
ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ

Διάλεξη 4: Διπολικά Τρανζίστορ

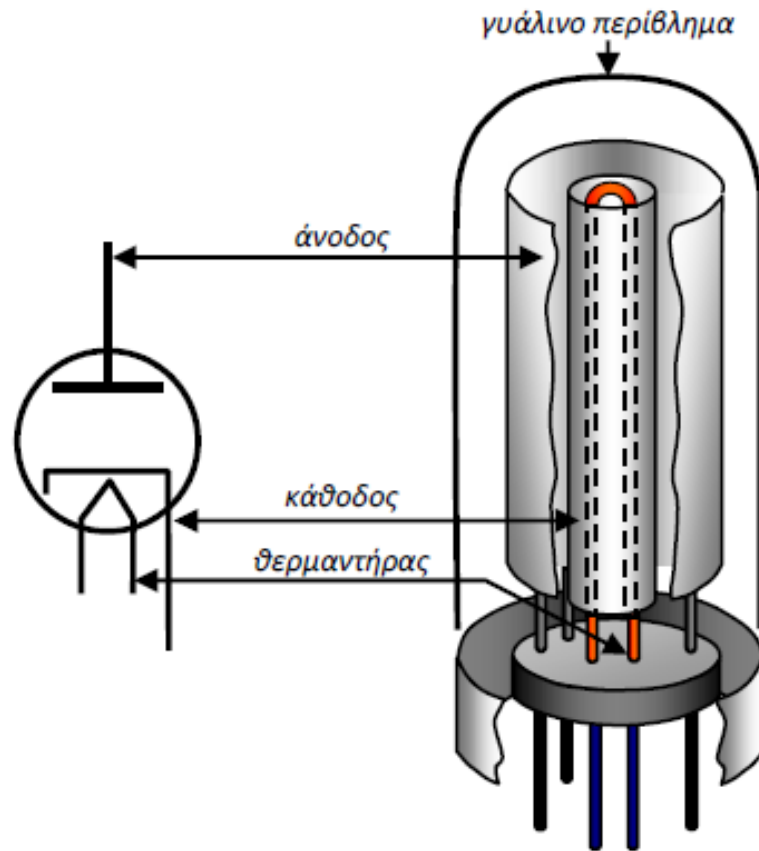
Δρ Δημήτριος Λαμπάκης

Ηλεκτρονικές λυχνίες κενού

Η εφεύρεση του **τρανζίστορ** υπήρξε αποτέλεσμα της προσπάθειας κατασκευής μιας διάταξης στερεάς κατάστασης η οποία να μιμείται τη συμπεριφορά της τριόδου ηλεκτρονικής λυχνίας και να είναι, επομένως, ικανή να επιτελεί ενίσχυση.

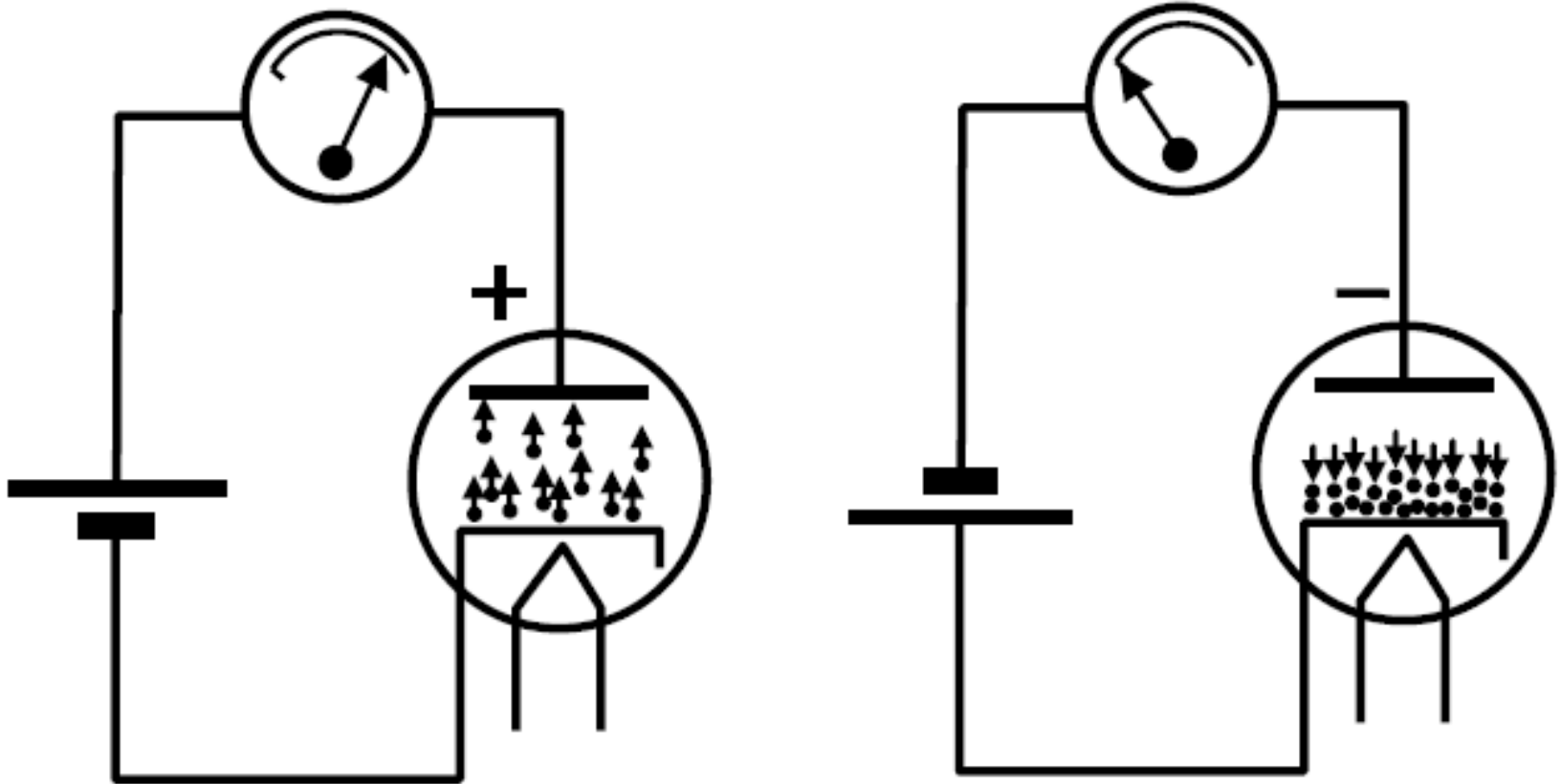
Ηλεκτρονικές λυχνίες κενού

Δομή διόδου ηλεκτρονικής λυχνίας και κυκλωματικό της σύμβολο



Ηλεκτρονικές λυχνίες κενού

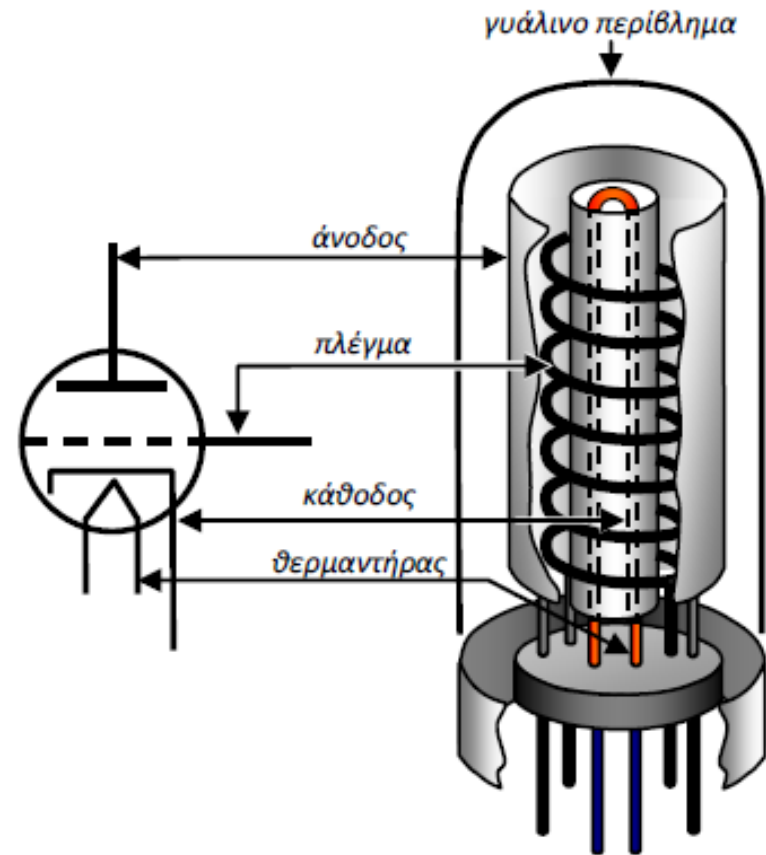
Αρχή λειτουργίας διόδου ηλεκτρονικής λυχνίας



Ηλεκτρονικές λυχνίες κενού

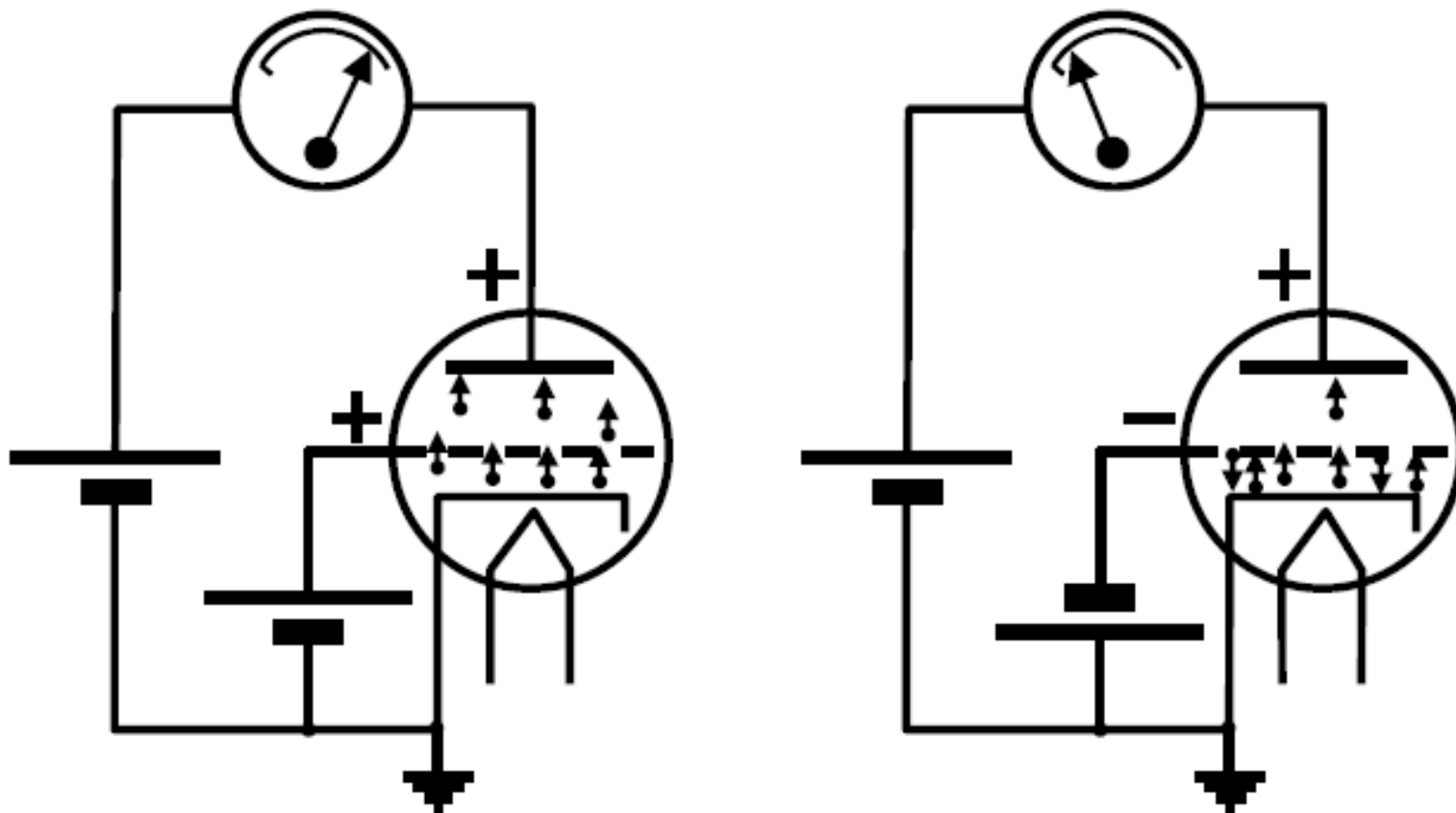
Δομή τριόδου ηλεκτρονικής λυχνίας και κυκλωματικό της σύμβολο

Η τριόδος λυχνία είναι μια διάταξη **τριών** ακροδεκτών ελεγχόμενη από τάση, υπό την έννοια ότι η τάση που εφαρμόζεται στον έναν από τους ακροδέκτες της (στο πλέγμα) μπορεί να ρυθμίζει (ελέγχει) τη ροή ηλεκτρονίων μεταξύ των άλλων δύο (ανόδου και καθόδου).



Ηλεκτρονικές λυχνίες κενού

Αρχή λειτουργίας τριόδου ηλεκτρονικής λυχνίας

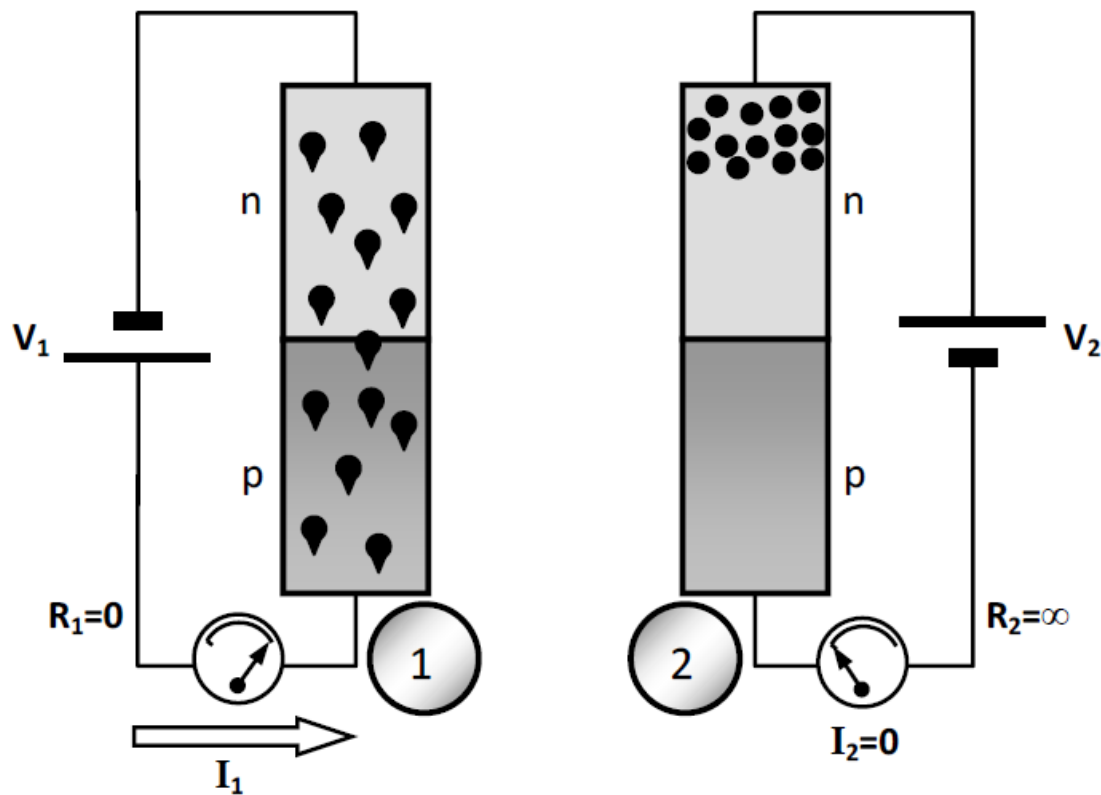


Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

- Η εφεύρεση του **τρανζίστορ** υπήρξε αποτέλεσμα της προσπάθειας κατασκευής μιας διάταξης στερεάς κατάστασης η οποία να μιμείται τη συμπεριφορά της τριόδου ηλεκτρονικής λυχνίας και να είναι, επομένως, ικανή να επιτελεί ενίσχυση.
- Θεμελιώδης σκοπός της λειτουργίας ενός τρανζίστορ είναι ο **έλεγχος** της ροής των ηλεκτρονίων μεταξύ δύο ακροδεκτών του, μέσω ενός τρίτου ακροδέκτη.

Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

- Δύο ανεξάρτητες επαφές pn



Σημείωση:

Η μία (1) πολωμένη κατά την ορθή φορά και την άλλη (2) κατά την ανάστροφη.

Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

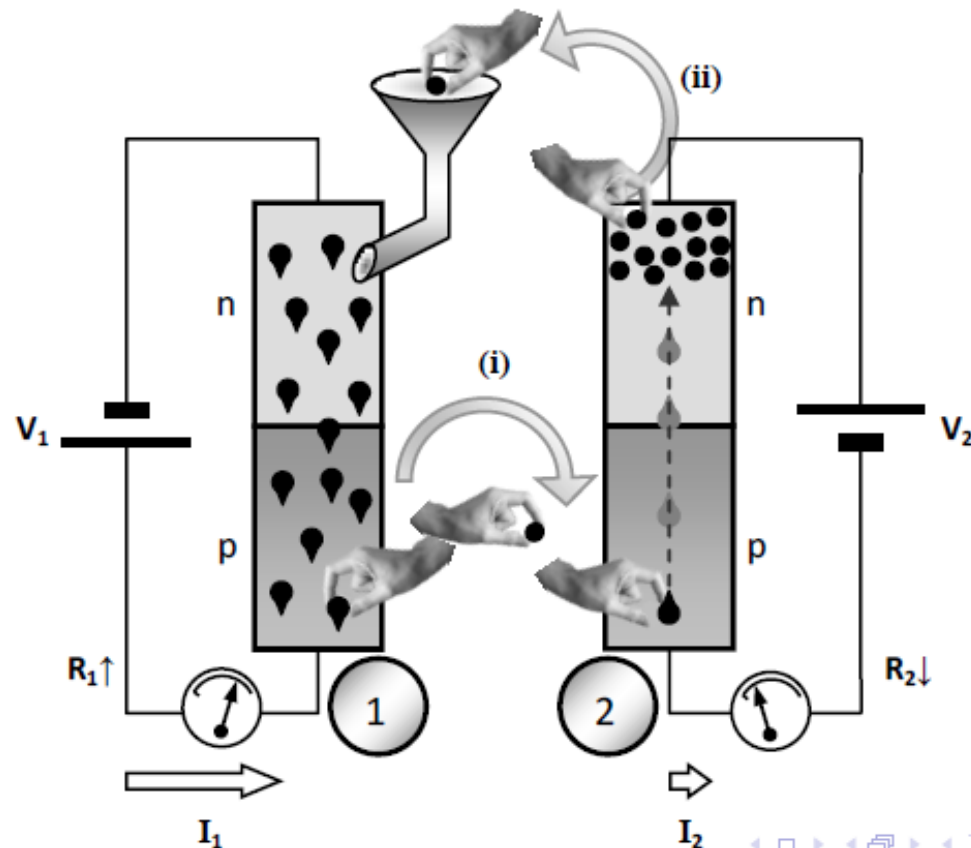
- Υποθέτουμε, ακόμη, ότι οι συγκεντρώσεις των προσμίξεων στις περιοχές τύπου n των επαφών αυτών είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες συγκεντρώσεις στις περιοχές τύπου p .
- Αυτό συνεπάγεται πως ο αριθμός των ηλεκτρονίων θα είναι πολύ μεγαλύτερος του αριθμού των οπών και άρα η αγωγιμότητα των επαφών θα καθορίζεται κυρίως από τα **ηλεκτρόνια**.

Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

- Αν η τάση V_1 στα άκρα της διόδου 1 είναι μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου της, τότε ένα ρεύμα πολύ μεγάλης έντασης (I_1) θα διαρρέει το κύκλωμα της διόδου αυτής. Άρα στο κύκλωμα της διόδου 1 θα έχουμε μια σχεδόν **μηδενική** αντίσταση R_1 .
- Λόγω της ανάστροφης πόλωσης της επαφής 2, το ρεύμα που τη διαρρέει θα είναι σχεδόν μηδενικό, ενώ τα ηλεκτρόνια του τμήματος τύπου n θα συνωστίζονται υπό την έλξη του θετικού πόλου της πηγής V_2 , η αντίσταση του αντίστοιχου κυκλώματος θα είναι **άπειρη**.

Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

- 'Υποκλέπουμε' ένα ηλεκτρόνιο από τη μία επαφή και το 'εγχέουμε' στην άλλη



Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

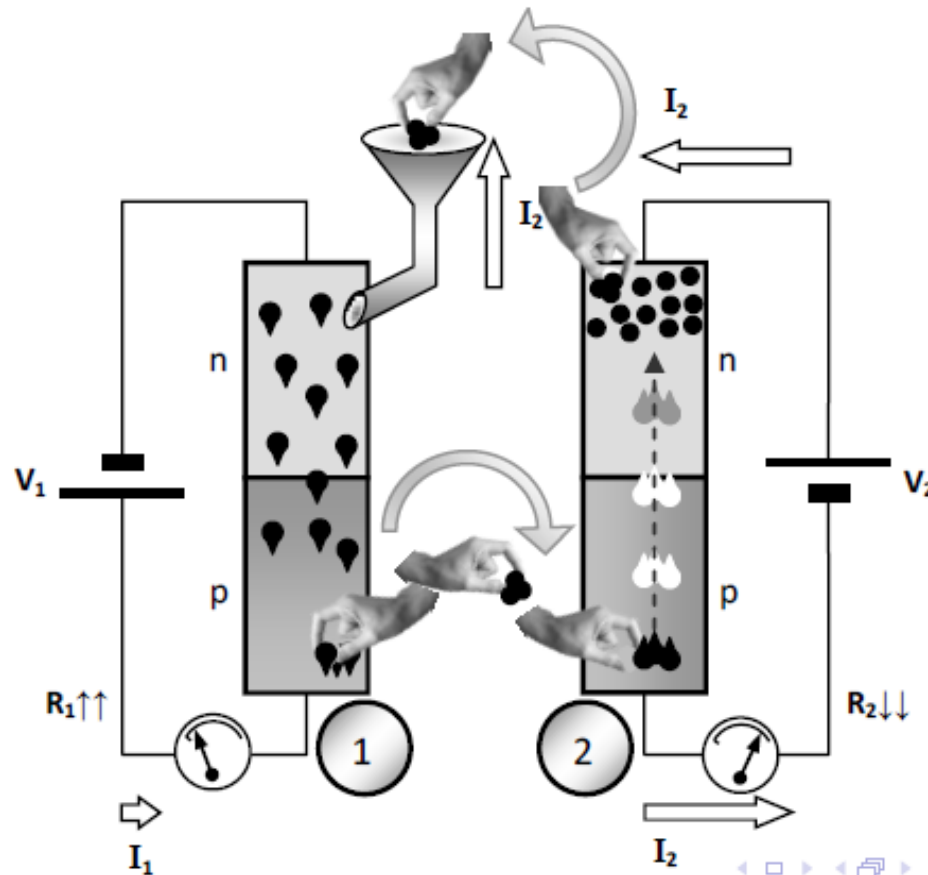
- Με την απόσπαση ενός ηλεκτρονίου από την επαφή 1 (η οποία είναι αρχικά ουδέτερη) αυτή θα παρουσιάσει έλλειμμα αρνητικού φορτίου (φορτίζεται, δηλαδή, θετικά).
- Παρόμοια, με την προσθήκη ενός ηλεκτρονίου στην επαφή 2 αυτή θα φορτισθεί αρνητικά.
- Για να αποκαταστήσουμε το ουδέτερο φορτίο των δύο κρυστάλλων θα «επιστρέψουμε» ένα ηλεκτρόνιο στην επαφή 1, αφαιρώντας το από την επαφή 2, η οποία παρουσιάζει πλεόνασμα ενός ηλεκτρονίου.

Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

- Άρα, ένα μικρό ρεύμα I_2 θα διαρρέει το κύκλωμα της διόδου 2, και η αντίσταση R_2 του κυκλώματος θα μειωθεί.
- Επομένως, το ρεύμα I_1 που διαρρέει το κύκλωμα της επαφής 1 θα μειωθεί, και η αντίσταση R_1 του κυκλώματος θα αυξηθεί.

Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

- 'Υποκλέπουμε' πολλά ηλεκτρόνια από τη μία επαφή και τα 'εγχέουμε' στην άλλη



Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

-Τότε, το ρεύμα I_1 που διαρρέει το κύκλωμα της επαφής 1 θα γίνει εξαιρετικά μικρό, και η αντίσταση R_1 του κυκλώματος σχεδόν άπειρη.

-Από την άλλη μεριά, το ρεύμα I_2 που διαρρέει το κύκλωμα της επαφής 2 θα γίνει πολύ μεγάλο, και η αντίσταση R_2 του κυκλώματος σχεδόν μηδενική.

-Άρα, αυξάνοντας τον βαθμό υποκλοπής μειώνουμε την αντίσταση του κυκλώματος 2 και αυξάνουμε την αντίσταση του κυκλώματος 1.

Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

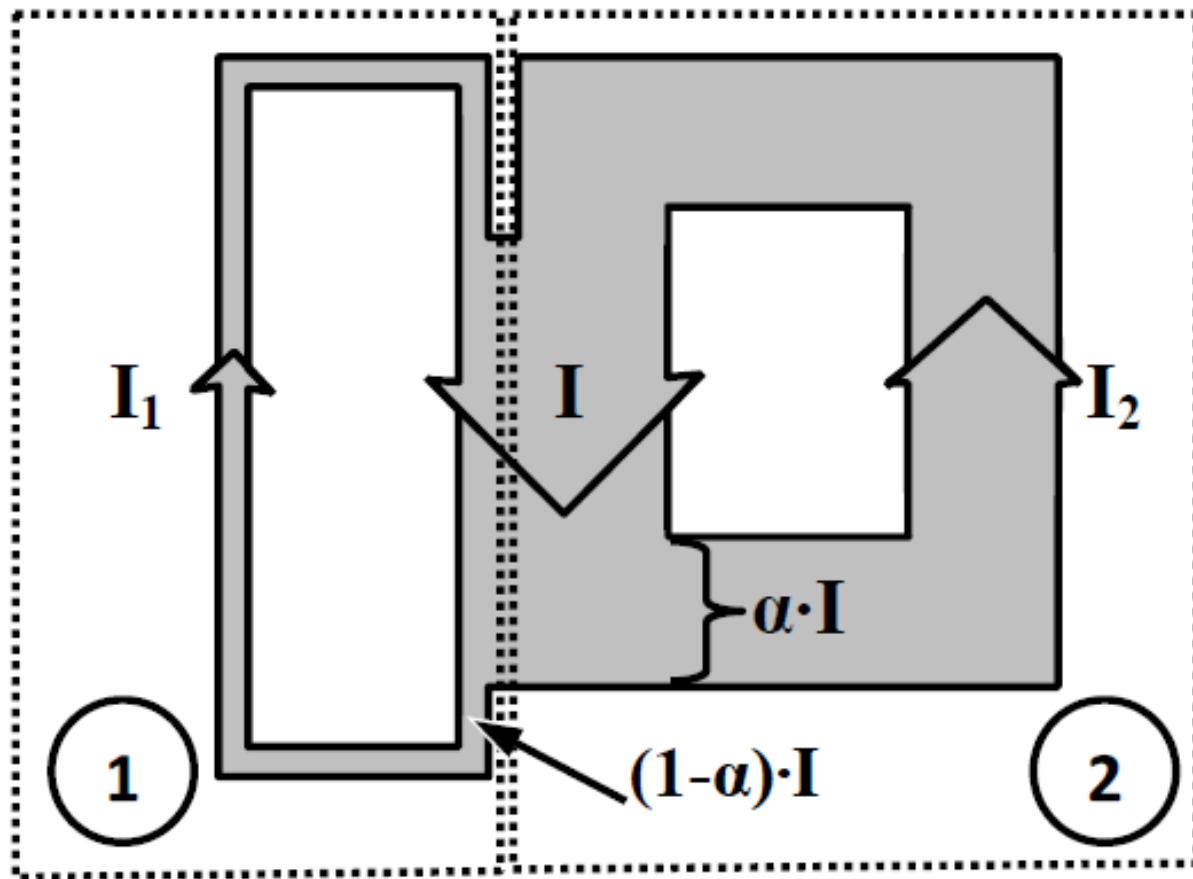
Σύνοψη:

Έχουμε κατασκευάσει νοητικά μια διάταξη η οποία, χρησιμοποιώντας μια διαδικασία υποκλοπής ηλεκτρονίων, «μεταφέρει» τη μικρή αντίσταση του κυκλώματος της διόδου 1 στο κύκλωμα 2 .

Για το λόγο αυτό ονομάζεται **transistor** (από το «transfer» [μεταφέρω] και «resistor»).

Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

- Σχέση των ρευμάτων στις δύο επαφές



Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

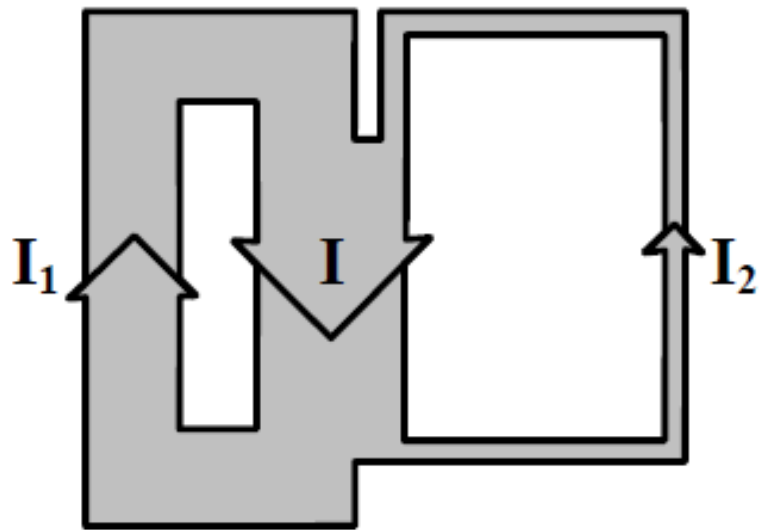
- Απολαβή ρεύματος

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\alpha \cdot I}{(1 - \alpha) \cdot I} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \beta$$

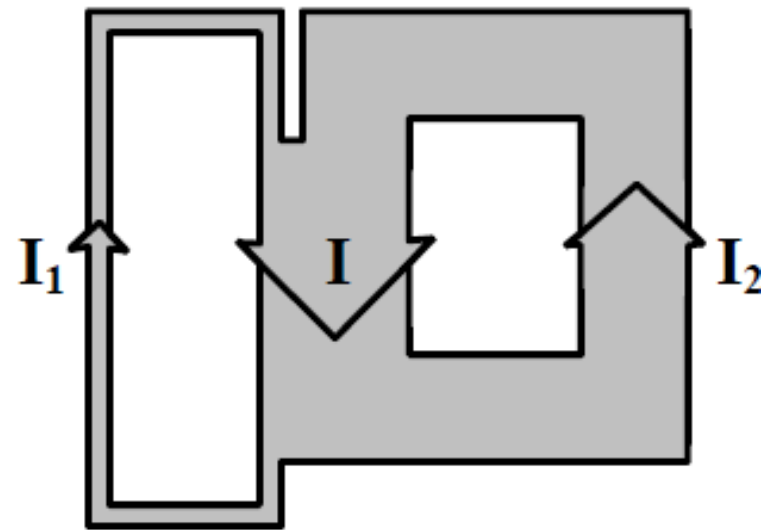
Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

- Ο **συντελεστής αναλογίας β** αποτελεί την απολαβή ρεύματος αν ως κύκλωμα εισόδου θεωρήσουμε το κύκλωμα 1 και ως κύκλωμα εξόδου το κύκλωμα 2 .
- Αν το **κλάσμα υποκλοπής α** πλησιάζει τη μονάδα, τότε η τιμή της σταθεράς β θα είναι πάρα πολύ μεγάλη, γεγονός που συνεπάγεται **μεγάλη απολαβή (ενίσχυση)** ρεύματος.
- Μια τέτοια πηγή με μεγάλη απολαβή ρεύματος μπορεί να επιτελεί ενίσχυση και, επομένως, η διάταξή μας μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυκλώματα ενισχυτών.

Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ



(i) – μικρό α

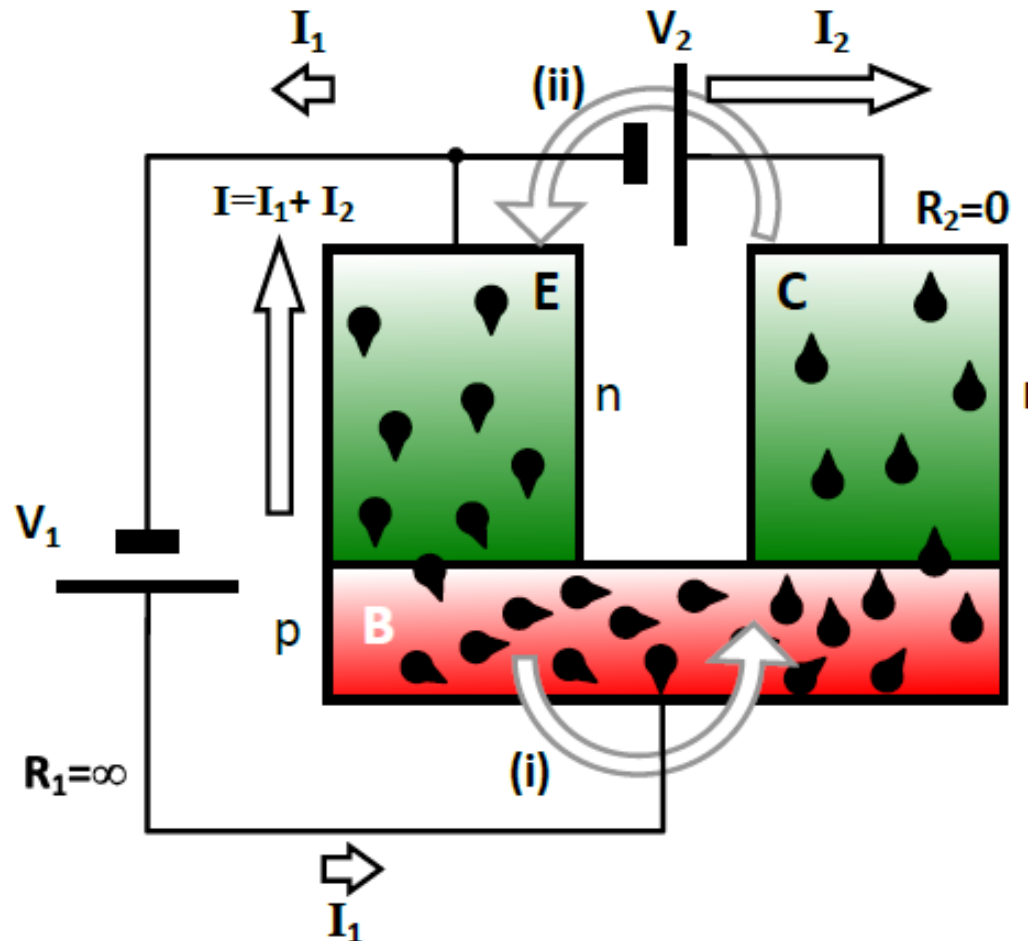


(ii) – μεγάλο α

Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

Υλοποίηση

Για να επιτευχθεί ο μηχανισμός υποκλοπής ηλεκτρονίων από το τμήμα p της μιας επαφής στο ομόλογο τμήμα της άλλης, συνενώνουμε τις δύο επαφές p-n με τέτοιο τρόπο ώστε το τμήμα τύπου p να είναι κοινό και για τις δύο.



Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

- Το κοινό τμήμα θα πρέπει να έχει πολύ μικρό πάχος, ώστε τα ηλεκτρόνια από το τμήμα n της επαφής 1 που θα φτάνουν σε αυτό να διαχέονται προς την επαφή 2 (βλ. βέλος i).
- Η «αφαίρεση» ηλεκτρονίων από το τμήμα τύπου n της επαφής 2 μπορεί να εξασφαλισθεί με την ηλεκτρική σύνδεση των δύο τμημάτων τύπου n ώστε τα κυκλώματα των δύο επαφών να μοιράζονται από κοινού το τμήμα τύπου n της επαφής 1 και να υπάρχει ροή των «πλεοναζόντων» ηλεκτρονίων (βλ. βέλος ii).
- Η επιλογή των τιμών των τάσεων V_1 και V_2 των πηγών τροφοδοσίας θα πρέπει να είναι κατάλληλη ώστε η επαφή 1 να είναι ορθά πολωμένη και η επαφή 2 ανάστροφα (όπως προαναφέρθηκε).

Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

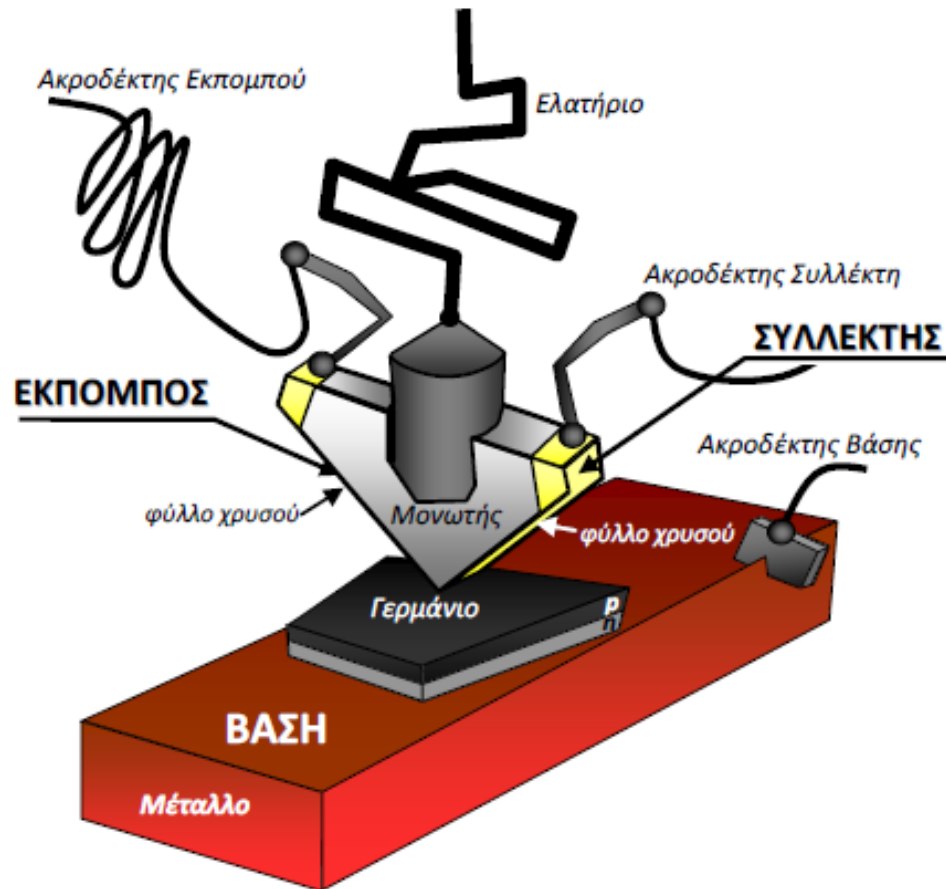
Επειδή το τμήμα τύπου n της επαφής 1 «εκπέμπει» τα ηλεκτρόνια που κυκλοφορούν στο τρανζίστορ θα το αποκαλούμε **εκπομπό (emitter)** και θα το συμβολίζουμε με E .

Παρόμοια, επειδή το τμήμα τύπου n της επαφής 2 «συλλέγει» το μεγαλύτερο μέρος των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται από τον εκπομπό θα το αποκαλούμε **συλλέκτη (collector)** και θα το συμβολίζουμε με C .

Το κοινό τμήμα τύπου p των δύο επαφών θα το ονομάζουμε **βάση (base)** για ιστορικούς λόγους και θα το συμβολίζουμε με B .

Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

- Δομή του πρώτου τρανζίστορ (σημειακής επαφής)



Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

- Σε μια μεταλλική βάση (από την οποία πήρε το όνομά του ο αντίστοιχος ακροδέκτης του τρανζίστορ) τοποθέτησαν μια πλάκα από γερμάνιο με προσμίξεις τύπου n, στην άνω επιφάνεια της οποίας είχε δημιουργηθεί ένα λεπτό στρώμα τύπου p.
- Στην επιφάνεια δύο επαπτόμενων εδρών ενός μονωτικού πρίσματος τοποθέτησαν ένα λεπτό φύλλο χρυσού το οποίο χάραξαν στην κοινή ακμή, ώστε τα δύο τμήματα του φύλλου να βρίσκονται σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους (αποτελώντας τα ηλεκτρόδια του εκπομπού και του συλλέκτη της διάταξης).
- Ένα άλλο ηλεκτρόδιο στερεωμένο στο σώμα του μετάλλου της βάσης αποτελούσε τον ακροδέκτη βάσης του τρανζίστορ, ενώ ένα ελατήριο εξασφάλιζε την πρόσφυση του πρίσματος και των στερεωμένων σε αυτό ηλεκτροδίων στην επιφάνεια του ημιαγωγού (γερμανίου).

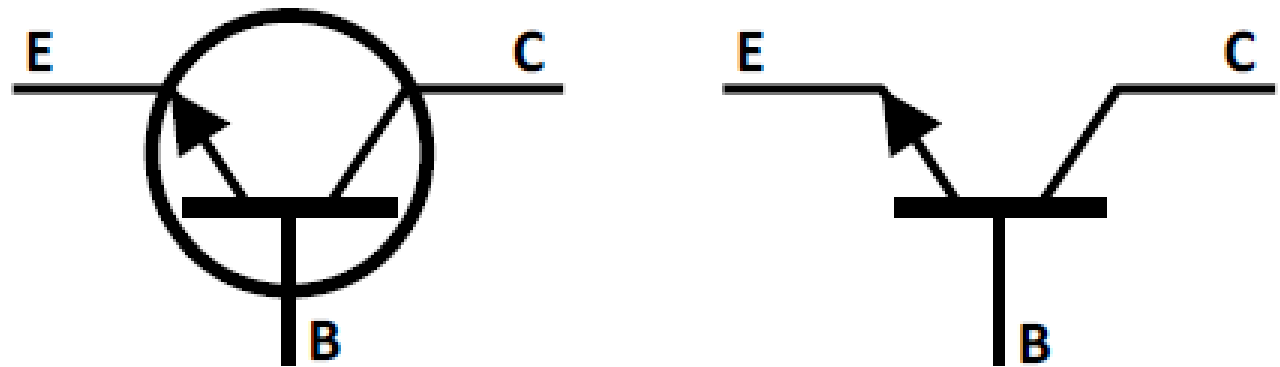
Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

Με την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων του εκπομπού και του συλλέκτη σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους γινόταν δυνατή η εμφάνιση του μηχανισμού «υποκλοπής» που ήδη περιγράψαμε, η οποία ονομάζεται και δράση (ή ενέργεια) του τρανζίστορ (transistor action).

Έτσι, πολώνοντας κατά την ορθή φορά το κύκλωμα εκπομπού-βάσης και παρεμβάλλοντας ένα μικρόφωνο έπαιρναν το ενισχυμένο σήμα του μικροφώνου από μεγάφωνο συνδεδεμένο στο κύκλωμα συλλέκτη-βάσης το οποίο πολωνόταν ανάστροφα.

Αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ

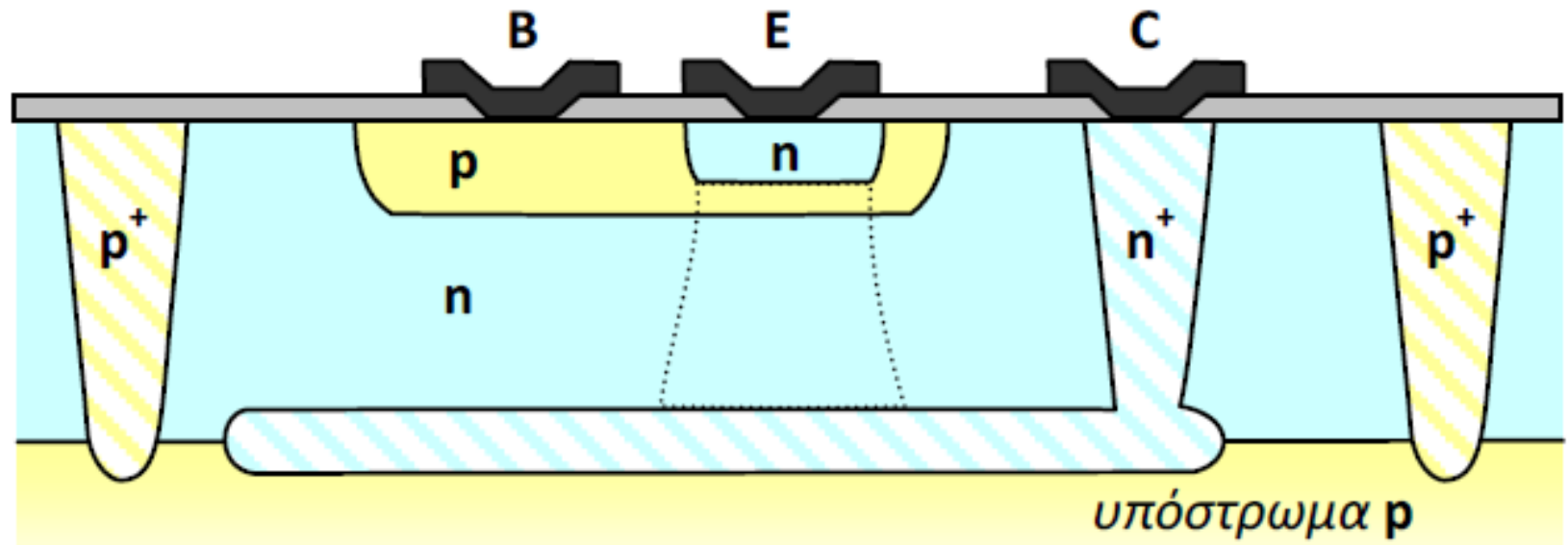
- Κυκλωματικά σύμβολα τρανζίστορ npn



Σημείωση: το βέλος το οποίο σημειώνεται στον εκπομπό δηλώνει τη συμβατική φορά του ρεύματος.

Κατασκευή του διπολικού τρανζίστορ

- Εγκάρσια τομή διπολικού τρανζίστορ (npn)

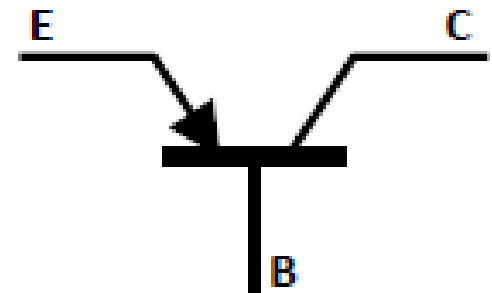
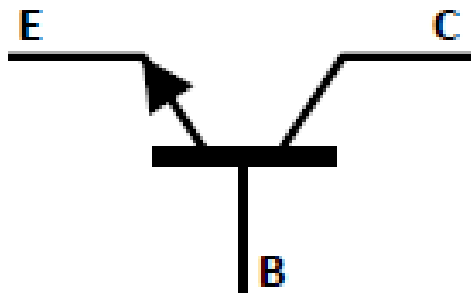
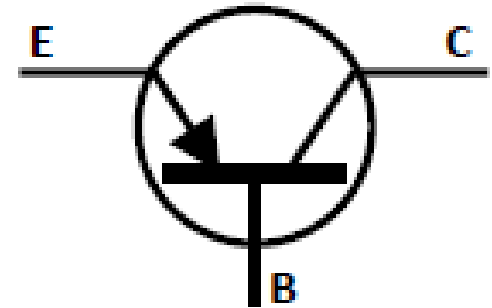
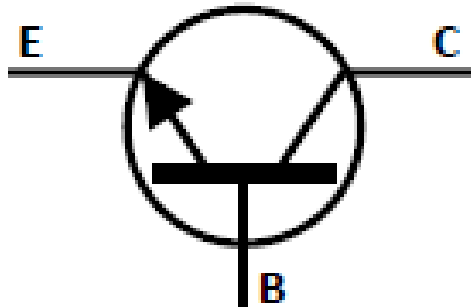
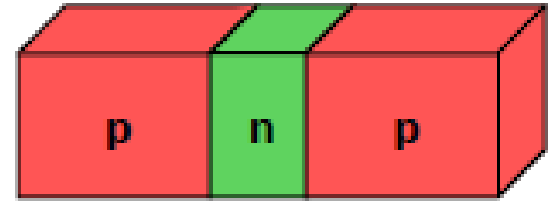
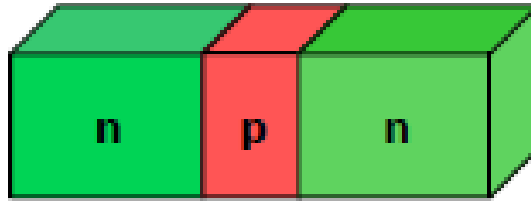


Τύποι

- Το τρανζίστορ με το οποίο ασχοληθήκαμε μέχρι στιγμής αποτελείται από δύο επαφές p-n με κοινό το τμήμα p. Τρανζίστορ αυτού του τύπου ονομάζονται **npn**.
- Παρόμοια συμπεριφορά έχουν και δύο επαφές p-n με κοινό το τμήμα n. Τα τρανζίστορ που κατασκευάζονται με τον τρόπο αυτό ονομάζονται **pnp**.

Τύποι

Σχηματική
αναπαράστασ
η και
κυκλωματικά
σύμβολα
διπολικών
τρανζίστορ



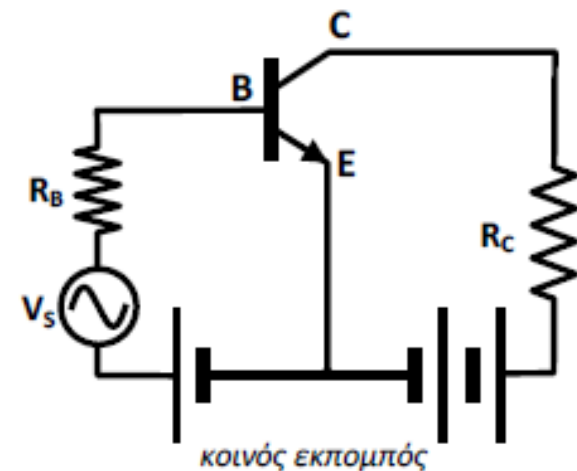
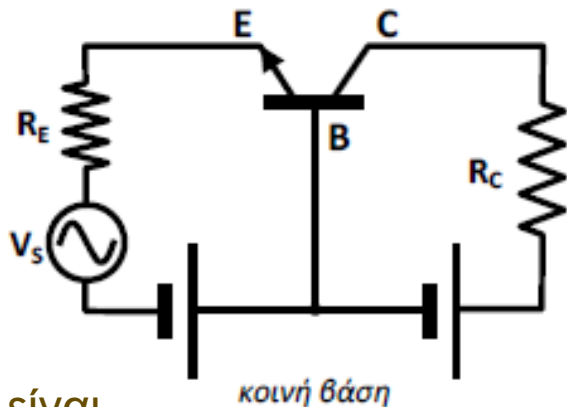
Τύποι

- Για τον τύπο r_{hp} η δράση του τρανζίστορ οφείλεται στις **οπές**. Δηλαδή, σε ένα τρανζίστορ r_{hp} γίνεται «υποκλοπή» οπών που φθάνουν στη βάση κινούμενες από τον εκπομπό και ακολουθεί η σάρωσή τους προς τον συλλέκτη.
- Η κυριότερη διαφορά των τρανζίστορ r_{hp} σε σχέση με τα r_{hp} είναι, εκτός από τον διαφορετικό τρόπο πόλωσης, η **μικρή τους «ταχύτητα»**, γιατί η ευκινησία των οπών είναι μικρότερη εκείνης των ηλεκτρονίων. Επομένως, ένα τρανζίστορ r_{hp} θα μπορεί να ανταποκριθεί λιγότερο καλά στις υψηλές συχνότητες σε σύγκριση με ένα r_{hp} .
- Για τον λόγο αυτό τα τρανζίστορ r_{hp} **επικρατούν** έναντι των r_{hp} στις διάφορες εφαρμογές.

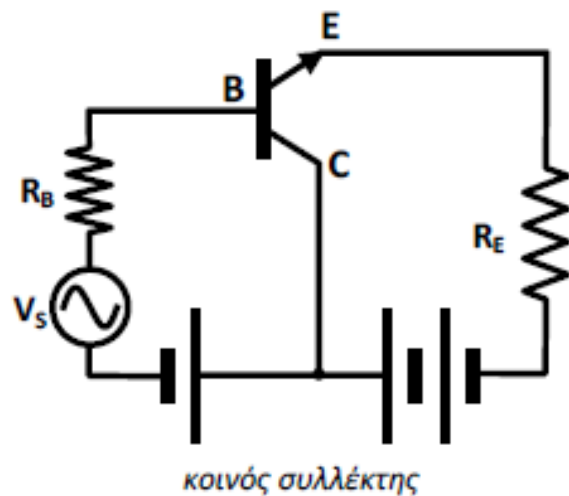
Βασικές συνδεσμολογίες του διπολικού τρανζίστορ

- Το τρανζίστορ για να εμφανίζει την επιθυμητή «δράση» (transistor action) θα πρέπει να έχει, εκτός από τα κατάλληλα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά (μικρό πάχος βάσης και υψηλή συγκέντρωση προσμίξεων στον εκπομπό), και την **κατάλληλη πόλωση**, δηλαδή, η επαφή εκπομπού-βάσης (ΕΒ) να είναι πολωμένη ορθά και η επαφή βάσης-συλλέκτη (ΒC) ανάστροφα.
- Θα πρέπει ακόμη να εξασφαλίζεται η «επιστροφή» στον εκπομπό των ηλεκτρονίων που σαρώνονται προς τον συλλέκτη, άρα θα πρέπει να υπάρχει ένα **ηλεκτρικά αγώγιμο μονοπάτι** από τον συλλέκτη προς τον εκπομπό.

Βασικές συνδεσμολογίες του διπολικού τρανζίστορ



Οι συνδεσμολογίες αυτές είναι συνδεσμολογίες **ενισχυτών**, μιας και το τρανζίστορ είναι πολωμένο ώστε να εμφανίζει τη «δράση» με την οποία εξασφαλίζεται η επιθυμητή ενίσχυση (για αυτό συμπεριλήφθηκαν και οι πηγές σήματος V_s , που αντιστοιχούν στο σήμα που ενισχύεται).





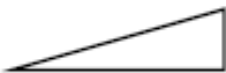





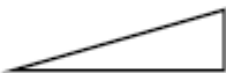






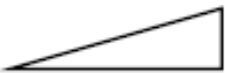


Βασικές συνδεσμολογίες του διπολικού τρανζίστορ

- Κάθε συνδεσμολογία αποτελείται από ένα **κύκλωμα εισόδου** (στο οποίο περιλαμβάνεται η πηγή σήματος) και ένα **κύκλωμα εξόδου**, όπου παρέχεται το ενισχυμένο σήμα.
- Τα δύο αυτά κυκλώματα έχουν κοινό έναν εκ των ακροδεκτών του τρανζίστορ. **Από τον κοινό ακροδέκτη παίρνουν και την ονομασία τους.** Αν κοινός ακροδέκτης είναι ο ακροδέκτης της βάσης, τότε η συνδεσμολογία ονομάζεται *κοινής βάσης* κ.ο.κ.

Βασικές συνδεσμολογίες του διπολικού τρανζίστορ

- Χαρακτηριστικά συνδεσμολογιών διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικό	Συνδεσμολογία		
	ΚΟΙΝΟΥ ΕΚΠΟΜΠΟΥ	ΚΟΙΝΗΣ ΒΑΣΗΣ	ΚΟΙΝΟΥ ΣΥΛΛΕΚΤΗ
Διαφορά φάσης εισόδου – εξόδου	180°	0°	0°
Απολαβή τάσης (A_v)			
Απολαβή ρεύματος (A_i)			
Απολαβή ισχύος			
Αντίσταση εισόδου			
Αντίσταση εξόδου			

 = χαμηλή,
  = μέση,
  = υψηλή.

Περιοχές (τρόποι) λειτουργίας

- Όπως αναφέρθηκε, ένα τρανζίστορ για να παρουσιάζει «δράση» θα πρέπει η επαφή βάσης-εκπομπού να είναι πολωμένη ορθά και η επαφή βάσης-συλλέκτη ανάστροφα.
- Τότε το ρεύμα του συλλέκτη θα είναι **ανάλογο** του ρεύματος της βάσης με συντελεστή αναλογίας β και, επίσης, **ανάλογο** του ρεύματος του εκπομπού με συντελεστή αναλογίας α .
- Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας λέμε πως το τρανζίστορ βρίσκεται στην **(ορθά) ενεργό περιοχή (active region)** και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ενίσχυσης.

Περιοχές (τρόποι) λειτουργίας

- Αν η επαφή βάσης-συλλέκτη είναι πολωμένη ορθά και η επαφή βάσης-εκπομπού ανάστροφα, τότε το τρανζίστορ θα εμφανίζει επίσης «δράση».
- Όμως οι προϋποθέσεις που αφορούν τις προσμίξεις των διάφορων τμημάτων του τρανζίστορ δεν θα πληρούνται, το «κλάσμα υποκλοπής» α θα είναι πολύ μικρό και **αναντίστοιχο** με αυτό που δίνει ο κατασκευαστής του τρανζίστορ.
- Στην περίπτωση αυτή λέμε πως το τρανζίστορ βρίσκεται στον **ανάστροφα ενεργό τρόπο λειτουργίας (ή ανάστροφο τρόπο – reverse mode)**.
- Επειδή στην περίπτωση αυτή τα χαρακτηριστικά του τρανζίστορ είναι πρακτικά άγνωστα, ο συγκεκριμένος τρόπος λειτουργίας θα πρέπει να αποφεύγεται.

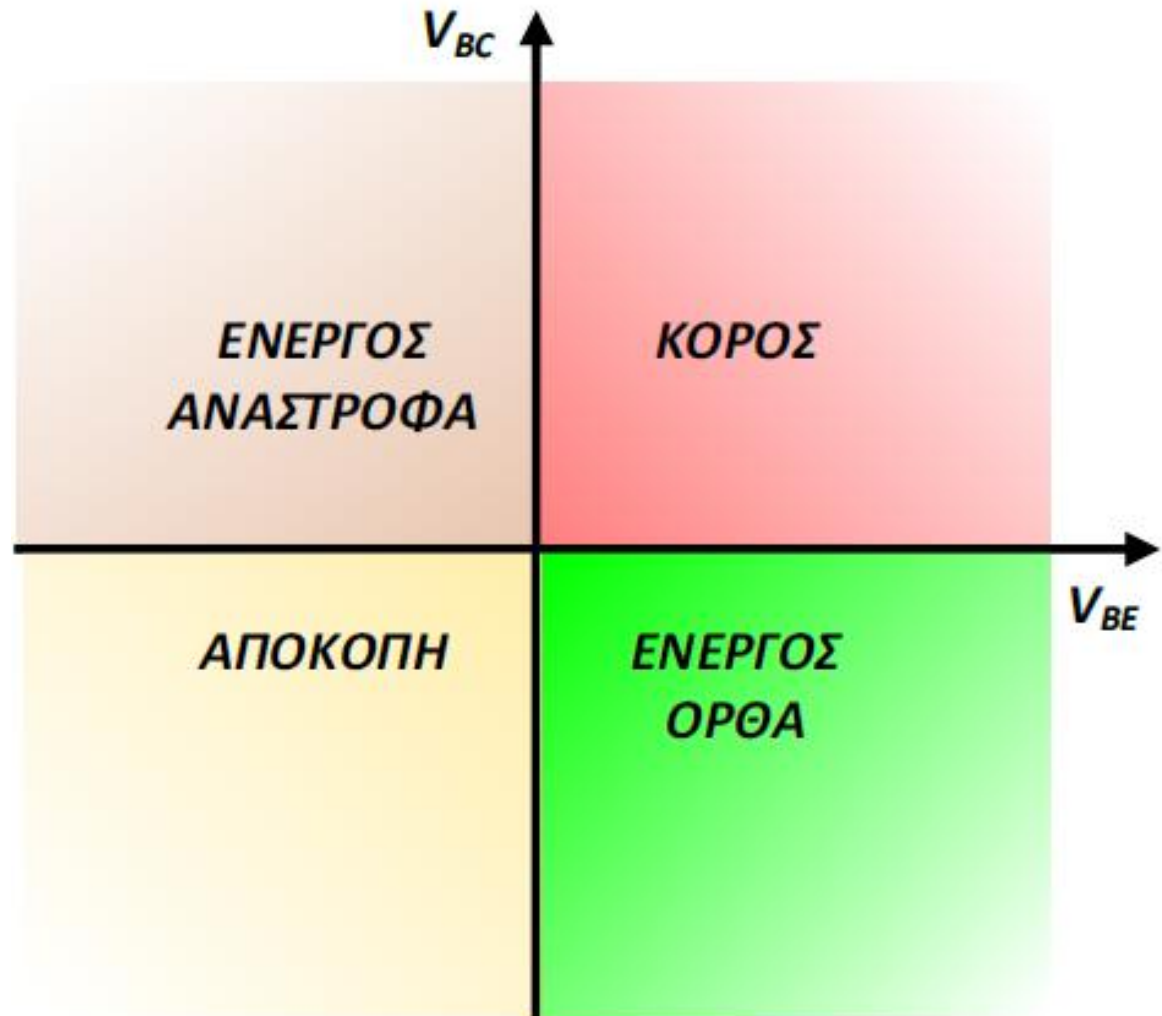
Περιοχές (τρόποι) λειτουργίας

- Αν η επαφή βάσης-συλλέκτη είναι πολωμένη ανάστροφα και το ίδιο ισχύει και για την επαφή βάσης-εκπομπού, τότε είναι φανερό πως το ρεύμα που θα διαρρέει το τρανζίστορ θα είναι σχεδόν μηδενικό. Λέμε τότε πως το τρανζίστορ βρίσκεται στην **αποκοπή (cutoff)**.
- Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας υπάρχει ανοικτό κύκλωμα μεταξύ εκπομπού και συλλέκτη, και άρα το τρανζίστορ συμπεριφέρεται ως ανοικτός διακόπτης.

Περιοχές (τρόποι) λειτουργίας

- Αν η επαφή βάσης-εκπομπού είναι πολωμένη ορθά και το ίδιο ισχύει και για την επαφή βάσης-συλλέκτη, τότε είναι φανερό πως το ρεύμα που θα διαρρέει το τρανζίστορ θα είναι πολύ μεγάλο, αντίστοιχο του ρεύματος των δύο διόδων που το αποτελούν και οι οποίες θα είναι ορθά πολωμένες. Λέμε τότε πως το τρανζίστορ βρίσκεται στον **κόρο (saturation)**.
- Σε αυτόν τον τρόπο λειτουργίας υπάρχει κλειστό κύκλωμα μεταξύ εκπομπού και συλλέκτη, και άρα το τρανζίστορ συμπεριφέρεται ως κλειστός διακόπτης.
- Στην περιοχή κόρου είναι προφανές ότι δεν εμφανίζεται «δράση» του τρανζίστορ, άρα τα ρεύματα των ακροδεκτών του **δεν** υπακούουν στις αναλογίες που αναφέραμε για την περίπτωση του ενεργού τρόπου λειτουργίας.

Περιοχές (τρόποι) λειτουργίας



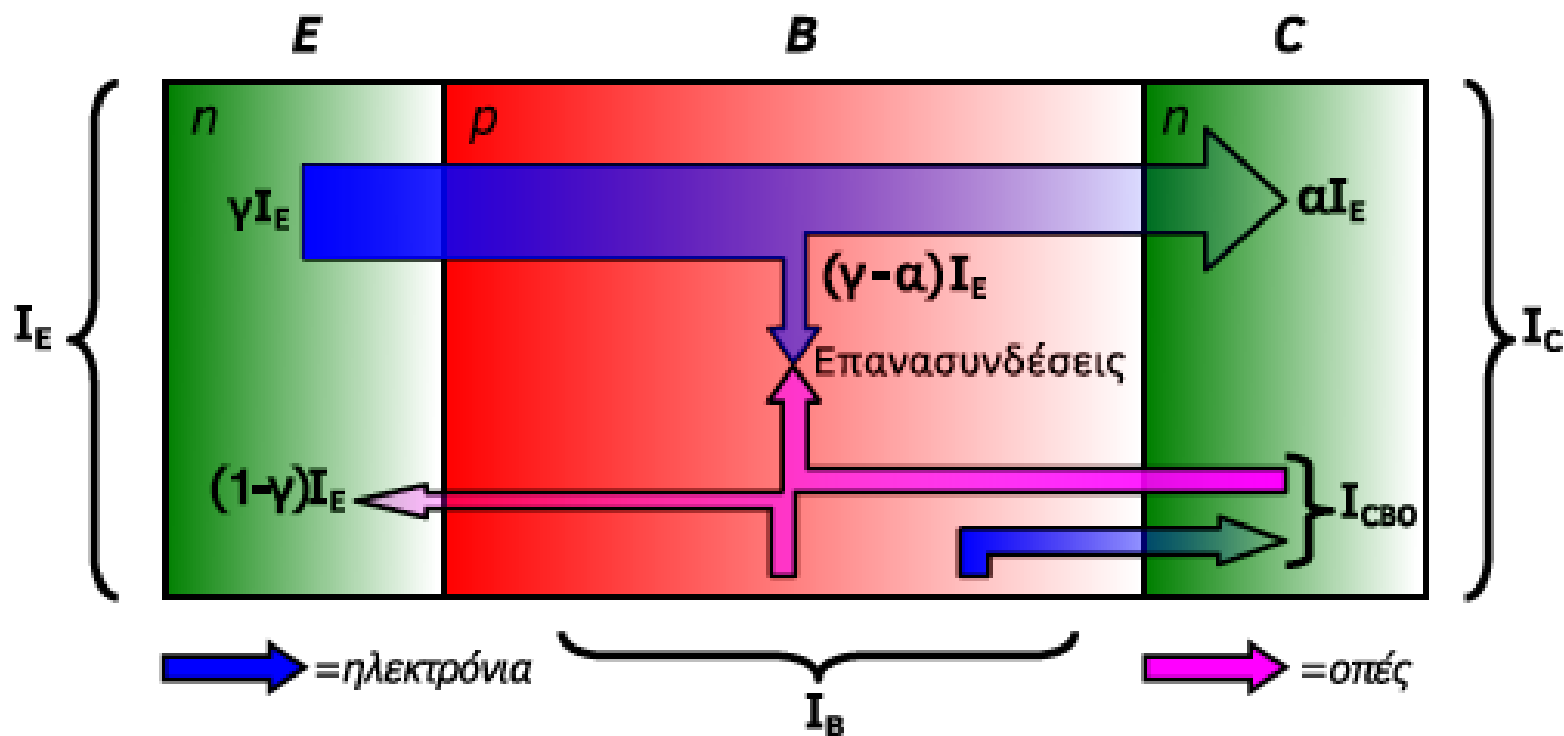
Διαγραμματική
αναπαράσταση

Σχέσεις ρευμάτων στην ενεργό περιοχή

- Στα προηγούμενα θεωρήσαμε ένα ιδανικό διπολικό τρανζίστορ τύπου npn, για το οποίο υποθέσαμε σχεδόν μηδενικές προσμίξεις στη βάση (άρα και ελάχιστες επανασυνδέσεις οπών-ηλεκτρονίων στην περιοχή αυτή) και αμελητέα τα ανάστροφα ρεύματα των επαφών.

