

Βασικές αρχές ημιαγωγών και τρανζίστορ MOS

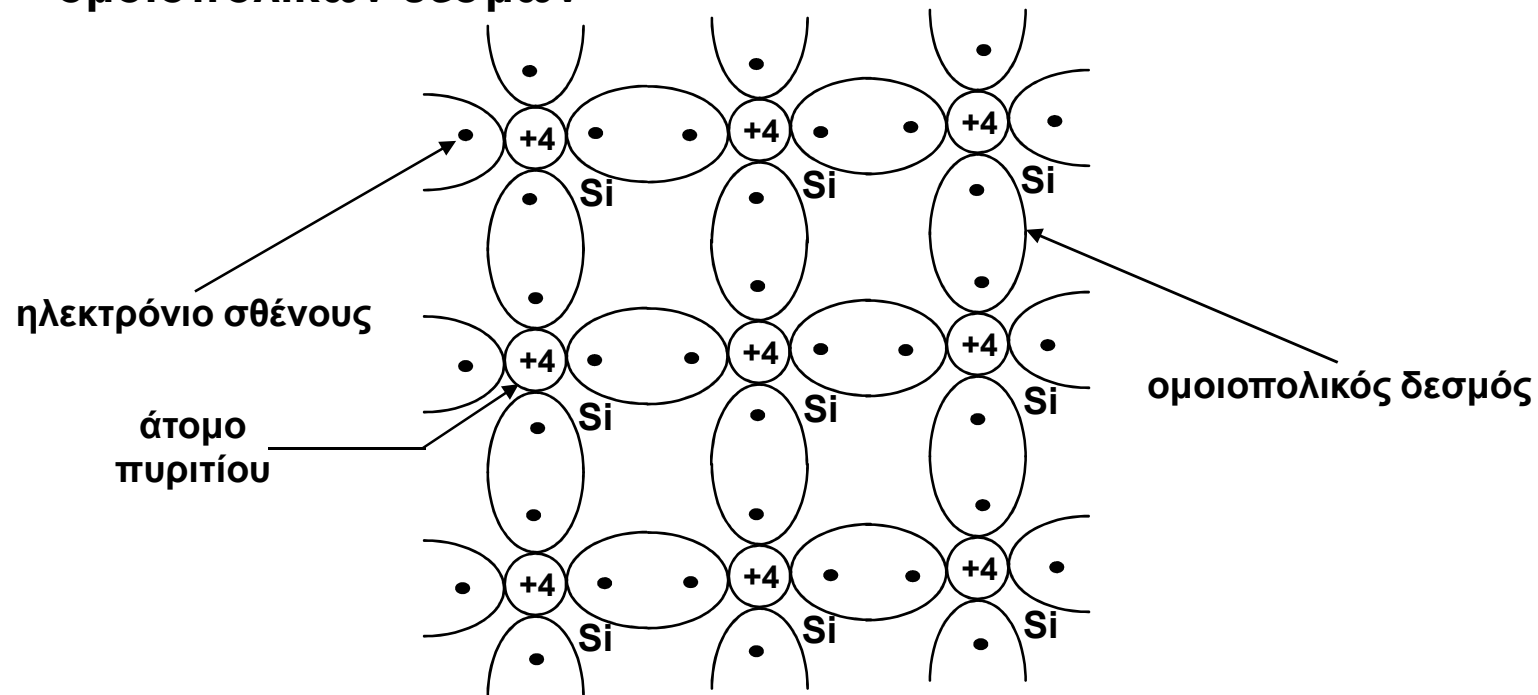
Εισαγωγή στην Ηλεκτρονική

Ημιαγώγιμα υλικά και πυρίτιο

- Η κατασκευή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος γίνεται με βάση ένα υλικό *ημιαγωγού* (semiconductor), το οποίο άγει περισσότερο ή λιγότερο το ηλεκτρικό ρεύμα ανάλογα με τις εκάστοτε εξωτερικές συνθήκες
- Αντίθετα με τους αγωγούς οι οποίοι διαθέτουν μεγάλο αριθμό φορέων του ρεύματος (ελεύθερα ηλεκτρόνια) και τους μονωτές οι οποίοι δεν έχουν καθόλου τέτοιους φορείς, οι ημιαγωγοί διαθέτουν έναν ενδιάμεσο (και *μεταβαλλόμενο*) αριθμό φορέων προς εκδήλωση αγωγιμότητας
- Το κυριότερο ημιαγώγιμο υλικό είναι (και θα είναι για αρκετά ακόμη χρόνια) το *πυρίτιο* (silicon)

Κρύσταλλος πυριτίου

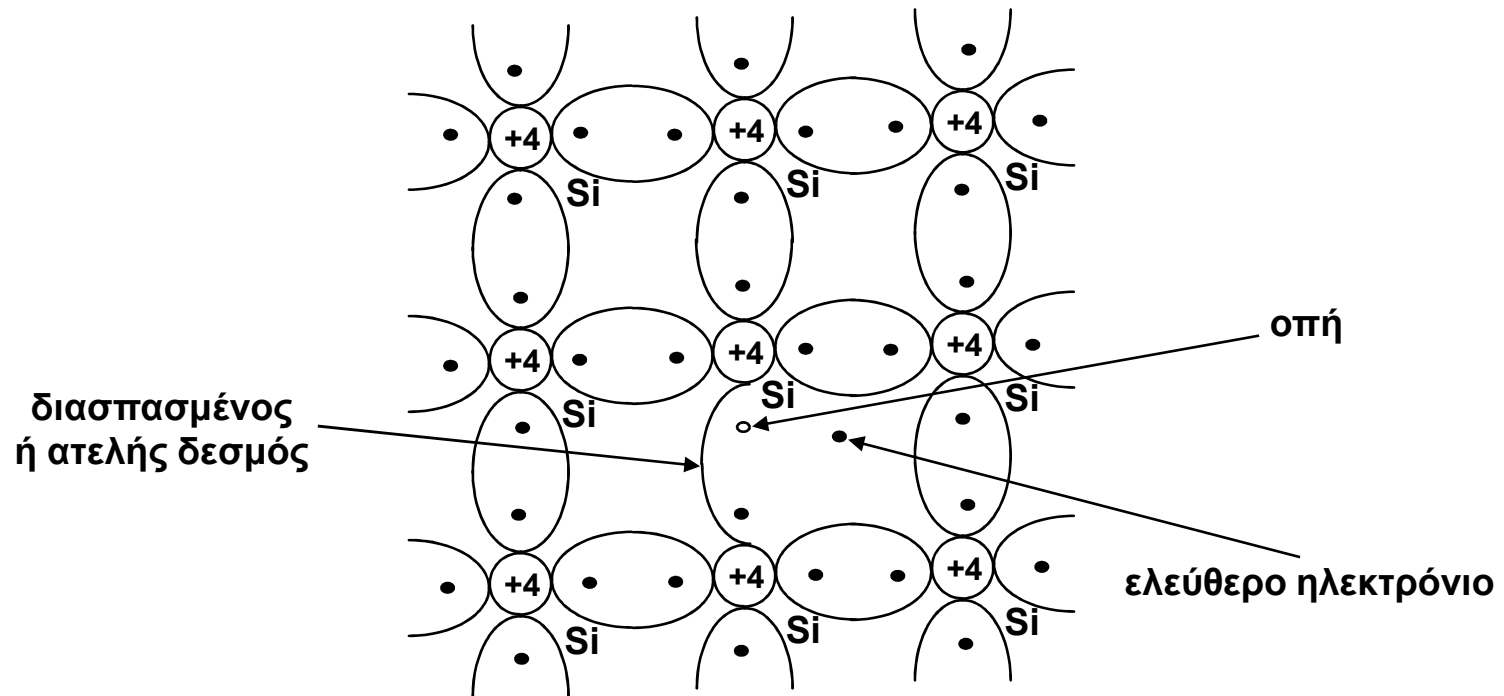
- Κάθε άτομο στον κρύσταλλο του καθαρού πυριτίου έχει 4 ηλεκτρόνια σθένους τα οποία συνδέονται με ισάριθμα ηλεκτρόνια από γειτονικά του άτομα (σε διάταξη πλέγματος) με τη βοήθεια ομοιοπολικών δεσμών



Αγωγιμότητα του πυριτίου

- Σε χαμηλή θερμοκρασία όλοι οι ομοιοπολικοί δεσμοί είναι ανέπαφοι και το υλικό δεν εμφανίζει ηλεκτρική αγωγιμότητα (ελλείπει κατάλληλων φορέων)
- Σε θερμοκρασία δωματίου αρκετοί από τους δεσμούς έχουν διασπαστεί και εμφανίζονται δύο διαφορετικοί φορείς του ρεύματος, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές (ήτοι οι κενές θέσεις ηλεκτρονίων πάνω στους δεσμούς), οι οποίοι συνεισφέρουν ανεξάρτητα στην εκδήλωση αγωγιμότητας
- Η κίνηση μιας οπής (hole) δημιουργείται από την αντίθετη διαδοχική κίνηση πολλών ηλεκτρονίων σθένους - και όχι των ελεύθερων ηλεκτρονίων - πάνω στις πλεγματικές θέσεις των δεσμών του ημιαγωγού, ενώ υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου (δηλαδή ως προς την αγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος) συμπεριφέρεται σαν ένας θετικός φορέας με φορτίο απολύτως ίσο με αυτό του ηλεκτρονίου (+e)
- Σε έναν κρύσταλλο καθαρού πυριτίου οι συγκεντρώσεις των ελεύθερων ηλεκτρονίων και των οπών είναι ανά πάσα στιγμή ίσες μεταξύ τους

