

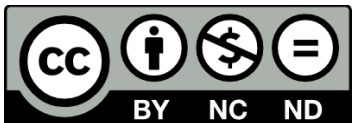


ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ Ι

Ενότητα 3: Τρανζίστορ FET

Χατζόπουλος Αλκιβιάδης

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχ. Υπολογιστών



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη 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.



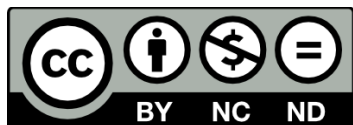
Σχεδιασμός ενοτήτων:

- 1. Ημιαγωγική δίοδος
- 2. Ένωση pn
- 3. **Τρανζίστορ FET**
- 4. Πόλωση των FET - Ισοδύναμα κυκλώματα
- 5. Ενισχυτές με FET
- 6. Διπολικό τρανζίστορ (BJT)
- 7. Πόλωση των BJT - Ισοδύναμα κυκλώματα
- 8. Ενισχυτές με διπολικά τρανζίστορ
- 9. Ενισχυτές με ενεργό φορτίο
- 10. Κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων





ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ FET



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα ενότητας

1. Εισαγωγή – τρανζίστορ JFET (διαφ. 7- 12)
2. Τρανζίστορ MOS – δομή (διαφ. 13- 18)
3. Χαρακτηριστικές λειτουργίας (διαφ. 19- 27)
4. Επιδράσεις μήκους καναλιού, φαινομένου σώματος, θερμοκρασίας (διαφ. 28-30)

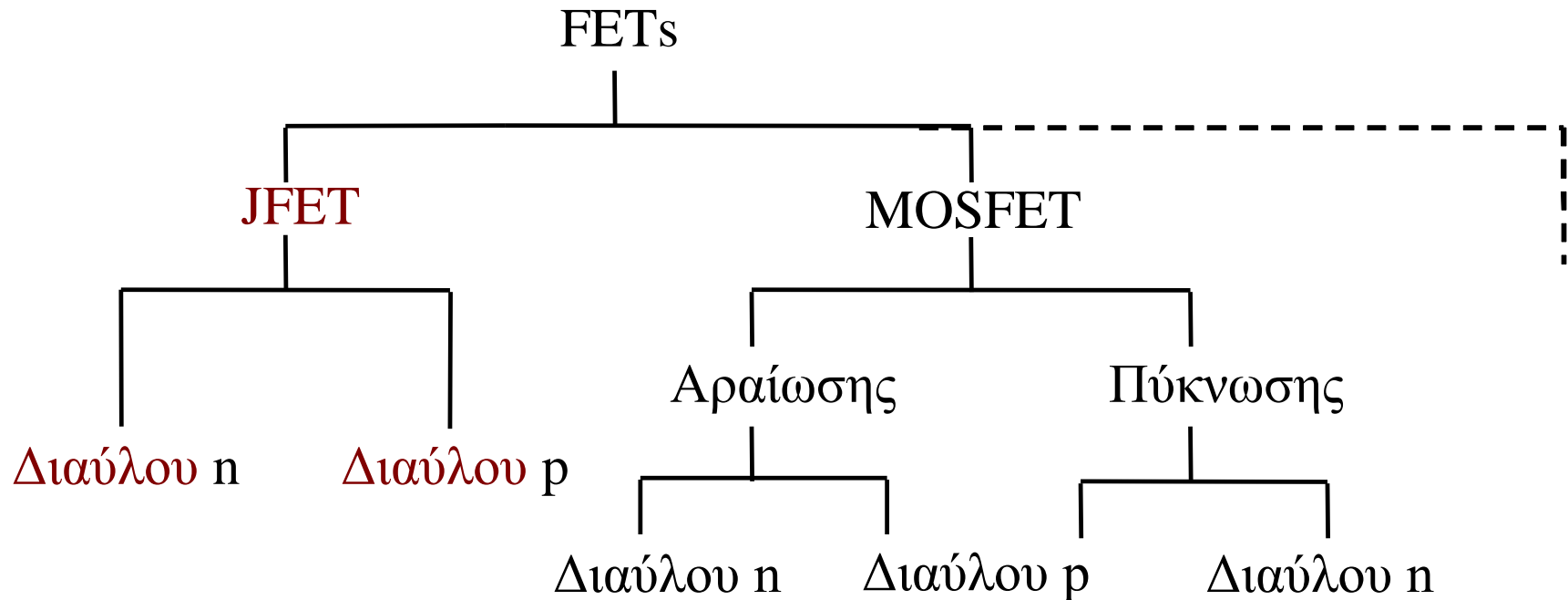


Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (Field Effect Transistor, FET) (1/2)

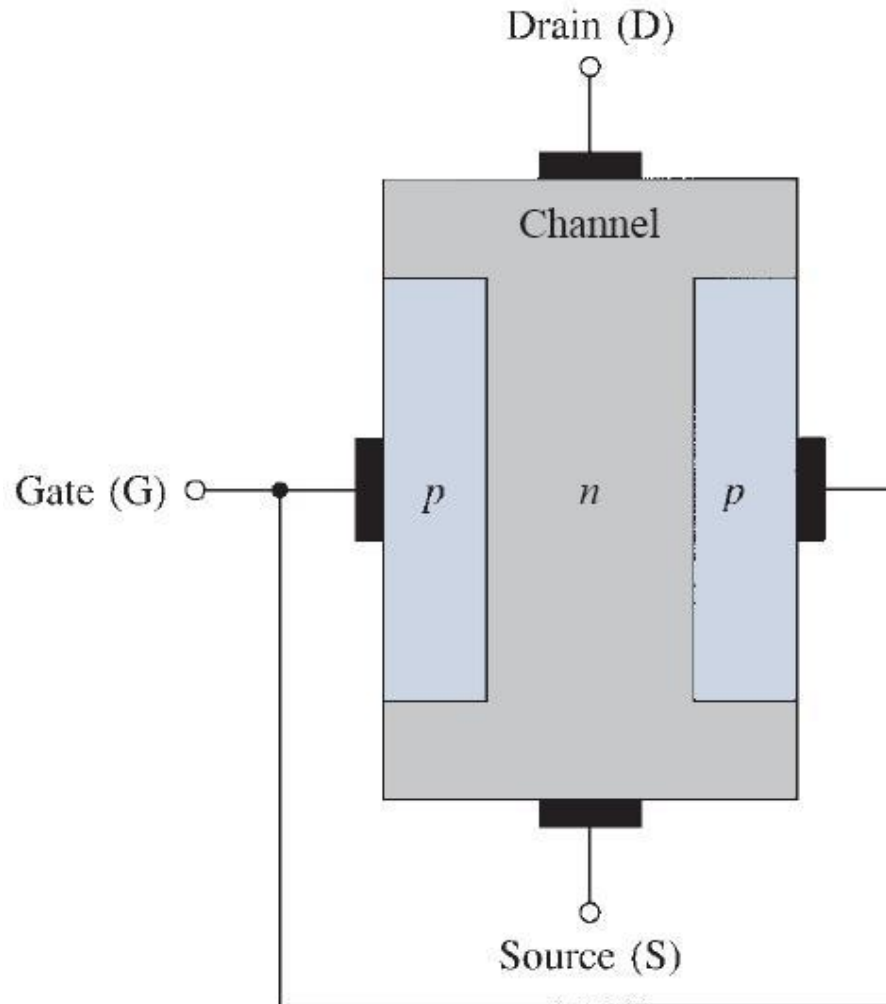
- ✓ Στοιχείο με τρεις ακροδέκτες.
- ✓ Έλεγχος εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου με την εφαρμογή εξωτερικού δυναμικού στην *πύλη (gate, G)*.
- ✓ Το πεδίο αυτό ελέγχει την αγωγιμότητα μεταξύ των άλλων δύο ακροδεκτών, της *εκροής (drain, D)* και της *πηγής (source, S)* και επομένως και το ρεύμα που θα διέρχεται από αυτούς.
- ✓ Ένας τύπος φορέων (ηλεκτρόνια ή οπές) - μονοπολικό.



Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (Field Effect Transistor, FET) (2/2)

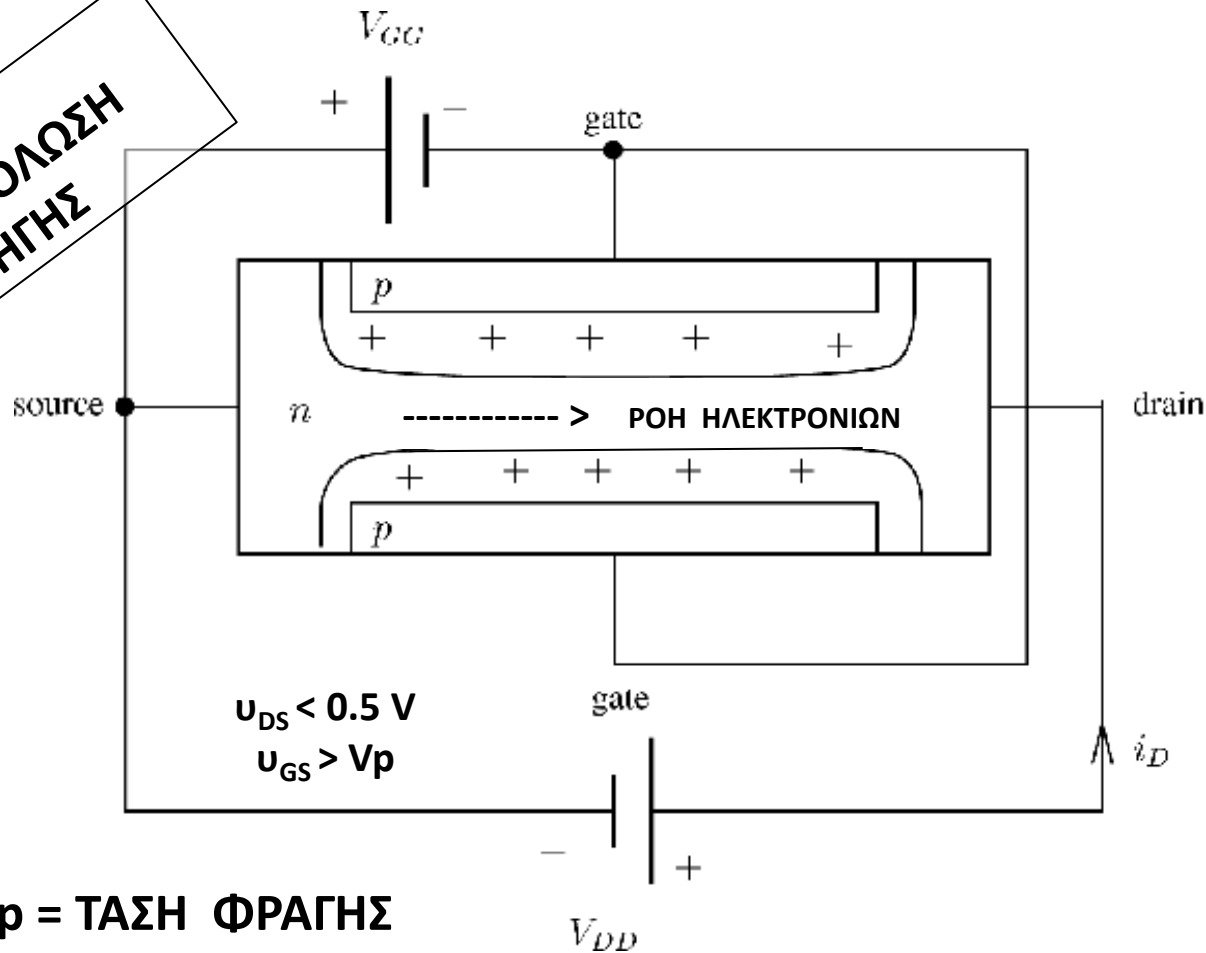


FET Επαφής (Junction FET, JFET) (1/3)

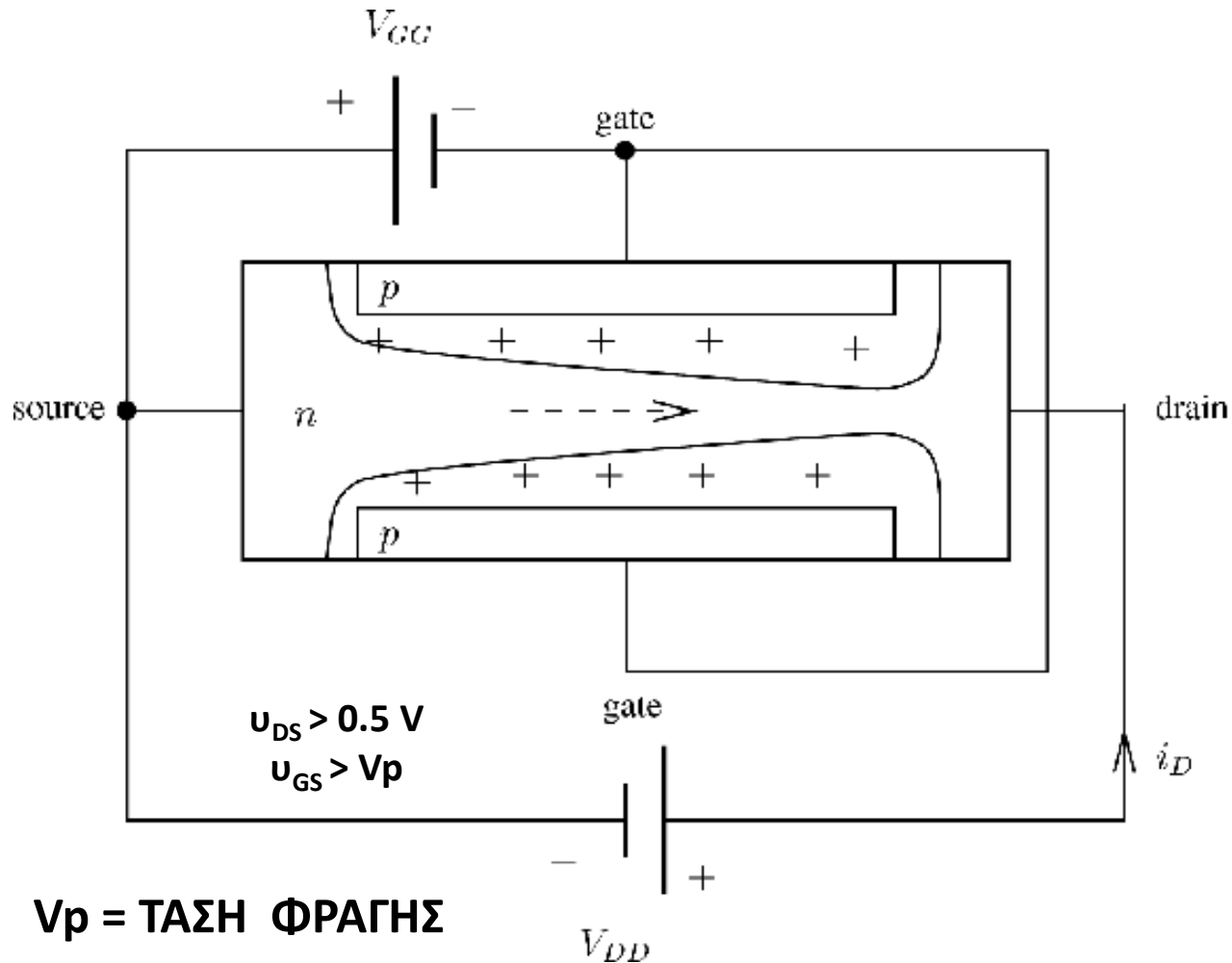


FET Επαφής (Junction FET, JFET) (2/3)