Σχέσεις ρευμάτων στην ενεργό περιοχή

- Οι συνιστώσες των διάφορων ρευμάτων σε ένα **πραγματικό (μη ιδανικό)** διπολικό τρανζίστορ.



Σχέσεις ρευμάτων στην ενεργό περιοχή

- Το ρεύμα του εκπομπού (I_E) θα οφείλεται στη ροή ενός μεγάλου αριθμού e^- που αντιστοιχούν στο ρεύμα I_E και στη ροή ενός πολύ μικρότερου αριθμού οπών (λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης προσμίξεων στη βάση) που αντιστοιχούν στο ρεύμα $(1-\gamma)I_E$.
- Η τιμή του συντελεστή γ θα πλησιάζει πολύ το 1 (και θα είναι ίση με 1 στην ιδανική περίπτωση).
- Το ρεύμα του συλλέκτη (I_C) θα οφείλεται στη ροή της μεγάλης πλειοψηφίας των ηλεκτρονίων του εκπομπού που σα ρώνονται προς τον συλλέκτη, και που αντιστοιχούν στο ρεύμα I_E , καθώς και στο μικρό ρεύμα ανάστροφης πόλωσης της επαφής βάσης-συλλέκτη (I_{CBO}).

Σχέσεις ρευμάτων στην ενεργό περιοχή

Άρα θα ισχύει $I_C = \alpha I_E + I_{CBO}$

Από τον πρώτο κανόνα του Kirchhoff θα έχουμε: $I_E = I_C + I_B$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις και λύνοντας ως προς I_B παίρνουμε:

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

Παρόμοια, λύνοντας ως προς I_C παίρνουμε:

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

Όμως, γνωρίζουμε ότι:

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

Σχέσεις ρευμάτων στην ενεργό περιοχή

Οπότε, η σχέση για το I_C γράφεται, ισοδύναμα:

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

Ακόμη, μπορούμε εύκολα να βρούμε πως:

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

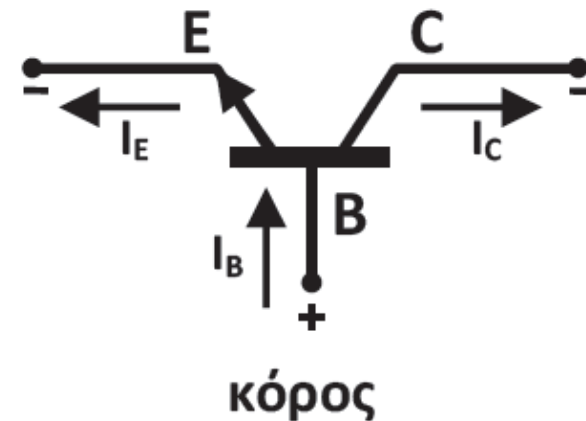
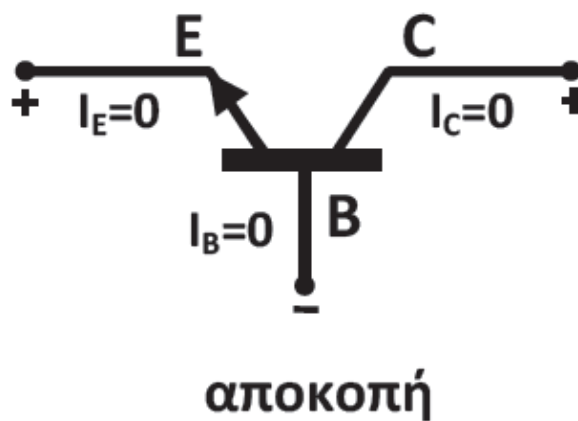
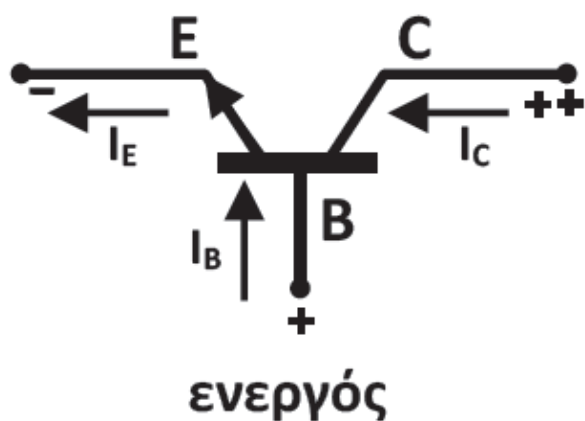
Οπότε, προκύπτει:

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

Παρατήρηση: Στην αγωγιμότητα της διάταξης συμβάλλουν και οι δύο τύποι ηλεκτρικών φορέων (ηλεκτρόνια και οπές)

Σχέσεις ρευμάτων στην ενεργό περιοχή

Φορά των ρευμάτων στους διάφορους τρόπους λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ



Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

- Προσπάθεια γραφικής αναπαράστασης της σχέσης μεταξύ του ρεύματος του συλλέκτη (I_C) και της τάσης συλλέκτη-βάσης (V_{CB}) για την περίπτωση ιδανικού διπολικού τρανζίστορ ($\alpha \simeq 1$) και για διάφορες τιμές του ρεύματος του εκπομπού (I_E).
- **Υπόθεση:** το τρανζίστορ βρίσκεται στον ενεργό τρόπο λειτουργίας (active mode) \rightarrow το ρεύμα του συλλέκτη θα είναι σχεδόν ίσο με το ρεύμα του εκπομπού (όλα τα ηλεκτρόνια που φθάνουν στη βάση θα σαρώνονται προς τον συλλέκτη) και πρακτικά ανεξάρτητο από την τάση «σάρωσης» V_{CB} .
- Έστω, ακόμη, ότι το τρανζίστορ βρίσκεται στην αποκοπή. Τότε, τόσο το ρεύμα του συλλέκτη όσο και το ρεύμα του εκπομπού θα είναι σχεδόν μηδενικά (σύμφωνα με όσα έχουμε προαναφέρει).

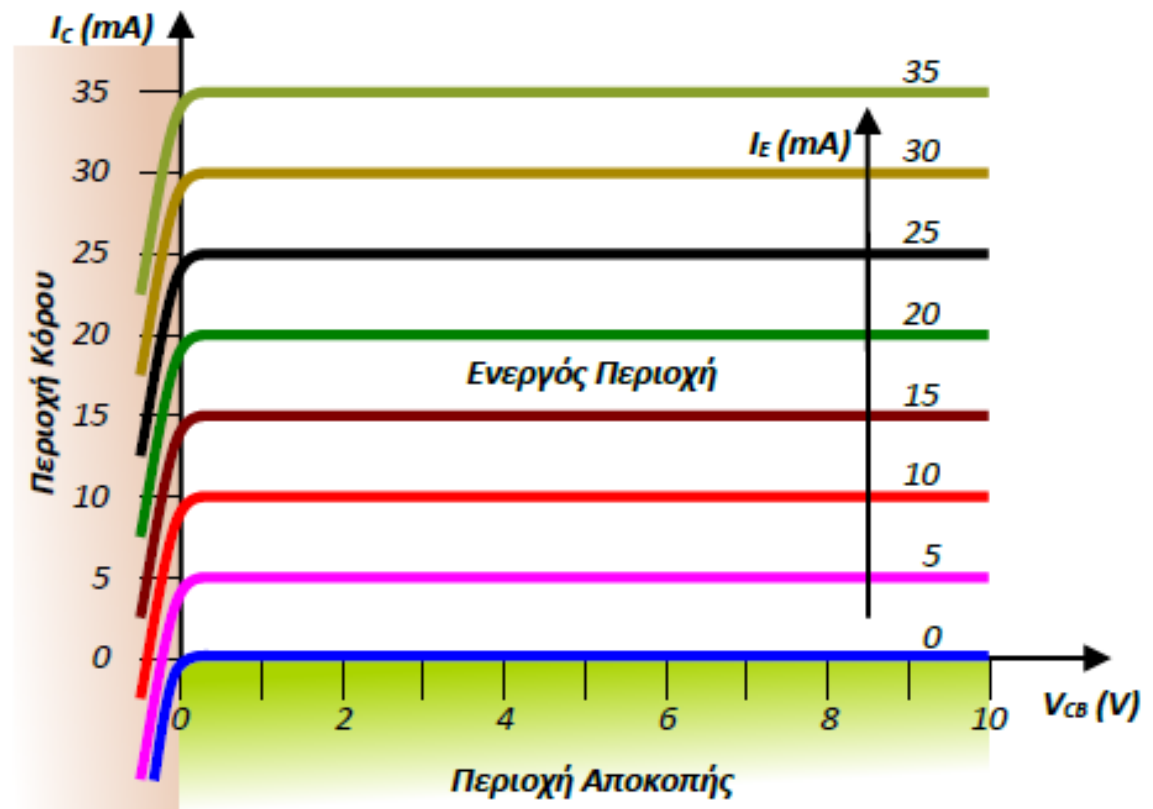
Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

- Αν η επαφή βάσης-συλλέκτη πολωθεί και αυτή ορθά, τότε το τρανζίστορ εισέρχεται στην περιοχή κόρου (saturation region).
- Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα του συλλέκτη θα αντιστρέψει τη φορά του σε σχέση με εκείνη στην ενεργό λειτουργία και η τιμή του θα εξαρτάται πάρα πολύ από την τιμή της τάσης V_{CB} ορθής πόλωσης της επαφής βάσης-συλλέκτη.

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

- Τα πιο πάνω συμπεράσματα συνοψίζονται στο σμήνος χαρακτηριστικών του παρακάτω σχήματος και αφορούν το διπολικό τρανζίστορ ανεξάρτητα από τον τύπο της συνδεσμολογίας που χρησιμοποιείται.

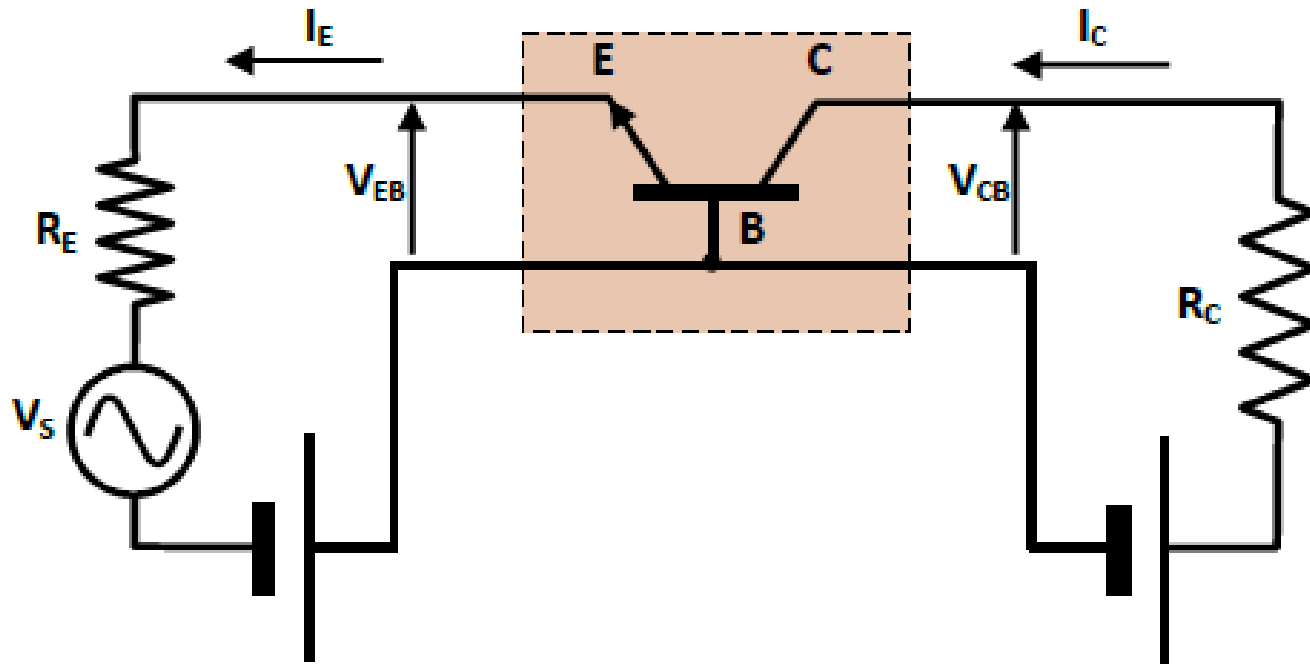
Σμήνος χαρακτηριστικών $I_C - V_{CB}$ για ιδανικό διπολικό τρανζίστορ



Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικές εισόδου για τη συνδεσμολογία κοινής βάσης

Έστω η συνδεσμολογία κοινής βάσης του παρακάτω σχήματος.
(Θεωρούμε το τρανζίστορ ως δίθυρη διάταξη-τετράπλο).



Η θύρα εισόδου αποτελείται από τον ακροδέκτη του εκπομπού και τον ακροδέκτη της βάσης, ενώ η θύρα εξόδου από τον ακροδέκτη του συλλέκτη και τον (κοινό) ακροδέκτη της βάσης.

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικές εισόδου για τη συνδεσμολογία κοινής βάσης

Κατά σύμβαση: θεωρούμε ως θετικά τα ρεύματα που εισέρχονται σε κάποιον ακροδέκτη του διθύρου και ως αρνητικά εκείνα που εξέρχονται.

Το ρεύμα εισόδου του διθύρου θα είναι ίσο με $-I_E$, ενώ η τάση εισόδου θα είναι προφανώς ίση με V_{EB} .

Για αποφυγή τυχόν σύγχυσης με τα πρόσημα, θα θεωρήσουμε ως ρεύμα εισόδου το ρεύμα I_E , ενώ ως τάση εισόδου την τάση V_{BE} .

Σημείωση: Η μορφή των αντίστοιχων χαρακτηριστικών εισόδου δεν θα επηρεαστεί από την παραδοχή αυτή.

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικές εισόδου για τη συνδεσμολογία κοινής βάσης

Η επαφή εκπομπού-βάσης (EB), η οποία και καθορίζει τη μορφή των χαρακτηριστικών εισόδου του διθύρου, συμπεριφέρεται όπως μια ορθά πολωμένη δίοδος, επομένως οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές θα προκύπτουν από τον **νόμο της επαφής EB**:

$$I_E = I_S \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_\theta}} - 1 \right)$$

όπου I_S το ανάστροφο ρεύμα κόρου και ο **συντελεστής ιδανικότητας** (n) θεωρήθηκε ίσος με τη μονάδα.

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικές εισόδου για τη συνδεσμολογία κοινής βάσης

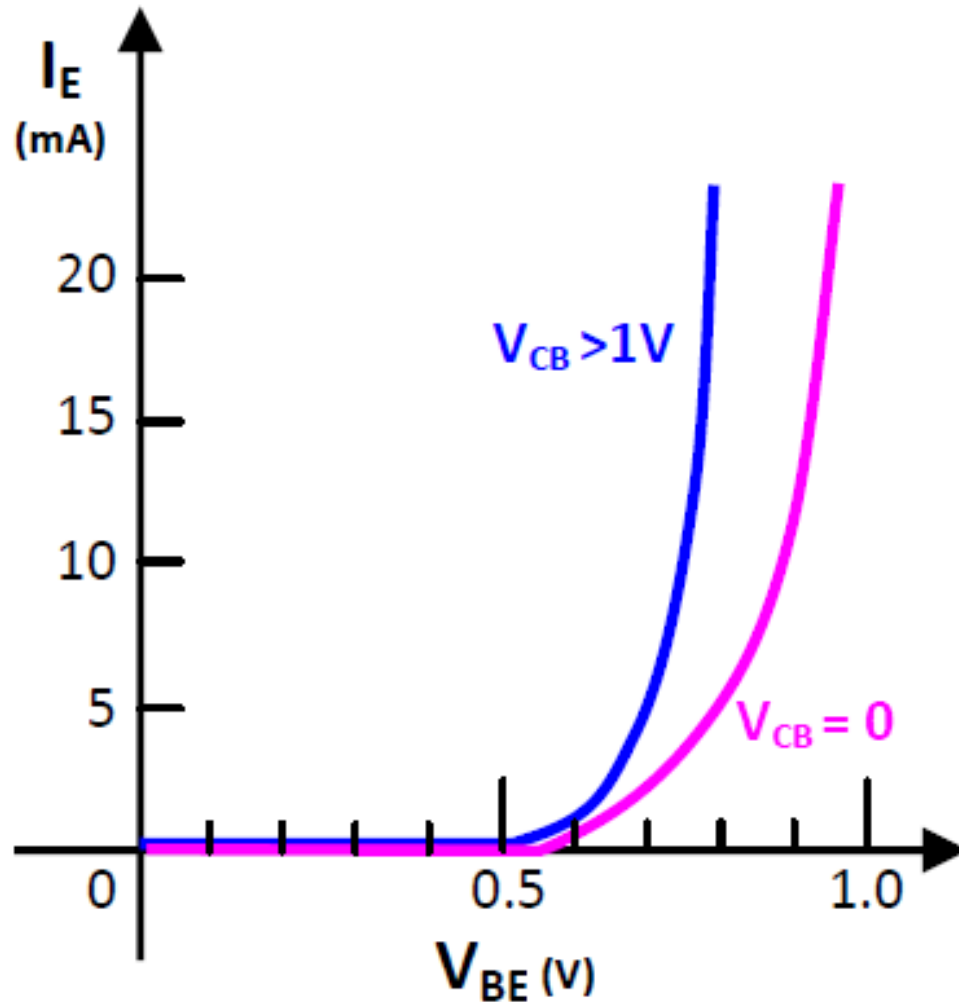
→ Με την αύξηση της τιμής της τάσης ανάστροφης πόλωσης της επαφής συλλέκτη-βάσης ($V_{CB} > 0$), και για δεδομένη τάση V_{EB} , το ρεύμα I_E του εκπομπού θα αυξηθεί, γιατί το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης της επαφής CB αυξάνεται, με αποτέλεσμα το «ενεργό» πλάτος της βάσης να μειώνεται.

→ Οπότε, η σάρωση των ηλεκτρονίων προς τον συλλέκτη είναι ταχύτερη και το ρεύμα του συλλέκτη μεγαλύτερο.

→ Άρα και η «ανατροφοδότηση» ηλεκτρονίων από τον συλλέκτη προς τον εκπομπό θα είναι ταχύτερη και άρα και το ρεύμα του εκπομπού μεγαλύτερο.

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικές εισόδου για τη συνδεσμολογία κοινής βάσης



Χαρακτηριστικές εισόδου για διπολικό τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινής βάσης

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικές εξόδου για τη συνδεσμολογία κοινής βάσης

→ Μας ενδιαφέρει η σχέση του ρεύματος εξόδου I_C με την τάση εξόδου V_{CB} , λαμβάνοντας υπόψη και την εξάρτηση του ρεύματος του συλλέκτη I_C από το ρεύμα του εκπομπού I_E (ρεύμα εισόδου).

Η επαφή συλλέκτη-βάσης είναι ανάστροφα πολωμένη, άρα το ρεύμα του συλλέκτη I_C εξαρτάται αποκλειστικά από το ρεύμα του εκπομπού I_E .

Όταν το ρεύμα του εκπομπού είναι μηδενικό, το ρεύμα του συλλέκτη είναι ίσο με το ανάστροφο ρεύμα της επαφής CB (I_{CBO}), που είναι, προφανώς, πάρα πολύ μικρό.

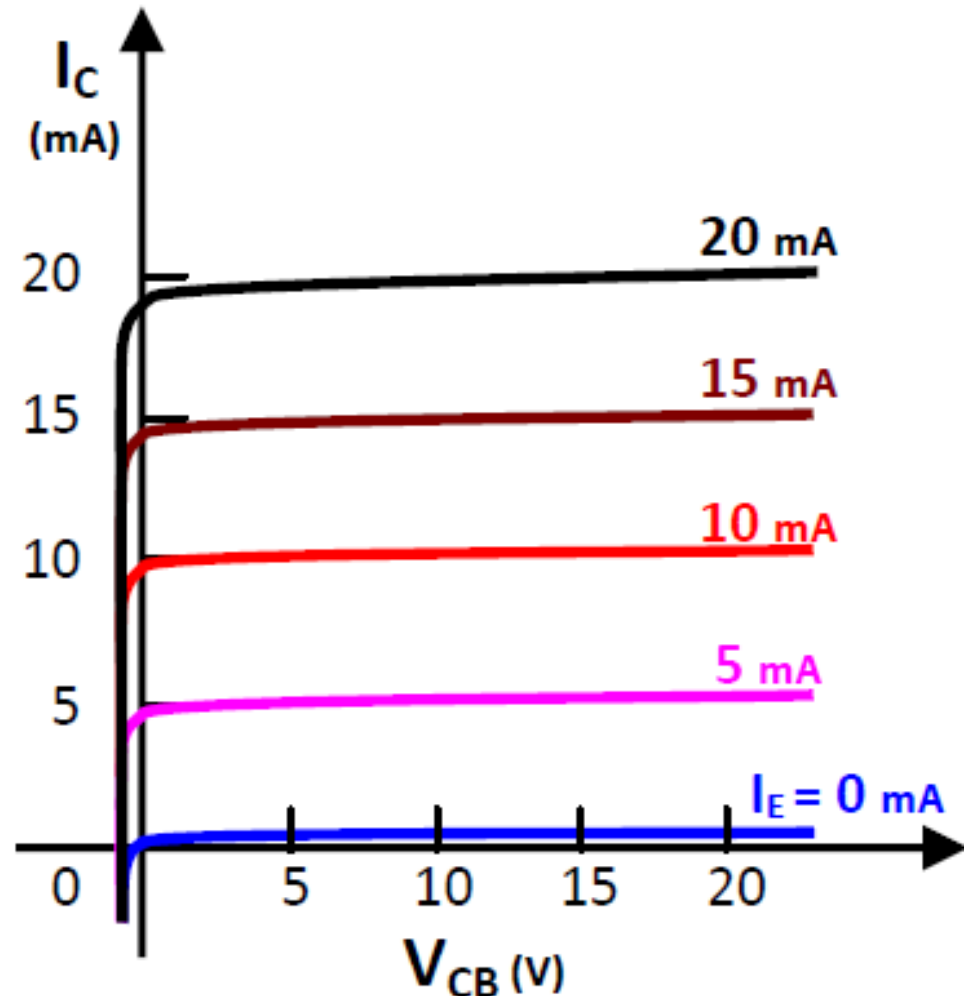
Όταν το ρεύμα του εκπομπού αυξάνεται, αυξάνεται αντίστοιχα και το ρεύμα του συλλέκτη, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (βλ. προηγ.):

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

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικές εξόδου για τη συνδεσμολογία κοινής βάσης

Για δεδομένο ρεύμα εκπομπού I_E , αύξηση της τάσης V_{CB} προκαλεί ελαφρά αύξηση του κλάσματος του τρανζίστορ και επομένως και του ρεύματος συλλέκτη I_C .

