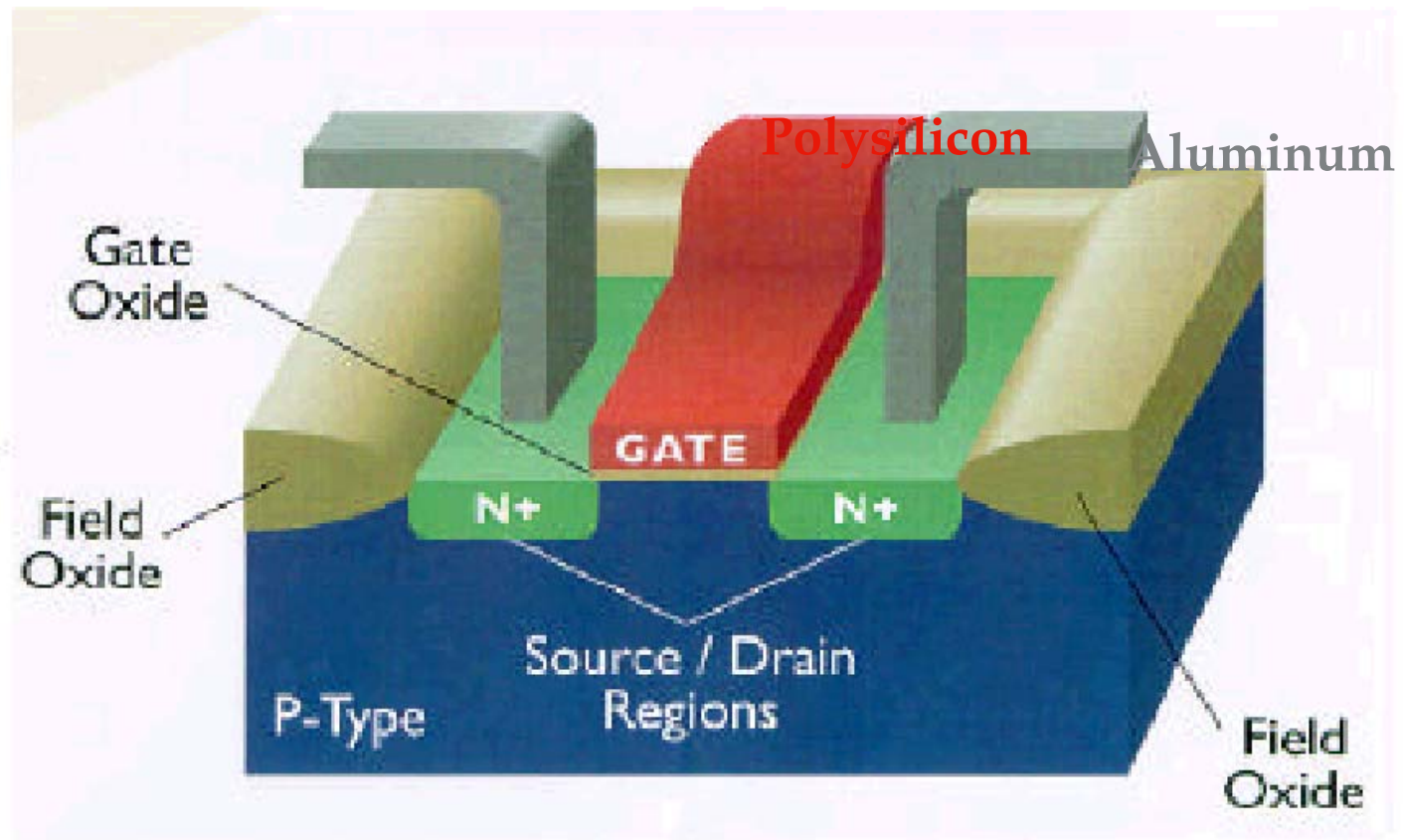




Τρανζίστορ

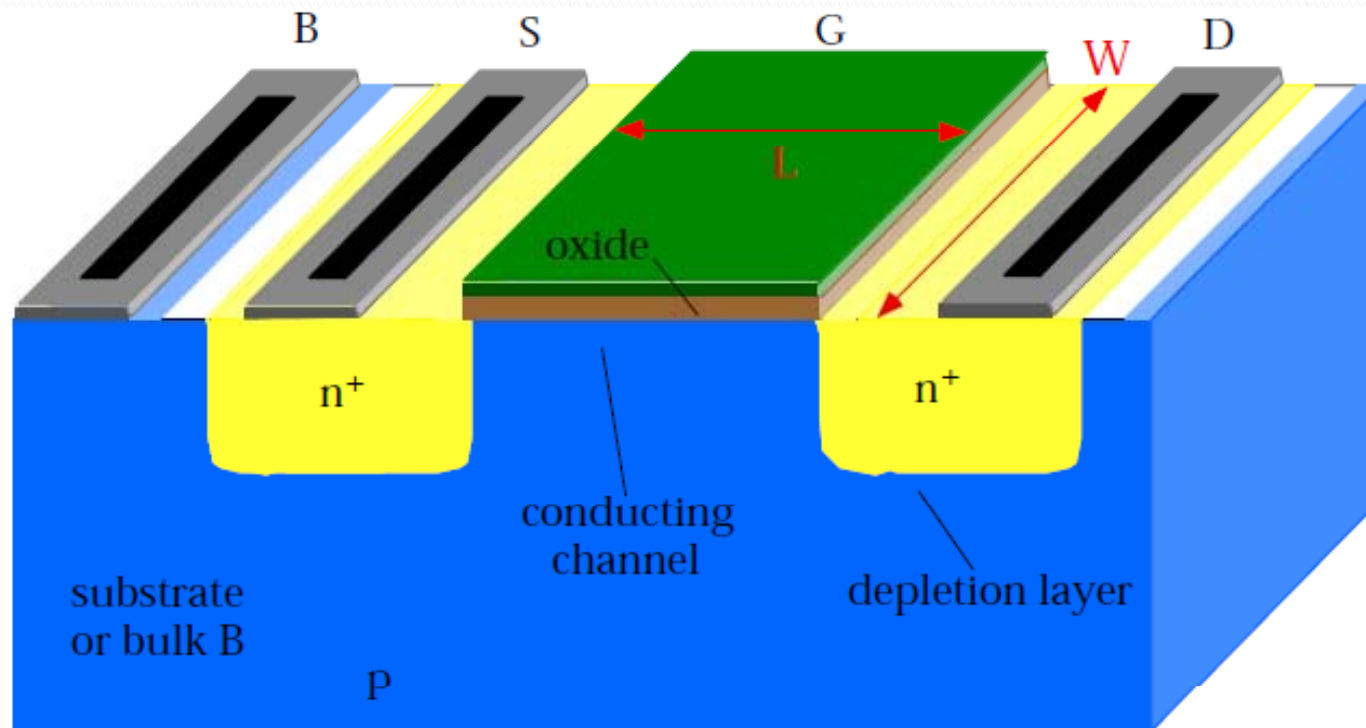
The MOS Transistor



N-MOS Τρανζίστορ

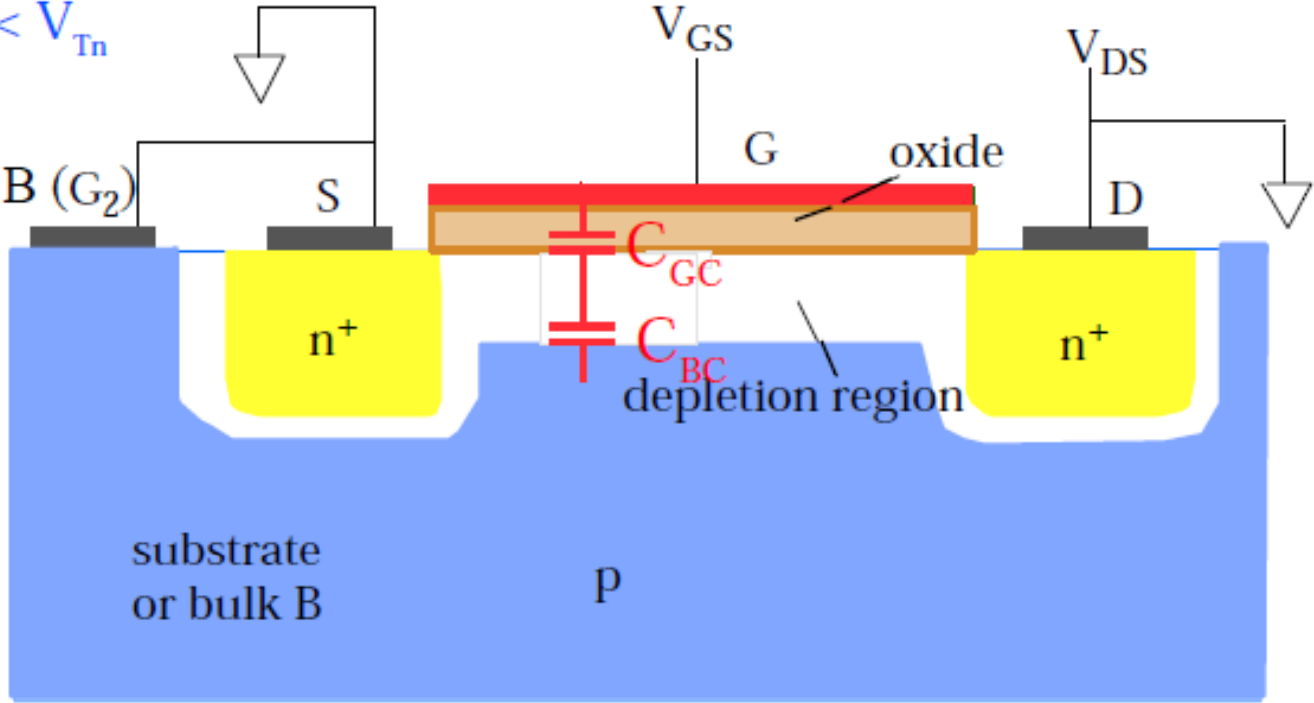
- Διάταξη τριών ακροδεκτών
 - Πηγή (Source)
 - Καταβόθρα (Drain)
 - Πύλη (Gate)
- Κατασκευαστικά η Πηγή και η Καταβόθρα είναι όμοιες
- Συνήθως υπάρχει και τέταρτος ακροδέκτης
 - Υπόστρωμα (Substrate, Body)

