

HY330 – Ψηφιακά Κυκλώματα - Εισαγωγή στα Συστήματα VLSI

Διδάσκων: Χ. Σωτηρίου, Βοηθοί: θα ανακοινωθούν

<http://inf-server.inf.uth.gr/courses/CE330>

I

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

3^η διάλεξη – Συσκευές στο Πυρήνιο

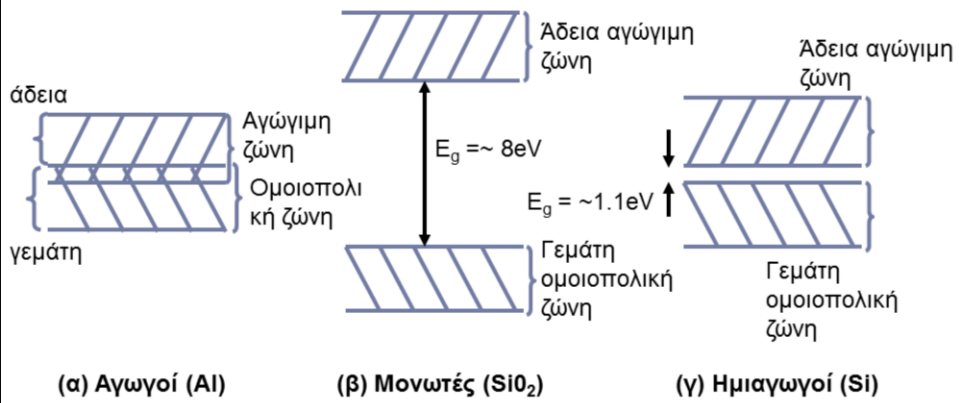
Περιεχόμενα

- ▶ Συσκευές στο Πυρίτιο
- ▶ Πυρίτιο n και p
- ▶ Δίοδος
 - ▶ Θετική, αρνητική πόλωση
 - ▶ Εξίσωση IV
 - ▶ Χωρητικότητα Χώρου Αραίωσης
 - ▶ Μοντέλο/παράμετροι SPICE
- ▶ Τρανζίστορ
 - ▶ Δομή
 - ▶ Τάση Κατωφλίου
 - ▶ Φαινόμενο Σώματος
 - ▶ Λειτουργία Πύλης
 - ▶ Καμπύλες V_{ds} , I_{ds} , V_{gs}
- ▶ Βασικές Εξισώσεις – Μοντέλο MOSFET
- ▶ DSM τρανζίστορ – Κόρος ταχύτητας
- ▶ Καθολικό μοντέλο DSM
- ▶ Παράμετροι SPICE
- ▶ PMOS τρανζίστορ
- ▶ Το τρανζίστορ ως αντίσταση/διακόπτης
- ▶ Παρασιτικές Χωρητικότητες
 - ▶ Χωρητικότητες Πύλης
 - ▶ Χωρητικότητες Διάχυσης
 - ▶ Αντιστάσεις S, D
- ▶ Άλλα DSM φαινόμενα

Συσκευές στο Πυρίτιο

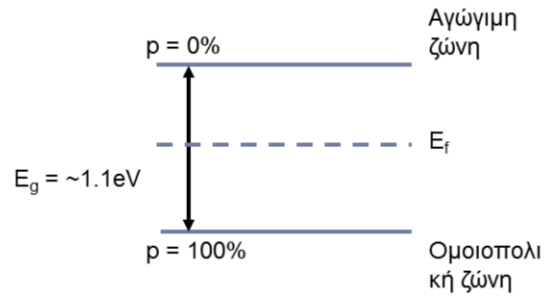
- ▶ **Συσκευές**
 - ▶ MOS τρανζίστορ
 - ▶ Παρασιτικές συσκευές
 - ▶ Δίοδοι
 - ▶ Παρασιτικές χωρητικότητες, αντιστάσεις διασυνδέσεων
 - ▶ Παρασιτικά τρανζίστορ (διπολικά)
- ▶ **Συσκευή - Συμπεριφορά - Μοντέλο**
- ▶ **Απλό μοντέλο για πρωτογενή ανάλυση**
 - ▶ Διαισθητική ανάλυση
 - ▶ Ελάχιστη ακρίβεια
- ▶ **Μοντέλα SPICE**
 - ▶ Προσομοίωση του κυκλώματος βάση μοντέλου κατασκευής

Ενεργειακές Ζώνες Στερεών



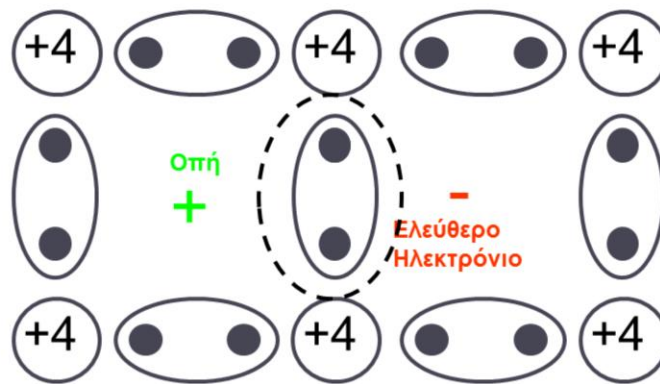
Ορισμός: Επίπεδο Fermi

- Το Ενεργειακό επίπεδο που έχει πιθανότητα κατάληψης 50%



Κρυσταλλική Δομή Si

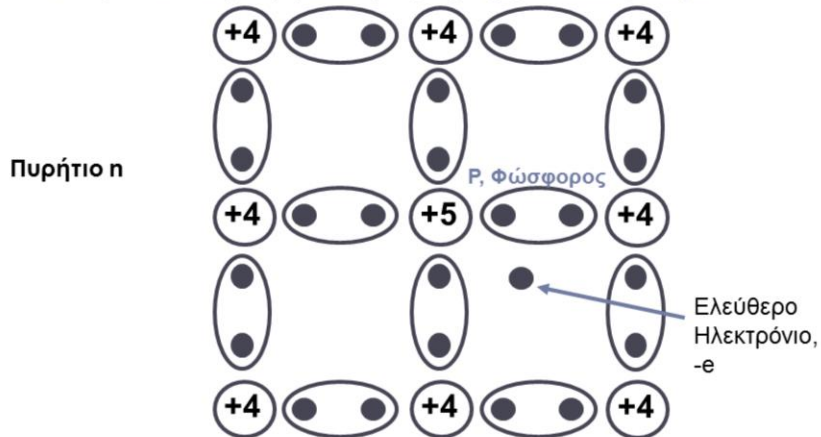
- Το πυρίτιο έχει κρυσταλλική δομή και σθένος 4.



Πυρίτιο τύπου n και p

► Πυρίτιο n

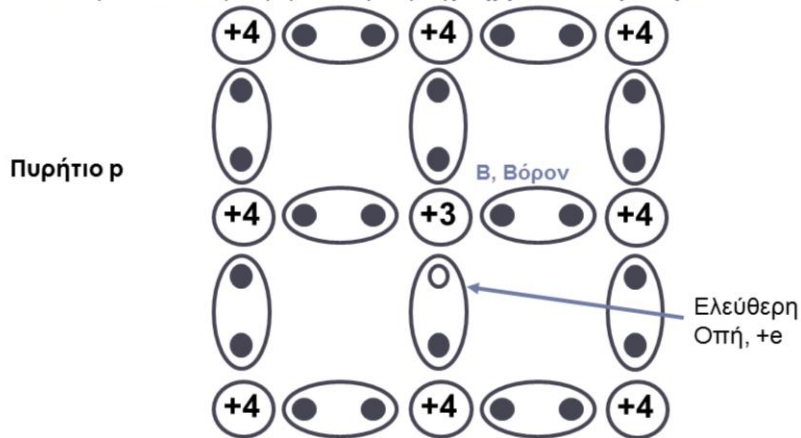
- Κρυσταλλική δομή που περιέχει (α) 5-σθενές άτομο



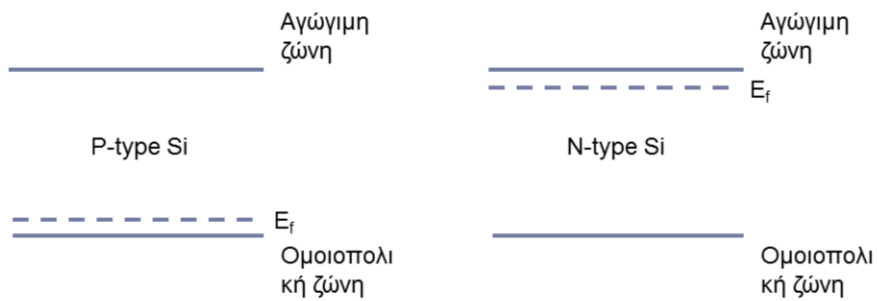
Πυρίτιο τύπου n και p

► Πυρίτιο p

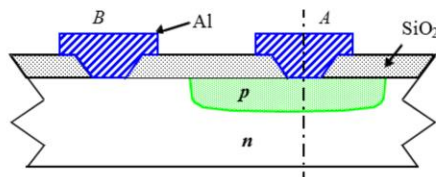
- Κρυσταλλική δομή που περιέχει (β) 3-σθενές άτομο



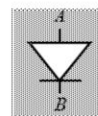
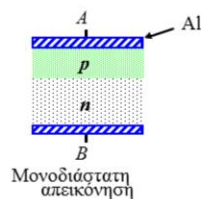
Επίπεδα Fermi σε n και p πυρίτιο



Δίοδος pn



Διατομή διόδου pn σε διεργασία κατασκευής



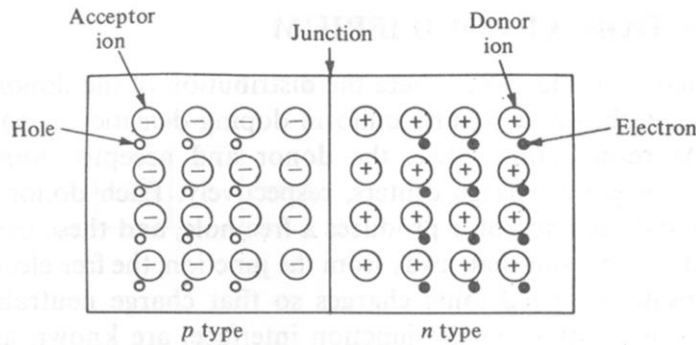
Σύμβολο διόδου

Η δίοδος συναντάται ως δομή σε κάθε MOS τρανζίστορ. Αποτελείται από δυο ομοιογενείς περιοχές n και p πυριτίου, οι οποίες διαχωρίζονται από ένα χώρο μετάβασης της πολικότητας, τον λεγόμενο **χώρο αραιώσης** (depletion region).

Το p είναι πυρίτιο αναμιγμένο με υλικό που δημιουργεί άτομα δέκτες, λ.χ. Βόρον, ενώ το n με υλικό που δημιουργεί άτομα δότες, λ.χ. Φώσφορο.

Δίοδος pn και Χώρος Αραίωσης

- ▶ Στο όριο μεταξύ p και n οι πλειοδότες φορείς αλληλοεξουδετερώνονται, με αποτέλεσμα την δημιουργία ηλεκτροστατικού δυναμικού



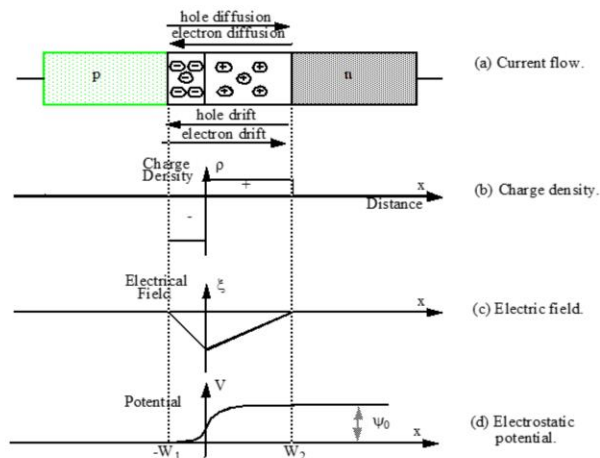
▶ 11

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Ο χώρος γύρω από την σύνδεση (junction), ο οποίος δεν περιλαμβάνει ελεύθερους φορείς, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα ονομάζεται χώρος αραίωσης ή και ένωση pn.

Η πολικότητα των ατόμων δεξιά και αριστερά από την ένωση, τα οποία έχουν στερηθεί τους ελεύθερους φορείς, δημιουργεί (α) μια διαφορά δυναμικού κατά μήκος της ένωσης, (β) άπωση στους ελεύθερους φορείς που βρίσκονται πέραν του χώρου της ένωσης. Έτσι, σε ένα ηλεκτρόνιο για παράδειγμα δεξιά θα ασκηθεί άπωση, από τα αρνητικά πολωμένα άτομα δεξιά, καθώς αυτό πλησιάζει την ένωση pn.

Χώρος Αραίωσης pn - Ανάλυση



► 12

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται αναλυτικά οι ιδιότητες του χώρου αραίωσης.

