

ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ VLSI

Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων



Θεωρία MOS Τρανζίστορ

Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής



Κεφάλαιο 2°

Γ. Τσατούχας



ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ VLSI

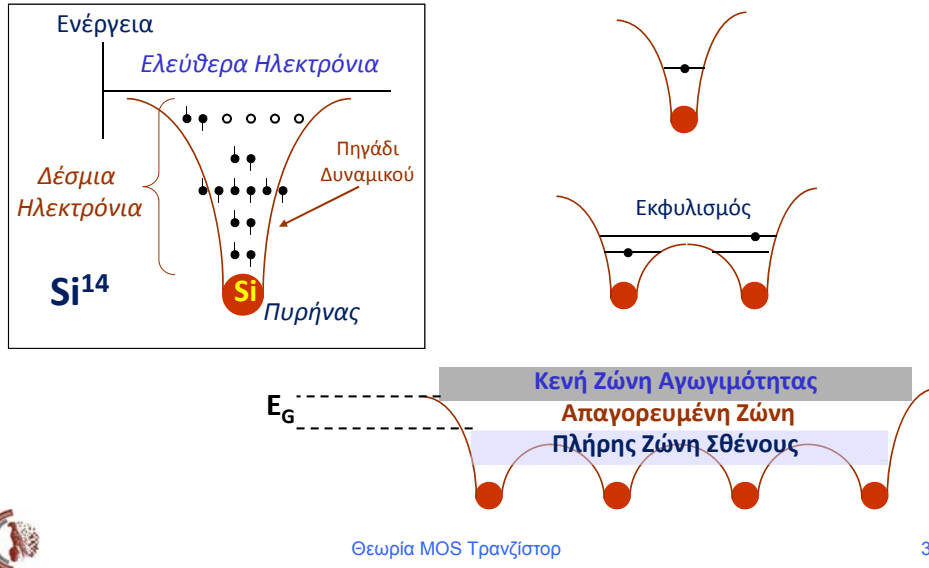
Διάρθρωση



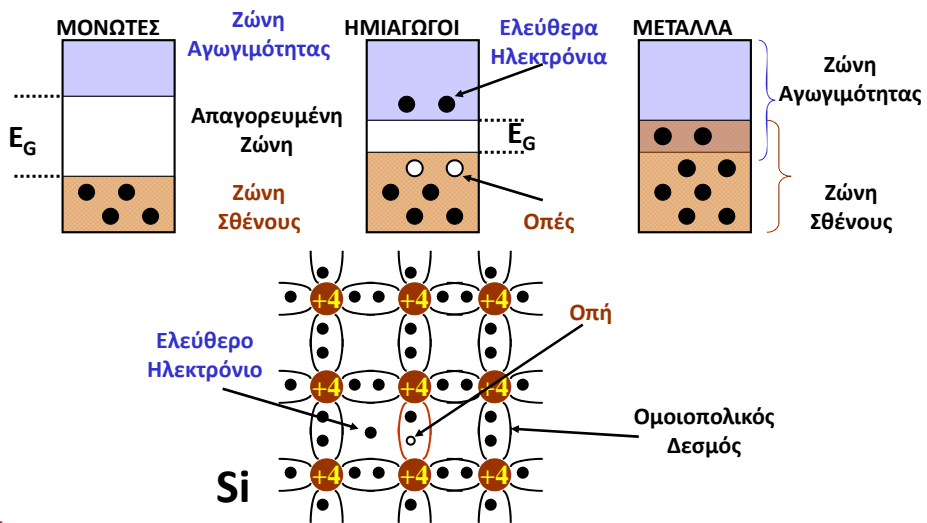
VLSI Systems
and Computer Architecture Lab

1. Ημιαγωγοί – Επαφή pn
2. MOS τρανζίστορ – Λειτουργία
3. Διαμόρφωση μήκους καναλιού
4. Τάση κατωφλίου
5. Κορεσμός ταχύτητας
6. Αγωγή υποκατωφλίου
7. Φαινόμενα δεύτερης τάξης