N-CHANNEL ENHANCEMENT-TYPE MOSFET



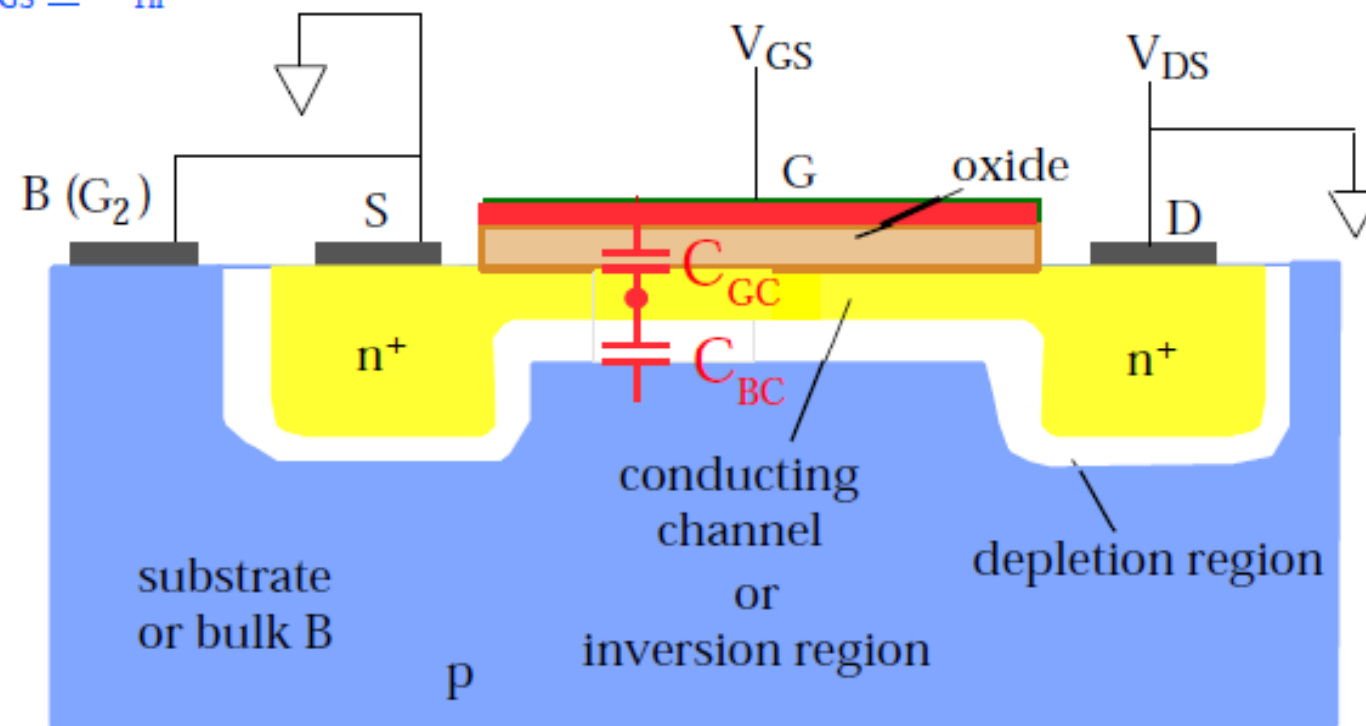
DEPLETION REGION

$$0 < V_{GS} < V_{Tn}$$

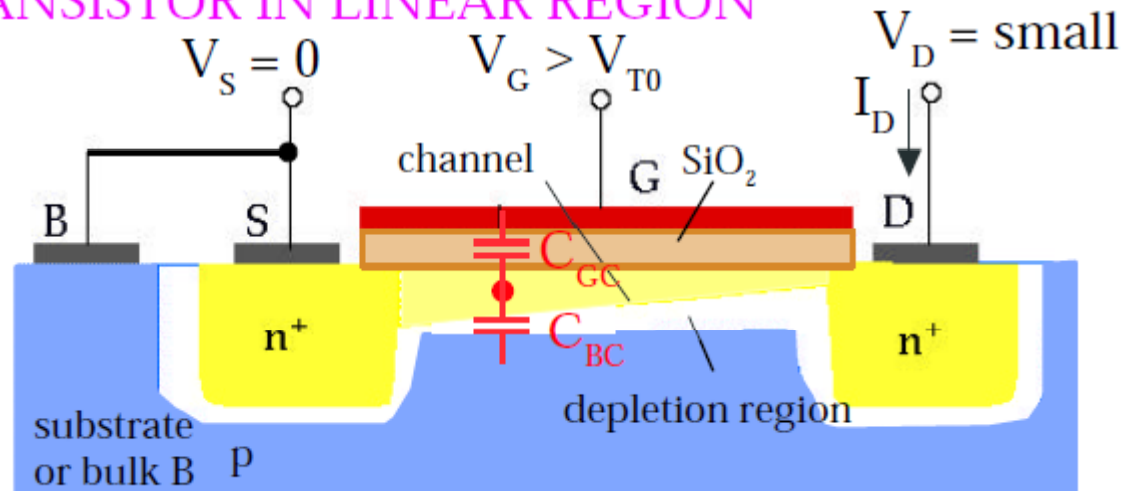


$$V_{GS} \geq V_{Tn}$$

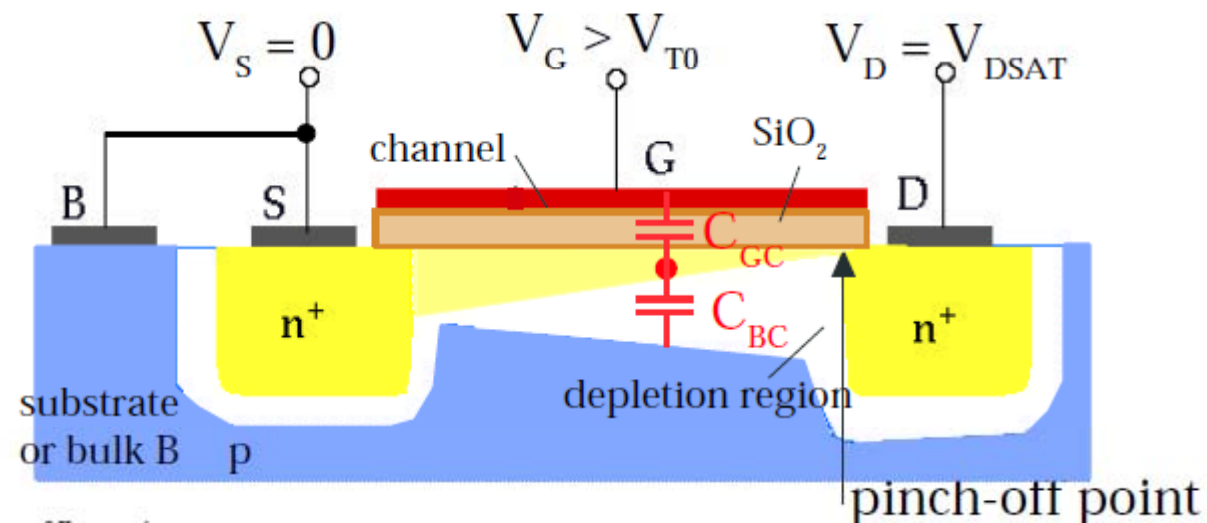
INVERSION REGION



