



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

# Σχεδίαση CMOS Ψηφιακών Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων

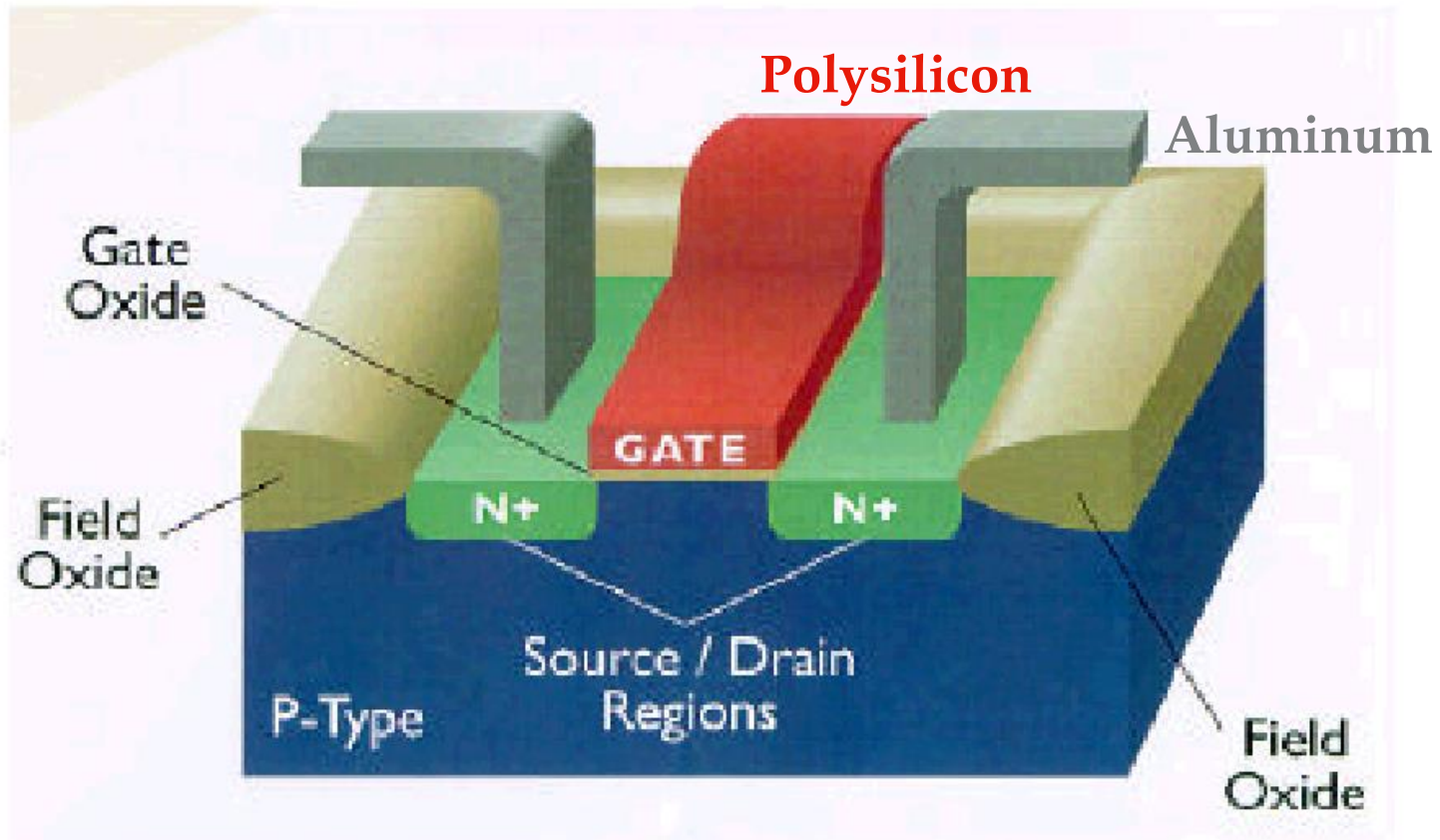
Ενότητα 3: Το τρανζίστορ

Αγγελική Αραπογιάννη

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