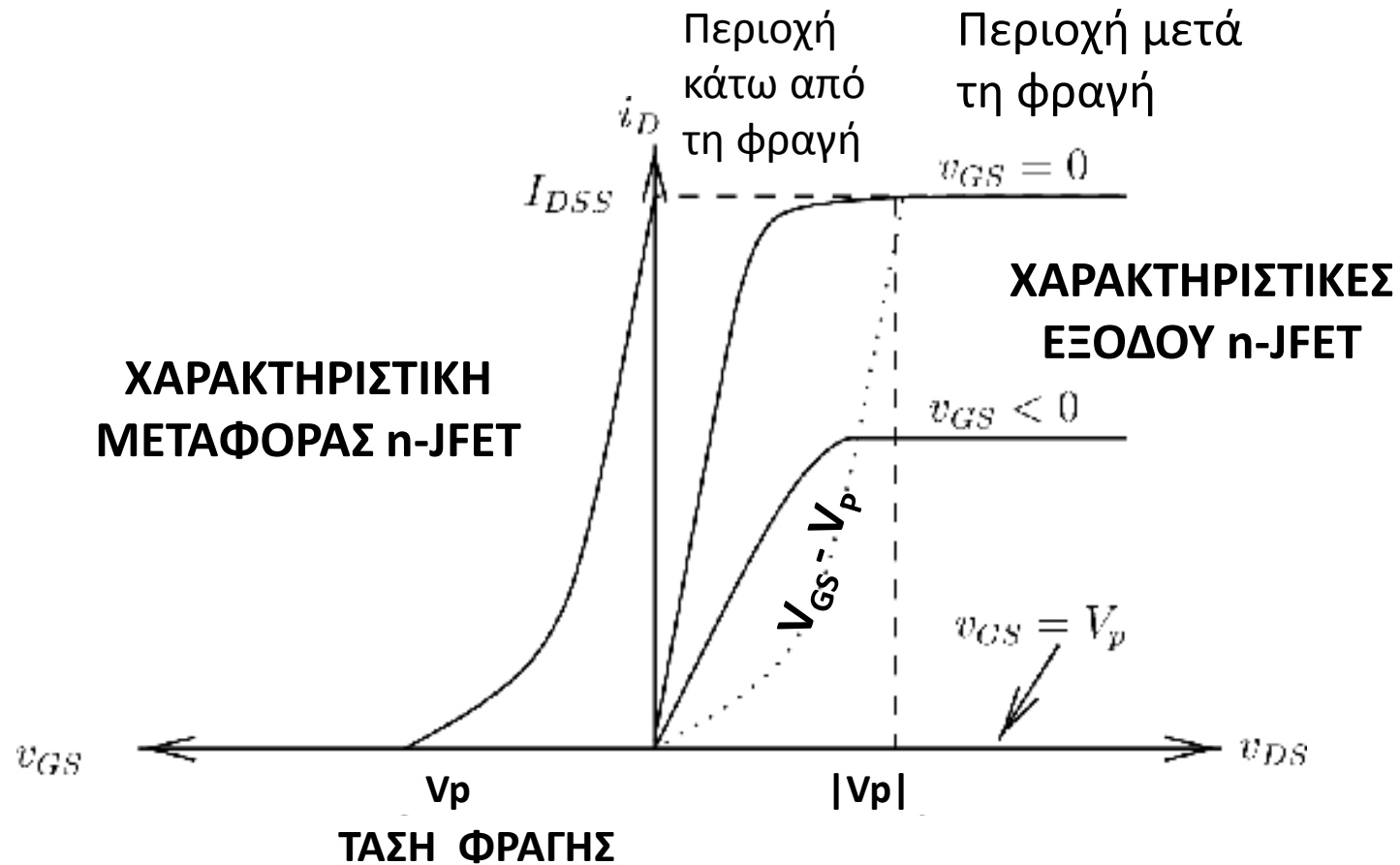
ΑΝΑΣΤΡΟΦΗ ΠΟΛΩΣΗ
ΠΥΛΗΣ - ΠΗΓΗΣ



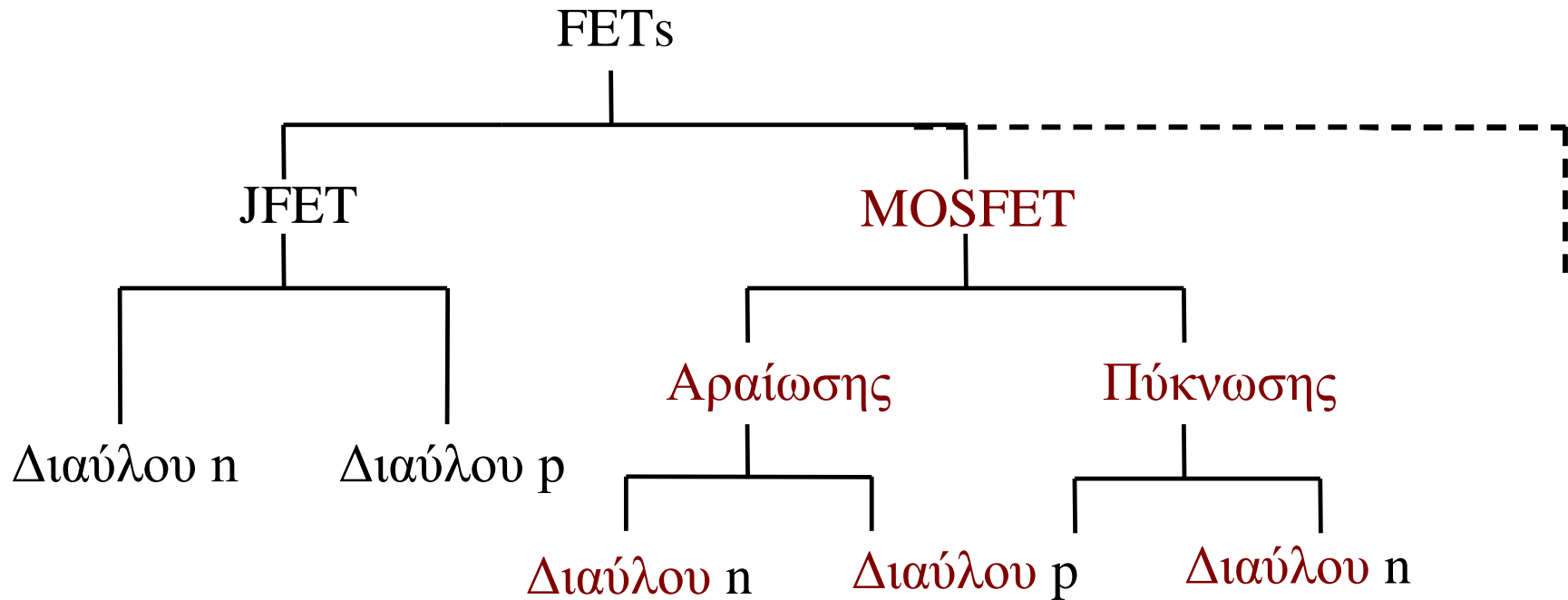
FET Επαφής (Junction FET, JFET) (3/3)



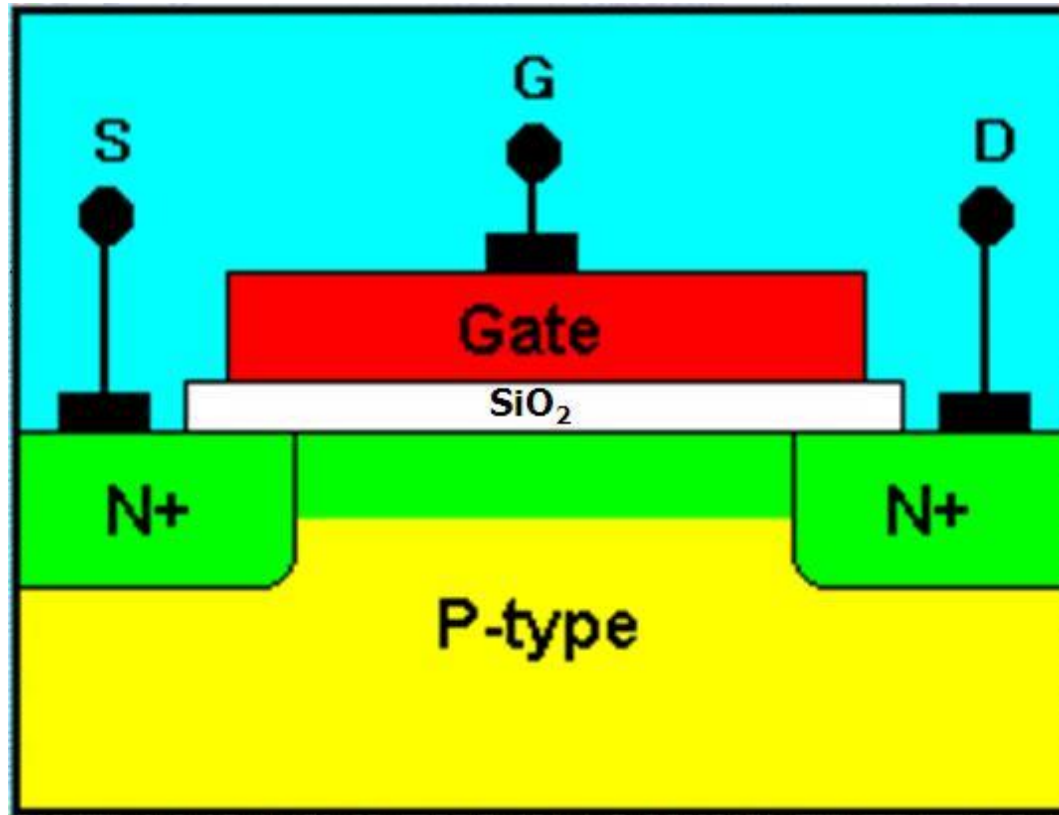
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ FET Επαφής (Junction FET, JFET)



