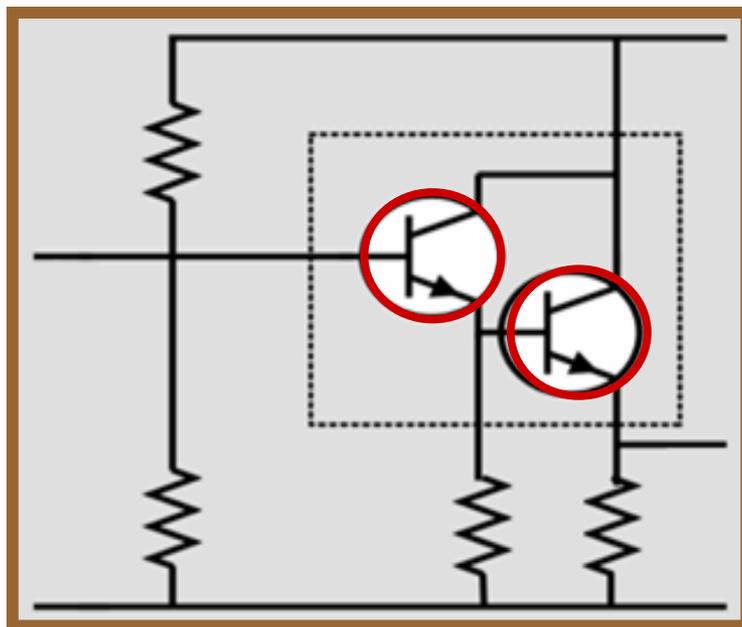


ΑΝΑΛΟΓΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ



Λάμπρος Μπισδούνης
Καθηγητής



Διδάσκων και διαλέξεις του μαθήματος



- **Διδάσκων:** Λάμπρος Μπισδούνης, Καθηγητής
- **Γραφείο:** Εργαστήριο Αναλογικών Ηλεκτρονικών Κυκλωμάτων, 1^{ος} όροφος κτηρίου Α1



- **Τηλέφωνο:** 2610 369293

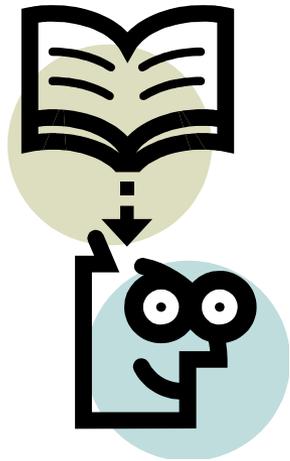


- **E-mail:** bisdounis@uop.gr



- **Διδασκαλία μαθήματος:**
Τετάρτη, 09:00 – 12:00, Αίθουσα Κ04

Προτεινόμενα βιβλία



Γ. Χαριτάντη, **Ηλεκτρονικά (Γραμμικά κυκλώματα συνεχούς χρόνου)**, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Αράκυνθος, 2013
[κωδικός στον Εύδοξο: [32998749](#)].

R. C. Jaeger, T. N. Blalock, B. J. Blalock, **Μικροηλεκτρονική**, Εκδόσεις Τζιόλα, 2026.
[κωδικός στον Εύδοξο: [143553071](#)].

B. Razavi, **Βασικές αρχές μικροηλεκτρονικής**, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2018.
[κωδικός στον Εύδοξο: [77108680](#)].

R. L. Boylestad, L. Nashelsky, **Ηλεκτρονικές διατάξεις και θεωρία κυκλωμάτων**, Εκδόσεις Τζιόλα, 2012.
[κωδικός στον Εύδοξο: [18549059](#)].

Στην ιστοσελίδα του μαθήματος στην πλατφόρμα **eclass** είναι διαθέσιμη **πρόσθετη βιβλιογραφία**, **ηλεκτρονικά βιβλία** και **σύνδεσμοι** με χρήσιμο υλικό.

Πρόσθετο διδακτικό υλικό



- Ιστοσελίδα του μαθήματος:

<https://eclass.uop.gr/courses/718>

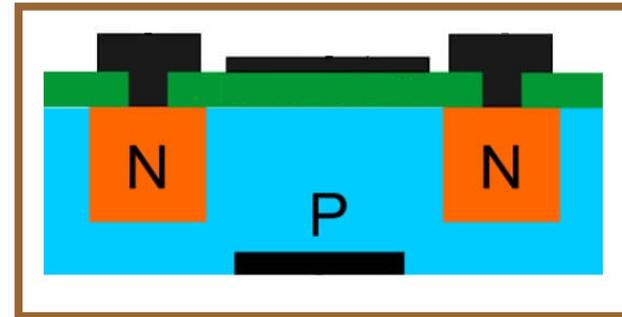
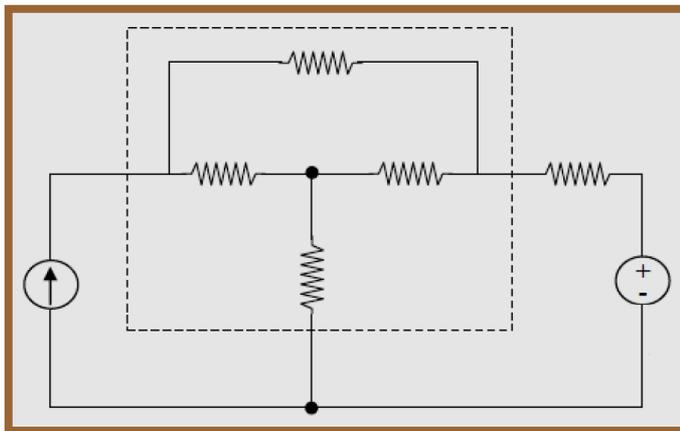
- Οι διαλέξεις περιλαμβάνουν **στοιχεία θεωρίας**, **παραδείγματα** και **λυμένες ασκήσεις**.



- Όλο το υλικό των διαλέξεων αναρτάται στην ιστοσελίδα του μαθήματος, στην οποία η πρόσβαση είναι ελεύθερη.

Ενότητες του μαθήματος

- Η πιο συνηθισμένη επεξεργασία αναλογικών σημάτων είναι η ενίσχυση τους, που επιτυγχάνεται με **ηλεκτρονικά κυκλώματα** που ονομάζονται **ενισχυτές**.
- Η σχέση αναλογίας που υπάρχει στους ενισχυτές μεταξύ του σήματος εισόδου και του σήματος εξόδου, τους χαρακτηρίζει ως **αναλογικά κυκλώματα**.
- Οι **ενισχυτές** αποτελούν και το **βασικό αντικείμενο** του μαθήματος.
- Οι ενότητες που θα μελετηθούν είναι οι παρακάτω:
 1. Βασικά στοιχεία ανάλυσης κυκλωμάτων και λειτουργίας τρανζίστορ
 2. Ενισχυτές απλής βαθμίδας με διπολικό τρανζίστορ
 3. Ενισχυτές απλής βαθμίδας με MOSFET
 4. Απόκριση συχνότητας ενισχυτών
 5. Καθρέπτες ρεύματος και ενισχυτές πολλών βαθμίδων
 6. Ανατροφοδότηση στους ενισχυτές
 7. Τελεστικός ενισχυτής



1^η ενότητα:
**ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ
ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ**



Περιεχόμενα 1^{ης} ενότητας

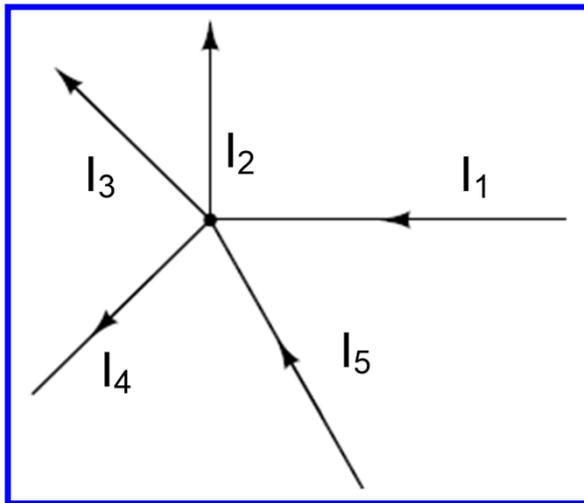
- Βασικά στοιχεία ανάλυσης κυκλωμάτων:
 - ✓ κανόνες Kirchhoff,
 - ✓ διαιρέτες τάσης και ρεύματος,
 - ✓ πραγματικές πηγές τάσης και ρεύματος,
 - ✓ μετασχηματισμοί Thevenin και Norton,
 - ✓ θεώρημα Miller (τάσεων και ρευμάτων),
 - ✓ ημιτονικά σήματα.
- Διπολικό τρανζίστορ (bipolar junction transistor).
- MOSFET (metal-oxide-semiconductor field effect transistor).