# The MOS Transistor

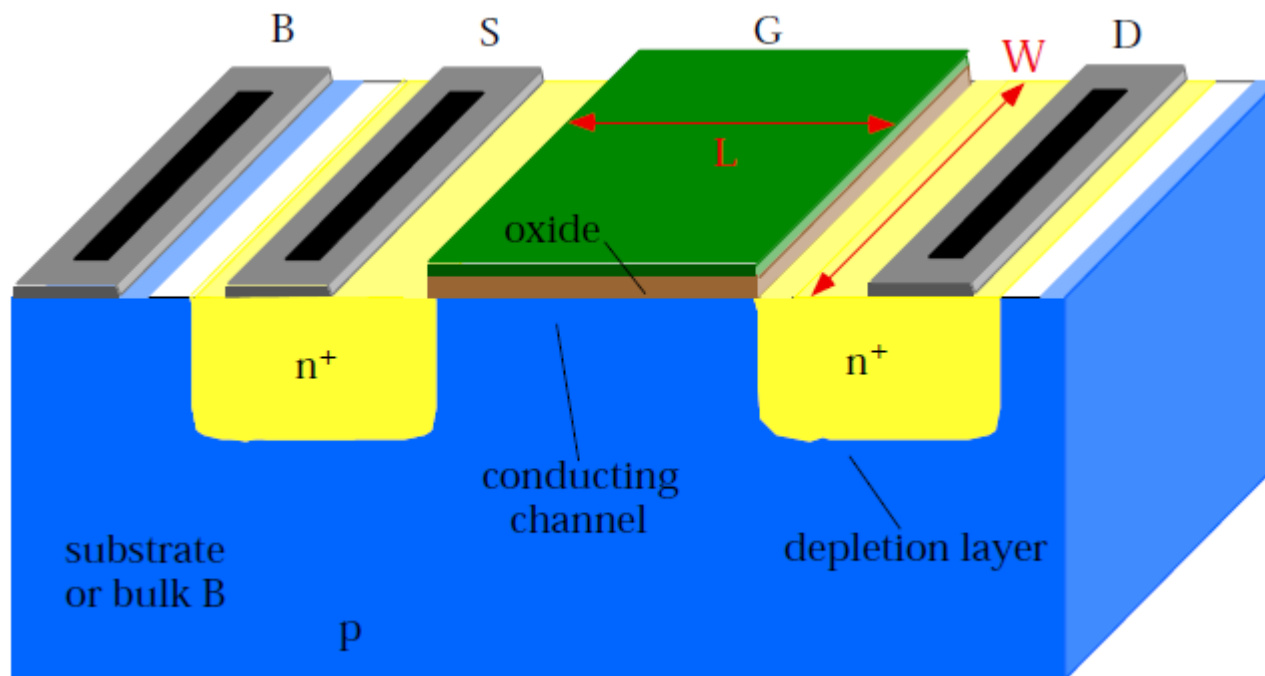


# N-MOS Τρανζίστορ

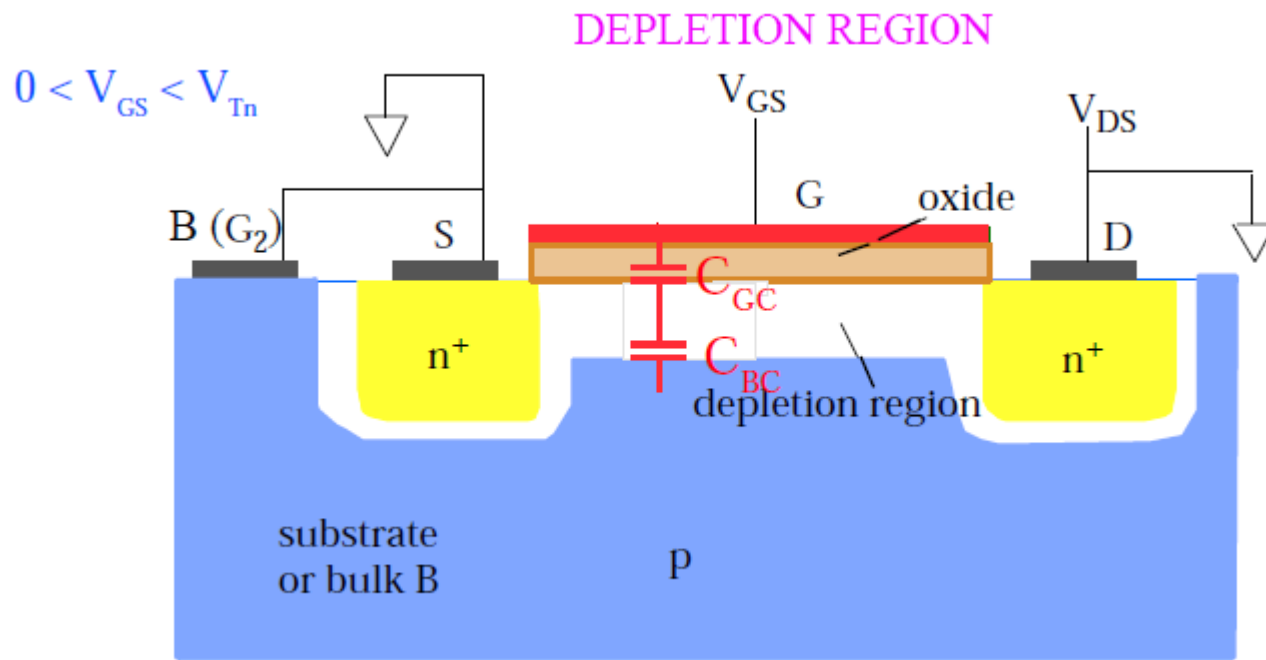
- Διάταξη τριών ακροδεκτών
  - Πηγή (Source)
  - Καταβόθρα (Drain)
  - Πύλη (Gate)
- Κατασκευαστικά η Πηγή και η Καταβόθρα είναι όμοιες
- Συνήθως υπάρχει και τέταρτος ακροδέκτης
  - Υπόστρωμα (Substrate, Body)



