



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Ηλεκτρονική

Ενότητα 4: Διπολικά Τρανζίστορ (BJT)

Αγγελική Αραπογιάννη

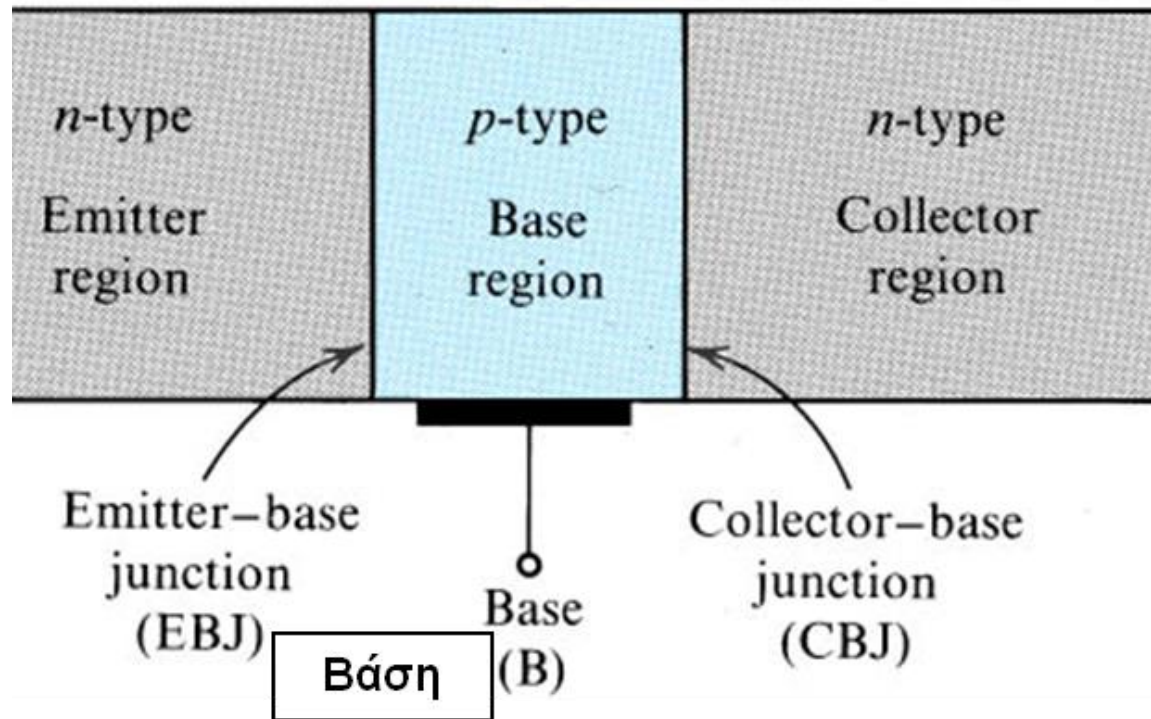
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

Περιεχόμενα ενότητας

- Δομή και λειτουργία του τρανζίστορ npn (και pnp).
- Ρεύμα Βάσης, Εκπομπού, Συλλέκτη.
- Περιοχές λειτουργίας του τρανζίστορ: ενεργός περιοχή, κόρος, αποκοπή.
- Παραδείγματα εντοπισμού του σημείου λειτουργίας-ηρεμίας του τρανζίστορ.
- Οι χαρακτηριστικές I-V κοινού εκπομπού και κοινής βάσης του τρανζίστορ.
- Συντελεστής ενίσχυσης ρεύματος (το β).
- Φαινόμενο Early.



Το τρανζίστορ npn (1/2)

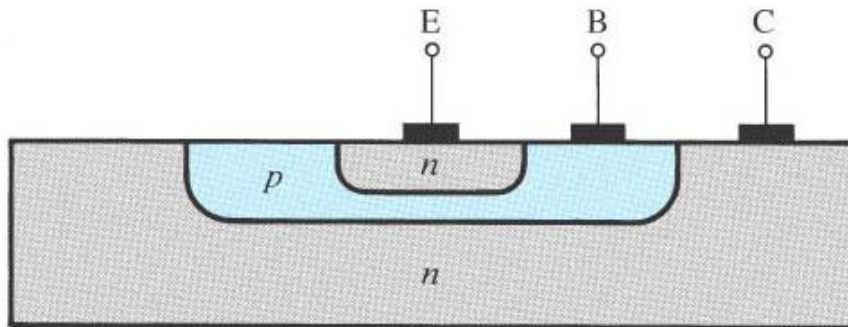


Σχηματική παράσταση του τρανζίστορ npn



Το τρανζίστορ npn (2/2)

Εγκάρσια τομή τρανζίστορ npn



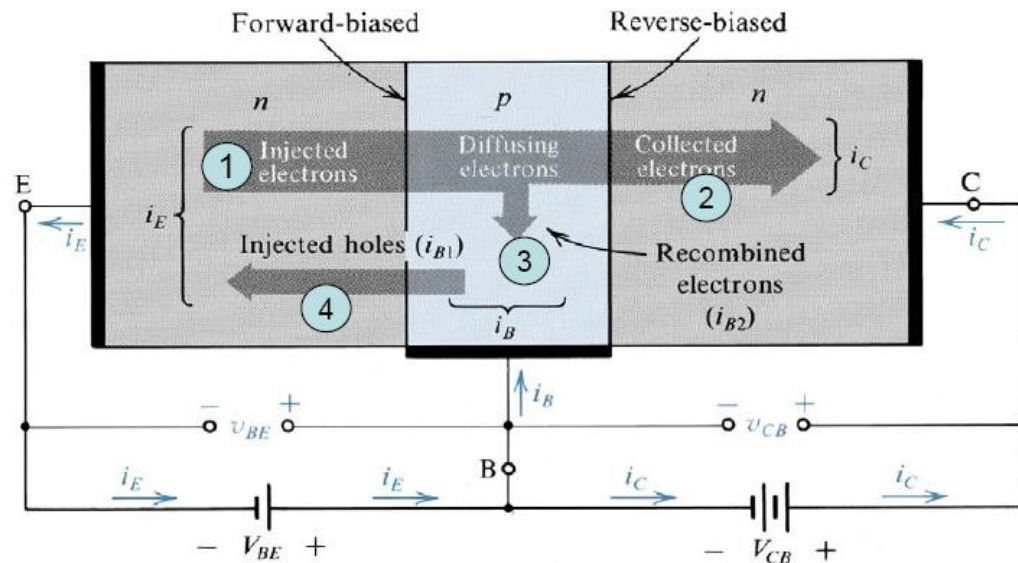
Περιοχές λειτουργίας διπολικού τρανζίστορ