1^{ος} κανόνας Kirchhoff

Το αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων σε έναν κόμβο ισούται με 0:

$$\sum_{i=1}^N I_i = 0$$

Στο αλγεβρικό άθροισμα των ρευμάτων ενός κόμβου, στα ρεύματα που εισέρχονται στον κόμβο θέτουμε θετικό πρόσημο, ενώ στα ρεύματα που εξέρχονται από τον κόμβο θέτουμε αρνητικό πρόσημο:



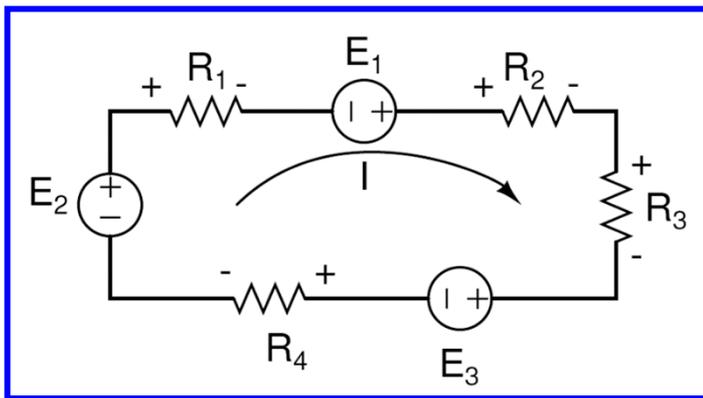
$$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 + I_5 = 0$$

2^{ος} κανόνας Kirchhoff

Το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων σε έναν βρόχο (δηλ. κλειστό κύκλωμα) ισούται με 0:

$$\sum_{i=1}^M V_i = 0$$

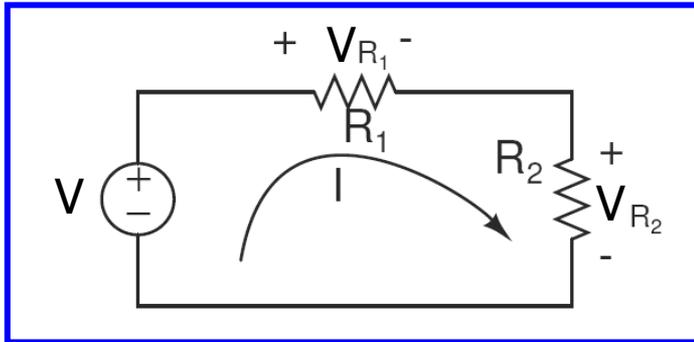
Όταν διατρέχουμε ένα βρόχο δεξιόστροφα, στις πηγές τάσης θέτουμε θετικό πρόσημο, εάν συναντάμε πρώτα τον θετικό ακροδέκτη (πόλο) τους και αρνητικό πρόσημο εάν συναντάμε πρώτα τον αρνητικό ακροδέκτη (πόλο) τους. Στις πτώσεις τάσης των αντιστάσεων θέτουμε θετικό πρόσημο, εάν η φορά που διατρέχουμε το βρόχο είναι ίδια με τη φορά του ρεύματος που διαρρέει τις αντιστάσεις και αρνητικό πρόσημο εάν η φορά που διατρέχουμε το βρόχο είναι αντίθετη με τη φορά του ρεύματος που διαρρέει τις αντιστάσεις.



$$I \cdot R_1 - E_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3 + E_3 + I \cdot R_4 - E_2 = 0$$

Διαιρέτες τάσης και ρεύματος

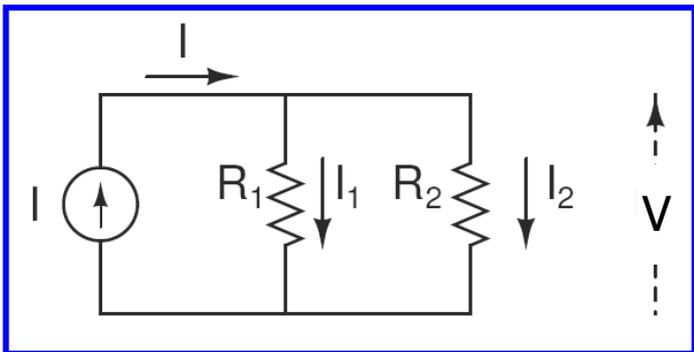
Διαιρέτης τάσης



$$V_{R_1} = I \cdot R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V$$

$$V_{R_2} = I \cdot R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V$$

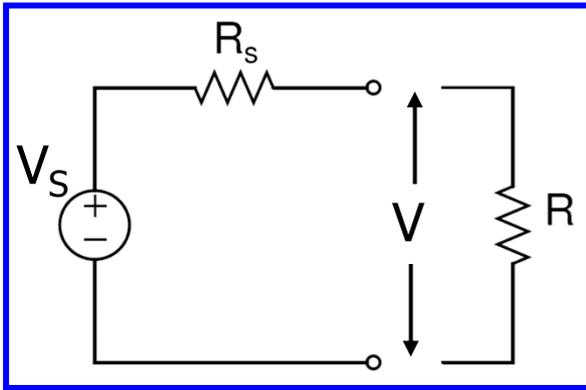
Διαιρέτης ρεύματος



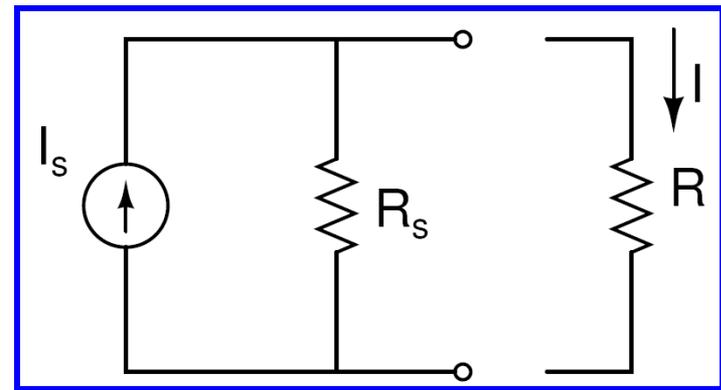
$$I_1 = \frac{V}{R_1} = \frac{R_{o\lambda} \cdot I}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I$$

$$I_2 = \frac{V}{R_2} = \frac{R_{o\lambda} \cdot I}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I$$

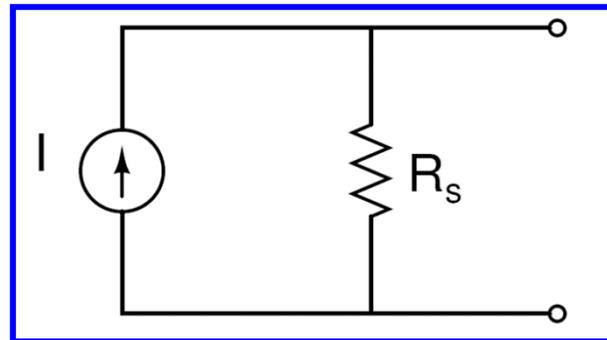
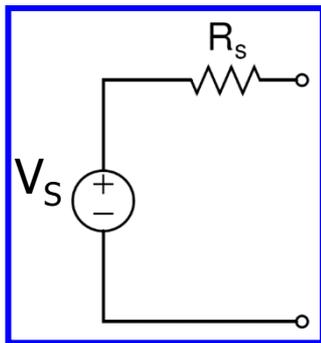
Πραγματικές πηγές τάσης και ρεύματος



