

HY121-Ηλεκτρονικά Κυκλώματα

Συνοπτική παρουσίαση της δομής και λειτουργίας του MOS τρανζίστορ

Γιώργος Δημητρακόπουλος

Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών
Πανεπιστήμιο Κρήτης

Η δομή του τρανζίστορ

Όπως ξέρετε υπάρχουν δύο είδη MOS τρανζίστορ, τα NMOS και τα PMOS. Και τα δύο αποτελούνται από 4 ακροδέκτες Gate (G), Source (S), Drain (D), Bulk (B). Για τις εφαρμογές που θα μας απασχολήσουν θεωρήστε ότι το Bulk είναι συνδεδεμένο στο Source και αγνοήστε το

Το τρανζίστορ NMOS κατασκευάζεται σε ένα p-τύπου υπόστρωμα όπου υπερτερούν οι δέκτες κινούμενων φορτίων χρησιμοποιώντας δύο n-τύπου περιοχές όπου υπερτερούν οι δότες φορτίου

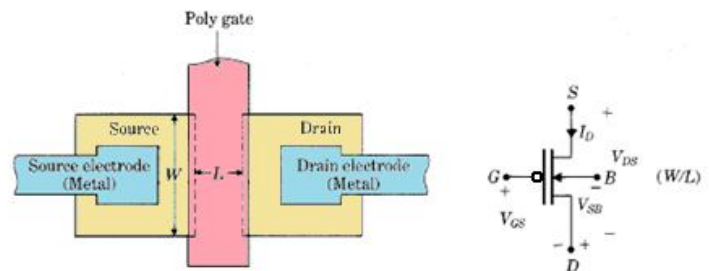
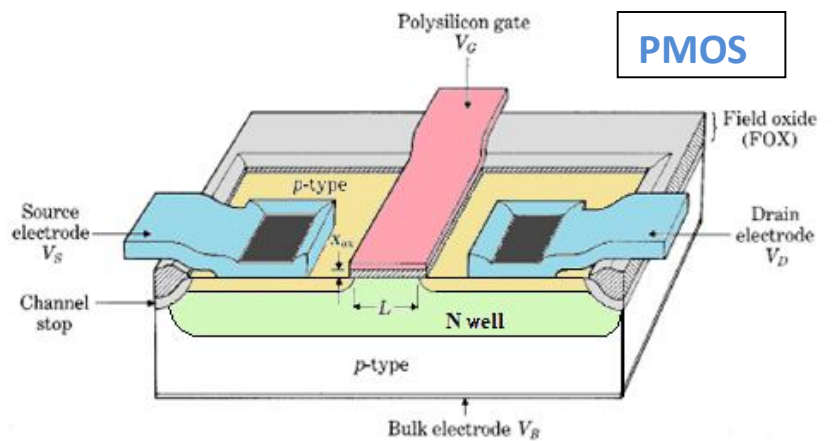
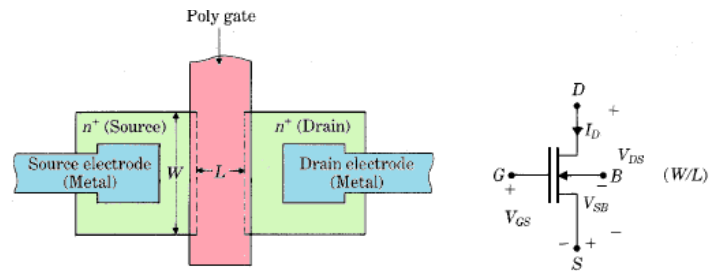
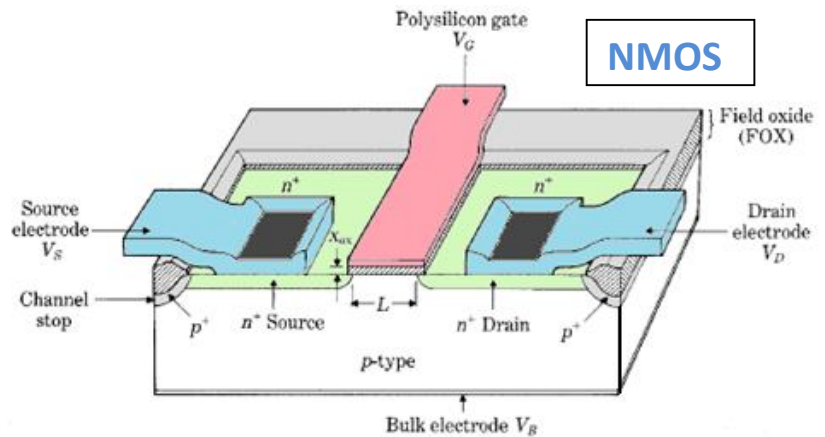
Αντίθετα τα PMOS τρανζίστορ φτιάχνονται μέσα σε ένα N πηγάδι από περιοχές τύπου p.

Οι περιοχές source και drain είναι συμμετρικές. Ονομάζουμε source τον ακροδέκτη με το χαμηλότερο δυναμικό στα NMOS και αυτόν με το υψηλότερο στα PMOS

Ορίζουμε όλες τις τάσεις χρησιμοποιώντας σαν κόμβο αναφοράς το source (Τάση Gate = $V_{GS} = V_G - V_S$, Τάση drain $V_{DS} = V_D - V_S$)

Τα στοιχεία της γεωμετρίας του τρανζίστορ που μας απασχολούν είναι το πλάτος του W , το μήκος του L και το ύψος του οξειδίου που βρίσκεται κάτω από την πολυσιλικόνη της πύλης x_{ox} ή t_{ox}

Στη συνέχεια θα περιορίσουμε την ανάλυση στα NMOS και θα δείξουμε στο τέλος πως χειριζόμαστε τα PMOS



Το κατώφλι του τρανζίστορ

Έστω ότι το δυναμικό στους τρεις ακροδέκτες (S, D, B) είναι στα 0V και αρχίσουμε να αυξάνουμε την τάση του Gate. Τότε θετικά φορτισμένα σωματίδια συσσωρεύονται στον ακροδέκτη του Gate τα οποία απωθούν προς τα κάτω τα θετικά σωματίδια από το p υπόστρωμα. Ουσιαστικά έλκουν στη θέση τους τα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια.