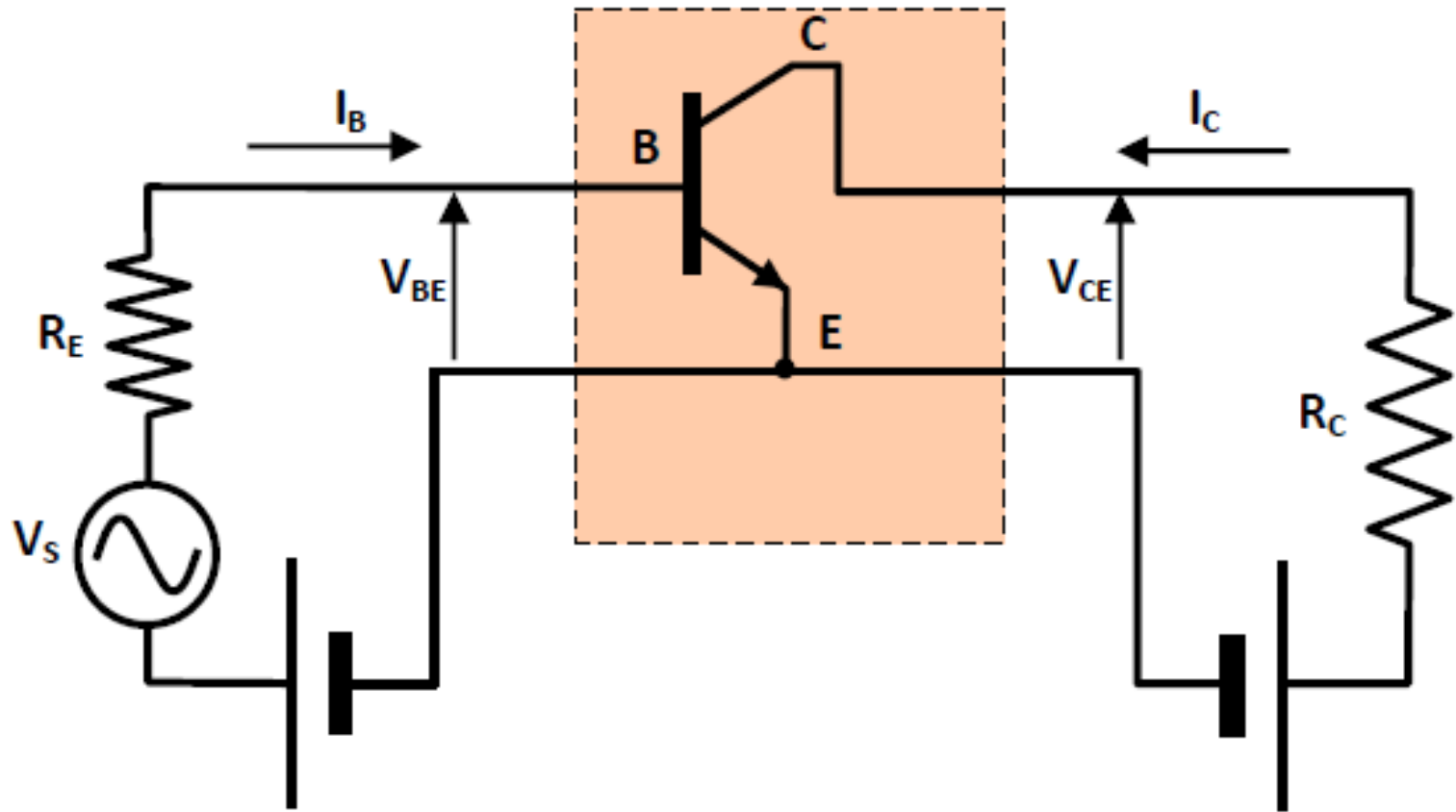


Χαρακτηριστικές εξόδου για διπολικό τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινής βάσης

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικές εισόδου για τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

Έστω η παρακάτω συνδεσμολογία κοινού εκπομπού



Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικές εισόδου για τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

Αντιμετωπίζουμε το τρανζίστορ ως **δίθυρη διάταξη**.

→ η **θύρα εισόδου** αποτελείται από τον ακροδέκτη της βάσης και τον ακροδέκτη του εκπομπού, ενώ

→ η **θύρα εξόδου** από τον ακροδέκτη του συλλέκτη και τον (κοινό) ακροδέκτη του εκπομπού.

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικές εισόδου για τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

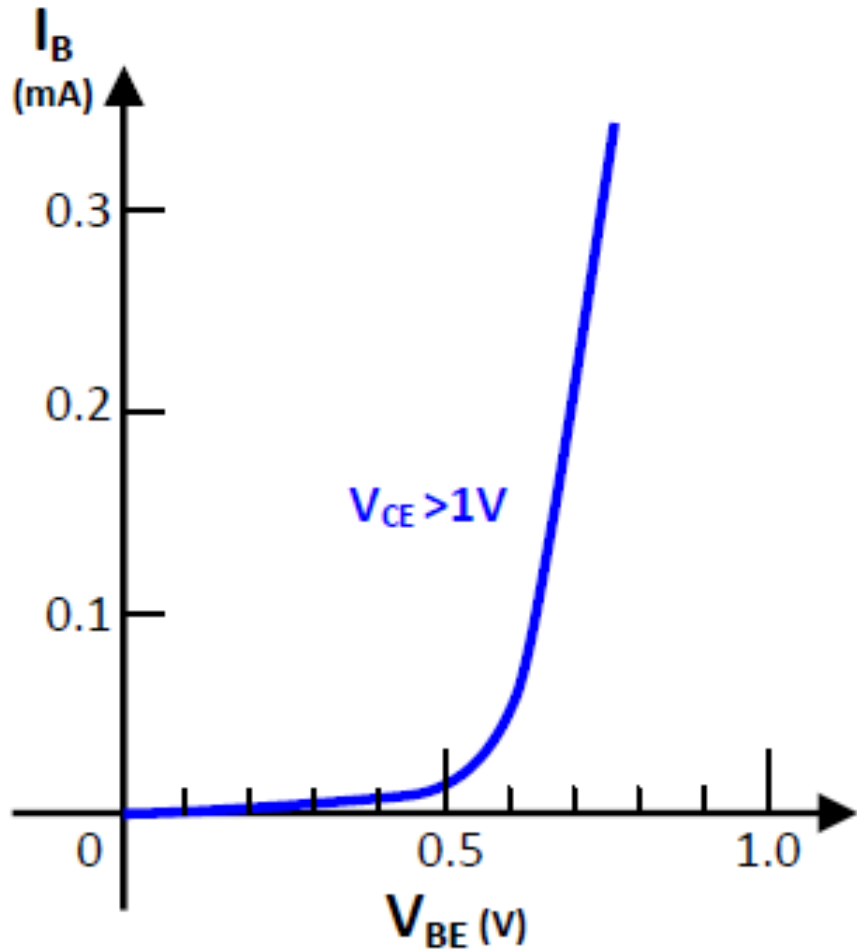
Η επαφή εκπομπού-βάσης (EB), που καθορίζει τη μορφή των χαρακτηριστικών εισόδου του διθύρου, συμπεριφέρεται όπως μια **ορθά** πολωμένη δίοδος, επομένως οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές θα προκύπτουν από τον νόμο της επαφής EB:

$$I_B = I_S \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_\theta}} - 1 \right)$$

Σημείωση: Η επίδραση της τάσης V_C στην τιμή του ρεύματος της βάσης I_B είναι αμελητέα.

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικές εισόδου για τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού



Χαρακτηριστικές εισόδου για διπολικό τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικές εξόδου για τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

Για το κύκλωμα εξόδου της συνδεσμολογίας κοινού εκπομπού, μας ενδιαφέρει η σχέση του ρεύματος εξόδου I_C με την τάση εξόδου V_C .

Ακόμη, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η εξάρτηση του ρεύματος του συλλέκτη I_C από το ρεύμα της βάσης I_B (ρεύμα εισόδου).

Το ρεύμα του συλλέκτη σχετίζεται με το ρεύμα της βάσης σύμφωνα με τη σχέση:

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

Με ανοικτό το κύκλωμα της βάσης ($I_B = 0$) η παραπάνω σχέση δίνει:

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

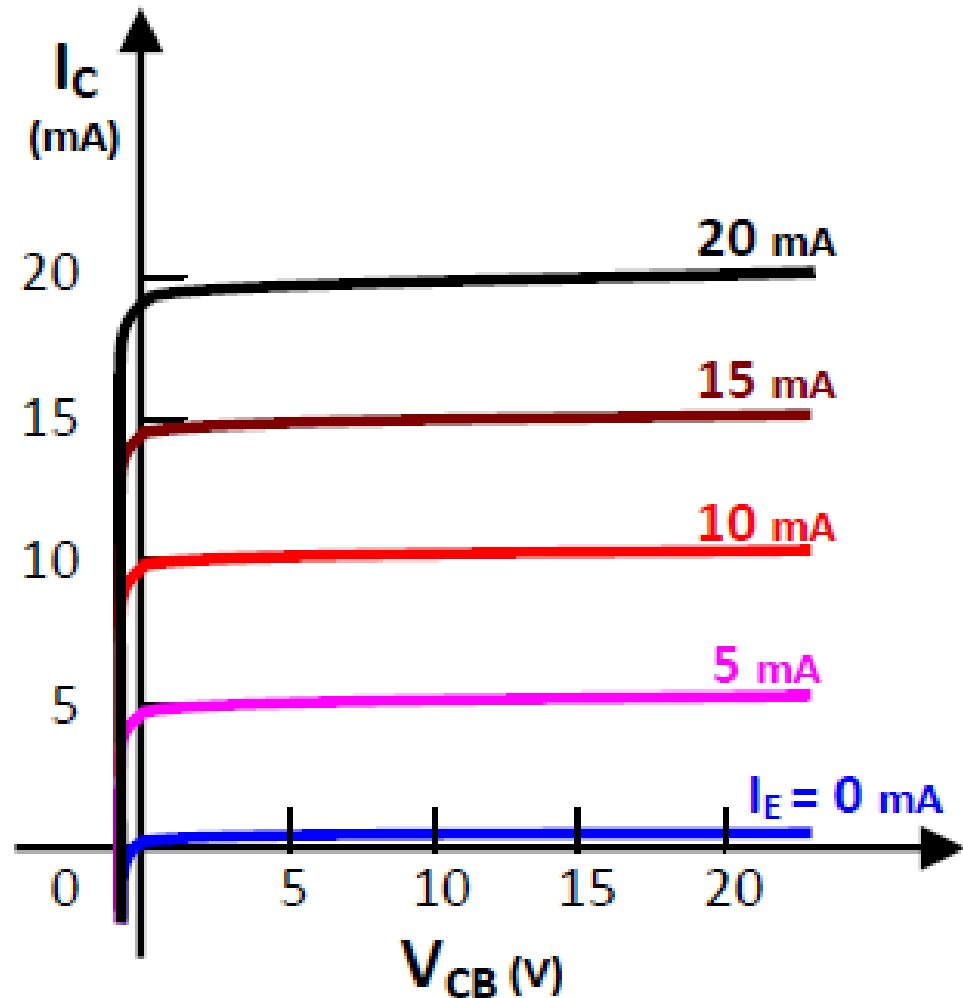
Σημείωση: Για δεδομένο ρεύμα εκπομπού I_E , αύξηση της τάσης V_{CB} προκαλεί ελαφρά αύξηση του κλάσματος του τρανζίστορ και επομένως και του ρεύματος συλλέκτη I_C .

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικές εξόδου για τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

Χαρακτηριστικές εξόδου για διπολικό τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

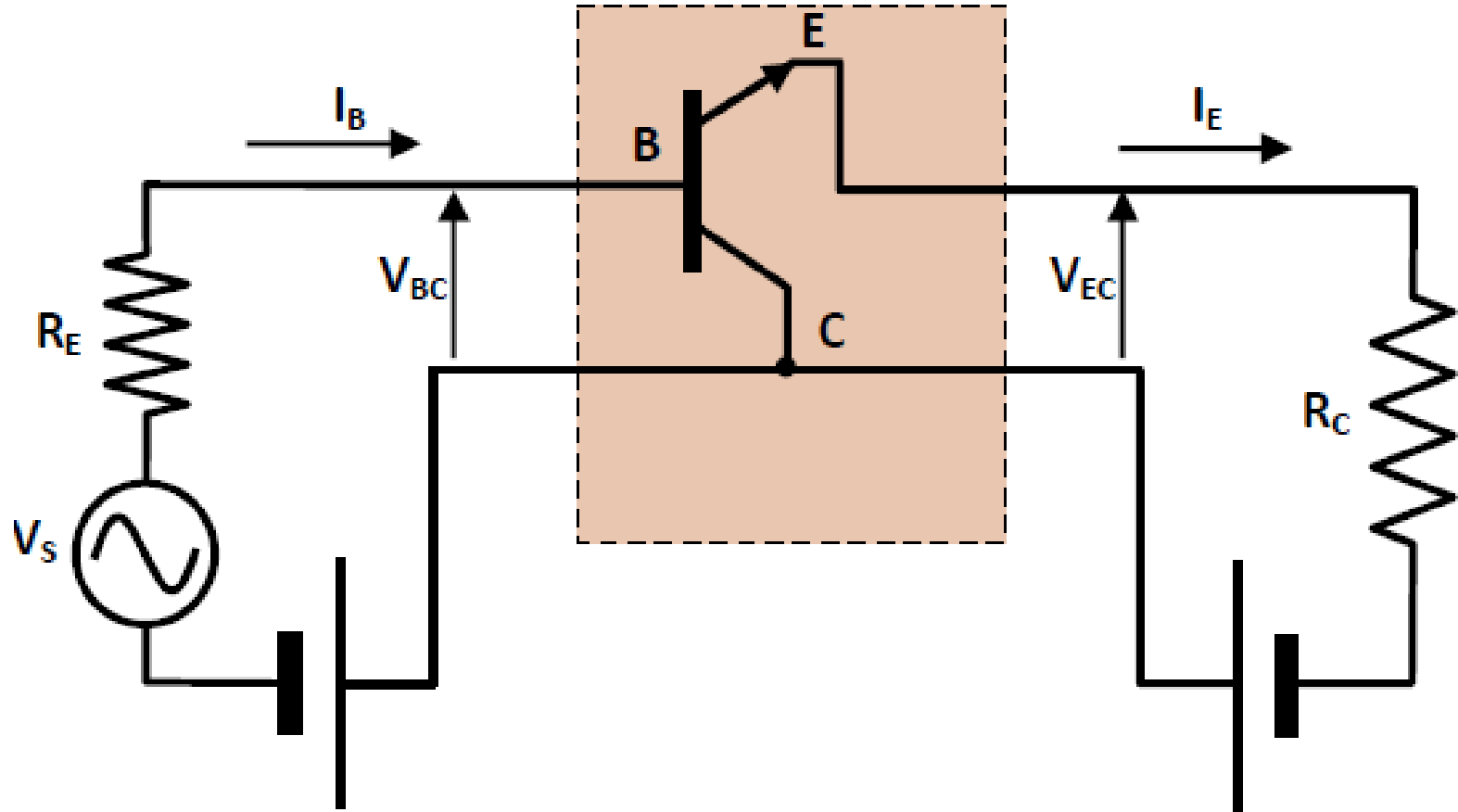
Σημείωση: Η ελαφρά κλίση των χαρακτηριστικών δικαιολογείται από την αύξηση του α (επομένως και του β) με την αύξηση της τάσης V_{CE} .



Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικές εισόδου για τη συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη

Συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη με το τρανζίστορ ως δίθυρη διάταξη



Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Χαρακτηριστικές εισόδου/εξόδου για τη συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη

Για την περίπτωση της συνδεσμολογίας κοινού συλλέκτη ισχύουν όσα αναφέραμε και για τη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού, αφού η πρώτη μπορεί να προκύψει από τη δεύτερη με αμοιβαία εναλλαγή του συλλέκτη και του εκπομπού.

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Σύγκριση συνδεσμολογιών κοινής βάσης/κοινού εκπομπού

Η βασικότερη διαφορά μεταξύ των συνδεσμολογιών κοινής βάσης και κοινού εκπομπού είναι η εξής:

→ Στη συνδεσμολογία κοινής βάσης το ρεύμα εξόδου (I_C) είναι περίπου ίσο με το ρεύμα εισόδου (I_E).

→ Αντίθετα, στη συνδεσμολογία κοινού εκπομπού το ρεύμα εξόδου (I_C) είναι πολλαπλάσιο του ρεύματος εισόδου (I_B).

→ Αυτό συνεπάγεται πως με την πρώτη συνδεσμολογία είναι αδύνατη η ενίσχυση ρεύματος, ενώ με τη δεύτερη είναι δυνατή.

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Θερμοκρασιακή εξάρτηση των χαρακτηριστικών εισόδου/εξόδου

Κατά τη σχεδίαση κυκλωμάτων με τρανζίστορ θα πρέπει να έχουμε υπόψη μας την εξάρτηση των χαρακτηριστικών εισόδου/εξόδου από τη θερμοκρασία.

Οι παράμετροι a και β εξαρτώνται σημαντικά από τη θερμοκρασία, με αποτέλεσμα αντίστοιχη εξάρτηση των χαρακτηριστικών.

Για την εξασφάλιση της ανοχής των κυκλωμάτων στις θερμοκρασιακές μεταβολές χρησιμοποιούνται κατάλληλες τεχνικές (μερικές από τις οποίες θα εξεταστούν στη συνέχεια).

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στην ενεργό περιοχή

Όπως ήδη τονίστηκε, ένα τρανζίστορ για να χρησιμοποιείται ως στοιχείο ενίσχυσης θα πρέπει να λειτουργεί στην ενεργό περιοχή.

Για να συμβαίνει αυτό θα πρέπει να πολώνεται κατάλληλα με τη χρήση πηγών τροφοδοσίας και αντιστατών προκειμένου να τίθεται στο επιθυμητό **σημείο λειτουργίας (ηρεμίας)**.

Θα εξεταστούν μερικοί τυπικοί τρόποι πόλωσης του διπολικού τρανζίστορ στην ενεργό περιοχή λειτουργίας και θα παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του καθενός.

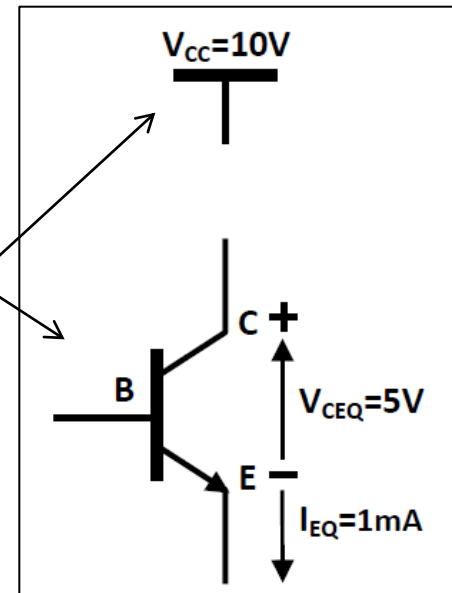
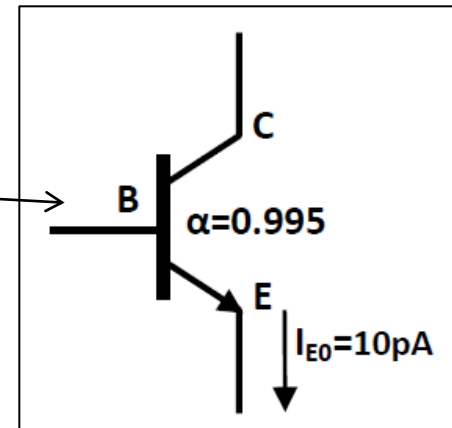
Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στην ενεργό περιοχή

Έστω τρανζίστορ npn. Γνωρίζω (από κατασκευαστή) ότι $\alpha=0.995$, και $I_{E0}=10\text{pA}$, όπου I_{E0} το ανάστροφο ρεύμα κόρου για την επαφή εκπομπού-βάσης.

Έστω ότι το τρανζίστορ πρέπει να πολωθεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε η τάση ηρεμίας μεταξύ συλλέκτη και εκπομπού V_{CEQ} να είναι ίση με 5V, και το ρεύμα ηρεμίας I_{EQ} του εκπομπού να είναι ίσο με 1mA.

Για την πόλωση του συλλέκτη χρησιμοποιείται μια πηγή σταθερής τάσης $V_{CC}=10\text{V}$.

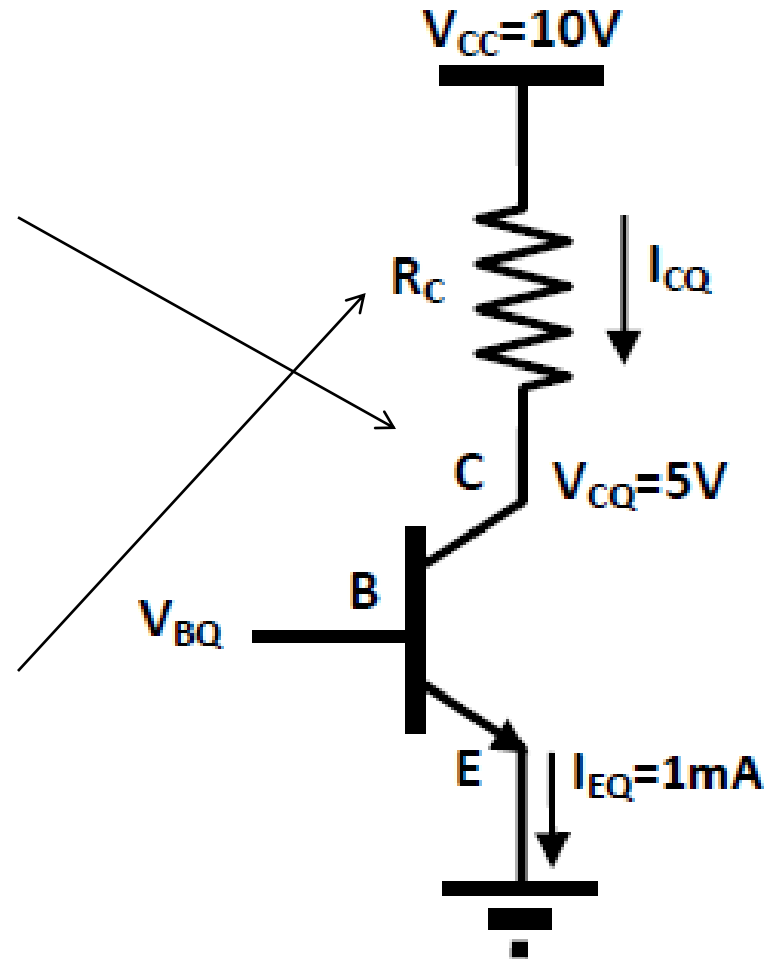


Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στην ενεργό περιοχή

Αν χρησιμοποιήσουμε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού (γειώσουμε, δηλαδή, τον εκπομπό), τότε η τάση ηρεμίας V_{CQ} του συλλέκτη θα είναι ίση με V_{CEQ} ($=5V$).