Η συγκέντρωση ηλεκτρονίων από το n στο p κυμαίνεται από πολύ υψηλή σε πολύ χαμηλή, και αντίστοιχα για τις οπές. Η διαφοροποίηση της συγκέντρωσης δημιουργεί τάση αραίωσης για τα ηλεκτρόνια, από το n στο p, και αντίστροφα για τις οπές. Η τάση αραίωσης, στην οποία αντιτίθεται η διαφορά δυναμικού της ένωσης δημιουργεί ένα ρεύμα αραίωσης. Οι φορείς που αλλάζουν πλευρά δημιουργούν ανάλογα πολωμένα άτομα. Επιπλέον, η διαφορά δυναμικού της ένωσης δημιουργεί αντίστροφη τάση, λόγω έλξης. Για παράδειγμα, ηλεκτρόνια στην p πλευρά έλκονται προς την n. Έτσι δημιουργείται και ένα ρεύμα έλξης. Σε κατάσταση ισορροπίας (δεν περνά ρεύμα από την διόδο) τα δύο ρεύματα είναι ίσα και αντίθετα.

- (α) **Ροή Ρεύματος**: η ροή ρεύματος φαίνεται στο (α). Ηλεκτρόνια αραιώνουν προς τα αριστερά, ενώ έλκονται προς τα δεξιά. Αντιστρόφως για τις οπές.
- (β) **Πυκνότητα Φορτίου**: το φορτίο ως συνάρτηση της απόστασης φαίνεται ότι έχει σταθερή πυκνότητα για τον χώρο αραίωσης για τις δυο περιοχές p και n. Όμως η πυκνότητα δεν είναι απαραίτητα ίδια. Επιπλέον, τα δυο φορτία είναι ίσα και αντίθετα.
- (γ) **Ηλεκτρικό Πεδίο**: η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου της ένωσης φαίνεται στο (γ). Είναι μέγιστη ακριβώς στο οριακό σημείο της ένωσης.
- (δ) **Ηλεκτροστατικό Δυναμικό**: η τάση, ως προς την απόσταση από την ένωση, φαίνεται στο (δ). Στα άκρα της διόδου υπάρχει διαφορά δυναμικού ϕ_0 .

Το δυναμικό ϕ_0 δίνεται από τον τύπο: $\phi_0 = \phi_T \cdot \ln((N_a \cdot N_d)/n_i^2)$, όπου

$\phi_T = kT/q = 26\text{mV}$ στα 300K,

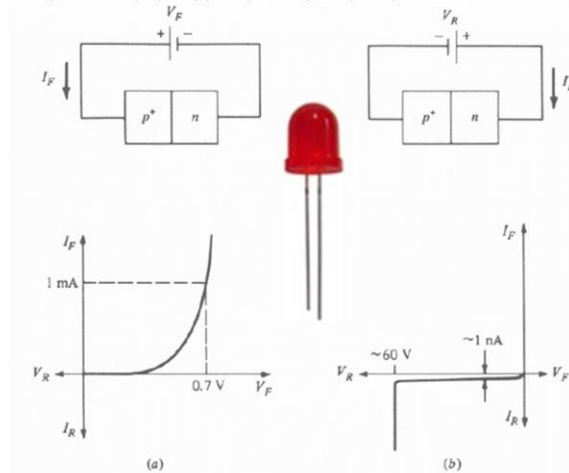
N_a : εναπόθεση ατόμων τύπου δέκτη στο υλικό p ($\#/m^3$),

N_d : εναπόθεση ατόμων τύπου δότη στο υλικό n ($\#/m^3$),

n_i : εγγενής συγκέντρωση φορέων στον ημιαγωγό ($\#/m^3$).

Λειτουργία Διόδου σε Κύκλωμα

- ▶ Η διόδος επιτρέπει την ροή ρεύματος σε μία μόνο κατεύθυνση



▶ 13

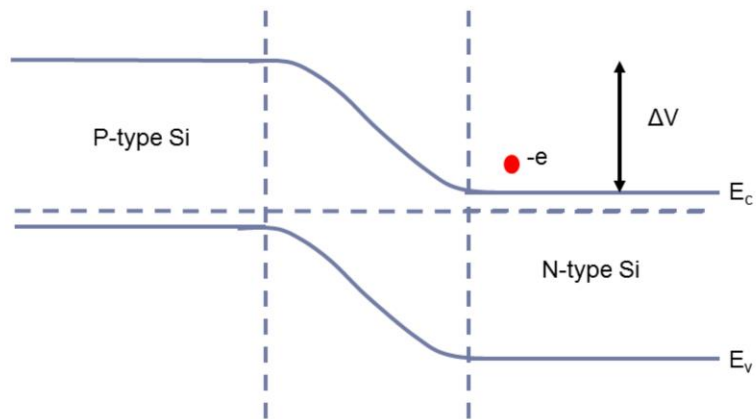
ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Στο παραπάνω Σχήμα φαίνεται η λειτουργία μιας διόδου, όταν σε αυτή εφαρμόζεται θετική (+ στο p, - στο n) και αρνητική διαφορά δυναμικού αντίστοιχα.

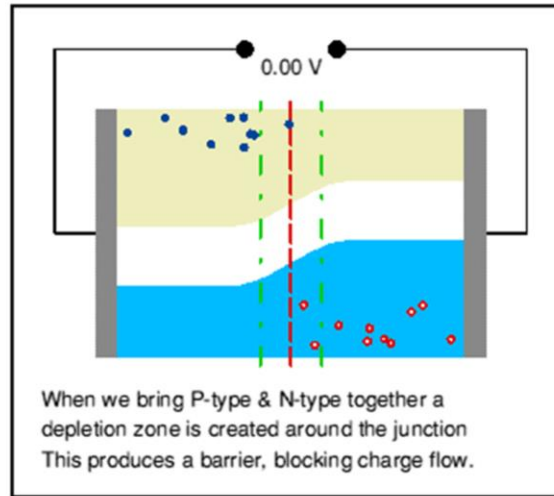
Στην πρώτη περίπτωση, αριστερά, η θετική τάση ταυτόχρονα (α) αντιτίθεται στο εγγενές δυναμικό της ένωσης και (β) ενισχύει το ρεύμα αραιώσης. Κατά συνέπεια όταν η θετική τάση που εφαρμόζεται είναι της τάξης του εγγενούς δυναμικού, ϕ_0 , τότε η παρέχεται ρεύμα μέσω της διόδου όπως φαίνεται στην αριστερή γραφική παράσταση. Η αύξηση του ρεύματος ως συνάρτηση του θετικού δυναμικού είναι εκθετική! Για τις περισσότερες διόδους η τάση κατά την οποία η διόδος μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει ελάχιστη αντίσταση είναι τα **0.7V**.

Αντιθέτως, στην δεύτερη περίπτωση, η αρνητική τάση ταυτόχρονα (α) ενισχύει το εγγενές δυναμικό της ένωσης και ομοίως (β) ενισχύει το ρεύμα έλξης. Κατά συνέπεια μόνο ένα μικρό ρεύμα έλξης παρέχεται μέσω της διόδου, το οποίο συντελείται από τους ελλάσσωνες φορείς. Μόνο σε πολύ μεγάλο αρνητικό δυναμικό (-60V) μπορεί να περάσει ρεύμα από μια διόδο, όπως φαίνεται στην δεξιά γραφική παράσταση.

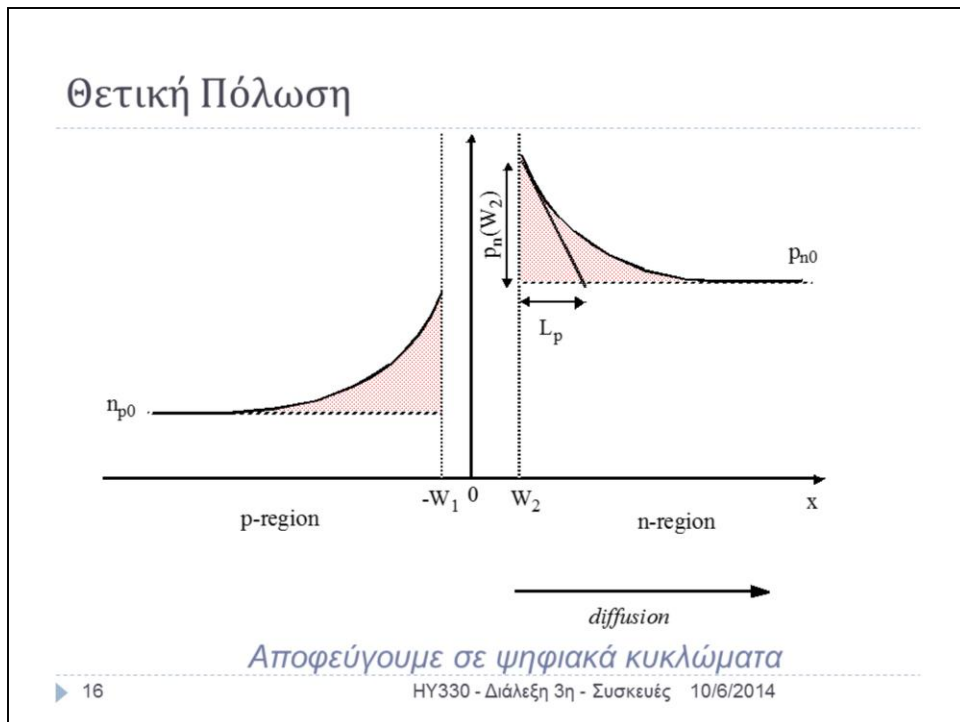
Επίπεδα Fermi στη Δίοδο



Λειτουργία Διόδου

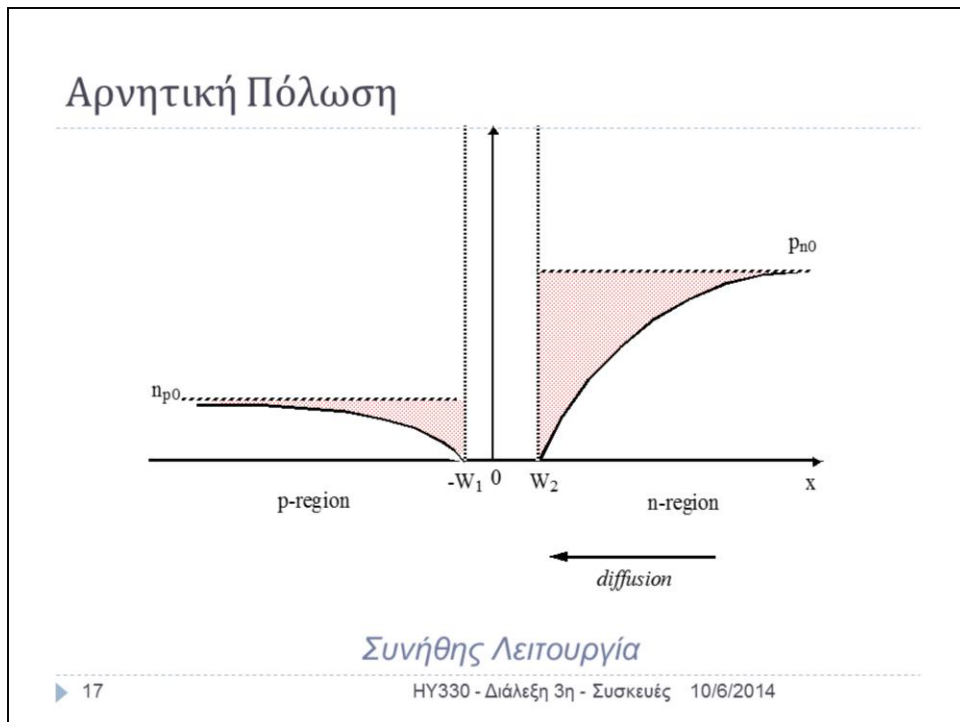


© J. C. G. Lesurf Univ. St. Andrews



Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η συγκέντρωση ελλάσωνων φορέων για τα τμήματα p και n της διόδου συναρτήσει της απόστασης x για θετική πόλωση. Σε αυτή την περίπτωση, οι ελλάσωνες φορείς έχουν πολύ υψηλή συγκέντρωση γύρω από την περιοχή της ένωσης (ρεύμα αραιώσης).

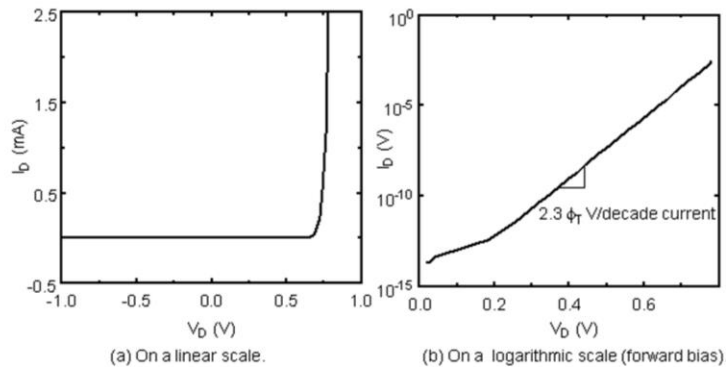
Για το p, ελλάσωνες φορείς είναι τα ηλεκτρόνια που καταφέρνουν να περάσουν την διαφορά δυναμικού της ένωσης. Αντιστοίχως για το n είναι οι οπές.



Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η συγκέντρωση ελλάσωνων φορέων για τα τμήματα p και n της διόδου συναρτήσει της απόστασης x για αρνητική πόλωση. Σε αυτή την περίπτωση, οι ελλάσωνες φορείς έχουν πολύ χαμηλή συγκέντρωση γύρω από την περιοχή της ένωσης (ρεύμα έλξης).

