

Τρανζίστορ Μετάλλου-Οξειδίου-Ημιαγωγού Επίδρασης Πεδίου (MOSFET)

- Δομή & Αρχή Λειτουργίας
- Περιοχές Λειτουργίας

Λευτέρης Καπετανάκης



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

2010

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Στις διαφάνειες των διαλέξεων χρησιμοποιείται διδακτικό υλικό το οποίο έχει δανειστεί από διάφορα εκπαιδευτικά βιβλία και διαδικτυακές σελίδες. Ο εισηγητής δεν έχει καμιά αξίωση κατοχής του υλικού αυτού και το χρησιμοποιεί μόνο για λόγους διδασκαλίας εντός της τάξης. Οι εικόνες και οι πίνακες είναι κτήμα διαφόρων συγγραφέων και παρέχονται στον αντίστοιχο δικτυότοπό τους.

Τύποι τρανζίστορ

- **Διπολικά τρανζίστορ**
 - n-p-n και p-n-p δομές πυριτίου
 - Μικρό ρεύμα εντός του πολύ λεπτού στρώματος της βάσης ελέγχει υψηλά επίπεδα ρεύματος μεταξύ του εκπομπού και του συλλέκτη
 - Τα ρεύματα βάσης περιορίζουν την πυκνότητα ολοκλήρωσης
- **Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET)**
Μετάλλου-Οξειδίου-ημιαγωγού (MOS)
 - nMOS και pMOS MOSFETS
 - Η εφαρμογή τάσης στην πύλη ελέγχει το ρεύμα μεταξύ της πηγής και της υποδοχής
 - Η χαμηλή ισχύς επιτρέπει πολύ μεγάλη ολοκλήρωση

ΤΛ1001 – 2010

L17: Τρανζίστορ Μετάλλου-Οξειδίου-ημιαγωγού Επαφής Επίδρασης Πεδίου

Τι είναι το MOSFET;

- Τα ψηφιακά Ο.Κ. βασίζονται σε διακόπτες τρανζίστορ
 - Η πιο συνηθής διάταξη για ψηφιακά και μικτά σήματα: MOSFET

- **Ορισμοί**

- MOS = Metal Oxide Semiconductor

- Φυσικά στρώματα της διάταξης

- FET = Field Effect Transistor

- Τι είναι πεδίο E ; Τι κάνει το πεδίο;
 - Είναι άλλα πεδία σημαντικά;

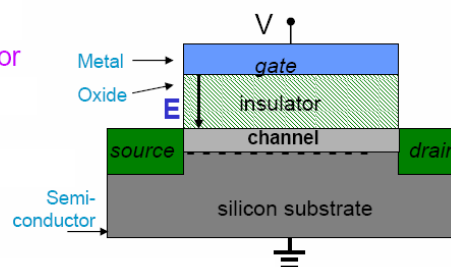
- CMOS = Complementary MOS

- Χρήση αμφοτέρων nMOS και pMOS στην κατασκευή κυκλώματος

- **Βασικά χαρακτηριστικά**

- gate → **Πύλη**
 - gate oxide (insulator) → **οξείδιο πύλης (μονωτής)**
 - source and drain → **πηγή και υποδοχή**
 - bulk/substrate → **υπόστρωμα**
 - channel → **κανάλι**

Σημείωση: Στα μοντέρνα MOSFETs το μέταλλο της πύλης έχει αντικαταστεί από πολυπυρίτιο
“metal” → polysilicon