Περιοχή	EBJ	CBJ
Αποκοπή	Ανάστροφα	Ανάστροφα
Ενεργός	Ορθά	Ανάστροφα
Κόρος	Ορθά	Ορθά



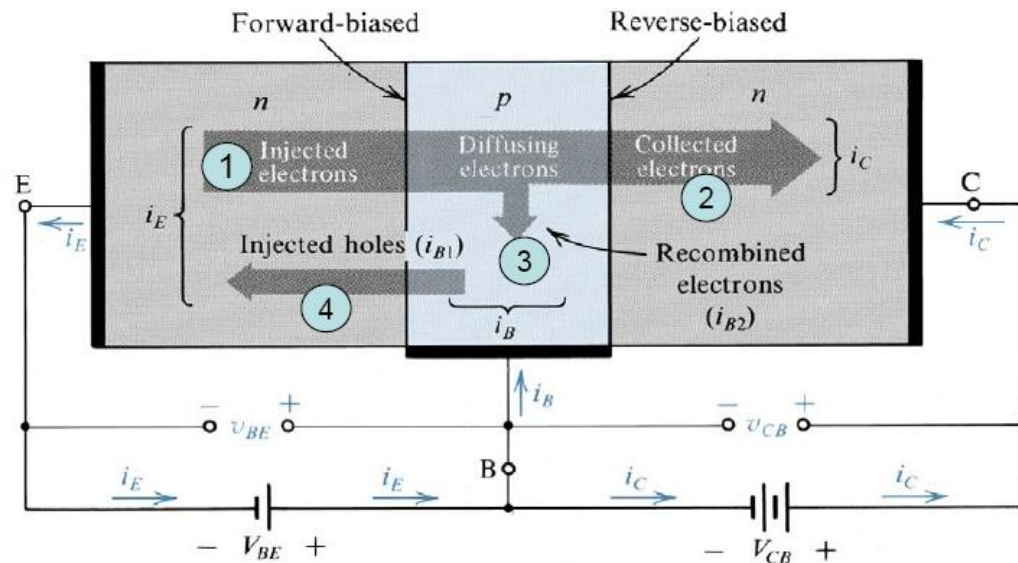
Το τρανζίστορ ηρη στην ενεργό περιοχή (1/2)

- Η ορθή πόλωση της επαφής EB εγχέει ηλεκτρόνια από τον εκπομπού στη βάση.
- Επειδή η περιοχή της βάσης είναι πολύ λεπτή, η πλειονότητα αυτών των ηλεκτρονίων διαχέεται προς την περιοχή απογύμνωσης της επαφής BC και κατόπιν σαρώνονται προς τον συλλέκτη από το ηλεκτρικό πεδίο της ανάστροφα πολωμένης επαφής BC.



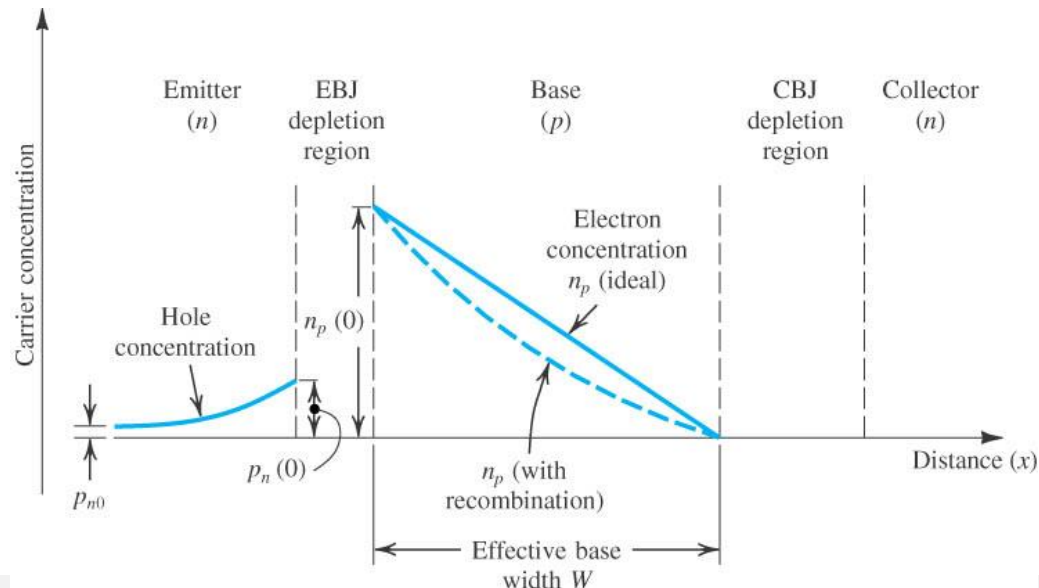
Το τρανζίστορ ηρη στην ενεργό περιοχή (2/2)

- Ένα μικρό ποσοστό από αυτά τα ηλεκτρόνια επανασυνδέονται με τις οπές στην περιοχή της βάσης.
- Οπές εγχέονται από τη βάση στην περιοχή του εκπομπού, $(4) \ll (1)$.



Κατανομή των φορέων μειονότητας

- Ρεύμα στο οποίο επικρατούν τα ηλεκτρόνια από τον εκπομπό στη βάση λόγω της ορθής πόλωσης και βαθμίδα συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας μέσα στη βάση.
 - Η μερική επανασύνδεση προκαλεί καμπύλωση της συγκέντρωσης στην περιοχή της βάσης.