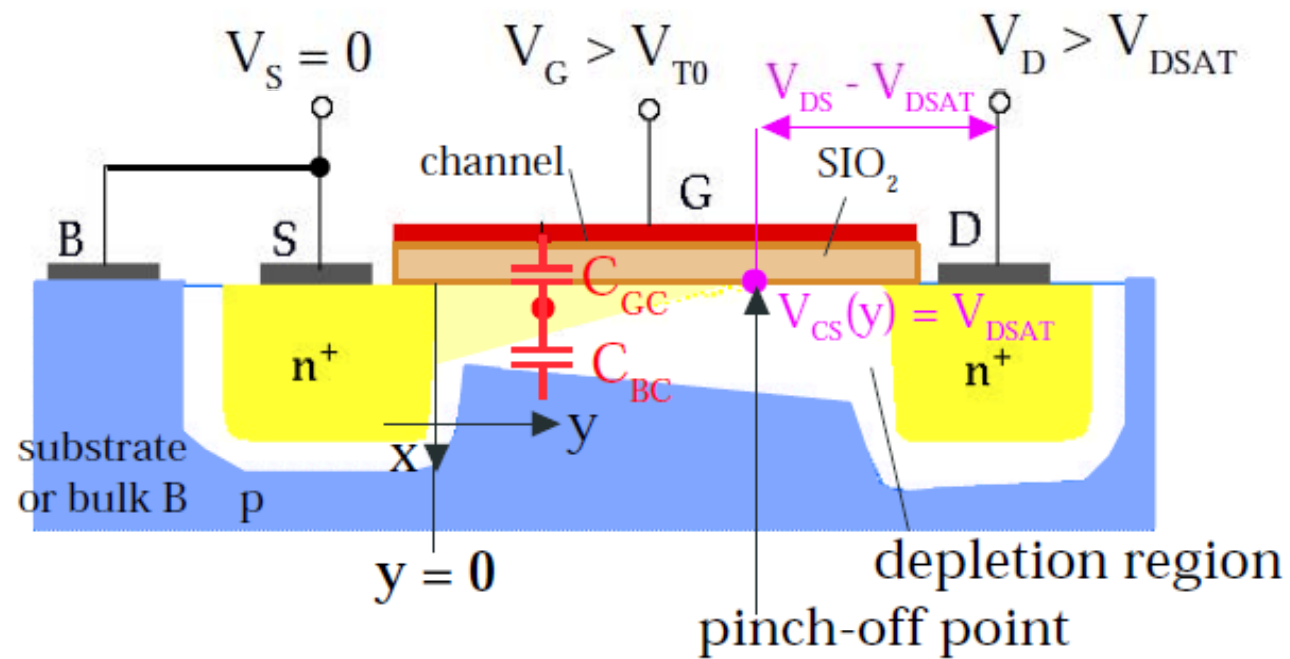
nMOS TRANSISTOR IN LINEAR REGION



nMOS TRANSISTOR AT EDGE OF SATURATION REGION

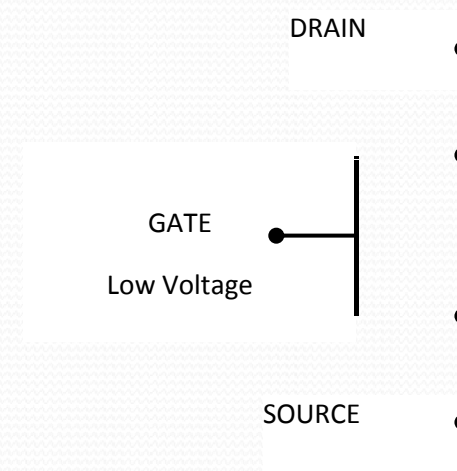
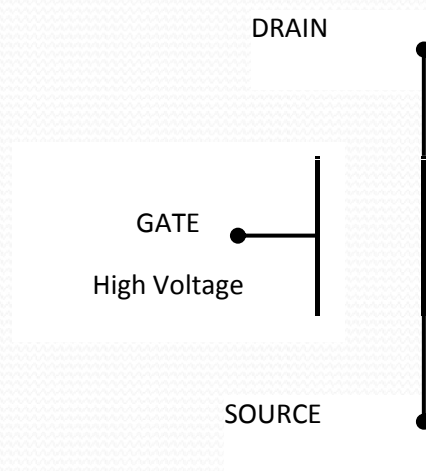
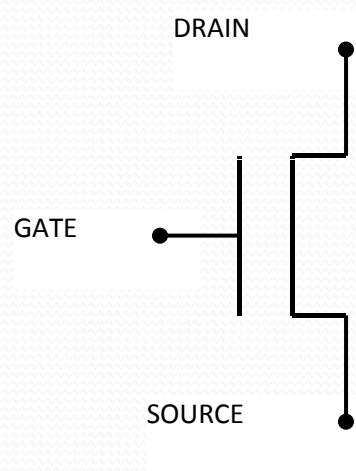