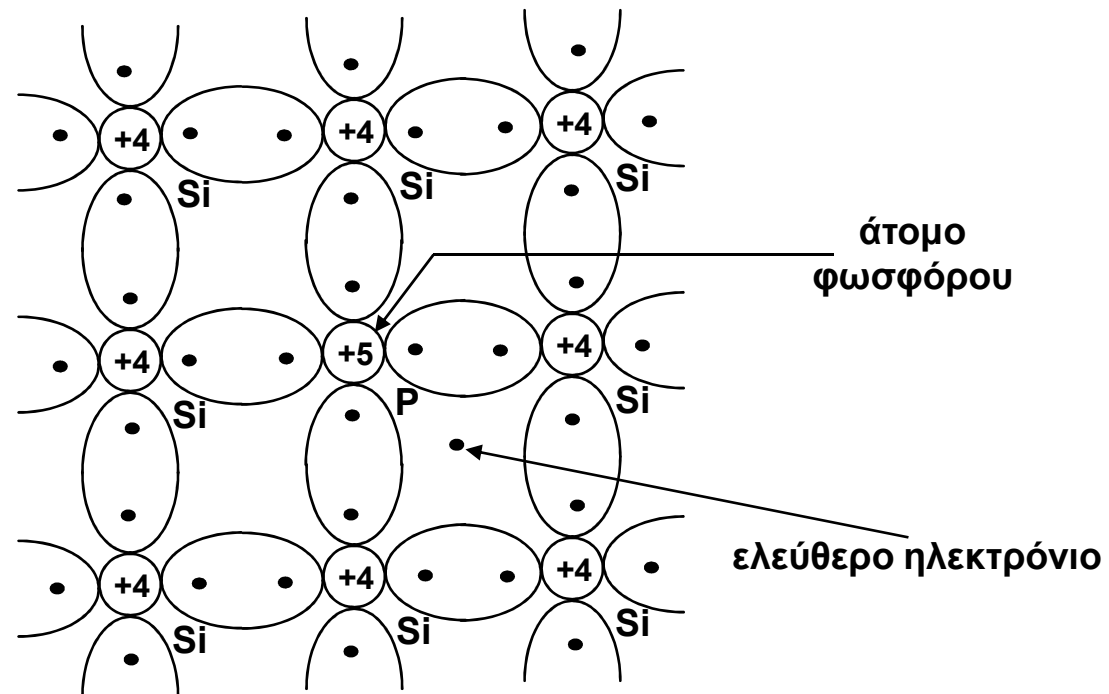
Αγωγιμότητα του πυριτίου



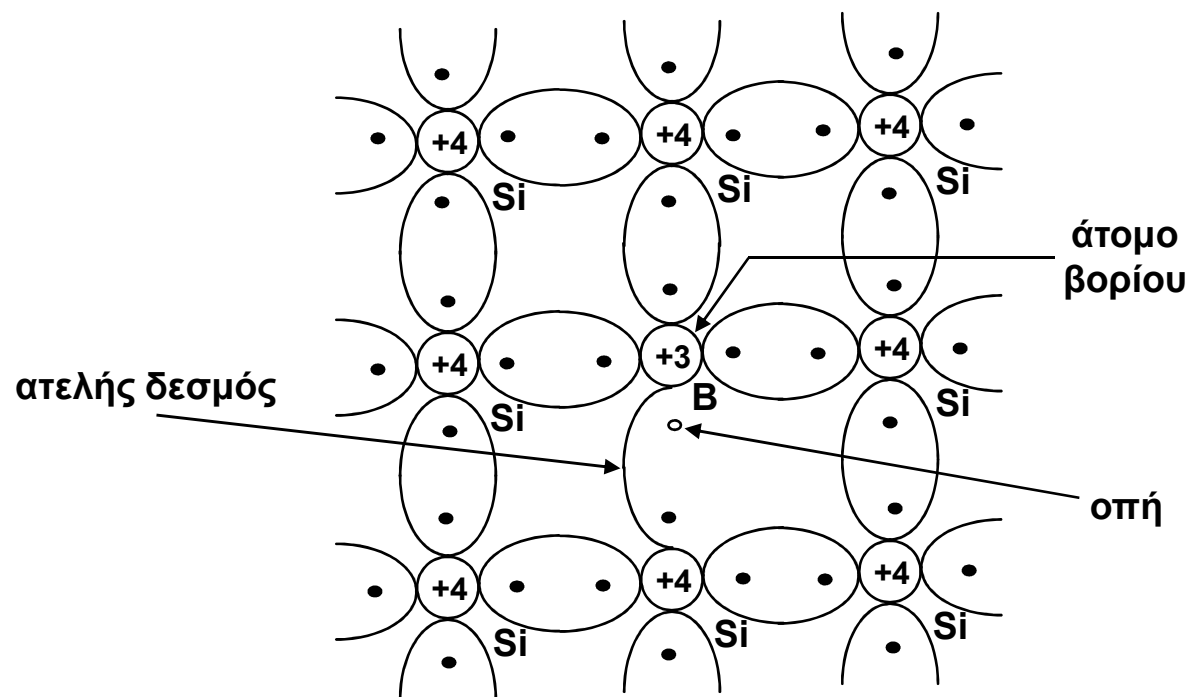
Ημιαγωγοί προσμίξεων

- Η προσθήκη στον κρύσταλλο του καθαρού πυριτίου μιας μικρής ποσότητας κάποιου στοιχείου-δότη (donor) με 5 ηλεκτρόνια σθένους (όπως είναι για παράδειγμα ο φώσφορος) έχει ως αποτέλεσμα την υπέρσχυση της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων έναντι αυτής των οπών και τη μετατροπή του πυριτίου σε ημιαγωγό *τύπου-n*
- Αντίθετα η προσθήκη στον καθαρό κρύσταλλο κάποιου στοιχείου-αποδέκτη (acceptor) με 3 ηλεκτρόνια σθένους (όπως είναι για παράδειγμα το βόριο) έχει ως αποτέλεσμα την υπέρσχυση της συγκέντρωσης των οπών έναντι αυτής των ελεύθερων ηλεκτρονίων και τη μετατροπή του πυριτίου σε ημιαγωγό *τύπου-p*

Ημιαγώγιμο πυρίτιο τύπου-n

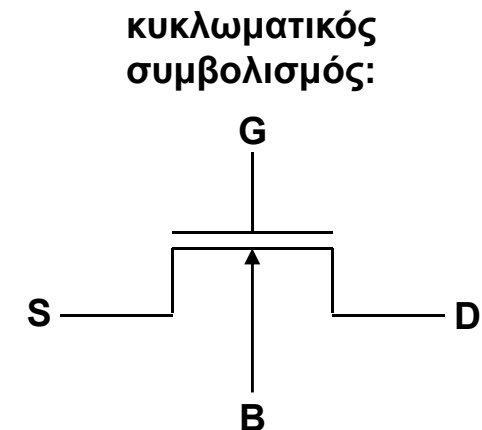
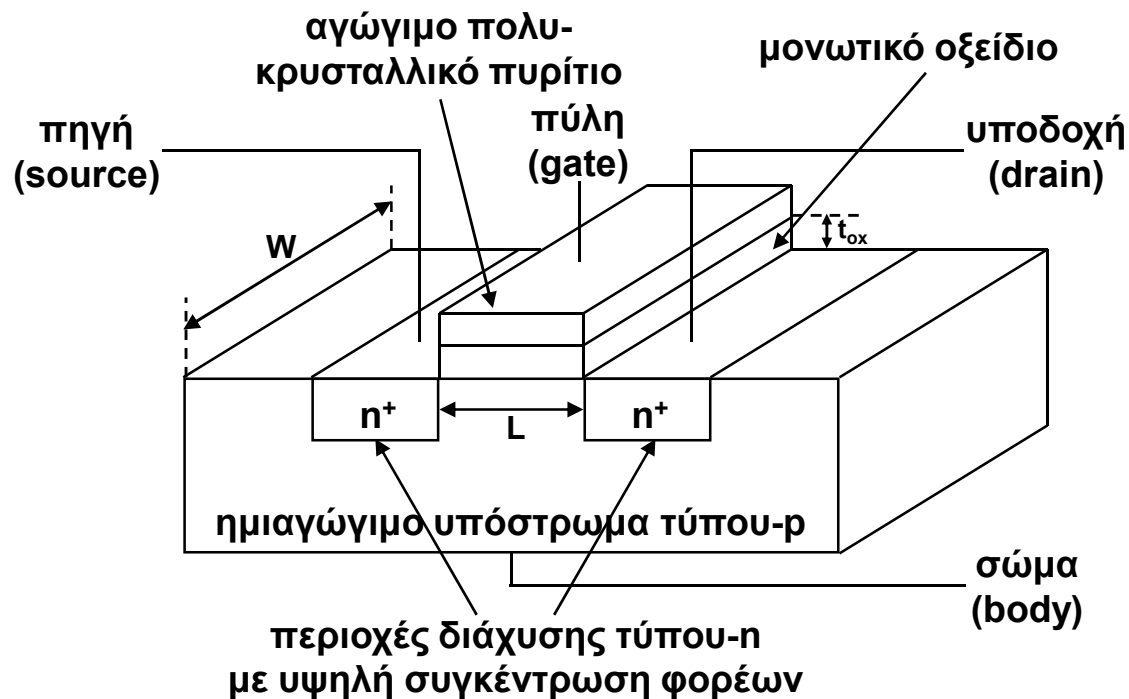