Για το p, ελλάσωνες φορείς είναι τα ηλεκτρόνια που καταφέρνουν να περάσουν την διαφορά δυναμικού της ένωσης. Αντιστοίχως για το n είναι οι οπές.

Εξάρτηση V-I στην Δίοδο



$$I_D = I_S \left(e^{V_D / \Phi_T} - 1 \right)$$

► 18

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

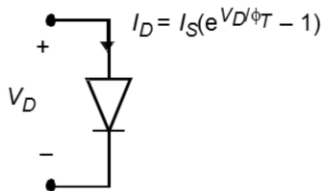
Όπως ειπώθηκε και νωρίτερα, η εξάρτηση του I από το V στην θετικά πολωμένη δίοδο είναι εκθετική, όπως φαίνεται στο πάνω αριστερά γράφημα του ρεύματος, I_D , ως προς το δυναμικό της διόδου, V_D .

Στο πάνω δεξιά γράφημα φαίνεται η εξάρτηση σε λογαριθμική κλίμακα. Το ρεύμα, όπως φαίνεται στο σχήμα, αυξάνεται κατά 10 φορές κάθε $2.3 \Phi_T$ (~60mV) επιπρόσθετης τάσης.

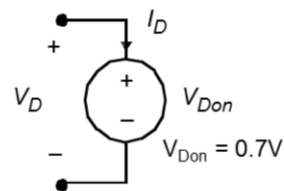
Η εξίσωση του ρεύματος της διόδου εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- I_S είναι μια σταθερά, που αντιστοιχεί στο ρεύμα κόρου της διόδου, είναι ανάλογη στο εμβαδό και συνάρτηση των επιπέδων εμπλουτισμού Na, Nd, και του πλάτους του ουδέτερου χώρου της διόδου. Το I_S συνήθως υπολογίζεται εμπειρικά, και είναι της τάξης των $10^{-17} \text{ A}/\mu\text{m}^2$
- $\Phi_T = 26\text{mV}$, όπως επεξηγήθηκε νωρίτερα.

Αναλυτικά Μοντέλα



(α) Ιδανικό Μοντέλο Διόδου



(β) Απλοϊκό Πρωτογενές Μοντέλο

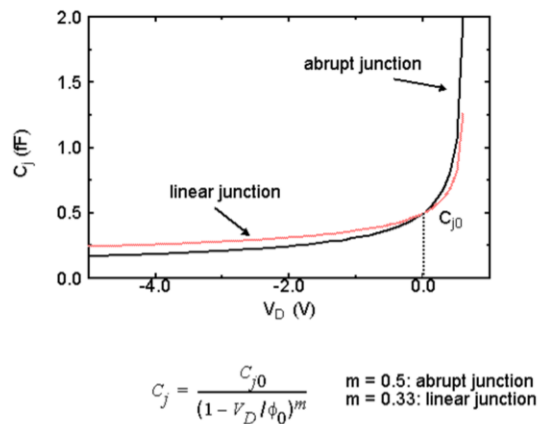
Στα παραπάνω σχήματα βλέπουμε δυο μοντέλα της διόδου.

Το πρώτο, στα αριστερά, αντιστοιχεί απλά στην ίδια την εξίσωση IV της συσκευής. Το βασικό μειονέκτημα του είναι ότι δεν επιτρέπει μια πρωτογενή και διαισθητική ανάλυση του κυκλώματος μια και είναι μη γραμμικό.

Το δεύτερο, απλούστερο μοντέλο, βασίζεται στην παρατήρηση ότι όταν μια δίοδος παρέχει ρεύμα, η τάση της είναι μεταξύ 0.6 και 0.8V, συνεπώς αντιστοιχεί την δίοδο με μια πηγή 0.7V η οποία δέχεται το οποιοδήποτε ρεύμα I_D (θεωρείται ότι η δίοδος δεν εμποδίζει την τιμή του ρεύματος).

Στην περίπτωση του μοντέλου (β), αν αλλάξει η πολικότητα που εφαρμόζεται στην δίοδο, η πηγή 0.7V θα αντικατασταθεί από ανοικτό κύκλωμα, για να επιδείξει την κατάλληλη απόκριση της διόδου.

Χωρητικότητα Ένωσης pn



► 20

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Η (παρασιτική, εγγενής) χωρητικότητα μιας διόδου pn αντιστοιχεί στο φορτίο που πρέπει να μετακινηθεί για κάποια αλλαγή της κατάστασης της διόδου. Έτσι, η χωρητικότητα μπορεί, είτε για μικρές, είτε για μεγαλύτερες αλλαγές του δυναμικού/φορτίου να εκφραστεί ως $C = dQ/dV$, ή $C = \Delta Q/\Delta V$ αντίστοιχα.

Η παραπάνω γραφική παράσταση παρουσιάζει την χωρητικότητα C_j ως συνάρτηση του δυναμικού. Είναι προφανές ότι είναι μη-γραμμική.

Στα ψηφιακά κυκλώματα, οι οποιεσδήποτε διόδοι είναι αντίστροφα στραμμένες, συνεπώς η χωρητικότητα που μας ενδιαφέρει είναι μόνο του χώρου αραίωσης. Η χωρητικότητα του χώρου αραίωσης, ως συνάρτηση της διαφοράς δυναμικού δίνεται από τον παραπάνω τύπο, όπου:

- C_{j0} είναι η χωρητικότητα της διόδου με διαφορά δυναμικού 0V,
- ϕ_0 είναι η εγγενής τάση, όπως επεξηγήθηκε νωρίτερα,
- V_D είναι η διαφορά δυναμικού (V_D αρνητικό για αντίστροφα στραμμένη διόδο),
- m είναι μια σταθερά ανάλογη της μετάβασης p σε n (απότομη ή γραμμικότερη).

Χωρητικότητα Ένωσης pn

- ▶ Για μεγάλες διαφοροποιήσεις της τάσης, ΔV_D , έχουμε:

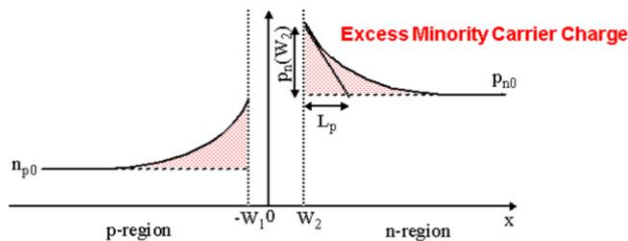
$$C_{eq} = \frac{\Delta Q_j}{\Delta V_D} = \frac{Q_j(V_{high}) - Q_j(V_{low})}{V_{high} - V_{low}} = K_{eq} C_{j0}$$

- ▶ Όπου το K_{eq} υπολογίζεται ως:

$$K_{eq} = \frac{-\phi_0^m}{(V_{high} - V_{low})(1-m)} \left[(\phi_0 - V_{high})^{1-m} - (\phi_0 - V_{low})^{1-m} \right]$$

Η παραπάνω έκφραση χρησιμεύει στον υπολογισμό των παρασιτικών χωρητικοτήτων των διόδων που υπάρχουν στα άκρα των MOS τρανζίστορ.

Χωρητικότητα Διάχυσης

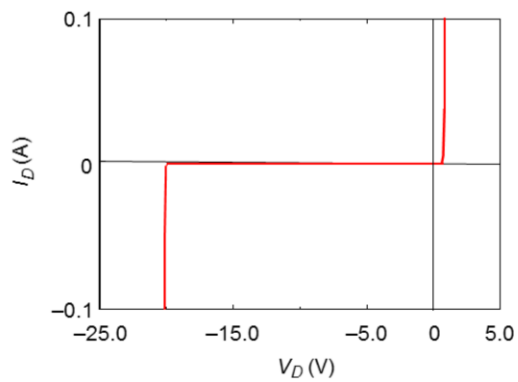


$$C_d = \frac{dQ_D}{dV_D} = \tau_D \frac{dI_D}{dV_D} \approx \frac{\tau_D I_D}{\phi_T}$$

Η χωρητικότητα της διάχυσης είναι η άλλη συνισταμένη της χωρητικότητας και έγκειται στον αριθμό των ελλάσωνων φορέων που βρίσκονται στην διάχυση, και το σχετικό φορτίο που αυτοί αντιπροσωπούν ως μεταβολή για κάθε μεταβολή του V_D .

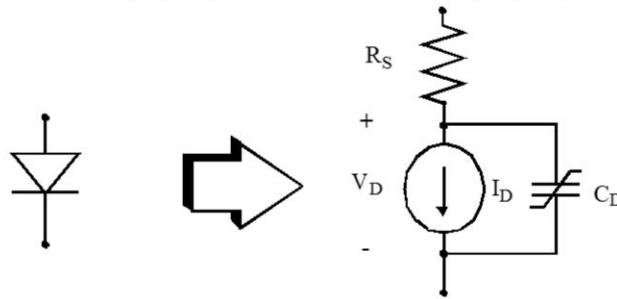
Δεν θα μας απασχολήσει η παραπάνω χωρητικότητα μια και στα ψηφιακά η χωρητικότητα της διόδου κυριαρχείται από αυτήν του χώρου αραίωσης.

Δευτερογενή Φαινόμενα



Avalanche Breakdown

Μοντέλο Διόδου στο SPICE



- ▶ I_D υπολογίζεται από την εξίσωση ρεύματος
- ▶ C_D υπολογίζεται από εξίσωση χωρητικότητας
- ▶ R_S αντιστοιχεί στην αντίσταση σε σειρά της διόδου

Παράμετροι SPICE Διόδου

Parameter Name	Symbol	SPICE Name	Units	Default Value
Saturation current	I_S	IS	A	1.0 E-14
Emission coefficient	n	N	-	1
Series resistance	R_S	RS	Ω	0
Transit time	τ_T	TT	sec	0
Zero-bias junction capacitance	C_{j0}	CJ0	F	0
Grading coefficient	m	M	-	0.5
Junction potential	ϕ_0	VJ	V	1

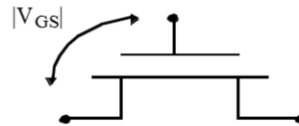
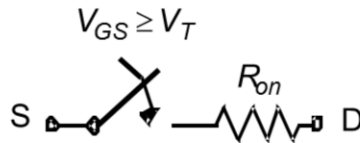
First Order SPICE diode model parameters.

Τι είναι το τρανζίστορ;

Διακόπτης!



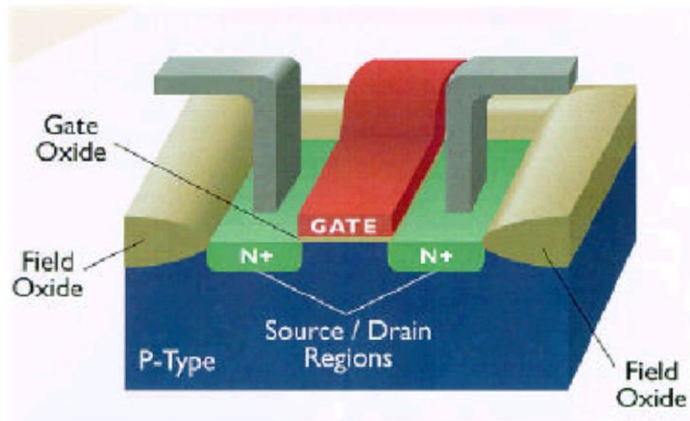
Ένα MOS Τρανζίστορ



Η βασική λειτουργία του τρανζίστορ είναι να διακόπτει ή να επιτρέπει την παροχή ρεύματος μεταξύ των δυο του άκρων, βάση του δυναμικού στην πύλη του, είναι δηλαδή ένας ηλεκτρικός διακόπτης ελεγχόμενος μέσω της τάσης που εφαρμόζεται στην πύλη του τρανζίστορ.

Ένα τρανζίστορ δεν μπορεί να περάσει άπειρο ρεύμα, μια και περιορίζεται από τα ηλεκτρικά του χαρακτηριστικά, όπως μέγεθος, αγωγιμότητα του υλικού, αριθμός φορέων, κτλ. μπορούμε να θεωρήσουμε μια εγγενή του αντίσταση, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.

