

# *ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

**ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ**

# Διπολικά τρανζίστορ

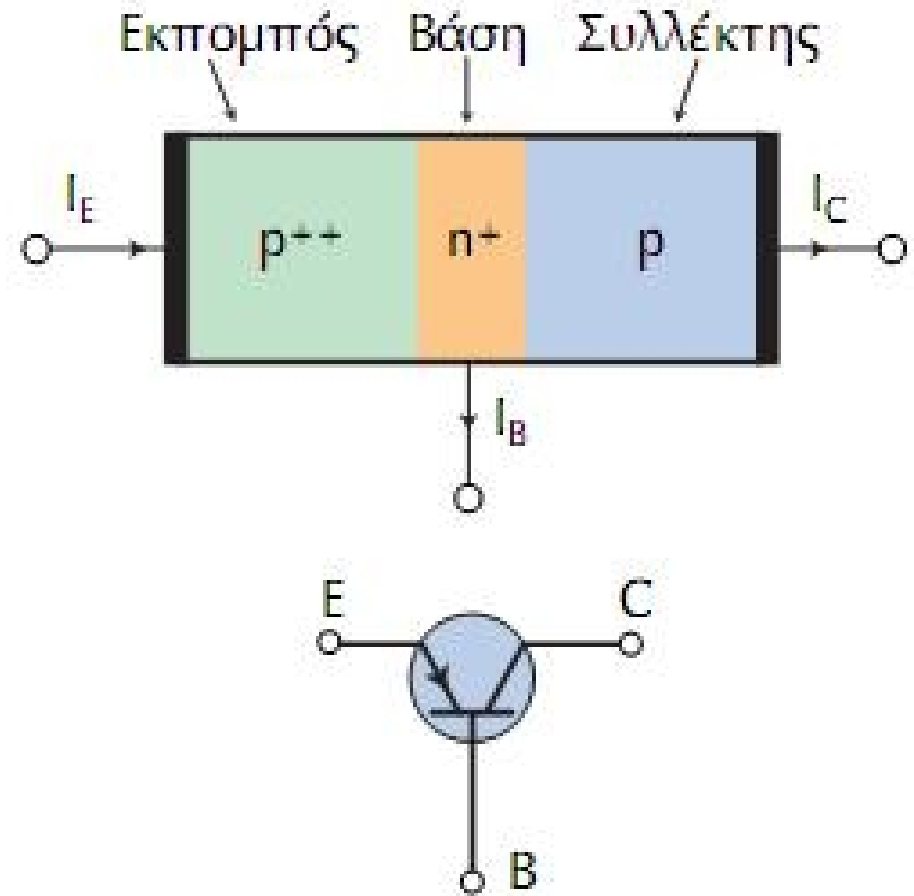
Το διπολικό τρανζίστορ (bipolar ή BJT) είναι ένας κρύσταλλος τριών στρωμάτων με διαφορετικό επίπεδο εμπλουτισμού: τον **εκπομπό E**, τη **βάση B** και το **συλλέκτη C**.

Ανάλογα με τον τρόπο εμπλουτισμού τους διακρίνονται σε:

- α) τρανζίστορ τύπου **PNP** και
- β) τρανζίστορ τύπου **NPN**.

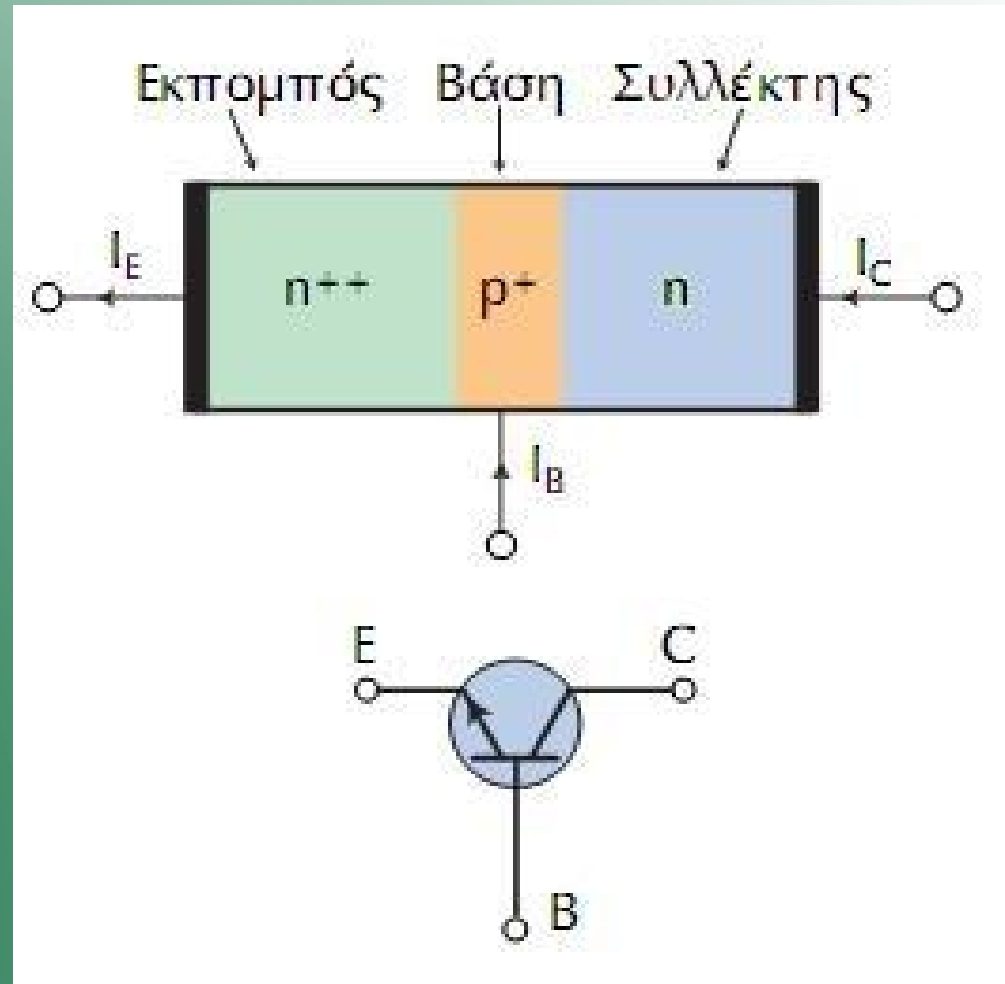
# Δομή του τρανζίστορ PNP

Ο **εκπομπός** είναι μια έντονα εμπλουτισμένη περιοχή, η **βάση** είναι πολύ λεπτή και λιγότερο εμπλουτισμένη, ενώ ο **συλλέκτης** έχει το λιγότερο εμπλουτισμό αλλά καταλαμβάνει τη μεγαλύτερη περιοχή.



# Δομή του τρανζίστορ NPN

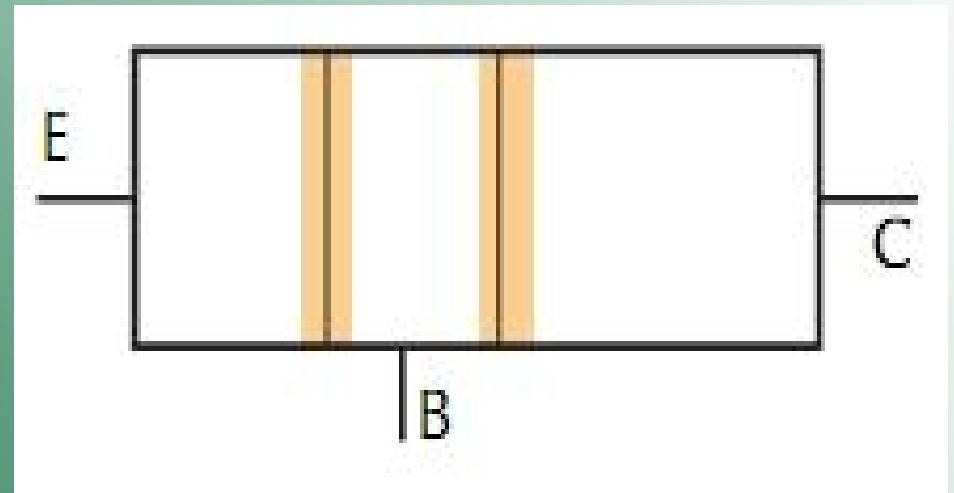
- Το τρανζίστορ NPN είναι **συμπληρωματικό** του PNP, καθώς οι φορείς πλειονότητας στο NPN είναι ηλεκτρόνια ενώ στο PNP είναι οπές.
- Η φορά του βέλους δείχνει πάντα τη συμβατική φορά του ηλεκτρικού ρεύματος.



# Μη πολωμένο τρανζίστορ NPN

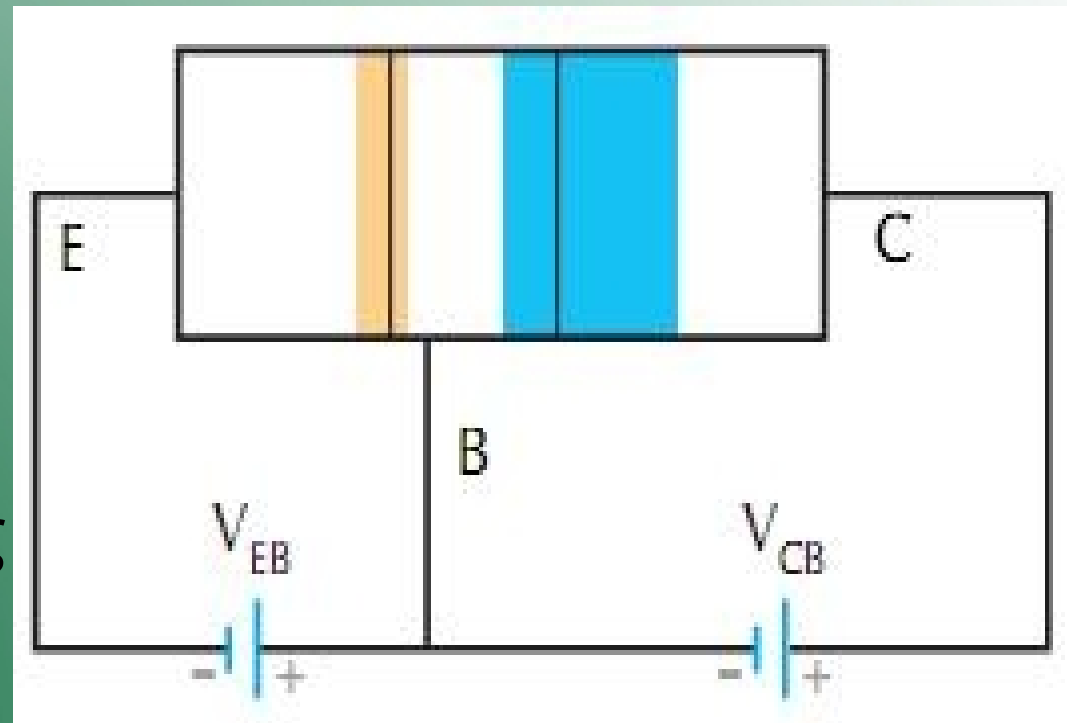
Κατά μήκος κάθε επαφής αναπτύσσεται ένα φράγμα δυναμικού, το οποίο στους  $23^{\circ}\text{C}$  έχει τιμή:

- α) **0,3V** αν ο ημιαγωγός είναι **γερμάνιο** και
- β) **0,7V** αν ο ημιαγωγός είναι **πυρίτιο**.



