

HY330 – Ψηφιακά Κυκλώματα - Εισαγωγή στα Συστήματα VLSI

Διδάσκων: Χ. Σωτηρίου, Βοηθοί: θα ανακοινωθούν

<http://www.csd.uoc.gr/~hy330>

I

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

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

▶ 2

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

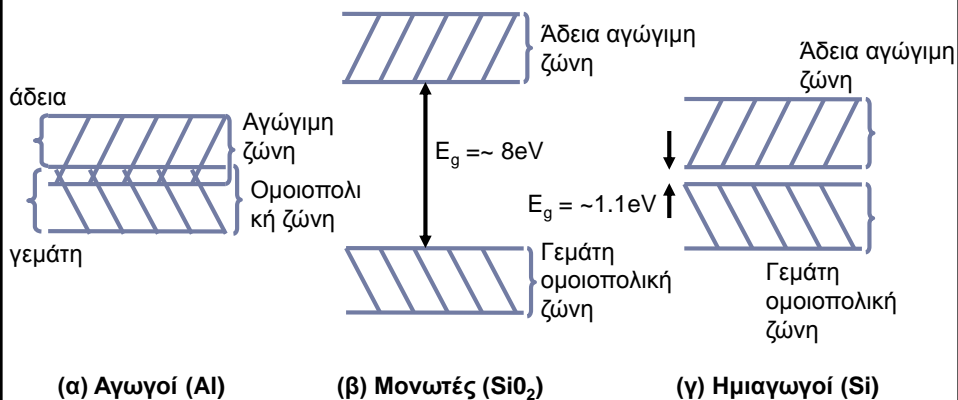
Συσκευές στο Πυρίτιο

- ▶ 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

▶ 3

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

Ενεργειακές Ζώνες Στερεών

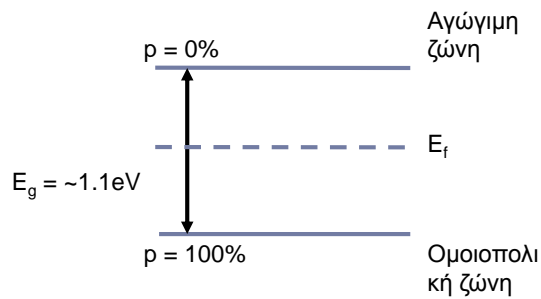


▶ 4

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

Ορισμός: Επίπεδο Fermi

- Το Ενεργειακό επίπεδο που έχει πιθανότητα κατάληψης 50%

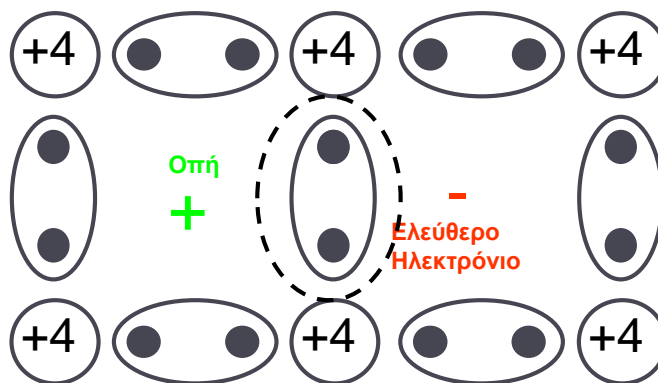


► 5

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

Κρυσταλλική Δομή Si

- Το πυρίτιο έχει κρυσταλλική δομή και σθένος 4.



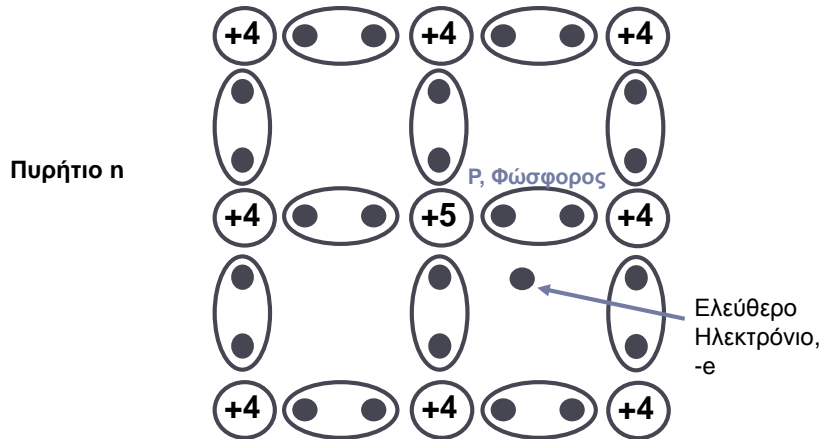
► 6

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

Πυρίτιο τύπου n και p

► Πυρίτιο n

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



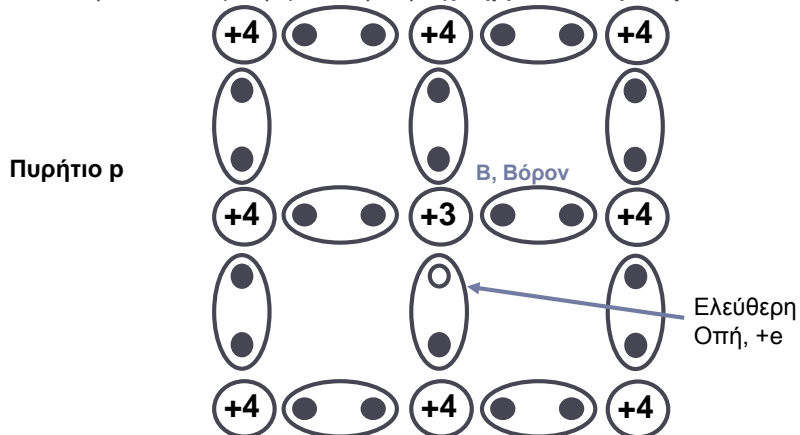
► 7

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

Πυρίτιο τύπου n και p

► Πυρίτιο p

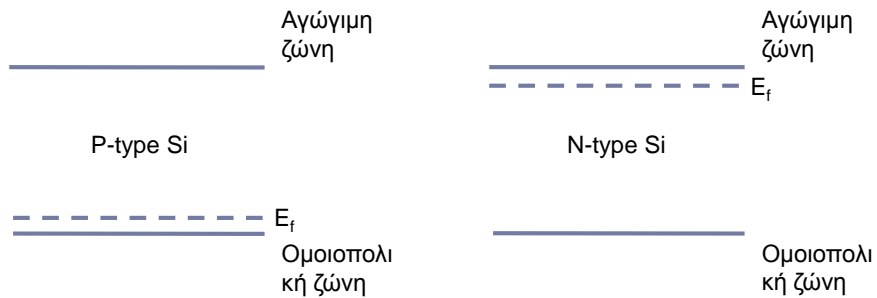
- Κρυσταλλική δομή που εμπεριέχει (β) 3-σθενές άτομο



► 8

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

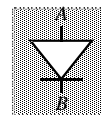
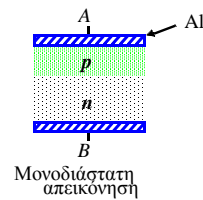
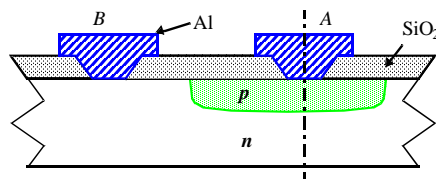
Επίπεδα Fermi σε n και p πυρίτιο