Επειδή η τιμή της τάσης αυτής είναι διαφορετική της τάσης τροφοδοσίας V_{CC} , παρεμβάλουμε μεταξύ της πηγής τροφοδοσίας και του συλλέκτη αντιστάτη R_C , ο οποίος θα προκαλεί την απαραίτητη πτώση τάσης ώστε η τάση στον συλλέκτη να έχει την επιθυμητή τιμή.



Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στην ενεργό περιοχή

Η τιμή της αντίστασης R_C θα υπολογιστεί από τον νόμο του Ohm ως εξής:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CQ}}{I_{CQ}}$$

Για τον υπολογισμό του ρεύματος ηρεμίας του συλλέκτη (I_{CQ}) θα χρησιμοποιήσουμε τη γνωστή σχέση:

$$I_C = \alpha I_E$$

Για τις τιμές των ρευμάτων ηρεμίας γράφεται: $I_{CQ} = \alpha I_{EQ}$

Οπότε:

$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CQ}}{\alpha I_{EQ}}$$

Με αντικατάσταση των αριθμητικών δεδομένων έχουμε: $R_C = 5.025\text{k}\Omega$.

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στην ενεργό περιοχή

Κατόπιν, θα υπολογίσουμε την τιμή της τάσης ηρεμίας μεταξύ της βάσης και του εκπομπού (V_{BEQ} , ή V_{BQ} αφού ο εκπομπός είναι γειωμένος και, επομένως, το δυναμικό του είναι μηδενικό), που είναι απαραίτητη ώστε το ρεύμα I_{EQ} του εκπομπού να έχει την επιθυμητή τιμή του 1mA.

Έχουμε τη σχέση που αντιστοιχεί στον νόμο της επαφής βάσης-εκπομπού:

$$I_E = I_{E0} \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_\theta}} - 1 \right)$$

Οι τιμές τάσης βάσης-εκπομπού που χρησιμοποιούμε είναι πολύ μεγαλύτερες της θερμικής τάσης V , οπότε

$$I_E = I_{E0} e^{\frac{V_{BE}}{V_\theta}} \quad \leftarrow \text{Αυτήν θα χρησιμοποιούμε στο εξής.}$$

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στην ενεργό περιοχή

Λύνοντας ως προς V_{BE} έχουμε:

$$V_{BE} = V_{\theta} \ln \frac{I_E}{I_{E0}}$$

η οποία, για τις αντίστοιχες τιμές ηρεμίας, γράφεται:

$$V_{BQ} = V_{\theta} \ln \frac{I_{EQ}}{I_{E0}}$$

Αριθμητικά: Αν λάβουμε υπόψη μας πως η τιμή της θερμικής τάσης V είναι περίπου ίση με 25mV και με αντικατάσταση των αριθμητικών δεδομένων στη παραπάνω σχέση βρίσκουμε πως η τιμή της τάσης πόλωσης V_{BQ} της βάσης θα πρέπει να είναι ίση με 0.632V.

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Άμεση πόλωση στη βάση

Η τάση V_{BQ} την οποία υπολογίσαμε πιο πάνω μπορεί να εφαρμοστεί άμεσα στη βάση του τρανζίστορ κατά τον τρόπο που φαίνεται στο διπλανό σχήμα.

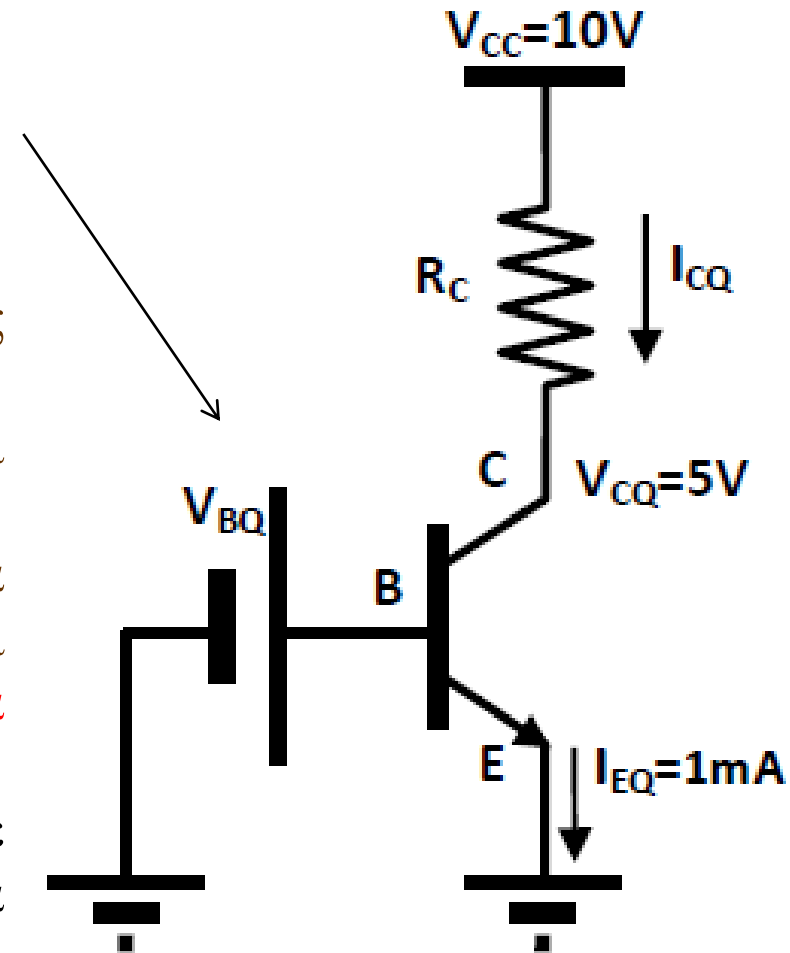
Μειονεκτήματα αυτού του τρόπου πόλωσης:

→ Το κύκλωμα απαιτεί δύο ανεξάρτητες πηγές τροφοδοσίας (τις V_{CC} και V_{BQ}).

→ Η τάση τροφοδοσίας V_{BQ} έχει τιμή μικρή και δύσκολα επιτεύξιμη στην απαιτούμενη ακρίβεια.

→ Άρα, η πηγή τάσης V_{BQ} θα πρέπει να ρυθμίζεται με πολύ μεγάλη ακρίβεια και να είναι πολύ καλά σταθεροποιημένη (**πολύ δύσκολο να επιτευχθεί στην πράξη**).

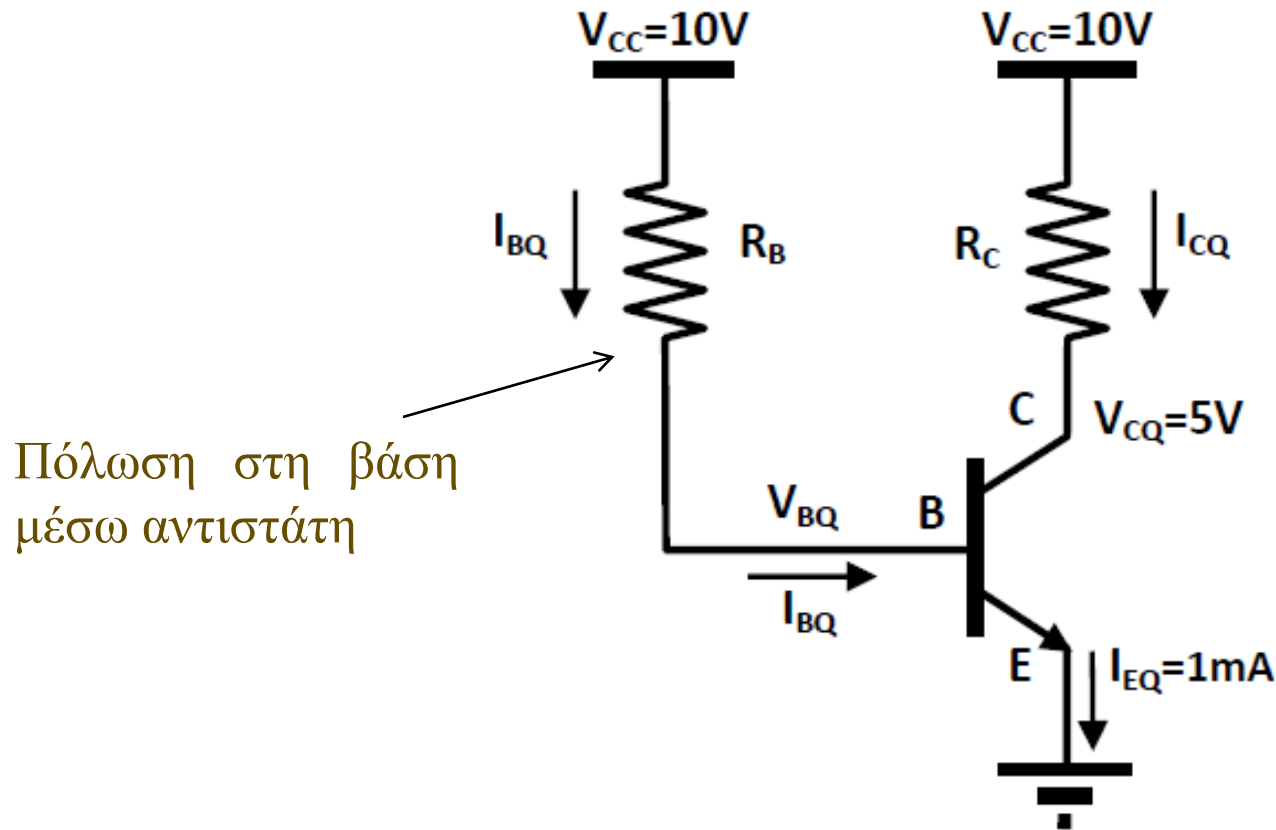
Συμπέρασμα: η πόλωση του τρανζίστορ με άμεση πόλωση στη βάση είναι εξαιρετικά ασταθής.



Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στη βάση μέσω αντιστάτη

Τροποποιώντας παραπάνω κύκλωμα έχουμε:



Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στη βάση μέσω αντιστάτη

Αντί για τη ρύθμιση της τάσης V_{BQ} θα προσπαθήσουμε να ρυθμίσουμε το ρεύμα ηρεμίας I_{BQ} της βάσης.

Επιτυγχάνοντας την κατάλληλη τιμή αυτού του ρεύματος, η τάση V_{BQ} θα προσαρμοστεί «αυτόματα», ώστε να λάβει την κατάλληλη τιμή (ίση με 0.632V για το παράδειγμα που εξετάζουμε).

Ας υπολογίσουμε την τιμή που θα πρέπει να έχει το ρεύμα ηρεμίας I_{BQ} της βάσης. Θα χρησιμοποιήσουμε τη σχέση:

$$I_C = \beta I_B$$

για τις τιμές ηρεμίας γράφεται:

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} \quad \Rightarrow \quad I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta}$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι: $I_{CQ} = \alpha I_{EQ}$

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στη βάση μέσω αντιστάτη

Έχουμε: $I_{BQ} = \frac{\alpha I_{EQ}}{\beta}$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση: $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$

Προκύπτει τελικά: $I_{BQ} = (1 - \alpha)I_{EQ}$

Με αντικατάσταση των αριθμητικών δεδομένων βρίσκουμε ότι το ρεύμα ηρεμίας της βάσης είναι:

$$I_{BQ} \approx 5\mu A$$

Ας υπολογίσουμε, τώρα, την τιμή της αντίστασης R_B η οποία απαιτείται για να λάβει το ρεύμα I_{BQ} την πιο πάνω τιμή. Με βάση το κύκλωμα του προηγούμενου σχήματος θα ισχύει:

$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BQ}}{R_B} \Rightarrow R_B = \frac{V_{CC} - V_{BQ}}{I_{BQ}}$$

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στη βάση μέσω αντιστάτη

Αντικαθιστώντας στην τελευταία τα αριθμητικά δεδομένα, η τιμή της αντίστασης πόλωσης είναι $R_B = 1.87M\Omega$.

Το πλεονέκτημα της συνδεσμολογίας είναι ότι χρησιμοποιεί μοναδική πηγή τροφοδοσίας τόσο για την πόλωση του συλλέκτη όσο και για την πόλωση της βάσης. Ωστόσο, όπως και η προηγούμενη, είναι **ασταθής**.

Αν αντικαταστήσουμε την έκφραση του α σε σχέση με το β :

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

παίρνουμε:

$$I_{BQ} = \frac{1}{\beta + 1} I_{EQ}$$

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στη βάση μέσω αντιστάτη

Έχοντας υπόψη μας τη μεγάλη διακύμανση του β (η οποία οφείλεται όχι μόνο στη θερμοκρασιακή του εξάρτηση αλλά και σε κατασκευαστικούς περιορισμούς οι οποίοι δεν επιτρέπουν την κατασκευή τρανζίστορ με β πολύ μεγάλης ακρίβειας), μπορούμε να συμπεράνουμε πως η τιμή του ρεύματος ηρεμίας της βάσης I_{BQ} θα είναι εξίσου ευμετάβλητη, όσο και το β .

Αυτό συνεπάγεται την **ασταθή πόλωση** όσον αφορά τη συγκεκριμένη συνδεσμολογία.

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στον εκπομπό

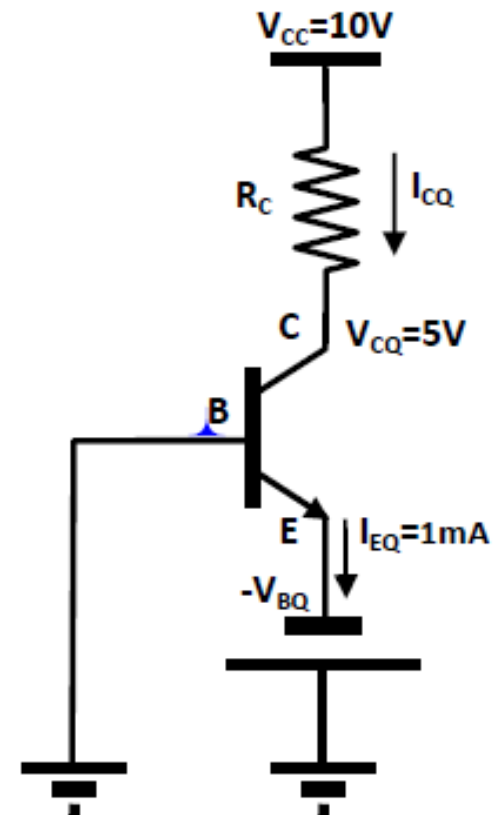
Η σταθερότητα στην πόλωση ενός διπολικού τρανζίστορ μπορεί να εξασφαλιστεί με απευθείας ρύθμιση του ρεύματος του εκπομπού.

Έστω το κύκλωμα του παρακάτω σχήματος

Η τάση ορθής πόλωσης της επαφής βάσης-εκπομπού παραμένει στην επιθυμητή τιμή.

Το πρόβλημα της χρήσης 2 διαφορετικών πηγών τροφοδοσίας υπάρχει και σε αυτή την περίπτωση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη συνδεσμολογία είναι μια συνδεσμολογία κοινής βάσης (καθώς η βάση είναι γειωμένη).



Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στον εκπομπό

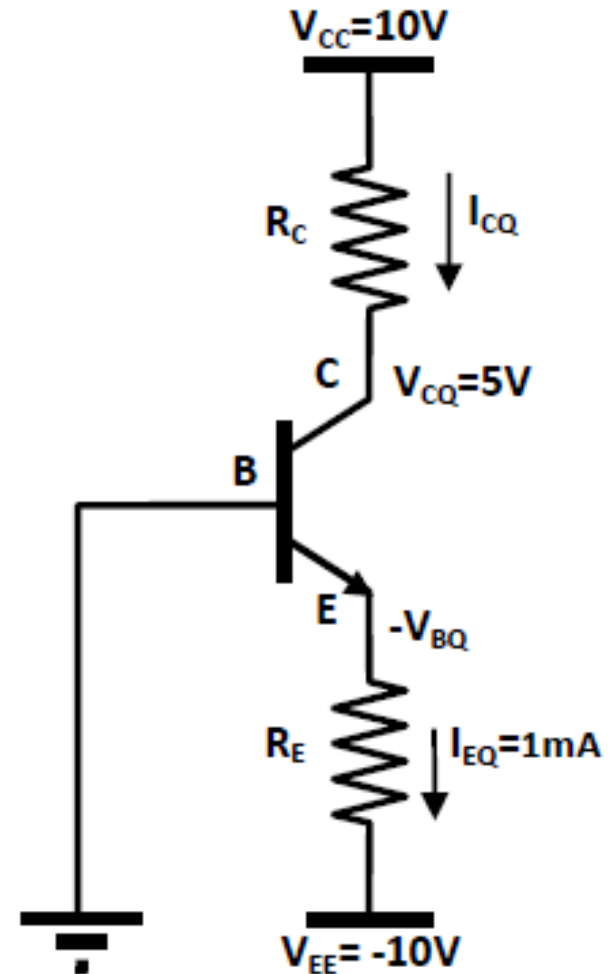
Μια περαιτέρω τροποποίηση μπορεί να γίνει με τη χρήση συμμετρικής τροφοδοσίας, σύμφωνα με το διπλανό σχήμα.

Η εισαγωγή της αντίστασης R_E στον εκπομπό είναι απαραίτητη ώστε να εξασφαλίζεται η κατάλληλη τιμή τάσης του εκπομπού, η οποία θα πρέπει να είναι ίση με $-V_{BQ}$, σύμφωνα με τα προηγούμενα.

Για τον αντιστάτη R_E ο νόμος του Ohm δίνει:

$$R_E = \frac{-V_{BQ} - V_{EE}}{I_{EQ}}$$

Με αντικατάσταση των αριθμητικών δεδομένων βρίσκουμε πως η τιμή της αντίστασης $R_E = 9.368 \text{ K}\Omega$.



Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στον εκπομπό

Με τη συγκεκριμένη συνδεσμολογία, οποιαδήποτε κι αν είναι η τιμή του β του τρανζίστορ, το ρεύμα της βάσης προσαρμόζεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε το ρεύμα του εκπομπού να παραμένει σταθερό και ίσο με I_{EQ} .

Ακόμα κι αν αντικαταστήσουμε το τρανζίστορ με ένα άλλο, από διαφορετικό κατασκευαστή, το ρεύμα του εκπομπού θα παραμείνει πρακτικά σταθερό.

Το ίδιο θα ισχύει και αν το β μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Έχουμε, δηλαδή, μια σταθερή συνδεσμολογία πόλωσης.

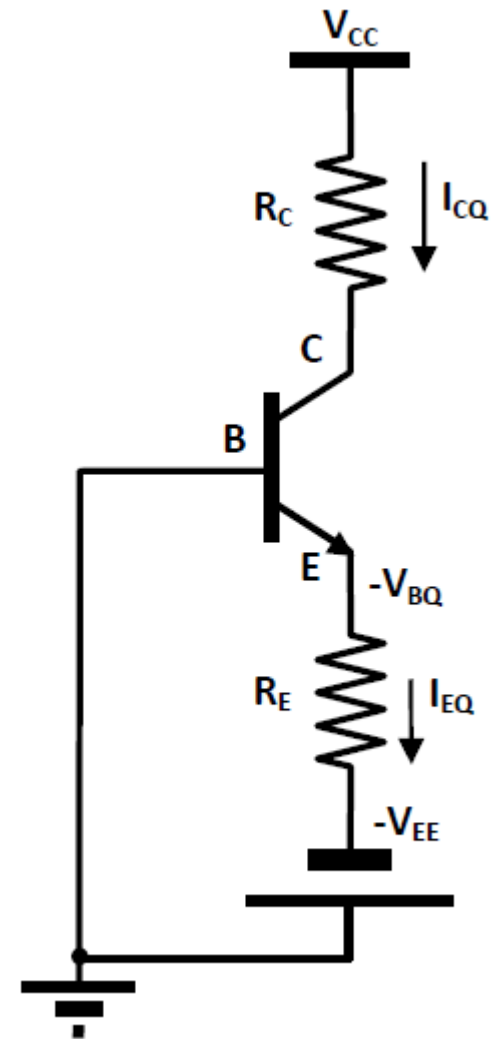
Το μειονέκτημά της είναι η χρήση δύο πηγών τροφοδοσίας.

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στη βάση και στον εκπομπό

(Συνδυασμός των δύο προηγούμενων περιπτώσεων)

Έστω η συνδεσμολογία του διπλανού σχήματος



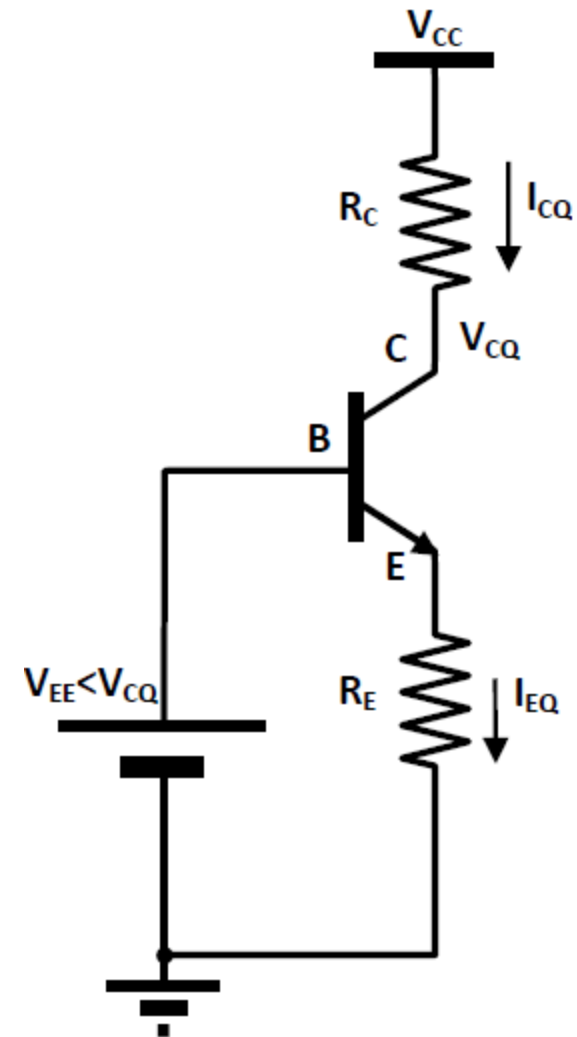
Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στη βάση και στον εκπομπό

Η πηγή τροφοδοσίας V_{EE} μπορεί να μεταφερθεί προς την πλευρά της βάσης, χωρίς να μεταβληθεί το κύκλωμα εισόδου του τρανζίστορ, οπότε έχουμε το διπλανό κύκλωμα (όπου, το ρεύμα του εκπομπού **δεν** επηρεάζεται).