$$V = \frac{R}{R_s + R} \cdot V_S$$



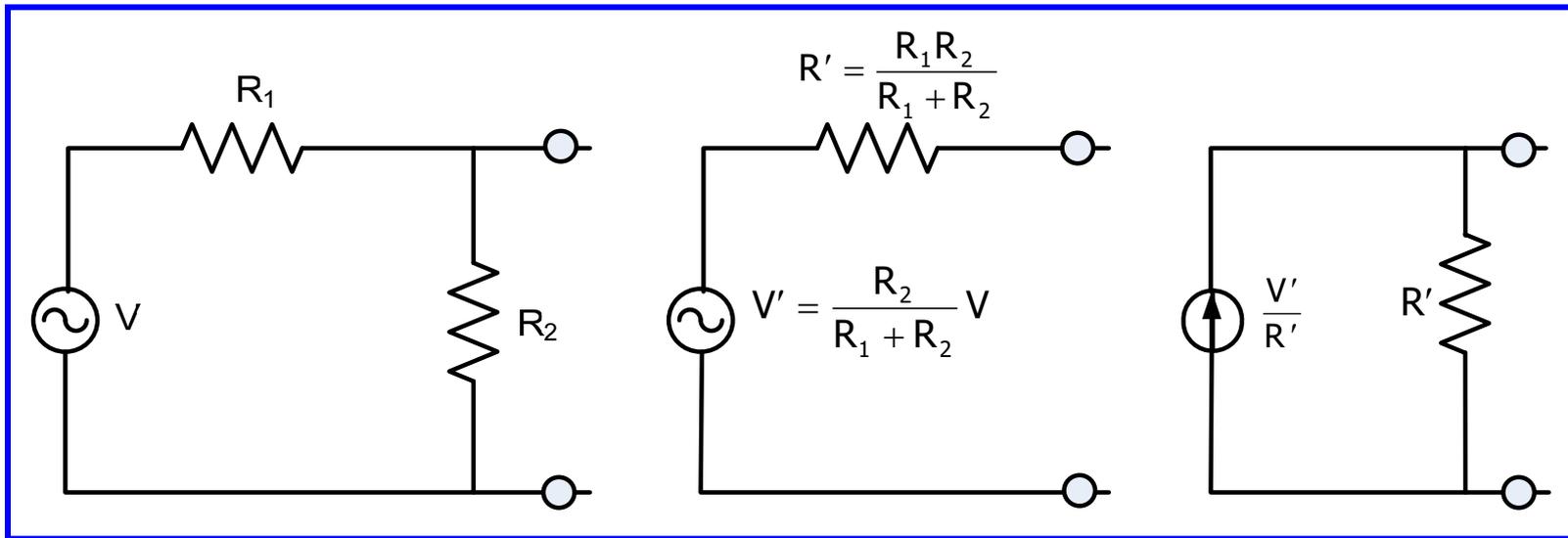
$$I = \frac{R_s}{R_s + R} \cdot I_s$$



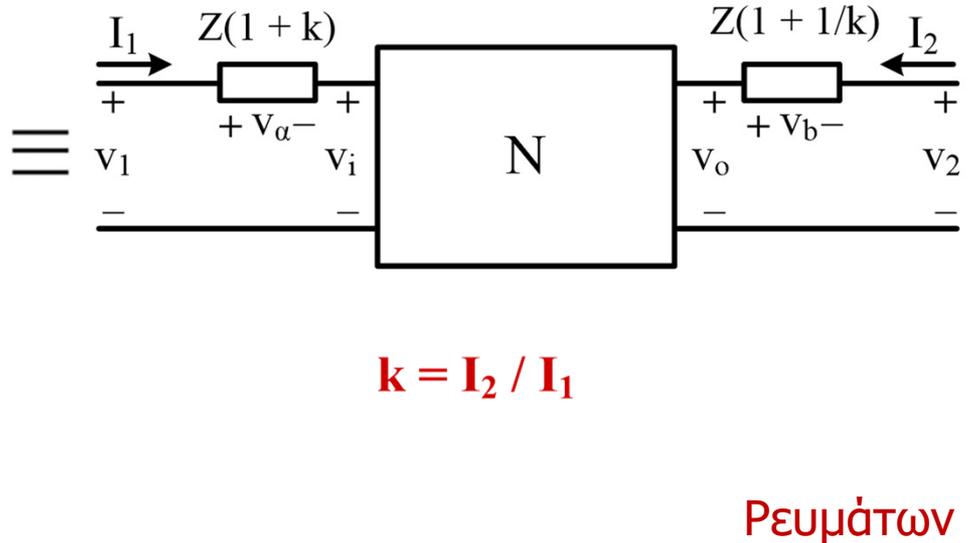
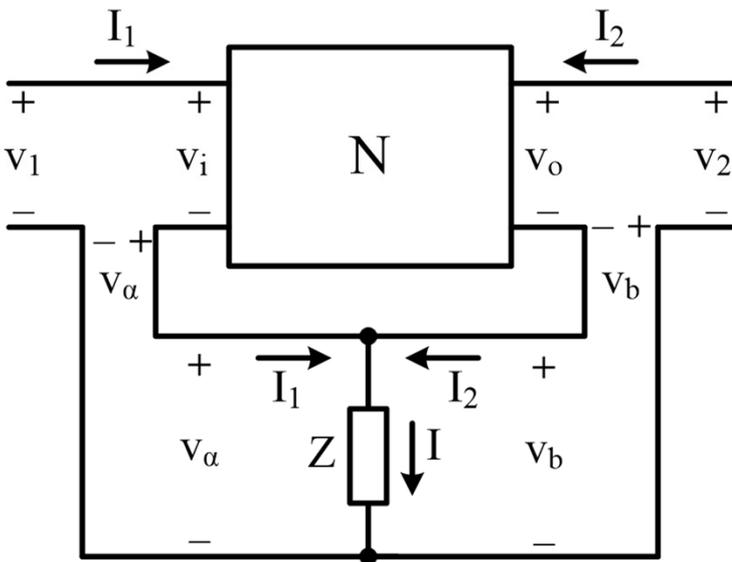
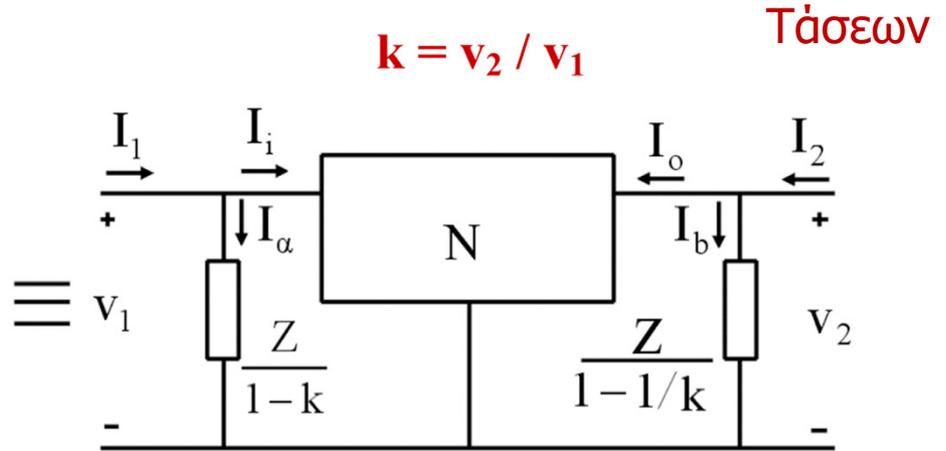
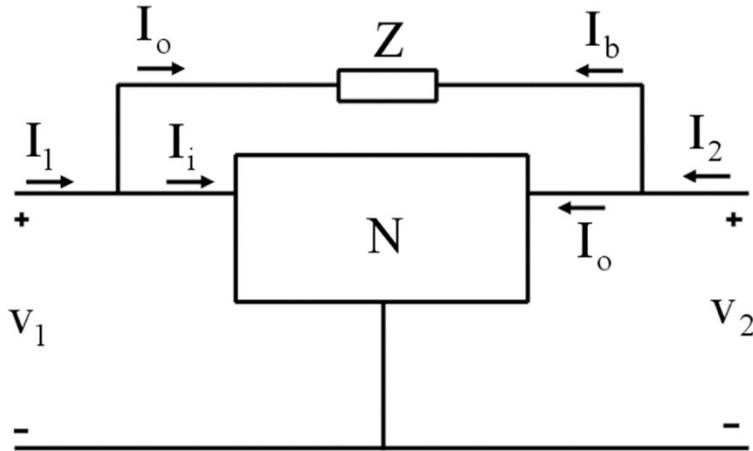
$$I = \frac{V_S}{R_s}$$