► 9

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

Δίοδος pn



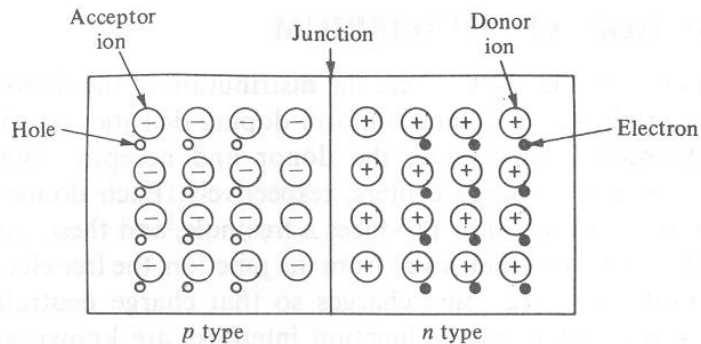
Σύμβολο διόδου

► 10

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

Δίοδος pn και Χώρος Αραίωσης

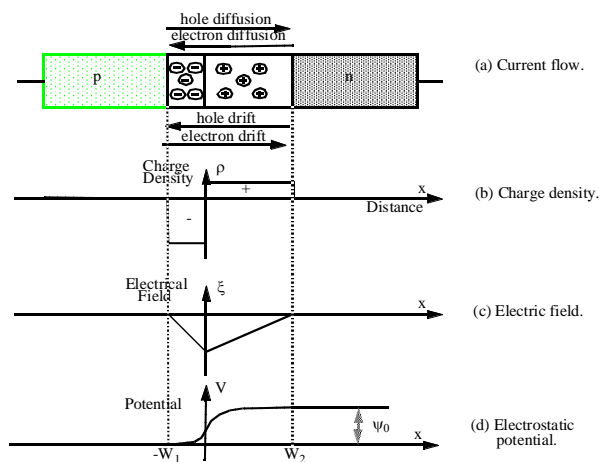
- ▶ Στο όριο μεταξύ p και n οι πλειοδότες φορείς αλληλοεξουδετερώνονται, με αποτέλεσμα την δημιουργία ηλεκτροστατικού δυναμικού



▶ 11

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

Χώρος Αραίωσης pn - Ανάλυση

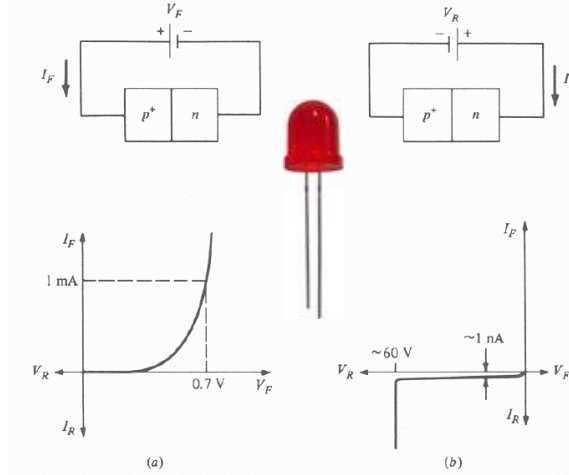


▶ 12

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

Λειτουργία Διόδου σε Κύκλωμα

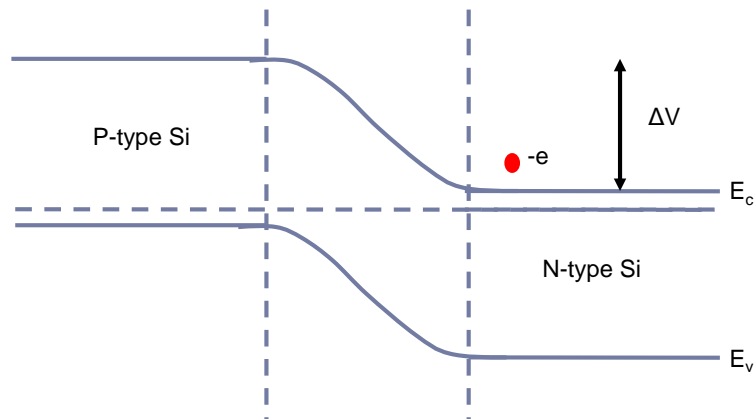
- ▶ Η διόδος επιτρέπει την ροή ρεύματος σε μία μόνο κατεύθυνση