Έτσι, κάτω από τις περιοχές του source και του drain και του gate σχηματίζεται μια περιοχή, η οποία έχει εκκενωθεί από θετικά φορτία και έχουν απομείνει μόνο αρνητικά. Η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή κένωσης (Depletion region)

Όσο αυξάνουμε την τάση του Gate τότε κάτω από το Gate συσσωρεύονται περισσότερα αρνητικά φορτία βαθαινοντας την περιοχή του Depletion

Το συνολικό φορτίο που συγκεντρώνεται κάτω από την πύλη πρέπει να είναι ίδιο με αυτό των θετικών φορτίων που έχουν συγκεντρωθεί στον ακροδέκτη του gate

Όταν το πλήθος των αρνητικών φορτίων σε αυτή την περιοχή αυξηθεί πάνω από ένα όριο αυτό μας επιτρέπει να πούμε πως έχει σχηματιστεί ένα κανάλι ηλεκτρονίων κάτω από το Gate του τρανζίστορ

Το κανάλι αυτό αποτελείται από αρνητικά φορτισμένα σωματίδια ενώ ανήκει στο υπόστρωμα (p) όπου υπερτερούν οι θετικοί δέκτες φορτίου (οπές). Η αλλαγή αυτή μας επιτρέπει να πούμε πως το κανάλι έχει αντιστραφεί (Channel invert).

Η τάση στο Gate, ή καλύτερα η διαφορά δυναμικού μεταξύ Gate και Source, που απαιτείται για να επιτύχουμε την αντιστροφή του καναλιού ονομάζεται τάση κατωφλίου του τρανζίστορ και συμβολίζεται με V_T

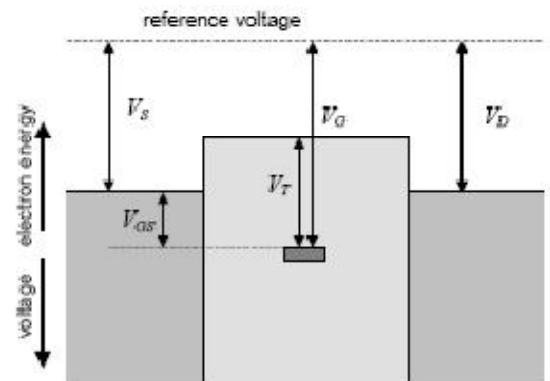
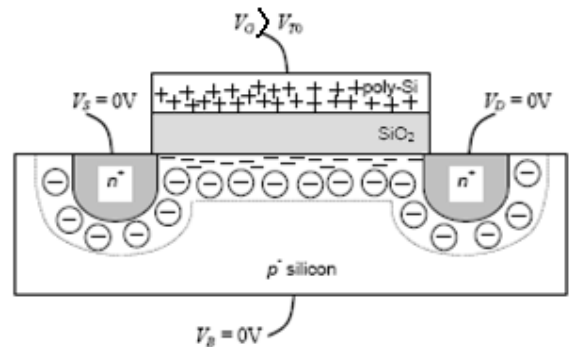
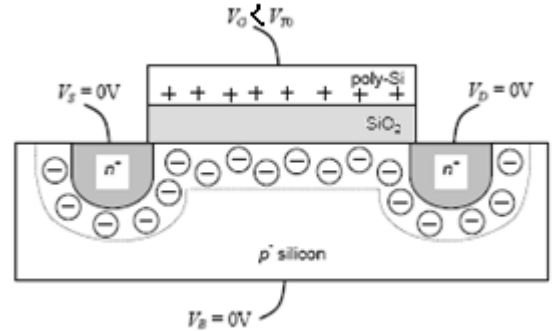
Το δυναμικό στην περιοχή του καναλιού είναι ανάλογο της τάσης που βάζουμε στο gate του τρανζίστορ και του V_T . Εφόσον το κανάλι έχει σχηματιστεί, το δυναμικό αυτό είναι ίσο με $V_{GS} - V_T$.

Όταν $V_{GS} > V_T$ λέμε ότι το τρανζίστορ άγει (ή έχει ενεργοποιηθεί ή έχει ανοίξει)

Μηχανικό ανάλογο

Για να καταλάβουμε πως αρχίζει να κυλάει ρεύμα στο τρανζίστορ μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα μηχανικό ανάλογο της λειτουργίας του.

Το ρεύμα θα κυλήσει στην περιοχή του καναλιού που σχηματίστηκε κάτω από το gate. Το κανάλι σχηματίστηκε όταν $V_{GS} > V_T$



Θεωρούμε το κανάλι σαν ένα ξύλινο εμπόδιο το οποίο χωρίζει τις δύο δεξαμενές ηλεκτρονίων source και drain. Το πλάτος του εμποδίου είναι όσο το μήκος του καναλιού. Μπορούμε να μετακινήσουμε το εμπόδιο πάνω και κάτω χρησιμοποιώντας ένα μοχλό ο οποίος έχει τοποθετηθεί σε απόσταση V_T κάτω από την κορυφή του εμποδίου. Η τάση αυξάνει όσο ο μοχλός κατεβαίνει προς τα κάτω ενώ η απόσταση του μοχλού από την επιφάνεια της δεξαμενής είναι ίση με την τάση V_{GS} .