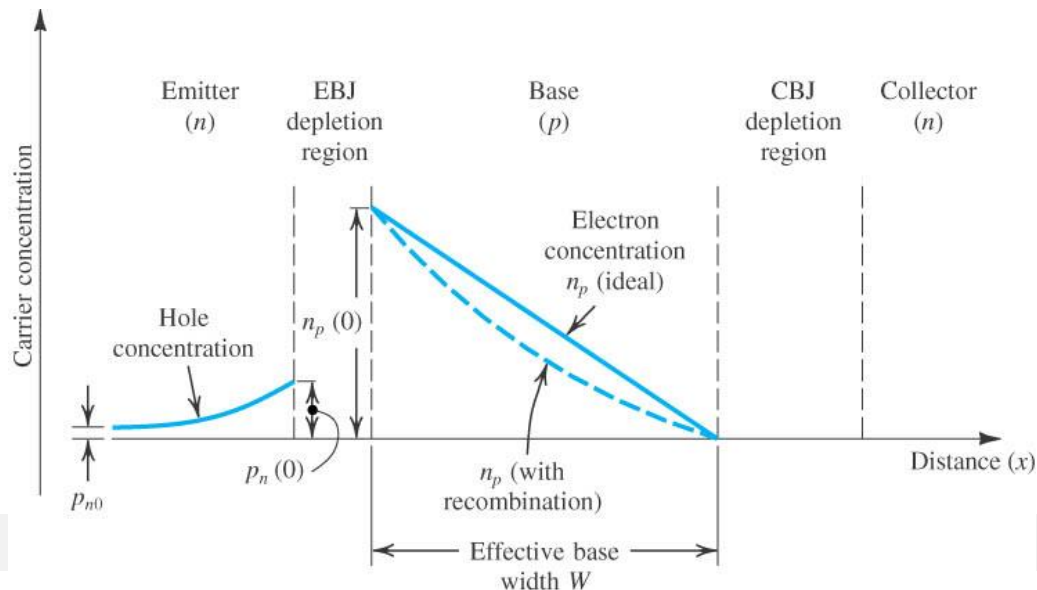
Το ρεύμα διάχυσης μέσω της βάσης

- Η διάχυση ηλεκτρονίων μέσω της βάσης καθορίζεται από την συγκέντρωσή τους στην επαφή EB: $n_p(0) = n_{p0} e^{u_{BE}/V_T}$

- Το ρεύμα διάχυσης των ηλεκτρονίων μέσω της βάσης είναι:

$$I_n = A_E q D_n \frac{dn_p(x)}{dx} = A_E q D_n \left(\frac{-n_p(0)}{W} \right)$$

- Το ρεύμα συλλέκτη είναι: $i_C = -I_n$



Το ρεύμα Συλλέκτη

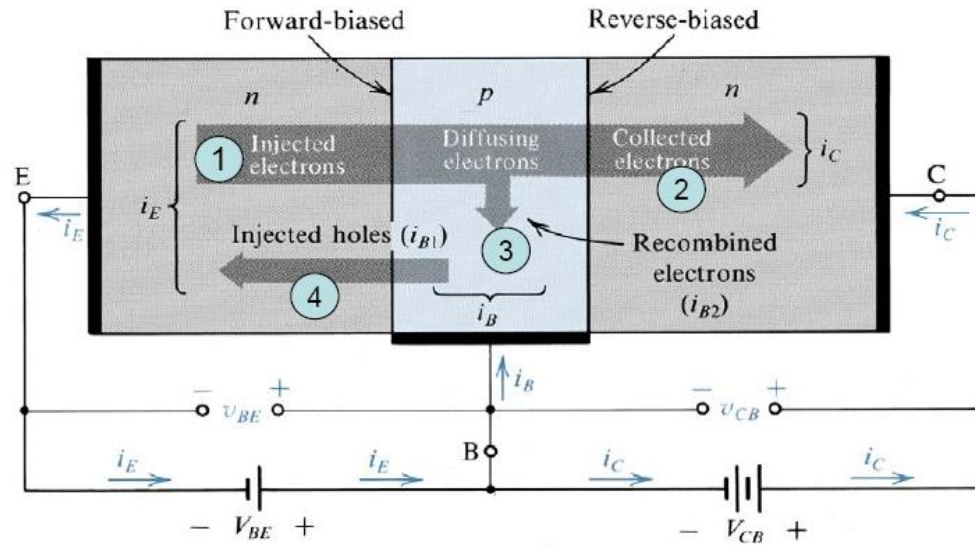
- Το ρεύμα συλλέκτη είναι:

$$i_C = I_S e^{u_{BE}/V_T} \quad \text{όπου} \quad I_S = \frac{qA_E D_n n_{p0}}{W} = \frac{qA_E D_n n_i^2}{N_A W}$$

- Το i_C είναι ανεξάρτητο από το u_{CE} .
- Το ρεύμα συλλέκτη ελέγχεται από την τάση των δύο άλλων ακροδεκτών: **πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση.**
- Το ρεύμα κόρου I_S είναι
 - Αντιστρόφως ανάλογο προς το W και ανάλογο προς το A_E .
 - Εξαρτάται από τη θερμοκρασία, λόγω του παράγοντα n_i^2 .



Το ρεύμα Βάσης



- Το ρεύμα της βάσης αποτελείται από δύο συνιστώσες: i_{B1} και i_{B2}
- το i_{B1} είναι εκθετική συνάρτηση του v_{BE} , λόγω της ορθής πόλωσης της επαφής EB
- Το i_{B2} , που οφείλεται στις επανασυνδέσεις, είναι ανάλογο προς τον αριθμό των ηλεκτρονίων που εγχέονται από τον εκπομπό, ο οποίος είναι εκθετική συνάρτηση του v_{BE} .



$$i_B \propto e^{v_{BE}/V_T}$$

Το βήτα (β)

- Μπορούμε να συνδέσουμε το i_C με το i_B με την παρακάτω σχέση:

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{i_S}{\beta} e^{u_{BE}/V_T}$$

- $\beta = i_C/i_B$
 - Το β είναι σταθερό για κάθε τρανζίστορ
 - Παίρνει τιμές μεταξύ 100 και 200 και ακόμη μεγαλύτερες
 - Ονομάζεται ενίσχυση ρεύματος κοινού εκπομπού
 - Συμβολίζεται επίσης με β_F και h_{FE} .