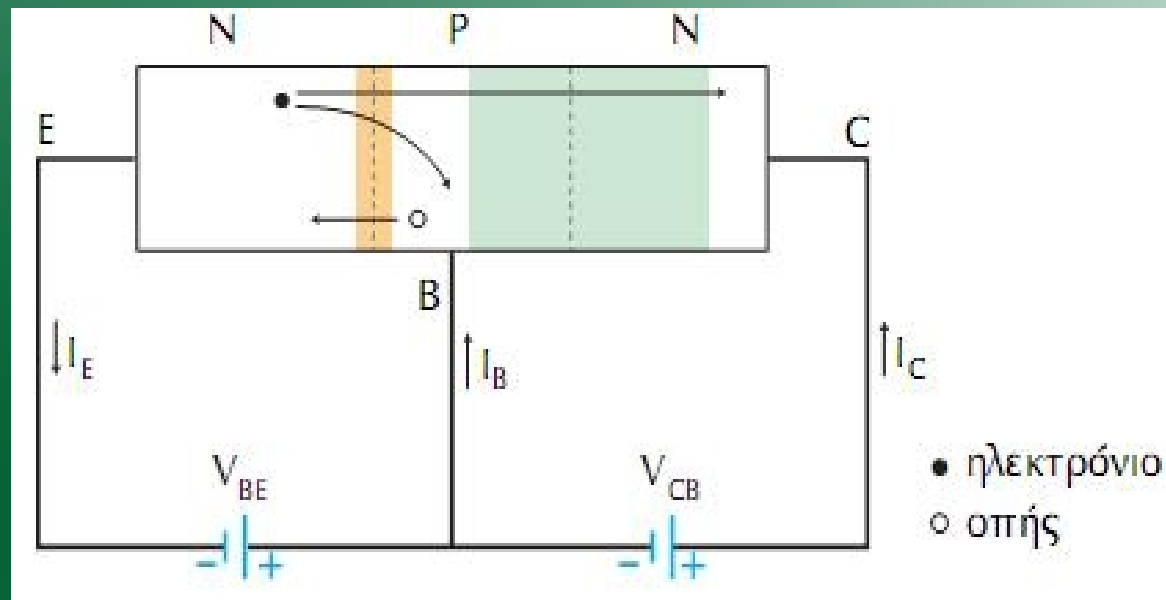
# Πολωμένο τρανζίστορ NPN

Η επαφή E-B πολώνεται **ορθά**, ώστε ο εκπομπός να εκπέμπει φορτία προς τη βάση. Η επαφή C-B πολώνεται **ανάστροφα**, ώστε ο συλλέκτης να συλλέγει τα φορτία. Λόγω της πόλωσης η περιοχή φορτίου του Εκπομπού ελαττώνεται, ενώ του Συλλέκτη αυξάνεται.



# Αρχή λειτουργίας του τρανζίστορ NPN

Όταν η τάση ορθής πόλωσης  $V_{EB}$  ξεπεράσει τα  $0,7V$ , τότε ρέουν ηλεκτρόνια από τον Εκπομπό στη Βάση. Το λεπτό στρώμα ημιαγωγού τύπου-P της βάσης περιορίζεται σημαντικά από την τάση ανάστροφης πόλωσης  $V_{CB}$ , με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να συλλέγονται από το συλλέκτη.



# Αρχή λειτουργίας του τρανζίστορ NPN

- Η επαφή εκπομπού-βάσης είναι πάντα **ορθά** πολωμένη, ενώ η επαφή συλλέκτη-βάσης είναι πάντα πολωμένη **ανάστροφα**.
- Το ρεύμα συλλέκτη είναι περίπου ίσο με το ρεύμα του εκπομπού, δηλαδή  $I_C \approx I_E$ .
- Το ρεύμα βάσης είναι πολύ μικρό.
- Το ρεύμα εκπομπού είναι ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων βάσης και συλλέκτη, δηλαδή  $I_C + I_B = I_E$ .



# Συντελεστές $\alpha_{DC}$ και $\beta_{DC}$

- Ο συντελεστής  $\alpha_{DC}$  εκφράζει το ποσοστό των φορτίων που εκπέμπονται από τον εκπομπό και φθάνουν στο συλλέκτη. Ο  $\alpha_{DC}$  είναι πάντα μικρότερος της μονάδας.
- Ο συντελεστής  $\beta_{DC}$  (συντελεστής απολαβής ρεύματος) δηλώνει πόσες φορές μεγαλύτερο ρεύμα είναι δυνατό να ελέγξουμε στο κύκλωμα του συλλέκτη μέσω του ρεύματος βάσης.

$$\alpha_{DC} = \frac{I_C}{I_E}$$

$$\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B}$$

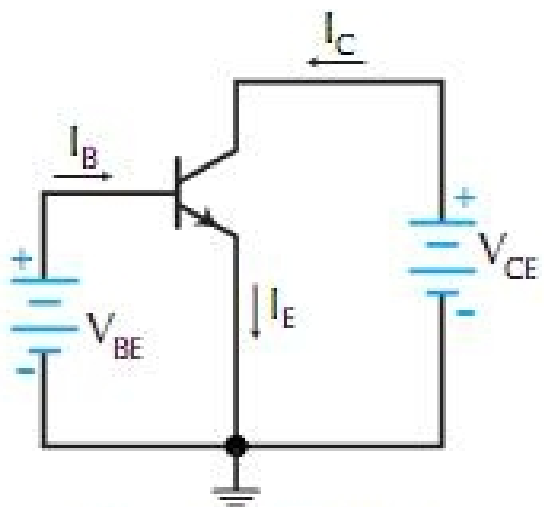
# Συντελεστές $\alpha_{DC}$ και $\beta_{DC}$

- Όσο περισσότερο ο συντελεστής  $\alpha_{DC}$  προσεγγίζει τη μονάδα, τόσο αυξάνεται η απολαβή ρεύματος  $\beta_{DC}$ .
- Οι τιμές του συντελεστή  $\beta_{DC}$  στα τρανζίστορ χαμηλής ισχύος κυμαίνονται μεταξύ 100 και 300, ενώ στα τρανζίστορ ισχύος κυμαίνονται μεταξύ 30 και 150.

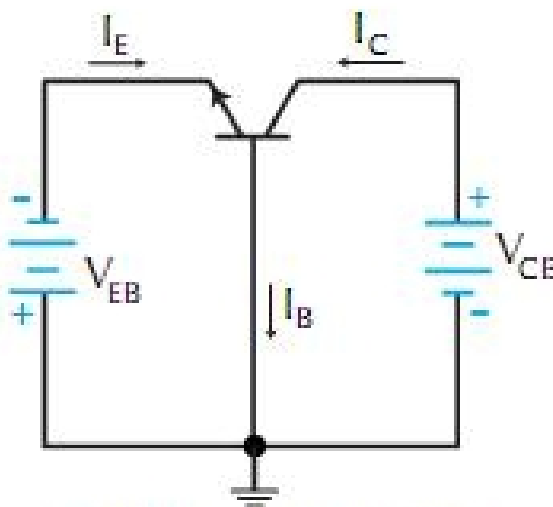
$$\alpha_{DC} = \frac{\beta_{DC}}{1 + \beta_{DC}}$$
$$\beta_{DC} = \frac{\alpha_{DC}}{1 - \alpha_{DC}}$$

# Βασικές συνδεσμολογίες τρανζίστορ

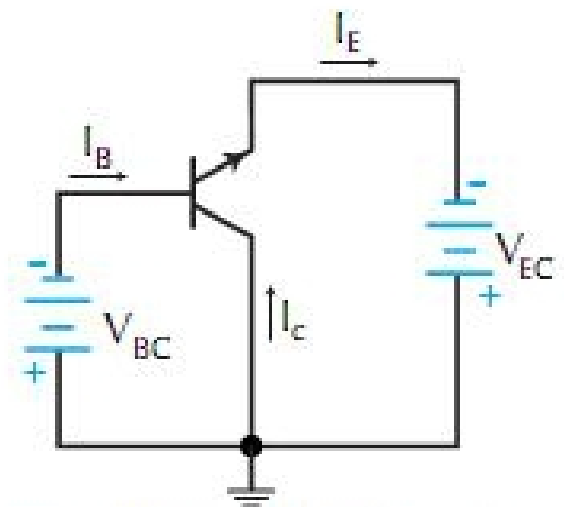
Πάντα η δίοδος εκπομπού είναι ορθά πολωμένη, ενώ η δίοδος συλλέκτη είναι πολωμένη ανάστροφα.



κοινού εκπομπού (CE).



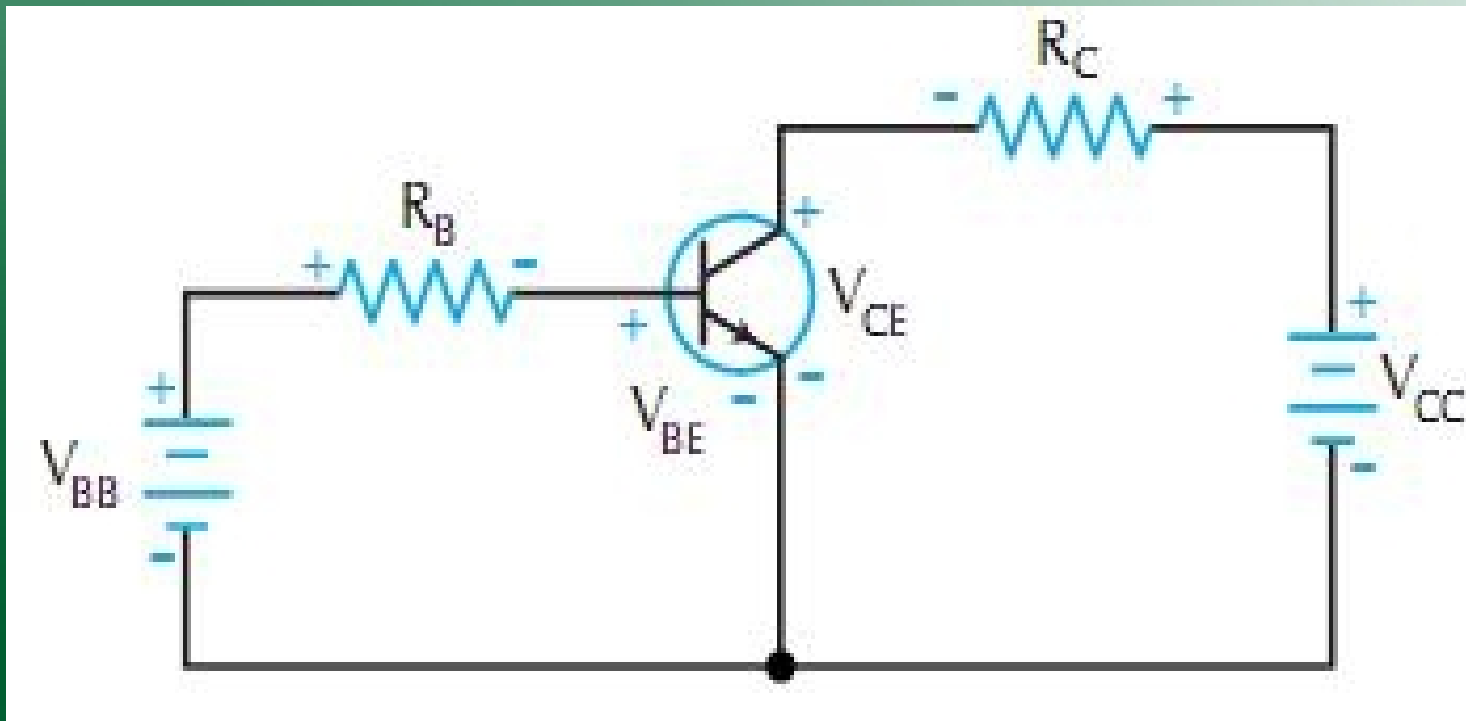
κοινής βάσης (CB)