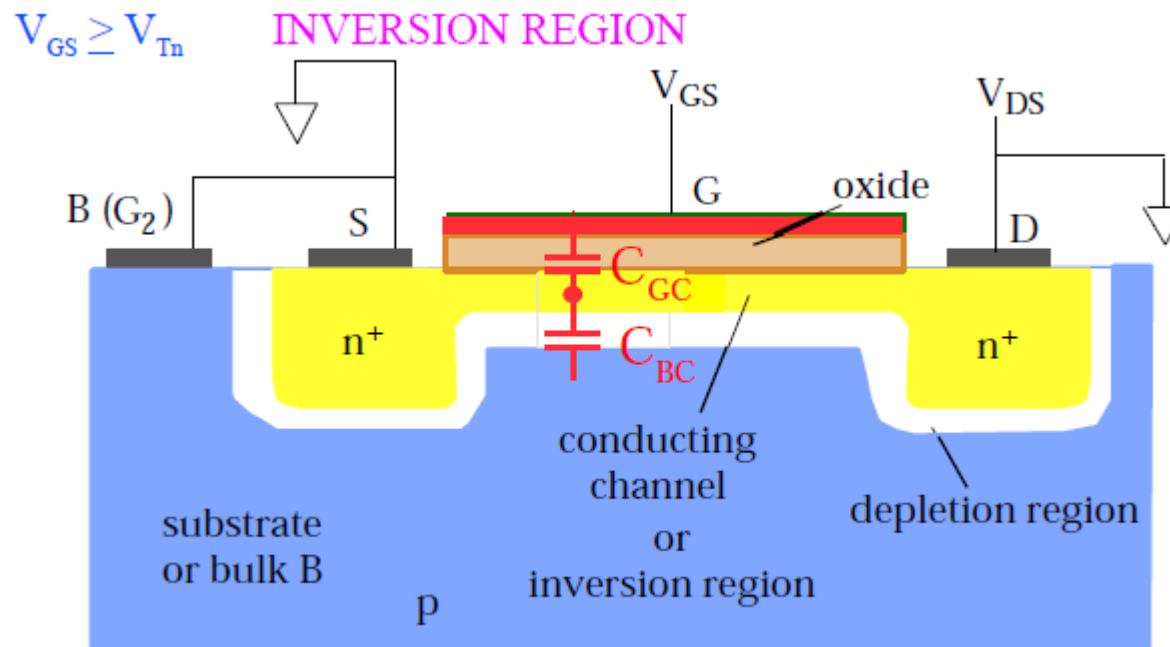
# N-Channel Enhancement-Type MOSFET



# Depletion region

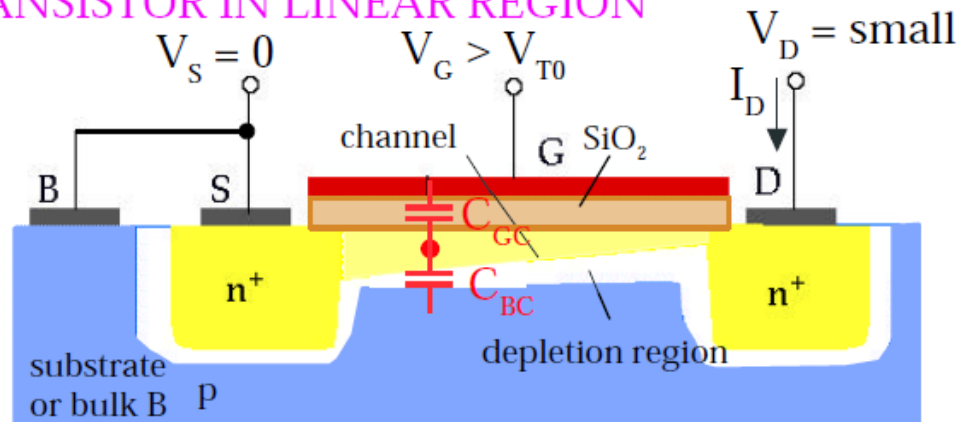


# Inversion Region

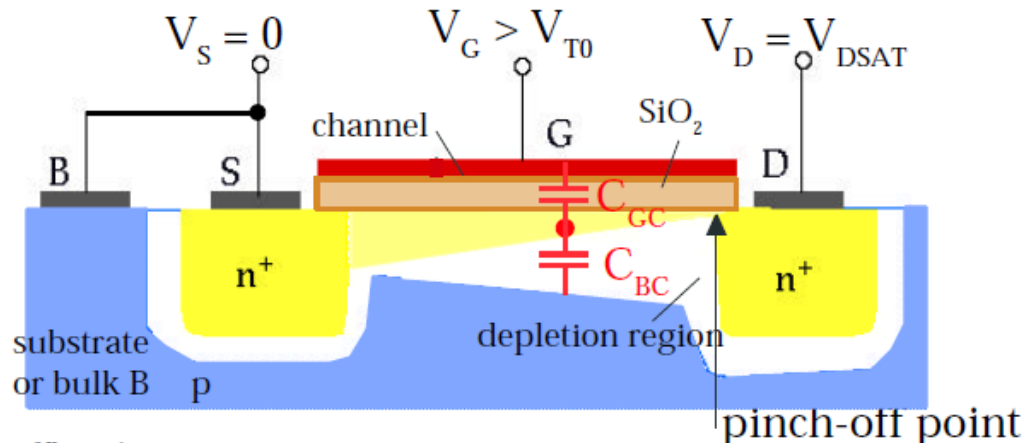