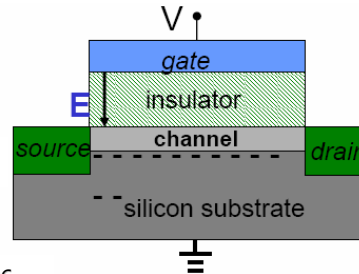
ΤΛ1001 – 2010

L17: Τρανζίστορ Μετάλλου-Οξειδίου-ημιαγωγού Επαφής Επίδρασης Πεδίου

MOSFET: Θεμελιώδεις σχέσεις

• Ηλεκτρικά πεδία

- Βασική Εξίσωση
 - Ηλεκτρικό πεδίο: $E = V/d$
- Κατακόρυφο πεδίο διαμέσου του οξειδίου πύλης
 - Καθορίζει τα επαγόμενα φορτία στο κανάλι
- Οριζόντιο πεδίο κατά μήκος του καναλιού
 - Καθορίζει τη ροή ρεύματος μεταξύ πηγής-εκροής



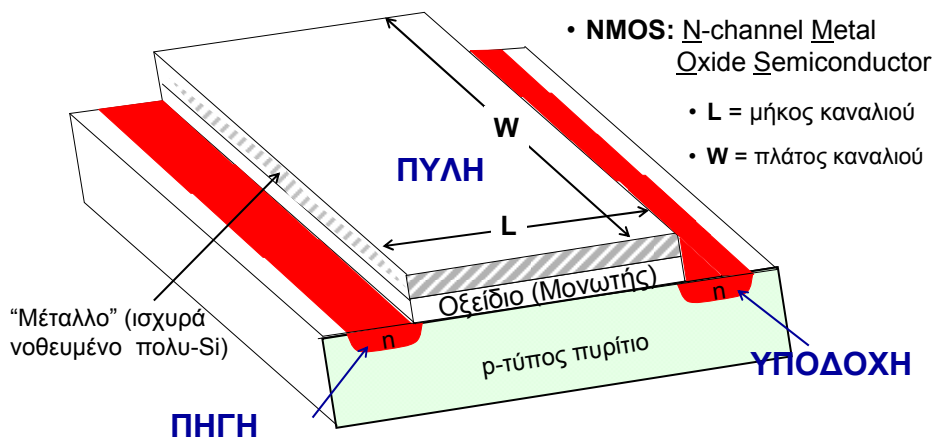
• Χωρητικότητα

- Βασικές Εξισώσεις
 - Φορτίο πυκνωτή : $Q = CV$
 - Χωρητικότητα : $C = \epsilon A/d$
- Εξισορρόπηση φορτίου στους οπλισμούς του πυκνωτή: $Q_+ = Q_-$
 - Το φορτίο της πύλης εξισορροπείται από το φορτίο στο κανάλι
 - Τι είναι το φορτίο του καναλιού; Από πού προέρχεται;

ΤΛ1001 – 2010

L17: Τρανζίστορ Μετάλλου-Οξειδίου-ημιαγωγού Επαφής Επίδρασης Πεδίου

MOSFET

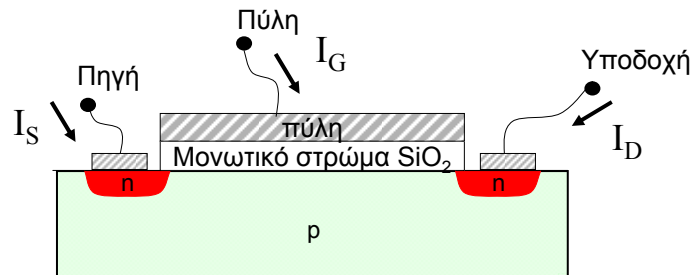


- Το ηλεκτρόδιο της ΠΥΛΗΣ (**GATE**) είναι τοποθετημένο πάνω (και ηλεκτρικά απομονωμένο από) την επιφάνεια του πυριτίου, και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της αντίστασης μεταξύ των περιοχών της ΠΗΓΗΣ (**SOURCE**) και της υποδοχής (**DRAIN**)