κοινού συλλέκτη (CC)

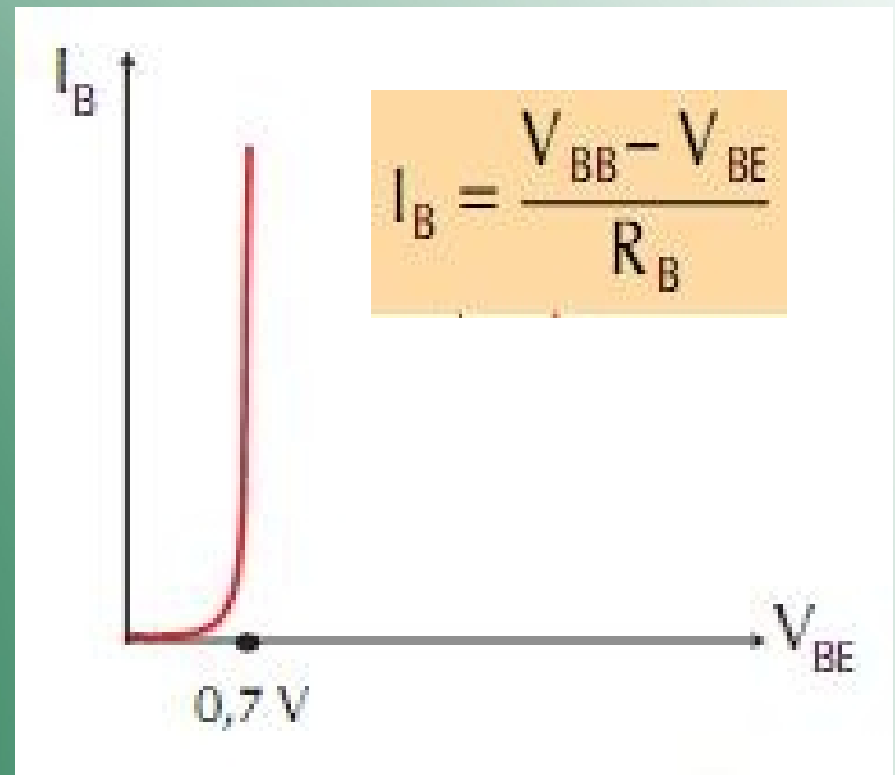
# Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

Οι αντιστάσεις  $R_B$  και  $R_C$  χρησιμεύουν για τον περιορισμό των ρευμάτων σε κάθε βρόχο.



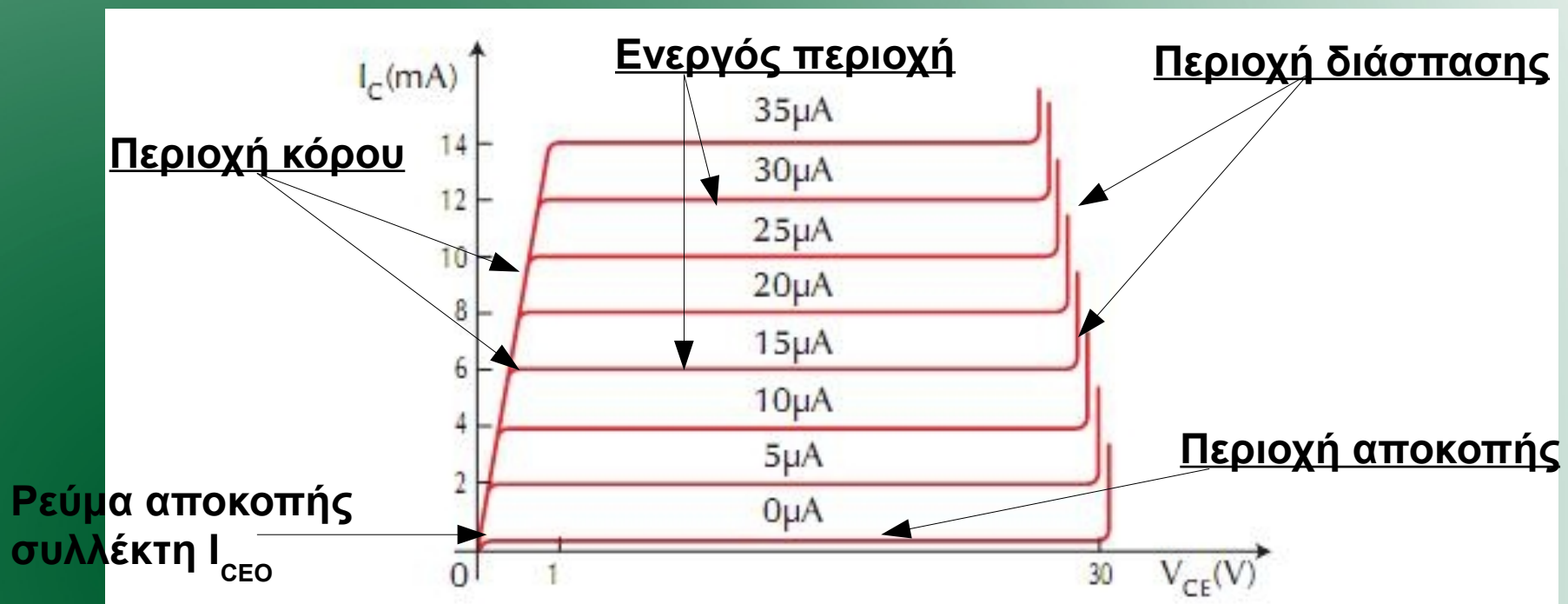
# Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος βάσης (κύκλωμα κοινού εκπομπού)

Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος βάσης λαμβάνεται όταν μεταβάλλεται η  $V_{BB}$  και μετράται το  $I_B$ .



# Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος συλλέκτη (κύκλωμα κοινού εκπομπού)

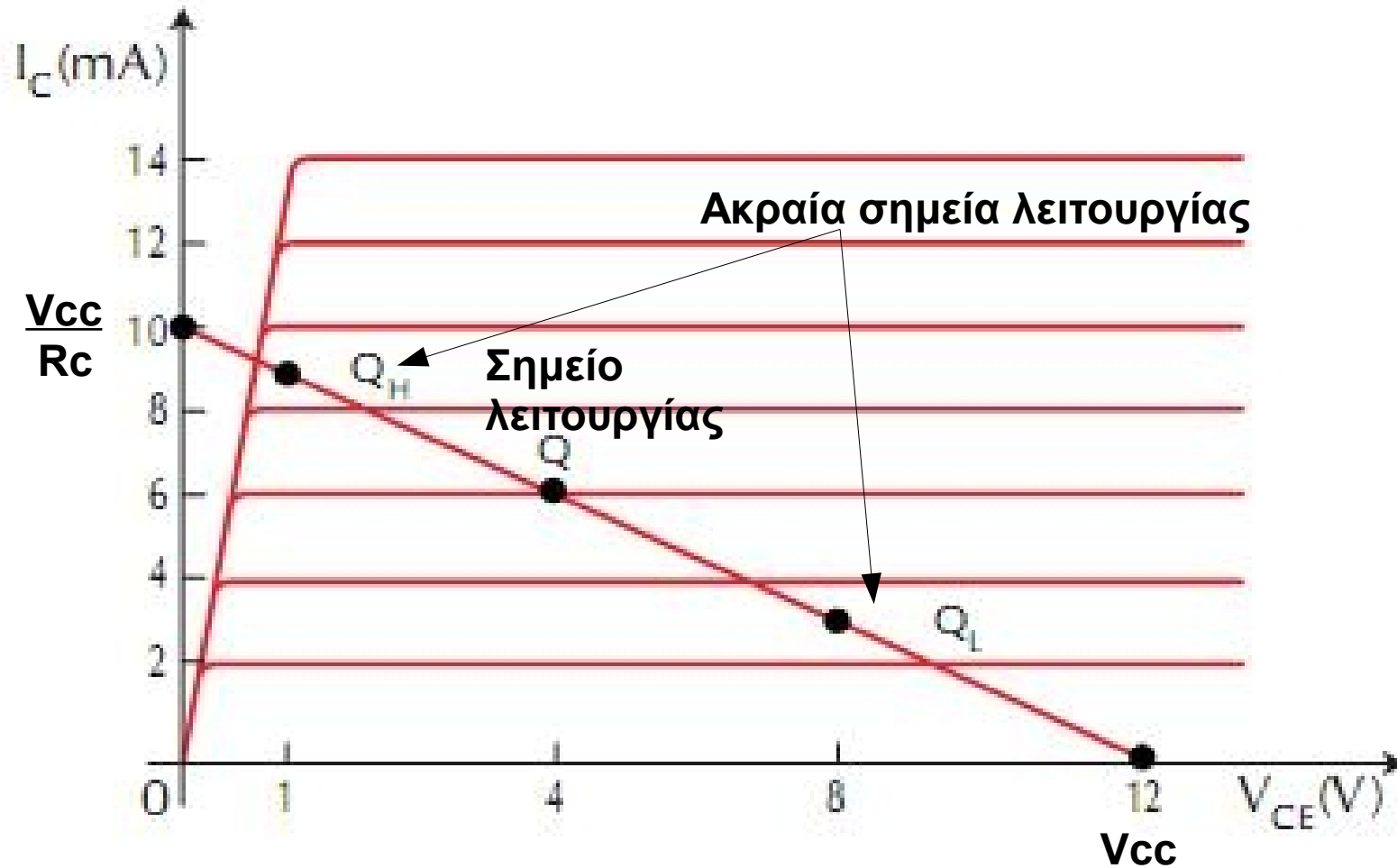
Λαμβάνονται όταν μεταβάλλεται η  $V_{CC}$  και μετράμε το ρεύμα συλλέκτη  $I_C$  με σταθερό το ρεύμα βάσης  $I_B$  σε όλη τη διάρκεια της μέτρησης.



