = I_B - \frac{Q_B(t)}{\tau_h}, \text{ για } t \geq 0, I_B = \text{cons.}$$

Το φορτίο αυξάνει εκθετικά  $Q_B(t) = I_B \tau_h \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_h}\right) \right]$ , όπου  $Q_{B\max} = I_B \tau_h$

Ταυτόχρονα αυξάνει εκθετικά το  $i_C$  σύμφωνα με τη σχέση

$$i_C = \frac{Q_B(t)}{\tau_B} = \frac{I_B \tau_h}{\tau_B} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_h}\right) \right]$$

όπου  $\tau_B = \frac{W^2}{2D_h}$ ,  $\tau_B$  είναι ο χρόνος διάβασης της βάσης από την οπή

Θεωρούμε ότι η έναρξη κορεσμού είναι όταν  $V_{CB}=0$  και το φορτίο  $Q_B = Q_s$   
Επομένως ο **χρόνος ανόδου** είναι:

$$t_r = t_1 = \tau_h \ln\left(\frac{1}{1 - Q_s / I_B \tau_h}\right) \quad \text{με} \quad Q_s = \frac{V_{CC}}{R_L} \tau_B = I_C \cdot \tau_B \quad \text{και} \quad I_B = \frac{V_s}{R_s}$$

Για μικρό  $t_r$  απαιτείται μικρός χρόνος ζωής  $\tau_h$ , μικρό  $Q_s$  και μεγάλο  $I_B$

Για  $t_1 \leq t \leq t_2$ , το  $Q_B > Q_s$ , περιοχή κορεσμού (και οι δυο επαφές είναι ορθά πολωμένες το ρεύμα  $I_C$  είναι σταθερό (ίδια κλίση συγκέντρωσης)

• **χρόνος αποθήκευσης ή χρονική καθυστέρηση αποθήκευσης  $t_s$**

Για  $t_2$ ,  $I_B = 0$  το φορτίο  $Q_B(t)$  μειώνεται εκθετικά

$$Q_B(t_2) \exp\left(-\frac{t-t_2}{\tau_h}\right)$$

Το ρεύμα  $I_C$  είναι σταθερό στην περιοχή κορεσμού μέχρι το  $Q_B(t)$  να μειωθεί σε  $Q_s$ , οπότε  $V_{CB}=0$   
Το τρανζίστορ μπαίνει στην ενεργό περιοχή και το  $I_C$  μειώνεται εκθετικά:

$$i_C = \frac{Q_B(t-t_2)}{\tau_B} = \frac{Q_B(t_2)}{\tau_B} \exp\left(-\frac{t-t_2}{\tau_h}\right)$$

Ο χρόνος αποθήκευσης  $t_s$  ορίζεται από τη χρονική στιγμή  $t_2$   $I_B=0$  και  $Q_B(t_2) = Q_{Bmax} = I_B \tau_h$  μέχρι  $t_3$ , οπότε το  $Q_B(t-t_2)$  μειώνεται σε  $Q_s = I_C \tau_B$ , το ρεύμα του συλλέκτη  $i_C$  πέφτει στο 90%,

$$t_s = t_3 - t_2 = \tau_h \ln\left[\frac{Q_B(t_2)}{Q_s}\right] \quad Q_B(t_2) = I_B \tau_h \Rightarrow$$

$$t_s = \tau_h \ln\left[\frac{I_B \tau_h}{Q_s}\right] = \tau_h \ln\left[\frac{I_B \tau_h}{I_C \tau_B}\right]$$

Ο χρόνος αποθήκευσης ή χρονική καθυστέρηση αποθήκευσης  $t_s$  είναι η πιο σημαντική παράμετρος του χρόνου διακοπής (switching time) του τρανζίστορ

**Χρόνος καθόδου  $t_f$**   $= (t_4 - t_3)$  το  $I_C$  μειώνεται εκθετικά από 90% στο 10% της μέγιστης τιμής του.

Η επαφή B-C είναι ανάστροφα πολωμένη αλλά συνεχίζεται η απομάκρυνση της περίσσειας των φορέων μειοψηφίας;

✓ Παρατηρήσεις

1. Χρόνος μετάβασης στην κατάσταση on: εξαρτάται από το πόσο γρήγορα μπορούμε να προσθέσουμε φορείς μειοψηφίας στη βάση,
2. Χρόνος μετάβασης στην κατάσταση off: εξαρτάται από το πόσο γρήγορα μπορούν να απομακρυνθούν οι φορείς μειοψηφίας από τη βάση με ανασύζευξη με τους φορείς πλειοψηφίας
3. Για τη μείωση του χρόνου ζωής  $\tau_h$ , απαιτείται αύξηση του ρυθμού ανασύζευξης, δια μέσου ισχυρών κέντρων ανασύζευξης φορέων που υλοποιείται με την εισαγωγή στη βάση ατόμων χρυσού