Το ρεύμα Εκπομπού

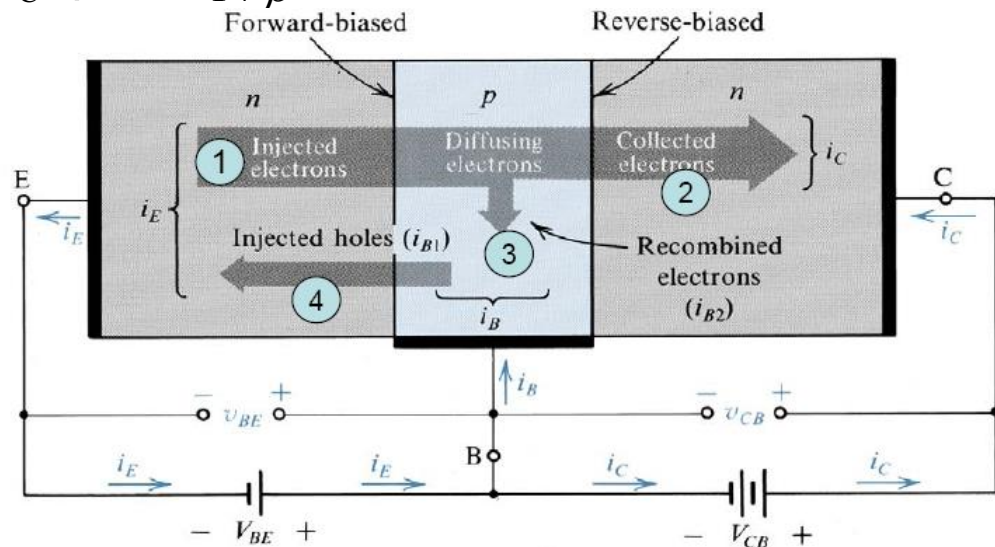
Θεωρώντας το τρανζίστορ σαν ένα κόμβο, μπορούμε να γράψουμε:

$$i_E = i_B + i_C = \frac{1}{\beta} i_C + i_C = \frac{1 + \beta}{\beta} i_C \quad \text{ή} \quad i_C = \frac{\beta}{1 + \beta} i_E$$

$$i_C = \alpha i_E$$

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

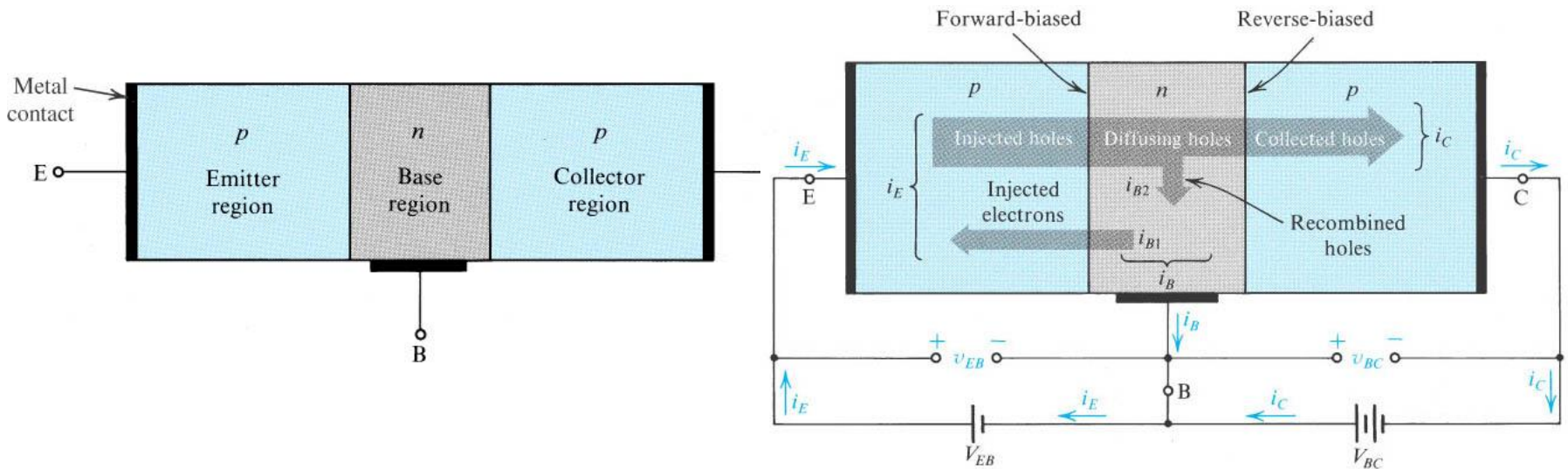
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$



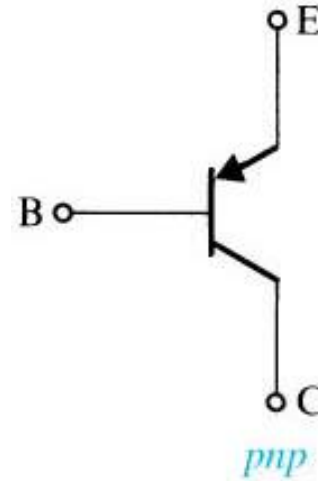
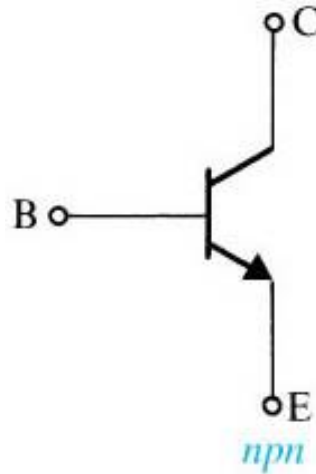
Το α ονομάζεται **ενίσχυση ρεύματος κοινής βάσης** και είναι $\alpha < 1$ αλλά κοντά στο 1.

Το τρανζίστορ pnp

Τα ρεύματα του τρανζίστορ pnp στην ενεργό περιοχή.