Ημιαγώγιμο πυρίτιο τύπου-p

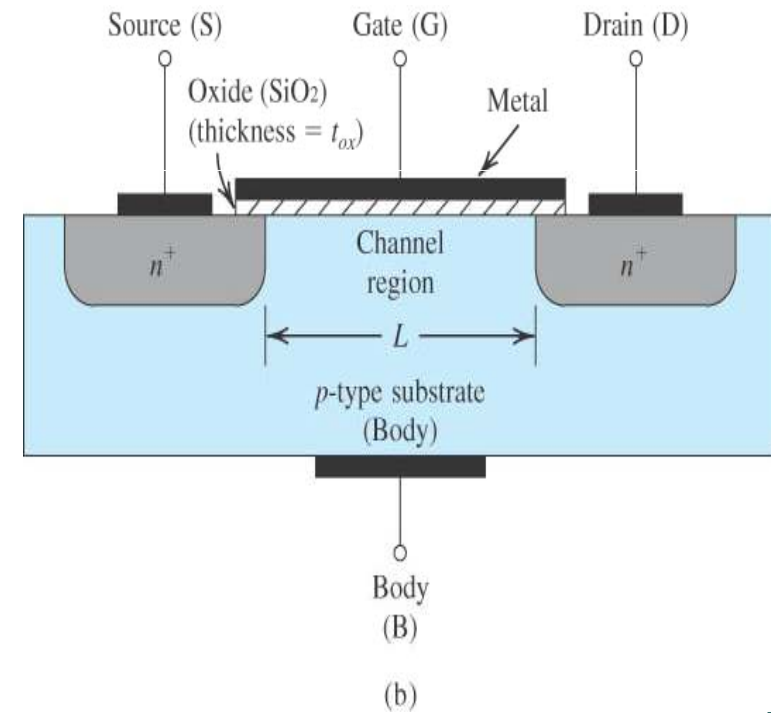
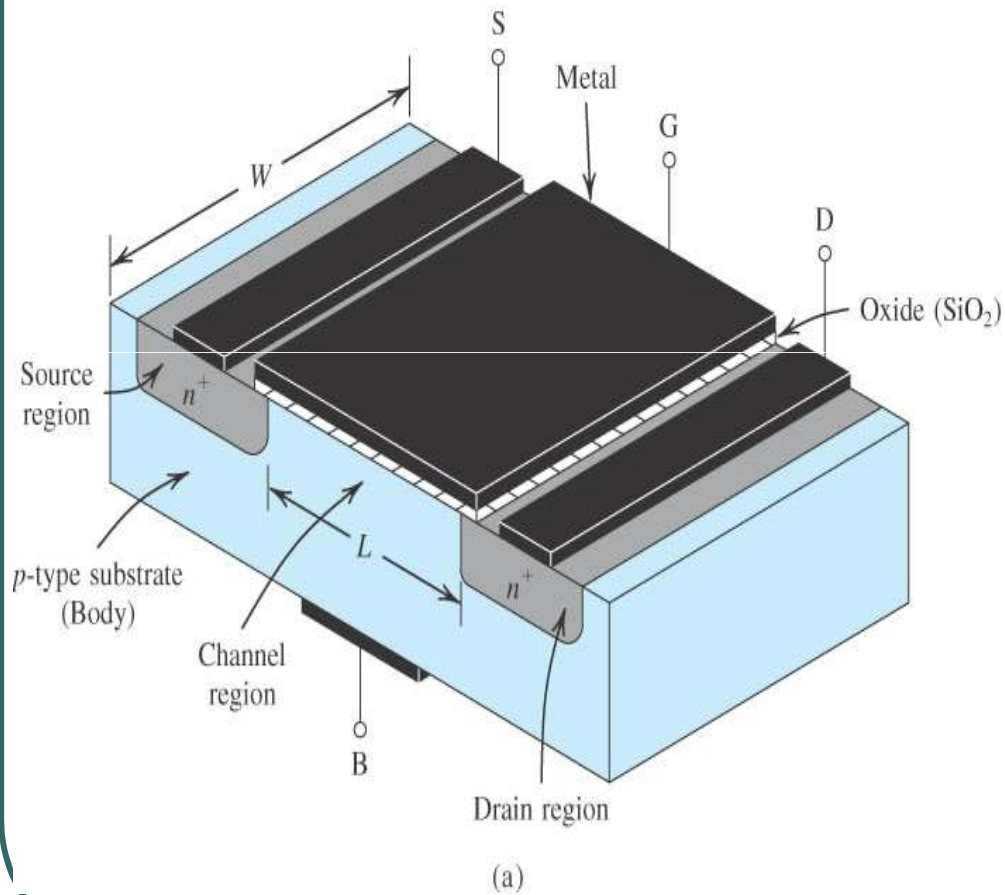


Τρανζίστορ MOS

- Το βασικό δομικό στοιχείο από ημιαγώγιμο υλικό για την υλοποίηση των λογικών πυλών στα ψηφιακά κυκλώματα είναι το *τρανζίστορ MOS* (Metal Oxide Semiconductor)
- Τρανζίστορ MOS τύπου-n (nMOS):

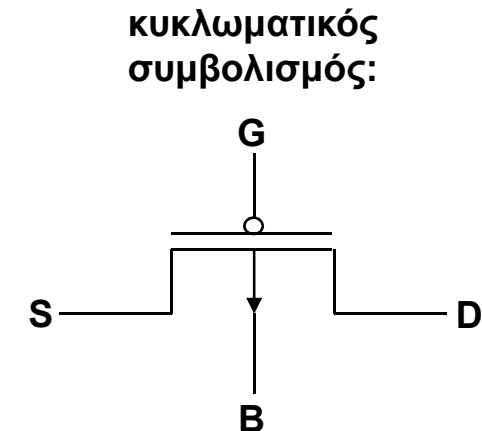
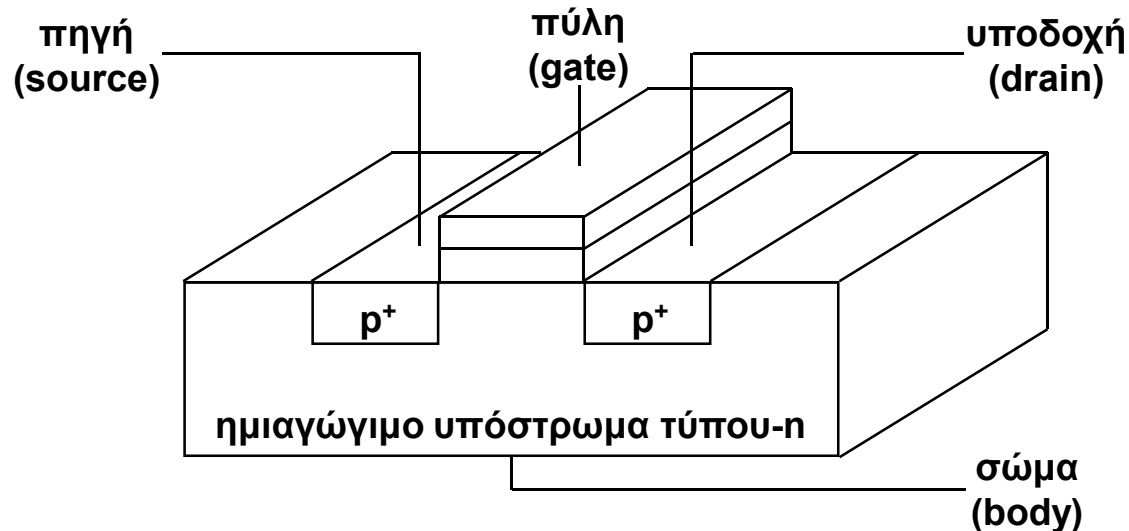