Τρισδιάστατη όψη Τρανζίστορ MOSFET



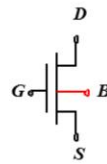
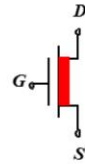
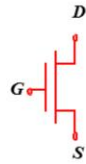
▶ 27

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

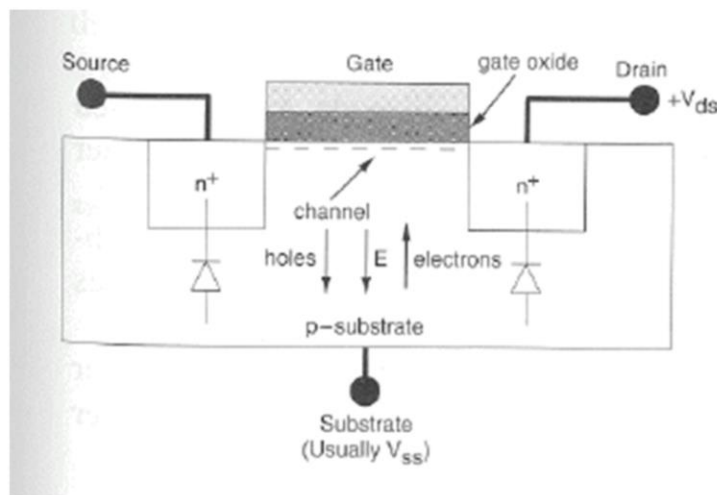
Στο παραπάνω σχήμα διακρίνουμε τα βασικά χαρακτηριστικά του τρανζίστορ. Αποτελείται από δυο περιοχές n^+ , την πηγή (source) και την καταβόθρα (drain) οι οποίες βρίσκονται ενσωματωμένες (από κατασκευής, μέσω διάχυσης των κατάλληλων ατόμων) σε ένα υπόστρωμα p . Ανάμεσα στα δυο άκρα βρίσκεται η πύλη του τρανζίστορ, ένα στρώμα πολύ-πυριτίου, η οποία διαχωρίζεται από το p υπόστρωμα από μια λεπτή στρώση SiO_2 , σχηματίζοντας έτσι ένα πυκνωτή μεταξύ πολύ-πυριτίου-οξέως-ημιαγωγού (p).

Το παραπάνω τρανζίστορ ονομάζεται τύπου n . Η εφαρμογή τάσης στην πύλη, θα δημιουργήσει ένα κανάλι n , μαζεύοντας ελλείψεις φορείς του p , το οποίο μπορεί να επιτρέψει την παροχή ρεύματος μεταξύ s και d . Στα τελευταία συνδέονται μεταλλικές συνδέσεις (γκρι) και το όλο τρανζίστορ είναι μονωμένο από τα παραπάνω στρώματα με ένα παχύ στρώμα διοξειδίου του πυριτίου.

MOS Τρανζίστορ – Τύποι, Σύμβολα



Δομή NMOS Τρανζίστορ



▶ 29

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

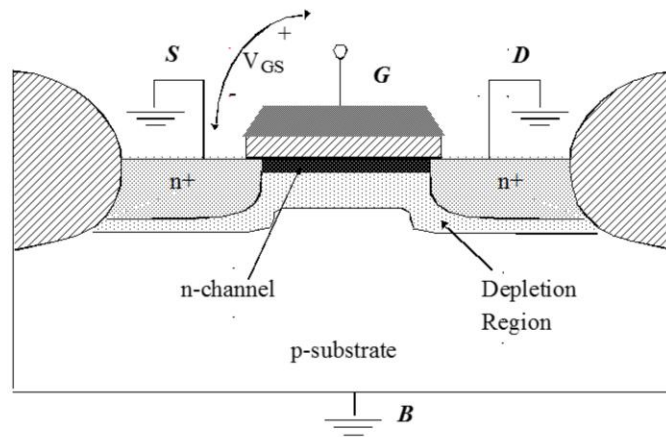
Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε μια κάθετη τομή του nmos τρανζίστορ, όπου διακρίνονται οι τέσσερις επαφές του, η πύλη, τα δυο άκρα, s και d, και η σύνδεση του υποστρώματος. Η τελευταία συνδέεται για όλα τα n ή p τρανζίστορ στην γείωση και στην τάση της πηγής αντίστοιχα, έτσι ώστε το υπόστρωμα να έχει ανάλογο δυναμικό με το s.

Παρατηρήστε ότι η δομή n+/p των δυο άκρων του τρανζίστορ αντιστοιχεί σε αντίστροφα στραμμένες διόδους. Έτσι δεν περνάει ρεύμα από αυτά προς το υπόστρωμα, όμως από τα προηγούμενα ξέρουμε τις ιδιότητες αυτών των παρασιτικών διόδων, λ.χ. χωρητικότητα.

Δομή NMOS Τρανζίστορ

- ▶ Υπόστρωμα ελαφριάς πυκνότητας p
- ▶ 2 σημεία υψηλής πυκνότητας n
- ▶ Η περιοχή μεταξύ τους ονομάζεται «κανάλι»
- ▶ Το κανάλι καλύπτεται από λεπτό μονωτικό στρώμα SiO_2
- ▶ Ακριβώς από πάνω βρίσκεται ένα ηλεκτρόδιο πολυ-Si και ονομάζεται πύλη
- ▶ Το SiO_2 δέν επιτρέπει ροή ρεύματος μεταξύ πύλης και καναλιού

Τάση Κατωφλίου – Threshold Voltage



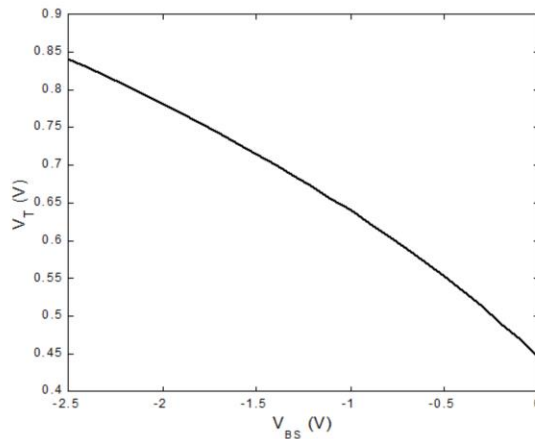
10/6/2014

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσσκευές 31

Εφαρμόζοντας τάση στην πύλη μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα χώρο αραιώσης μεταξύ s και d (ανάλογο της διόδου). Συνεχίζοντας να αυξάνουμε το δυναμικό της πύλης μπορούμε να έλξουμε ελάχισσωνες φορείς από το p υπόστρωμα, έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα προσωρινό κανάλι n κάτω από το λεπτό οξειδίο.

Ως τάση κατωφλίου ορίζουμε το δυναμικό στην πύλη που είναι ικανό να δημιουργήσει αυτό το λεπτό κανάλι n, να πετύχει δηλαδή ισχυρή αντιστροφή του p σε n.

Φαινόμενο Σώματος - The Body Effect



▶ 32

ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Το σημαντικό ως προς την τιμή του δυναμικού κατωφλίου είναι ότι αλλάζει ανάλογα με την τάση στο υπόστρωμα.

Εξετάζουμε τιμές του $V_{BS} < 0$ μια και το V_{BS} δεν επιτρέπεται ποτέ να γίνει μεγαλύτερο του 0, και συγκεκριμένα μεγαλύτερο του 0.6V, μια και αυτό θα άναβε την δίοδο BS και θα περνούσε ρεύμα από το s στο υπόστρωμα.

Έτσι, εξετάζοντας αρνητικές τιμές του V_{BS} βλέπουμε στον άξονα y ότι το δυναμικό κατωφλίου ανεβαίνει.

Ο λόγος είναι ότι η όσο δίοδος s-υποστρώματος δέχεται περισσότερο αρνητική τάση, τόσο μεγαλώνει ο χώρος αραίωσης της (σπρώχνοντας έξω μείζονες φορείς), με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερο δυναμικό στην πύλη για να δημιουργηθεί εκεί το κανάλι. Η παρατήρηση είναι σημαντική στις περιπτώσεις όπου το s είναι σε μεγαλύτερο δυναμικό από το υπόστρωμα (σε λογικές πύλες).

Τάση Κατωφλίου – Εξάρτηση στο V_{SB}

$$V_T = \phi_{ms} - 2\phi_F - \frac{Q_B}{C_{ox}} - \frac{Q_{SS}}{C_{ox}} - \frac{Q_I}{C_{ox}}$$

Workfunction Difference
Depletion Layer Charge
Surface Charge
Implants

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

with

$$V_{T0} = \phi_{ms} - 2\phi_F - \frac{Q_{B0}}{C_{ox}} - \frac{Q_{SS}}{C_{ox}} - \frac{Q_I}{C_{ox}}$$

and

$$\gamma = \frac{\sqrt{2q\epsilon_{si}N_A}}{C_{ox}}$$

▶ 33

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

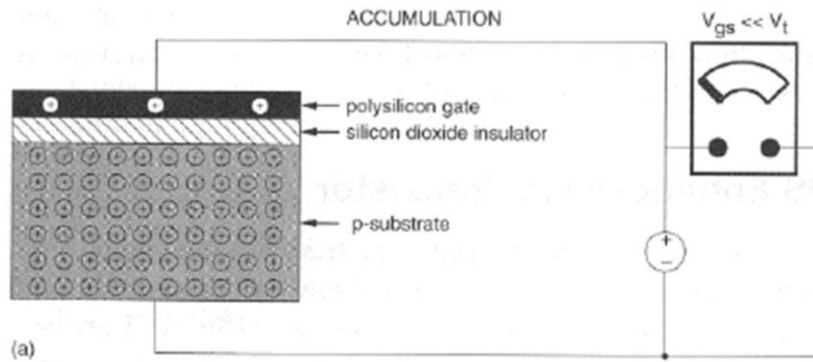
Έτσι βλέπουμε ότι γενικά:

V_t εξαρτάται από το V_{t0} έναν συντελεστή γ , το δυναμικό V_{SB} και παραμέτρους του ημιαγωγού.

Τυπικές τιμές των $2\phi_F$ και γ είναι 0.6V και 0.4 αντίστοιχα για NMOS (το γ είναι αρνητικό για PMOS).