Το τρανζίστορ για να παραμείνει στην ενεργό περιοχή θα πρέπει να ισχύει $V_{EE} < V_{CC}$, ώστε η επαφή βάσης - συλλέκτη να παραμένει ανάστροφα πολωμένη.

Για να ικανοποιείται η προηγούμενη ανισότητα θα πρέπει, προφανώς, να ισχύει $V_{EE} < V_{CC}$.

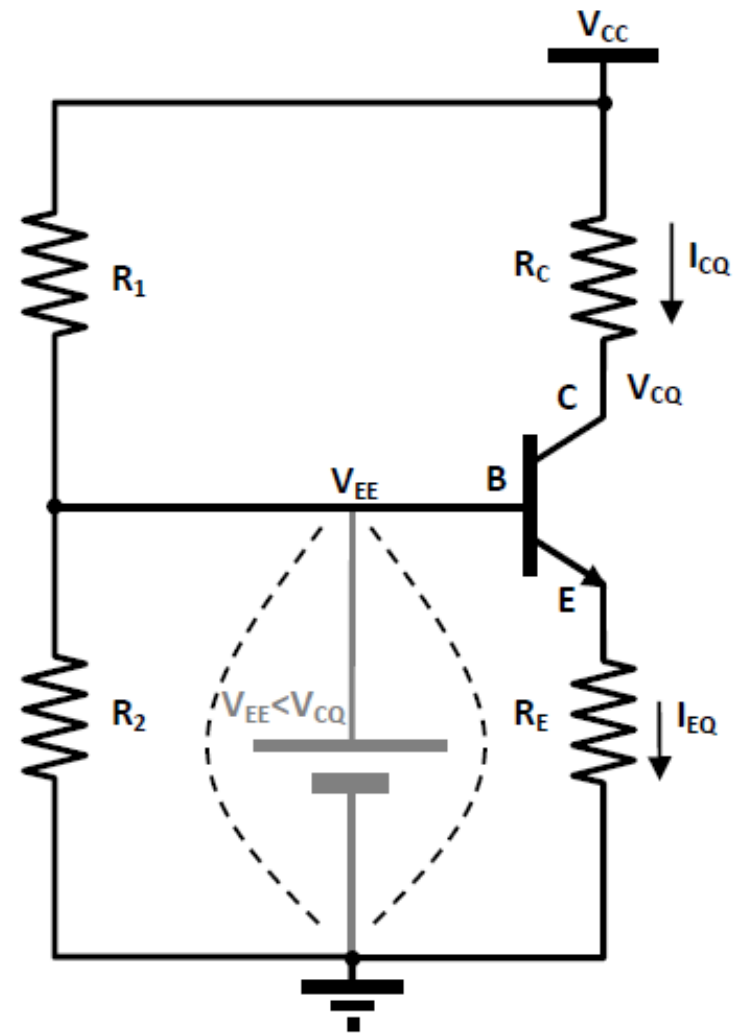


Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στη βάση και στον εκπομπό

Η πηγή τροφοδοσίας V_{EE} μπορεί να παραλειφθεί αν η τάση V_{EE} ληφθεί από την πηγή τροφοδοσίας V_{CC} μέσω διαιρέτη τάσης, με κατάλληλη επιλογή των τιμών των αντιστάσεων του διαιρέτη κατά τον τρόπο που υποδεικνύει το διπλανό σχήμα.

Τότε, ο διαιρέτης τάσης αντιστοιχεί σε μια **μη** ιδανική πηγή τάσης, δηλαδή σε μια πηγή τάσης με **μη** μηδενική τιμή εσωτερικής αντίστασης.



Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

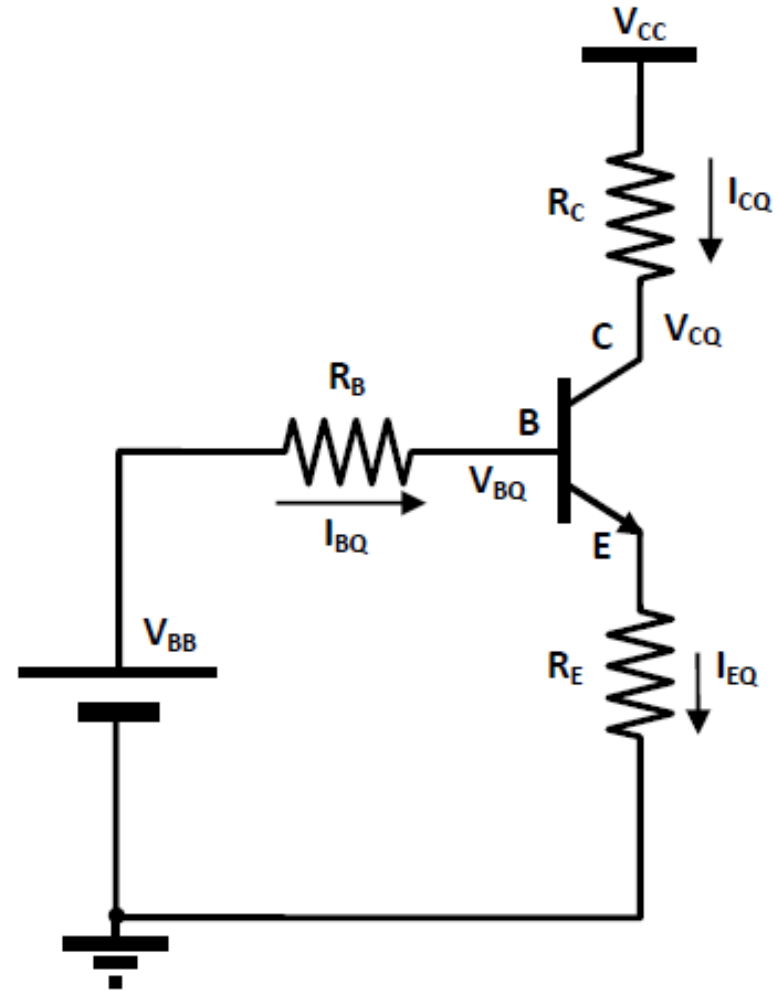
Πόλωση στη βάση και στον εκπομπό

Το δικτύωμα μεταξύ της βάσης και της γης για το κύκλωμα του παραπάνω σχήματος μπορεί να αντικατασταθεί από το αντίστοιχο ισοδύναμο Thevenin (βλ. διπλ. σχήμα) για το οποίο θα ισχύουν:

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

$$R_B = R_{Th} = R_1 // R_2$$

Η πώση τάσης πάνω στην «εσωτερική» αντίσταση θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο μικρή, ώστε $V_{BQ} \simeq V_{BB}$.



Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στη βάση και στον εκπομπό

Για την τάση V_{BQ} στη βάση ισχύει:

$$V_{BQ} = V_{BB} - I_{BQ}R_B$$

Επιπλέον,
$$V_{BQ} = V_{BEQ} + I_{EQ}R_E$$

Οπότε,
$$V_{BEQ} + I_{EQ}R_E = V_{BB} - I_{BQ}R_B$$

Εάν απαιτήσουμε να ισχύει: $I_{BQ}R_B \ll I_{EQ}R_E \longrightarrow$ (εύκολα, εξαιτίας της μεγάλης τιμής του β).

$$V_{BEQ} + I_{EQ}R_E = V_{BB} \Rightarrow I_{EQ} = \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{R_E}$$

Η παραπάνω σχέση υποδηλώνει σταθερότητα στην πόλωση καθώς τα μεγέθη τα οποία υπεισέρχονται σε αυτήν είναι **σταθερά** (απουσιάζουν ευμετάβλητοι όροι, όπως το β).

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

Πόλωση στη βάση και στον εκπομπό

Παρατήρηση: η συγκεκριμένη συνδεσμολογία δεν ταυτίζεται με καμιά από τις βασικές συνδεσμολογίες του τρανζίστορ (κοινού εκπομπού, κοινής βάσης, ή κοινού συλλέκτη) μιας και κανένας από τους τρεις ακροδέκτες του τρανζίστορ δεν είναι κοινός (γειωμένος).

Ισοδύναμα κυκλώματα

Η ανάλυση κυκλωμάτων που περιέχουν διπολικά τρανζίστορ μπορεί να απλοποιηθεί με την αντικατάσταση των τρανζίστορ με κάποιο **ισοδύναμο κύκλωμα**.

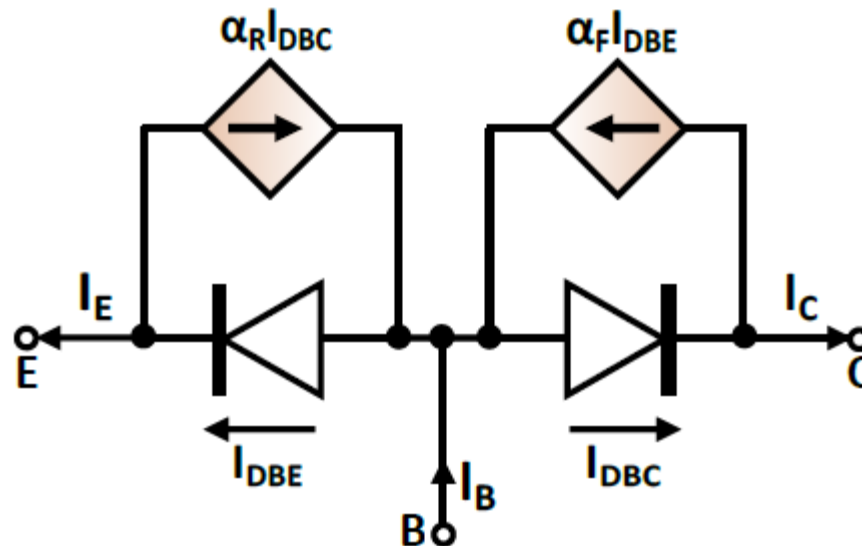
Από τα διάφορα ισοδύναμα κυκλώματα που υπάρχουν, επιλέγεται κάθε φορά το καταλληλότερο για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Π.χ. αναλύεται ένα κύκλωμα στις υψηλές συχνότητες, τότε θα πρέπει να επιλεγεί ένα ισοδύναμο κύκλωμα το οποίο να μπορεί να περιγράψει (να «μιμηθεί») με ακρίβεια τη συμπεριφορά ενός τρανζίστορ στις συχνότητες αυτές.

Ισοδύναμα κυκλώματα

Μοντέλο των Ebers-Moll

Αρκετά ακριβές μοντέλο το οποίο βασίζεται στο γεγονός ότι το διπολικό τρανζίστορ αποτελείται από δύο επαφές p-n: Την επαφή βάσης-εκπομπού και την επαφή βάσης-συλλέκτη.

Στο ισοδύναμο κύκλωμα που το περιγράφει, οι επαφές αντιστοιχούν σε δύο διόδους συνδεδεμένες η μία δίπλα στην άλλη (back to back) (βλ. παρακ. σχήμα).



Ισοδύναμα κυκλώματα

Μοντέλο των Ebers-Moll

Το ισοδύναμο κύκλωμα περιλαμβάνει, επίσης, δύο εξαρτημένες πηγές ρεύματος (ελεγχόμενες από ρεύμα) οι οποίες «μιμούνται» τον μηχανισμό «υποκλοπής» ηλεκτρονίων (που εξηγήθηκε προηγούμενα: Η μία (εκείνη μεταξύ βάσης και συλλέκτη) αφορά την ορθά ενεργό λειτουργία (active mode), ενώ η άλλη (μεταξύ εκπομπού και βάσης) αφορά την ανάστροφα ενεργό λειτουργία (reverse mode).

Το μοντέλο Ebers-Moll είναι ένα μοντέλο μεγάλου σήματος, δηλαδή, τα αποτελέσματα που δίνει αφορούν τις τιμές των μεγεθών τάσης ή ρεύματος χωρίς να γίνεται διάκριση σε DC ή AC συνιστώσα.

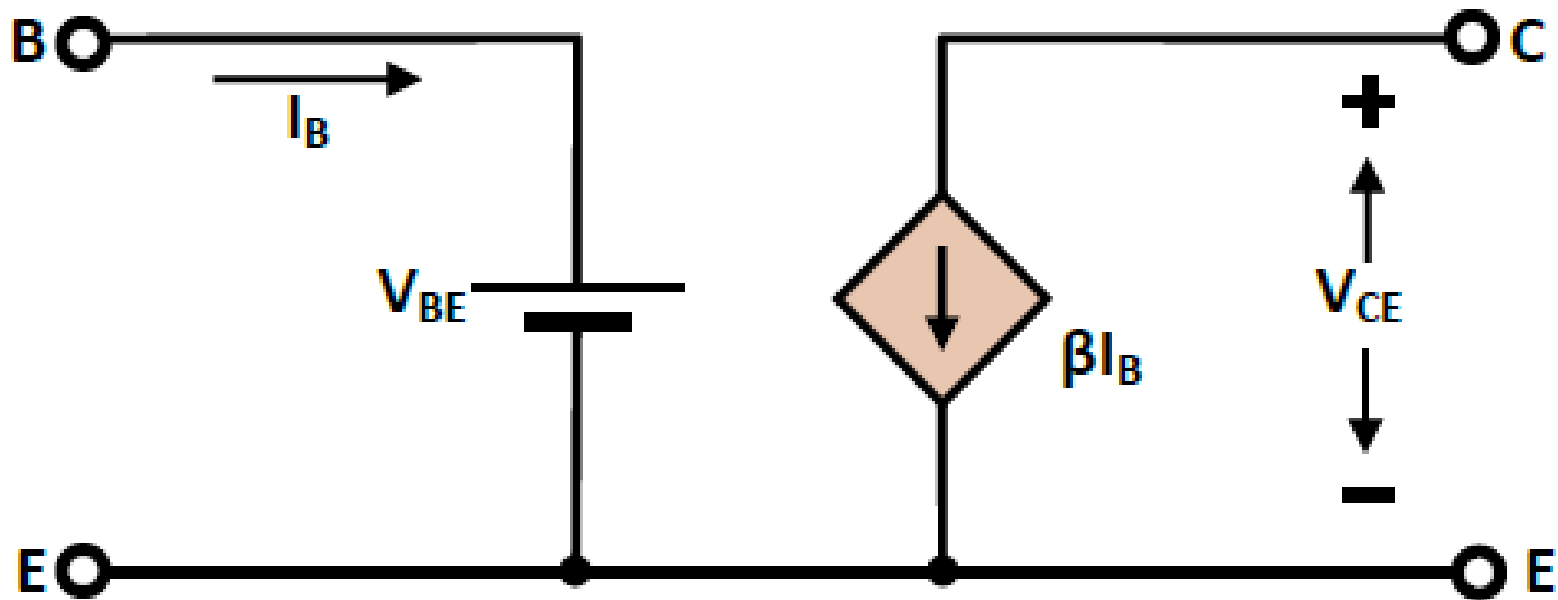
Η χρήση του κατά την ανάλυση «επί χάρτου» εμφανίζει το πρόβλημα πως οι εξισώσεις που το περιγράφουν είναι **μη γραμμικές** και επιλύονται δύσκολα.

Όμως, το μοντέλο Ebers-Moll είναι κατάλληλο για τη χρήση σε προσομοιωτές κυκλωμάτων, καθώς (α) δεν θέτει περιορισμούς στην τιμή του σήματος και (β) επειδή περιγράφει με επιτυχία όλες τις περιοχές λειτουργίας του τρανζίστορ.

Ισοδύναμα κυκλώματα

Μοντέλο για το συνεχές (DC)

Το ισοδύναμο κύκλωμα του παρακάτω σχήματος περιγράφει το διπολικό τρανζίστορ στην ορθά ενεργό λειτουργία.



Ισοδύναμα κυκλώματα

Μοντέλο για το συνεχές (DC)

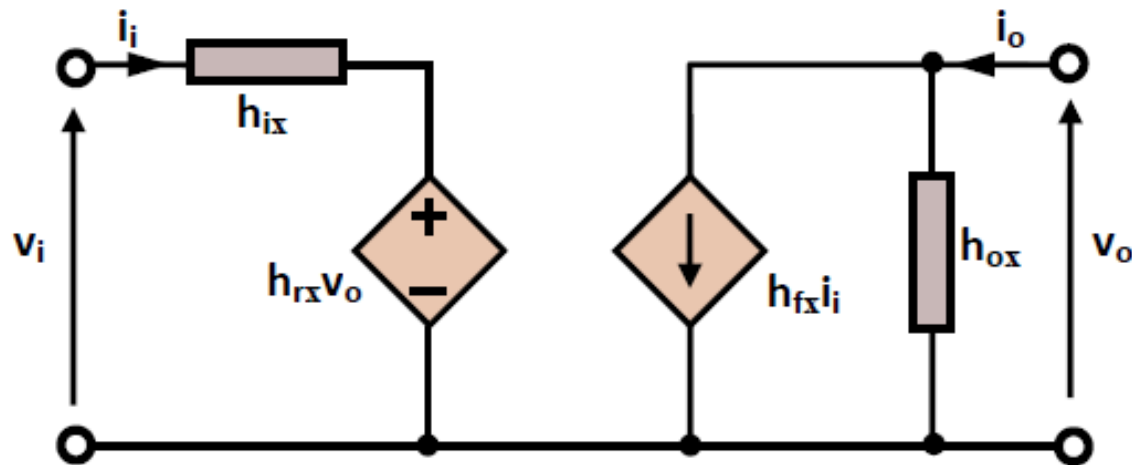
Για την επαφή βάσης-εκπομπού χρησιμοποιεί το μοντέλο της τυπικής διόδου σε ορθή πόλωση, ενώ για το ρεύμα I_C του συλλέκτη χρησιμοποιεί την προσέγγιση $I_C = I_B$, όπου I_B το ρεύμα της βάσης.

Πρόκειται για ένα μοντέλο μεγάλου σήματος, το οποίο χρησιμοποιείται για την DC ανάλυση κυκλωμάτων που περιέχουν διπολικά τρανζίστορ και αντιστοιχεί σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού.

Ισοδύναμα κυκλώματα

Μοντέλα μικρού σήματος

Τα μοντέλα μικρού σήματος που περιγράφουν ένα διπολικό τρανζίστορ προϋποθέτουν σήματα πολύ μικρού πλάτους, που μεταβάλλονται γύρω από το σημείο ηρεμίας τους. Κατά την ανάλυση μικρού σήματος οι εξισώσεις που περιγράφουν το τρανζίστορ μπορούν να «γραμμικοποιηθούν», και το τρανζίστορ μπορεί να θεωρηθεί ως **δίθυρη** διάταξη. Πιο συγκεκριμένα, οι h-υβριδικές παράμετροι μπορούν να υπολογιστούν από τις χαρακτηριστικές του τρανζίστορ (για δεδομένο σημείο ηρεμίας) οπότε το ισοδύναμο κύκλωμα του παρακάτω σχήματος βρίσκει ευρεία χρήση στην ανάλυση κυκλωμάτων με τρανζίστορ, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για **όλες** τις βασικές συνδεσμολογίες (κοινού εκπομπού, κοινής βάσης και κοινού συλλέκτη).

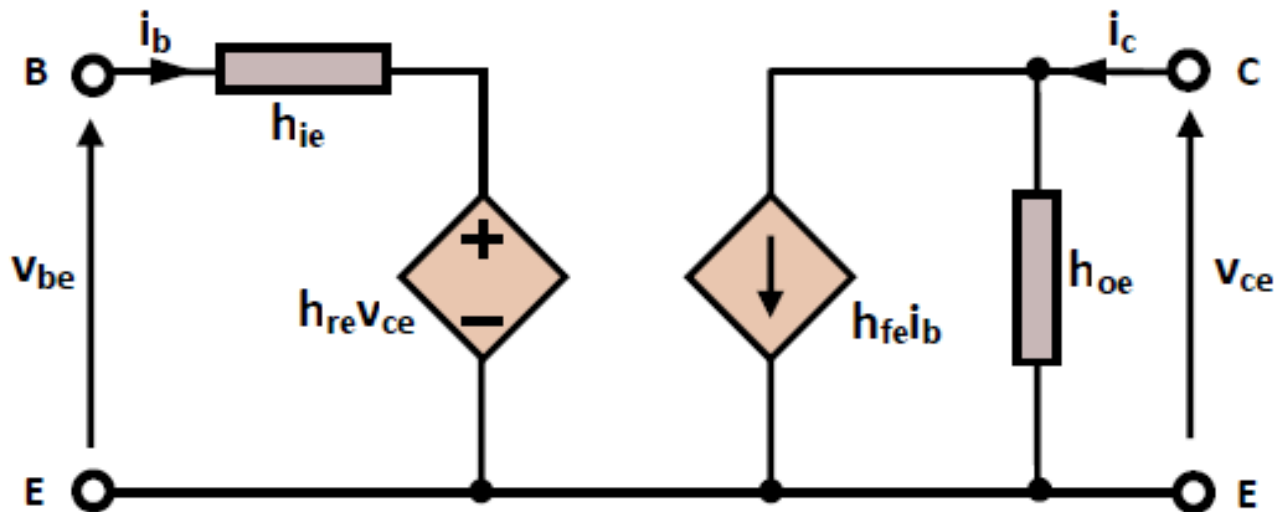


Ισοδύναμα κυκλώματα

Μοντέλα μικρού σήματος

Για την περίπτωση συνδεσμολογίας κοινού εκπομπού ο δείκτης x αντικαθίσταται με e , για συνδεσμολογία κοινής βάσης με b και για συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη με c .