ΤΛ1001 – 2010

L17: Τρανζίστορ Μετάλλου-Οξειδίου-ημιαγωγού Επαφής Επίδρασης Πεδίου

MOSFET N-καναλιού

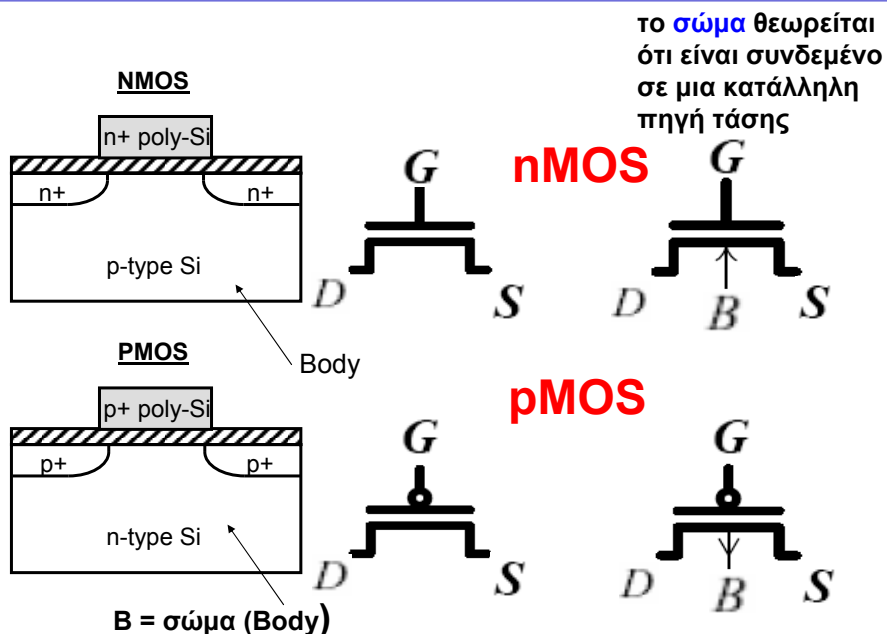


- Χωρίς την εφαρμογή τάσης μεταξύ πύλης- πηγής, δεν υπάρχει ροή ρεύματος ανάμεσα στις περιοχές της πηγής και της εκροής.
- Πάνω από μία ορισμένη τάση πύλης- πηγής (**τάση κατωφλίου, V_T**), ένα αγωγίμο στρώμα από ευκίνητα ηλεκτρόνια σχηματίζεται στην επιφάνεια του Si από κάτω από το οξειδίο. Τα ηλεκτρόνια αυτά μπορούν να μεταφέρουν ρεύμα μεταξύ της πηγής και της υποδοχής.