Αν κατεβάζουμε το μοχλό αρκετά προς τα κάτω ώστε το $V_{EFF} = V_{GS} - V_T > 0$, τότε η περιοχή που καλειπτόταν από το εμπόδιο γεμίζει ακαριαία με νερό. Η ποσότητα του νερού (φορτίου) που γέμισε αυτό το κανάλι είναι ανάλογη του V_{EFF} .

Όσο πιο πολύ μεγαλώσει το V_{EFF} (όσο πιο βαθιά δηλαδή μετακινηθεί ο μοχλός με την αύξηση του V_G) τόσο πιο μεγάλη και η ποσότητα του νερού (φορτίου) που βρίσκεται πάνω από το εμπόδιο (κάτω από το gate του τρανζίστορ αντίστοιχα)

Παρόλο που τα δύο κομμάτια της δεξαμενής ενώθηκαν και η περιοχή πλημμύρισε με φορτίο δεν έχουμε ροή ρεύματος (νερού) γιατί η επιφάνεια του Source και Drain βρίσκονται στο ίδιο ύψος (δυναμικό)

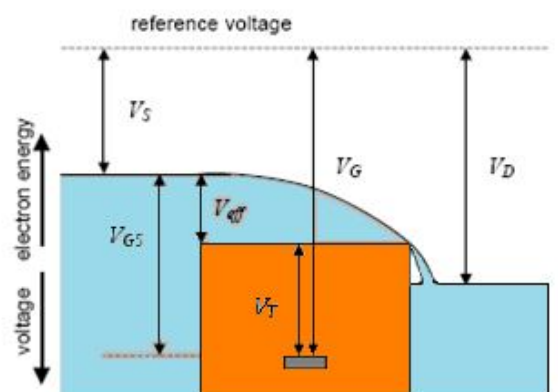
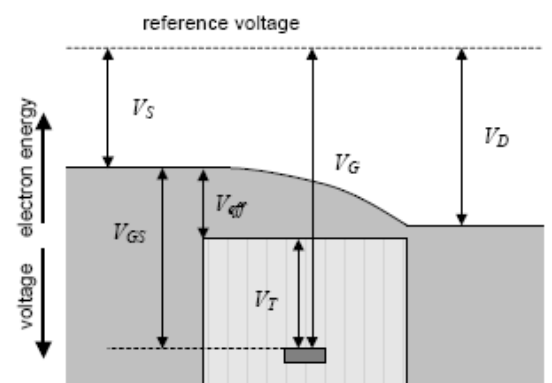
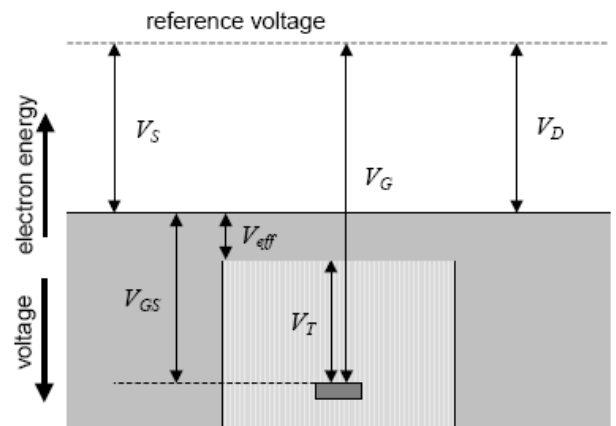
Ροή ρεύματος

Η ροή του ρεύματος θα ξεκινήσει μόλις το ύψος μεταξύ των source και drain μεταβληθεί. Αυτό το επιτυγχάνουμε «πιέζοντας» την επιφάνεια του drain προς τα κάτω. Αυξάνουμε δηλαδή την τάση στον ακροδέκτη drain κάνοντας τη διαφορά δυναμικού μεταξύ drain και source $V_{DS} = V_D - V_S$ θετική

Τα ηλεκτρόνια (μόρια νερού) κινούνται από το source στο drain. Παρατηρώντας το σχήμα βλέπουμε πως για να αυξήσουμε την ποσότητα του ρεύματος μπορούμε να κάνουμε δύο πράγματα.

- Να κατεβάσουμε περαιτέρω το εμπόδιο αυξάνοντας δηλαδή την τάση V_{GS} . Έτσι αυξάνουμε την ποσότητα νερού (φορτίου) που συσσωρεύεται πάνω από το εμπόδιο (κανάλι κάτω από το gate). Με άλλα λόγια αυξάνουμε το φορτίο που επιτρέπουμε να κυλίσει από το source στο drain.
- Να αυξήσουμε τη υψομετρική διαφορά των επιφανειών source και drain αυξάνοντας τη διαφορά δυναμικού V_{DS} .

Τι θα συνέβαινε αν κατεβάζαμε πολύ την επιφάνεια του drain έναντι του source, ώστε το drain να είναι πολύ χαμηλότερα από την πάνω πλευρά του εμποδίου. Τότε από την πλευρά του drain η ποσότητα του νερού (φορτίο) θα ήταν σχεδόν μηδενική και η εικόνα θα έμοιαζε περισσότερο με καταράκτη με το φορτίο να κυλάει μέσα στο drain.