# nMOS Transistor in Linear Region

## nMOS TRANSISTOR IN LINEAR REGION



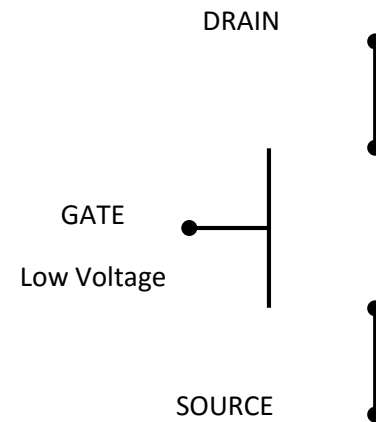
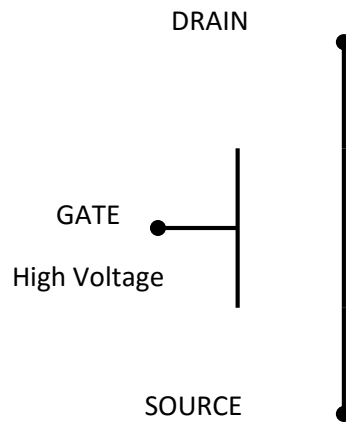
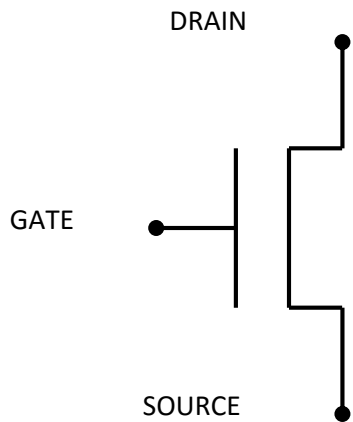
## nMOS TRANSISTOR AT EDGE OF SATURATION REGION