Ο δείκτης f (από το forward) υπο δηλώνει σχέση της εξόδου με την είσοδο, ενώ ο δείκτης r (από το reverse) σχέση της εισόδου με την έξοδο. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται το **h -υβριδικό** ισοδύναμο διπολικού τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού:



Ισοδύναμα κυκλώματα

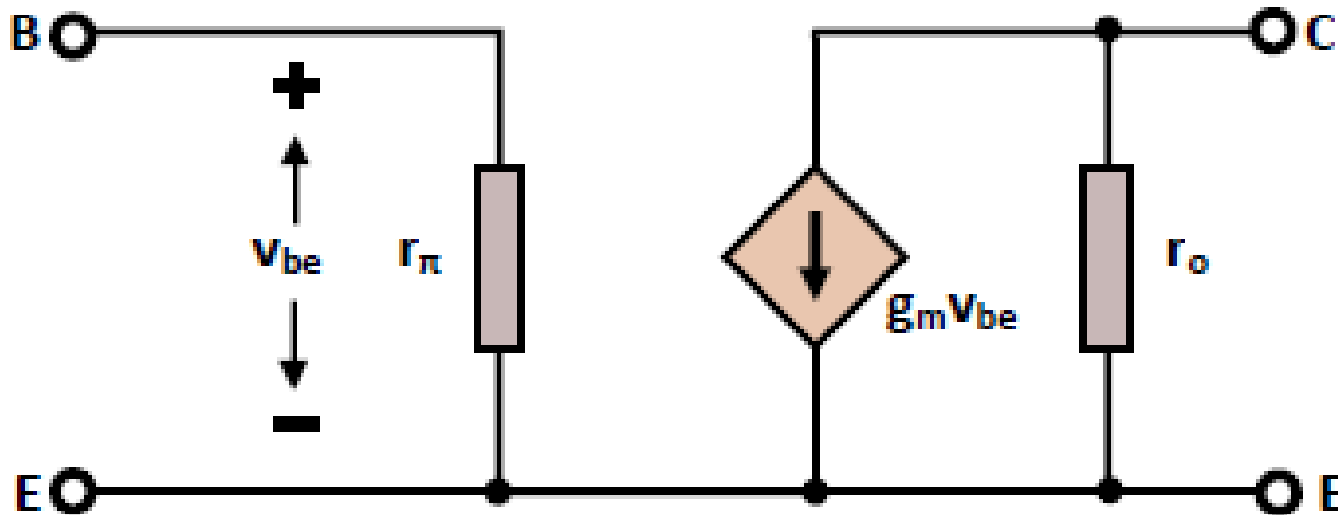
Μοντέλα μικρού σήματος

- Η παράμετρος h_{ie} αντιστοιχεί στην αντίσταση εισόδου του τρανζίστορ για βραχυκυκλωμένη έξοδο.
- Η παράμετρος h_{re} είναι αδιάστατο μέγεθος και αντιστοιχεί στην απολαβή τάσης της εισόδου ως προς την έξοδο, για ανοικτοκυκλωμένη είσοδο.
- Η παράμετρος h_{fe} είναι αδιάστατο μέγεθος που αντιστοιχεί στην απολαβή ρεύματος της εξόδου ως προς την είσοδο, για βραχυκυκλωμένη έξοδο και ταυτίζεται με το β του τρανζίστορ.
- Η παράμετρος h_{oe} αντιστοιχεί στην αγωγιμότητα εξόδου για ανοικτοκυκλωμένη είσοδο.

Ισοδύναμα κυκλώματα

Μοντέλα μικρού σήματος

Παρόμοιο με το προηγούμενο, το π -υβριδικό ισοδύναμο ενός διπολικού τρανζίστορ (βλπ. παρακ. σχήμα).

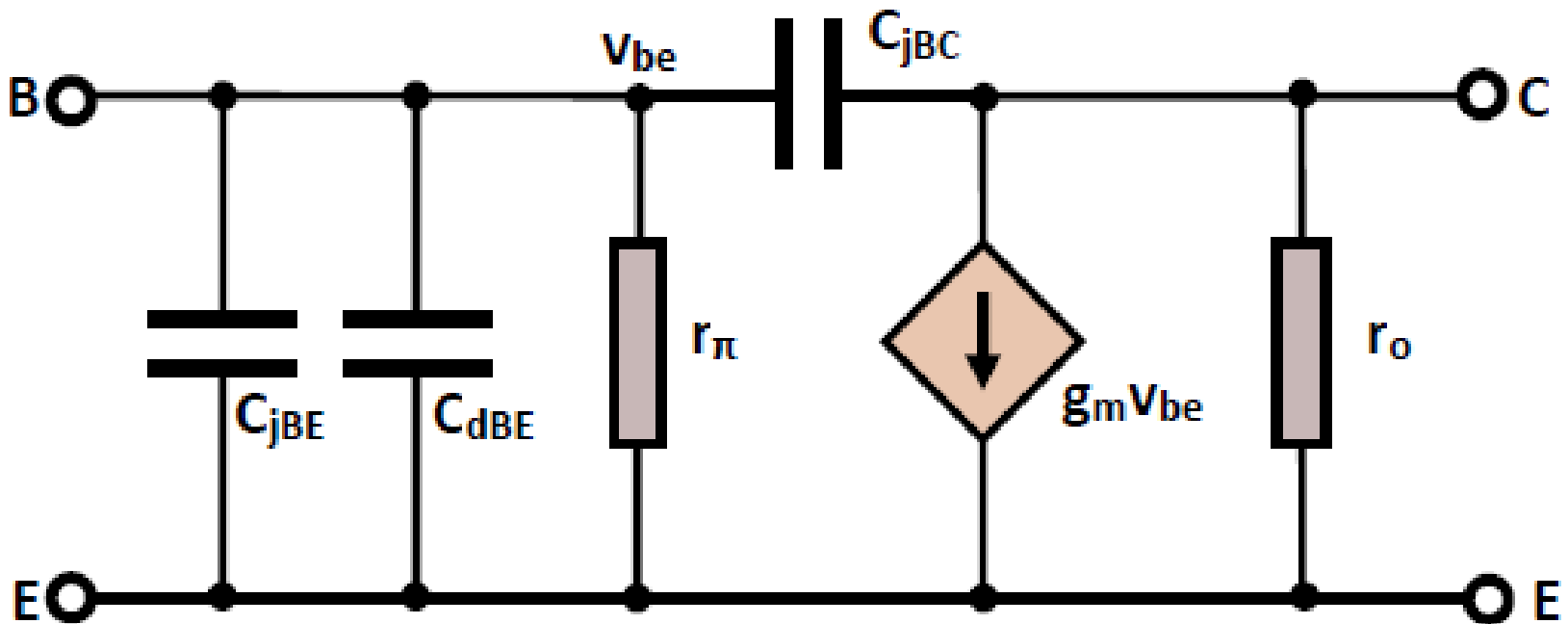


Αποτελείται από την αντίσταση εισόδου r_{π} , την αντίσταση εξόδου r_o και μια πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από την τάση βάσης-συλλέκτη (V_{bc}) μέσω της διαγωγιμότητας g_m .

Ισοδύναμα κυκλώματα

Μοντέλα μικρού σήματος

Το πλεονέκτημα του π -υβριδικού μοντέλου, το οποίο ισχύει για σήματα χαμηλών συχνοτήτων όπως και το h -υβριδικό μοντέλο, είναι πως μπορεί να επεκταθεί κατά τον τρόπο που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, ώστε να ισχύει και για σήματα υψηλών συχνοτήτων.



Ισοδύναμα κυκλώματα

Μοντέλα μικρού σήματος

Για σήματα υψηλών συχνοτήτων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι εσωτερικές (ή παρασιτικές) χωρητικότητες της διάταξης, και συγκεκριμένα η χωρητικότητα της επαφής βάσης-εκπομπού (C_{jBE}), η χωρητικότητα διάχυσης μεταξύ βάσης και εκπομπού (C_{dBE}) και η χωρητικότητα της επαφής βάσης-συλλέκτη (C_{jBC}), η οποία αναφέρεται και ως **χωρητικότητα Miller**.

Ζεύγη διπολικών τρανζίστορ

Με την κατάλληλη διασύνδεση ζευγών διπολικών τρανζίστορ μπορούμε να πάρουμε υψηλές απολαβές ρεύματος (β), σε σχέση με την απολαβή ρεύματος καθενός εκ των τρανζίστορ του ζεύγους.

Ζεύγη διπολικών τρανζίστορ

Συνδεσμολογία *Darlington*

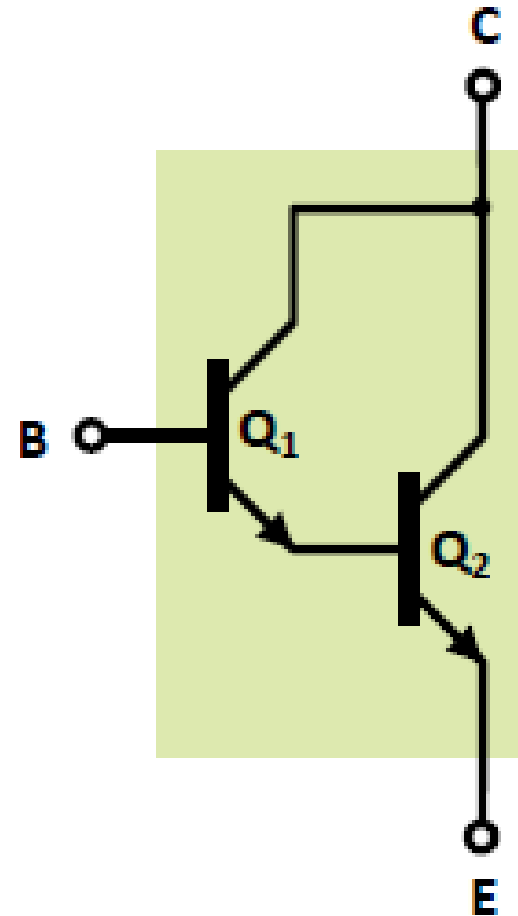
Έστω η συνδεσμολογία του διπλανού σχήματος.

Αποτελείται από δύο διπολικά τρανζίστορ και ονομάζεται **συνδεσμολογία *Darlington***.

Ένα ζεύγος *Darlington* μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μοναδικό τρανζίστορ, με συλλέκτη τον κοινό συλλέκτη των δύο μελών του ζεύγους, βάση τη βάση του τρανζίστορ Q_1 και εκπομπό τον εκπομπό του τρανζίστορ Q_2 .

Με τη χρήση της σχέσης $I_C = \beta I_B$ μπορούμε εύκολα να δείξουμε πως για ένα ζεύγος *Darlington* ισχύει:

$$\beta \simeq \beta_1 \beta_2$$



Ζεύγη διπολικών τρανζίστορ

Συνδεσμολογία Darlington

Επομένως, η απολαβή ρεύματος ενός ζεύγους Darlington είναι πρακτικά ίση με το γινόμενο των απολαβών ρεύματος των τρανζίστορ που αποτελούν το ζεύγος.

Η πτώση τάσης μεταξύ της βάσης και του εκπομπού του ζεύγους θα είναι ίση με το διπλάσιο της αντίστοιχης πτώσης τάσης για κάθε επιμέρους τρανζίστορ. Το γεγονός αυτό αποτελεί και ένα από τα μειονεκτήματα της συνδεσμολογίας.

Ζεύγη Darlington διατίθενται στο εμπόριο σε ολοκληρωμένες συσκευασίες, αλλά μπορούν και να σχηματισθούν με τη χρήση διακριτών τρανζίστορ.

Ζεύγη διπολικών τρανζίστορ

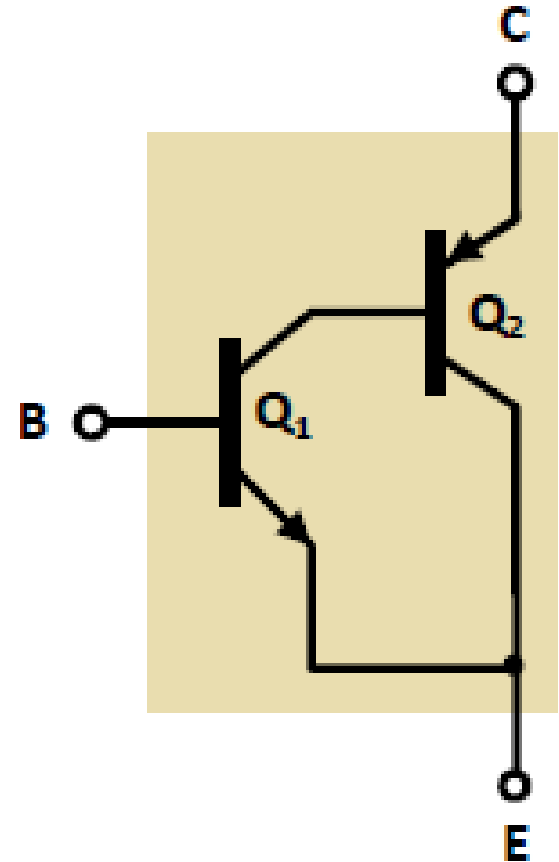
Συνδεσμολογία Sziklai

Εξίσου μεγάλη απολαβή ρεύματος μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση της συνδεσμολογίας Sziklai (βλ. διπλ. σχήμα).

Εξαιτίας της χρήσης δύο τρανζίστορ διαφορετικών (συμπληρωματικών) τύπων (ενός npn και ενός pnp), η συνδεσμολογία αυτή αναφέρεται και ως **συμπληρωματική συνδεσμολογία Darlington (complementary Darlington connection)**.

Εύκολα μπορεί να αποδειχθεί ότι για ένα ζεύγος Sziklai ισχύει: $\beta = \beta_1 \beta_2$

όπου β η απολαβή ρεύματος του ζεύγους και β_1, β_2 οι απολαβές ρεύματος των τρανζίστορ Q_1 και Q_2 , αντίστοιχα.



Ζεύγη διπολικών τρανζίστορ

Συνδεσμολογία Sziklai

Το **πλεονέκτημα** της συνδεσμολογίας Sziklai είναι πως, σε αντίθεση με τη συνδεσμολογία Darlington, η πτώση τάσης μεταξύ βάσης και εκπομπού της συνδεσμολογίας είναι ίση με την αντίστοιχη πτώση τάσης καθενός εκ των μελών του ζεύγους.

Εφαρμογές

Ακολουθητής εκπομπού (emitter follower)

Πρόκειται για συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη και συνήθως χρησιμοποιείται ως απομονωτής τάσης (voltage buffer).

Στη συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη η βάση παίζει τον ρόλο της εισόδου του κυκλώματος και ο εκπομπός τον ρόλο της εξόδου, ενώ ο συλλέκτης αποτελεί τον κοινό αγωγό μεταξύ των δύο κυκλωμάτων.

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό της συνδεσμολογίας κοινού συλλέκτη είναι η προσαρμογή των αντιστάσεων. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη αντίσταση του κυκλώματος της βάσης (κύκλωμα εισόδου) και στη μικρή αντίσταση του κυκλώματος του εκπομπού (κύκλωμα εξόδου).

Ένα απλό κύκλωμα ακολουθητή εκπομπού με τρανζίστορ ηρη φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Εφαρμογές

Ακολουθητής εκπομπού (emitter follower)

Για το κύκλωμα αυτό ισχύει: $V_{out} = V_{in} - I_B R_B - V_{BE}$

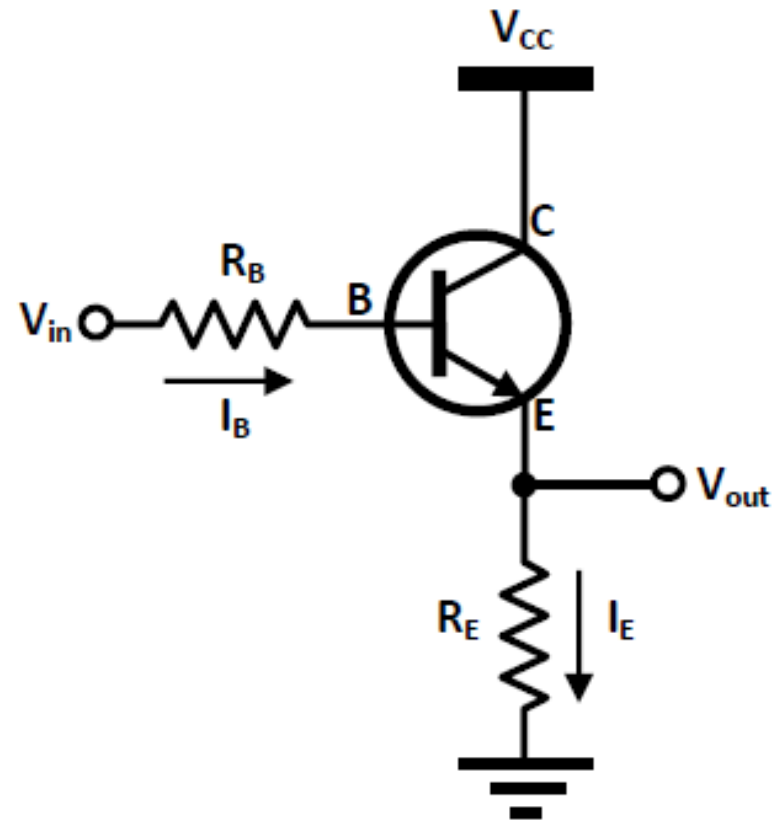
Το ρεύμα βάσης (I_B) είναι πολύ μικρό και μπορεί να αμεληθεί, οπότε:

$$V_{out} = V_{in} - V_{BE}$$

Αν θεωρήσουμε τις μεταβολές των τάσεων εισόδου (V_{in}) και εξόδου (V_{out}), η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\Delta V_{out} = \Delta V_{in}$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει πως οι μεταβολές του σήματος εξόδου είναι ίσες με τις μεταβολές του σήματος εισόδου, άρα η έξοδος παρακολουθεί την είσοδο (ακολουθητής εκπομπού).



Εφαρμογές

Ακολουθητής εκπομπού (*emitter follower*)

→ Η αντίσταση εισόδου του κυκλώματος είναι: $R_{in} = \frac{\Delta V_{in}}{\Delta I_B}$

Ακόμη ισχύει:

$$I_E = \beta \cdot I_B \Rightarrow \Delta I_E = \beta \cdot \Delta I_B \Rightarrow \Delta I_B = \frac{\Delta I_E}{\beta}$$

Οπότε: $R_{in} = \beta \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_E}$

Όμως: $\frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_E} = R_E$

Άρα: $R_{in} = \beta R_E$

Είναι φανερό ότι η αντίσταση εισόδου είναι πολύ μεγάλη, μιας και η απολαβή ρεύματος β έχει πολύ μεγάλη τιμή.

Εφαρμογές

Ακολουθητής εκπομπού (*emitter follower*)

→ Η αντίσταση εξόδου του κυκλώματος είναι:

$$R_{out} = \frac{\Delta V_{out}}{\Delta I_E} \Rightarrow R_{out} = \frac{\Delta V_{in}}{\beta \cdot \Delta I_B} \Rightarrow R_{out} = \frac{R_s + R_B}{\beta}$$

όπου R_s η αντίσταση της πηγής σήματος που υποθέτουμε πως τροφοδοτεί την είσοδο του κυκλώματος.

Από την προηγούμενη σχέση είναι φανερό ότι η αντίσταση εξόδου είναι πολύ μικρή.

Εφαρμογές

Πηγή ρεύματος

Έστω η συνδεσμολογία του διπλανού σχήματος.

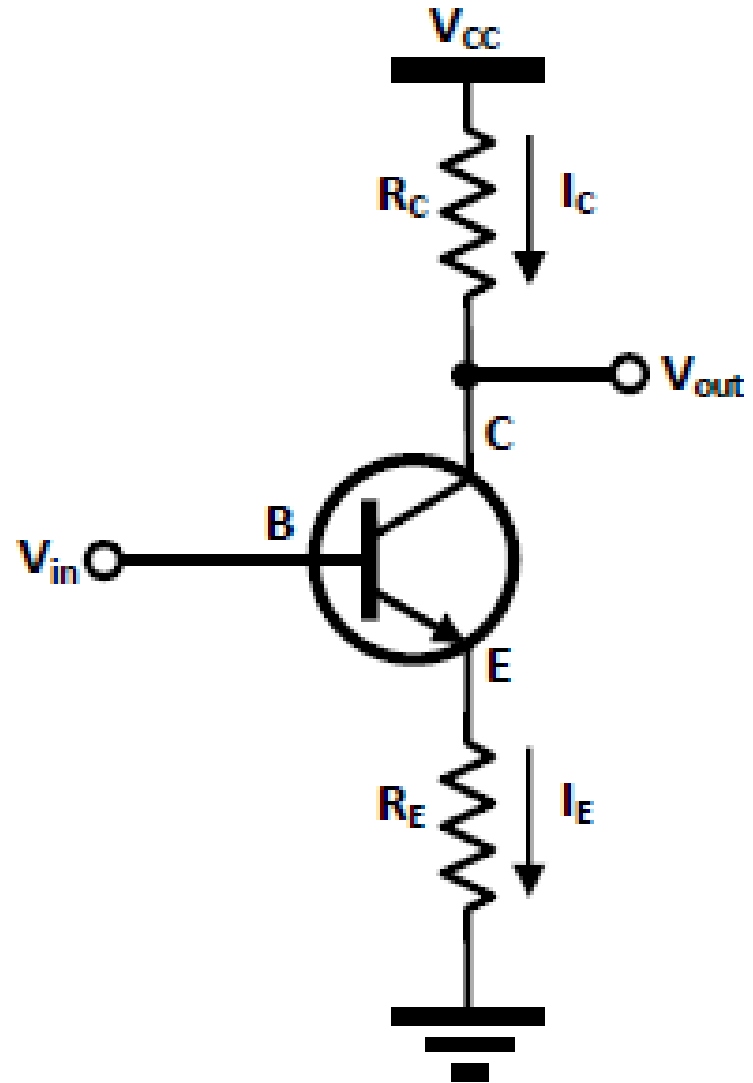
Μπορεί να διαπιστωθεί, πως το ρεύμα που διαρρέει το διπολικό τρανζίστορ είναι ανεξάρτητο της αντίστασης R_C στον συλλέκτη.

Πράγματι, ισχύουν:

$$I_C = I_E$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

$$V_E = V_{in} - V_{BE}$$



Εφαρμογές

Πηγή ρεύματος

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτει η σχέση:

$$I_C = \frac{V_{in} - V_{BE}}{R_E}$$

από την οποία μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το ρεύμα (I_C) του συλλέκτη είναι σταθερό, για δεδομένες τιμές της τάσης εισόδου (V_{in}) και της αντίστασης R_E στον εκπομπό, και ανεξάρτητο της αντίστασης R_C στον συλλέκτη (η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως η αντίσταση φόρτου).

Έχουμε, επομένως, μια **πηγή** σταθερού ρεύματος.

Βιβλιογραφία

ΓΙΑΝΝΗΣ ΛΙΑΠΕΡΔΟΣ, “ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΤΙΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ, Θεωρία και Εργαστηριακές Ασκήσεις”, ΤΕΙ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