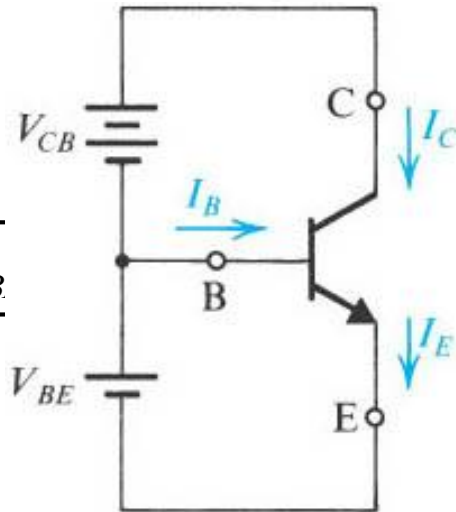


Συμβολισμός και πόλωση των διπολικών τρανζίστορ



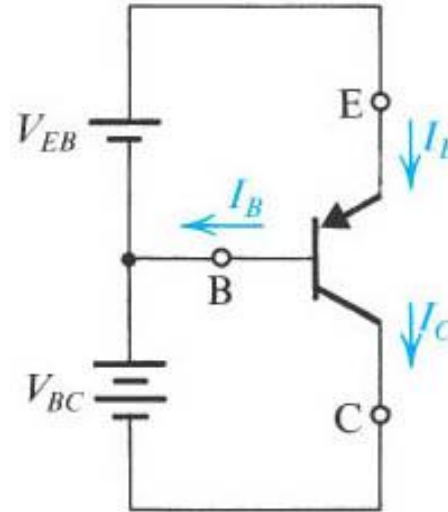
$$I_E = I_C + I_B$$

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



$$I_E = I_C + I_B$$

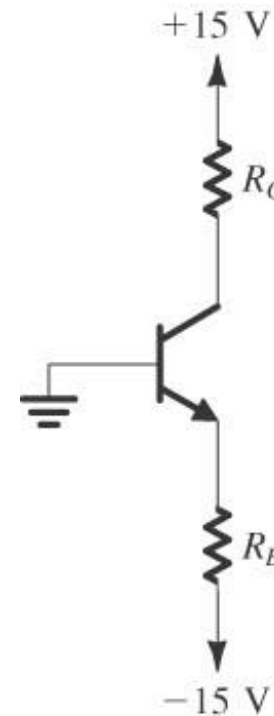
$$V_{EC} = V_{BC} + V_{EB}$$



Παράδειγμα 1 (1/2)

Δίνονται: $\beta=100$ και
 $v_{BE}=0,7V$ όταν $i_C=1mA$

Να σχεδιαστεί το
κύκλωμα έτσι ώστε
 $I_C=2mA$ και $V_C=5V$.



Παράδειγμα 1 (2/2)

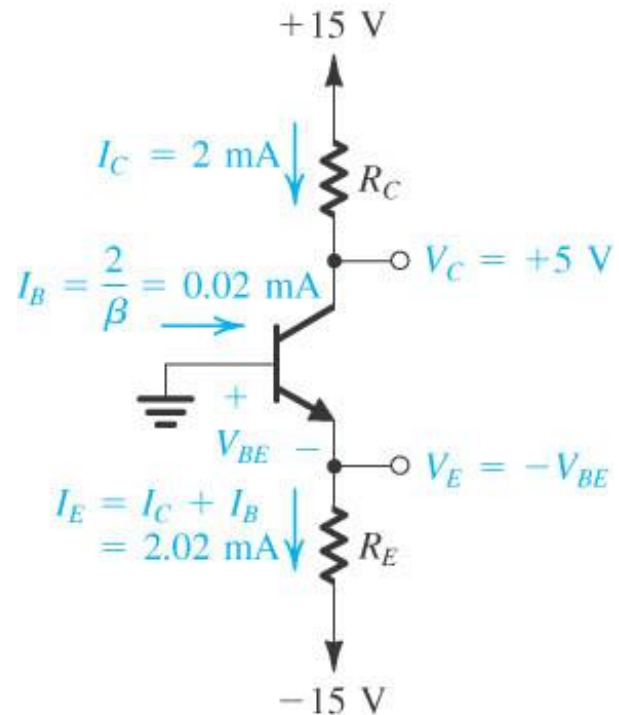
$$R_C = \frac{V_{CC} - V_C}{I_C} = 5k\Omega$$

$$\left. \begin{aligned} i_{C1} &= I_S e^{v_{BE1}/V_T} \\ i_{C2} &= I_S e^{v_{BE2}/V_T} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{i_{C1}}{i_{C2}} = e^{(v_{BE1} - v_{BE2})/V_T}$$

$$\ln \frac{i_{C1}}{i_{C2}} = \frac{v_{BE1} - v_{BE2}}{V_T}$$

$$v_{BE1} = v_{BE2} + V_T \ln \frac{i_{C1}}{i_{C2}} = 0,717V$$

$$R_E = \frac{V_E - V_{EE}}{I_E} = 7,07k\Omega$$



Υπολογισμός ρευμάτων και τάσεων

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \frac{I_S}{\beta} e^{v_{BE}/V_T}$$

$$V_{BE} \approx 0,7V$$

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

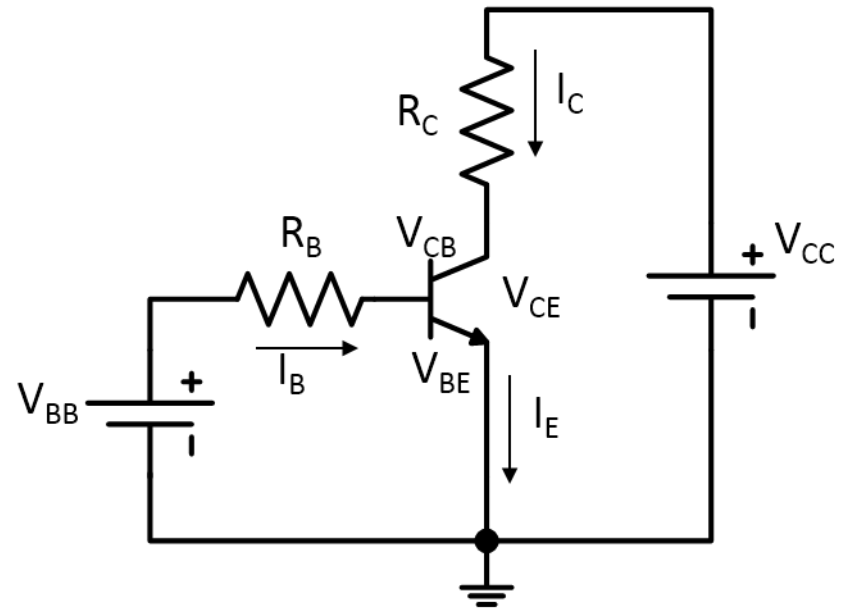
$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