# N-MOS (Λειτουργία)

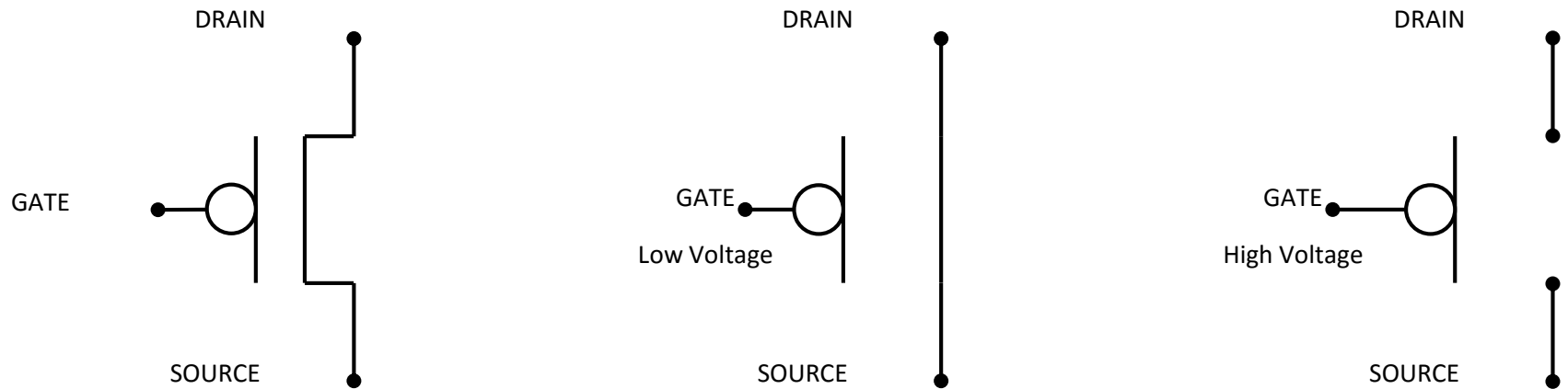


# P-MOS

- 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”