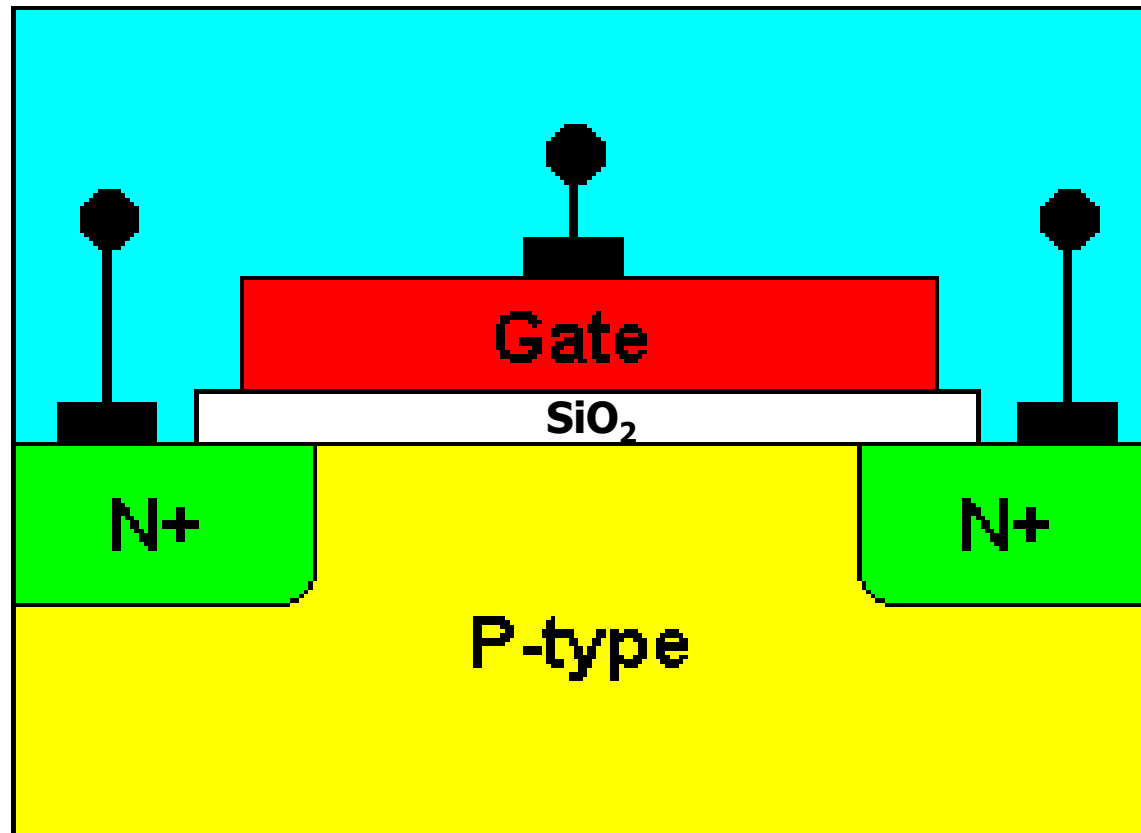
MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor FET)



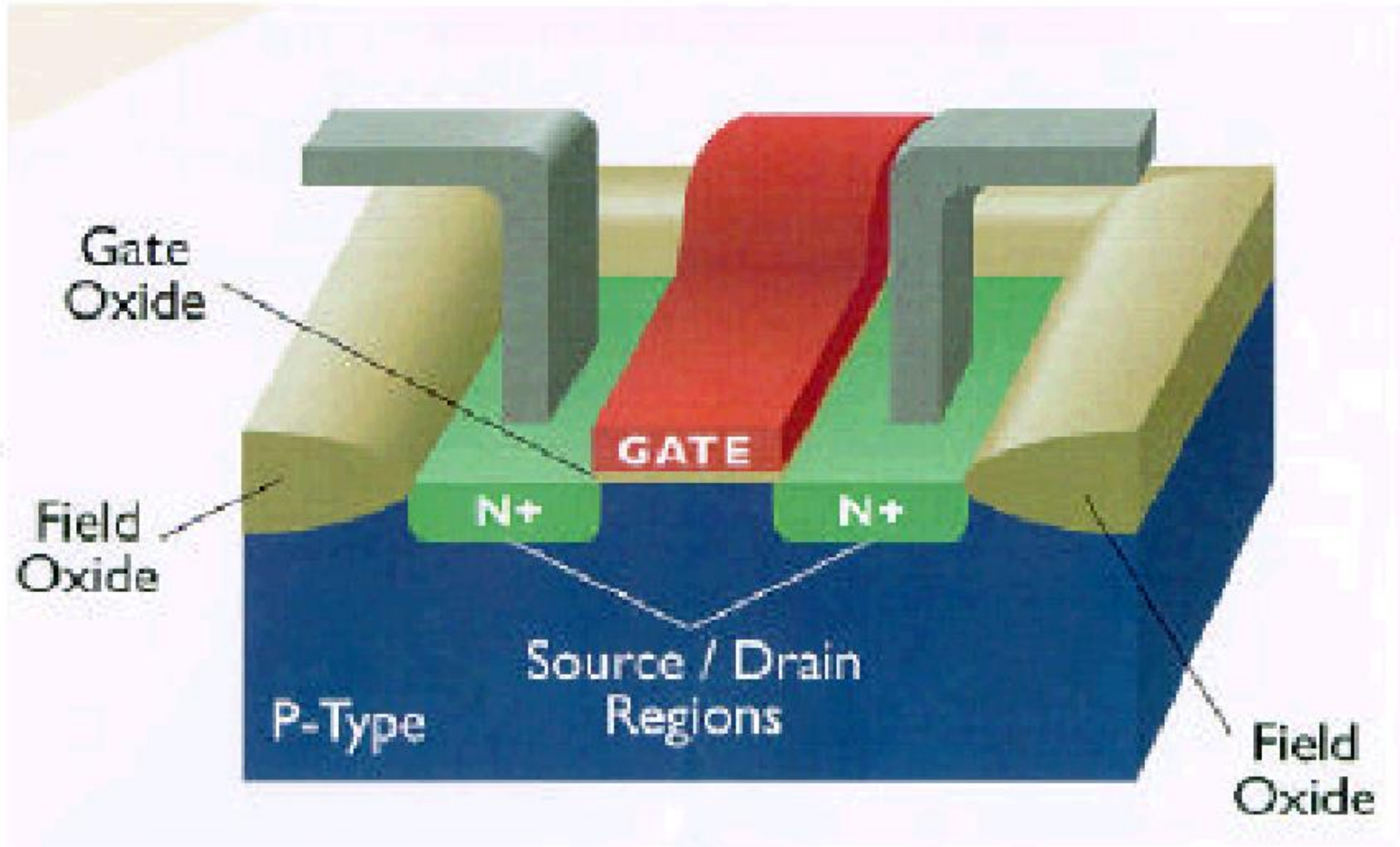
MOSFET Αραίωσης - διαύλου n (και πύκνωσης)



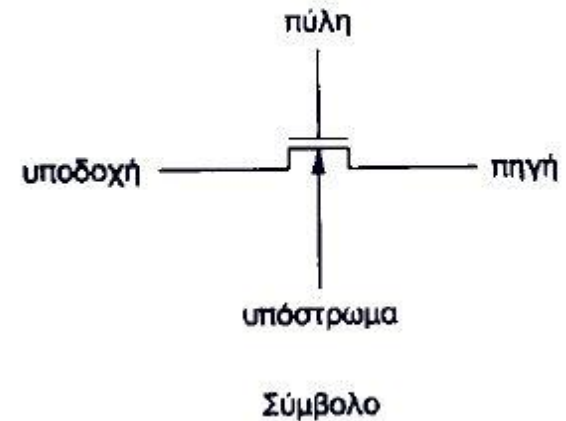
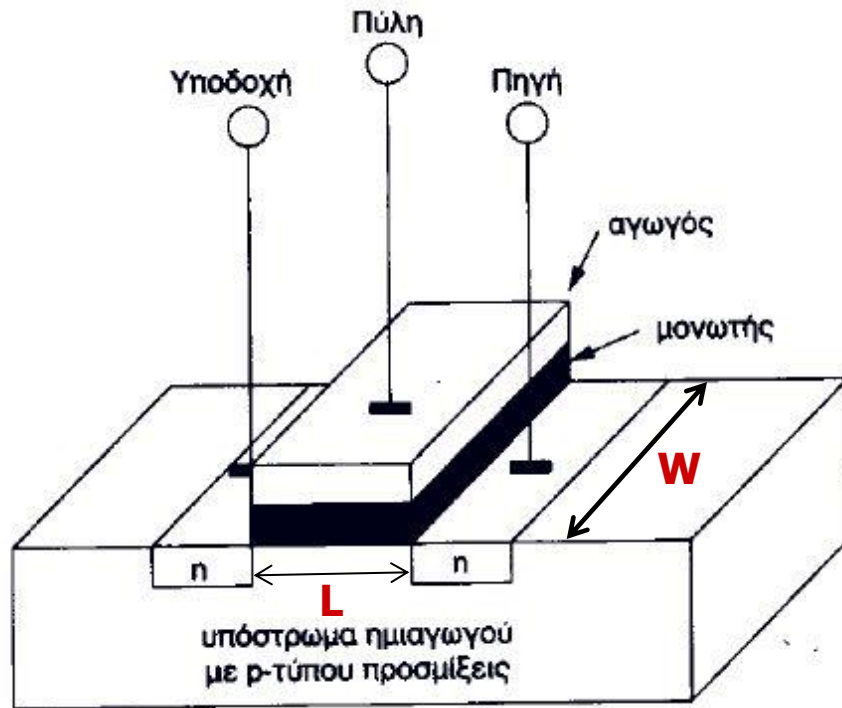
MOSFET Πύκνωσης - διαύλου n (1/3)



MOSFET Πύκνωσης - διαύλου n (2/3)



MOSFET Πύκνωσης - διαύλου n (3/3)