Σε αυτή την περίπτωση το νερό που κυλάει στο drain είναι ανεξάρτητο από το βάθος της επιφάνειας του drain. Το drain έχει κατέβει πολύ χαμηλά έναντι του πάνω μέρους του εμποδίου και δεν επηρεάζει την ποσότητα νερού που πέφτει μέσα σ'αυτό. Τότε λέμε πως το τρανζίστορ έφτασε στην κατάσταση κορεσμού (saturation)

Το ρεύμα που διαρρέει το τρανζίστορ

Τη στιγμή που $V_{DS} > 0$ και το τρανζίστορ ανοιχτό ($V_{GS} > V_T$) έχουμε ροή ρεύματος κάτω από το κανάλι

Η depletion περιοχή είναι πλατύτερη από την πλευρά του drain. Ο λόγος είναι πως η δίοδος που σχηματίζεται στην περιοχή του drain είναι ισχυρότερα ανάστροφα πολωμένη

Αντίθετα το κανάλι που έχει σχηματιστεί περιέχει περισσότερο φορτίο προς το source. Ο λόγος είναι ότι η τάση του source V_s είναι μικρότερη από το drain με αποτέλεσμα η τάση που έχει εμφανιστεί κατά μήκος του καναλιού να είναι μεγαλύτερη κοντά στο source

Σε μια οποιαδήποτε θέση y κάτω από το κανάλι αν πάρουμε μια φέτα dy μπορούμε να γράψουμε πως το φορτίο που περιέχεται ($Q = CV$) είναι $Q(y) = WC_{ox} dy (V_{GS} - V_T - V(y))$. Το C_{ox} (χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας του gate) εξαρτάται από το πάχος της περιοχής του οξειδίου t_{ox} . Όσο μεγαλύτερο το πάχος τόσο μικρότερο το C_{ox} και επομένως τόσο λιγότερο και το ρεύμα του τρανζίστορ. Ουσιαστικά η ποσότητα C_{ox} δείχνει πόσο αποδοτικά μπορεί το φορτίο που συσσωρεύεται στο gate μέσω της αύξησης του V_{GS} , να "καθρεπτιστεί" με αντίθετης πολικότητας φορτία στο κανάλι που σχηματίζεται κάτω από το gate.

Δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι **Ρεύμα = Φορτίο x Ταχύτητα = Q x u (ρυθμός μεταβολής φορτίου)**

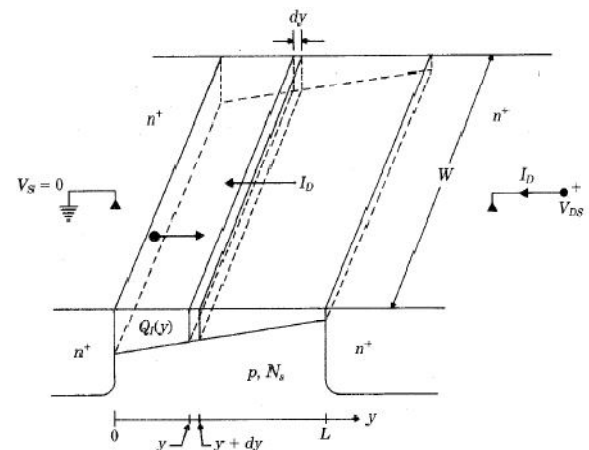
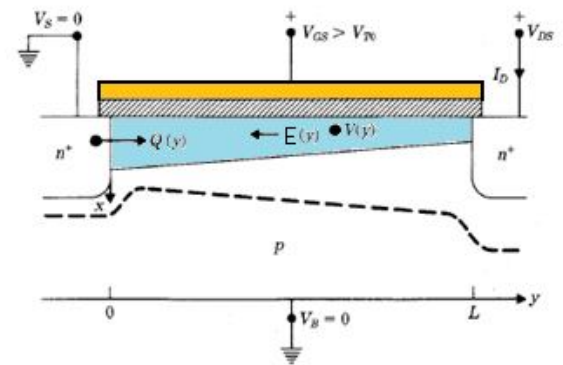
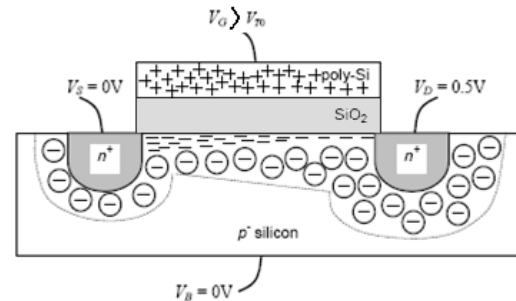
Η ταχύτητα εξαρτάται από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου $E(y)$ επί την κινητικότητα μ των ηλεκτρονίων. Προς το παρόν θεωρούμε πως η ταχύτητα αυξάνει γραμμικά με την ένταση του πεδίου $u = \mu E(y)$. Επομένως η κινητικότητα σταθερή για όλες τις τιμές του E .

Το ηλεκτρικό πεδίο ορίζεται ως το δυναμικό ανά απόσταση. Έτσι σε ένα οποιοδήποτε σημείο y , $E(y) = dV(y)/dy$

Επομένως για το ρεύμα έχουμε:

$$I_{DS} = \mu W C_{ox} (V_{GS} - V_T - V(y)) \frac{dV(y)}{dy}$$

Το y παίρνει τιμές από 0 έως L , όσο και το μέγιστο μήκος του καναλιού (μήκος της περιοχής του gate του τρανζίστορ). Περιμένουμε πως όσο μεγαλύτερο το μήκος του τρανζίστορ (μήκος καναλιού κάτω από το gate) τόσο μικρότερο το ρεύμα



που θα έχουμε εφόσον τα ηλεκτρονία έχουν να διανύσουν μεγαλύτερη απόσταση ώστε ξεκινώντας από το source να καταλήξουν στο drain.