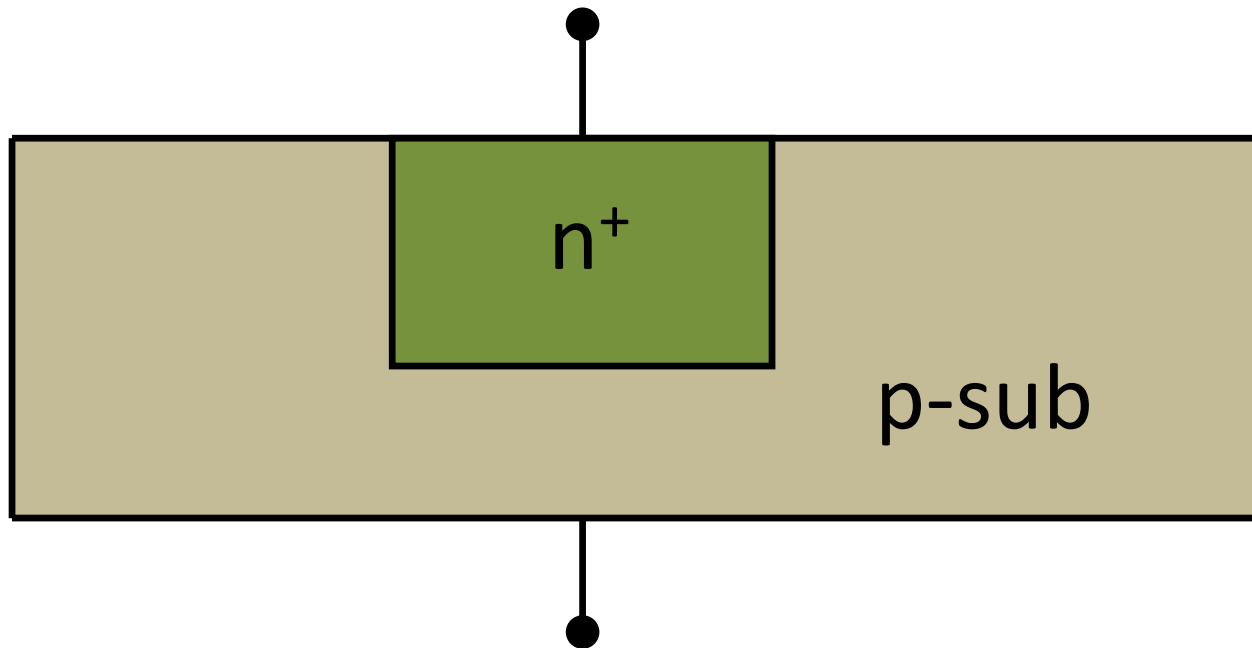


# P-MOS λειτουργία



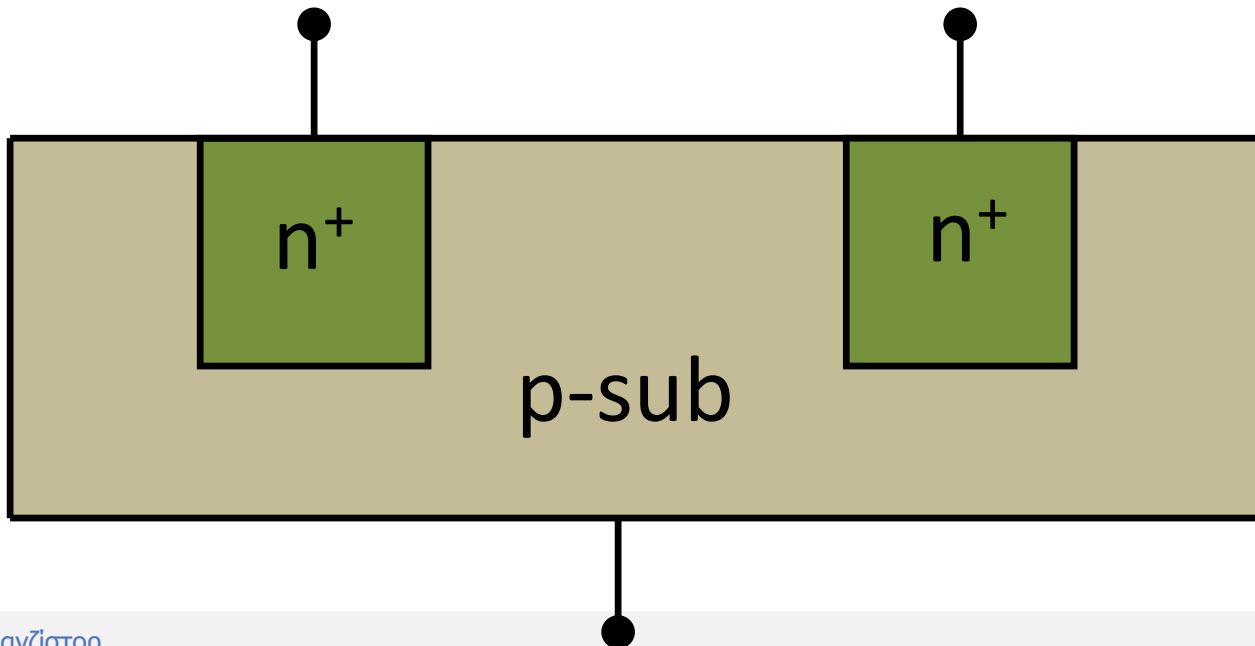
# Κατασκευή (1 από 2)