# Τεχνικά χαρακτηριστικά τρανζίστορ

- $V_{CB}$  : τάση διάσπασης διόδου συλλέκτη-βάσης
- $V_{CEO}$  : τάση διάσπασης συλλέκτη-εκπομπού ( $I_B=0$ )
- $V_{EB}$  : τάση διάσπασης διόδου βάσης-εκπομπού
- $I_C$  : μέγιστο ρεύμα συλλέκτη
- $P_{DA}$  : μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς για θερμοκρασία περιβάλλοντος
- $P_{DC}$  : μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς για θερμοκρασία κελύφους
- $h_{FE}$  : συντελεστής  $\beta_{DC}$

# Ευθεία φόρτου



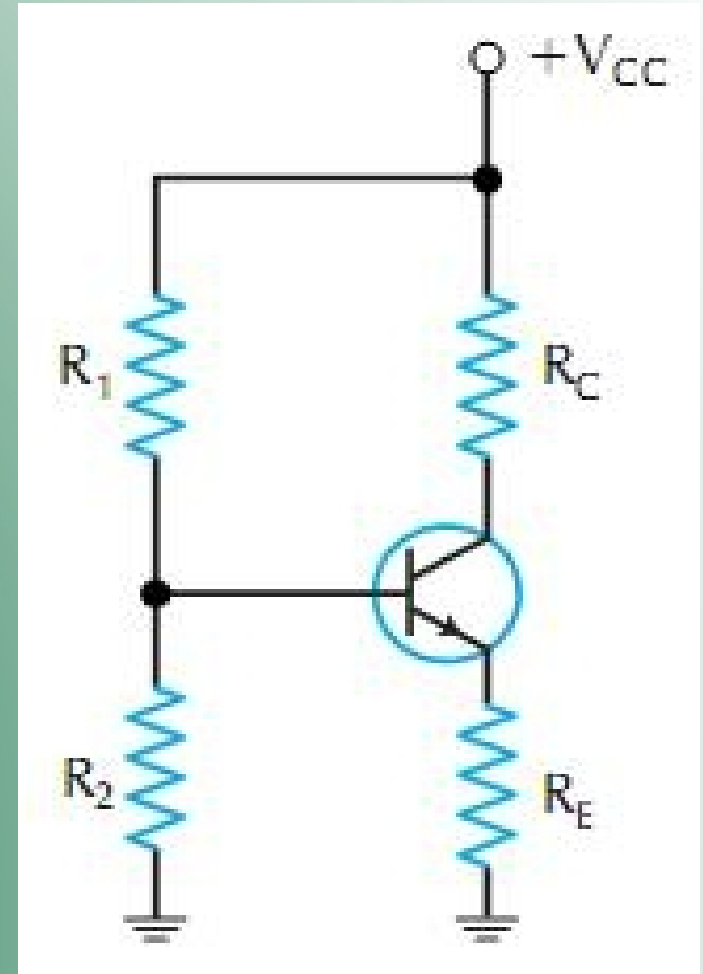


# Προβλήματα αρχικού κυκλώματος κοινού εκπομπού

- χρειαζόμαστε δύο πηγές τάσης ( $V_{BB}$  και  $V_{CC}$ )
- ο συντελεστής  $\beta_{DC}$  ποικίλει στις ίδιες σειρές τρανζίστορ ακόμα και με λόγο 3:1
- όταν η δίοδος εκπομπού είναι ορθά πολωμένη, η τάση της μειώνεται κατά  $2,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ , με αποτέλεσμα όταν αυξάνει η θερμοκρασία του τρανζίστορ να αυξάνεται το ρεύμα βάσης και κατά συνέπεια το ρεύμα συλλέκτη. Οπότε το σημείο λειτουργίας μεταφέρεται προς τα πάνω. Όταν η θερμοκρασία μειώνεται, το σημείο Q μεταφέρεται προς τα κάτω.

# Διαιρέτης τάσης ( $R_1, R_2$ ) και αντίσταση εκπομπού ( $R_E$ )

- Ο διαιρέτης τάσης ( $R_1$  και  $R_2$ ) αντικαθιστά την πηγή  $V_{BB}$
- Η αντίσταση  $R_E$  παρεμβάλλεται μεταξύ εκπομπού και γείωσης με σκοπό να κάνει το κύκλωμα ανεξάρτητο του συντελεστή  $\beta_{DC}$  του τρανζίστορ, μειώνοντας έτσι τη θερμική ολίσθηση της διόδου εκπομπού



# Τύποι DC ανάλυσης κυκλώματος κοινού εκπομπού

- Τάση βάσης

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{DC}}$$

- Τάση εκπομπού

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

- Ρεύμα εκπομπού

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

- Ρεύμα συλλέκτη

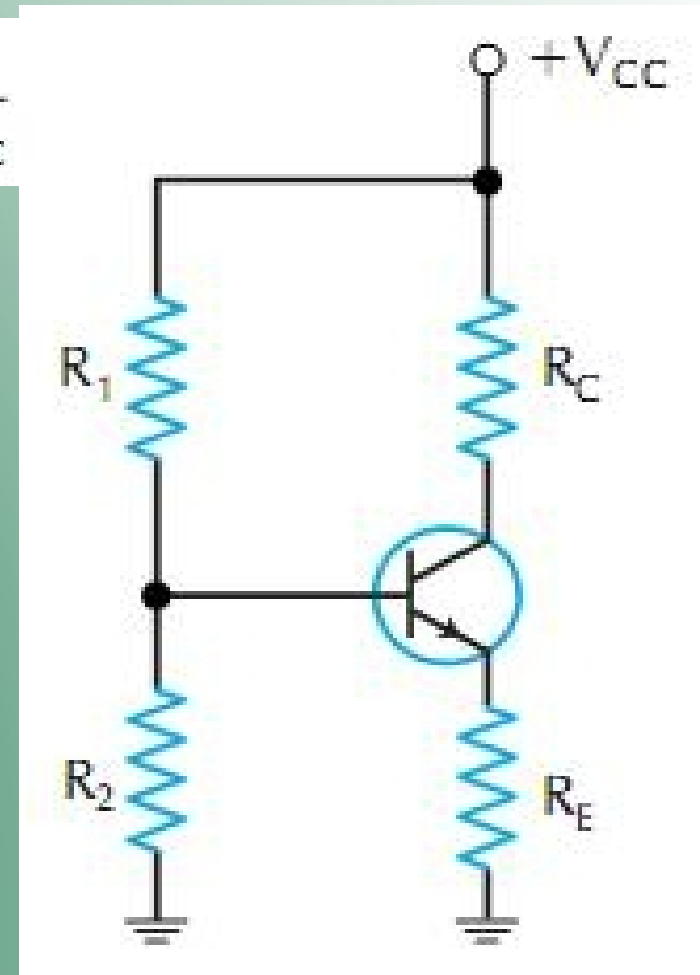
$$I_C \approx I_E$$

- Τάση συλλέκτη

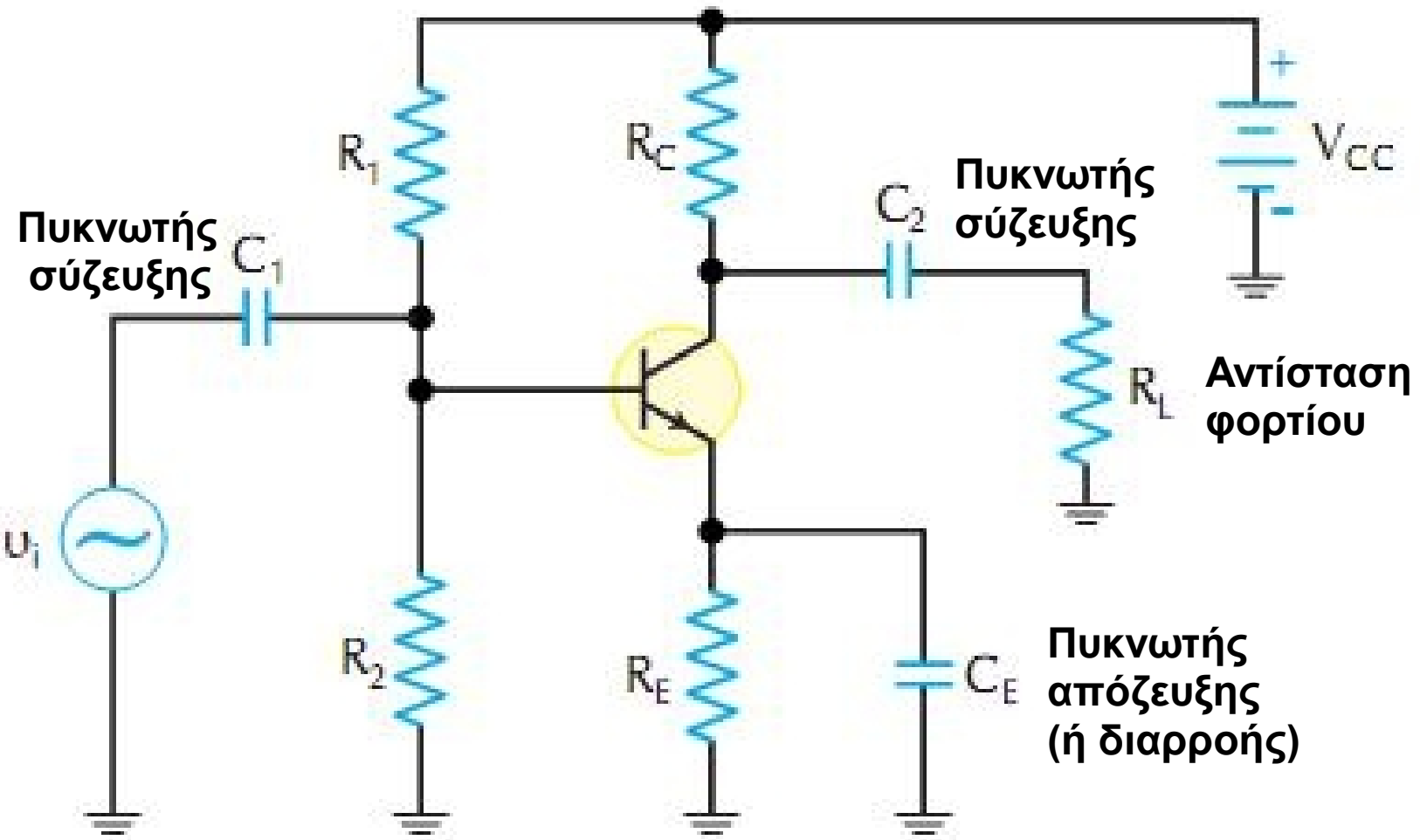
$$V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$