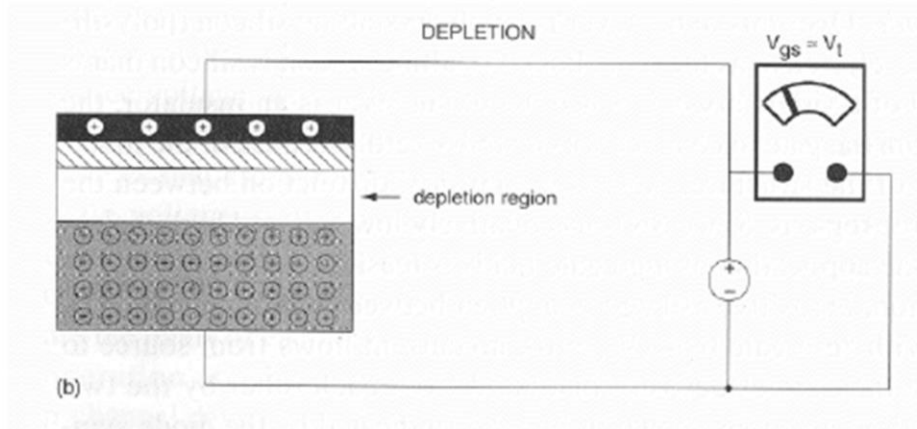
Λειτουργία Πύλης NMOS

- Συσσώρευση όταν $V_{gs} \ll V_T$



Λειτουργία Πύλης NMOS

- ▶ Αραίωση όταν $V_{gs} \approx V_T$

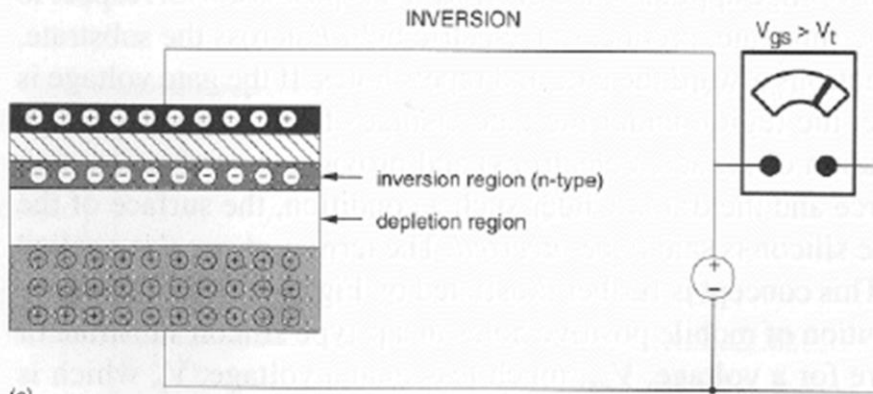


▶ 35

ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Λειτουργία Πύλης NMOS

- ▶ Αντιστροφή όταν $V_{gs} > V_T$

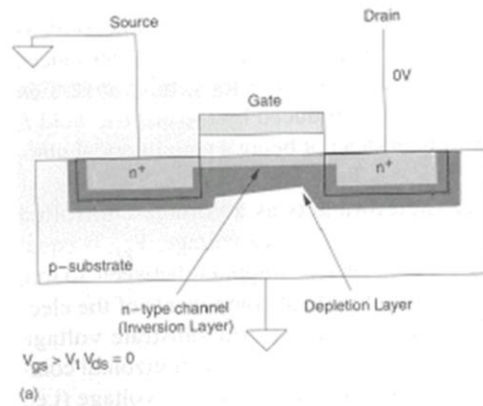


▶ 36

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Λειτουργία NMOS Τρανζίστορ

- ▶ Αν $V_{gs} > V_T$ αλλά $V_{ds} = 0$

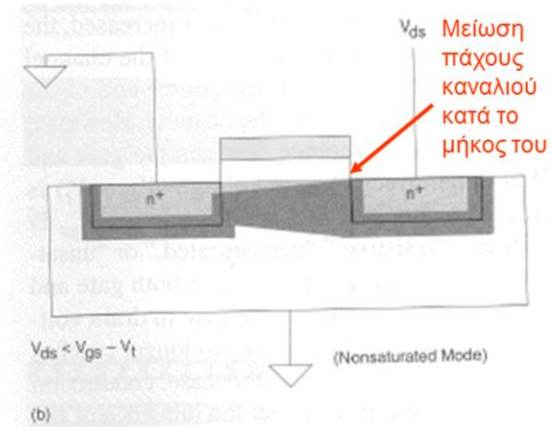


▶ 37

ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Λειτουργία NMOS Τρανζίστορ

► Αν $V_{ds} < V_{gs} - V_T$

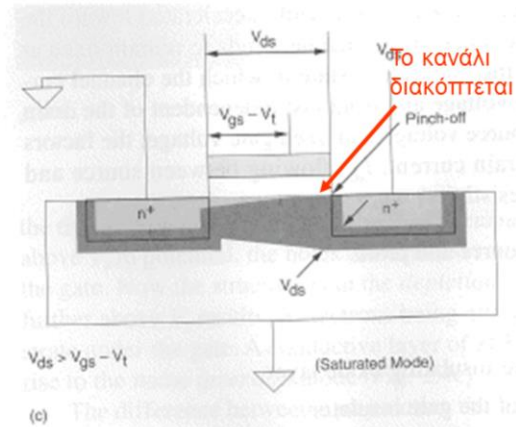


► 38

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Λειτουργία NMOS Τρανζίστορ

► Αν $V_{ds} \geq V_{gs} - V_T$



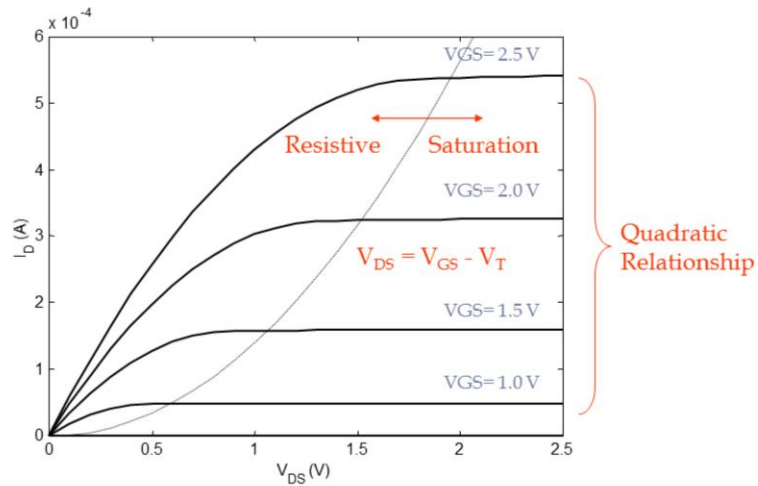
► 39

ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Λειτουργία NMOS Τρανζίστορ

- ▶ Βασίζεται στην επιρροή του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργεί η πύλη (FET)
- ▶ Μια συσκευή MOS είναι ένας διακόπτης ελεγχόμενος από το V_{gs}
- ▶ Άν $V_{gs} = 0$, τότε $I_{ds} = \sim 0$
- ▶ Άν $V_{gs} \geq V_T$, και $V_{ds} > 0$, τότε υπάρχει ροή ηλεκτρονίων
- ▶ Η αύξηση του δυναμικού V_{ds} επηρεάζει την μορφή του καναλιού:
 - ▶ Στο άκρο εισροής (πηγή) η διαφορά είναι V_{gs}
 - ▶ Στο άκρο εκροής (καταβόθρα) η διαφορά είναι V_{gd}
- ▶ Άν $V_{gd} < V_T$, τότε το κανάλι διακόπτεται

Καμπύλη IV ενός τρανζίστορ

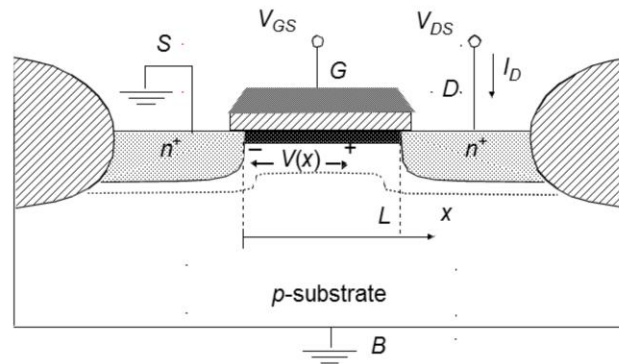


► 41

ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

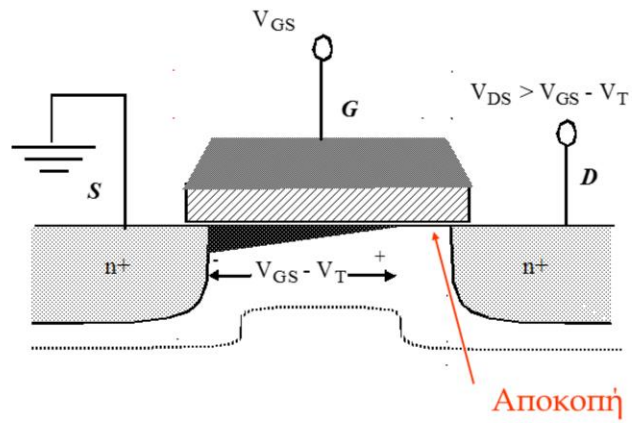
Η παράμετρος λ είναι η κλίση του I_D ως προς το V_{DS} στον κορεσμό.

Τρανζίστορ στην γραμμική περιοχή



Τάσεις MOS στην γραμμική περιοχή

Τρανζίστορ σε κόρο



Βασικές Σχέσεις IV Τρανζίστορ

Linear Region: $V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$

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

with

$$k'_n = \mu_n C_{ox} = \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

Process Transconductance
Parameter

Saturation Mode: $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$

$$I_D = \frac{k'_n W}{2 L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

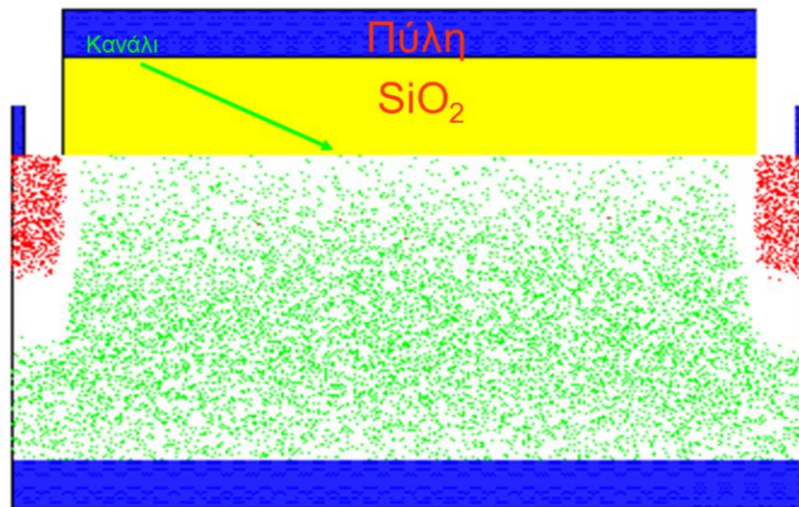
Channel Length Modulation

Οι παραπάνω εξισώσεις αποτελούν τις βασικές εξισώσεις IV τρανζίστορ μακριού καναλιού. Αφορούν ένα τρανζίστορ ημος (για το ρπος είναι ανάλογες, με αντίστροφο το V_t).

Οι συντελεστές της εξίσωσης είναι οι εξής:

- W , L είναι το πλάτος και το μήκος της ενεργής περιοχής του τρανζίστορ (κάτω από την πύλη),
- V_{gs} , V_{ds} είναι οι διαφορές δυναμικού gs και ds αντίστοιχα. Μπορούμε να ορίσουμε και $V_{gd} = V_g - V_d$ για να υπολογίσουμε τότε παύει το κανάλι.
- k'_n είναι μια παράμετρος της διεργασίας η οποία εξαρτάται από την κινητικότητα των φορέων, μ_n , και την χωρητικότητα ανά μονάδα εμβαδού $C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox}$, όπου ϵ_{ox} ή διηλεκτρική σταθερά του οξέως και t_{ox} το πάχος του.
- Η παράμετρος λ είναι η κλίση του I_D ως προς το V_{ds} στον κορεσμό.

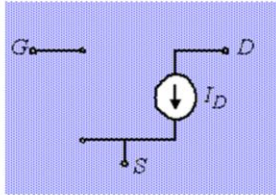
Τρανζίστορ σε λειτουργία



▶ 45

ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσσκευές 10/6/2014

Μοντέλο MOSFET Τρανζίστορ



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

$$I_D = \frac{\kappa'_n W}{2 L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$$V_{DS} < V_{GS} - V_T$$

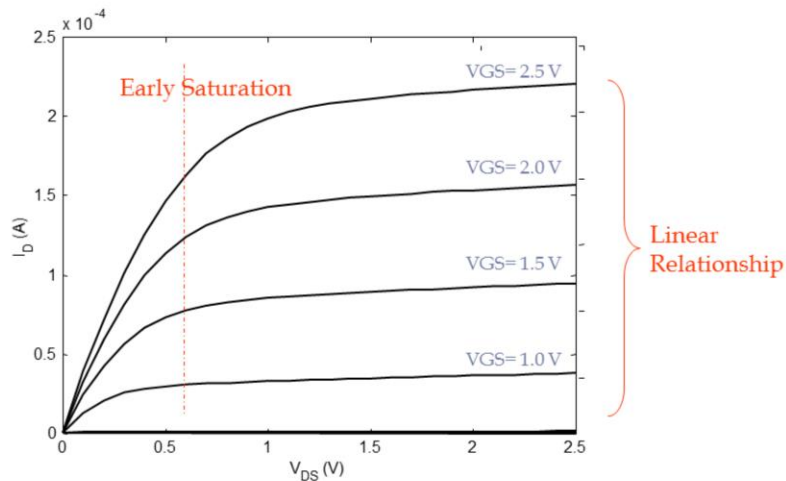
$$I_D = \kappa'_n \frac{W}{L} \left((V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right)$$

with

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

Το μοντέλο του τρανζίστορ παραπάνω απομονώνει την πύλη από τα s και d, ως ανοικτό κύκλωμα, μια και δεν περνάει ρεύμα μεταξύ τους. Θεωρεί I_d μια πηγή ρεύματος με της ανάλογες εξισώσεις στις δυο περιοχές λειτουργίας, γραμμική και κορεσμού.

Καμπύλες IV σε DSM Τρανζίστορ



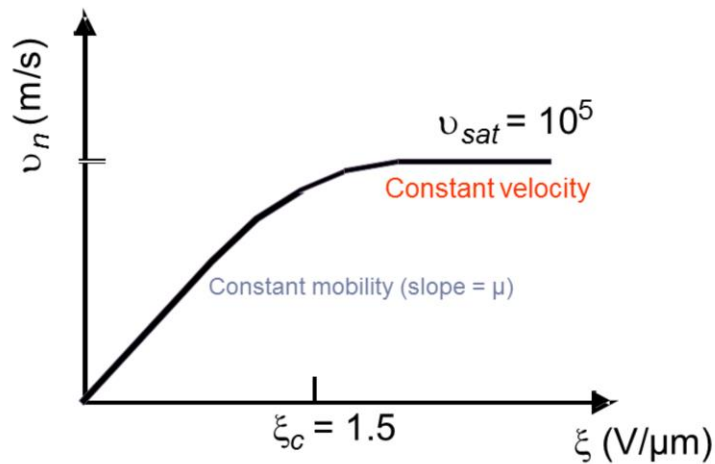
► 47

ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Στα τρανζίστορ πολύ μικρού μεγέθους (πύλη $\leq 1 \mu\text{m}$), η συμπεριφορά των χαρακτηριστικών καμπυλών $I_D/V_{DS}/V_{GS}$ αλλάζει, έτσι ώστε το ρεύμα σε κορεσμό δεν είναι πλέον ανάλογο του τετραγώνου του V_{GS} .

Αυτό οφείλεται σε ένα φαινόμενο που ονομάζεται κόρος ταχύτητας (velocity saturation).

Κόρος Ταχύτητας

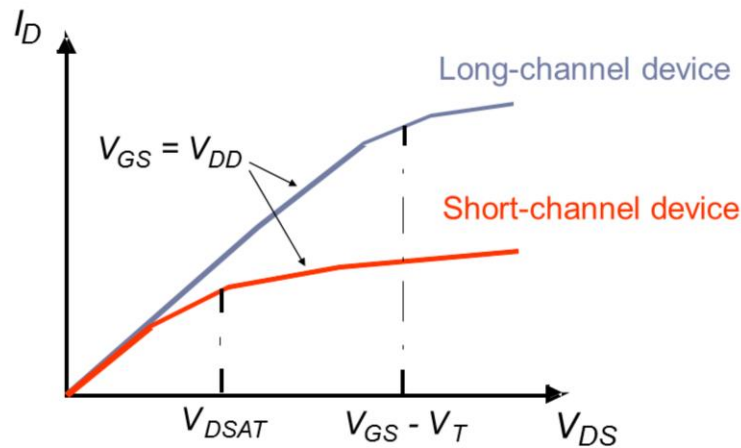


▶ 48

ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Ο κόρος ταχύτητας εμφανίζεται όταν το ηλεκτρικό πεδίο ανά μ m, μεταξύ d και s , ξ , είναι ισχυρότερο μιας κρίσιμης τιμής, ξ_c . Τότε, η ταχύτητα των φορέων επηρεάζεται από τοπικές κρούσεις μεταξύ τους, με αποτέλεσμα η ταχύτητα να κορένεται, όπως και φαίνεται στο παραπάνω σχήμα.