▶ 13

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

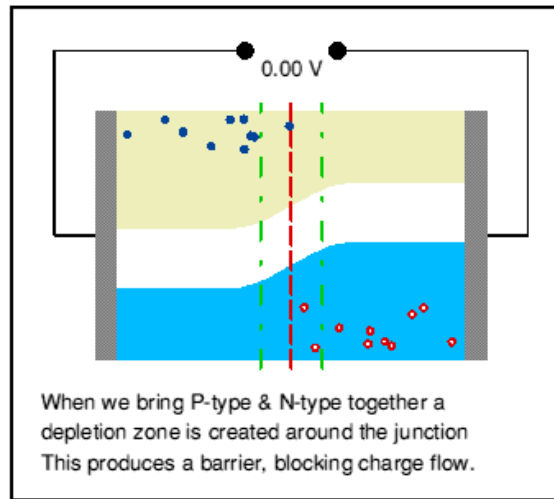
Επίπεδα Fermi στη Δίοδο



▶ 14

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

Λειτουργία Διόδου

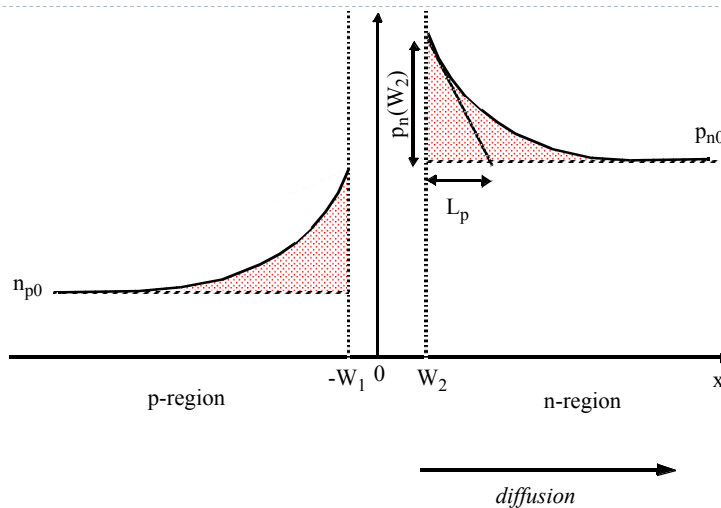


© J. C. G. Lesurf Univ. St. Andrews

► 15

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

Θετική Πόλωση

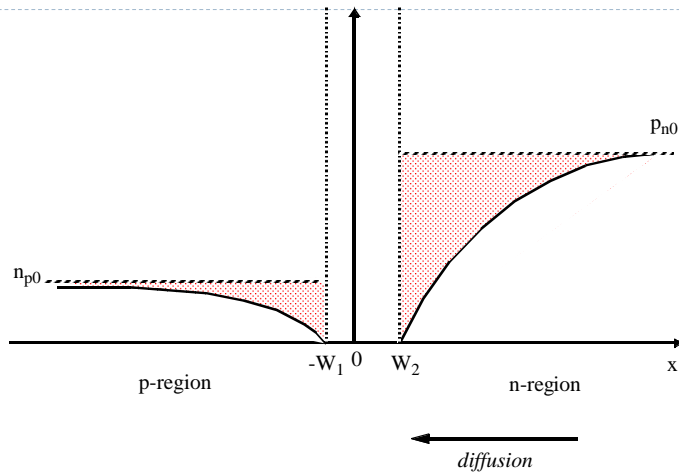


Αποφεύγουμε σε ψηφιακά κυκλώματα

► 16

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

Αρνητική Πόλωση

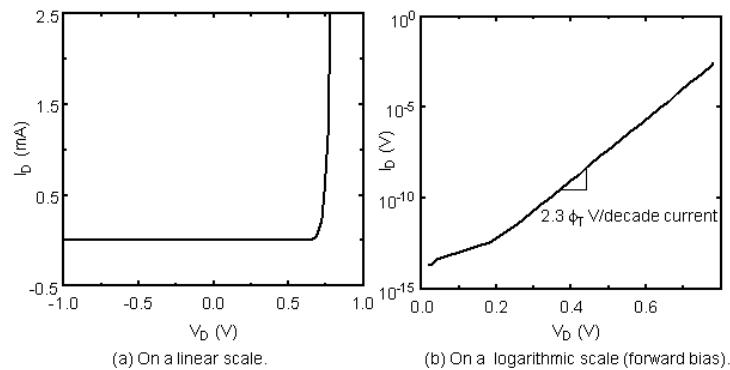


Συνήθης Λειτουργία

► 17

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

Εξάρτηση V-I στην Δίοδο

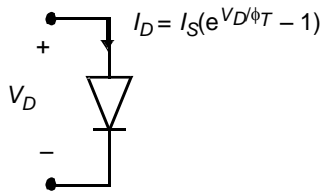


$$I_D = I_S \left(e^{V_D / \phi_T} - 1 \right)$$

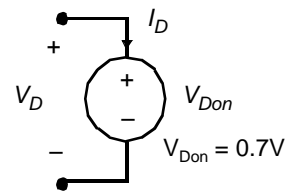
► 18

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

Αναλυτικά Μοντέλα



(α) Ιδανικό Μοντέλο Διόδου

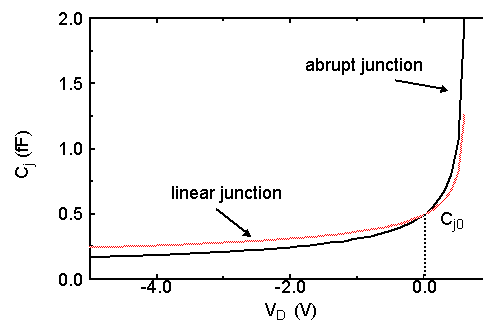


(β) Απλοϊκό Πρωτογενές Μοντέλο

▶ 19

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

Χωρητικότητα Ένωσης pn



$$C_j = \frac{C_{j0}}{(1 - V_D/\phi_0)^m}$$

$m = 0.5$: abrupt junction
 $m = 0.33$: linear junction

▶ 20

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

Χωρητικότητα Ένωσης pn

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

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

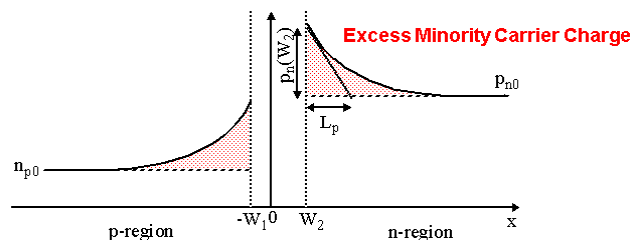
- ▶ Όπου το K_{eq} υπολογίζεται ως:

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

▶ 21

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

Χωρητικότητα Διάχυσης

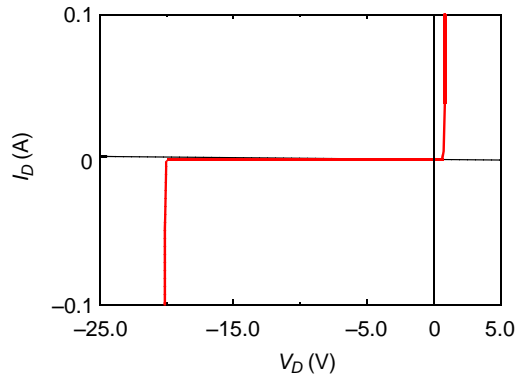


$$C_d = \frac{dQ_D}{dV_D} = \tau_T \frac{dI_D}{dV_D} \approx \frac{\tau_T I_D}{\phi_T}$$

▶ 22

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

Δευτερογενή Φαινόμενα

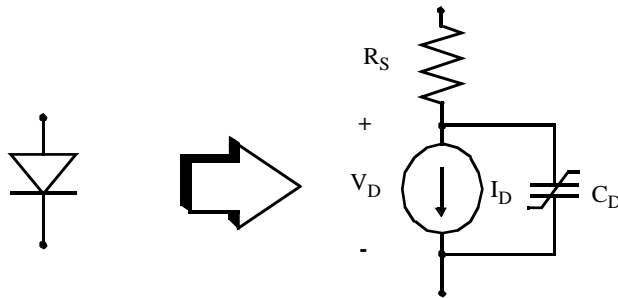


Avalanche Breakdown

► 23

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

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

► 24

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

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

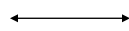
First Order SPICE diode model parameters.

► 25

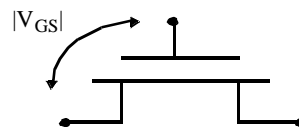
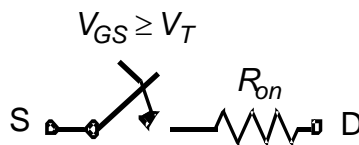
HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 10/3/2014

Τι είναι το τρανζίστορ;

Διακόπτης!