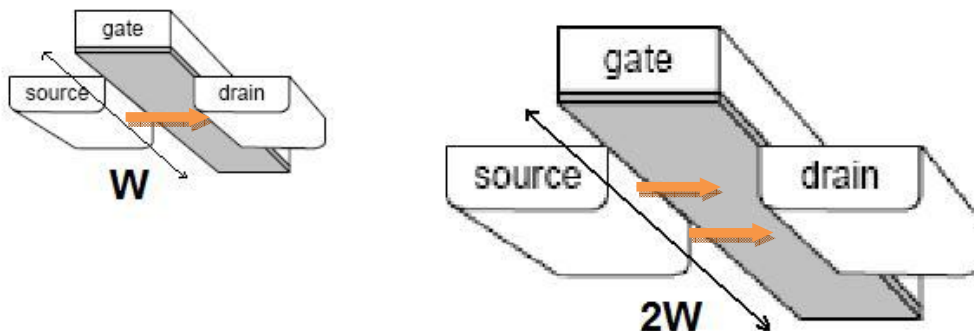
Ανάλυση του ρεύματος

Λύνοντας τη διαφορική εξίσωση προκύπτει ότι το ρεύμα που διαρρέει το τρανζίστορ είναι ίσο με

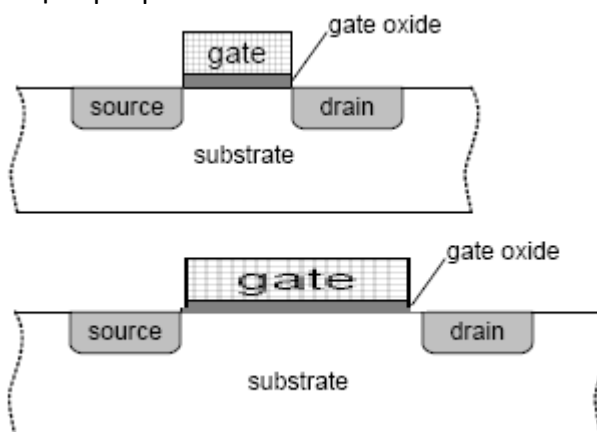
$$I_{DS} = \mu C_{OX} \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS}$$

Πριν αναλύσουμε τη συνεισφορά των τάσεων V_{GS} και V_{DS} ας δούμε ας δούμε τη συμπεριφορά των άλλων παραμέτρων.

- Όσο μεγαλύτερη η κινητικότητα μ των ηλεκτρονίων τόσο μεγαλύτερο το ρεύμα. Ο λόγος είναι ότι τα ηλεκτρόνια μπορούν να διανύσουν μια δεδομένη απόσταση σε λιγότερο χρόνο αυξάνοντας έτσι το dQ/dt δηλαδή το ρεύμα.
- Όπως είπαμε και πριν όσο μεγαλύτερο το C_{ox} τόσο καλύτερα μπορεί το φορτίο που συσσωρεύεται στο gate να “καθρεπτιστεί” με αντίθετης πολικότητας φορτία στο κανάλι που σχηματίζεται κάτω από το gate.
- Επίσης τρανζίστορ μεγάλου πλάτους W παρέχουν και μεγαλύτερο ρεύμα. Ουσιαστικά αυξάνει η ποσότητα του φορτίου που μπορεί να κινηθεί κάτω από το κανάλι (με την αύξηση του W το μήκος του καναλιού παραμένει αναλλοίωτο, αυξάνει όμως το πλάτος του – το κανάλι γίνεται πιο φαρδύ)



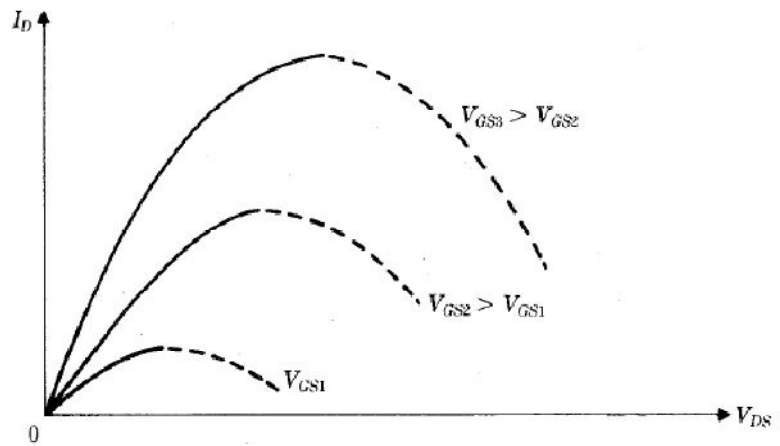
- Αντίθετα μεγαλύτερο L σημαίνει πως τα ηλεκτρόνια έχουν να διανύσουν μεγαλύτερη απόσταση από το Source στο Drain το οποίο για σταθερή ταχύτητα μεταφράζεται σε περισσότερο χρόνο μειώνοντας έτσι το dQ/dt και κατ'επέκταση το ρεύμα.



Για να διερευνήσουμε τη συνεισφορά των V_{DS} και V_{GS} στο ρεύμα, ας ζωγραφίσουμε το ρεύμα I_{DS} συναρτήσει της τάσης V_{DS} για διάφορες τιμές του V_{GS} . Η καμπύλη του σχήματος μας αποκαλύπτει μια μη-φυσιολογική συμπεριφορά

Η καμπύλη του ρεύματος αυξάνει αρχικά συναρτήσει του V_{DS} και μετά από μια τιμή, το ρεύμα αρχίζει να μειώνεται. Φυσικά κάτι τέτοιο δε μπορεί να συμβεί

Αυτό που συμβαίνει είναι πως το ρεύμα πιάνει τη μέγιστη τιμή του και στη συνέχεια παραμένει σταθερό. Εισέρχεται δηλαδή στην περιοχή του κορεσμού (saturation) στην οποία είναι ανεξάρτητο του V_{DS} .