Τρανζίστορ MOS



Τρανζίστορ MOS

- Τρανζίστορ MOS τύπου-p (pMOS):

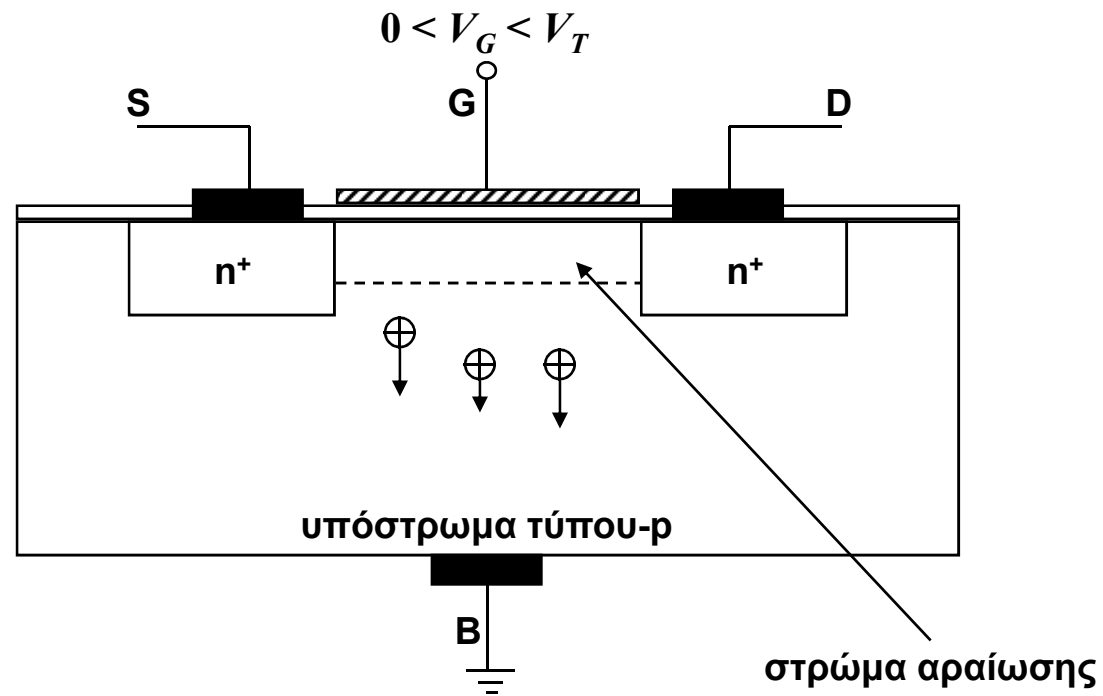


- Όταν απαιτείται ταυτόχρονη κατασκευή τρανζίστορ nMOS και pMOS στο ίδιο υπόβαθρο πυριτίου (τεχνολογία CMOS), συνήθως το τελευταίο κατασκευάζεται μέσα σε ένα *πηγάδι* (well) τύπου-n το οποίο ενσωματώνεται στο γενικό υπόστρωμα τύπου-p

Τρανζίστορ MOS

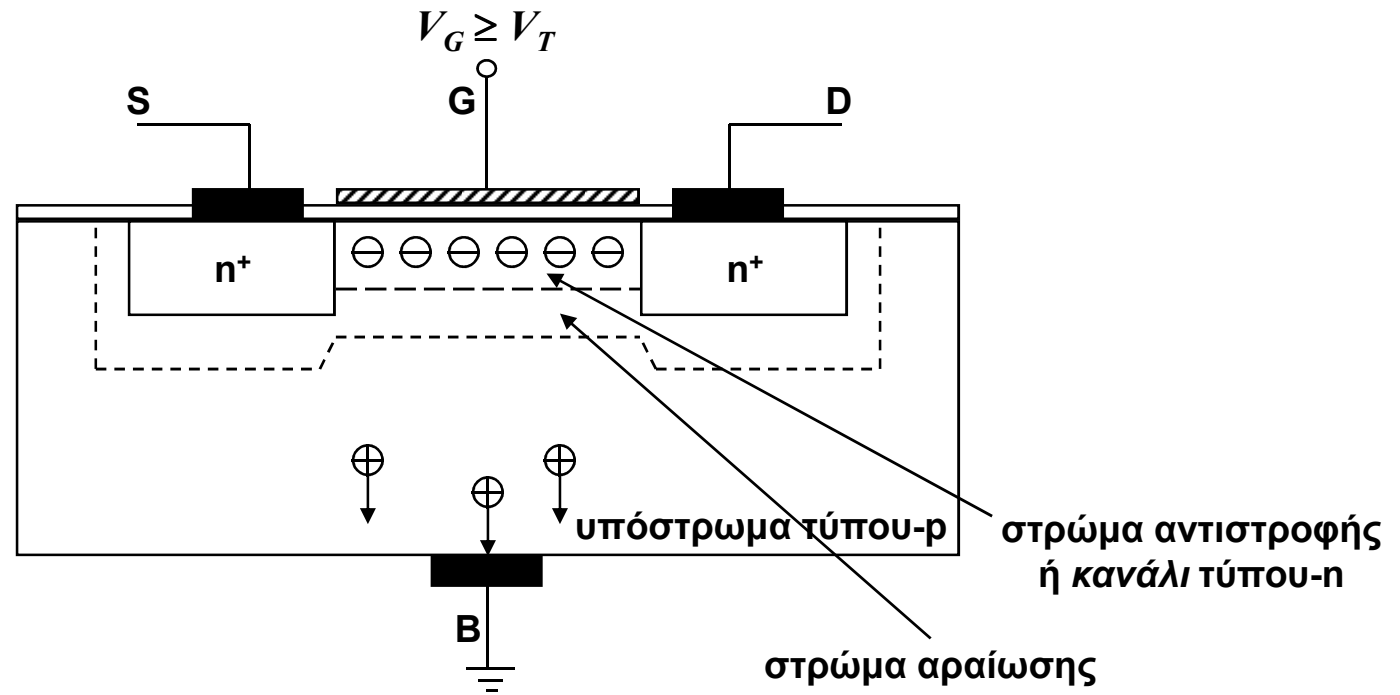
- Στοιχείο τεσσάρων ακροδεκτών (μαζί με τον ακροδέκτη υποστρώματος ή σώματος)
- Η πηγή και η υποδοχή είναι οι ακροδέκτες ροής του ρεύματος (και είναι κατασκευαστικά ισοδύναμες μεταξύ τους καθώς διαχωρίζονται μόνο από την εκάστοτε φορά του ρεύματος) ενώ η πύλη αποτελεί τον ακροδέκτη ελέγχου της ροής αυτής ανάμεσά τους (με την ανάπτυξη ενός κατάλληλου ηλεκτρικού πεδίου)
- Η διάταξη κατασκευάζεται κατόπιν ειδικής χημικής επεξεργασίας διαφόρων σταδίων (με προσθήκες υλικών και μετατροπές επιφανειακών περιοχών) ενός δισκίου (wafer) πυριτίου

Λειτουργία τρανζίστορ MOS



μικρή θετική τάση πύλης \Rightarrow αραίωση (depletion)

Λειτουργία τρανζίστορ MOS



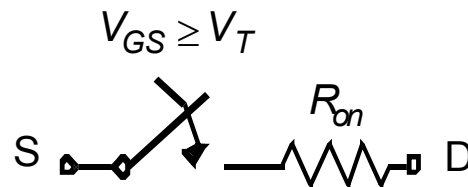
ισχυρή θετική τάση πύλης \Rightarrow αντιστροφή (inversion)

Λειτουργία τρανζίστορ MOS

- Μια επαρκώς μεγάλη θετική (αρνητική για τρανζίστορ pMOS) τάση V_G έχει ως αποτέλεσμα η περιοχή κάτω από την πύλη να αντιστραφεί από τύπου-p σε τύπου-n, και αυτό το στρώμα αντιστροφής (με μεγάλη συγκέντρωση φορέων ηλεκτρονίων) που σχηματίζεται μπορεί να λειτουργήσει ως αγωγίμο μονοπάτι ή κανάλι για τη διέλευση ρεύματος μεταξύ πηγής και υποδοχής
- Η αντιστροφή (και η δημιουργία του αγωγίμου καναλιού) επέρχεται σε μια τάση κατωφλίου V_T η οποία εξαρτάται από τις παραμέτρους της τεχνολογίας (όπως για παράδειγμα την προϋπάρχουσα συγκέντρωση των φορέων μειονότητας των ηλεκτρονίων στην περιοχή του καναλιού) καθώς και τον κυκλωματικό όρο της τάσης V_{SB} μεταξύ πηγής και σώματος
- Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση V_G σε σχέση με τη V_T τόσο βαθύτερο είναι το κανάλι που σχηματίζεται και τόσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητά του στη διέλευση του ρεύματος