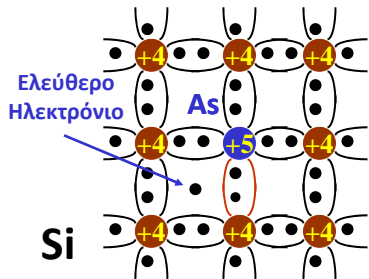
Ενεργειακές Ζώνες



Μονωτές – Ημιαγωγοί - Μέταλλα



Ημιαγωγοί με Προσμίξεις

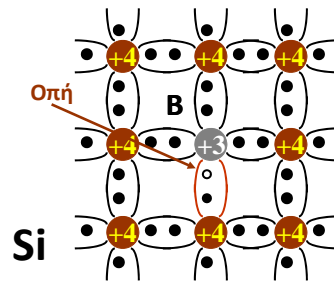


Ημιαγωγοί τύπου n

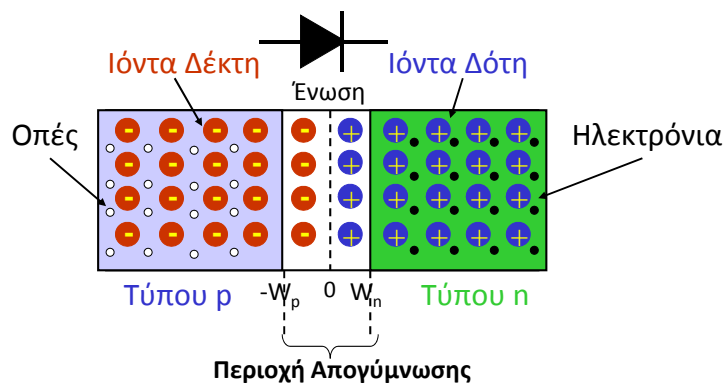
Δότες ή προσμίξεις τύπου n: είναι οι προσμίξεις που δίνουν φορείς ηλεκτρονίων

Ημιαγωγοί τύπου p

Δέκτες ή προσμίξεις τύπου p: είναι οι προσμίξεις που δίνουν οπές



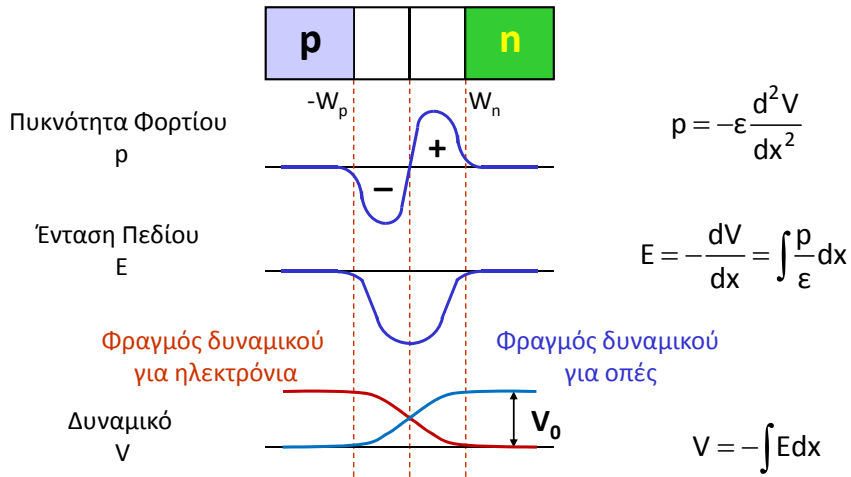
Επαφή Ανοικτού Κυκλώματος (I)



Η διάχυση οπών προς τα δεξιά και ηλεκτρονίων προς τα αριστερά δημιουργεί μία περιοχή κενή από κινούμενα φορτία, εξ αιτίας της ένωσης οπών – ηλεκτρονίων, την **περιοχή απογύμνωσης**.



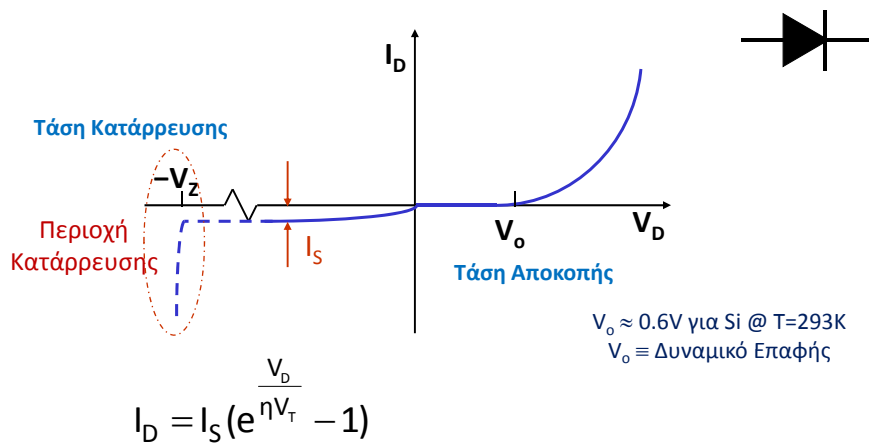
Επαφή Ανοικτού Κυκλώματος (II)