nMOS TRANSISTOR IN SATURATION REGION



N-MOS

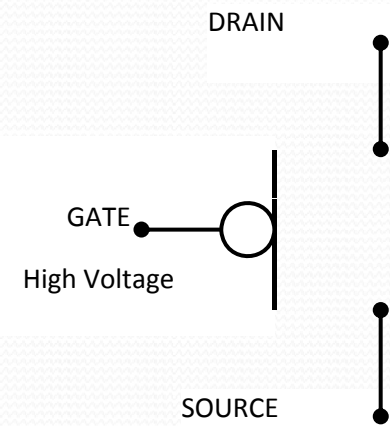
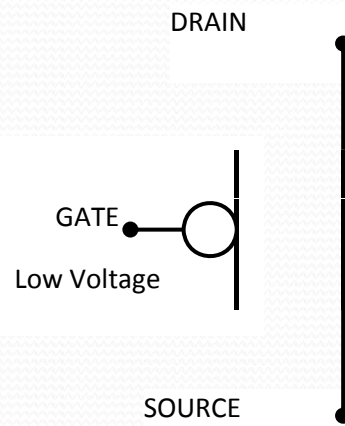
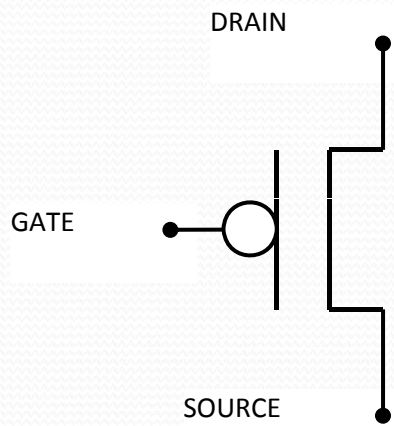
(Λειτουργία)



P-MOS

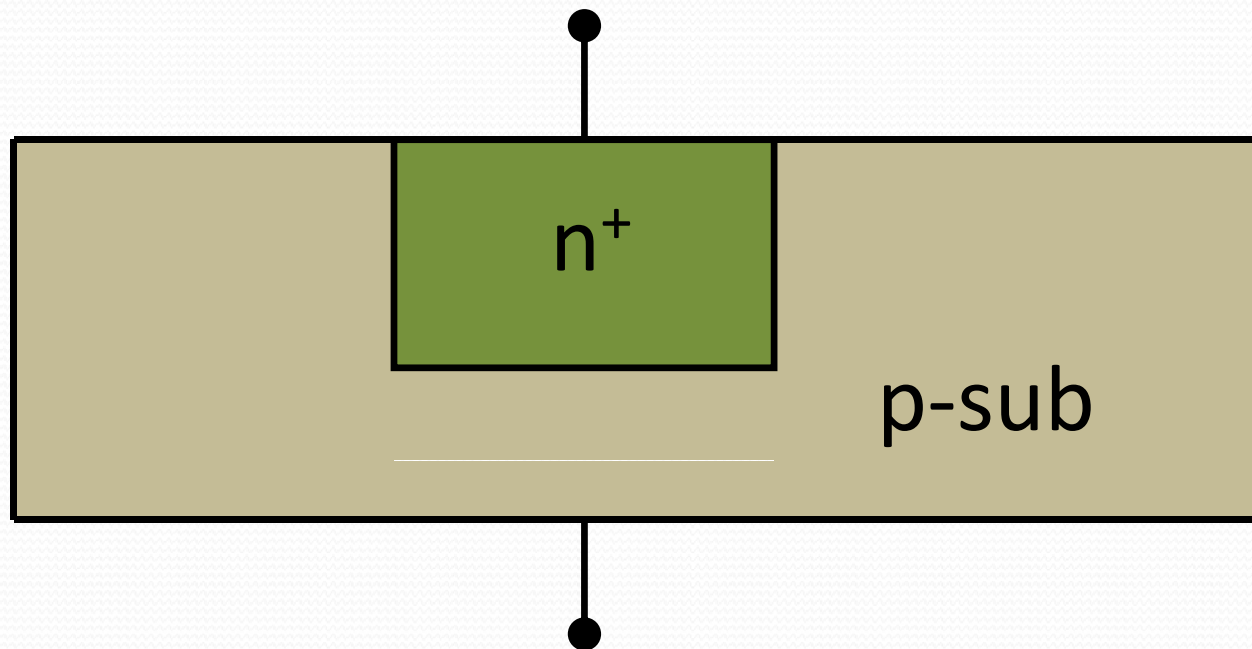
- Ακροδέκτες όπως και στο n-MOS
- Η διαφορά είναι στην τάση ενεργοποίησης
- Το n-MOS ενεργοποιείτε με υψηλή τάση στην πύλη
- Το p-MOS ενεργοποιείτε με χαμηλή τάση στην πύλη
- Με λογικό “1” την υψηλή τάση και λογικό “0” την χαμηλή τάση το n-MOS ενεργοποιείτε με λογικό “1” και το p-MOS με λογικό “0”