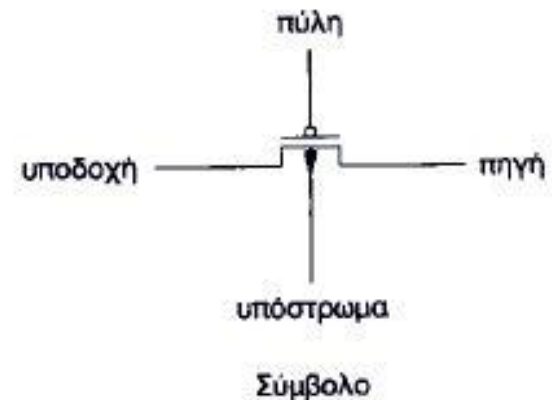
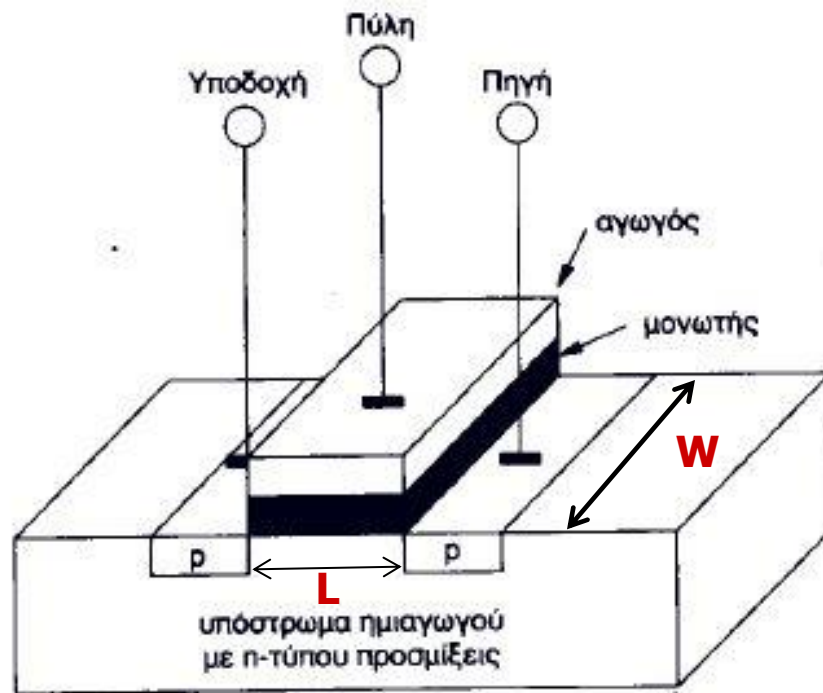


Η πύλη (gate) ελέγχει τη ροή ρεύματος μεταξύ πηγής (source) και υποδοχής ή εκροής (drain).

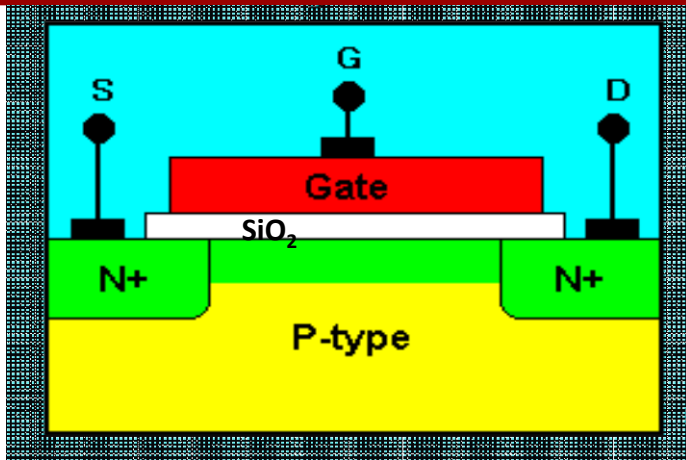
Η πηγή και η υποδοχή είναι συμμετρικοί ακροδέκτες.



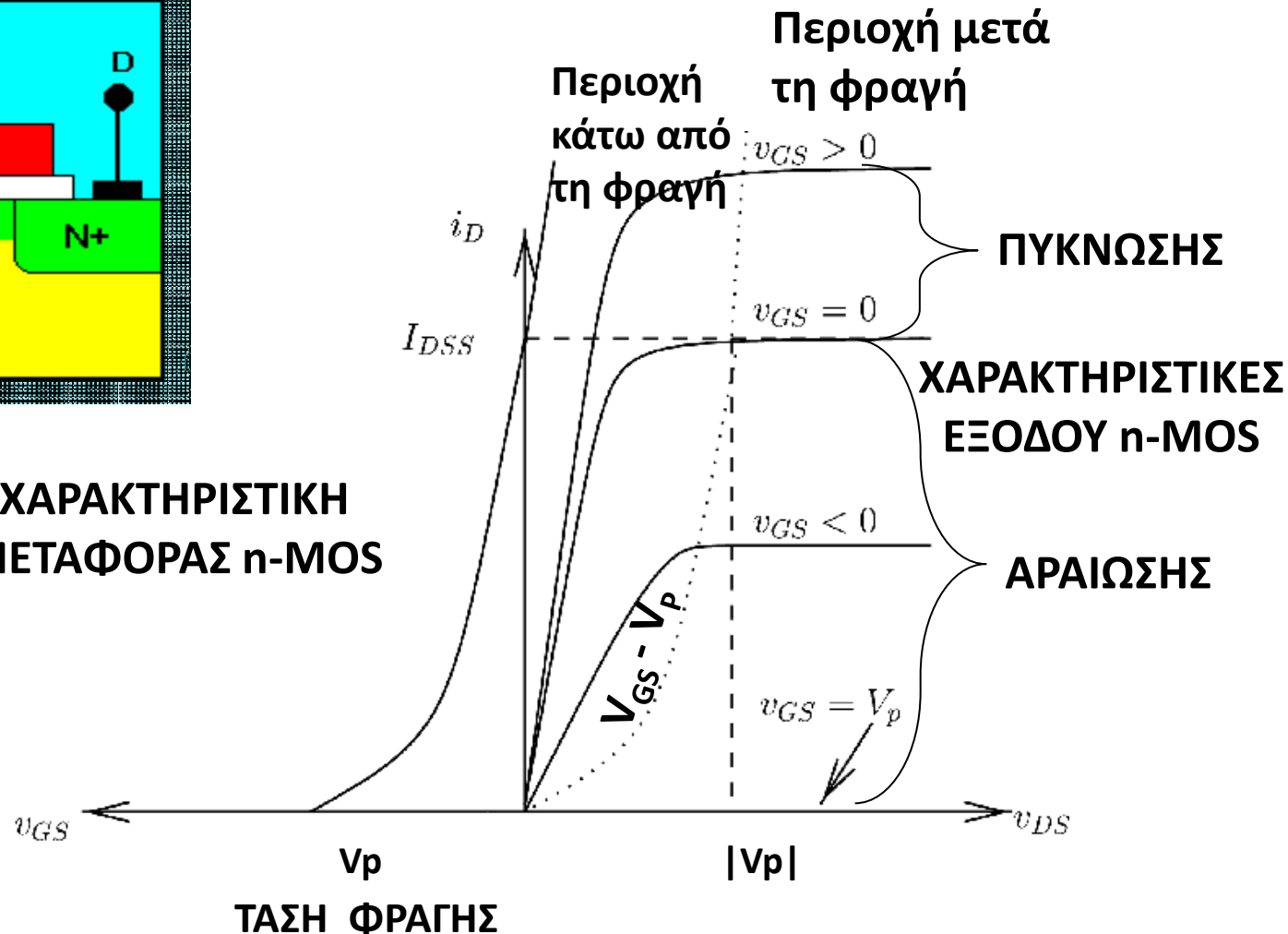
MOSFET Πύκνωσης - διαύλου p



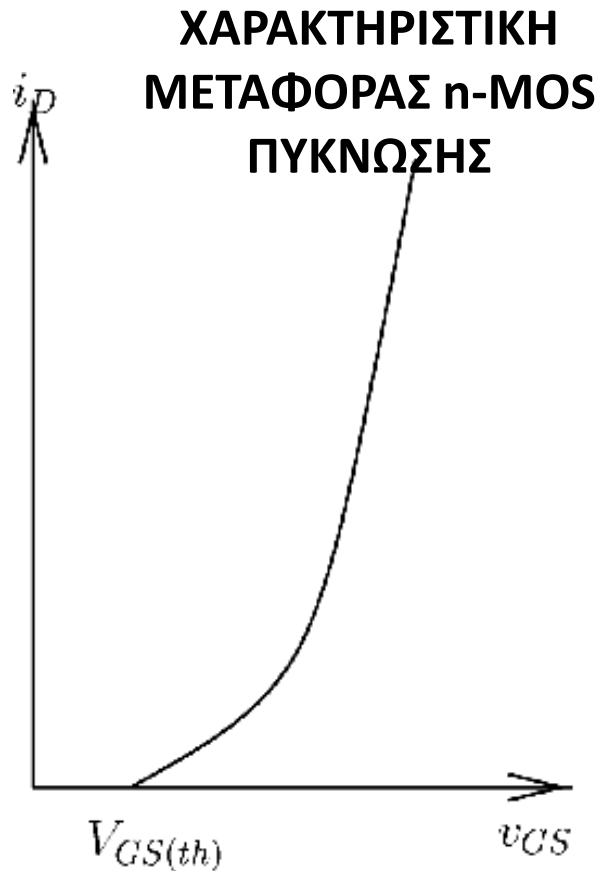
MOSFET Αραίωσης - διαύλου n (και πύκνωσης)