- Τάση C-E

$$V_{CE} = V_C - V_E$$



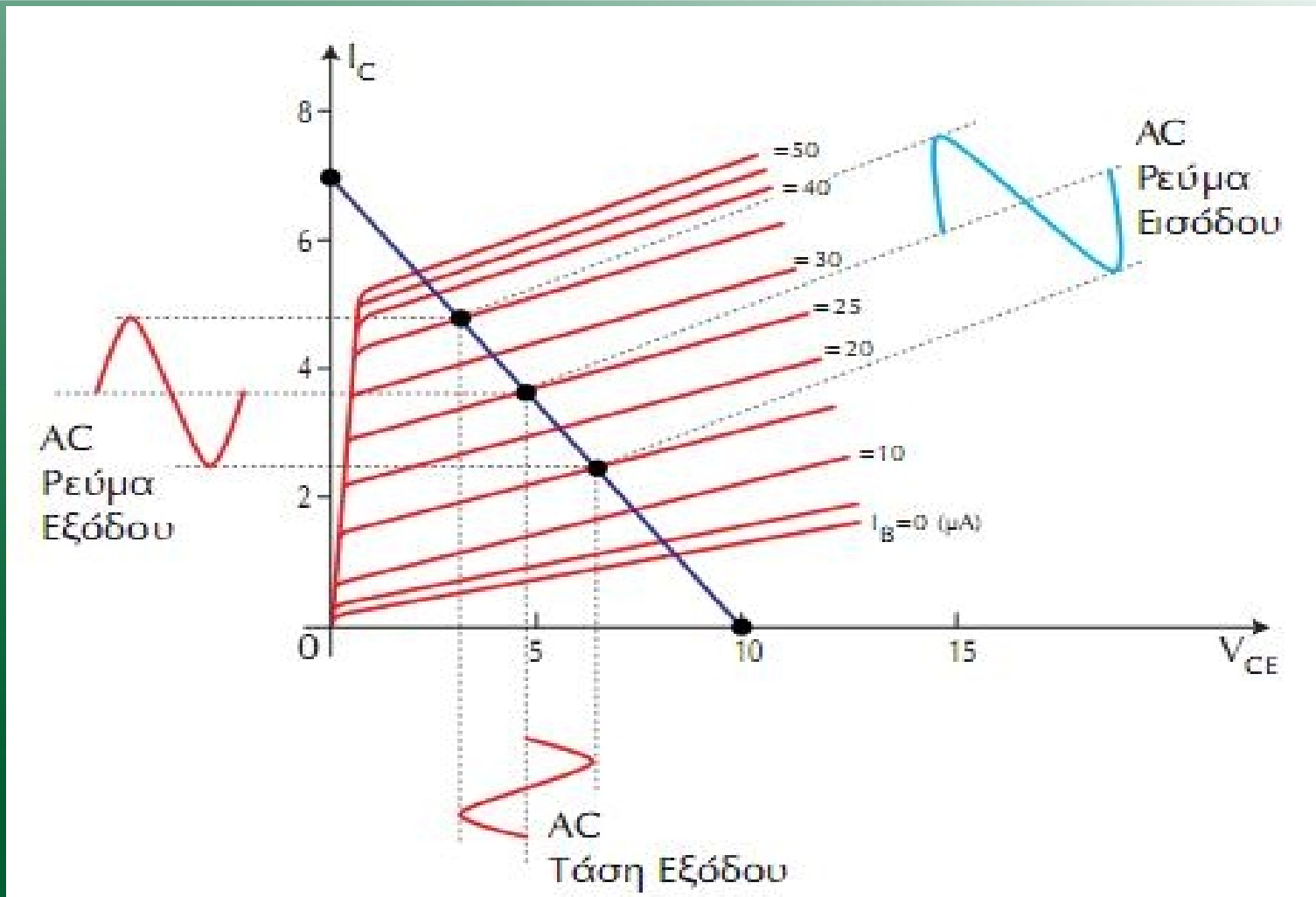
# Ενισχυτής κοινού εκπομπού



# Πυκνωτές σύζευξης και απόζευξης

- Οι πυκνωτές  $C_1$  και  $C_2$  ονομάζονται **ΠΥΚΝΩΤΕΣ ΣΥΖΕΥΞΗΣ**, διότι μέσω αυτών γίνεται η σύζευξη μεταξύ της γεννήτριας σήματος και του ενισχυτή, καθώς και του ενισχυτή με το φόρτο.
- Ο πυκνωτής  $C_E$  ονομάζεται **ΠΥΚΝΩΤΗΣ ΑΠΟΖΕΥΞΗΣ** ή **ΔΙΑΡΡΟΗΣ**, επειδή γειώνει τον εκπομπό για το εναλλασσόμενο (έχει πολύ μικρή σύνθετη αντίσταση).
- Χωρίς τον πυκνωτή  $C_E$ , η απολαβή τάσης του εκπομπού είναι μικρότερη.

# Χαρακτηριστική εισόδου-εξόδου του ενισχυτή κοινού εκπομπού



# Τύποι AC ανάλυσης κυκλώματος κοινού εκπομπού

- Αντίσταση

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_C}$$

- Αντίσταση

$$r_L = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L}$$

- Απολαβή τάσης (με  $C_E$ )

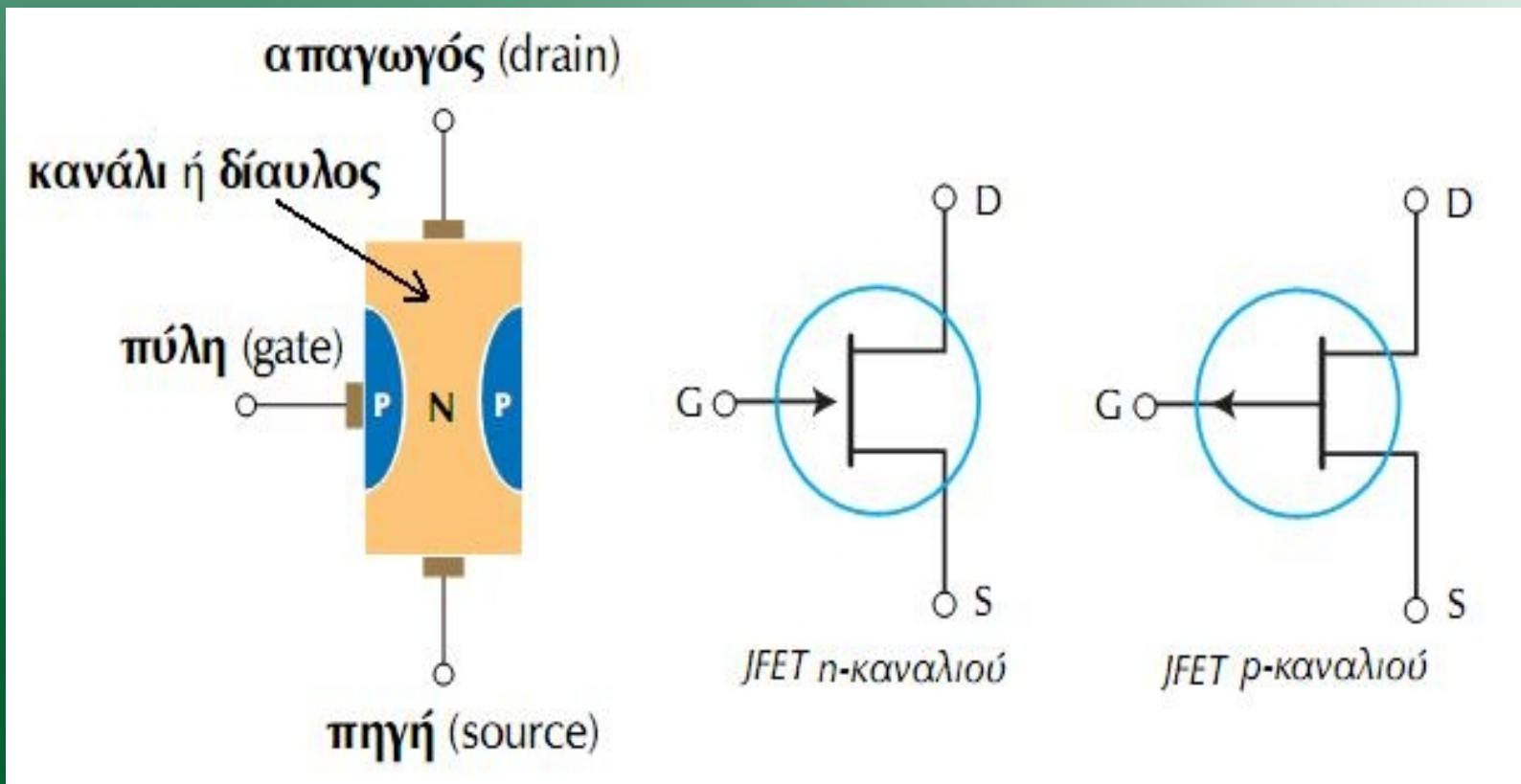
$$A_V = \frac{U_L}{U_i} = \frac{r_L}{r_e}$$

- Απολαβή τάσης (χωρίς  $C_E$ )

$$A_V = \frac{U_L}{U_i} = \frac{r_L}{r_e + R_E}$$

# Τρανζίστορ εγκάρσιου πεδίου επαφής (*Junction Field Effect Transistor, JFET*)

Ονομάζεται **μονοπολικό** τρανζίστορ, διότι βασίζει τη λειτουργία του σε ένα μόνο είδος φορέων (ηλεκτρόνια ή οπές).