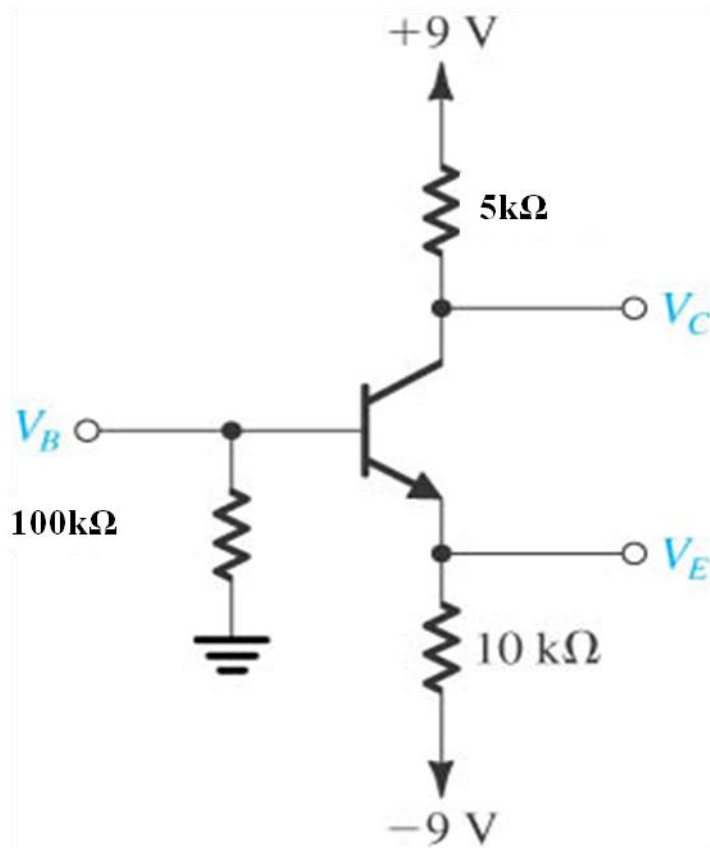
$$I_E = \frac{I_C}{\alpha}$$

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

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



Άσκηση 1

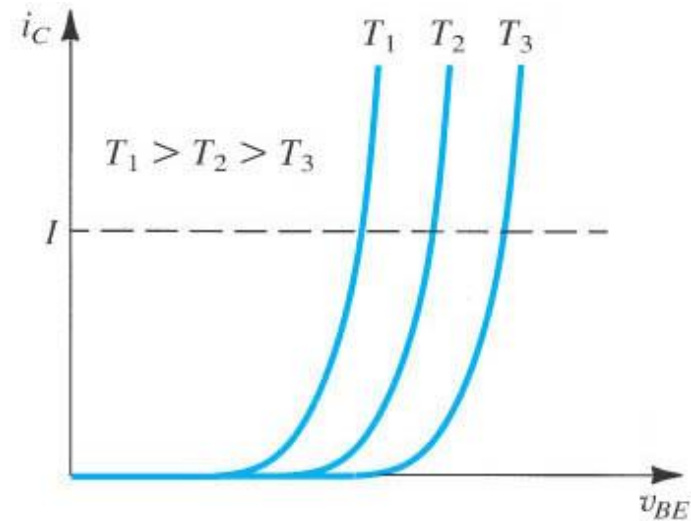
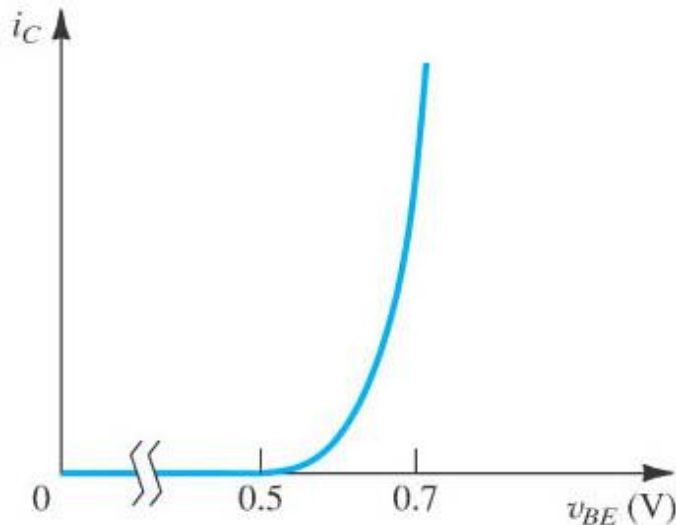


Αν $V_B = -1V$ και $V_E = -1,7V$ να υπολογιστούν τα: I_B , I_E , β , α , I_C και V_C .

Είναι το τρανζίστορ πολωμένο στην ενεργό περιοχή;

Γραφική παράσταση των χαρακτηριστικών του τρανζίστορ

$$i_c = I_s e^{v_{BE}/V_T}$$



Η χαρακτηριστική $i_c - v_{BE}$ του τρανζίστορ ηρη.

Οι χαρακτηριστικές $i_E - v_{BE}$ και $i_B - v_{BE}$ έχουν την ίδια μορφή.

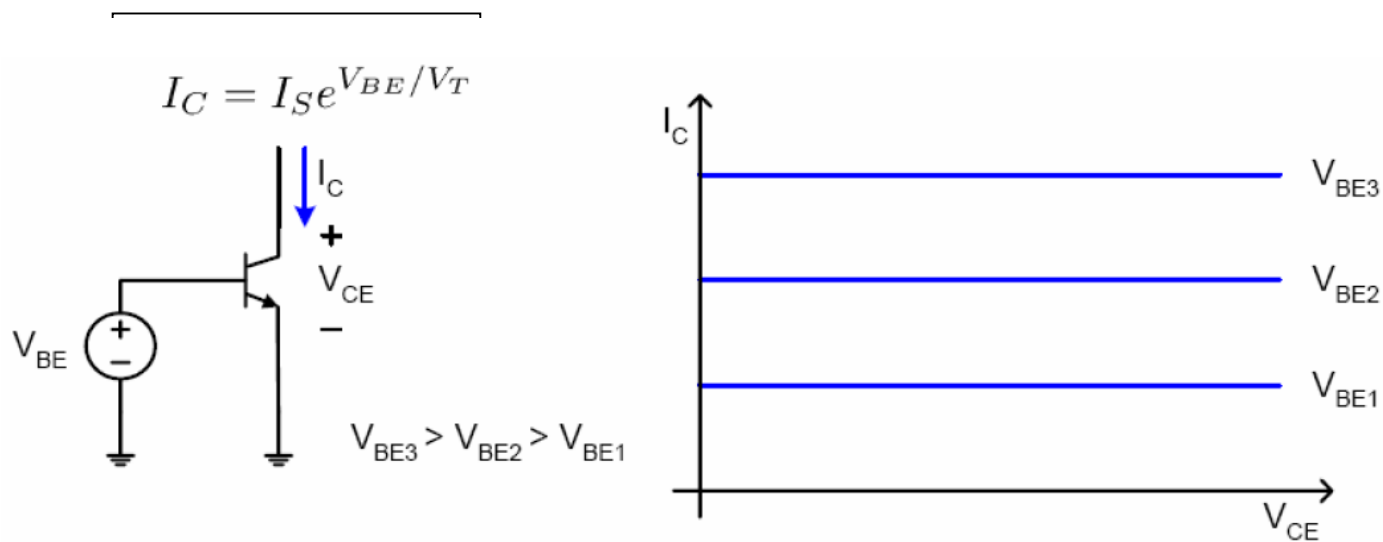
Επίδραση της θερμοκρασίας στην χαρακτηριστική $i_c - v_{BE}$ του τρανζίστορ ηρη.

$$0.6V < v_{BE} < 0.8V \Rightarrow v_{BE} \approx 0.7V$$



Χαρακτηριστικές κοινού εκπομπού

- Το ρεύμα συλλέκτη δείχνει ανεξάρτητο της V_{CE} στην ενεργό περιοχή.
- Επομένως μπορούμε να πούμε ότι το τρανζίστορ συμπεριφέρεται σαν ιδανική πηγή ρεύματος.