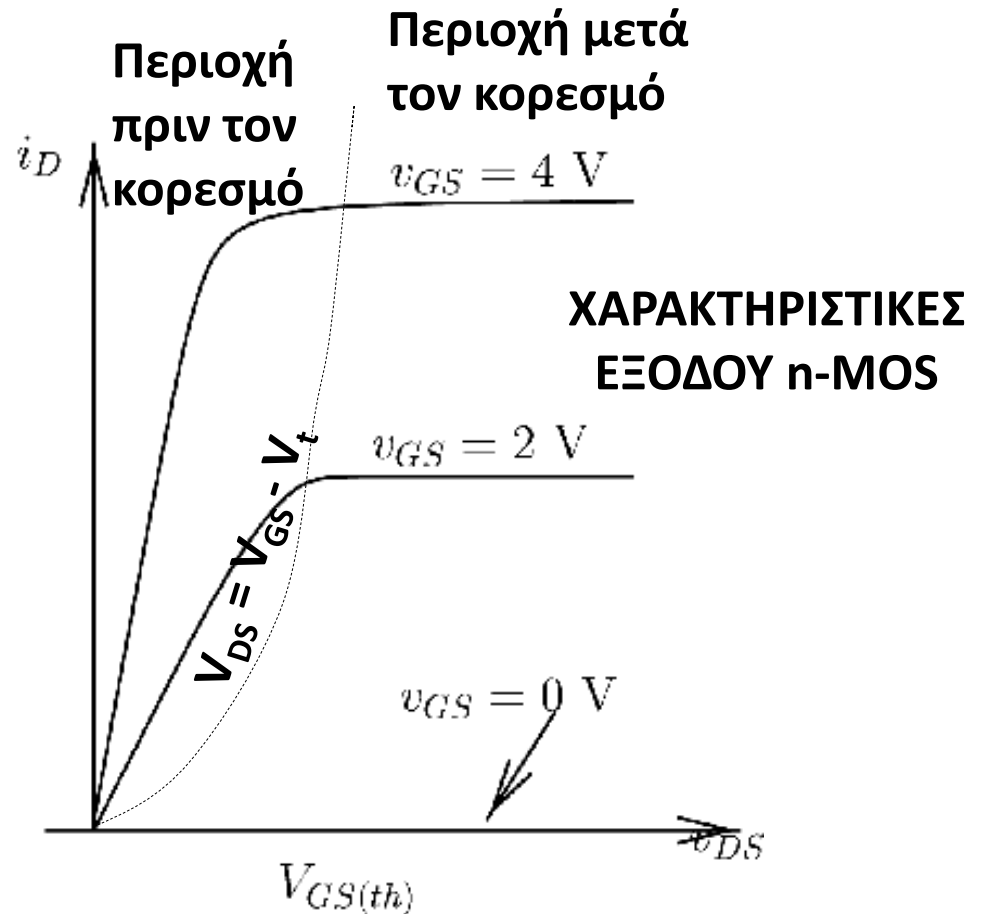
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ
ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ n-MOS



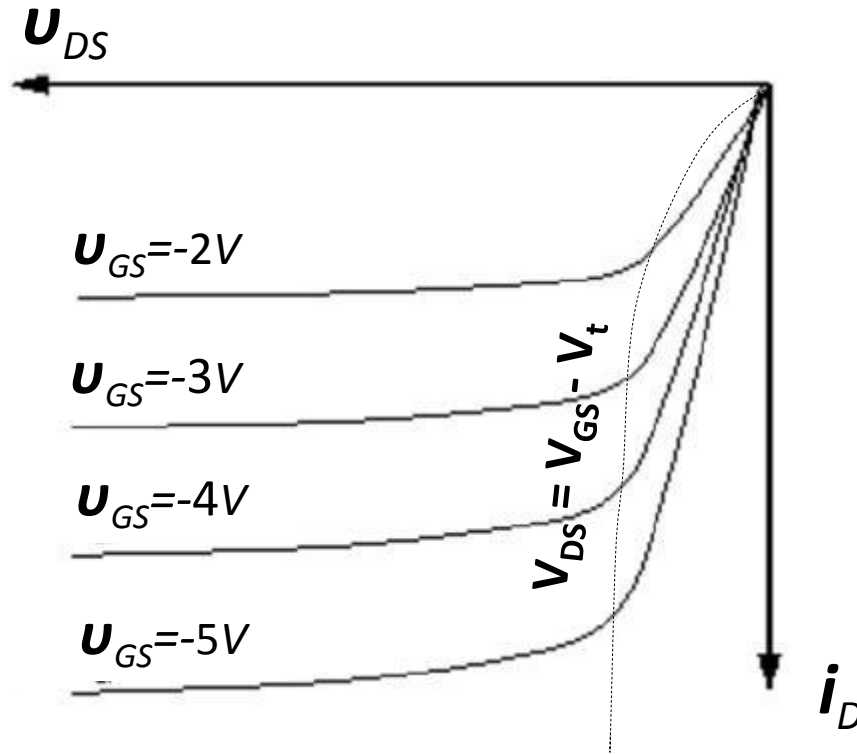
MOSFET Πύκνωσης - διαύλου n



$V_t = \text{ΤΑΣΗ ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ}$



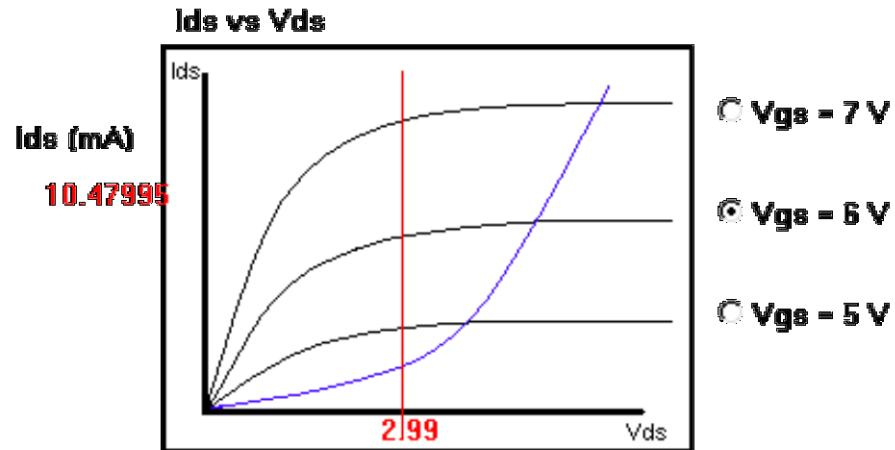
MOSFET Πύκνωσης - διαύλου p



ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ
ΕΞΟΔΟΥ p-MOS



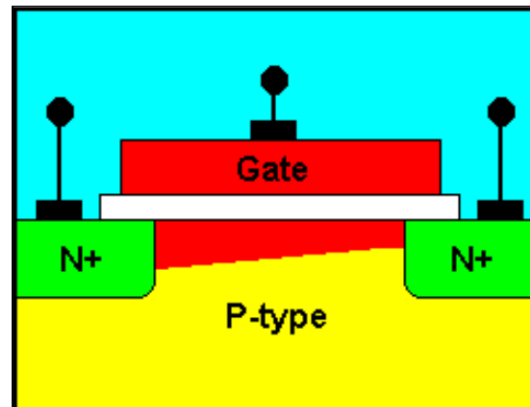
Χαρακτηριστικές εξόδου και λειτουργία MOSFET Πύκνωσης - διαύλου n (1/3)