Η τιμή της V_{DS} που οδηγεί στη μέγιστη τιμή του ρεύματος I_{DS} μπορούμε να την υπολογίσουμε λύνοντας την εξίσωση $dI_{DS}/dV_{DS} = 0$. Η τιμή της τάσης V_{DS} για την οποία το ρεύμα παίρνει τη μέγιστη τιμή του ονομάζεται τάση V_{DSAT} και είναι ίση με $V_{GS} - V_T$

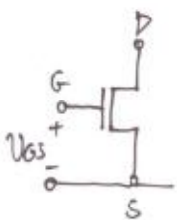
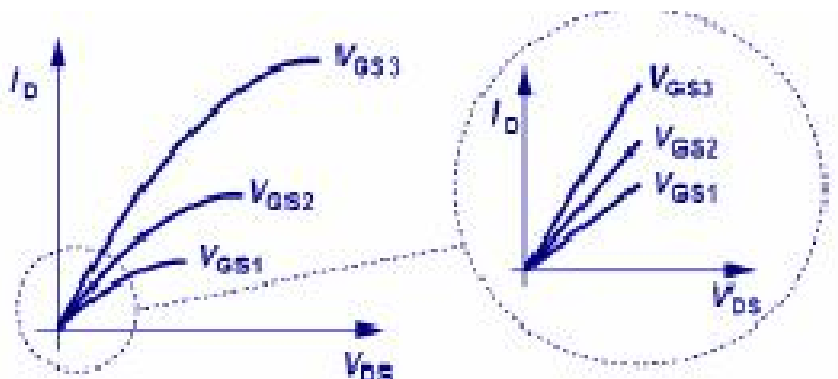
Τι συμβαίνει όμως στο κομμάτι όπου το V_{DS} παίρνει τιμές μικρότερες του V_{DSAT} . Τότε διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

Όταν $V_{DS} \ll V_{GS} - V_T$ τότε $V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \approx V_{GS} - V_T$. Έτσι προκύπτει πως το ρεύμα του τρανζίστορ είναι περίπου ίσο με

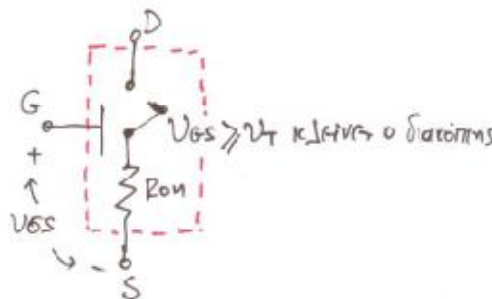
$$I_{DS} \approx \mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) V_{DS}$$

Αν ορίσουμε $\mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T) = \frac{1}{A}$

το οποίο για δεδομένο V_{GS} είναι μια σταθερή ποσότητα τότε το ρεύμα που διαρρέει το τρανζίστορ είναι ίσο με $I_{DS} \approx \frac{V_{DS}}{A}$. Δηλαδή το τρανζίστορ συμπεριφέρεται σαν μια αντίσταση. Το ρεύμα που ρέει μεταξύ του Drain και του Source είναι γραμμικό εξαρτημένο από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ του Drain και του Source V_{DS} .



μοντέλο



Το μοντέλο αυτό το χρησιμοποιήσαμε στην περίπτωση των ψηφιακών κυκλωμάτων, χωρίς να γνωρίζουμε τίποτε για το ρεύμα του τρανζίστορ. Ήταν όμως ένα ρεαλιστικό

μοντέλο για τα ψηφιακά κυκλώματα; Σε μια ψηφιακή πύλη όταν το gate ενός NMOS τρανζίστορ είναι στο λογικό -1 (σε μια τάση περίπου ίση με V_{DD}) τότε και η διαφορά δυναμικού V_{GS} είναι και αυτή περίπου ίση με V_{DD} (εξαρτάται από το αν το τρανζίστορ βρίσκεται σε σειρά με άλλα τρανζίστορ). Η έξοδος της

πύλης αν υπάρχει κάποιο ενεργό μονοπάτι στο NMOS δίκτυο οδηγείται στο λογικό-0 (δηλαδή στα 0Volt). Έτσι το V_{DS} που εμφανίζουν τότε τα τρανζίστορ είναι περίπου ίσο με 0. Έτσι παρατηρούμε πως η ψηφιακή λειτουργία επιβάλλει όταν ο υπολογισμός ολοκληρώνεται να έχουμε $V_{DS} \ll V_{GS} - V_T$. Οπότε καλά κάναμε και μοντελοποιήσαμε το τρανζίστορ σαν μία αντίσταση για να υπολογίσουμε τα V_{OL} και V_{OH} της λογικής πύλης. Η τιμή που έπρεπε να διαλέξουμε για την αντίσταση μας R_{ON} τώρα γνωρίζουμε πως έπρεπε να είναι

$$R_{ON} = \frac{1}{\mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)}$$

Όταν $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ αλλά όχι ιδιαίτερα μικρότερο σε σχέση με το $V_{GS} - V_T$ τότε ουσιαστικά το τρανζίστορ συμπεριφέρεται σαν μια μη-γραμμική αντίσταση, όπου το ρεύμα που τη διαρρέει, εξαρτάται από το τετράγωνο της διαφοράς δυναμικού στα άκρα της. Δηλαδή $I_{DS} \approx \frac{V_{DS}}{A} + a V_{DS}^2$, όπου a μια σταθερά.