Μετασχηματισμοί Thevenin και Norton

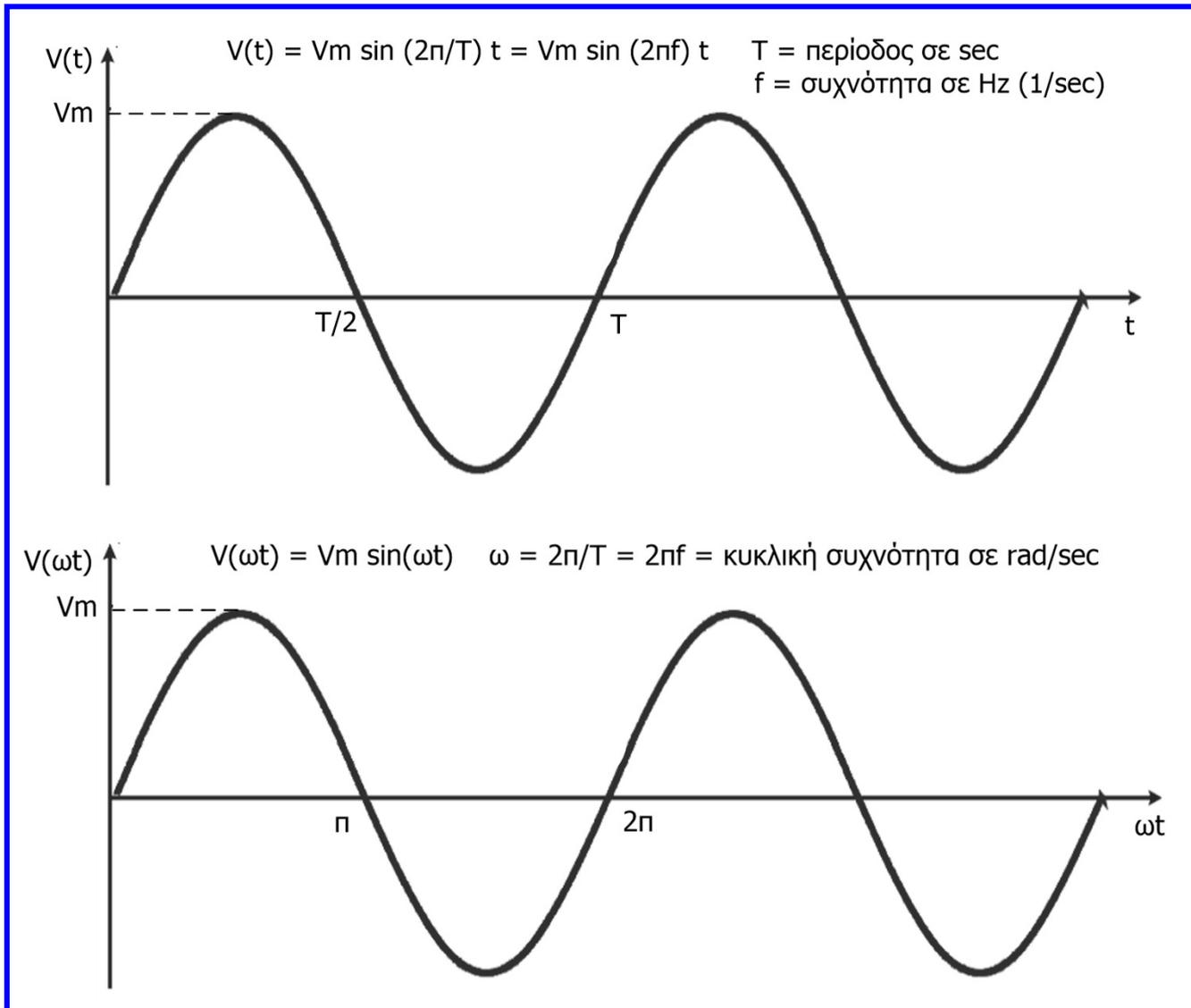
- **Θεώρημα Thevenin:** Κάθε γραμμικό κύκλωμα δύο ακροδεκτών μπορεί να αντικατασταθεί με μία πηγή τάσης ίση με την τάση ανοιχτού κυκλώματος μεταξύ των ακροδεκτών, σε σειρά με την αντίσταση R που «φαίνεται» από τους ακροδέκτες αυτούς.
- **Θεώρημα Norton:** Κάθε γραμμικό κύκλωμα δύο ακροδεκτών μπορεί να αντικατασταθεί με μία πηγή ρεύματος ίσου με το ρεύμα βραχυκυκλώματος μεταξύ των ακροδεκτών, παράλληλα με την αντίσταση R που «φαίνεται» από τους ακροδέκτες αυτούς.
- Η αντίσταση R υπολογίζεται εάν θεωρήσουμε βραχυκυκλωμένες όλες τις πηγές τάσης και ανοιχτές όλες τις πηγές ρεύματος.



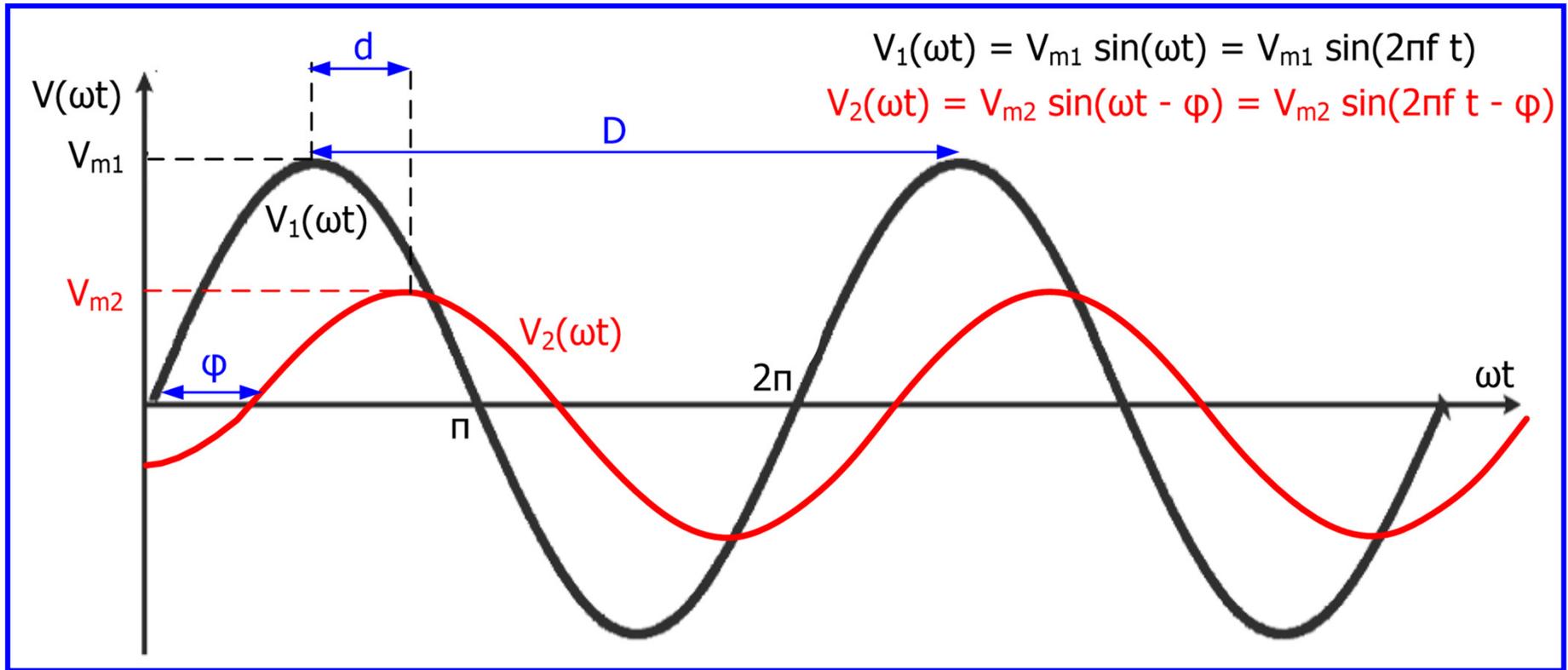
Θεώρημα Miller



Ημιτονικά σήματα



Ημιτονικά σήματα

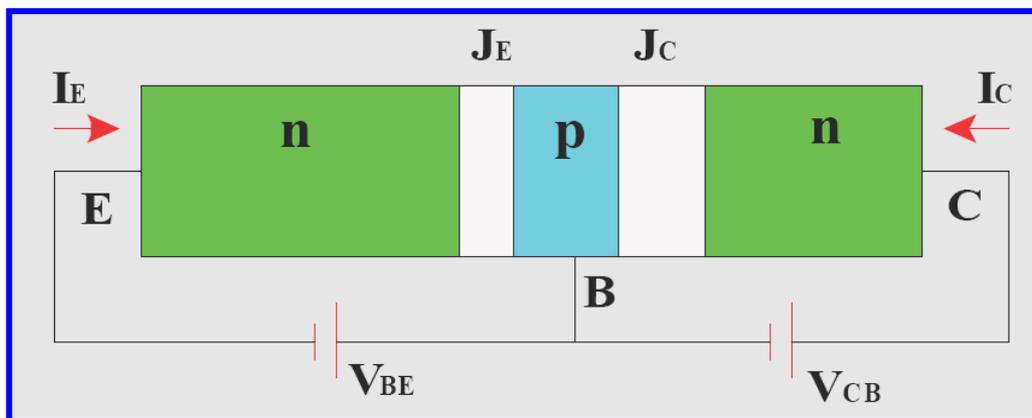


Διαφορά φάσης σημάτων (φ): προηγείται η κυματομορφή της V_1 κατά φ

$$\varphi^\circ = (d / D) \cdot 360$$

Διπολικό τρανζίστορ (bipolar junction transistor, BJT)

- Με τον όρο **πόλωση του τρανζίστορ** αναφερόμαστε στη **λειτουργία του στο συνεχές ρεύμα** και εννοούμε τον τρόπο με τον οποίο πολώνονται οι επαφές που συνιστούν το τρανζίστορ.
- Το τρανζίστορ λειτουργεί ως **ενισχυτική βαθμίδα** όταν η επαφή **βάσης-εκπομπού πολώνεται ορθά** και η επαφή **βάσης-συλλέκτη πολώνεται ανάστροφα** (πόλωση στην **ενεργό περιοχή**).
- Τα ρεύματα φορέων μειονότητας (ηλεκτρονίων βάσης και οπών συλλέκτη) έχουν μικρή συνεισφορά στο ρεύμα συλλέκτη, δηλ. το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης επαφής συλλέκτη I_{CBO} μπορεί να θεωρηθεί αμελητέο.