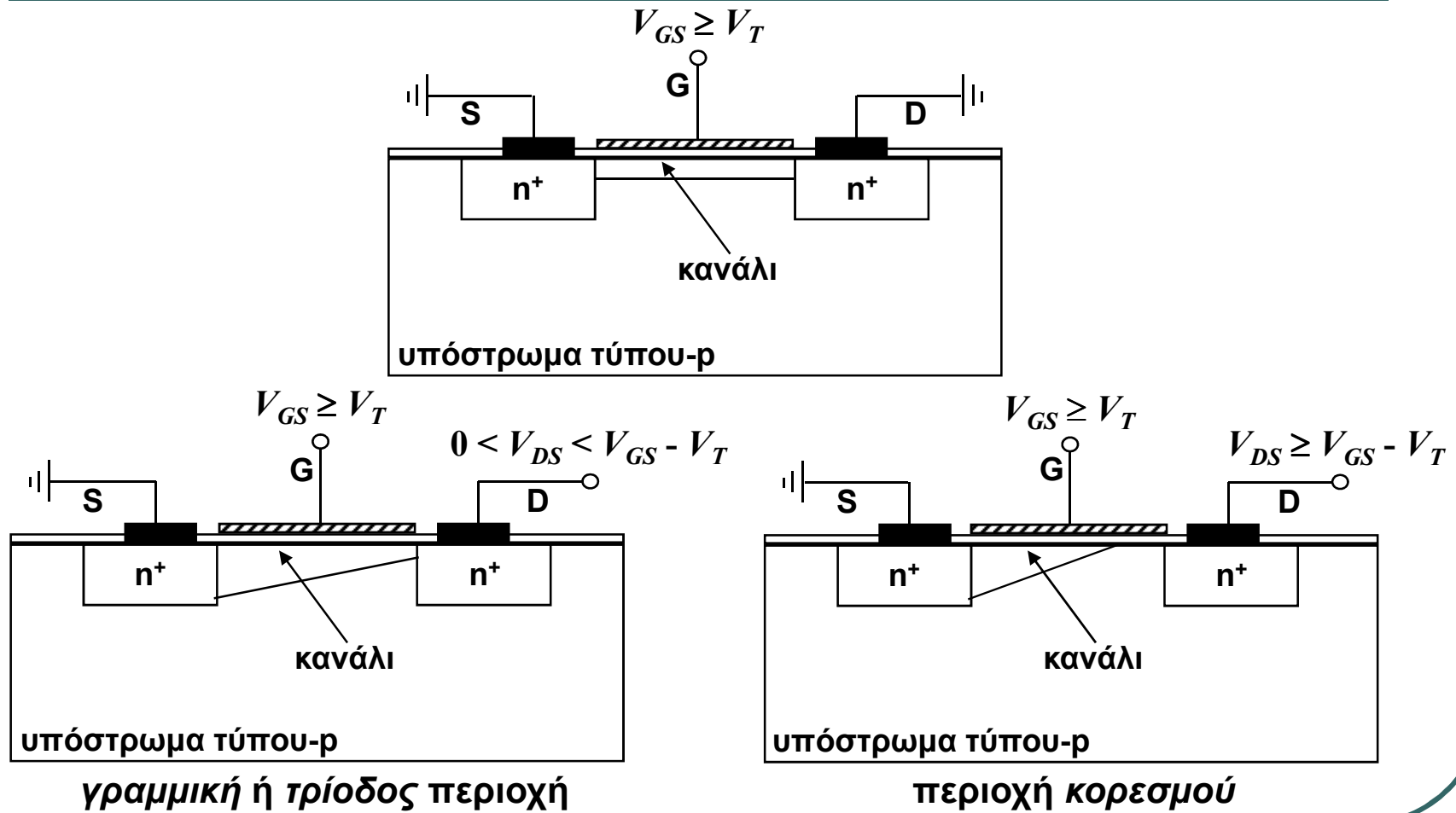
Λειτουργία τρανζίστορ MOS

- Η ροή του ρεύματος μετά τη διάνοιξη του καναλιού πραγματοποιείται με την εφαρμογή μιας θετικής τάσης (διαφορά δυναμικού) $V_{DS} > 0$ από την πηγή προς την υποδοχή, και θα έχει ως αποκλειστικούς φορείς τα ηλεκτρόνια (οπές για pMOS)
- Το τρανζίστορ MOS (κατά την εφαρμογή του στην υλοποίηση ψηφιακών συστημάτων) μπορεί επομένως να θεωρηθεί ως ένας διακόπτης ON/OFF που ελέγχεται από κάποιο ηλεκτρικό σήμα

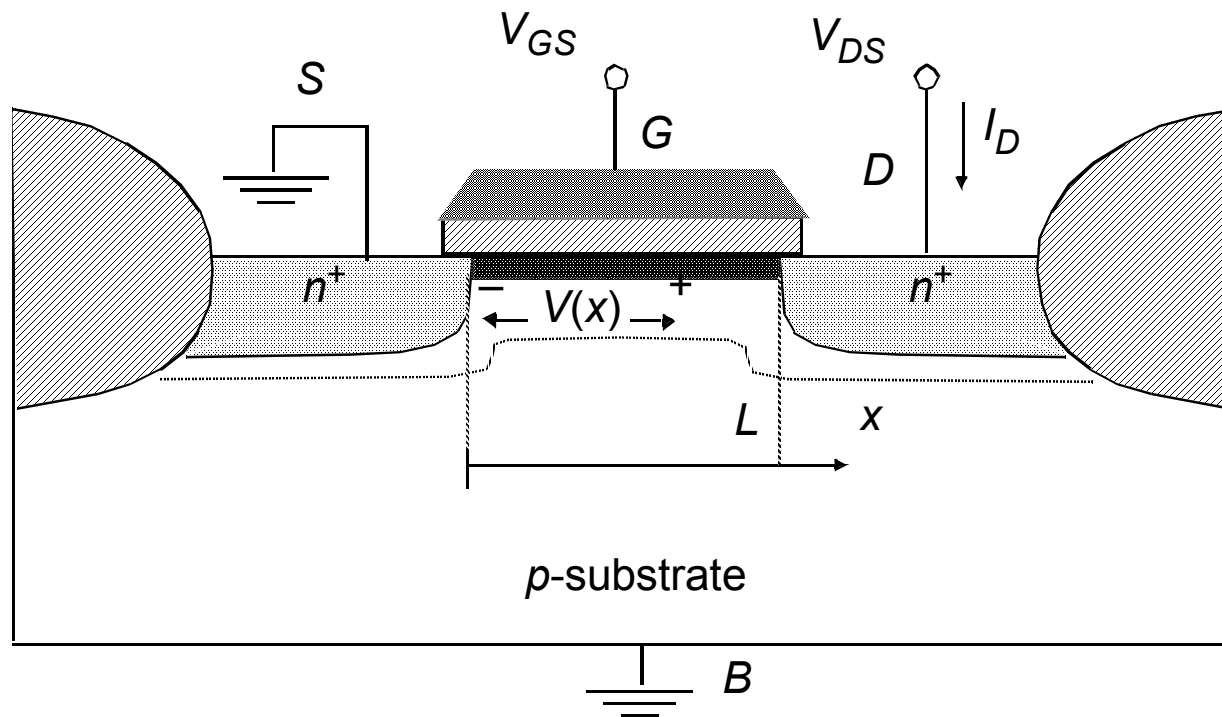


- Η διάταξη του τρανζίστορ pMOS είναι η δυική αυτής του τρανζίστορ nMOS, με την έννοια ότι απαιτούνται οι αντίθετες πολικότητες των τάσεων για όμοια λειτουργία ενώ το ρεύμα γίνεται με αποκλειστικούς φορείς τις οπές