ΤΛ1001 – 2010

L17: Τρανζίστορ Μετάλλου-Οξειδίου-ημιαγωγού Επαφής Επίδρασης Πεδίου

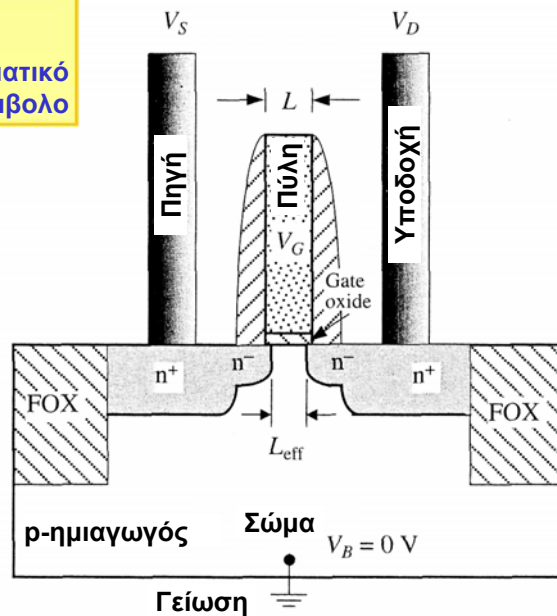
Κυκλωματικός συμβολισμός του MOSFET



ΤΛ1001 – 2010

L17: Τρανζίστορ Μετάλλου-Οξειδίου-ημιαγωγού Επαφής Επίδρασης Πεδίου

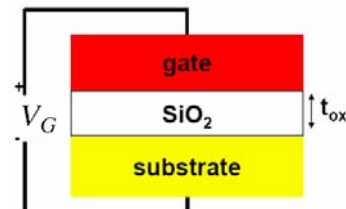
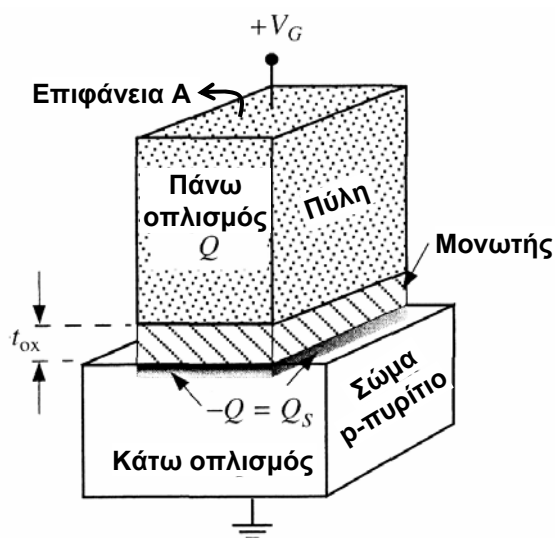
Λειτουργία τρανζίστορ nMOS



ΤΛ1001 – 2010

Ψάξης Πεδίου

Η πύλη του MOSFET ως πυκνωτής



$$C_G = \frac{\epsilon_{\text{ins}} A}{t_{\text{ox}}}$$

$$\epsilon_{\text{ins}} = \epsilon_{\text{ox}} = 3.9 \epsilon_0$$

$$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$$

ΤΛ1001 – 2010

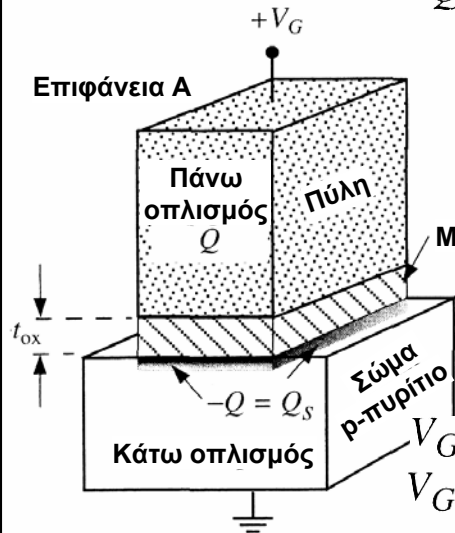
L17: Τρανζίστορ Μετάλλου-Οξειδίου-ημιαγωγού Επαφής Επίδρασης Πεδίου

Φορτίο πυκνωτή MOSFET

■ Η χωρητικότητα πύλης βοηθά να καθορίσουμε το φορτίο στο κανάλι το οποίο σχηματίζει το **στρώμα αντιστροφής**.

$$Q = CV \Rightarrow Q = C_G V_G$$

$$Q_s = Q_B + Q_n$$



ιονισμένα ακίνητα άτομα νόθευσης

Ελεύθερα ηλεκτρόνια

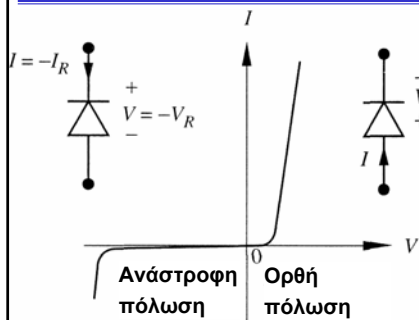
Μία θετική τάση πύλης απαιτείται για τη δημιουργία του φορτίου Q_s , αλλά αυτή πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη για να προκαλέσει το σχηματισμό ενός στρώματος ελεύθερων ηλεκτρονίων στο p-πυρίτιο.