Πόλωση στην ενεργό περιοχή (τρανζίστορ npn)

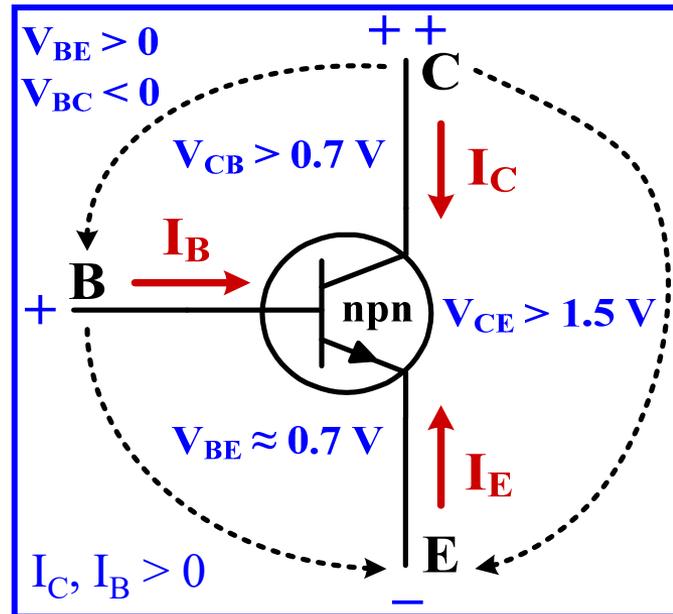
Λειτουργία του διπολικού τρανζίστορ

Προσεγγιστική λειτουργία στο συνεχές
(ενεργός περιοχή)

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

$$I_C \approx \beta I_B \quad \beta \gg 1$$

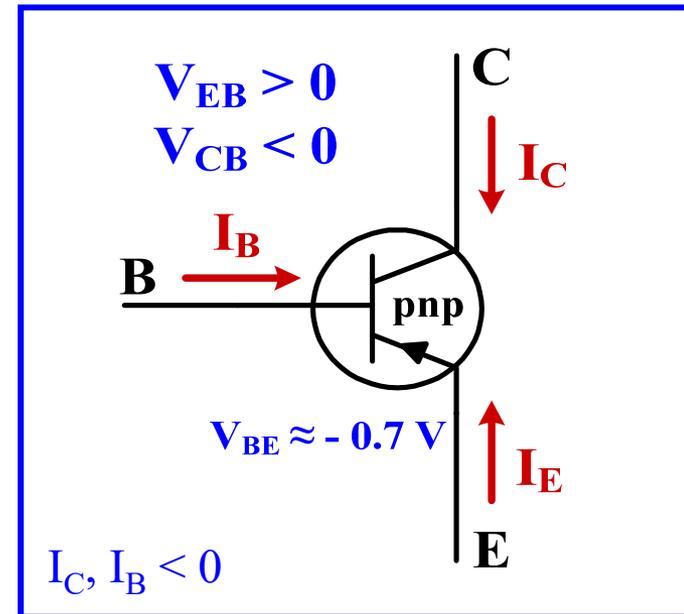
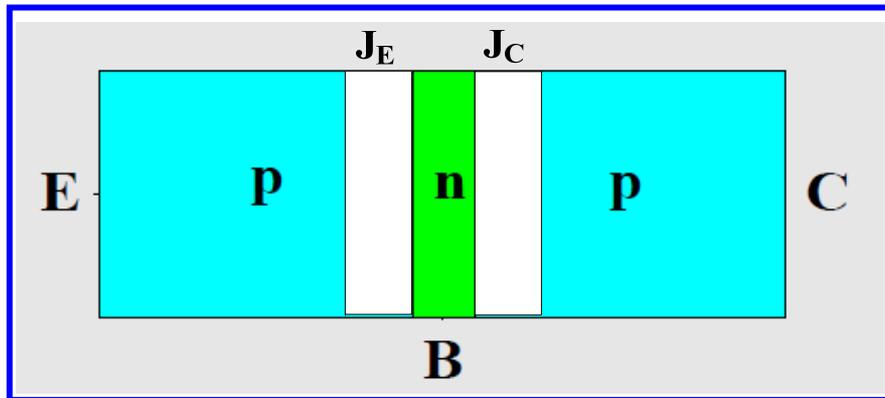
$$I_E = -(I_C + I_B) = -(I_C + \frac{1}{\beta} I_C) \approx -I_C$$



- Το τρανζίστορ προσεγγιστικά λειτουργεί ως δρόμος ρεύματος από τον συλλέκτη στον εκπομπό και το μέγεθος του ρεύματος αυτού ελέγχεται από το ρεύμα βάσης που «σταματά» στη βάση (εάν θεωρήσουμε ότι $\beta \gg 1$).
- Το συνεχές δυναμικό βάσης είναι υψηλότερο από το δυναμικό εκπομπού ($V_{BE} \cong 0,7 \text{ V}$ για τρανζίστορ πυριτίου τύπου npn) και το συνεχές δυναμικό συλλέκτη είναι υψηλότερο από το δυναμικό βάσης
- β : ενίσχυση (απολαβή) ρεύματος στο συνεχές (συνήθως από 50 έως 350).

Λειτουργία του διπολικού τρανζίστορ

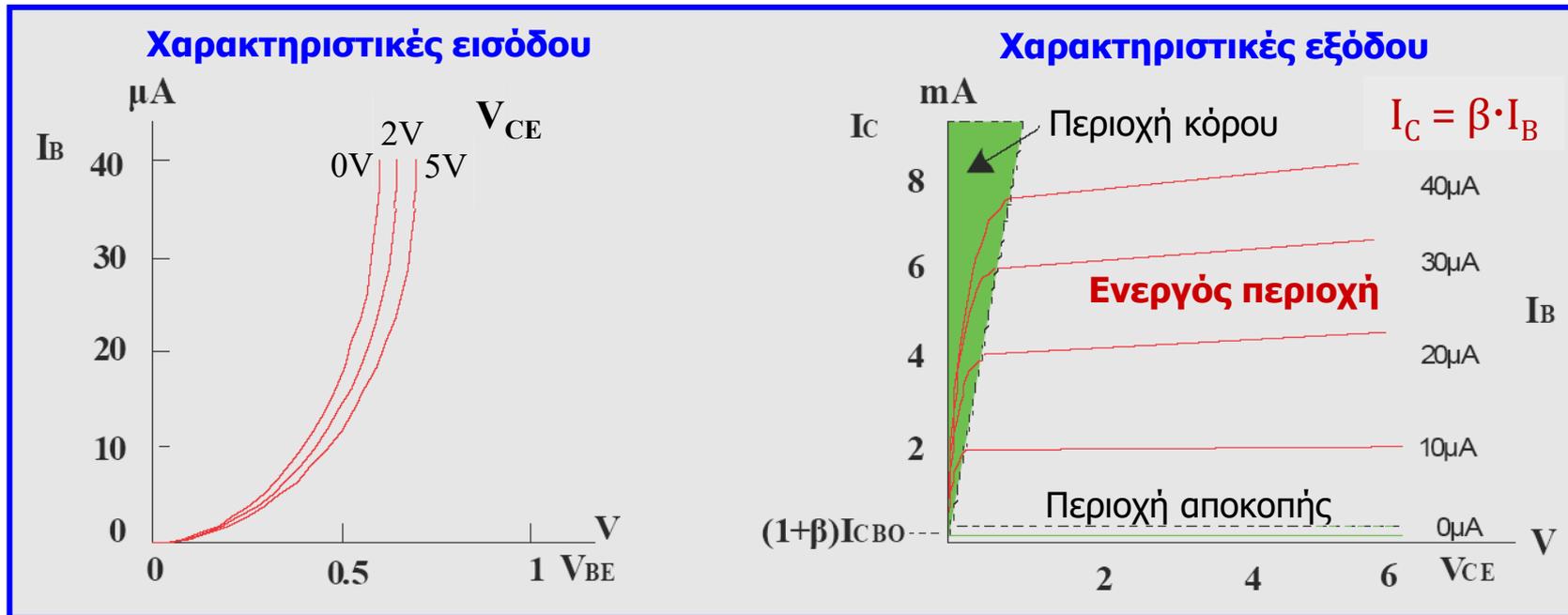
Τρανζίστορ pnp



- Το τρανζίστορ pnp λειτουργεί ως ενισχυτική βαθμίδα όταν η επαφή εκπομπού-βάσης πολώνεται ορθά και η επαφή συλλέκτη-βάσης πολώνεται ανάστροφα (πόλωση στην ενεργό περιοχή).
- Το συνεχές δυναμικό βάσης είναι χαμηλότερο από το δυναμικό εκπομπού ($V_{BE} \cong -0,7 \text{ V}$) και το συνεχές δυναμικό συλλέκτη είναι χαμηλότερο από το δυναμικό βάσης.