Ο κορεσμός του ρεύματος

Το ρεύμα του τρανζίστορ παίρνει τη μέγιστη τιμή του όταν $V_{DS} = V_{DSAT}$. Τότε το ρεύμα παρατηρούμε είναι ίσο με

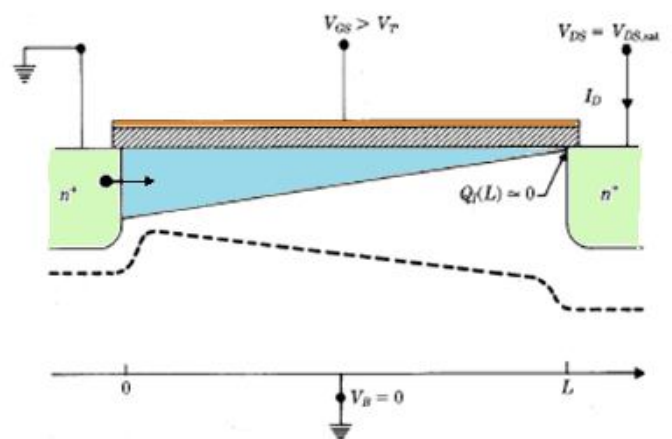
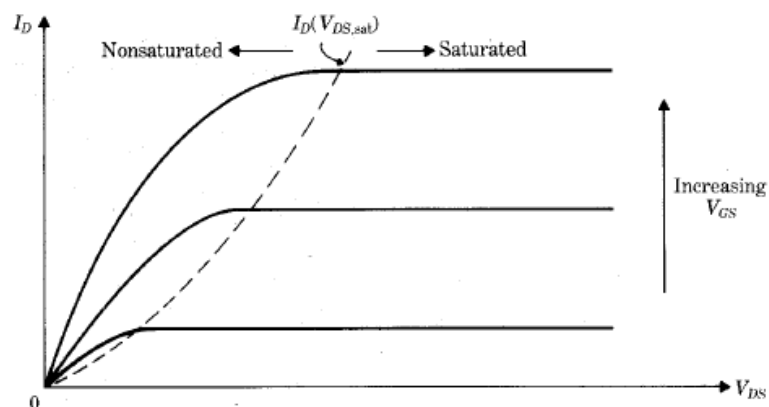
$$I_{SAT} = \mu C_{OX} \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_T - \frac{V_{DSAT}}{2} \right) V_{DSAT}$$

Εφ'οσον $V_{DSAT} = V_{GS} - V_T$ τότε η τιμή του ρεύματος κορεσμού είναι ίση με

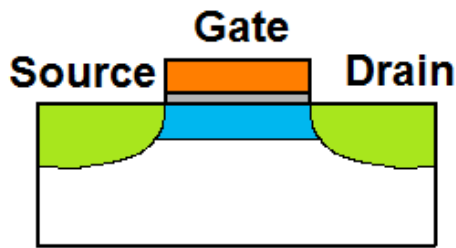
$$I_{SAT} = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \frac{W}{L} V_{DSAT}^2$$

Το ρεύμα σε αυτή την περίπτωση είναι πια ανεξάρτητο του V_{DS} και αυξάνει μόνο με την αύξηση του V_{GS} . Με άλλα λόγια όταν το τρανζίστορ λειτουργεί στην περιοχή του κορεσμού ($V_{DS} > V_{DSAT}$), το τρανζίστορ συμπεριφέρεται σαν μια πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από τάση (την V_{GS}).

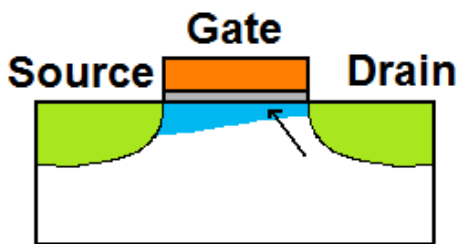
Γιατί συμβαίνει όμως αυτή η σταθεροποίηση του ρεύματος με την αύξηση του V_{DS} . Λόγω της αύξησης της V_{DS} και κατ'επέκταση της τάσης στο Drain η περιοχή του καναλιού κοντά στο Drain στενεύει πάρα πολύ με αποτέλεσμα θεωρητικά το φορτίο στην άκρη του καναλιού να είναι 0. Ουσιαστικά το φορτίο δε γίνεται 0 αλλά μειώνεται αρκετά. Όμως λόγω του ισχυρού τοπικού ηλεκτρικού πεδίου τα λίγα ηλεκτρόνια κινούνται με μεγάλες ταχύτητες προς το drain κάνοντας το ρεύμα να μοιάζει με τον καταρράκτη του μηχανικού ανάλογου. Ουσιαστικά λόγω του στενέματος του καναλιού δίπλα στο drain το πλήθος των ηλεκτρονίων που διέρχονται στη μονάδα του χρόνου είναι σταθερό και δεν μπορεί να αυξηθεί με την περαιτέρω αύξηση του V_{DS} (κορεσμός ρεύματος). Η περιοχή αυτή θα «ανοίξει» και πάλι μόνο με την



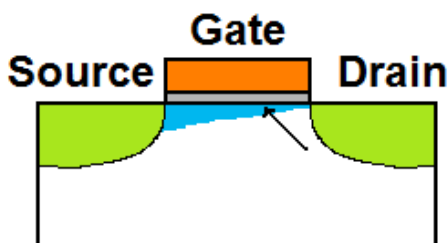
αύξηση του V_{GS} το οποίο θα βαθύνει περισσότερο το κανάλι και θα κάνει τη στενή άκρη να μοιάζει μεγαλύτερη, αυξάνοντας έτσι το πλήθος των φορτίων που διέρχονται στη μονάδα του χρόνου.