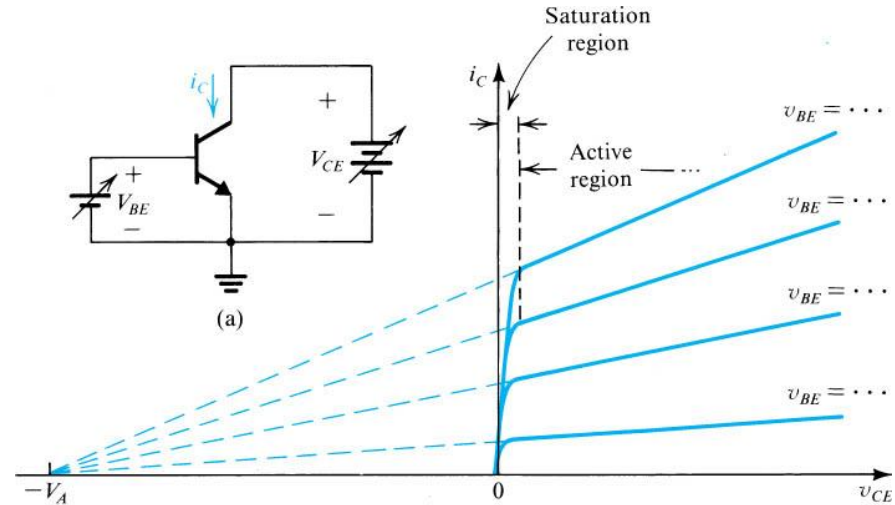
Φαινόμενο Early

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A}\right)$$

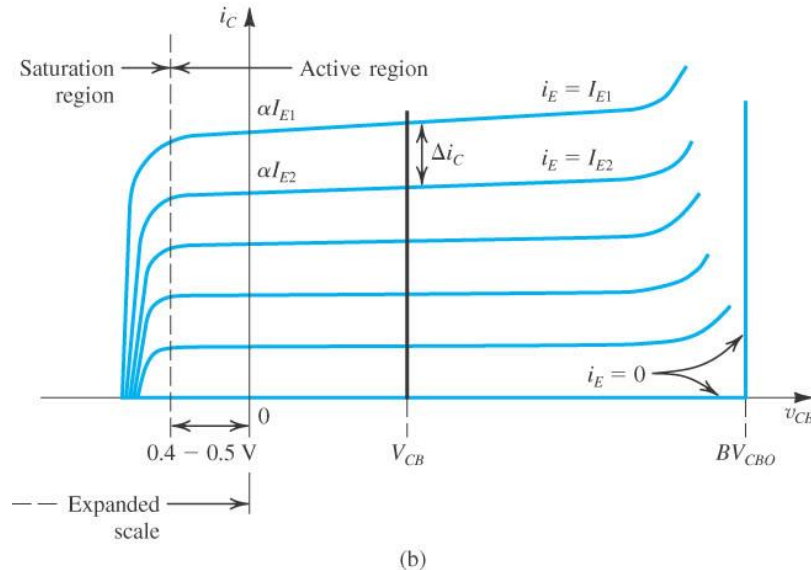
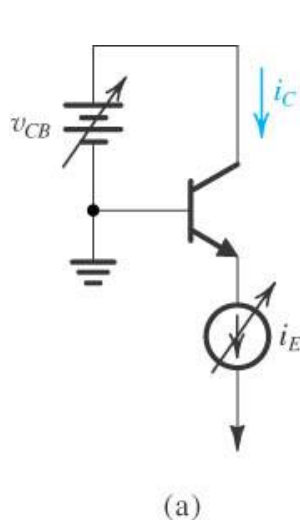
$$r_o \equiv \left[\frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \Big|_{v_{BE} = \text{σταθ}} \right]^{-1}$$

$$r_o \cong \frac{V_A}{I_C}$$

- Φαινόμενο Early:
 - Το ρεύμα συλλέκτη στην πράξη εξαρτάται ελαφρά από την V_{CE} στην ενεργό περιοχή.
 - Η τάση Early, V_A , είναι χαρακτηριστικό του τρανζίστορ (50 ως 100).
 - Μη μηδενική κλίση σημαίνει πεπερασμένη αντίσταση εξόδου, r_o .
- Για μικρές τιμές της V_{CE} η επαφή συλλέκτη-βάσης πολώνεται ορθά και το τρανζίστορ μπαίνει στον κόρο.