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

- Χαρακτηριστικές καμπύλες εισόδου και εξόδου τρανζίστορ *npn* σε σύνδεση ΚΕ:



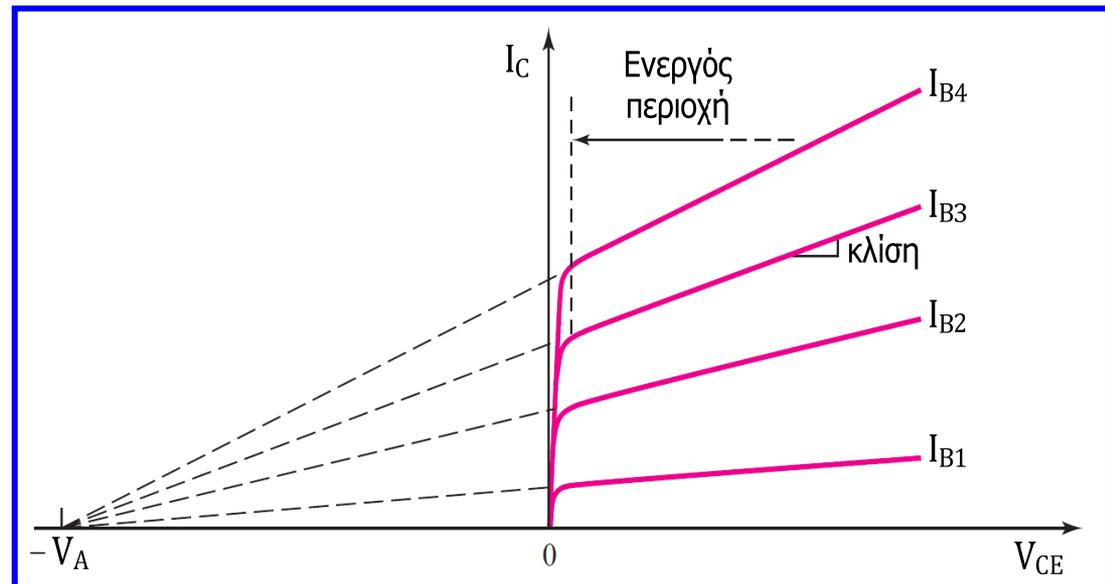
- Τα ρεύματα συλλέκτη και βάσης διαφέρουν περίπου κατά δύο τάξεις μεγέθους.
- Το τρανζίστορ λειτουργεί ως **ενισχυτική βαθμίδα** όταν πολώνεται στην ενεργό περιοχή (όπου ισχύει προσεγγιστικά: $I_C = \beta \cdot I_B$), ενώ όταν λειτουργεί ως **διακόπτης** αλλάζει κατάσταση αγωγής μεταξύ των περιοχών κόρου & αποκοπής.
- Οι χαρακτηριστικές του **τρανζίστορ npn** σχεδιάζονται στο **3^ο τεταρτημόριο** του συστήματος αξόνων της V_{CE} και του I_C , αφού $V_{CE} < 0$ και $I_C < 0$.

Χαρακτηριστικές του διπολικού τρανζίστορ

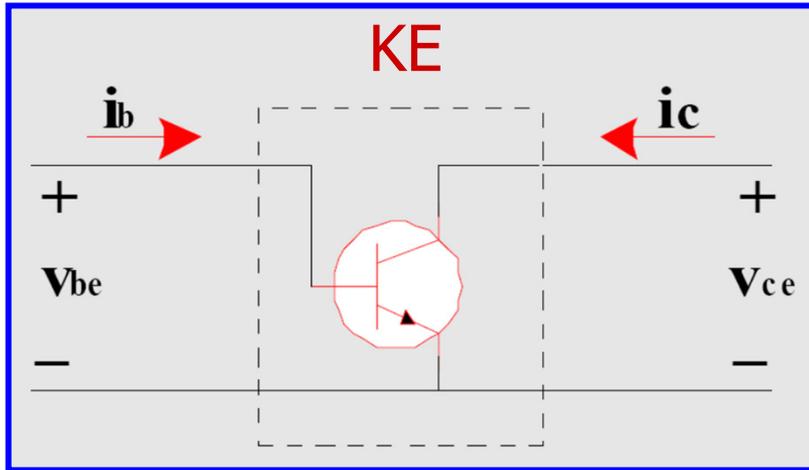
- **Φαινόμενο Early:** η εξάρτηση του I_B και επομένως του I_C από την V_{CE} στην ενεργό περιοχή.
- Σε αυτό οφείλεται η κλίση στις χαρακτηριστικές εξόδου του τρανζίστορ, δηλαδή η αντίσταση εξόδου του τρανζίστορ είναι πεπερασμένη.
- Όταν κατά προσέγγιση δεν λαμβάνεται υπόψη, οι χαρακτηριστικές εξόδου του τρανζίστορ είναι ευθείες παράλληλες με τον άξονα της V_{CE} και η αντίσταση εξόδου του τρανζίστορ είναι άπειρη.

$$I_B = \frac{I_S}{\beta} \cdot \left(e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} - 1 \right) \cdot \left(1 + \frac{V_{CE}}{V_A} \right)$$
$$I_S = 10^{-12} - 10^{-16} \text{ A}$$
$$V_T = 26 \text{ mV (θερμική τάση)}$$
$$V_A = 50 - 200 \text{ V (τάση Early)}$$

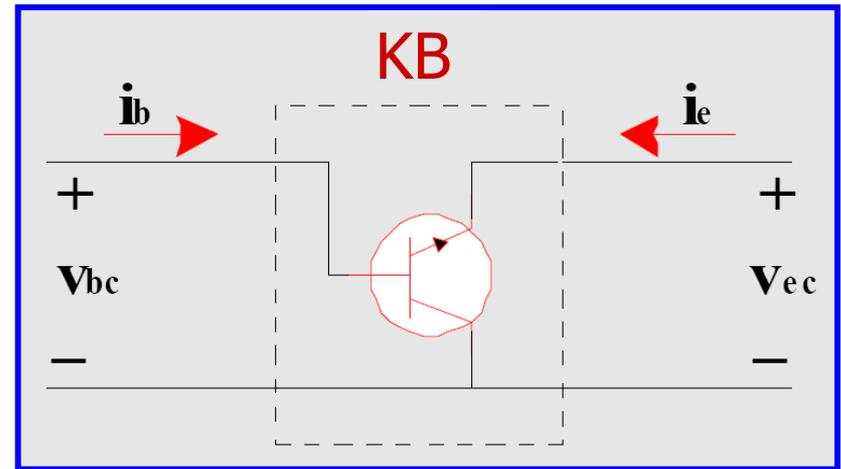
I_S : ρεύμα κόρου, ανάλογο με το εμβαδόν διατομής του BJT



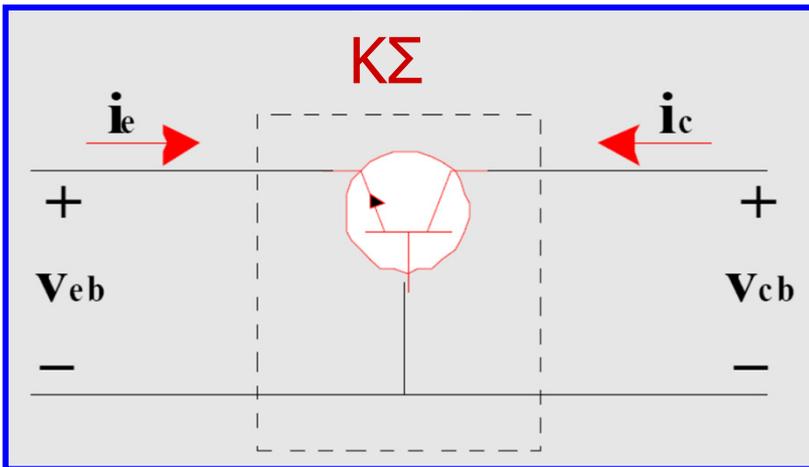
Τρόποι σύνδεσης του διπολικού τρανζίστορ