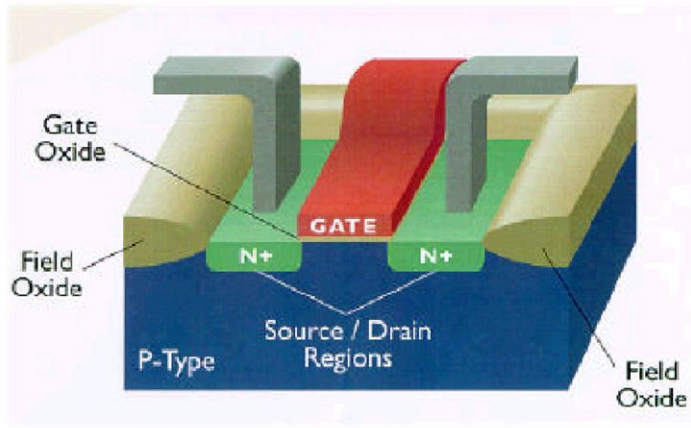
Ένα MOS Τρανζίστορ



► 26

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

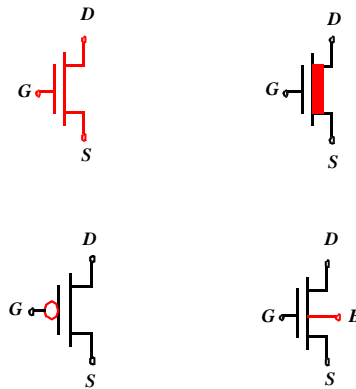
Τρισδιάστατη όψη Τρανζίστορ MOSFET



▶ 27

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

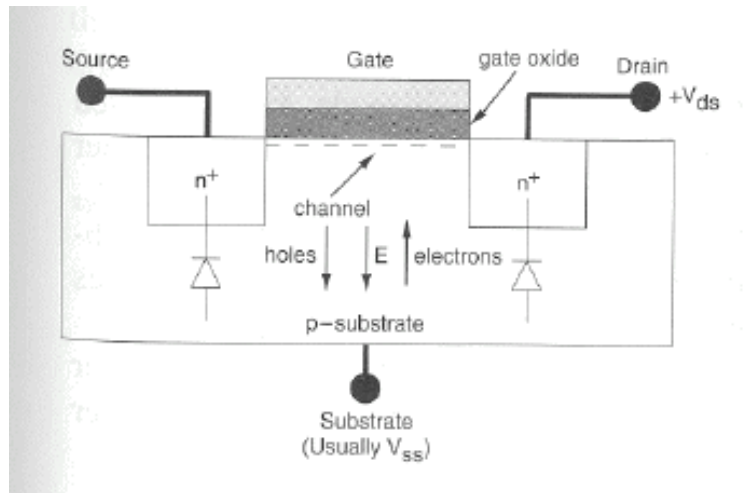
MOS Τρανζίστορ – Τύποι, Σύμβολα



▶ 28

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

Δομή NMOS Τρανζίστορ



► 29

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

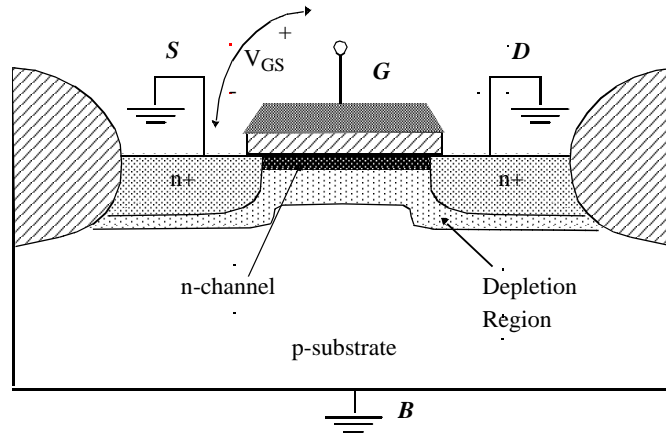
Δομή NMOS Τρανζίστορ

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

► 30

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

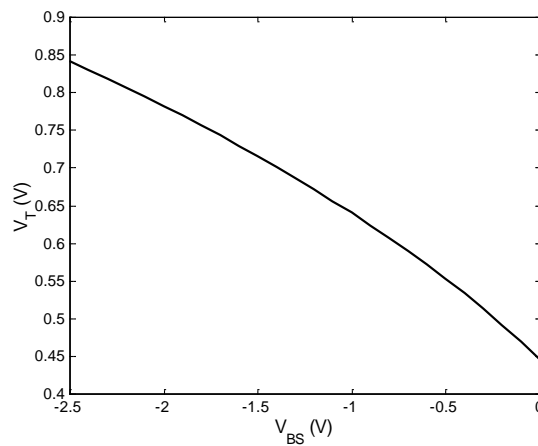
Τάση Κατωφλίου – Threshold Voltage



10/3/2014

HY330 - Διάλεξη 3η - Συσκευές 31

Φαινόμενο Σώματος - The Body Effect



32

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

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
Implants

Body Effect Coefficient

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

with

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

and

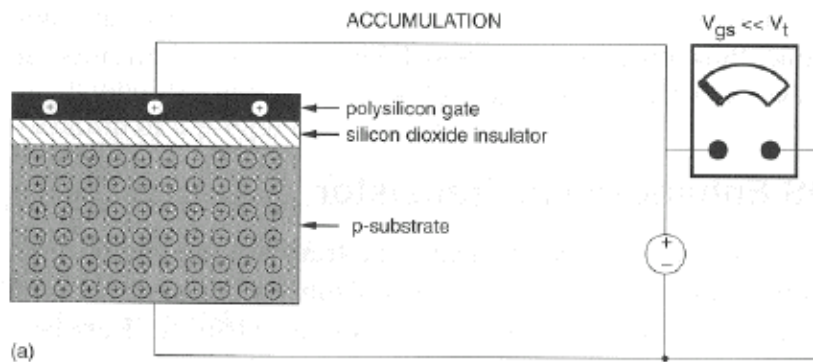
$$\gamma = \frac{\sqrt{2q\epsilon_{si}N_A}}{C_{ox}}$$