Θεωρία MOS Τρανζίστορ

7

I-V Χαρακτηριστική Επαφής p-n



V_T = το θερμικό δυναμικό = 25mV @ $T=293K$
 $\eta = 2$ για Si

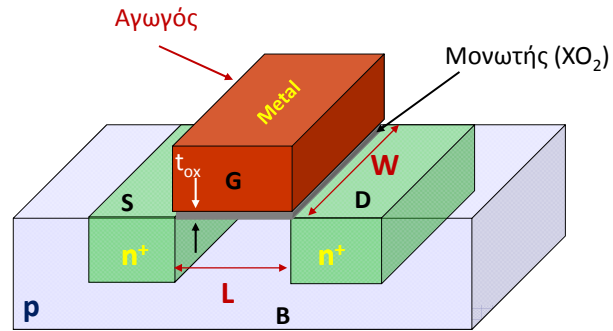
Νόμος της Επαφής p-n

Θεωρία MOS Τρανζίστορ

8

Τρανζίστορ MOS-FET

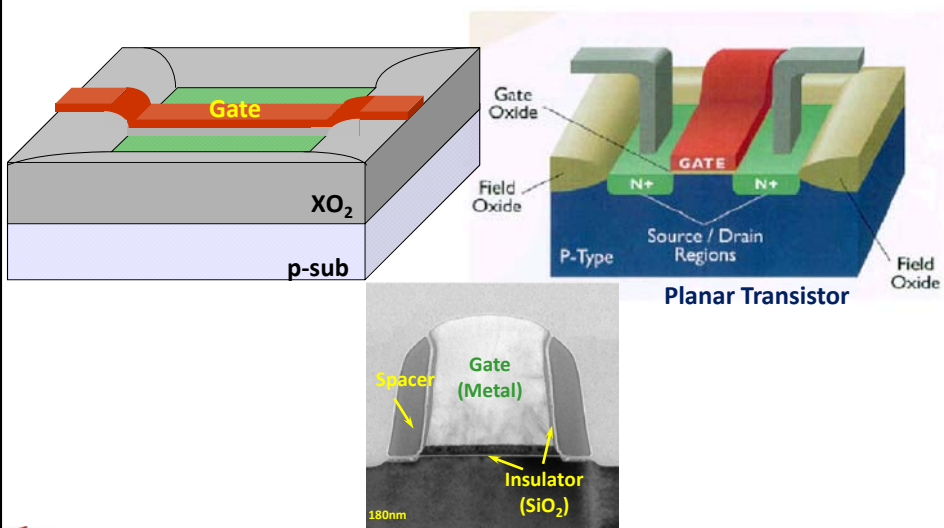
Επίπεδο (planar) MOS Τρανζίστορ



Θεωρία MOS Τρανζίστορ

9

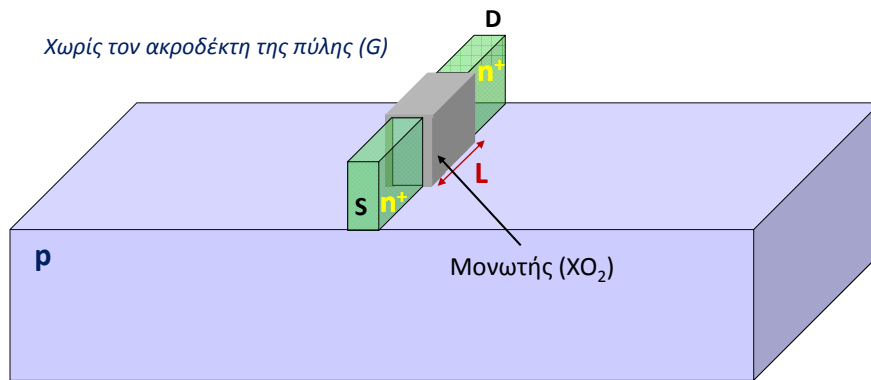