Σύνδεση κοινού εκπομπού

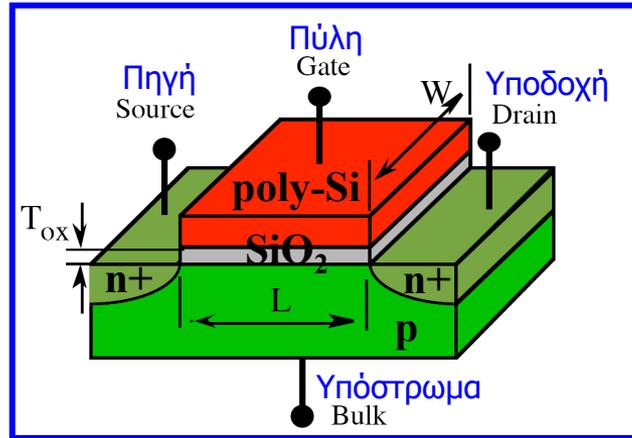


Σύνδεση κοινού συλλέκτη

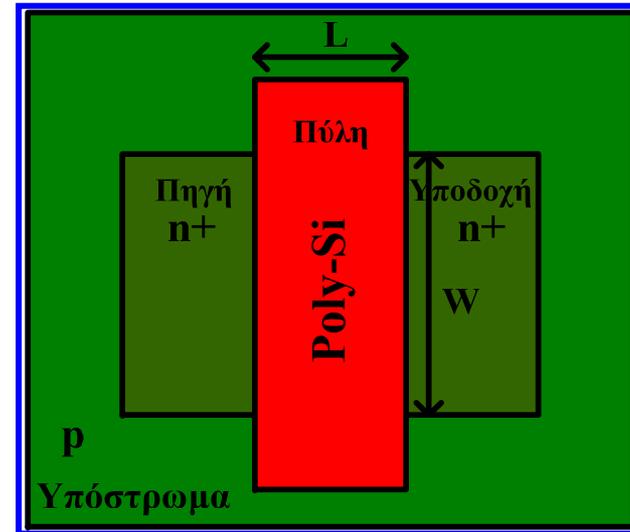


Σύνδεση κοινής βάσης

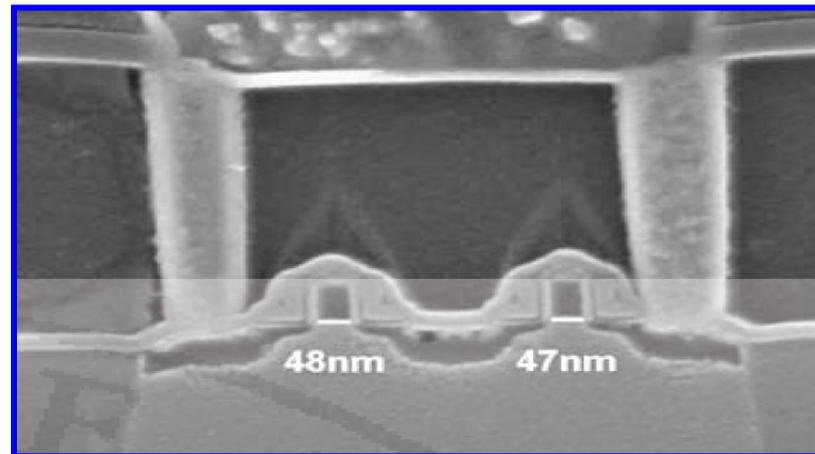
Τρανζίστορ MOSFET (metal-oxide-semiconductor field effect transistor)



Τρανζίστορ nMOS



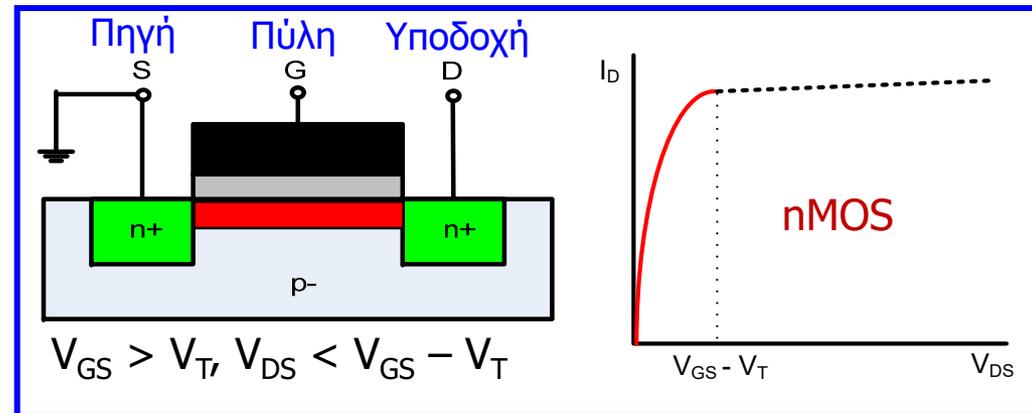
Το τρανζίστορ pMOS κατασκευάζεται σε υπόστρωμα τύπου n, με περιοχές πηγής και υποδοχής τύπου p



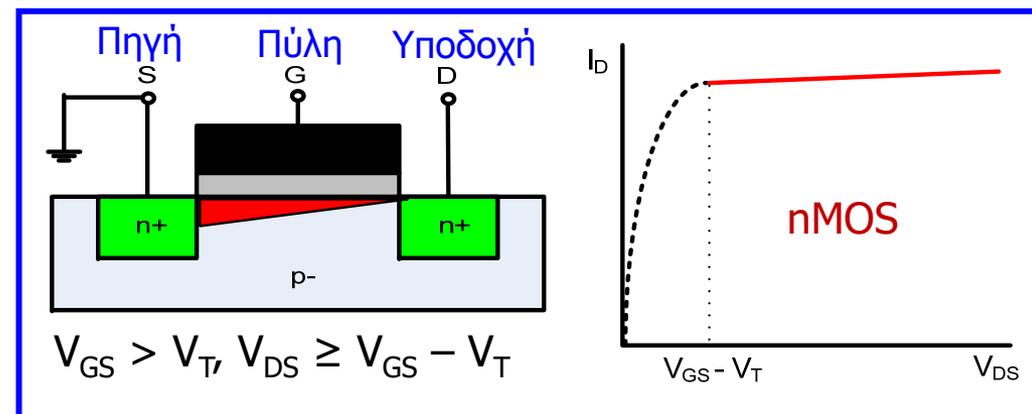
MOSFETs (2010)

Λειτουργία του τρανζίστορ MOSFET

- Στο τρανζίστορ **nMOS** όταν η τάση πύλης-πηγής υπερβαίνει την τάση κατωφλίου (V_T), δημιουργείται αγώγιμο κανάλι τύπου n (ρεύμα ηλεκτρονίων).
- Αντίστοιχα, στο **pMOS** δημιουργείται ρεύμα οπών.
- Τα MOSFET αναφέρονται ως μονοπολικά τρανζίστορ αφού το ρεύμα που δημιουργείται συνίσταται από ένα είδος φορέων.
- $V_{GS} > V_T$, $V_{DS} < V_{GS} - V_T$: ομοιόμορφο κανάλι και το ρεύμα υποδοχής (I_D) μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με την V_{DS} (**ωμική περιοχή**).
- $V_{GS} > V_T$, $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$: το κανάλι στενεύει (εξαντλείται) στην περιοχή της υποδοχής και το I_D παραμένει σχεδόν σταθερό σε σχέση με την V_{DS} (**περιοχή κόρου**).