P-MOS λειτουργία

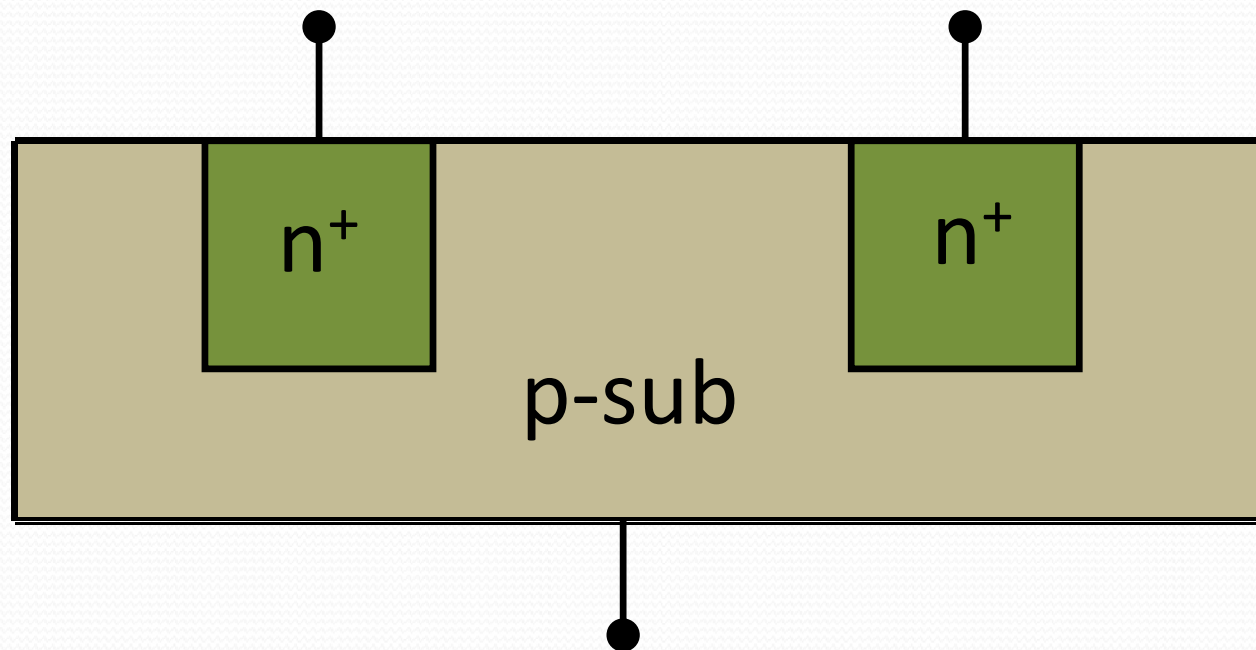


Κατασκευή

- Με χαμηλή τάση στο υπόστρωμα ανάστροφα πολωμένη δίοδος




Εάν η χαμηλότερη τάση βρίσκεται στο υπόστρωμα και οι δύο δίοδοι πολωμένες ανάστροφα

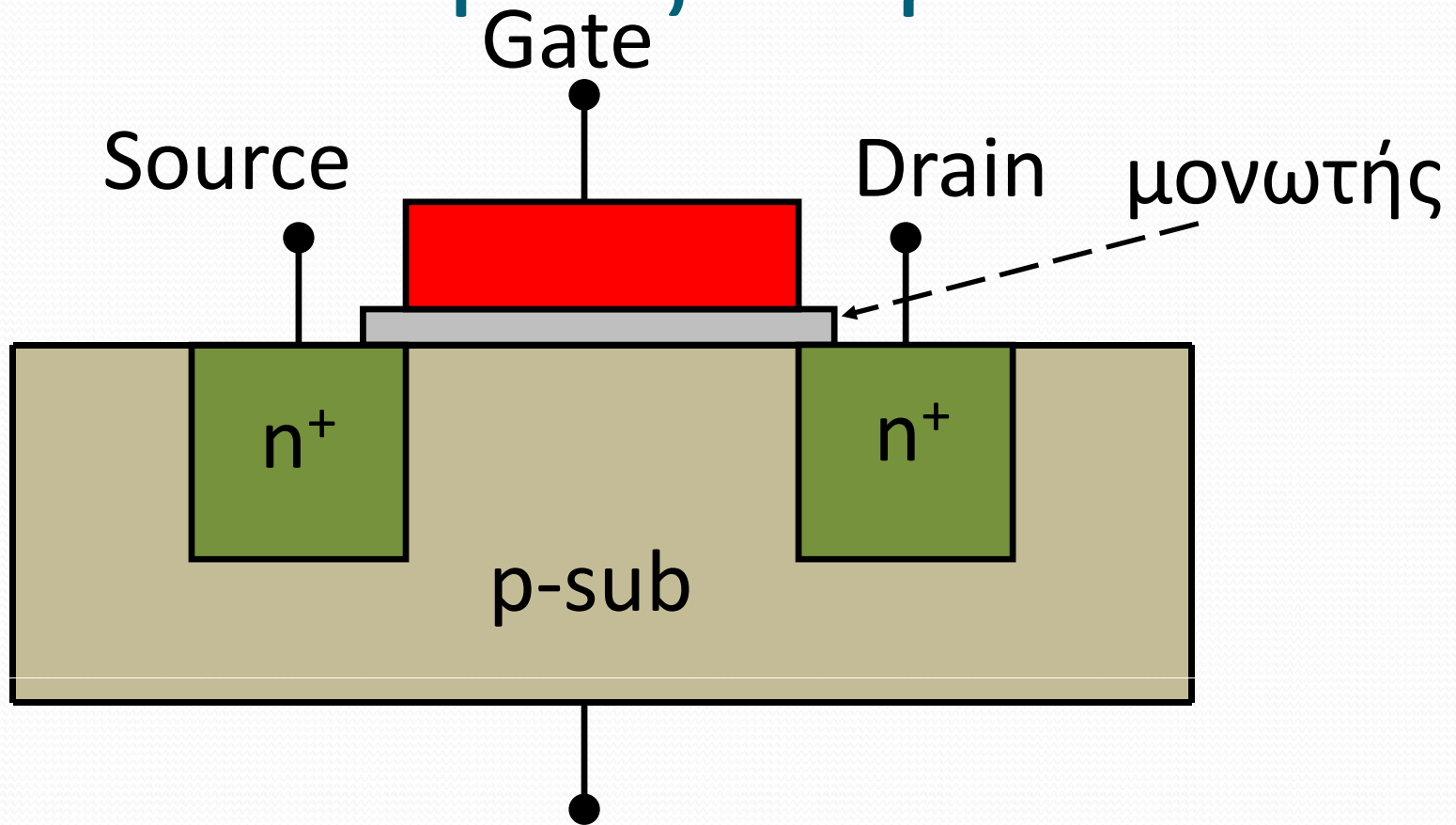


Το κανάλι

- Για να επικοινωνούν οι περιοχές n^+ πρέπει να δημιουργηθεί κανάλι
- Στις περιοχές n^+ οι φορείς είναι ηλεκτρόνια
- Τα ηλεκτρόνια έχουν αρνητικό φορτίο και έλκονται από θετικές τάσεις
- Η θετική τάση (στα n -MOS) τρανζίστορ που χρειάζεται για την δημιουργία καναλιού δίνεται από την πύλη