Σύγκριση



▶ 49

ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Πρακτικά, αυτό που συμβαίνει στα τρανζίστορ μικρής κλίμακας είναι το εξής. Όταν το V_{ds} φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή V_{dsat} , η ταχύτητα κορένεται, με αποτέλεσμα να κορένεται και το ρεύμα, σε μικρότερη τιμή από ότι των ανάλογων τρανζίστορ μεγάλης κλίμακας.

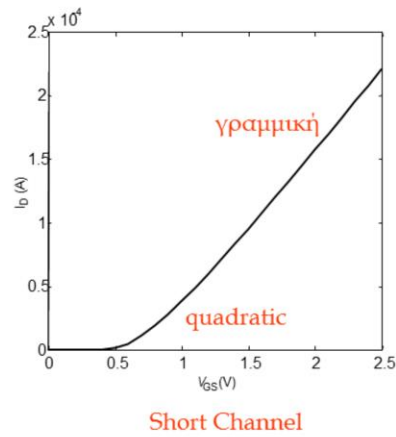
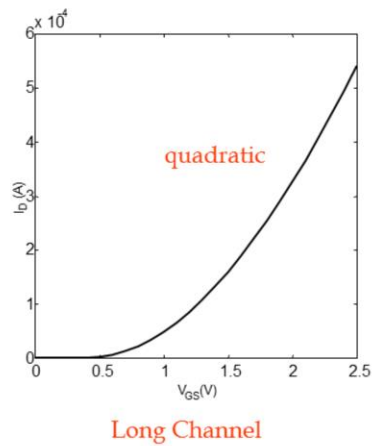
Παρατηρούμε ότι ο κορεσμός στο V_{dsat} είναι πριν το V_{ds} να φτάσει το $V_{gs} - V_t$.

Έτσι, για τρανζίστορ μικρής κλίμακας ΔΕΝ ισχύει η εξίσωση ρεύματος κορεσμού:

$I_d = K'nW/2L (V_{gs} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{ds})$, αλλά μια τροποποιημένη, συναρτήσει του V_{dsat}

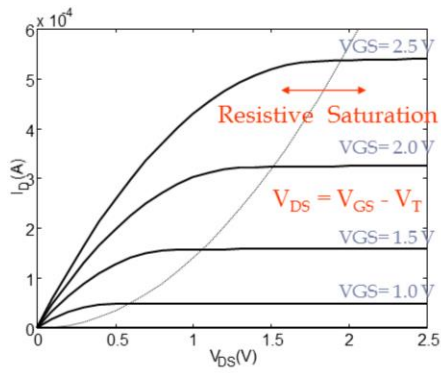
$$I_d = K'W/L [(V_{gs} - V_t)V_{dsat} - V_{dsat}^2/2].$$

I_D και V_{GS}

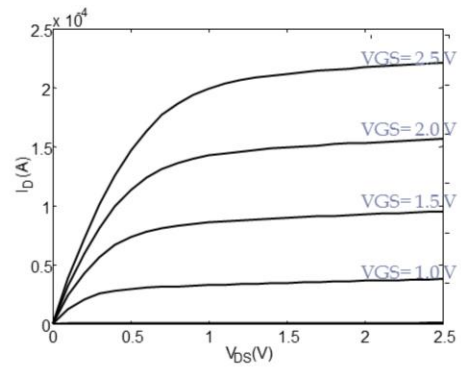


Παραπάνω βλέπουμε την διαφοροποίηση I_D , V_{GS} για τρανζίστορ μακριού και κοντού καναλιού.

I_D και V_{DS}

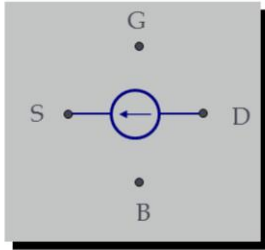


Long Channel



Short Channel

Καθολικό Μοντέλο MOSFET



$$I_D = 0 \text{ for } V_{GT} \leq 0$$

$$I_D = k' \frac{W}{L} \left(V_{GT} V_{min} - \frac{V_{min}^2}{2} \right) (1 + \lambda V_{DS}) \text{ for } V_{GT} \geq 0$$

$$\text{with } V_{min} = \min(V_{GT}, V_{DS}, V_{DSAT}),$$

$$V_{GT} = V_{GS} - V_T,$$

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

► 52

ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Το παραπάνω αναλυτικό, καθολικό μοντέλο συμπεριλαμβάνει και τις τρεις εξισώσεις, γραμμική, κορεσμό, κορεσμό ταχύτητας μέσω του \min .

Εδώ πρακτικά προκύπτουν και οι τρεις εξισώσεις ως εξής:

- Αν $(V_{gs} - V_t < V_{dsat})$ και $(V_{gs} - V_t > V_{ds})$ τότε το τρανζίστορ βρίσκεται στην **γραμμική περιοχή**, δηλ.

$$I_D = k' \frac{W}{L} [(V_{gs} - V_t)V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2}] (1 + \lambda V_{ds}),$$

- Αν $(V_{gs} - V_t < V_{dsat})$ και $(V_{gs} - V_t < V_{ds})$, τότε το τρανζίστορ βρίσκεται στην **περιοχή κορεσμού**, δηλ.

$$I_D = k' \frac{W}{L} [\frac{(V_{gs} - V_t)^2}{2}] (1 + \lambda V_{ds}),$$

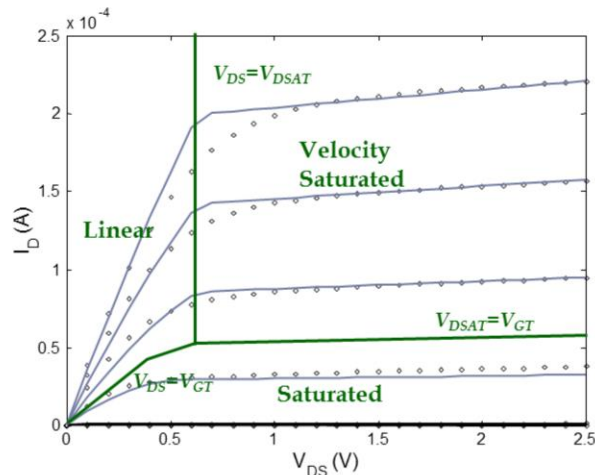
- Αν $(V_{gs} - V_t > V_{dsat})$ και $(V_{gs} - V_t > V_{ds})$ και $(V_{ds} < V_{dsat})$, τότε το τρανζίστορ βρίσκεται στην **γραμμική περιοχή**, δηλ.

$$I_D = k' \frac{W}{L} [(V_{gs} - V_t)V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2}] (1 + \lambda V_{ds}),$$

- Αν $(V_{gs} - V_t > V_{dsat})$ και $(V_{ds} > V_{dsat})$, τότε το τρανζίστορ βρίσκεται στην περιοχή **κορεσμού ταχύτητας**, δηλ.

$$I_d = k' W/L [(V_{gs} - V_t)V_{dsat} - V_{dsat}^2/2] (1 + \lambda V_{ds})$$

Απλό μοντέλο και SPICE



► 53

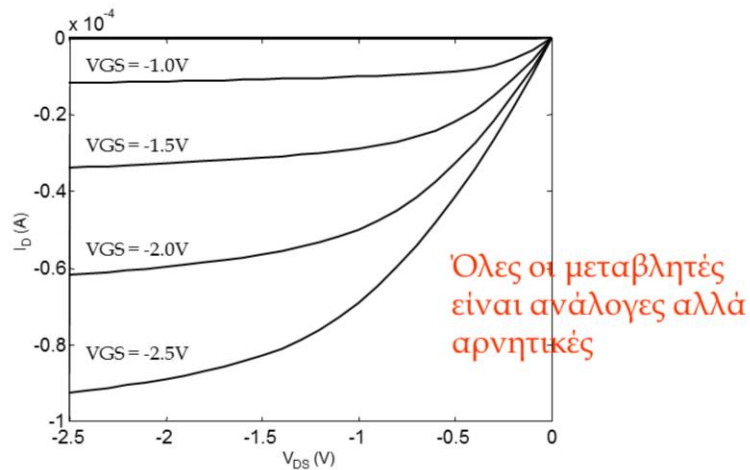
ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Βλέπουμε στο παραπάνω σχήμα αναλυτικά τις περιοχές που καλύπτει η προηγούμενη εξίσωση.

Η κάτω περιοχή, όπου $V_{GS} - V_t = V_{DS}$ και $V_{GS} - V_t < V_{DSAT}$ είναι η περιοχή του κορεσμού.

Η αριστερά-πάνω περιοχή, όπου $V_{DS} < V_{DSAT}$ είναι η γραμμική περιοχή, ενώ η περιοχή όπου $V_{GS} - V_t > V_{DSAT}$ και $V_{DS} > V_{DSAT}$ είναι η περιοχή κόρου ταχύτητας.

Τρανζίστορ PMOS



▶ 54

ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Μέχρι τώρα εξετάζαμε αποκλειστικά τρανζίστορ npmos. Για τα pmos ισχύουν ακριβώς τα ίδια με την διαφορά ότι η p+, n, p+ δομή τους συνεπάγεται ότι (α) η πηγή έχει το υψηλότερο δυναμικό, αντί το χαμηλότερο, (β) το V_t είναι αρνητικό αντί για θετικό.

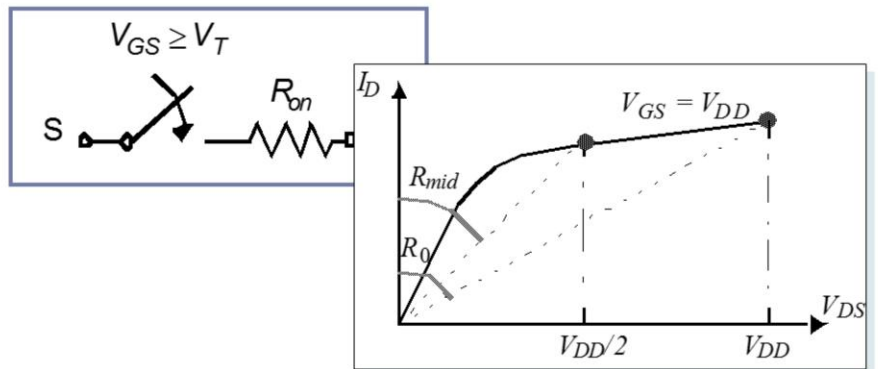
Παράμετροι ενός μοντέλου 0,25μm

Table 3.2 Parameters for manual model of generic 0.25 μm CMOS process (minimum length device).

	V_{TO} (V)	γ (V ^{0.5})	V_{DSAT} (V)	K' (A/V ²)	λ (V ⁻¹)
NMOS	0.43	0.4	0.63	115×10^{-6}	0.06
PMOS	-0.4	-0.4	-1	-30×10^{-6}	-0.1

Οι παραπάνω παράμετροι ισχύουν για τα μοντέλα nmos/pmos επιπέδων 1-3

Τρανζίστορ ως Διακόπτης



$$R_{eq} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{DD}}{I_{D,sat}(1 + \lambda V_{DD})} + \frac{V_{DD}/2}{I_{D,sat}(1 + \lambda V_{DD}/2)} \right) \approx \frac{3}{4} \frac{V_{DD}}{I_{D,sat}} \left(1 - \frac{5}{6} \lambda V_{DD} \right)$$

► 56

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

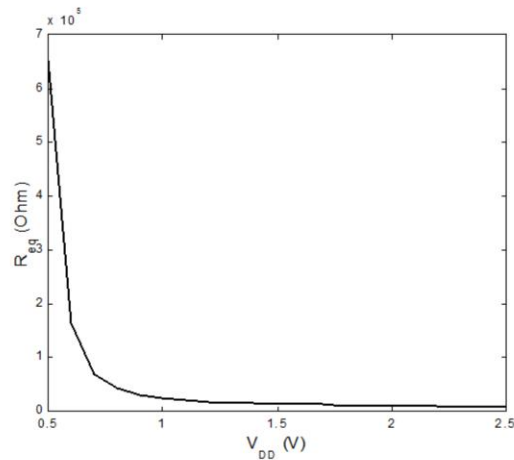
Εδώ εξετάζουμε την αντιστοιχία τρανζίστορ και αντίστασης. Έτσι, θέλουμε να βρούμε μια ισοδύναμη, μέση τιμή αντίστασης για το τρανζίστορ κατά την περίπτωση φόρτισης ή εκφόρτισης μιας χωρητικότητας.

Αν εξετάσουμε την εκφόρτιση μιας χωρητικότητας παρατηρούμε ότι (α) η αρχική τιμή είναι V_{DD} , ενώ (β) η τελική είναι $V_{DD}/2$ (βάση της σύμβασης της καθυστέρησης). Έτσι, και στις δυο περιπτώσεις ένα τρανζίστορ η βρίσκεται σε συνθήκες κορεσμού ταχύτητας, άρα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την σχετική εξίσωση ρεύματος και να υπολογίσουμε την αντίσταση ως $R = \Delta V / \Delta I$.