► 33

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

Λειτουργία Πύλης NMOS

- Συσσώρευση όταν $V_{gs} \ll V_T$

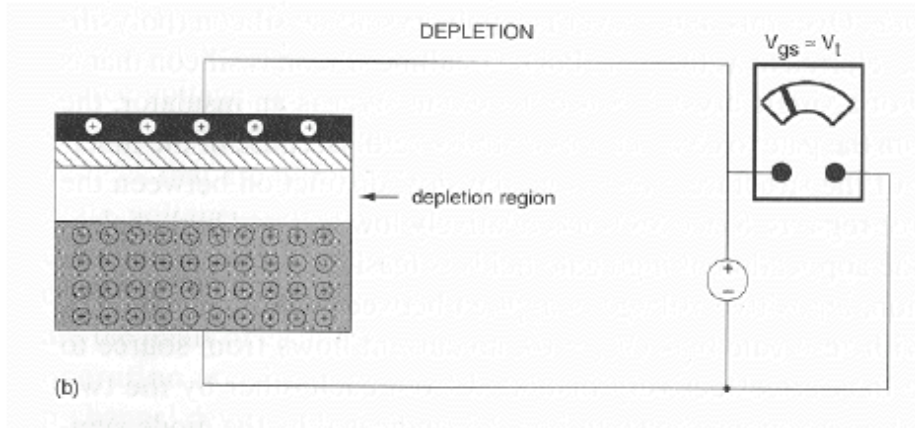


► 34

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

Λειτουργία Πύλης NMOS

- ▶ Αραίωση όταν $V_{gs} \approx V_T$

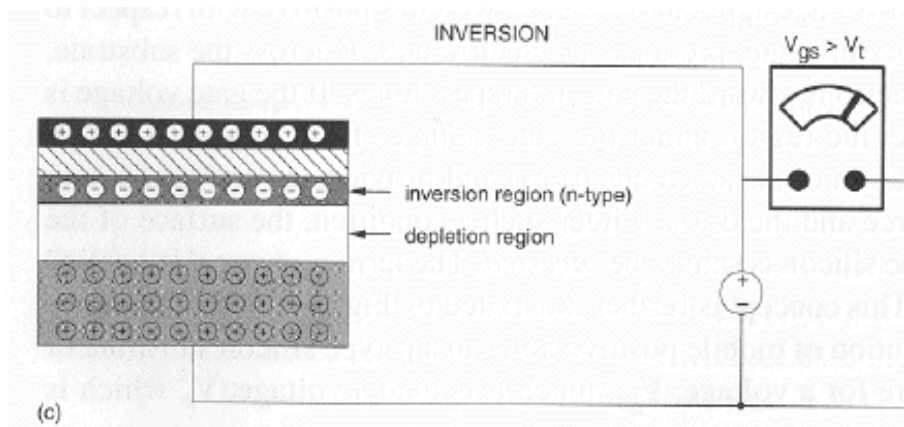


▶ 35

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

Λειτουργία Πύλης NMOS

- ▶ Αντιστροφή όταν $V_{gs} > V_T$

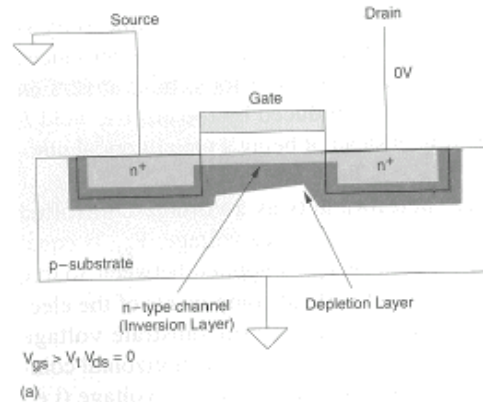


▶ 36

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

Λειτουργία NMOS Τρανζίστορ

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

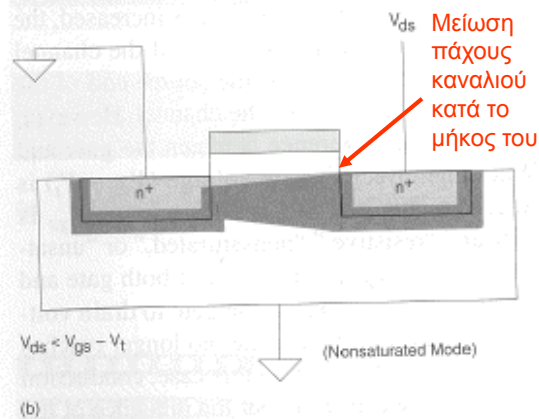


▶ 37

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

Λειτουργία NMOS Τρανζίστορ

- ▶ Αν $V_{ds} < V_{gs} - V_T$

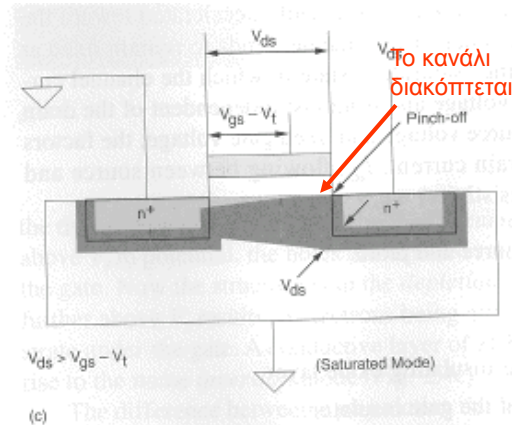


▶ 38

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

Λειτουργία NMOS Τρανζίστορ

- ▶ Άν $V_{ds} \geq V_{gs} - V_T$



▶ 39

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

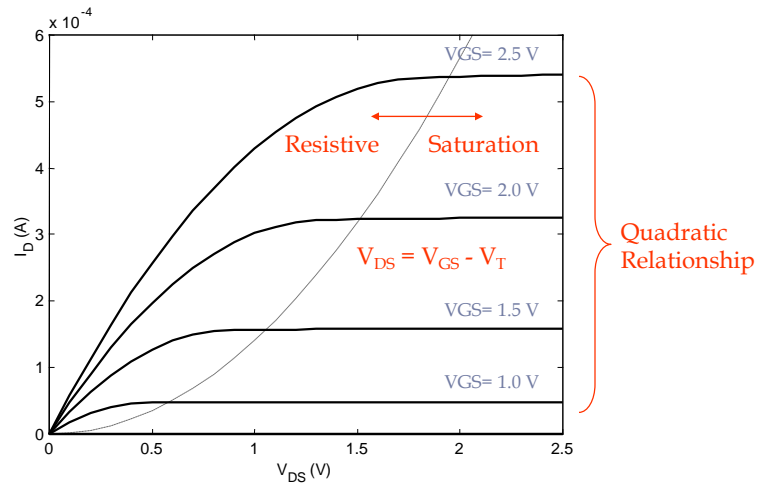
Λειτουργία NMOS Τρανζίστορ

- ▶ 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

▶ 40

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

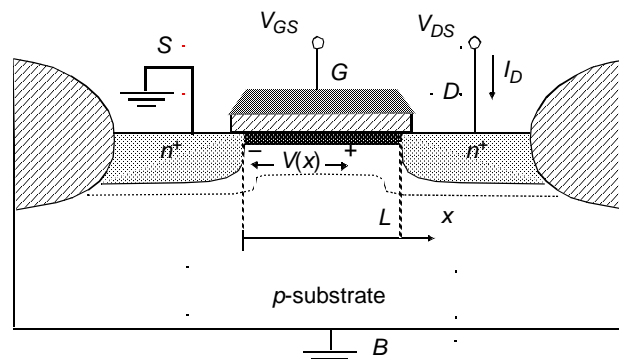
Καμπύλη IV ενός τρανζίστορ



► 41

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

Τρανζίστορ στην γραμμική περιοχή

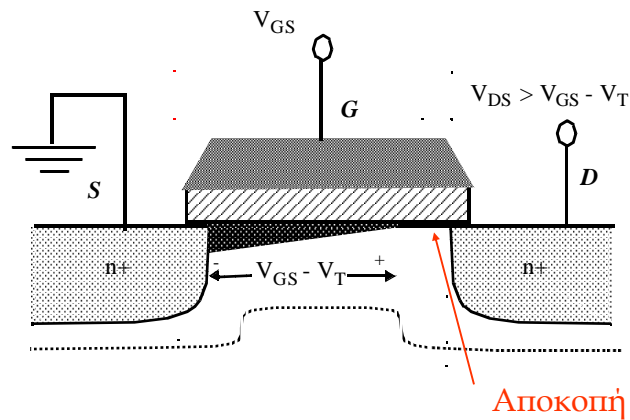


Τάσεις MOS στην γραμμική περιοχή

► 42

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

Τρανζίστορ σε κόρο



► 43

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

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

$$k'_n = \mu_n C_{ox} = \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad \text{Process Transconductance Parameter}$$

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

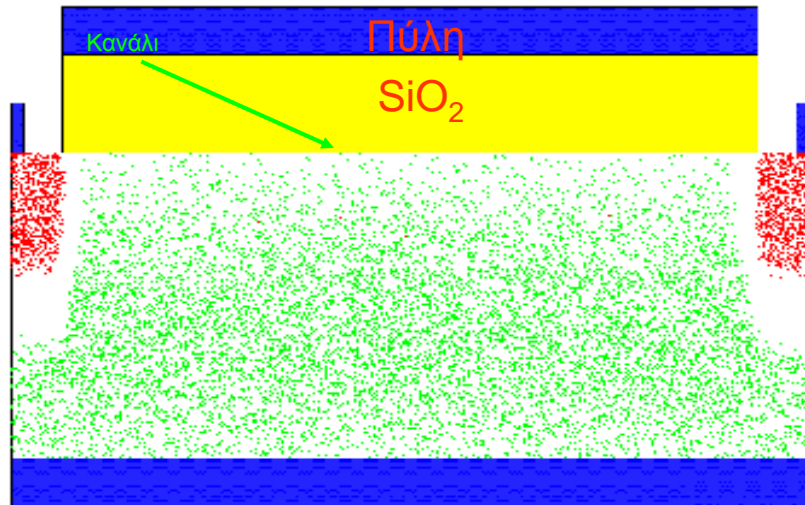
$$I_D = \frac{k'_n W}{2 L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