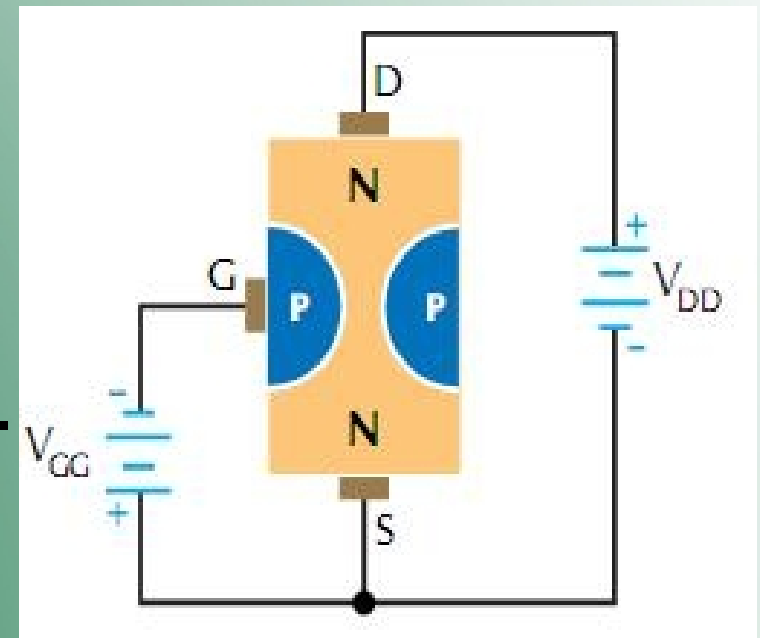


# *Αντιστοιχία διπολικού τρανζίστορ και μονοπολικού JFET*

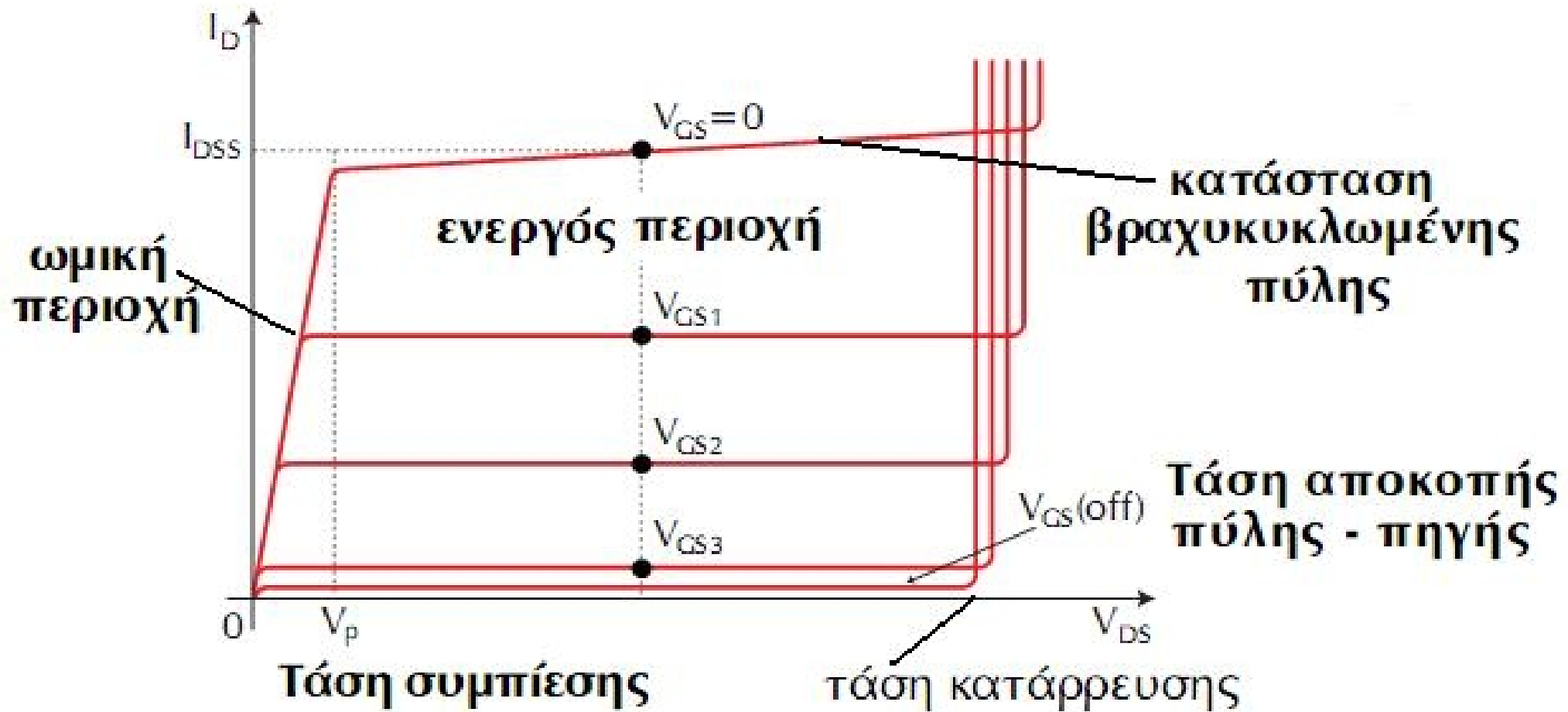
Διπολικό Τρανζίστορ	JFET	Διπολικό Τρανζίστορ	JFET
Εκπομπός	Πηγή	E	S
Βάση	Πύλη	B	G
Συλλέκτης	Απαγωγός	C	D

# Αρχή λειτουργίας JFET

- Μεταβάλλοντας την πόλωση της πύλης, μεταβάλλεται το εύρος του καναλιού και έτσι ελέγχεται το ρεύμα που διαρρέει το JFET.
- Η πύλη πολώνεται ανάστροφα.
- Το ρεύμα πύλης είναι πάρα πολύ μικρό.
- Η αντίσταση εισόδου είναι πολύ μεγάλη.



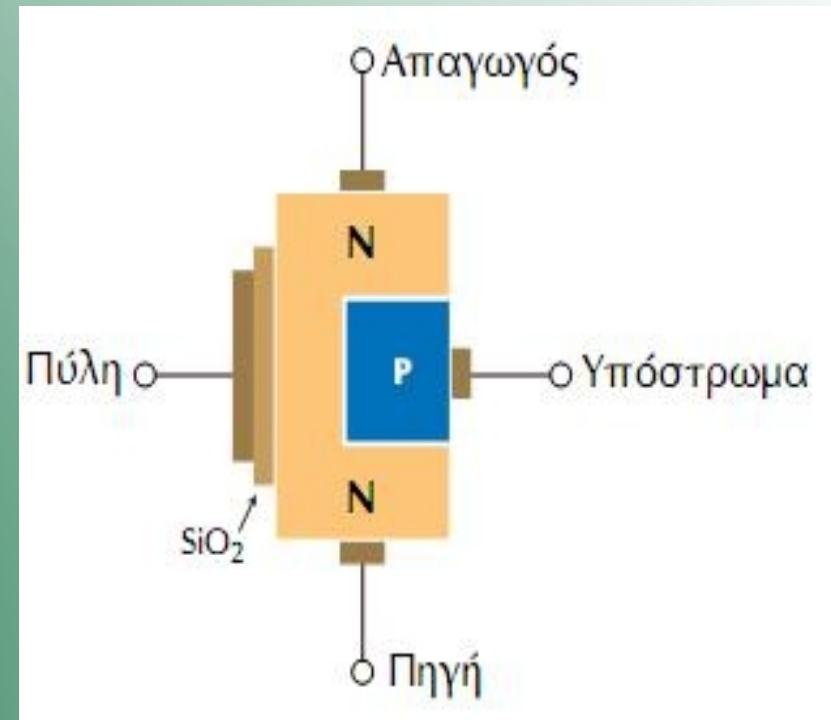
# Χαρακτηριστικές καμπύλες JFET



# *MOSFET*

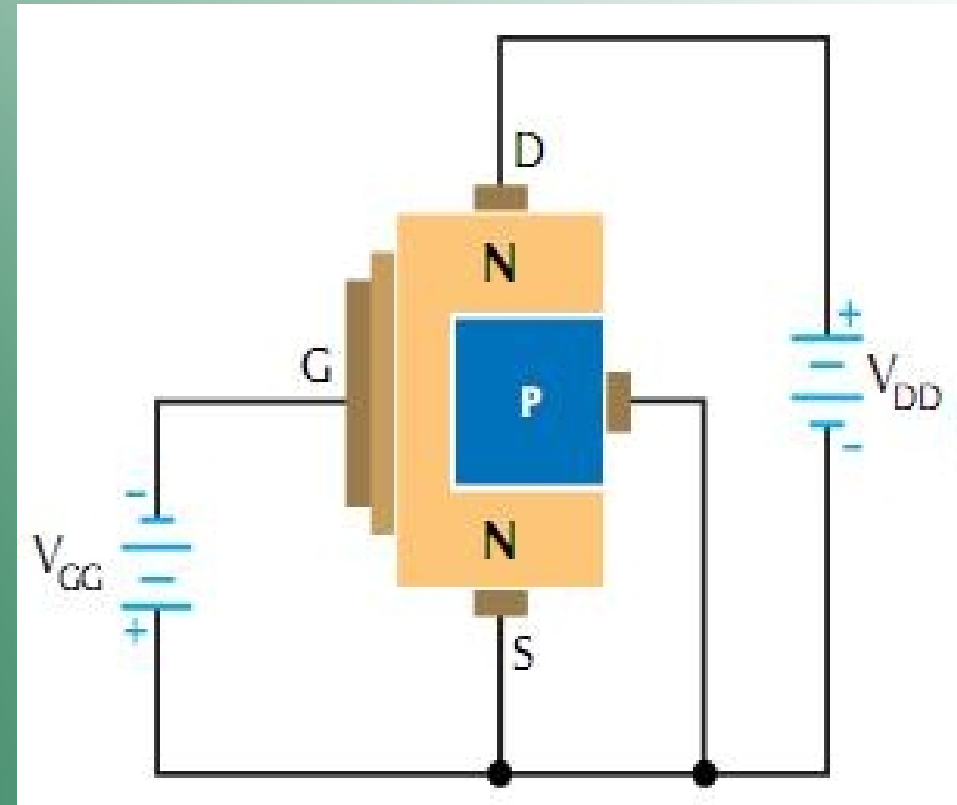
## *(Metal-Oxide Semiconductor FET)*

- Η πύλη είναι ηλεκτρικά μονωμένη ως προς το κανάλι (παρεμβάλλεται ένα λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου ως μονωτικό).
- Το ρεύμα της πύλης είναι πολύ μικρό.
- Τα MOSFET διακρίνονται σε τύπου **πύκνωσης** και τύπου **αραίωσης**.



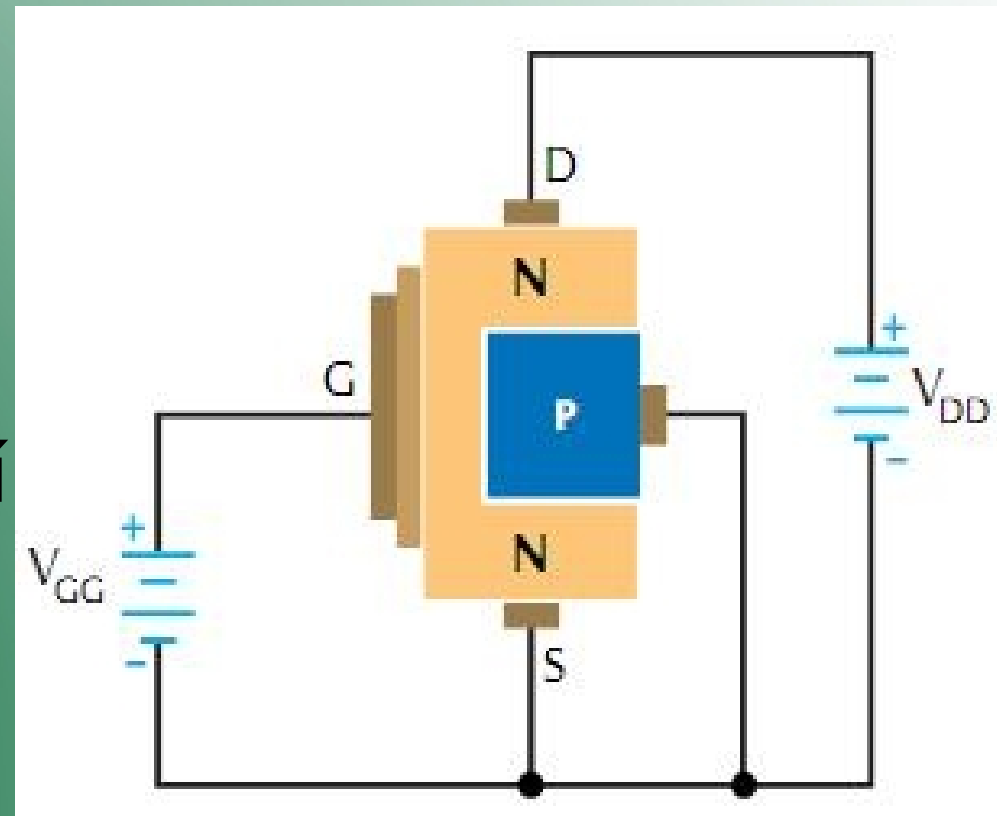
# *MOSFET* τύπου αραίωσης με αρνητική τάση πύλης

- Όταν στην πύλη εφαρμοστεί αρνητική τάση, τότε αυτή απωθεί τα ηλεκτρόνια του καναλιού, με αποτέλεσμα να **μειωθεί το ρεύμα απαγωγού**. Η λειτουργία αυτή ονομάζεται **αραίωση**.