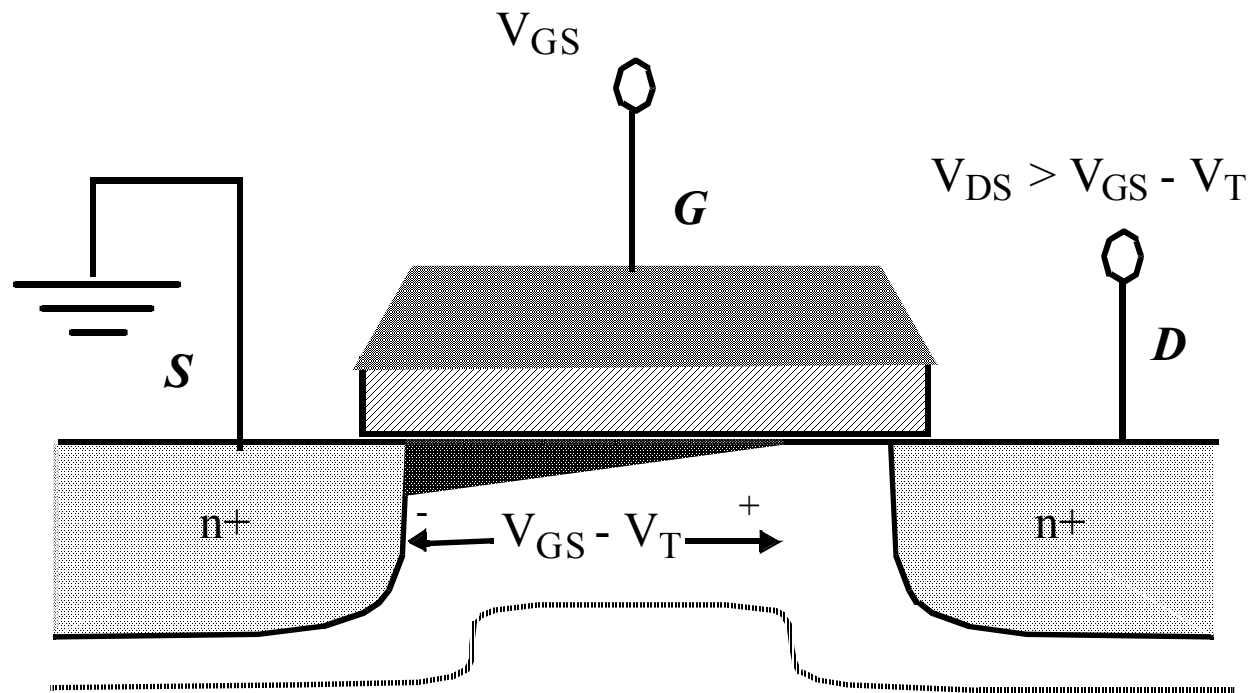
Λειτουργία τρανζίστορ MOS



Λειτουργία τρανζίστορ MOS



Λειτουργία τρανζίστορ MOS



Λειτουργία τρανζίστορ MOS

- Όταν $V_{GS} < V_T$ τότε δεν υπάρχει αγωγίμο κανάλι και το τρανζίστορ λειτουργεί στην περιοχή αποκοπής (cutoff)
- Ανεβάζοντας την V_{GS} πάνω από τη V_T και εφαρμόζοντας μια τάση V_{DS} μέχρι $V_{GS} - V_T$, δηλαδή όταν $V_{GS} \geq V_T$ και $0 < V_{DS} < V_{GS} - V_T$ (τρανζίστορ στη γραμμική - linear ή τρίοδο περιοχή), τότε το σχηματιζόμενο κανάλι εκτείνεται μέχρι την υποδοχή και το ρεύμα είναι περίπου ανάλογο με την τάση V_{DS} , με αγωγιμότητα η οποία εξαρτάται από το βάθος του καναλιού (δηλαδή το κανάλι δρα σαν μια αντίσταση ελεγχόμενη από τάση)
- Η εφαρμοζόμενη τάση V_{DS} εμφανίζεται ως πτώση τάσης κατά μήκος του καναλιού και δίνει μια κλίση με μικρότερο βάθος στην περιοχή της υποδοχής, το οποίο θα μειώνεται ολοένα και περισσότερο με κάθε επιπλέον αύξηση της V_{DS}

Λειτουργία τρανζίστορ MOS

- Εάν η V_{DS} ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή $V_{GS} - V_T \equiv V_{OV}$ (overdrive voltage), δηλαδή όταν $V_{GS} \geq V_T$ και $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ (τρανζίστορ στην περιοχή κορεσμού - saturation), το κανάλι δεν φτάνει στην υποδοχή (αλλά τα ηλεκτρόνια-φορείς επιταχύνονται προς αυτήν διαμέσου της περιοχής αραίωσης λόγω της V_{DS}) και το ρεύμα λαμβάνει μια μέγιστη (κορεσμένη) τιμή η οποία αντιστοιχεί στην τάση $V_{GS} - V_T$ και είναι πρακτικά σταθερή και ανεξάρτητη της V_{DS}
- Ο ακροδέκτης σώματος συνδέεται πάντοτε στη γείωση (στην τάση τροφοδοσίας V_{DD} για τρανζίστορ pMOS) έτσι ώστε οι δίοδοι p-n της πηγής και της υποδοχής να είναι ανάστροφα πολωμένες και να μην υπάρχει ροή ρεύματος προς το υπόστρωμα

Βασικές εξισώσεις τρανζίστορ nMOS

- Περιοχή αποκοπής:

$$I_D = 0$$

$$V_{GS} < V_T$$

- Γραμμική ή τριόδος περιοχή:

$$I_D = \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} \left((V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right)$$

$$V_{GS} \geq V_T$$
$$0 < V_{DS} < V_{GS} - V_T$$

- Περιοχή κορεσμού (κόρου):

$$I_D = \frac{1}{2} \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$V_{GS} \geq V_T$$
$$V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$$

$$\text{όπου: } k_n = k'_n \left(\frac{W}{L} \right) = \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L}$$

Βασικές εξισώσεις τρανζίστορ pMOS

- Περιοχή αποκοπής:

$$I_D = 0$$

$$V_{GS} > V_T$$

- Γραμμική ή τριόδος περιοχή:

$$I_D = \frac{\mu_p \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} \left((V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right)$$

$$\begin{aligned} V_{GS} &\leq V_T \\ 0 > V_{DS} &> V_{GS} - V_T \end{aligned}$$

- Περιοχή κορεσμού (κόρου):

$$I_D = \frac{1}{2} \frac{\mu_p \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$\begin{aligned} V_{GS} &\leq V_T \\ V_{DS} &\leq V_{GS} - V_T \end{aligned}$$

$$\text{όπου: } k_p = k'_p \left(\frac{W}{L} \right) = \frac{\mu_p \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L}$$

Εναλλακτικές εξισώσεις τρανζίστορ pMOS

- Περιοχή αποκοπής:

$$I_D = 0$$

$$V_{SG} < |V_T|$$

- Γραμμική ή τρίοδος περιοχή:

$$I_D = \frac{\mu_p \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} \left((V_{SG} - |V_T|) V_{SD} - \frac{V_{SD}^2}{2} \right)$$

$$\begin{aligned} V_{SG} &\geq |V_T| \\ 0 < V_{SD} &< V_{SG} - |V_T| \end{aligned}$$

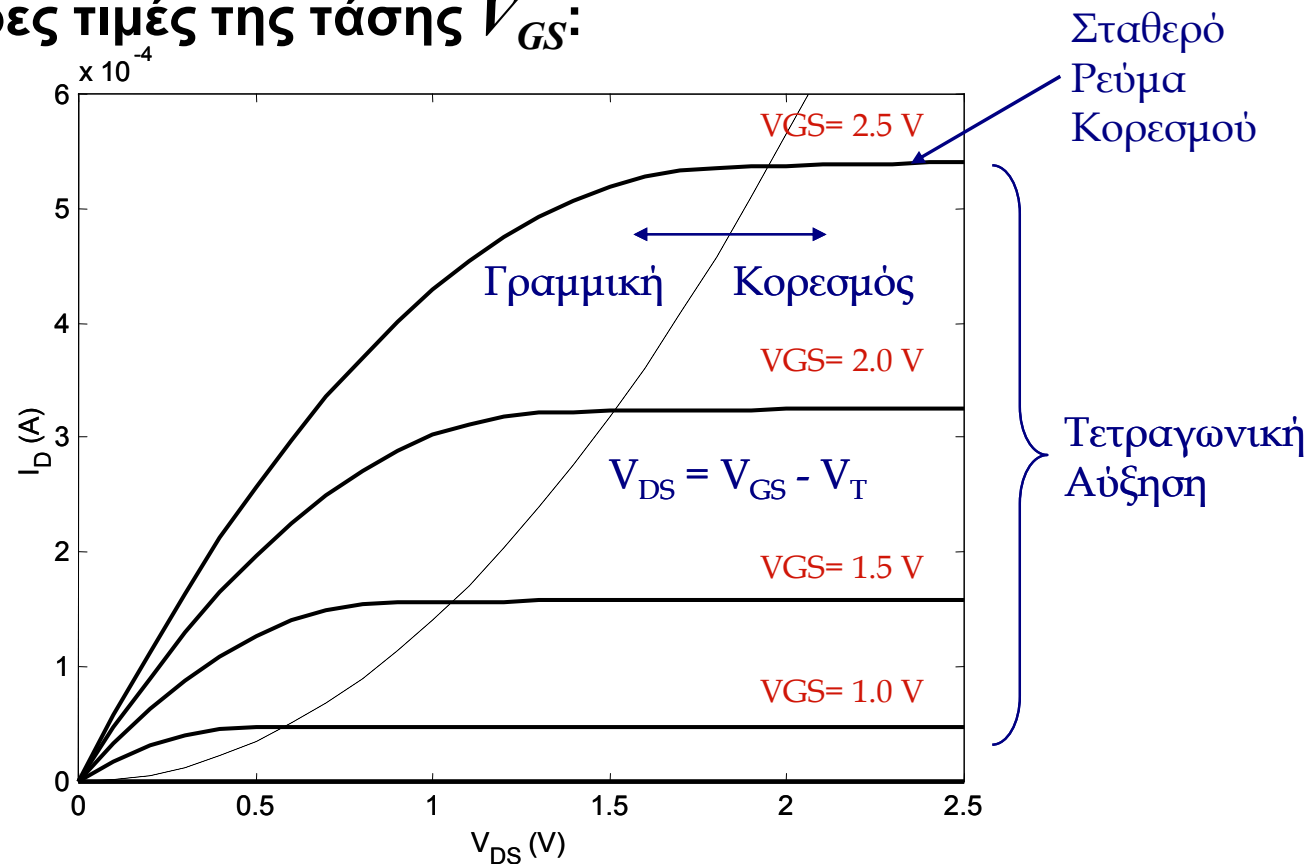
- Περιοχή κορεσμού (κόρου):

$$I_D = \frac{1}{2} \frac{\mu_p \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} (V_{SG} - |V_T|)^2$$

$$\begin{aligned} V_{SG} &\geq |V_T| \\ V_{SD} &\geq V_{SG} - |V_T| \end{aligned}$$