Επιπλέον είναι πολύ σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι:

R αντιστρόφως ανάλογο με το W, και ανάλογο με το L, άρα ως σχεδιαστές αυτός είναι ο μόνος τρόπος να ελέγξουμε την αντίσταση ενός τρανζίστορ.

Τρανζίστορ ως Διακόπτης



► 57

ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Παραπάνω βλέπουμε γράφημα της ισοδύναμης αντίστασης ενός nmos τρανζίστορ ελάχιστου μεγέθους, όπου εφαρμόζουμε $V_{ds} = V_{dd}$ σε εκφόρτιση πυκνωτή και μετράμε $V_{dd} \rightarrow V_{dd}/2$ ενώ και $V_{gs} = V_{dd}$.

Τρανζίστορ ως Διακόπτης

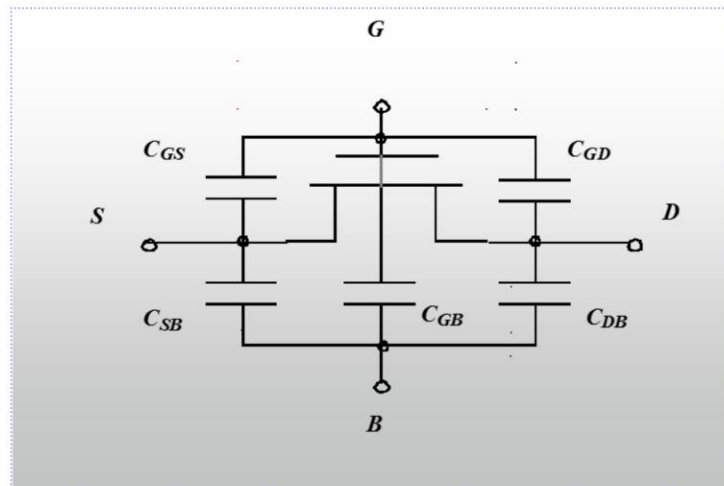
Table 3.3 Equivalent resistance R_{eq} ($W/L = 1$) of NMOS and PMOS transistors in 0.25 μm CMOS process (with $L = L_{min}$). For larger devices, divide R_{eq} by W/L .

V_{DD} (V)	1	1.5	2	2.5
NMOS ($k\Omega$)	35	19	15	13
PMOS ($k\Omega$)	115	55	38	31

Παραπάνω φαίνεται η ισοδύναμη, μέση, αντίσταση για τρανζίστορ σε διεργασία 0.25 μm με $W = L = 1$.

Για τρανζίστορ με μέγεθος W/L η ισοδύναμη R υπολογίζεται ως $R \cdot (L/W)$. Αυτή η παρατήρηση είναι σημαντική για όταν θα φτιάξουμε ένα κύκλωμα και θέλουμε είτε να προσεγγίσουμε την αντίσταση των τρανζίστορ του, είτε να την τροποποιήσουμε/βελτιστοποιήσουμε.

Δυναμική Συμπεριφορά MOS Τρανζίστορ

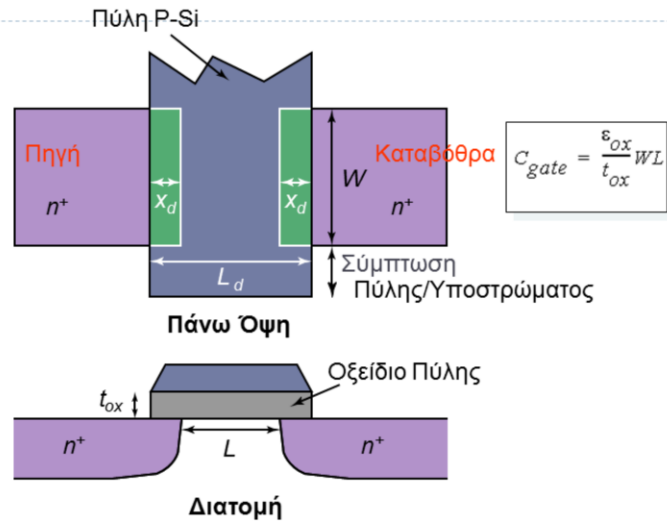


► 59

ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Η δυναμική λειτουργία ενός τρανζίστορ, δηλαδή οι γρήγορες εναλλαγές των σχετικών ηλεκτρικών του σημάτων, είναι συνάρτηση των εγγενών του χαρακτηριστικών, και όπως και στην δίοδο η ταχύτητα δυναμικής λειτουργίας εξαρτάται από τον χρόνο που απαιτείται για να εκφορτιστούν και να φορτιστούν οι εγγενείς, παρασιτικές χωρητικότητες του mosfet.

Χωρητικότητα της Πύλης



▶ 60

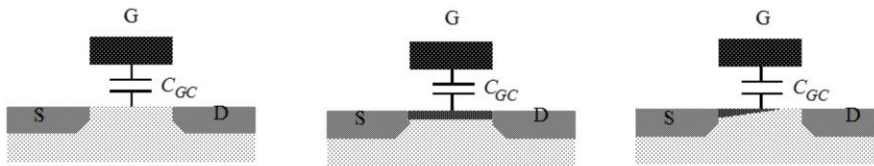
ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Ο πρώτος, και ισχυρός παράγοντας χωρητικότητας, μια και αυτή είναι και η ίδια της η λειτουργία, είναι η πύλη.

Μια πύλη σχηματίζει δυο συνολικά συνιστώσες χωρητικότητας: (α) την λεγόμενη χωρητικότητα επικάλυψης, η οποία έχει να κάνει με την συμμετρική επικάλυψη του καναλιού, δεξιά και αριστερά, από ένα μικρό τμήμα της πύλης (x_d), και ισούται με $CG_{So} = CG_{Do} = C_{ox} \cdot x_d \cdot W = C_o \cdot W$, όπου δίνονται παράμετροι C_{gso} , C_{dso} ως χωρητικότητα να μονάδα πλάτους, και (β) την χωρητικότητα του ιδίου του καναλιού.

Η τελευταία είναι ισχυρά μεταβλητή και εξαρτάται από τα δυναμικά που εφαρμόζονται στα άκρα της συσκευής.

Χωρητικότητα της Πύλης



Operation Region	C_{gb}	C_{gs}	C_{gd}
Cutoff	$C_{ox}WL_{eff}$	0	0
Triode	0	$C_{ox}WL_{eff}/2$	$C_{ox}WL_{eff}/2$
Saturation	0	$(2/3)C_{ox}WL_{eff}$	0

Σημαντικές Περιοχές λειτουργίας για Ψηφιακά Κυκλώματα:
Κόρος και Αποκοπή

► 61

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

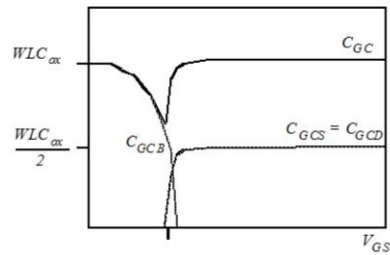
Το παραπάνω διάγραμμα παρουσιάζει τις ιδιότητες της μεταβαλλόμενης χωρητικότητας του καναλιού.

Στην περίπτωση που το τρανζίστορ είναι σβηστό, η χωρητικότητα του καναλιού εμφανίζεται ως χωρητικότητα μεταξύ της πύλης και του υποστρώματος, και η τιμή της είναι $c_{ox}.W.L_{eff}$, όπου L_{eff} το κυριολεκτικό μήκος του καναλιού.

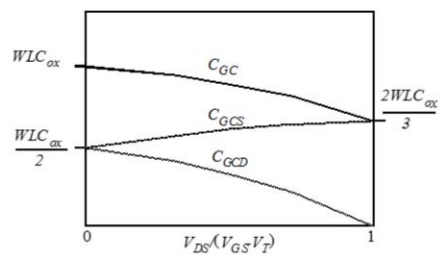
Στην περίπτωση που το τρανζίστορ βρίσκεται στην γραμμική περιοχή η χωρητικότητα του καναλιού μπορεί να θεωρηθεί ως επιμέρους χωρητικότητες C_{gcs} , C_{gcd} , μια και το κανάλι βρίσκεται σε ηλεκτρική επαφή με τα d, s. Έτσι, μπορούμε να θεωρήσουμε προσεγγιστικά ότι η χωρητικότητα του καναλιού διαμοιράζεται στα d, s.

Τέλος, στην περίπτωση του κορεσμού, που έχουμε αποκοπή του καναλιού στο d, η χωρητικότητα είναι στραμμένη προς το s, λόγω της προκύπτουσας δομής. Δεν θα φτάσει όμως την συνολική τιμή, $c_{ox}.W.L_{eff}$. Προσεγγιστικά, θεωρούμε ότι φτάνει τα 2/3 της τελευταίας για έναν τυπικό κορεσμό.

Χωρητικότητα Πύλης

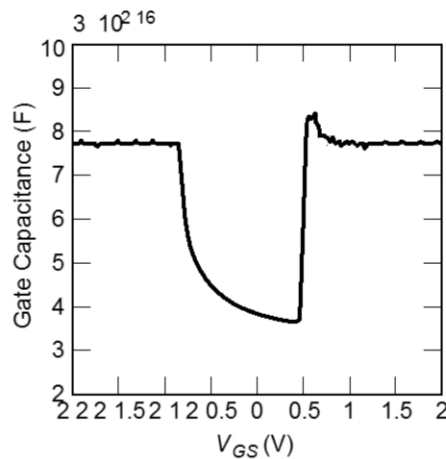
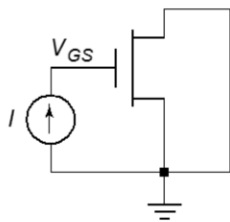


Χωρητικότητα συναρτήσει του V_{GS}
(με $V_{DS} = 0$)



Χωρητικότητα συναρτήσει του
επιπέδου κορεσμού

Μέτρηση της Χωρητικότητας Πύλης με SPICE



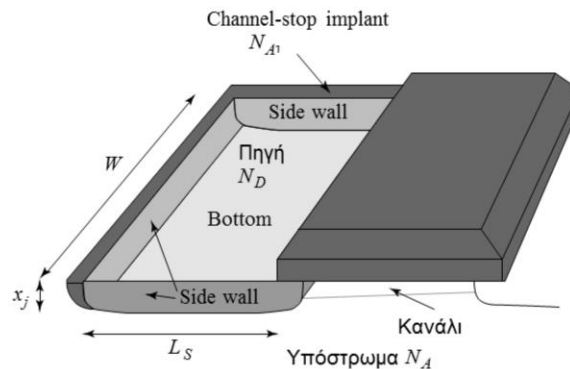
▶ 63

ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Το SPICE μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει, βάση του μοντέλου των τρανζίστορ της διεργασίας, παραμέτρους της συσκευής, όπως λ.χ. η χωρητικότητα της πύλης.

Όπως φαίνεται παραπάνω βάση της εξίσωσης $I = C (dV_{GS}/dt)$, μπορούμε εφαρμόζοντας, V_{GS} και I να υπολογίζουμε το στιγμιαίο C συναρτήσει του V_{GS} .

Χωρητικότητα Διάχυσης



$$C_{diff} = C_{bottom} + C_{sw} = C_j \times AREA + C_{jsw} \times PERIMETER$$

$$= C_j L_S W + C_{jsw} (2L_S + W)$$

▶ 64

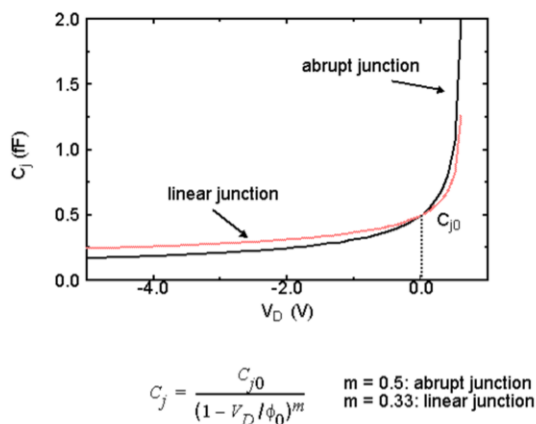
ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Επιπλέον της χωρητικότητας που εμφανίζεται στο μέρος της πύλης, οι αντίστροφα στραμμένες διόδοι που σχηματίζονται μεταξύ s, d και υποστρώματος δημιουργούν στην πηγή και στην καταβόθρα παρασιτικές χωρητικότητες ως προς το υπόστρωμα, τις λεγόμενες χωρητικότητες διάχυσης.

Οι χωρητικότητες διάχυσης έχουν δυο συνιστώσες, μια κάθετη χωρητικότητα προς το υπόστρωμα, ανάλογη του εμβαδού της διάχυσης, $c_j \cdot Area$, και μια πλευρική/περιμετρική και οριζόντια, ανάλογη με την περίμετρο της διάχυσης, $c_{jsw} \cdot perimeter$.

Και οι δυο αυτές είναι ανάλογες της χωρητικότητας του χώρου αραίωσης της διόδου που συζητήσαμε νωρίτερα, είναι μη γραμμικές και υπολογίζονται με τον ίδιο τύπο.