- Με χαμηλή τάση στο υπόστρωμα ανάστροφα πολωμένη δίοδος



# Κατασκευή (2 από 2)

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



# Το κανάλι (1 από 2)

- 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

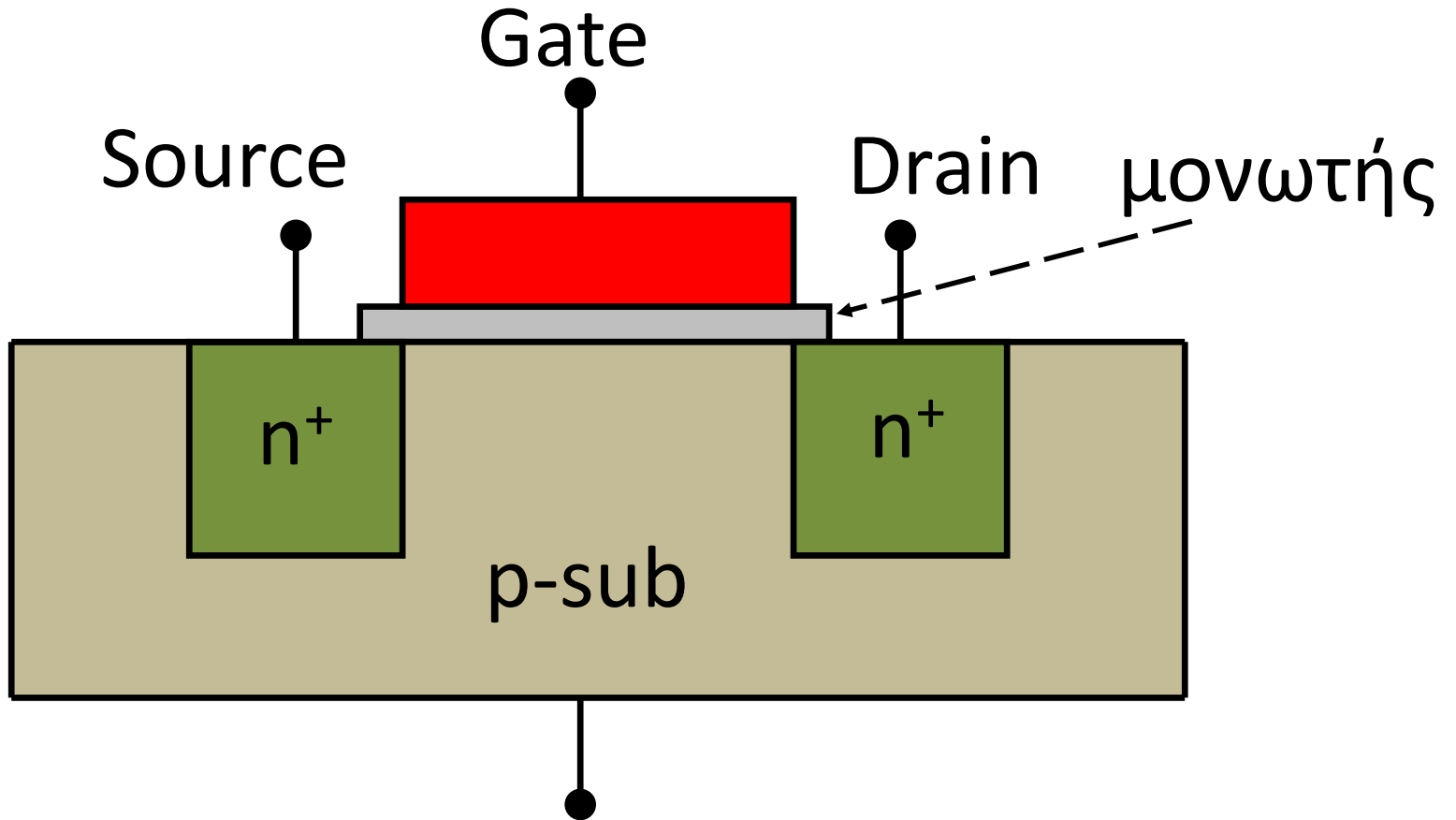


# Το κανάλι (2 από 2)

- 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 $\beta$

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



# Περιοχή κόρου (1 από 3)

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



## Περιοχή κόρου (2 από 3)

- 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  $V_{ds}$





# Περιοχή κόρου (3 από 3)

- 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 and Subthreshold Region

- 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 p-MOS

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



# Περιοχή κόρου p-MOS

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



# Παράμετρος $\beta$ p-MOS

- $\beta = (\mu_p / t_{ox}) \cdot (W/L)$
- Κατασκευαστικοί παράγοντες
  - $\mu_p$  ευκινησία οπών
  - $\epsilon_{ox}$  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 (1 από 2)