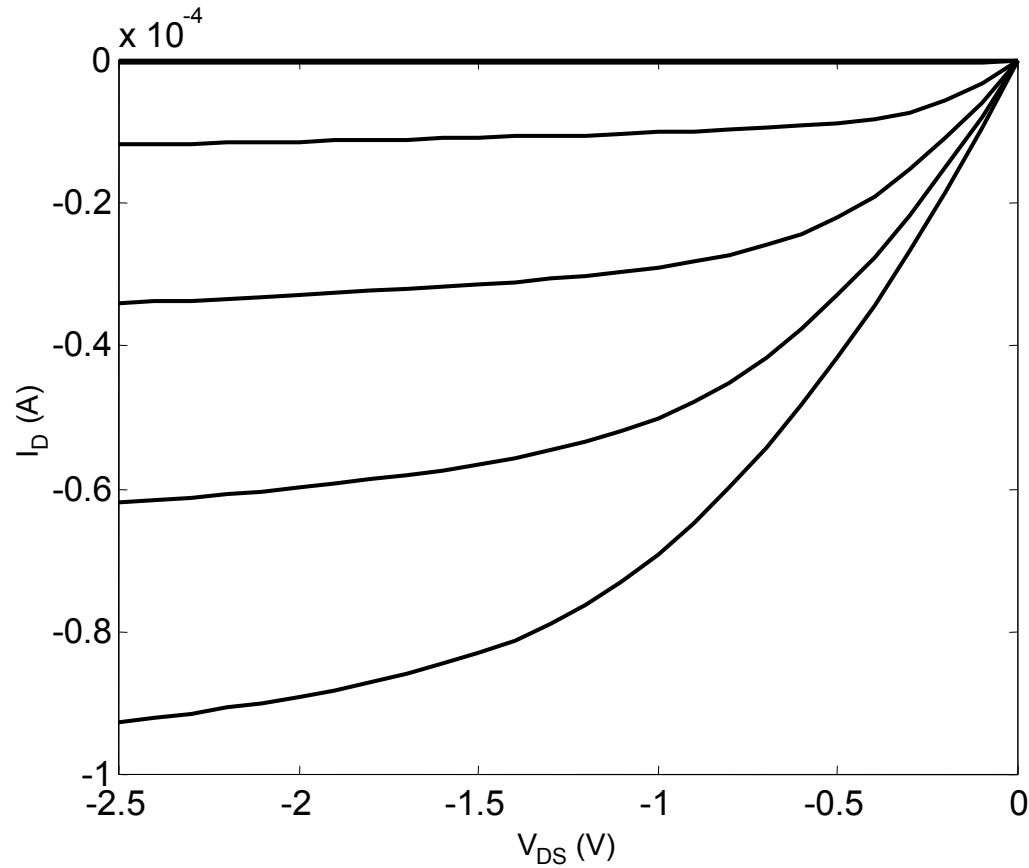
Ιδανικές χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος τρανζίστορ MOS

- Χαρακτηριστικές $I_D = f(V_{DS})$ ενός τρανζίστορ nMOS για διάφορες τιμές της τάσης V_{GS} :



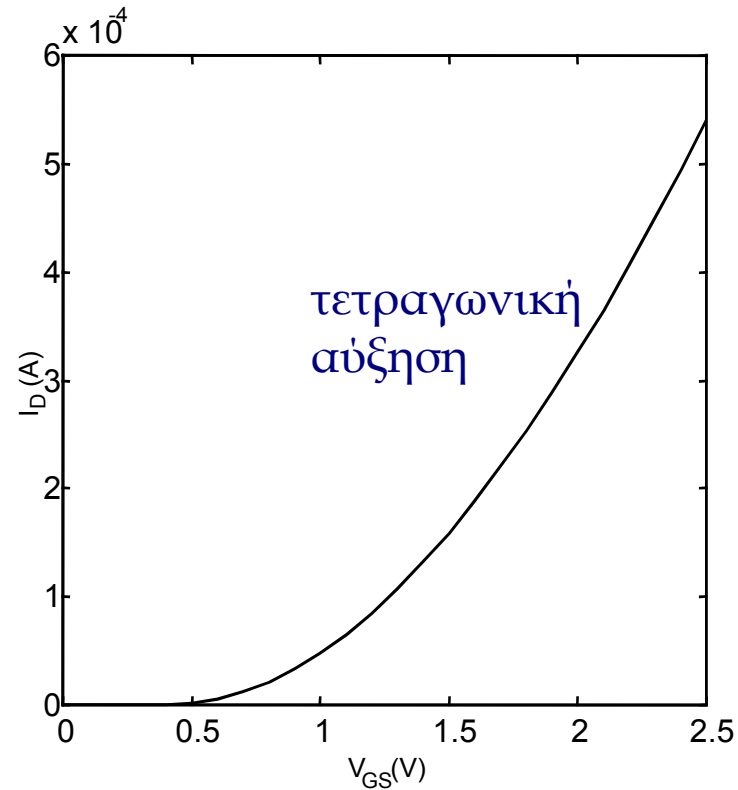
Ιδανικές χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος τρανζίστορ MOS

- Χαρακτηριστικές $I_D = f(V_{DS})$ ενός τρανζίστορ pMOS:



Ιδανικές χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος τρανζίστορ MOS

- Χαρακτηριστική $I_D = f(V_{GS})$ ρεύματος κορεσμού ενός τρανζίστορ nMOS (με $V_{DS} = V_{DD} > V_{GS} - V_T$):



Διαμόρφωση μήκους καναλιού

- Στην πραγματικότητα το ρεύμα του τρανζίστορ στην περιοχή του κόρου δεν είναι πλήρως ανεξάρτητο της V_{DS} καθώς υπάρχει μια διαμόρφωση (modulation) του σημείου αποκοπής (pinch-off) και του ενεργού μήκους του καναλιού με την τιμή της V_{DS}
- Το ρεύμα κόρου θα είναι στη συγκεκριμένη περίπτωση:

$$I_D = \frac{1}{2} \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L_m} (V_{GS} - V_T)^2$$

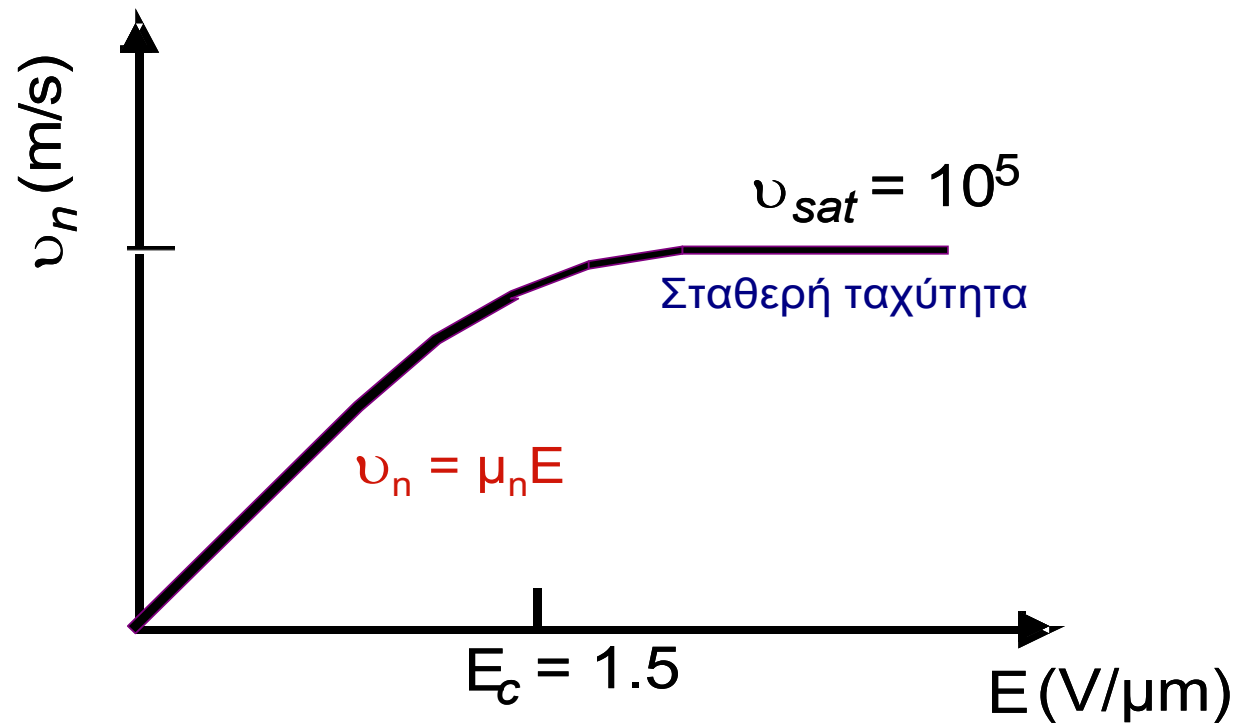
όπου $L_m < L$ το διαμορφούμενο μήκος καναλιού λόγω της V_{DS}