$$V_G \leq V_{Tn}: Q_n = 0$$

$$V_G > V_{Tn}: \text{Σχηματισμός στρώματος } Q_n$$

η-μιαγωγού Επαφής Επίδρασης Πεδίου

Επαφές pn και σχηματισμός του καναλιού

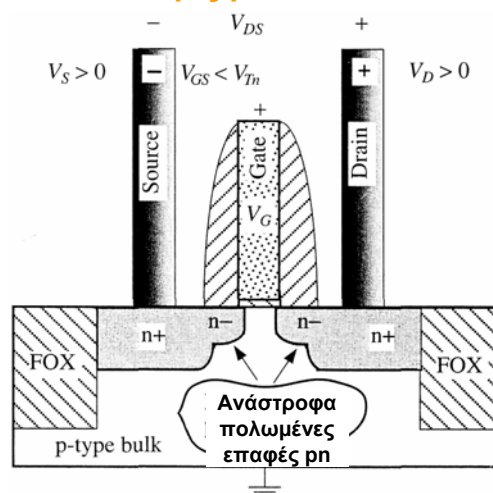


$$I = I_S (e^{V/V_{th}} - 1)$$

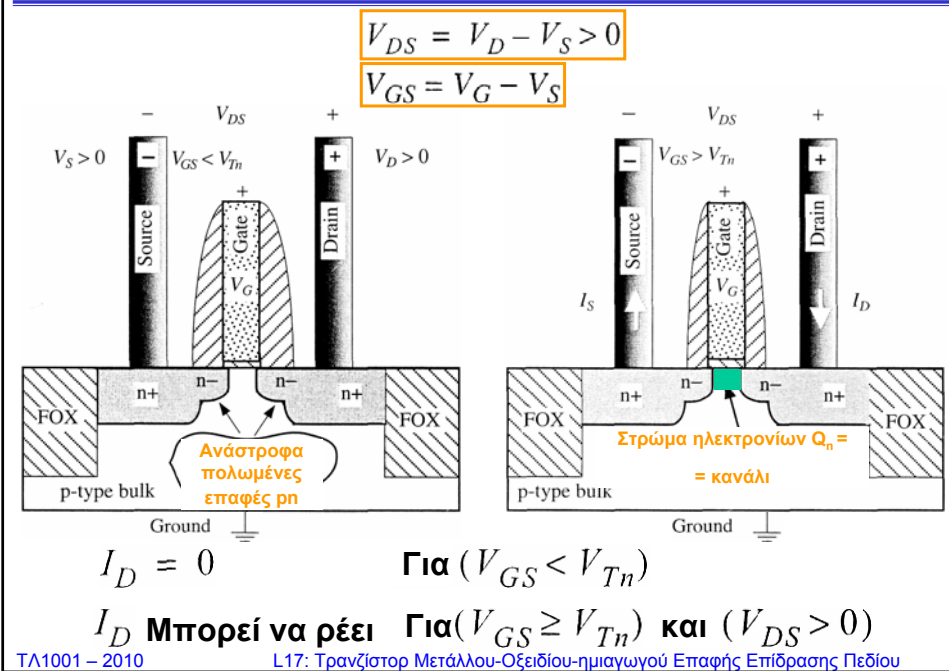
$$I = -I_R = -I_S$$

$$V_{th} = 26 \text{ mV σε } 300 \text{ K}$$

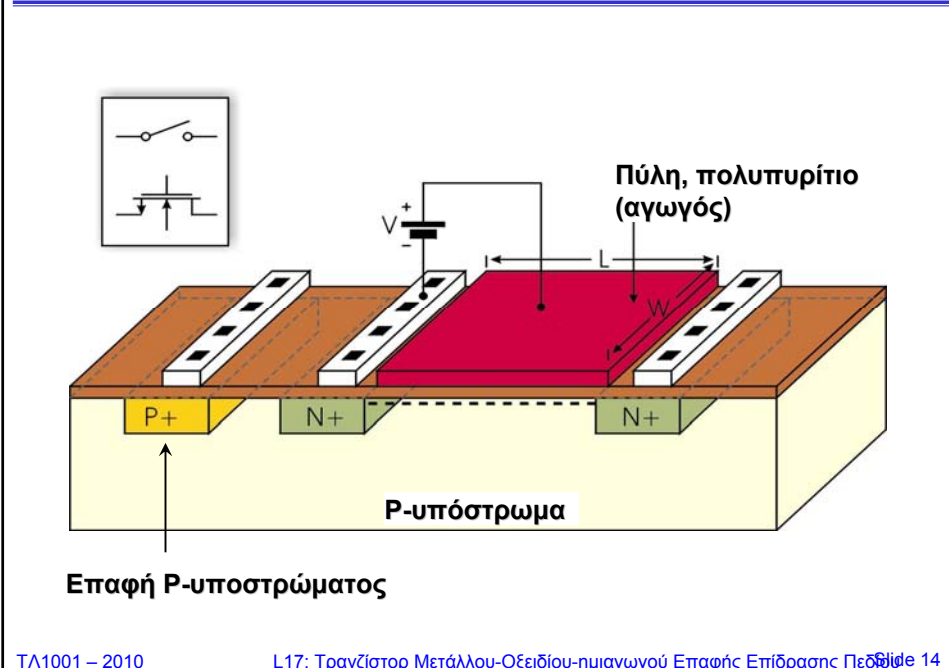