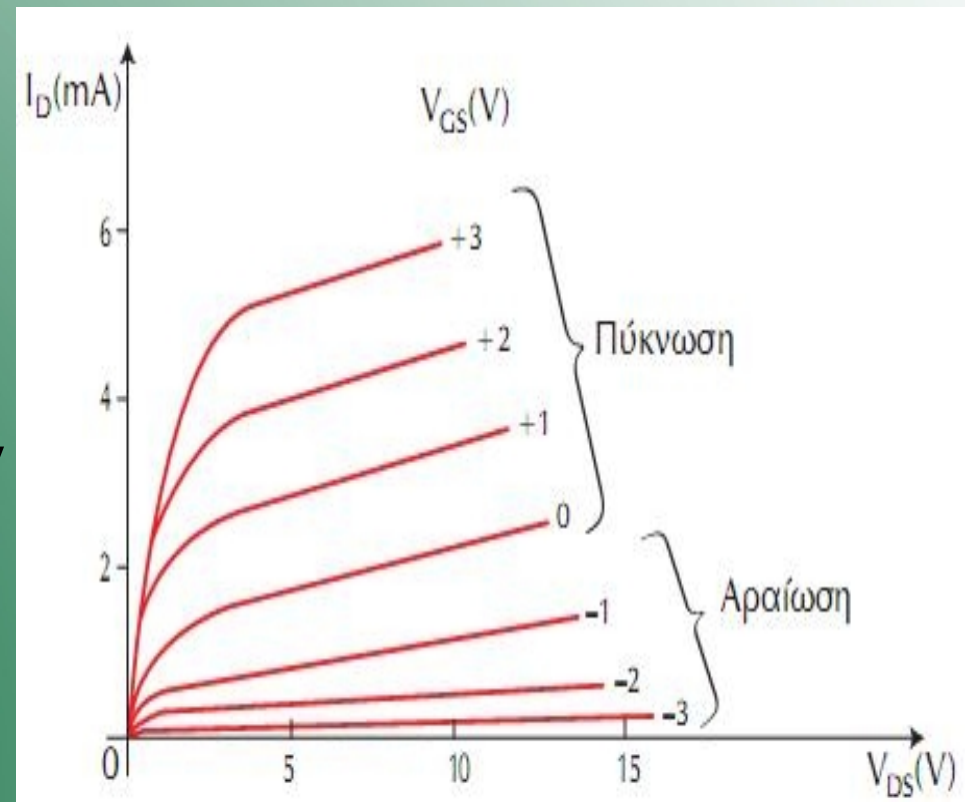
# *MOSFET* τύπου αραίωσης με θετική τάση πύλης

- Όταν στην πύλη εφαρμοστεί θετική τάση, τότε αυτή προσελκύει τα ηλεκτρόνια του καναλιού, με αποτέλεσμα να **αυξηθεί το ρεύμα απαγωγού**. Η λειτουργία αυτή ονομάζεται **πύκνωση**.

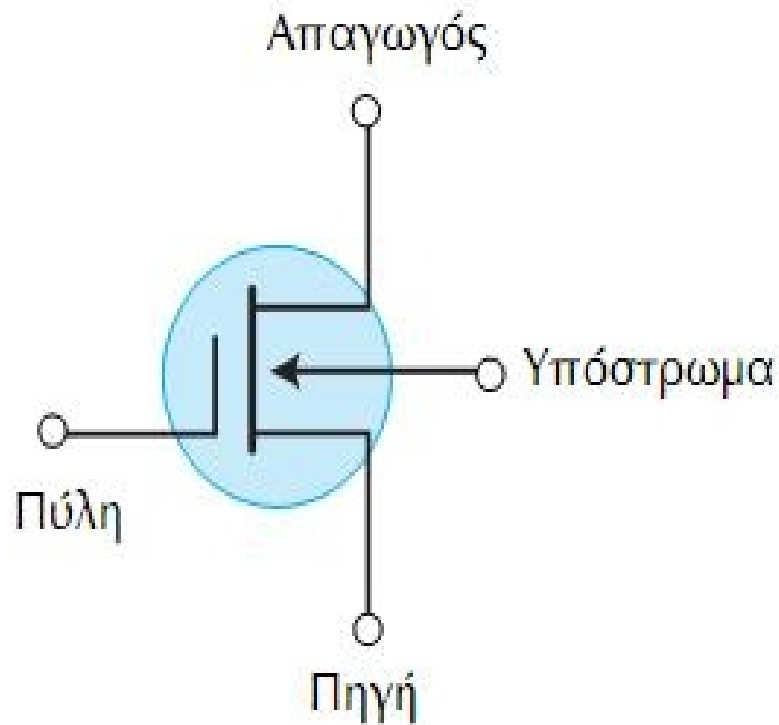


# Χαρακτηριστική ρεύματος απαγωγού των MOSFET αραίωσης

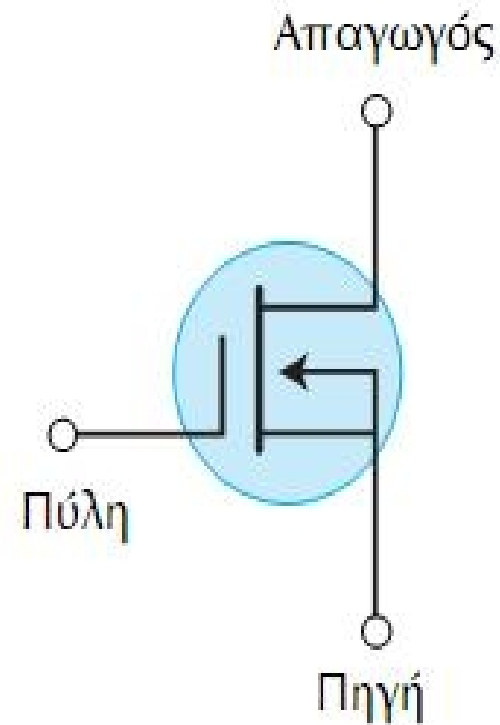
- Με θετικές τάσεις στην πύλη έχουμε αύξηση του ρεύματος απαγωγού (**πύκνωση**).
- Με αρνητικές τάσεις στην πύλη έχουμε μείωση του ρεύματος απαγωγού (**αραίωση**).



# Σύμβολα MOSFET τύπου αραίωσης



MOSFET τύπου αραίωσης N-καναλιού με ακροδέκτη υποστρώματος,



MOSFET τύπου αραίωσης N-καναλιού χωρίς ακροδέκτη υποστρώματος

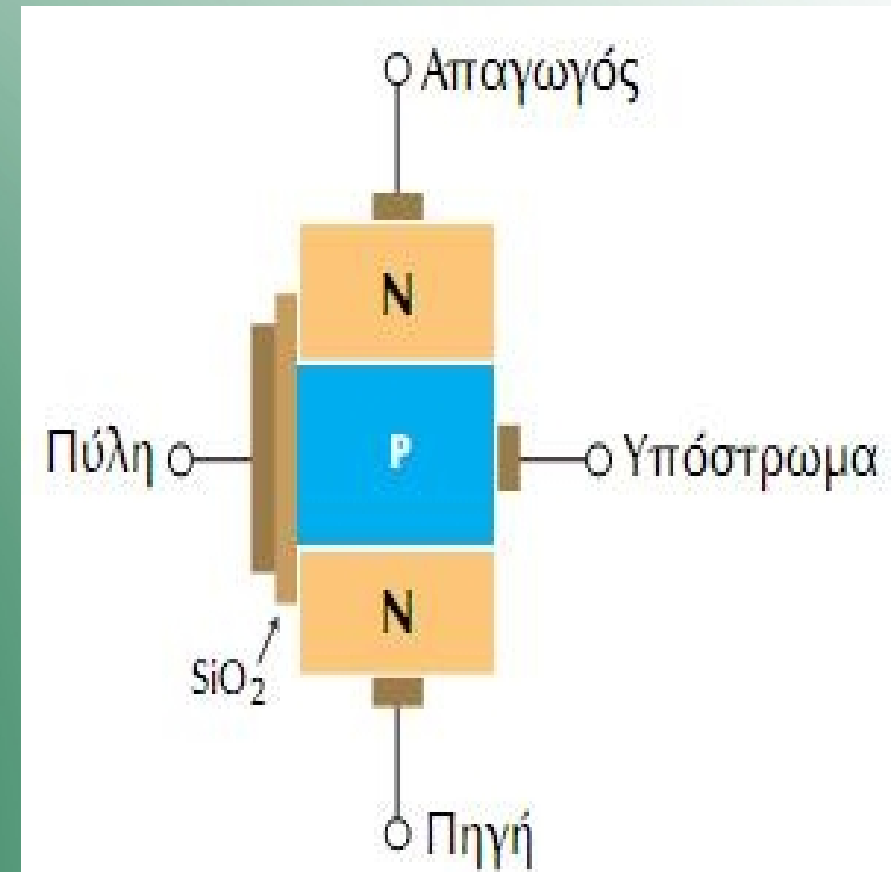


# *Εφαρμογές MOSFET τύπου αραιώσης*

- Χρησιμοποιούνται κυρίως στα **αναλογικά** ηλεκτρονικά (ενισχυτές, κυκλώματα αυτομάτου ελέγχου απολαβής, κτλ).