Channel Length Modulation

► 44

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

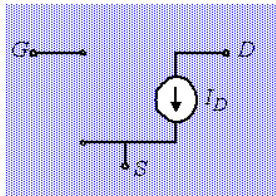
Τρανζίστορ σε λειτουργία



▶ 45

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

Μοντέλο MOSFET Τρανζίστορ



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

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

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

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

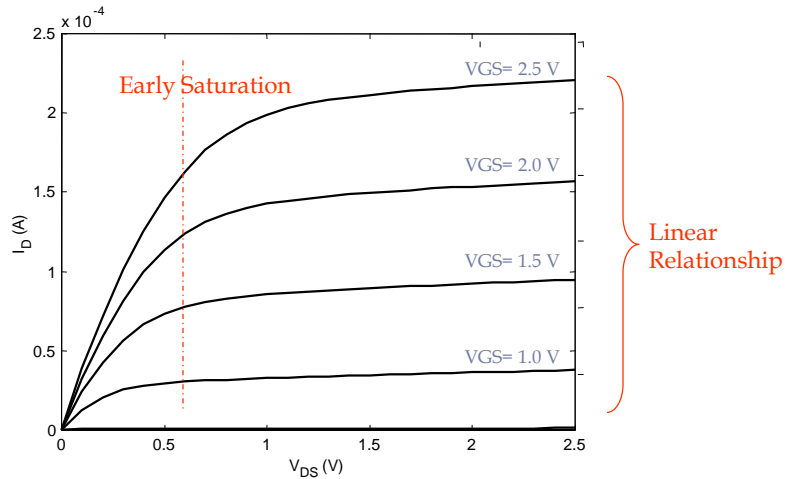
with

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

▶ 46

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

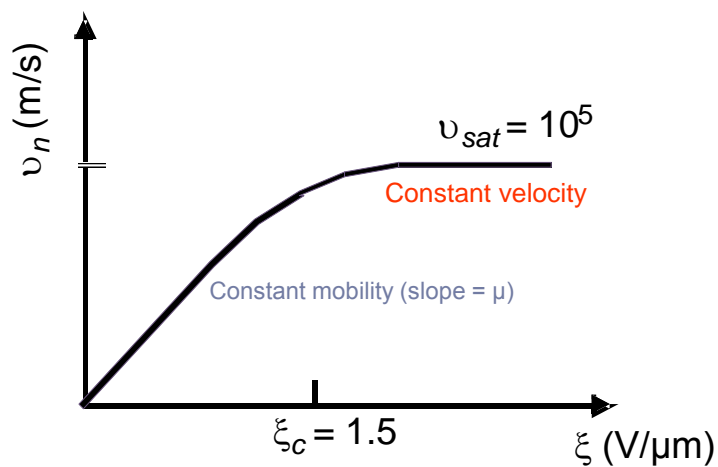
Καμπύλες IV σε DSM Τρανζίστορ



► 47

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

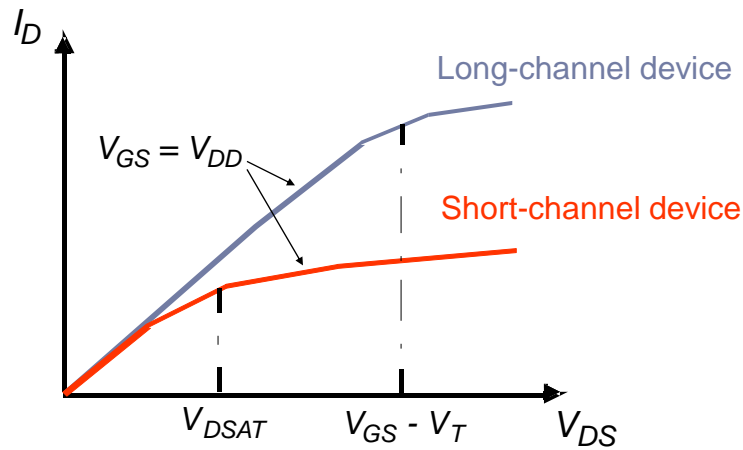
Κόρος Ταχύτητας



► 48

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

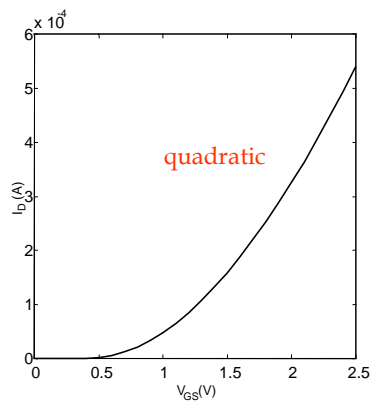
Σύγκριση



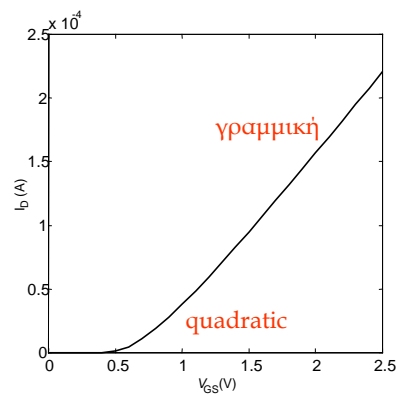
► 49

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

I_D και V_{GS}



Long Channel

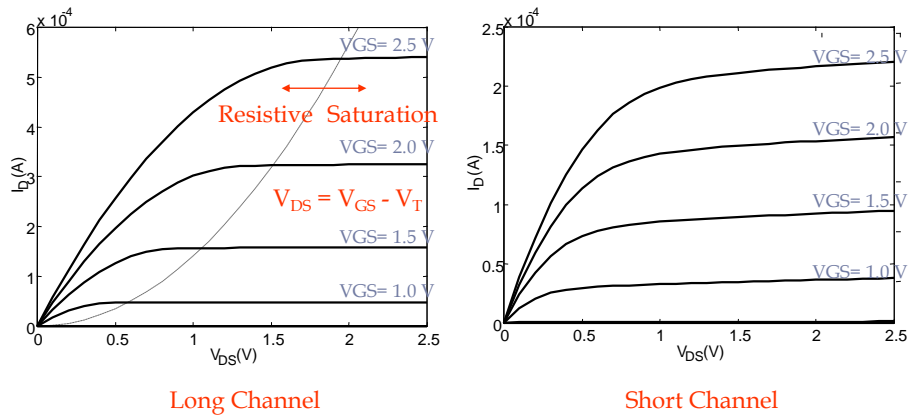


Short Channel

► 50

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

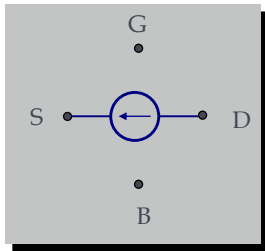
I_D και V_{DS}



► 51

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

Καθολικό Μοντέλο MOSFET



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

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

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

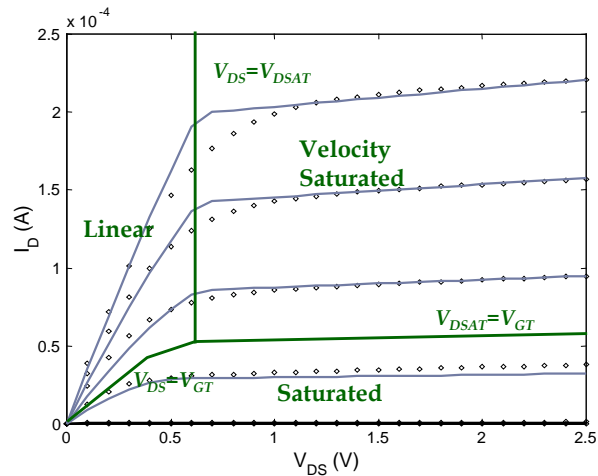
$$V_{GT} = V_{GS} - V_T,$$

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

► 52

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

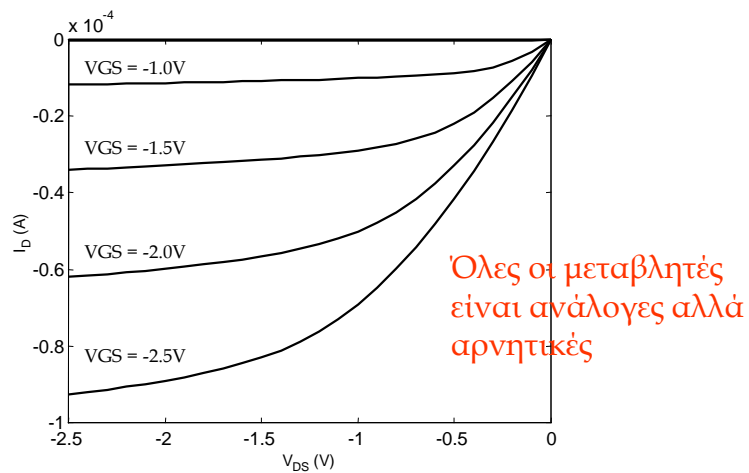
Απλό μοντέλο και SPICE



53

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

Τρανζίστορ PMOS



54

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

Παράμετροι ενός μοντέλου 0,25μm

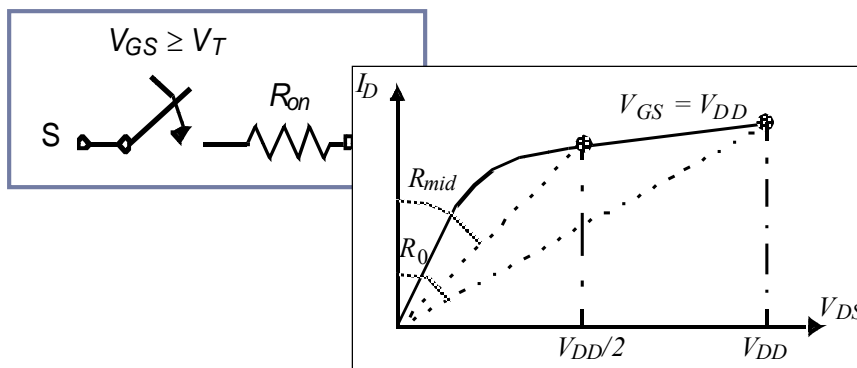
Table 3.2 Parameters for manual model of generic 0.25 μm CMOS process (minimum length device).