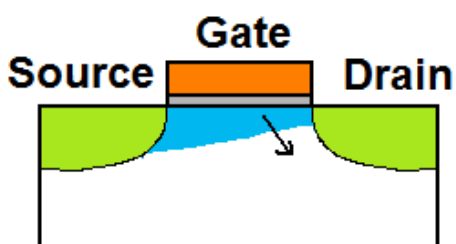
$V_{GS} > V_T$
 V_{DS} μικρό



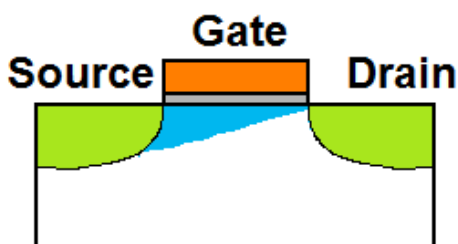
Αύξηση V_{DS}
Το κανάλι στενεύει
κοντά στο Drain



Αύξηση V_{DS}
 $V_{DS} > V_{GS} - V_T$
Κορεσμός



Αύξηση V_{GS}
Το κανάλι ξαναβάθυνε -
φύγαμε από τον
κορεσμό



Νέα αύξηση V_{DS}
Το κανάλι αρχίζει να
ξαναστενεύει κοντά
στο Drain

Ο νέος κορεσμός θα συμβεί σε μεγαλύτερο V_{DS} γιατί η αύξηση του V_{GS} οδήγησε και σε αύξηση του απαιτούμενου $V_{DSAT} = V_{GS} - V_T$

Σύνοψη - Οι περιοχές λειτουργίας του τρανζίστορ

Το τρανζίστορ περιγράφεται από 3 περιοχές λειτουργίας

Η περιοχή της αποκοπής (cut-off) όπου το τρανζίστορ δεν έχει ακόμη ανοίξει. Αυτό συμβαίνει όταν το $V_{GS} < V_T$ ανεξάρτητα της τάσης V_{DS}

Η γραμμική περιοχή (linear ή triode region) στην οποία το ρεύμα αυξάνεται σχεδόν γραμμικά συναρτήσει του V_{DS} .

$$I_{DS-LINEAR} = \mu C_{OX} \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS}$$

Το τρανζίστορ λειτουργεί σε αυτήν την περιοχή όταν $V_{GS} > V_T$ και $V_{DS} < V_{DSAT}$.

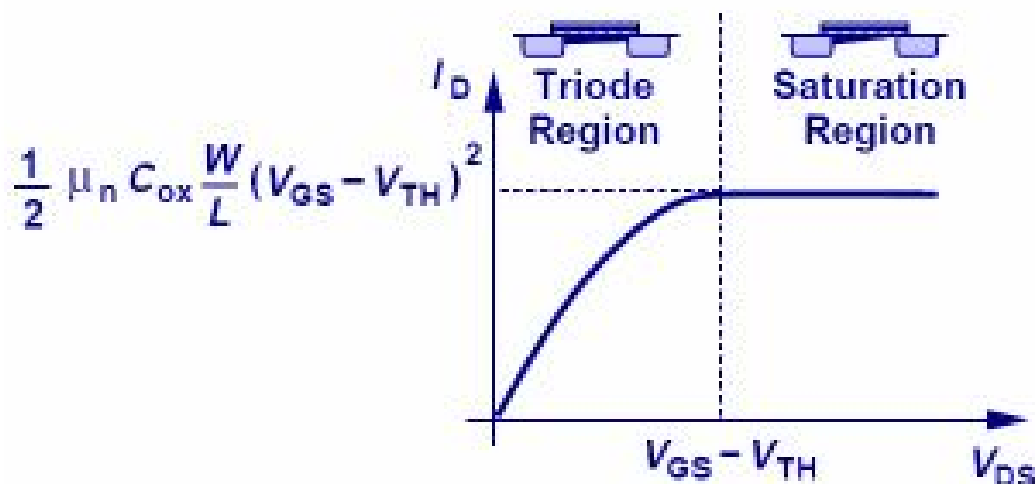
Η τιμή του V_{DSAT} που διαχωρίζει τη γραμμική περιοχή από την περιοχή του saturation είναι $V_{GS} - V_T$

Το τρανζίστορ εισέρχεται στην περιοχή του κορεσμού όταν $V_{DS} > V_{DSAT}$ και φυσικά μόνο όταν το τρανζίστορ είναι ανοικτό $V_{GS} > V_T$. Τότε το τρανζίστορ συμπεριφέρεται σαν πηγή ρεύματος και το ρεύμα είναι ίσο με:

$$I_{DS-SAT} = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

Προσέξτε καλά την εξίσωση. Το ρευμα στο saturation δεν είναι πάντα σταθερό – αλλά αυξάνει όσο αυξάνει και το V_{GS} – γιατί αυξάνει το φορτίο που συγκεντρώνεται στο κανάλι κάτω από το Gate.

Το ρεύμα στον κορεσμό είναι απλά ανεξάρτητο σε πρώτο βαθμό από το V_{DS}



Αντιμετώπιση των PMOS τρανζίστορ

Στα PMOS τρανζίστορ οι τάσεις ορίζονται να είναι αρνητικές με αποτέλεσμα το source είναι ο ακροδέκτης με το υψηλότερο δυναμικό. Το ίδιο συμβαίνει και για την τάση κατωφλίου.

Για να μην μπερδευόμαστε θα θεωρούμε τις απόλυτες τιμές των τάσεων

Για παράδειγμα ένα PMOS τρανζίστορ ενεργοποιείται όταν $|V_{GS}| > |V_T|$. Αν το source του τρανζίστορ είναι στο VDD τότε το τρανζίστορ θα αρχίσει να άγει όταν το V_G είναι μικρότερο του $V_{DD} - |V_{TP}|$ και μεγαλύτερο του 0 (GND).