- 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



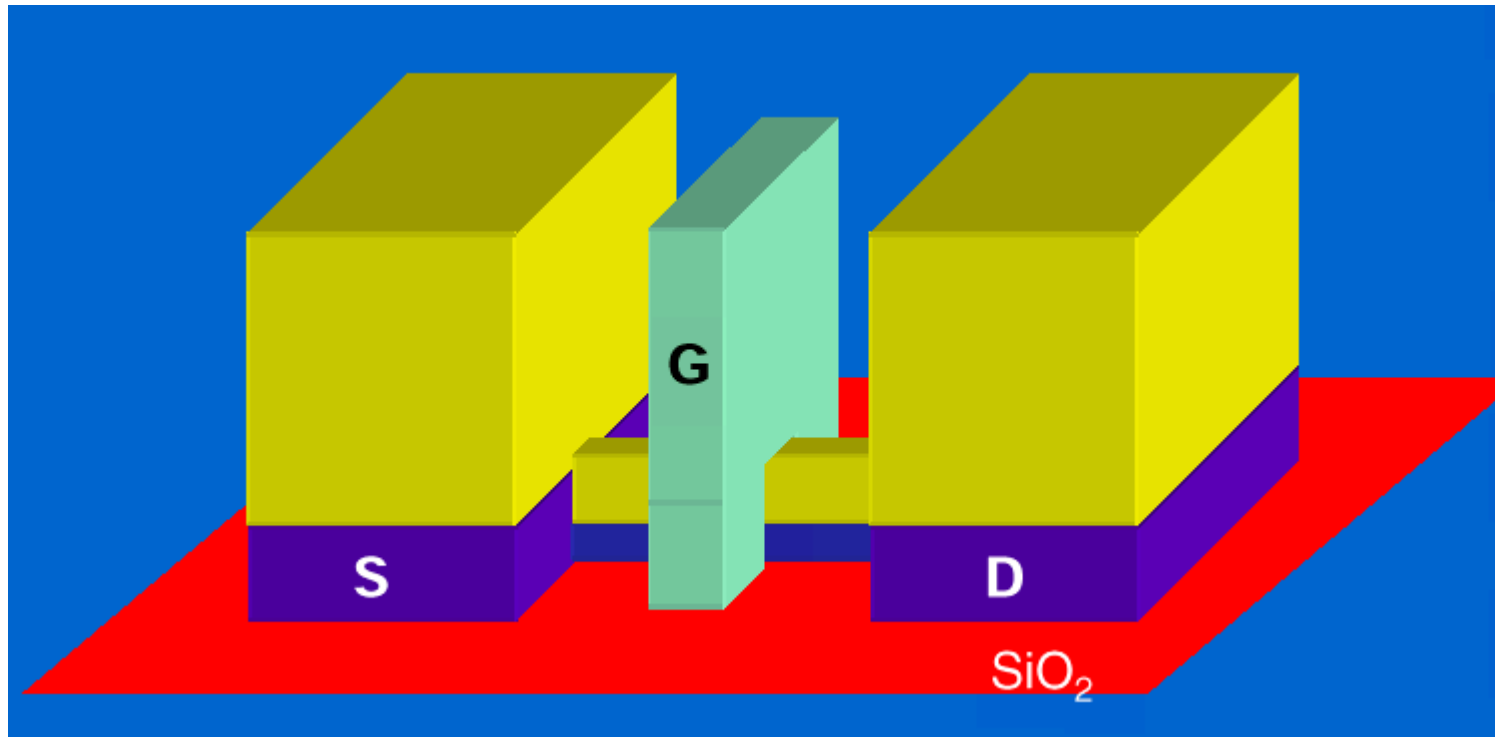
# Πάχος Μονωτή (2 από 2)

- 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



# Τέλος Ενότητας



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την 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.



Σημειώματα

# Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Αραπογιάννη Αγγελική 2015. «Σχεδίαση CMOS Ψηφιακών Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων. Το Τρανζίστορ.». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/DI102/>.



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 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».



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

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

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



# 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.





# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

Οι εικόνες και τα διαγράμματα που χρησιμοποιούνται είναι από το βιβλίο:

Behzad Razavi. 2000. *Design of Analog CMOS Integrated Circuits* (1 ed.). McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA ©2000 .



# 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.



# Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

Οι εικόνες και τα διαγράμματα που χρησιμοποιούνται είναι από το βιβλίο:

Sung-Mo Kang, Yusuf Leblebici. 1996. *CMOS Digital Integrated Circuits* (1 ed.). McGraw-Hill, Inc., New York, NY, USA © 1996.