	V_{T0} (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

► 55

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

Τρανζίστορ ως Διακόπτης

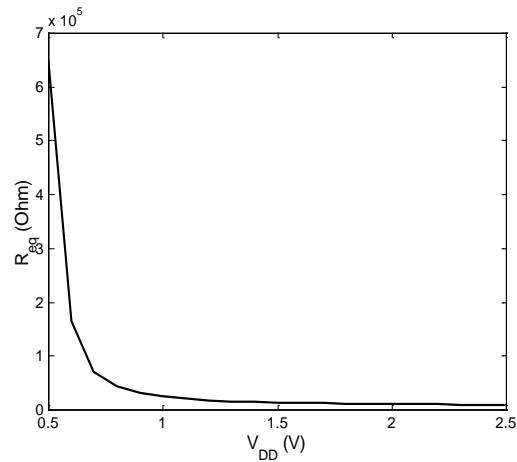


$$R_{eq} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{DD}}{I_{DSAT}(1 + \lambda V_{DD})} + \frac{V_{DD}/2}{I_{DSAT}(1 + \lambda V_{DD}/2)} \right) \approx \frac{3}{4} \frac{V_{DD}}{I_{DSAT}} \left(1 - \frac{5}{6} \lambda V_{DD} \right)$$

► 56

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

Τρανζίστορ ως Διακόπτης



► 57

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

Τρανζίστορ ως Διακόπτης

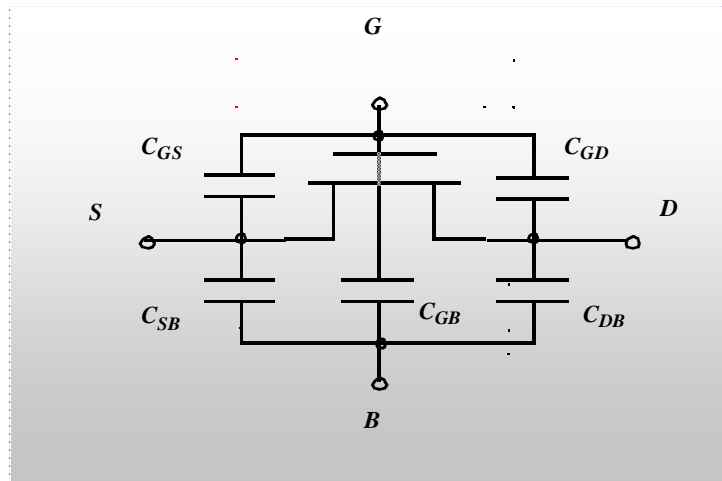
Table 3.3 Equivalent resistance R_{eq} ($W/L = 1$) of NMOS and PMOS transistors in 0.25 μm CMOS process (with $L = L_{min}$). For larger devices, divide R_{eq} by WL .

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

► 58

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

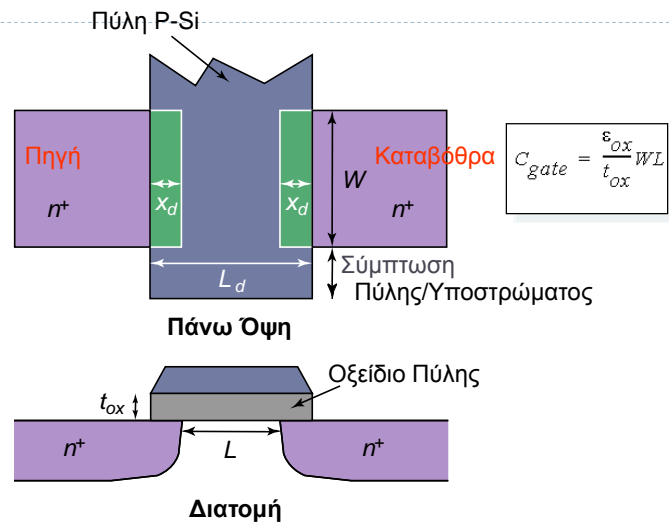
Δυναμική Συμπεριφορά MOS Τρανζίστορ



► 59

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

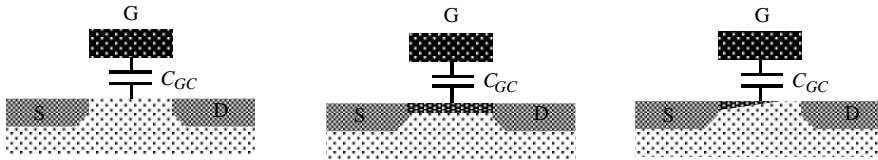
Χωρητικότητα της Πύλης



► 60

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

Χωρητικότητα της Πύλης



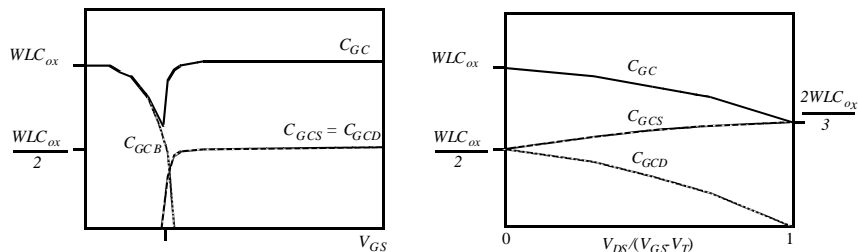
Operation Region	C_{gb}	C_{gs}	C_{gd}
Cutoff	$C_{ox}WL_{eff}$	0	0
Triode	0	$C_{ox}WL_{eff}/2$	$C_{ox}WL_{eff}/2$
Saturation	0	$(2/3)C_{ox}WL_{eff}$	0

Σημαντικές Περιοχές λειτουργίας για Ψηφιακά Κυκλώματα:
Κόρος και Αποκοπή

► 61

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

Χωρητικότητα Πύλης



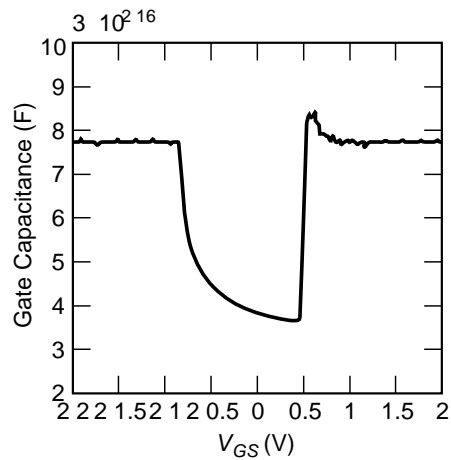
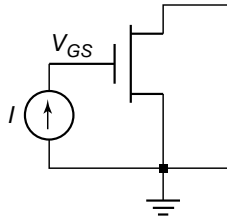
Χωρητικότητα συναρτήσει του V_{GS}
 (με $V_{DS} = 0$)

Χωρητικότητα συναρτήσει του
 επιπέδου κορεσμού

► 62

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

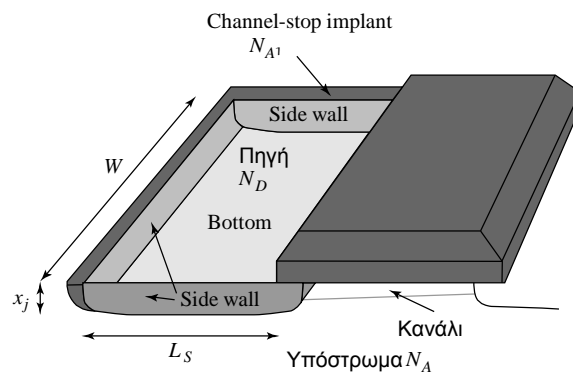
Μέτρηση της Χωρητικότητας Πύλης με SPICE



▶ 63

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

Χωρητικότητα Διάχυσης



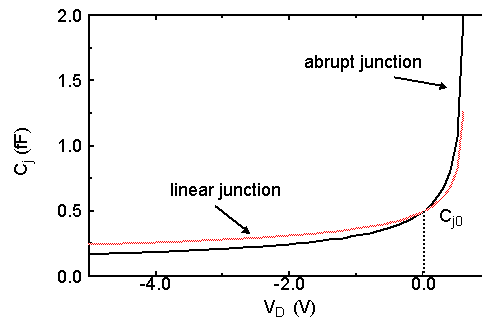
$$C_{diff} = C_{bottom} + C_{sw} = C_j \times AREA + C_{jsw} \times PERIMETER$$