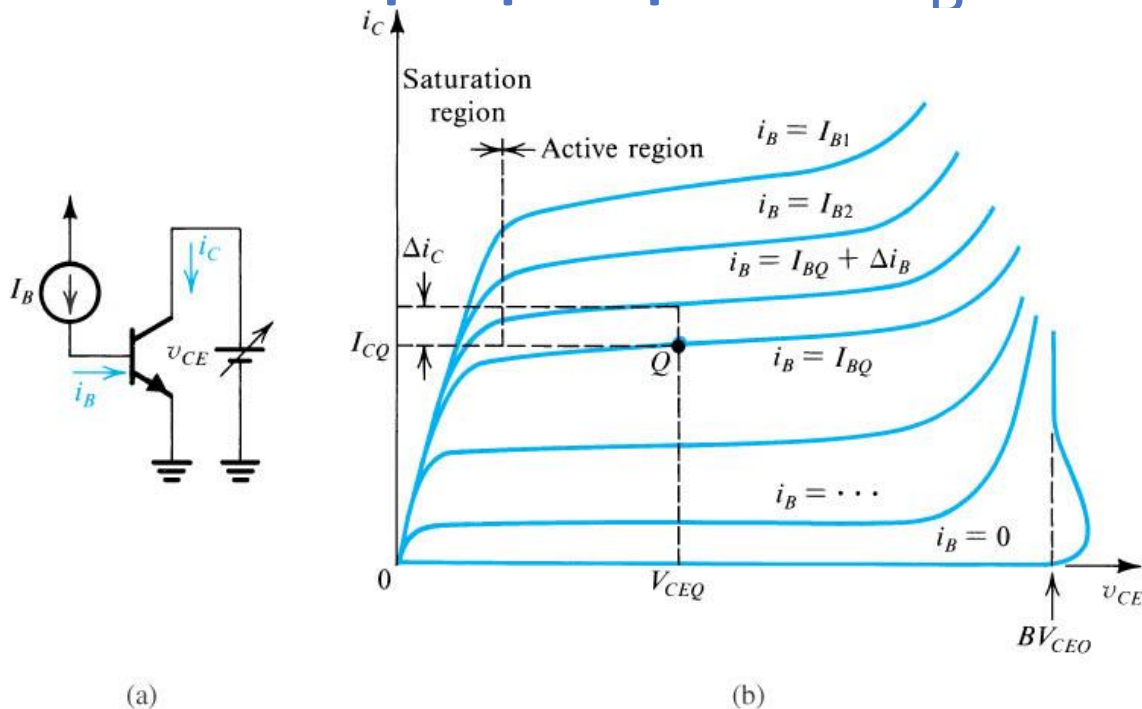


Χαρακτηριστικές κοινής βάσης



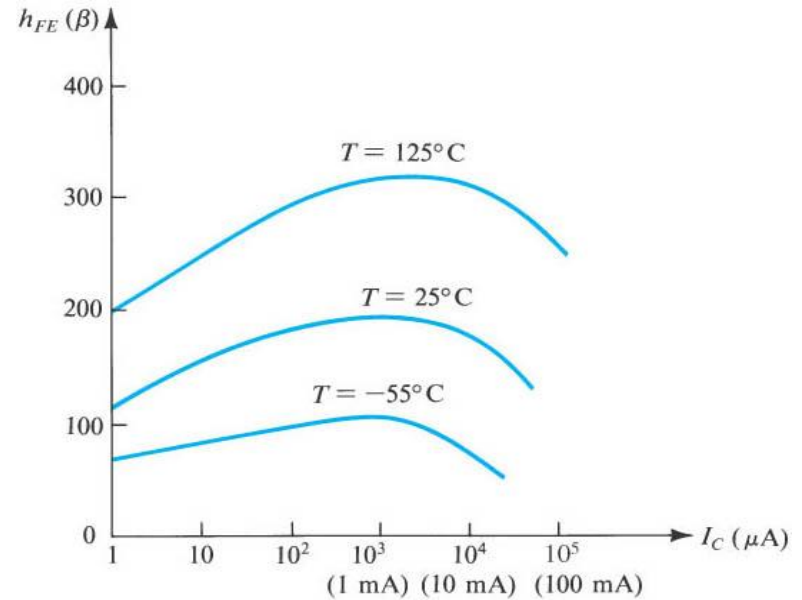
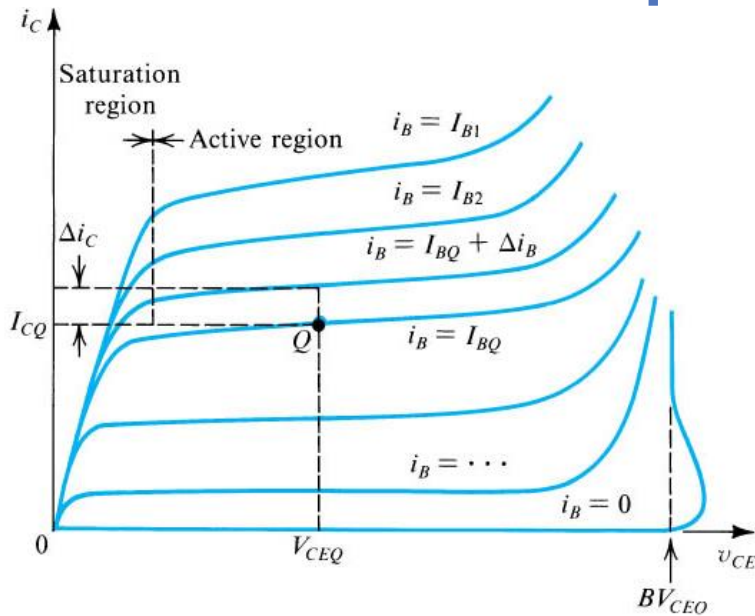
- Καθώς η v_{CB} γίνεται αρνητική, η επαφή συλλέκτη-βάσης πολώνεται ορθά και το τρανζίστορ εισέρχεται στον κόρο.
- Η BV_{CBO} είναι η τάση κατάρρευσης της επαφής συλλέκτη-βάσης και έχει μεγάλη τιμή.
- Η κλίση των χαρακτηριστικών στην ενεργό περιοχή είναι μικρότερη από την αντίστοιχη των χαρακτηριστικών κοινού εκπομπού. Επομένως, η αντίσταση εξόδου κοινής βάσης είναι μεγαλύτερη.

Χαρακτηριστικές κοινού εκπομπού με παράμετρο το I_B



- Η τάση κατάρρευσης της επαφής συλλέκτη-εκπομπού BV_{CEO} έχει πολύ μικρότερη τιμή από την V_{CBO} .
- Στον κόρο η αντίσταση εξόδου έχει πολύ μικρή τιμή και το τρανζίστορ δρα ως «κλειστός διακόπτης».

Η ενίσχυση ρεύματος β του τρανζίστορ



$$\beta_{dc} \equiv h_{FE} \equiv \frac{I_{CQ}}{I_{BQ}}$$

$$\beta_{ac} \equiv h_{fe} \equiv \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{V_{CE}} = \sigma \alpha \theta$$

- Το β εξαρτάται από το ρεύμα συλλέκτη και τη θερμοκρασία.
- Η τιμή του β διαφέρει έντονα μεταξύ τρανζίστορ του ίδιου τύπου.



Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.01.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Αραπογιάννη Αγγελική 2014. «Ηλεκτρονική. Ενότητα 4: Διπολικά τρανζίστορ (BJT)».
Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<http://opencourses.uoa.gr/courses/DI4/>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