- 
- Η πύλη απομονώνεται από το υπόλοιπο τρανζίστορ με μονωτή
 - Αρχικά το υλικό της πύλης ήταν μέταλλο, για κατασκευαστικούς λόγους αργότερα επικράτησε το πολύκρυσταλλικό πυρίτιο
 - Ο μονωτής ήταν αρχικά οξείδιο του πυριτίου, σήμερα συχνότερα χρησιμοποιούνται νιτρίδια του πυριτίου
 - Δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ πηγής και καταβόθρας
 - Στο n-MOS ο ακροδέκτης με την υψηλή τάση ονομάζεται καταβόθρα και εκείνος με την χαμηλή πηγή

Το n-MOS Τρανζίστορ



Θετική Τάση

- Τα ηλεκτρόνια θα προέλθουν από περιοχές με ελεύθερα ηλεκτρόνια (Source, Drain)
- Η Πύλη θα πρέπει να έχει δυναμικό υψηλότερο τουλάχιστον από τη πηγή
- Μικρή διαφορά δυναμικού δεν αρκεί για την δημιουργία καναλιού
 - Τα ηλεκτρόνια αρχικά εξουδετερώνονται με τις οπές που προϋπάρχουν στο υπόστρωμα

Τάση κατωφλίου

(Threshold Voltage)

- Η ελάχιστη τάση που απαιτείτε ώστε να εξουδετερωθούν οι οπές του υποστρώματος
 - Για τάσεις μεγαλύτερες από την τάση κατωφλίου υπάρχει κανάλι
 - Για τάσεις μικρότερες από την τάση κατωφλίου δεν υπάρχει κανάλι
- Ορισμός: Τάση Κατωφλίου V_t για ένα n-MOS τρανζίστορ ονομάζεται η τάση που πρέπει να εφαρμοστεί ανάμεσα στη πύλη και την πηγή για να δημιουργηθεί κανάλι. Κάτω από την τάση κατωφλίου το ρεύμα πηγής καταβόθρας I_{ds} είναι πρακτικά 0.

Επίδραση Υπόστρώματος (Body Effect)

- Αρνητικές τάσεις στο υπόστρωμα απωθούν τα ηλεκτρόνια και εμποδίζουν την δημιουργία καναλιού
- Θετικότερες τάσεις διευκολύνουν την δημιουργία καναλιού αλλά
 - Το υπόστρωμα δεν μπορεί να είναι θετικότερο από την πηγή, πρέπει λόγω ανάστροφης πόλωσης πηγή-υπόστρωμα να είναι απομονωμένα

Εξισώσεις n-MOS

- Περιοχή αποκοπής
 - $V_{gs} \leq V_t$
 - $I_{ds} = 0$
 - Δεν υπάρχει κανάλι, δεν υπάρχει ρεύμα

Περιοχή Τριόδου

- $0 \leq V_{ds} \leq V_{gs} - V_t$
- $I_{ds} = \beta [(V_{gs} - V_t)V_{ds} - (V_{ds}^2/2)]$
- Υπάρχει κανάλι, εξαρτάται από τις τάσεις σε πύλη, πηγή και καταβόθρα

Παράμετρος β

- $\beta = (\mu_e \epsilon_{ox} / t_{ox}) \cdot (W/L)$
- Κατασκευαστικοί παράγοντες
 - μ_e ευκινησία ηλεκτρονίων
 - ϵ_{ox} η διηλεκτρική σταθερά του οξειδίου
 - t_{ox} πάχος οξειδίου
- Σχεδιαστικοί παράγοντες
 - Πλάτος W και μήκος L

Περιοχή κόρου

- $0 \leq V_{gs} - V_t \leq V_{ds}$
- $I_{ds} = \beta [(V_{gs} - V_t)^2 / 2]$
- Το κανάλι εξαρτάται μόνο από τις τάσεις στη πηγή και στην πύλη

- Μπορούμε να πάρουμε την έκφραση για την περιοχή κόρου εάν αντικαταστήσουμε με $V_{gs}-V_t$ την V_{ds} στην έκφραση της γραμμικής περιοχής
 - Εξασφαλίζει συνέχεια εξισώσεων
 - Η νέα έκφραση δεν εξαρτάτε από V_{ds}

- Στην πραγματικότητα στην περιοχή κόρου έχουμε αύξηση του ρεύματος με την αύξηση της τάσης στην εκροή.
- Η καλύτερη αυτή προσέγγιση δίνεται από την
- $I_{ds} = \beta[(V_{gs} - V_t)^2 / 2] \cdot (1 + \lambda \cdot V_{ds})$
- Το φαινόμενο οφείλεται στο ότι υψηλότερες τιμές της V_{ds} οδηγούν σε αύξηση της περιοχής απογύμνωσης της εκροής και “μείωση” του μήκους του καναλιού



- Drain Punchthrough

- Με υψηλή τάση στην καταβόθρα βραχυκύκλωμα με πηγή

- Subthreshold Region

- Υπάρχει μικρό ρεύμα, μπορεί να υπολογιστεί με χρήση κατάλληλων μοντέλων

Εξισώσεις p-MOS

- Περιοχή αποκοπής
 - $V_{gs} \geq V_t$
 - $I_{ds} = 0$
 - Δεν υπάρχει κανάλι, δεν υπάρχει ρεύμα