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

▶ 64

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

Χωρητικότητα Ένωσης pn



$$C_j = \frac{C_{j0}}{(1 - V_D / \phi_0)^m}$$

$m = 0.5$: abrupt junction
 $m = 0.33$: linear junction

▶ 65

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

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:

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

▶ 66

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

Χωρητικότητες – Διεργασία 0.25μm

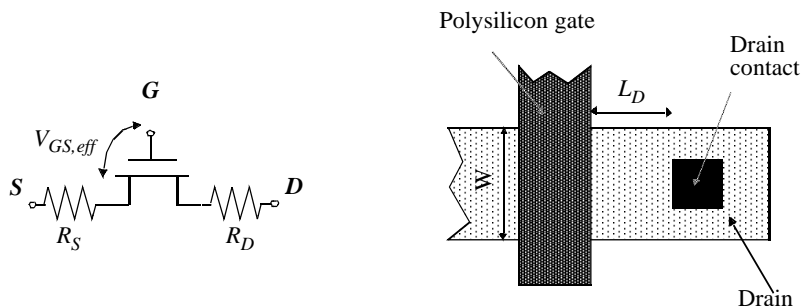
- ▶ Έτσι, συνολικά οι χωρητικότητες έχουν ως εξής:
 - ▶ $CGS = CGCS + CGSO$
 - ▶ $CGD = CGCD + CGDO$
 - ▶ $CGB = CGCB$ (όταν είναι το τρανζίστορ σβηστό)
 - ▶ $CSB = CSdiff$
 - ▶ $CDB = Cdiff$
- ▶ Παρακάτω παραθέτονται χαρακτηριστικές τιμές για τις σχετικές παραμέτρους σε διεργασία 0.25μm.

	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

▶ 67

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

Παρασιτικές Αντιστάσεις S, D



▶ 68

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

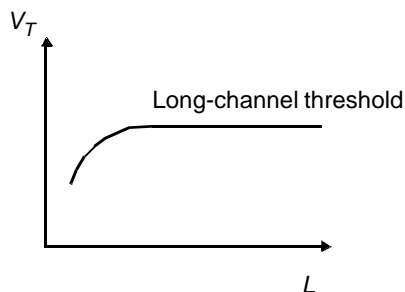
Το υπό-του-1μm Τρανζίστορ

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

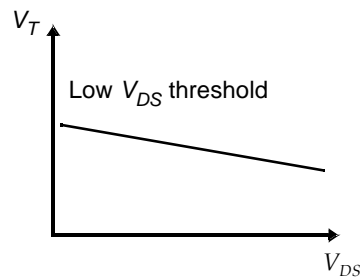
▶ 69

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

Διαφοροποιήσεις V_T



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

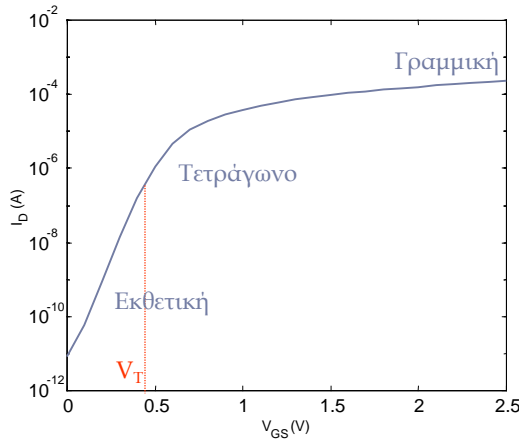


Drain-induced barrier lowering (for low L)

▶ 70

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

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 $I_{D2}/I_{D1} = 10$

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

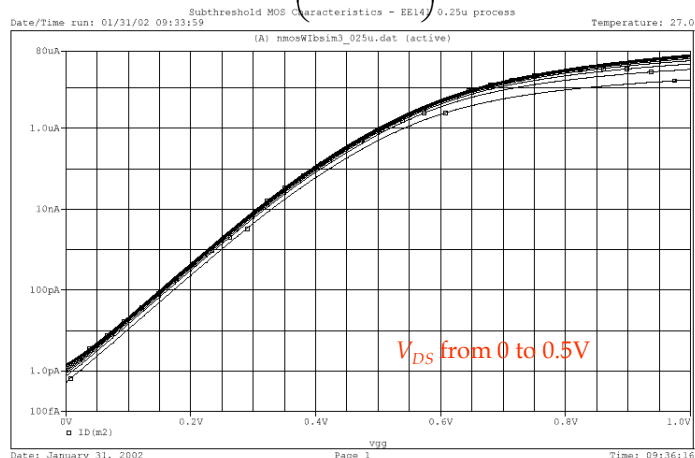
Typical values for S :
60 .. 100 mV/decade

► 71

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

I_D και V_{GS} ενώ $V_g < V_T$

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

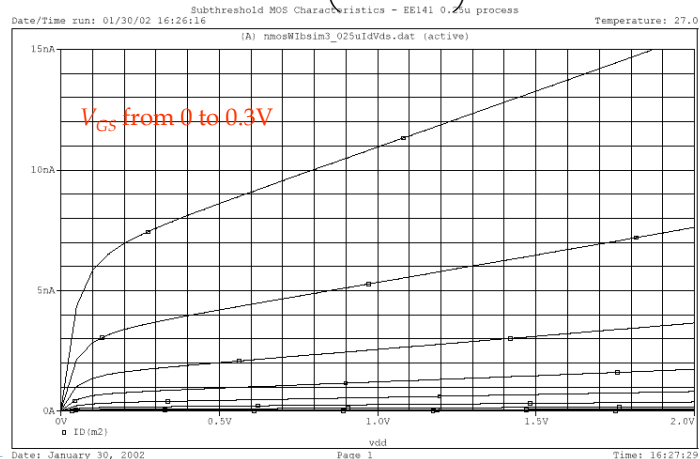


► 72

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

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 10/3/2014

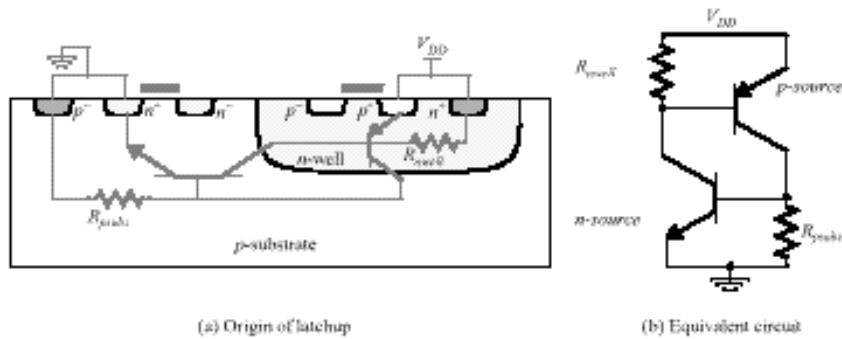
Περίληψη περιοχών λειτουργίας Τρανζίστορ MOSFET

- ▶ 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}

74

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

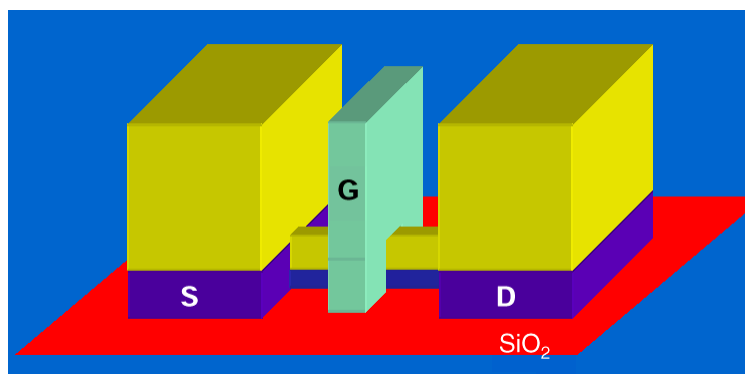
Latch-up, Παρασιτικό Βραχυκύκλωμα



► 75

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

Μελλοντικές Προοπτικές



25 nm FINFET MOS transistor

► 76

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