Χωρητικότητα Ένωσης pn



▶ 65

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Η (παρασιτική, εγγενής) χωρητικότητα μιας διόδου pn αντιστοιχεί στο φορτίο που πρέπει να μετακινηθεί για κάποια αλλαγή της κατάστασης της διόδου. Έτσι, η χωρητικότητα μπορεί, είτε για μικρές, είτε για μεγαλύτερες αλλαγές του δυναμικού/φορτίου να εκφραστεί ως $C = dQ/dV$, ή $C = \Delta Q/\Delta V$ αντίστοιχα.

Η παραπάνω γραφική παράσταση παρουσιάζει την χωρητικότητα C_j ως συνάρτηση του δυναμικού. Είναι προφανές ότι είναι μη-γραμμική.

Στα ψηφιακά κυκλώματα, οι οποιεσδήποτε διόδοι είναι αντίστροφα στραμμένες, συνεπώς η χωρητικότητα που μας ενδιαφέρει είναι μόνο του χώρου αραίωσης. Η χωρητικότητα του χώρου αραίωσης, ως συνάρτηση της διαφοράς δυναμικού δίνεται από τον παραπάνω τύπο, όπου:

- C_{j0} είναι η χωρητικότητα της διόδου με διαφορά δυναμικού 0V,
- ϕ_0 είναι η εγγενής τάση, όπως επεξηγήθηκε νωρίτερα,
- V_D είναι η διαφορά δυναμικού (V_D αρνητικό για αντίστροφα στραμμένη διόδο),
- m είναι μια σταθερά ανάλογη της μετάβασης p σε n (απότομη ή γραμμικότερη).

Χωρητικότητα Ένωσης pn

- ▶ Για μεγάλες διαφοροποιήσεις της τάσης, ΔV_D , έχουμε:

$$C_{eq} = \frac{\Delta Q_j}{\Delta V_D} = \frac{Q_j(V_{high}) - Q_j(V_{low})}{V_{high} - V_{low}} = K_{eq} C_{j0}$$

- ▶ Όπου το K_{eq} υπολογίζεται ως:

$$K_{eq} = \frac{-\phi_0^m}{(V_{high} - V_{low})(1-m)} \left[(\phi_0 - V_{high})^{1-m} - (\phi_0 - V_{low})^{1-m} \right]$$

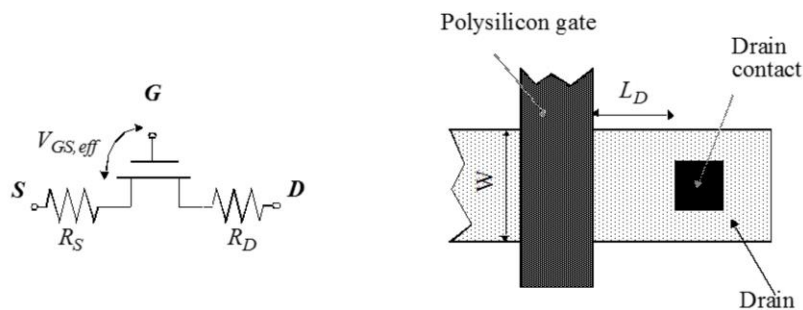
Η παραπάνω έκφραση χρησιμεύει στον υπολογισμό των παρασιτικών χωρητικοτήτων των διόδων που υπάρχουν στα άκρα των MOS τρανζίστορ.

Χωρητικότητες – Διεργασία 0.25μm

- ▶ Έτσι, συνολικά οι χωρητικότητες έχουν ως εξής:
 - ▶ $CGS = CGCS + CGSO$
 - ▶ $CGD = CGCD + CGDO$
 - ▶ $CGB = CGCB$ (όταν είναι το τρανζίστορ σβηστό)
 - ▶ $CSB = CS_{diff}$
 - ▶ $CDB = C_{diff}$
- ▶ Παρακάτω παραθέτονται χαρακτηριστικές τιμές για τις σχετικές παραμέτρους σε διεργασία 0.25μm.

	C_{ox} (fF/μm ²)	C_O (fF/μm)	C_j (fF/μm ²)	m_j	ϕ_b (V)	C_{jsw} (fF/μm)	m_{jsw}	ϕ_{Dsw} (V)
NMOS	6	0.31	2	0.5	0.9	0.28	0.44	0.9
PMOS	6	0.27	1.9	0.48	0.9	0.22	0.32	0.9

Παρασιτικές Αντιστάσεις S, D



▶ 68

ΗΥ330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Εκτός από την αντίσταση του καναλιού, που είναι όπως αναφέραμε μη-γραμμική και προσεγγίζεται, μια ακόμη παρασιτική συσκευή είναι η οποιαδήποτε αντίσταση προκύπτει από:

- την οριζόντια αντίσταση της διαδρομής το ρεύματος από και προς τα S, D (όπως φαίνεται πάνω δεξιά)
- την αντίσταση της διεπαφής (contact) μεταξύ διάχυσης και μετάλλου

Έτσι πρακτικά δημιουργούνται παρασιτικές αντιστάσεις σε σειρά με το κανάλι ως εξής:

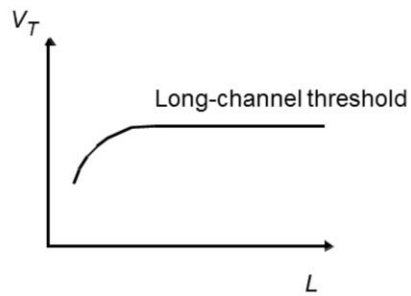
$$R_{s,d} = (L_{s,d}/W) \cdot R_{\square} + R_c, \text{ όπου}$$

$L_{s,d}$, d , W τα μεγέθη του τρανζίστορ όπως στο σχήμα, R_{\square} η αντίσταση της διάχυσης ανά τετραγωνικό, και R_c η αντίσταση της διεπαφής (τυπικές τιμές για R_{\square} είναι 20-100Ω).

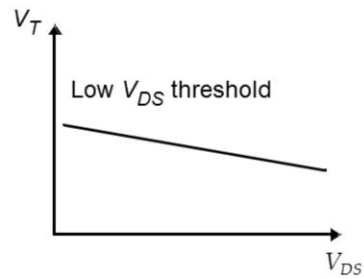
Το υπό-του-1μm Τρανζίστορ

- ▶ Διαφοροποιήσεις Δυναμικού Κατωφλίου
- ▶ Αγωγιμότητα κάτω από το V_t
- ▶ Σημαντικές Παρασιτικές Αντιστάσεις

Διαφοροποιήσεις V_T

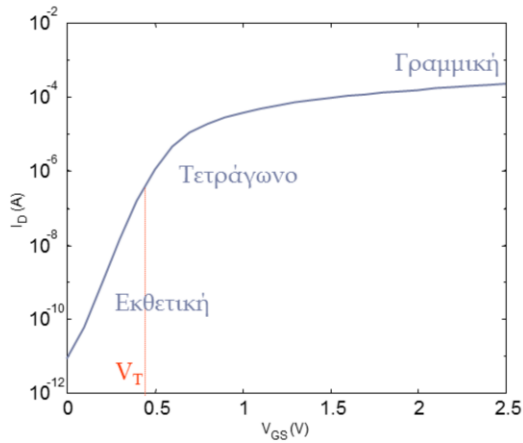


Threshold as a function of the length (for low V_{DS})



Drain-induced barrier lowering (for low L)

Αγωγιμότητα για $V_g < V_T$



The Slope Factor

$$I_D \sim I_0 e^{\frac{qV_{GS}}{nkT}}, \quad n = 1 + \frac{C_D}{C_{ox}}$$

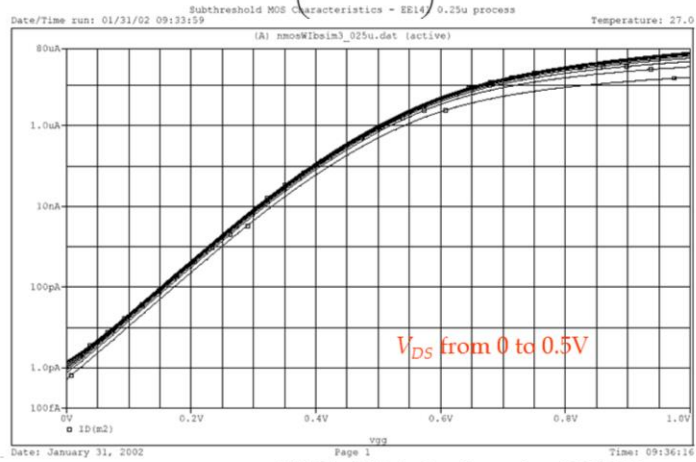
S is ΔV_{GS} for $I_{D2}/I_{D1} = 10$

$$S = n \left(\frac{kT}{q} \right) \ln(10)$$

Typical values for S :
60 .. 100 mV/decade

I_D και V_{GS} ενώ $V_g < V_T$

$$I_D = I_0 e^{\frac{qV_{GS}}{nkT}} \left(1 - e^{-\frac{qV_{DS}}{kT}} \right)$$

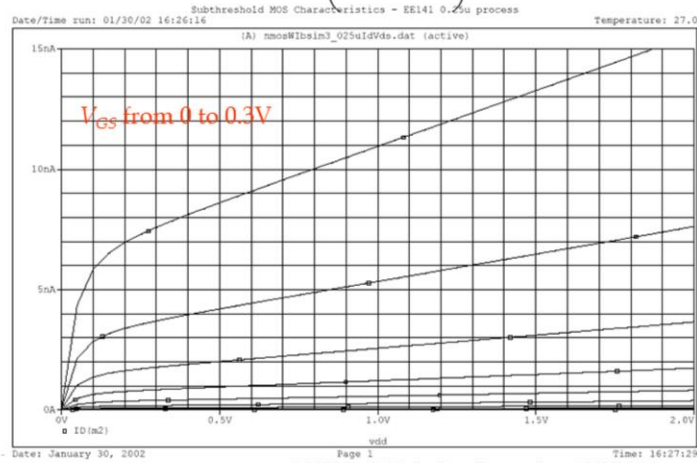


72

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

I_D και V_{DS} ενώ $V_g < V_T$

$$I_D = I_0 e^{\frac{qV_{GS}}{nkT}} \left(1 - e^{-\frac{qV_{DS}}{kT}} \right) (1 + \lambda \cdot V_{DS})$$



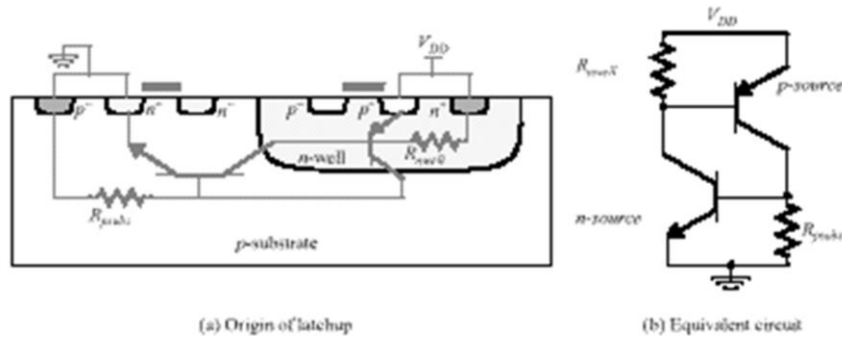
73

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Περίληψη περιοχών λειτουργίας Τρανζίστορ MOSFET

- ▶ Ισχυρή Αντιστροφή $V_{GS} > V_T$
 - ▶ Γραμμική (ως Αντίσταση) $V_{DS} < V_{DSAT}$
 - ▶ Κόρος (Σταθερό Ρεύμα) $V_{DS} \geq V_{DSAT}$
- ▶ Ασθενής Αντιστροφή (υπό-Κατωφλίου) $V_{GS} \leq V_T$
 - ▶ Εκθετική εξάρτηση ως προς το V_{GS} , γραμμική ως προς το V_{DS}

Latch-up, Παρασιτικό Βραχυκύκλωμα



▶ 75

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/6/2014

Στο υπόστρωμα ενός ζευγαριού CMOS δημιουργούνται εμμέσως παρασιτικά διπολικά τρανζίστορ, τύπων n_{pn} (οριζόντια) και p_{np} (κάθετα), όπως φαίνεται στο σχήμα.

Τα διπολικά τρανζίστορ πρακτικά αποτελούνται από 2 διόδους, λ.χ. ένα n_{pn} είναι μια διάδος n συγχωνευμένη με μια p \rightarrow n_{pn} . Στα διπολικά η πρώτη διάδος ρυθμίζει το ρεύμα μια και ουσιαστικά σπρώχνει φορείς στην δεύτερη.

Όπως ξέρουμε από τις διόδους η συνθήκη για παροχή ρεύματος σε μια p n διάοδο θετικά στραμμένη είναι να εφαρμόσουμε δυναμικό $\sim 0.7V$. Ομοίως, αυτή είναι και η συνθήκη για την ενεργοποίηση των παρασιτικών τρανζίστορ παραπάνω, όπου αν ενεργοποιηθούν, όπως φαίνεται, δημιουργούν ένα καταστροφικό παρασιτικό ρεύμα μεταξύ πηγής (V_{dd}) και γείωσης (Gnd). Αυτή η πτώση τάσης είναι συνάρτηση των δυο αντιστάσεων, επίσης παρασιτικών, που φαίνονται στο σχήμα ($V = IR$). Συνεπώς, θέλουμε να είναι **ελάχιστες**, και αυτός είναι ο σκοπός των επαφών στο υπόστρωμα.