- Εάν θεωρήσουμε ότι $\Delta L / L_m = (L - L_m) / L_m = \lambda \cdot |V_{DS}| \ll 1$, όπου λ είναι μια εμπειρική παράμετρος μοντέλου (συντελεστής διαμόρφωσης μήκους καναλιού), το ρεύμα κόρου θα γραφεί ως εξής:

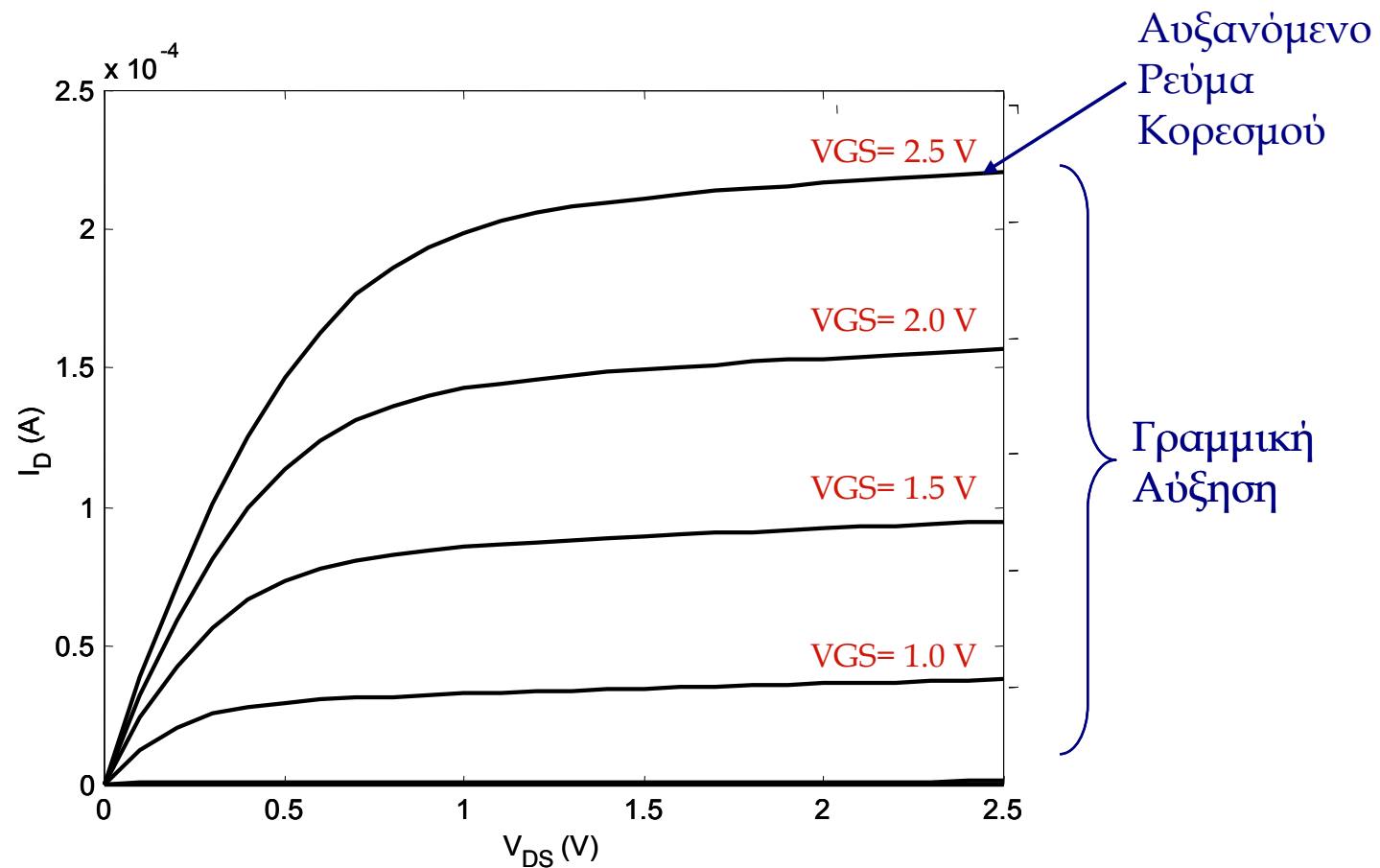
$$I_D = \frac{1}{2} \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda |V_{DS}|) \equiv \frac{1}{2} \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 + |V_{DS}| / r_o$$

όπου r_o η αντίσταση ασθενούς σήματος στην κατάσταση κόρου

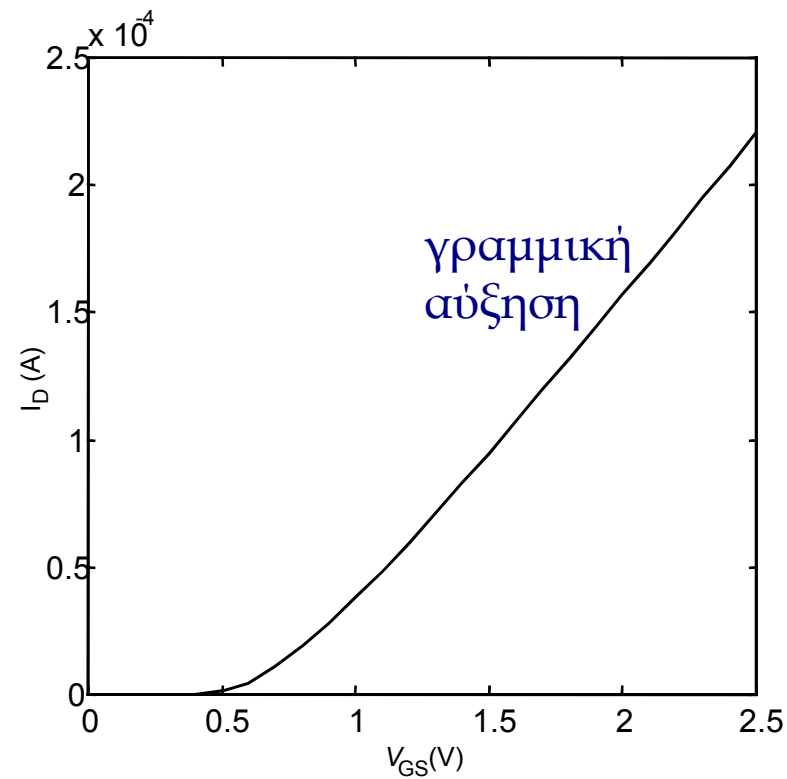
Κορεσμός ταχύτητας φορέων



Πραγματικές χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος τρανζίστορ MOS



Πραγματικές χαρακτηριστικές τάσης-ρεύματος τρανζίστορ MOS



Φαινόμενο σώματος

- Μια ενδεχόμενη μη μηδενική τάση V_{SB} μεταξύ πηγής και υποστρώματος θα έχει ως αποτέλεσμα τη μεγέθυνση της περιοχής αραίωσης (λόγω της ανάστροφης πόλωσης) και την αύξηση της απαιτούμενης τάσης κατωφλίου V_T για το σχηματισμό του καναλιού, σύμφωνα με τον εξής τύπο:

$$|V_T| = |V_{T0}| + \gamma \left(\sqrt{|2\phi_F| + |V_{SB}|} - \sqrt{|2\phi_F|} \right)$$

όπου V_{T0} είναι η τάση κατωφλίου του τρανζίστορ υπό μηδενική πόλωση $V_{SB} = 0$, γ είναι ένας συντελεστής πόλωσης υποστρώματος ο οποίος εξαρτάται από τις παραμέτρους της τεχνολογίας, και $|2\phi_F|$ είναι μια φυσική παράμετρος που αντιπροσωπεύει το δυναμικό της επιφάνειας στην κατάσταση (ισχυρής) αντιστροφής

Αντιστοιχίες παραμέτρων στο SPICE (LEVELS 1,2,3 – μέχρι 0.25μm)

k_n', k_p'	↔	KP
V_{T0}	↔	VTO
γ	↔	GAMMA
$ 2\phi_F $	↔	PHI
λ	↔	LAMBDA