Οι επαφές pn του MOSFET



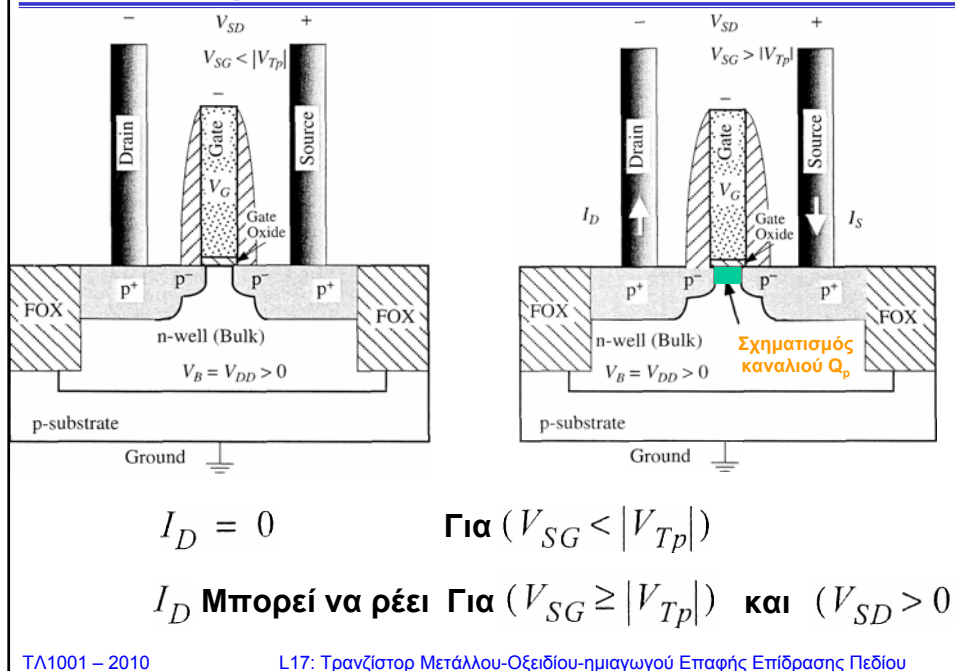
Σχηματισμός του n-καναλιού



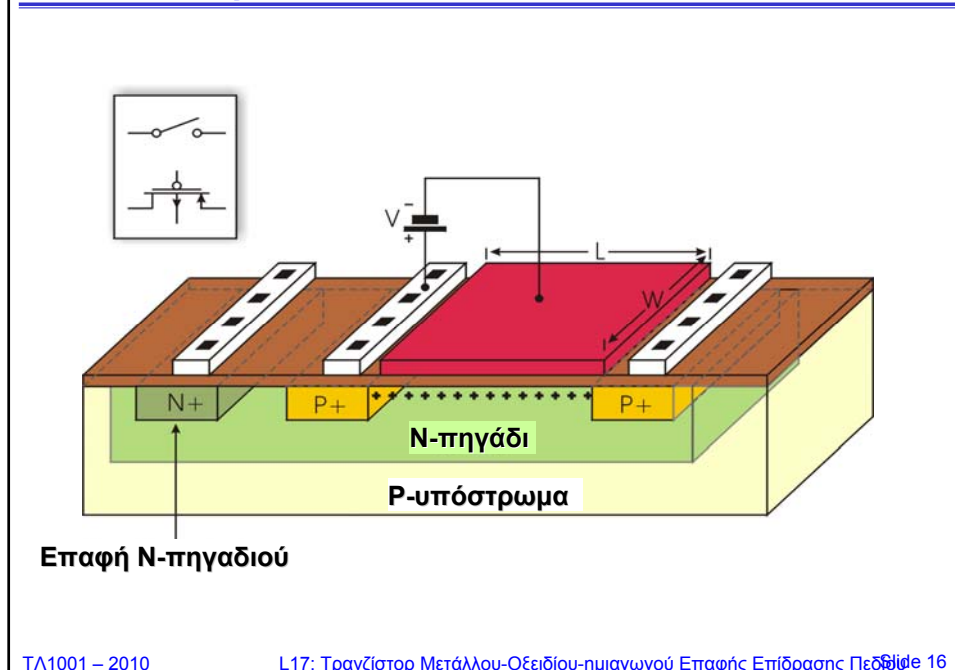
Σχηματισμός του n-καναλιού



Σχηματισμός του p-καναλιού



Σχηματισμός του p-καναλιού



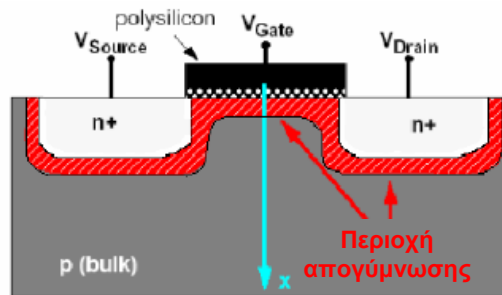
nMOS στην αποκοπή

$$\triangleright V_{GS} < V_T$$

Θεωρείστε:

$$V_T = 0.75V$$

Τάση κατωφλίου



$$V_S = 0V$$

$$V_G = 0.5V$$

$$V_D = 0V$$

κανένα στρώμα
αντιστροφής στην
επιφάνεια



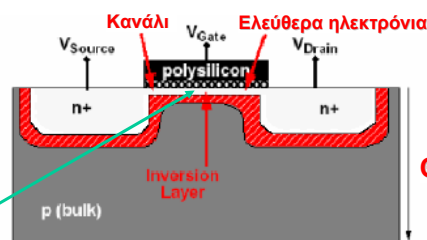
TL1001 – 2010

L17: Τρανζίστορ

nMOS στην ωμική (τρίοδο) περιοχή

$$\triangleright V_{GS} > V_T$$

$$V_{DS} \approx 0$$



$$V_S = 0V$$

$$V_G = 1V$$

$$V_D = 0V$$

Θεωρείστε:
 $V_T = 0.75V$

Τάση κατωφλίου

Πυκνότητα φορτίου
αντιστροφής:

$$Q_i(x) = -C_{ox}[V_{GS} - V_T]$$

$$\text{όπου } C_{ox} \equiv \epsilon_{ox} / t_{ox}$$

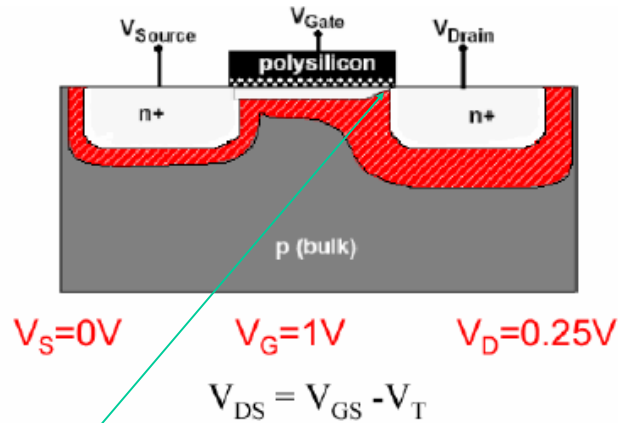


TL1001 – 2010

L17: Τρανζίστορ Μετάλλου-Οξειδίου-ημιαγωγού Επαφής Επίδρασης Πεδίου

nMOS στο ξεκίνημα κόρου

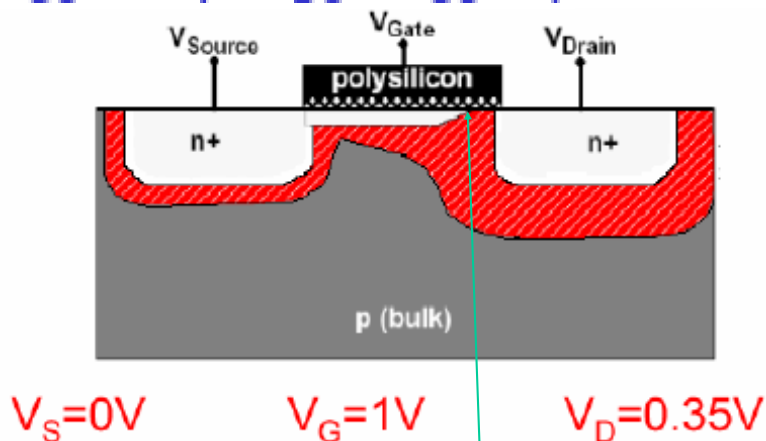
► $V_{GS} > V_T$, $V_{DS} = V_{GS} - V_T$



Το στρώμα αντιστροφής “αποκόπτεται” στην περιοχή της υποδοχής

nMOS στον κόρου (1)

► $V_{GS} > V_T$, $V_{DS} > V_{GS} - V_T$



Αύξηση του μήκους “αποκοπής” του καναλιού στην περιοχή της υποδοχής

nMOS απλές Χαρακτηριστικές $I_D - V_{DS}$

Οι καμπύλες $I_D - V_{DS}$ αποτελούνται από δύο περιοχές:

1) Ωμική περιοχή : $0 < V_{DS} < V_{GS} - V_T$

$$I_D = k'_n \frac{W}{L} \left[V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right] V_{DS}$$

με $k'_n = \mu_n C_{ox}$

Παράμετρος διαγωγιμότητας διαδικασίας

2) Περιοχή κόρου:
 $V_{DS} > V_{GS} - V_T$

$$I_{DSAT} = \frac{k'_n}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

με $k'_n = \mu_n C_{ox}$

“πρόβλεψη
γραμμικού
μοντέλου”

Αυτή η καμπύλη δείχνει που η καμπύλη I_D αρχίζει να γίνεται επίπεδη: το I_D δεν εξαρτάται πια από την τάση V_{DS}