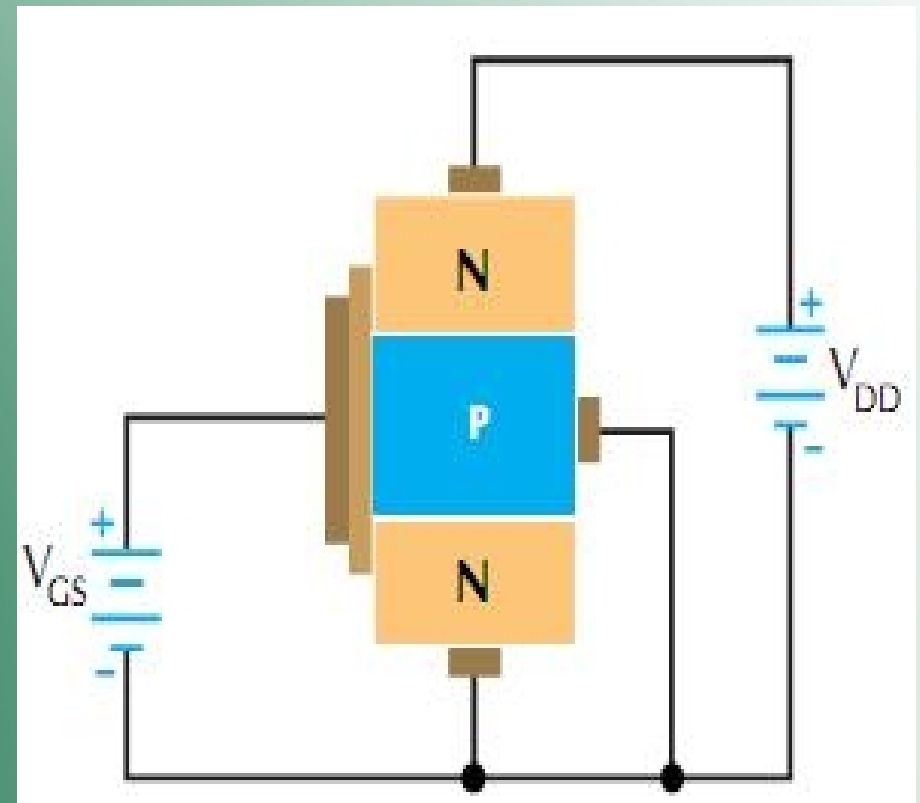
# *MOSFET* τύπου πύκνωσης

- Λειτουργεί **αποκλειστικά με πύκνωση** και επιτρέπει ταυτόχρονη ολοκλήρωση διατάξεων **N και P καναλιού** στο ίδιο τσιπ!
- Το υπόστρωμα εκτείνεται μέχρι την επίστρωση του διοξειδίου του πυριτίου.



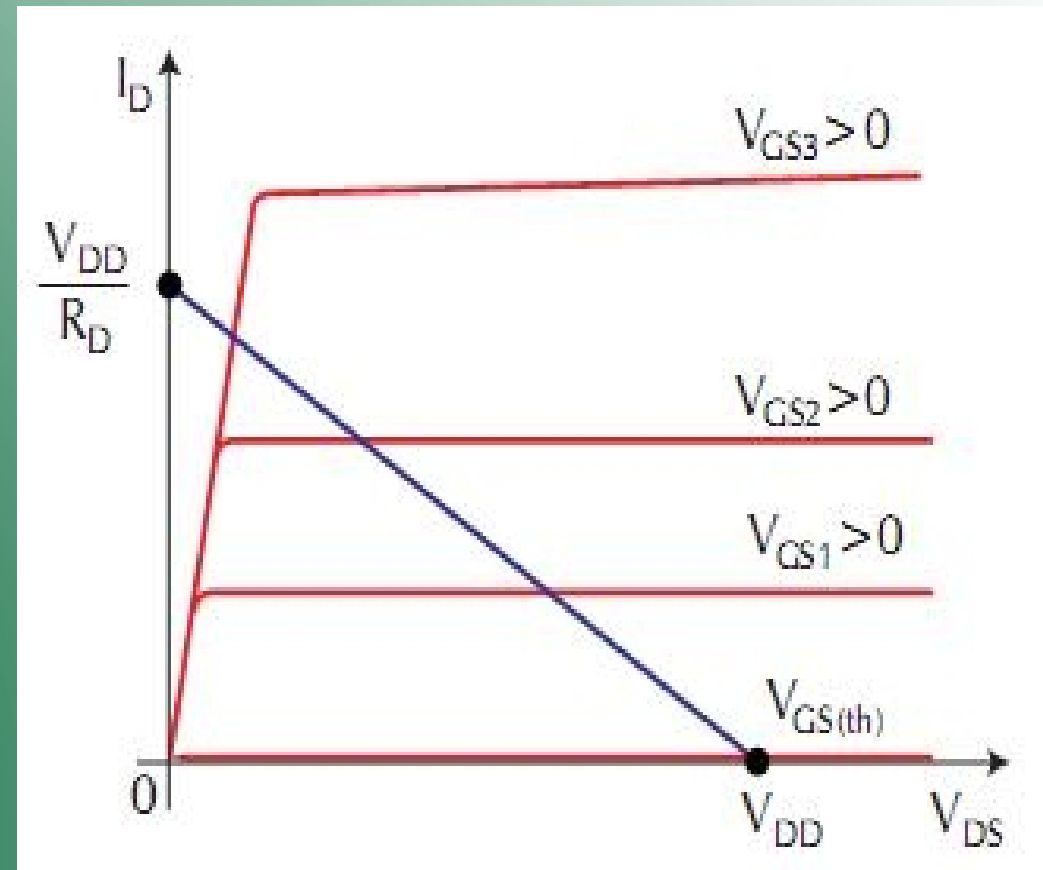
# Πόλωση MOSFET τύπου πύκνωσης

- Το ρεύμα απαγωγού καθορίζεται από την τάση της πύλης.
- Όταν η τάση της πύλης είναι μικρότερη από την τάση κατωφλίου, τότε δεν περνάει ρεύμα.

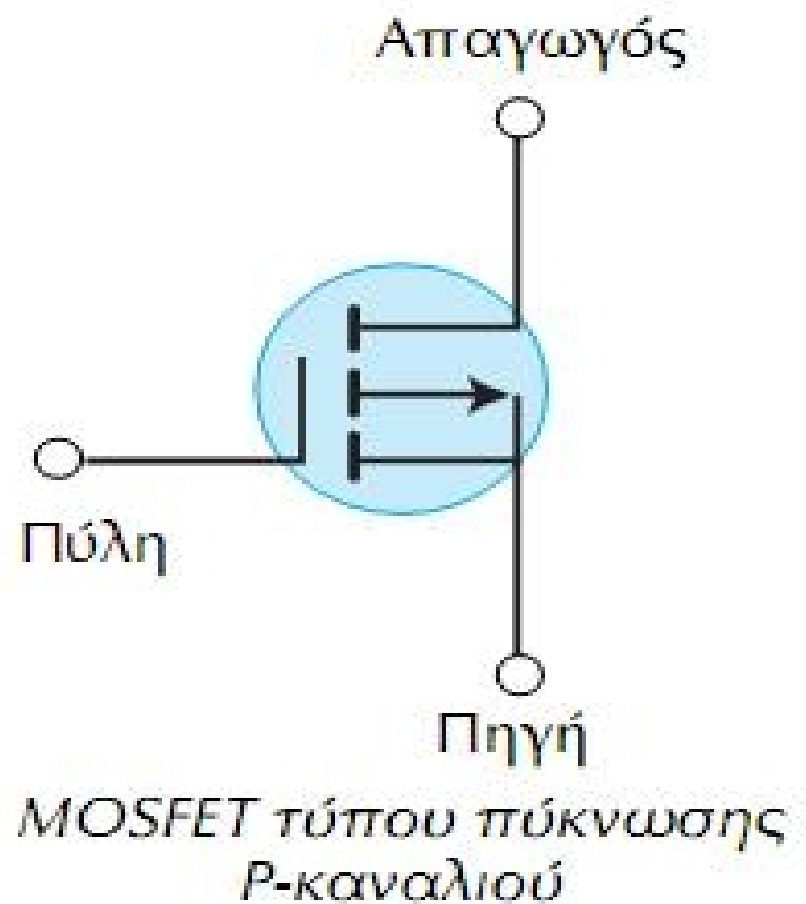
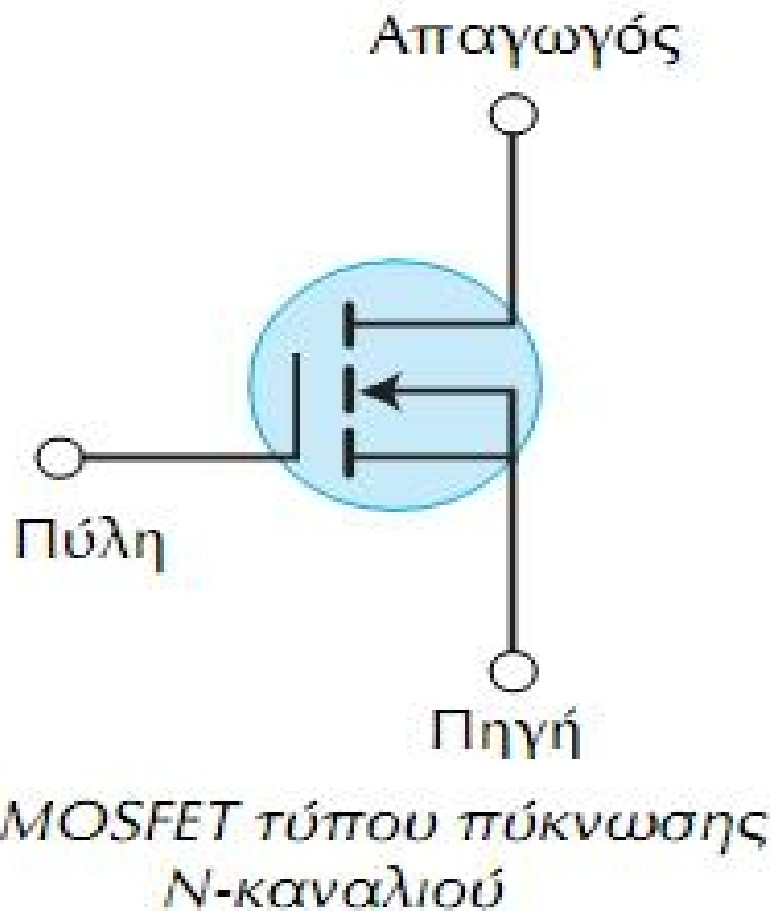


# Χαρακτηριστική ρεύματος απαγωγού *MOSFET* τύπου πύκνωσης

- Το ρεύμα απαγωγού καθορίζεται από την τάση της πύλης.
- Όταν η τάση της πύλης είναι μικρότερη από την τάση κατωφλίου, τότε δεν περνάει ρεύμα.



# Σύμβολα MOSFET τύπου πύκνωσης



# *Εφαρμογές MOSFET τύπου πύκνωσης*

- Χρησιμοποιούνται στα **αναλογικά** ηλεκτρονικά (τελεστικοί ενισχυτές, voltage inverters, ενισχυτές, παλμοτροφοδοτικά) και κυρίως στα **ψηφιακά** ηλεκτρονικά (μνήμες RAM/ROM, πύλες CMOS, μικροεπεξεργαστές, κτλ).
- Έχουν **πολύ μικρή κατανάλωση ισχύος**
- Τα MOSFET είναι **πολύ ευαίσθητα** και μπορούν να καταστραφούν από τα ηλεκτροστατικά φορτία των χεριών μας!