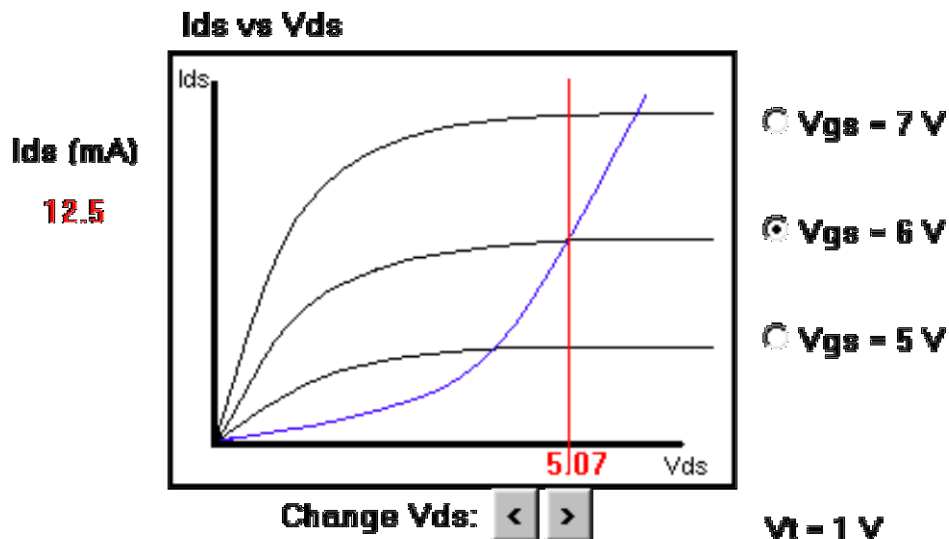
Change Vds: < >

Vt = 1 V
K = 0.001

Conducting Channel

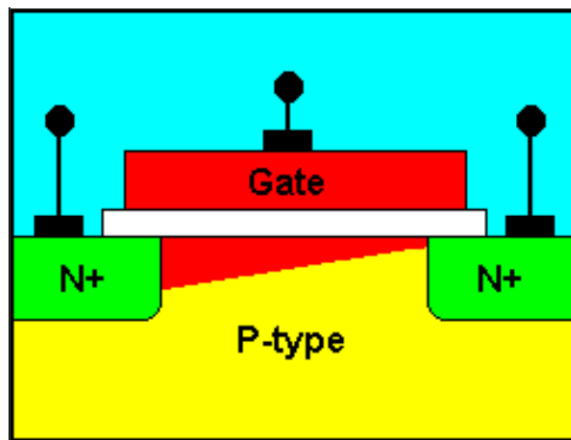


Χαρακτηριστικές εξόδου και λειτουργία MOSFET Πύκνωσης - διαύλου n (2/3)

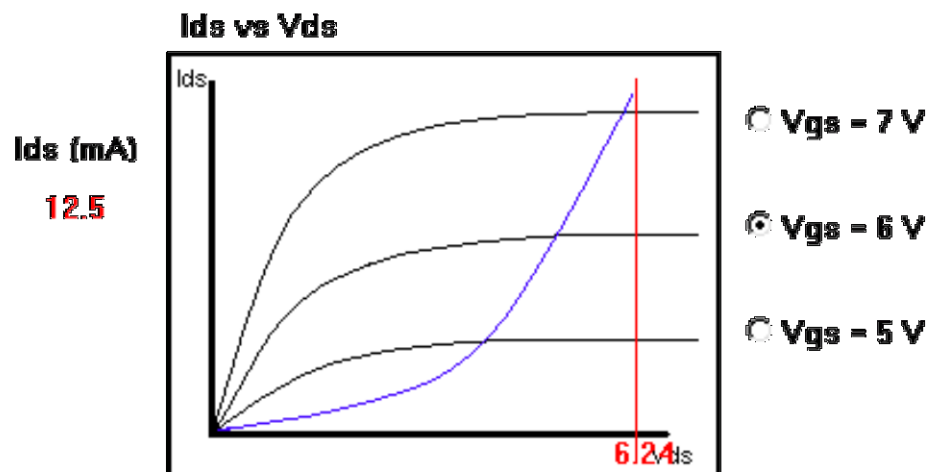


Vt = 1 V
K = 0.001

Conducting Channel



Χαρακτηριστικές εξόδου και λειτουργία MOSFET Πύκνωσης - διαύλου n (3/3)

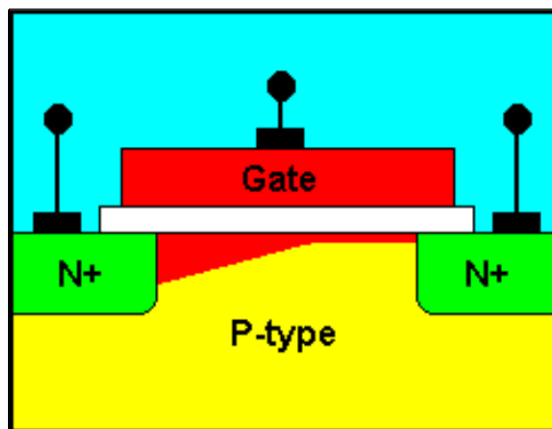


Change V_{ds}: < >

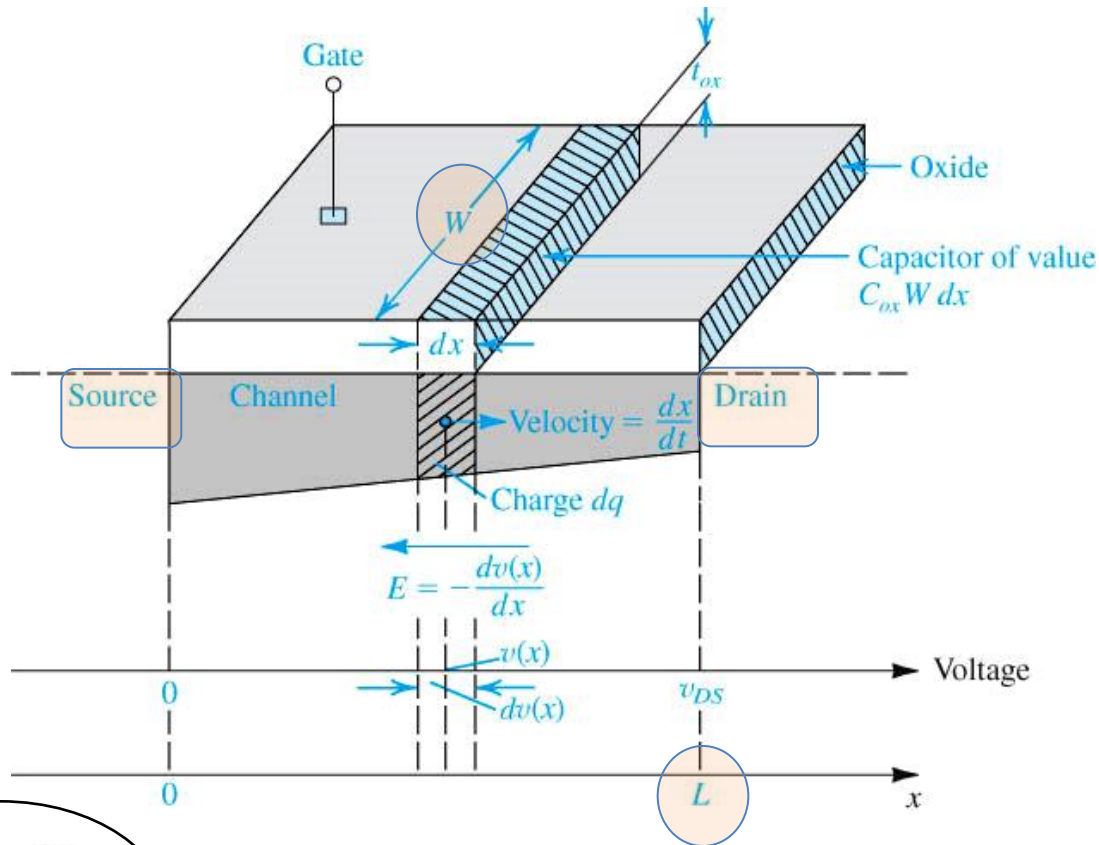
V_t = 1 V

K = 0.001

Conducting Channel



Εύρεση χαρακτηριστικής $i_D - U_{DS}$ nMOS τρανζίστορ (1/3)

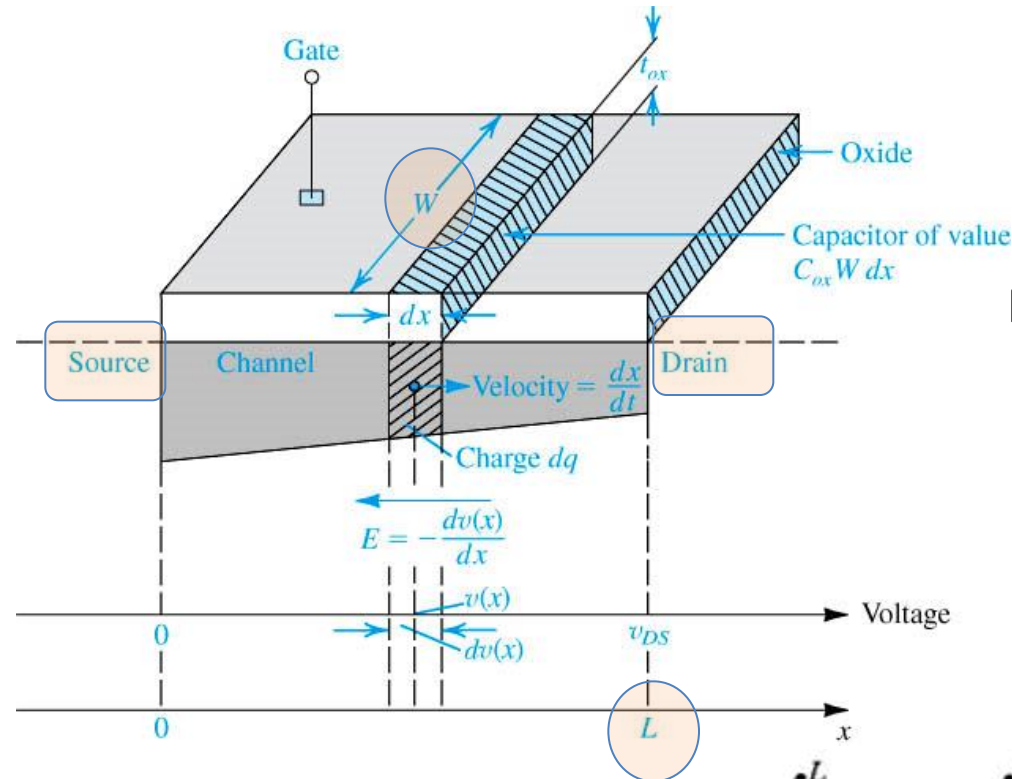


$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

$$\epsilon_{ox} = 3.9\epsilon_0 = 3.9 \times 8.854 \times 10^{-12} = 3.45 \times 10^{-11} \text{ F/m}$$