Περιοχή Τριόδου

- $0 \leq V_{ds} \leq V_{gs} - V_t$
- $I_{ds} = \beta [(V_{gs} - V_t)V_{ds} - (V_{ds}^2/2)]$
- Υπάρχει κανάλι, εξαρτάται από τις τάσεις σε πύλη, πηγή και εκροή

Περιοχή κόρου

- $0 \geq V_{gs} - V_t \geq V_{ds}$
- $I_{ds} = \beta [(V_{gs} - V_t)^2 / 2]$
- Το κανάλι εξαρτάται μόνο από τις τάσεις στην πηγή και στην πύλη

Παράμετρος β

- $\beta = (\mu_p / t_{ox}) \cdot (W/L)$
- Κατασκευαστικοί παράγοντες
 - μ_p ευκινησία οπών
 - ϵ_{ox} η διηλεκτρική σταθερά του οξειδίου
 - t_{ox} πάχος οξειδίου
- Σχεδιαστικοί παράγοντες, W, L
- Ευκινησία οπών τυπικά μικρότερη από αυτή των ηλεκτρονίων
 - Εξαρτάται από πυκνότητα φορέων και θερμοκρασία

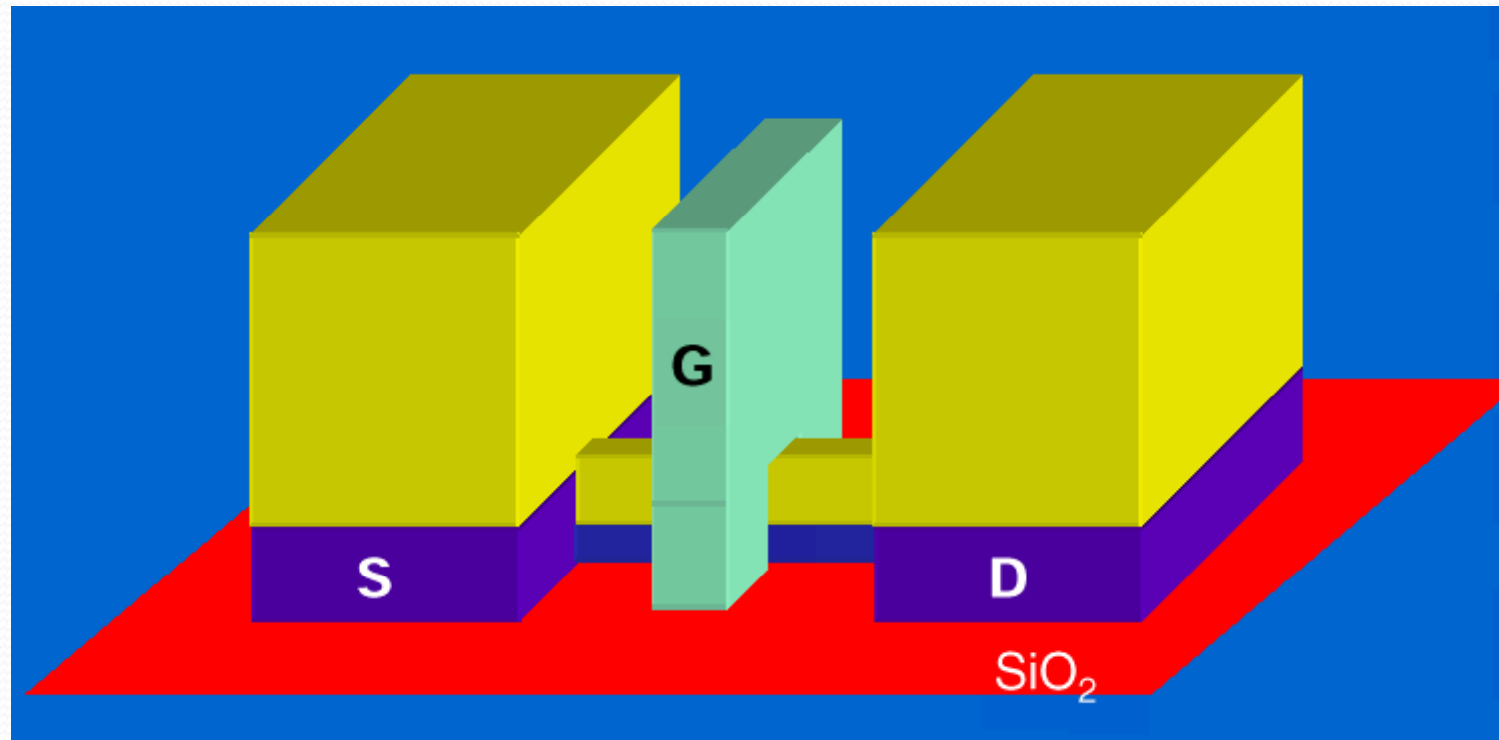
Πάχος Μονωτή

- Για ταχύτερη λειτουργία (ευκολότερη δημιουργία καναλιού) μειώνουμε το πάχος του μονωτή
- Με μειωμένο πάχος η αντοχή του τρανζίστορ σε υψηλό δυναμικό μειώνεται
- Το εύρος των δυναμικών καθορίζεται από τον κατασκευαστή

Στις μοντέρνες τεχνολογίες έχουμε τρανζίστορ με διαφορετικά πάχη οξειδίου

- Λεπτά για χαμηλές τάσεις (στο εσωτερικό του κυκλώματος)
- Παχιά για υψηλές τάσεις (στους ακροδέκτες)
- Σε μοντέρνες τεχνολογίες το διοξείδιο του πυριτίου αντικαθίσταται από νιτρίδια.
 - Για χαμηλές τάσεις το πάχος του οξειδίου θα έπρεπε να είναι υπερβολικά λεπτό με αποτέλεσμα διαρροές λόγω ατελειών και κβαντομηχανικών φαινομένων

Future Perspectives



25 nm FINFET MOS transistor