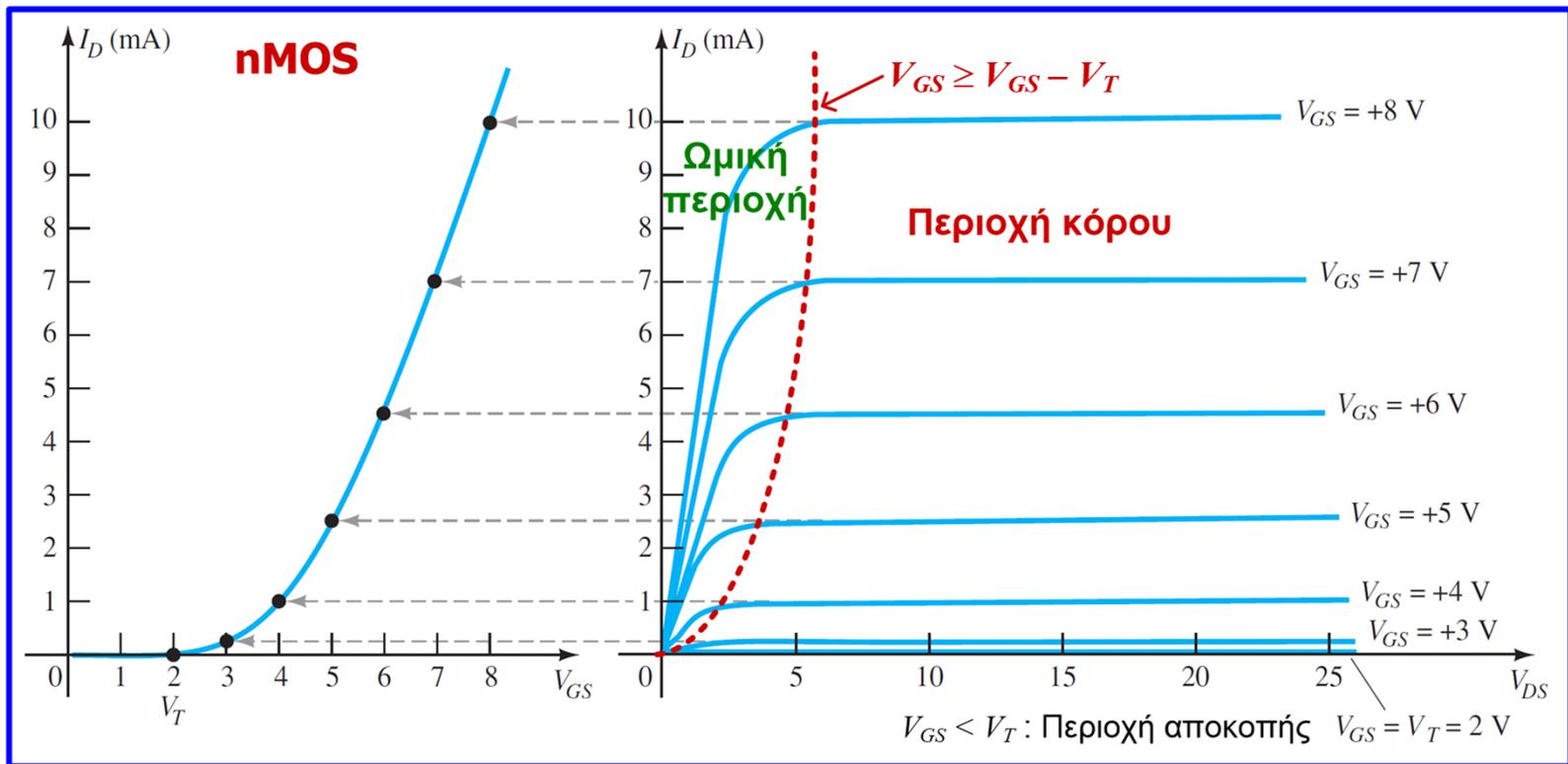


Πόλωση στην ωμική περιοχή



Πόλωση στην περιοχή κόρου

Χαρακτηριστικές εξόδου του τρανζίστορ MOSFET



Στην **περιοχή κόρου** (που αντιστοιχεί στην ενεργό περιοχή του διπολικού τρανζίστορ), το ρεύμα I_{DS} είναι σταθερό σε σχέση με την τάση V_{DS} .

Στην **πραγματικότητα** όμως, όσο αυξάνεται η V_{DS} προκαλεί μία μικρή γραμμική αύξηση στο I_D λόγω του ότι μειώνεται το ενεργό μήκος του καναλιού (**διαμόρφωση μήκους καναλιού**). Η εξάρτηση αυτή λαμβάνεται υπόψη όταν επιθυμούμε να περιγράψουμε με αυξημένη ακρίβεια τη λειτουργία του τρανζίστορ στην περιοχή κόρου.

Λειτουργία του τρανζίστορ MOSFET

nMOS: $V_{GS}, V_{DS}, V_T, I_D > 0$

pMOS: $V_{GS}, V_{DS}, V_T, I_D < 0$

Αποκοπή: $I_D = 0, V_{GS} \leq V_T$

V_T : τάση
κατωφλίου

Ωμική περιοχή:

$$I_D = \beta \left[(V_{GS} - V_T) - \frac{V_{DS}}{2} \right] V_{DS}, V_{GS} > V_T, V_{DS} < V_{GS} - V_T$$

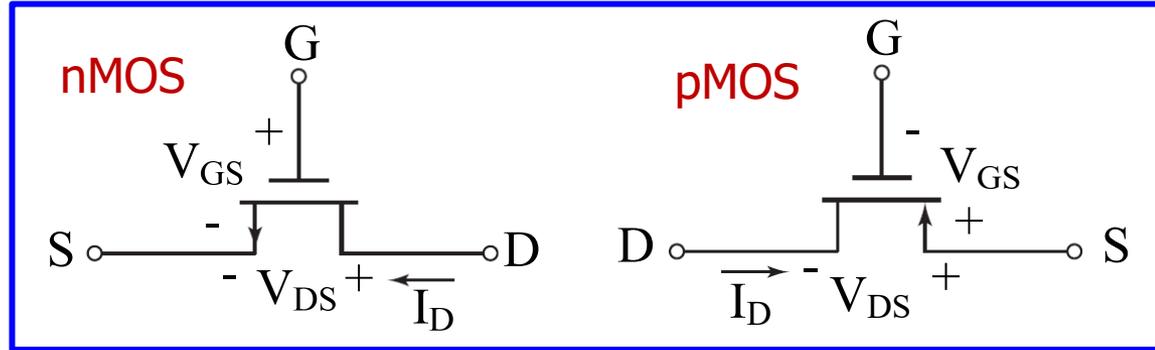
Περιοχή κόρου (λειτουργία ως ενισχυτική βαθμίδα):

$$I_D = \frac{\beta}{2} (V_{GS} - V_T)^2, V_{GS} > V_T, V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$$

$\beta = K_p (W / L)$ (παράγοντας κέρδους ή απολαβή)

K_p : παράμετρος διαγωγιμότητας

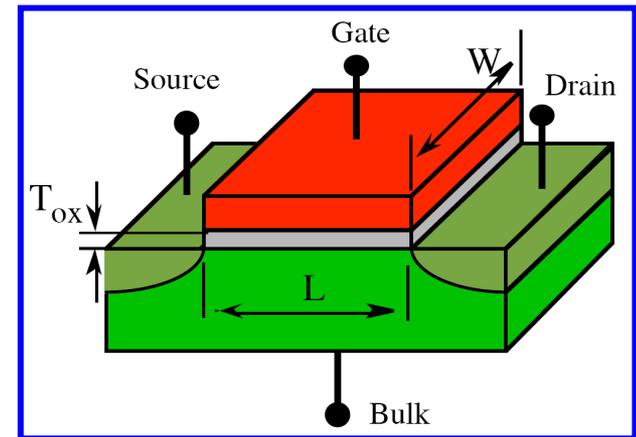
W : πλάτος καναλιού, L : μήκος καναλιού



Η φορά των ανισοτήτων
αντιστρέφεται στο pMOS

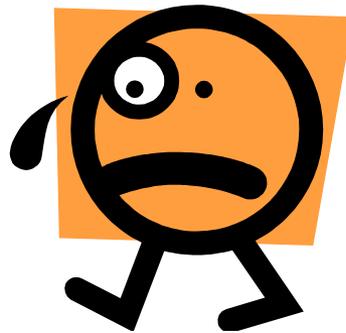
$$I_G = 0, \forall V_{GS}, V_{DS}$$

Η διαμόρφωση μήκους
καναλιού δεν έχει
ληφθεί υπόψη



Λειτουργία του τρανζίστορ MOSFET

- Ενώ στο διπολικό τρανζίστορ υφίσταται μικρό ρεύμα βάσης, στο τρανζίστορ MOSFET **δεν υφίσταται ρεύμα πύλης**.
- Το τρανζίστορ MOSFET λειτουργεί ως **ενισχυτική βαθμίδα** όταν πολώνεται στην **περιοχή κόρου**, ενώ όταν λειτουργεί ως **διακόπτης** αλλάζει κατάσταση αγωγής μεταξύ της ωμικής περιοχής και της περιοχής αποκοπής.
- Η διακοπτική λειτουργία των τρανζίστορ MOSFET βρίσκει ευρεία εφαρμογή στα ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα.
- Οι **χαρακτηριστικές του τρανζίστορ pMOS** σχεδιάζονται στο **3^ο τεταρτημόριο** του συστήματος αξόνων της V_{DS} και του I_D , αφού $V_{DS} < 0$ και $I_D < 0$.
- Το τρανζίστορ MOSFET συνδέεται με τρεις τρόπους: σύνδεση **κοινής πηγής**, σύνδεση **κοινής πύλης** και σύνδεση **κοινής υποδοχής**, οι οποίοι είναι αντίστοιχοι με τους 3 τρόπους σύνδεσης του διπολικού τρανζίστορ (κοινού εκπομπού, κοινής βάσης, κοινού συλλέκτη).



Τέλος 1^{ης} ενότητας