Εύρεση χαρακτηριστικής $i_D - v_{DS}$ nMOS τρανζίστορ (2/3)



$$dq = -C_{ox}(W dx)[v_{GS} - v(x) - V_t]$$

$$\frac{dx}{dt} = -\mu_n E(x) = \mu_n \frac{dv(x)}{dx}$$

Ρεύμα ολίσθησης: $i = \frac{dq}{dt} = \frac{dq}{dx} \frac{dx}{dt}$

$$i = -\mu_n C_{ox} W [v_{GS} - v(x) - V_t] \frac{dv(x)}{dx}$$

$$i_D = -i = \mu_n C_{ox} W [v_{GS} - v(x) - V_t] \frac{dv(x)}{dx}$$

$$i_D dx = \mu_n C_{ox} W [v_{GS} - V_t - v(x)] dv(x)$$

$$\int_0^L i_D dx = \int_0^{v_{DS}} \mu_n C_{ox} W [v_{GS} - V_t - v(x)] dv(x)$$

**Τριοδική Περιοχή λειτουργίας
(περιοχή πριν τον κορεσμό):**

$$i_D = (\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L} \right) \left[(v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right]$$



Εύρεση χαρακτηριστικής $i_D - v_{DS}$ nMOS τρανζίστορ (3/3)

$$i_D = (\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L} \right) \left[(v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right] \Rightarrow$$

Η περιοχή κορεσμού αρχίζει για:

$$v_{DS} = v_{GS} - V_t$$

$$\Rightarrow i_D = \frac{1}{2} (\mu_n C_{ox}) \left(\frac{W}{L} \right) (v_{GS} - V_t)^2$$

Κατασκευαστική παράμετρος διαγωγιμότητας:

$$k'_n = \mu_n C_{ox}$$

Τριοδική Περιοχή

(περιοχή πριν τον κορεσμό):

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \left[(v_{GS} - V_t) v_{DS} - \frac{1}{2} v_{DS}^2 \right]$$

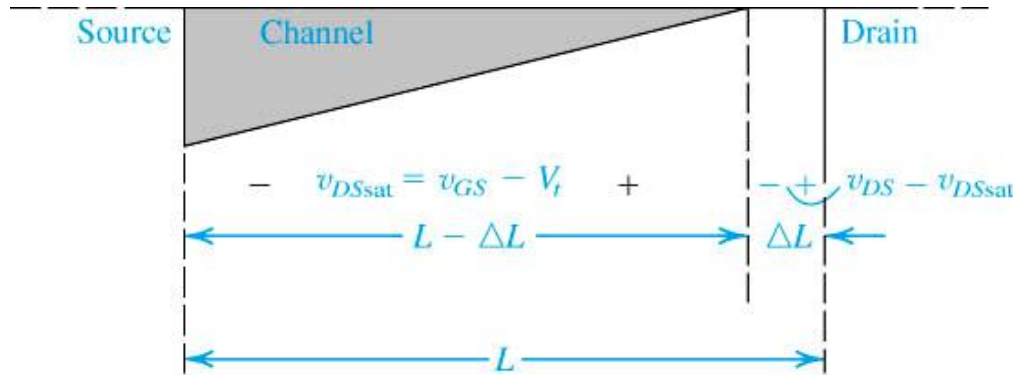
Περιοχή κορεσμού:

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2$$

Τάση υπεροδήγησης: $V_{OV} \equiv V_{GS} - V_t$



Διαμόρφωση μήκους καναλιού σε MOS τρανζίστορ



$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L - \Delta L} (v_{GS} - V_t)^2$$

$$= \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} \frac{1}{1 - (\Delta L/L)} (v_{GS} - V_t)^2$$

$$\cong \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} \left(1 + \frac{\Delta L}{L}\right) (v_{GS} - V_t)^2$$

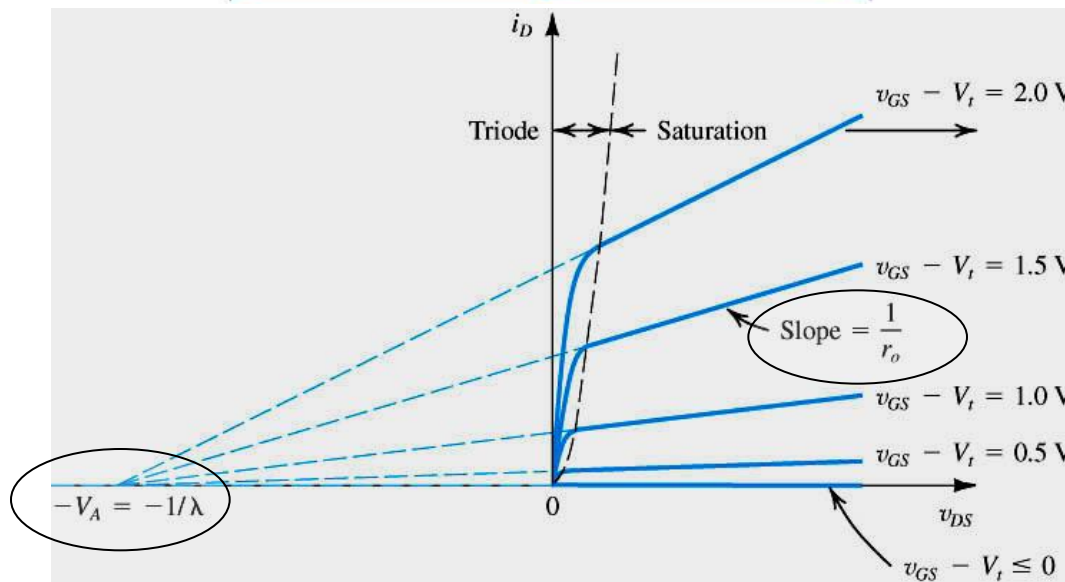
$$\Delta L = \lambda' v_{DS}$$

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} \left(1 + \frac{\lambda' v_{DS}}{L}\right) (v_{GS} - V_t)^2$$

$$\lambda = \frac{\lambda'}{L}$$

$$i_D = \frac{1}{2} k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda v_{DS})$$

Τάση Early: $V_A = \frac{1}{\lambda}$



Επίδραση υποστρώματος όταν $V_{SB} \neq 0$ (φαινόμενο σώματος)

Τάση κατωφλίου για $V_{SB} = 0$

$$V_t = V_{t0} + \gamma [\sqrt{2\phi_f + V_{SB}} - \sqrt{2\phi_f}]$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{2qN_A\epsilon_s}}{C_{ox}}$$

Παράμετρος φαινομένου σώματος

N_A η συγκέντρωση προσμίξεων του p τύπου υποστρώματος

ϕ_f φυσική παράμετρος με τυπικές τιμές:

$$2\phi_f = 0.60 \text{ V για nMOS}$$

$$2\phi_f = 0.75 \text{ V για pMOS}$$

Τιμές σταθερών:

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\epsilon_{ox} = 3.9\epsilon_0 = 3.45 \times 10^{-11} \text{ F/m}$$

$$\epsilon_s = 11.7\epsilon_0 = 1.04 \times 10^{-10} \text{ F/m}$$

$$q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$



Επίδραση θερμοκρασίας στη λειτουργία των MOS

V_t μειώνεται κατά 2 mV περίπου για κάθε 1°C αύξηση θερμοκρασίας.

⇒ Αύξηση ρεύματος i_D με την θερμοκρασία.

k' μειώνεται με τη θερμοκρασία.

⇒ Μείωση ρεύματος i_D με την θερμοκρασία.

Συνολική επίδραση:

Μείωση ρεύματος i_D με την θερμοκρασία



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Χατζόπουλος Αλκιβιάδης. «ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ Ι, Τρανζίστορ FET ». Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
http://opencourses.auth.gr/eclass_courses.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Μη Εμπορική Χρήση - Όχι Παράγωγα Έργα 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».



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

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

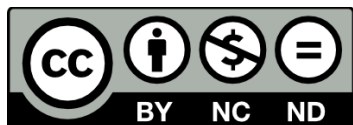
[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Σβάρνα Κωνσταντίνα
Θεσσαλονίκη, χειμερινό εξάμηνο 2014-2015





ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Σημειώματα

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.