Τρισδιάστατη Εικόνα Επίπεδου Τρανζίστορ



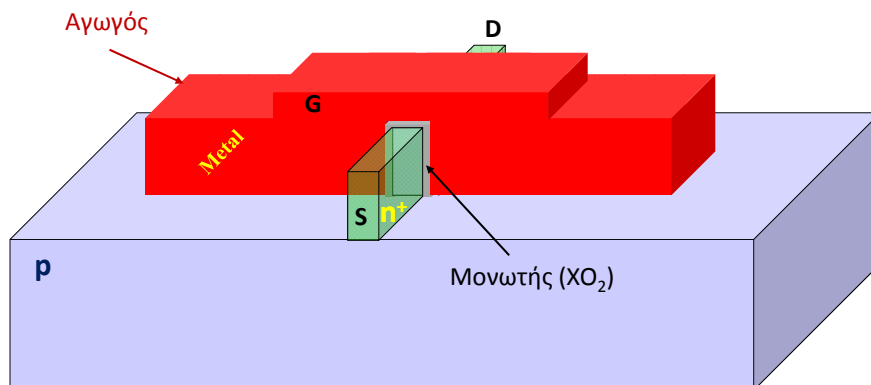
Θεωρία MOS Τρανζίστορ

10

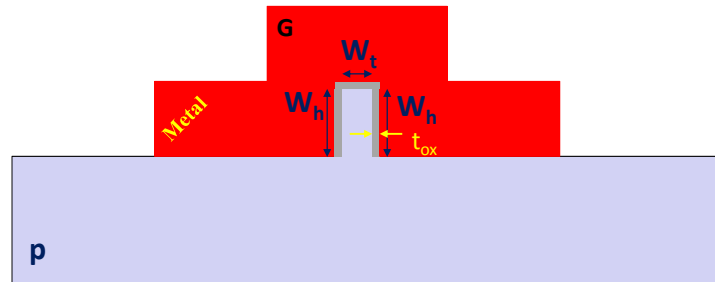
Τρανζίστορ FIN-FET I



Τρανζίστορ FIN-FET II



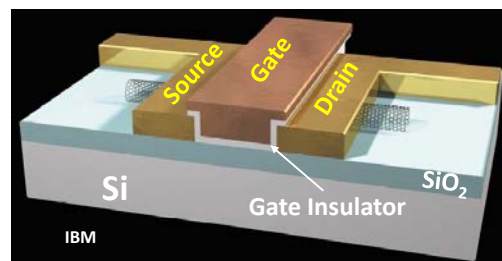
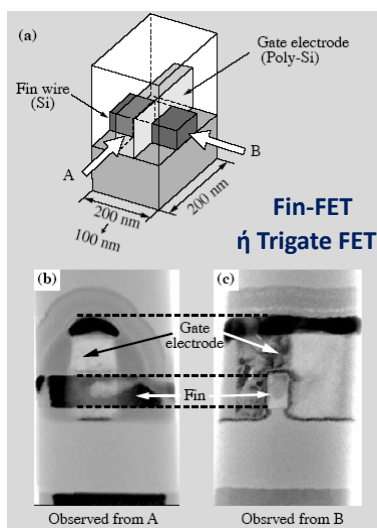
Τρανζίστορ FIN-FET III



$$W = 2W_h + W_t \approx 2W_h$$



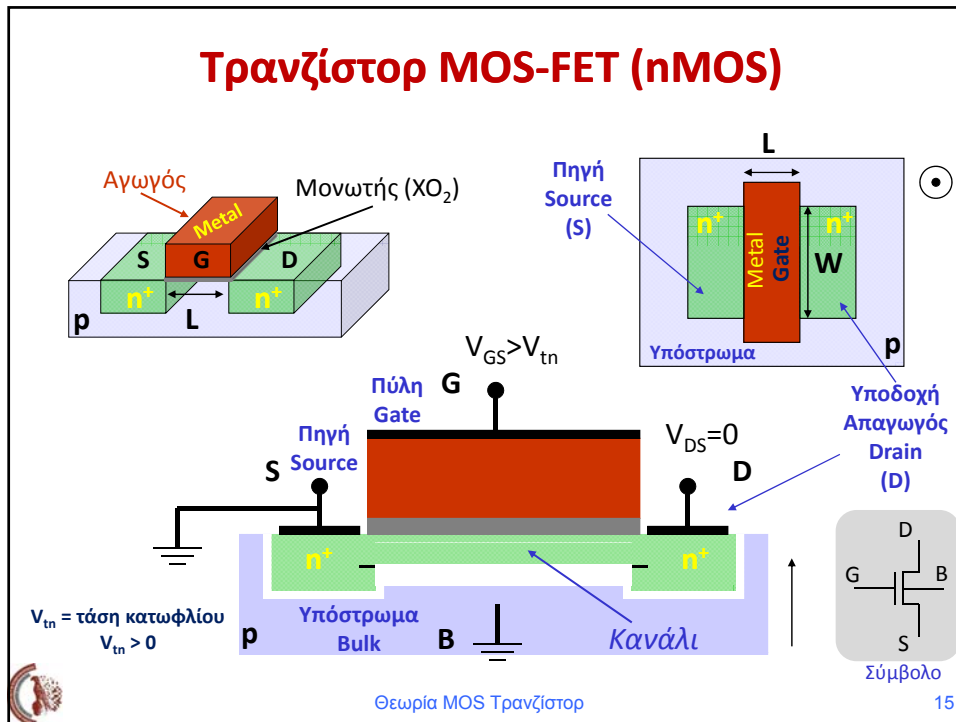
Fin FET & Carbon Nanotube FET



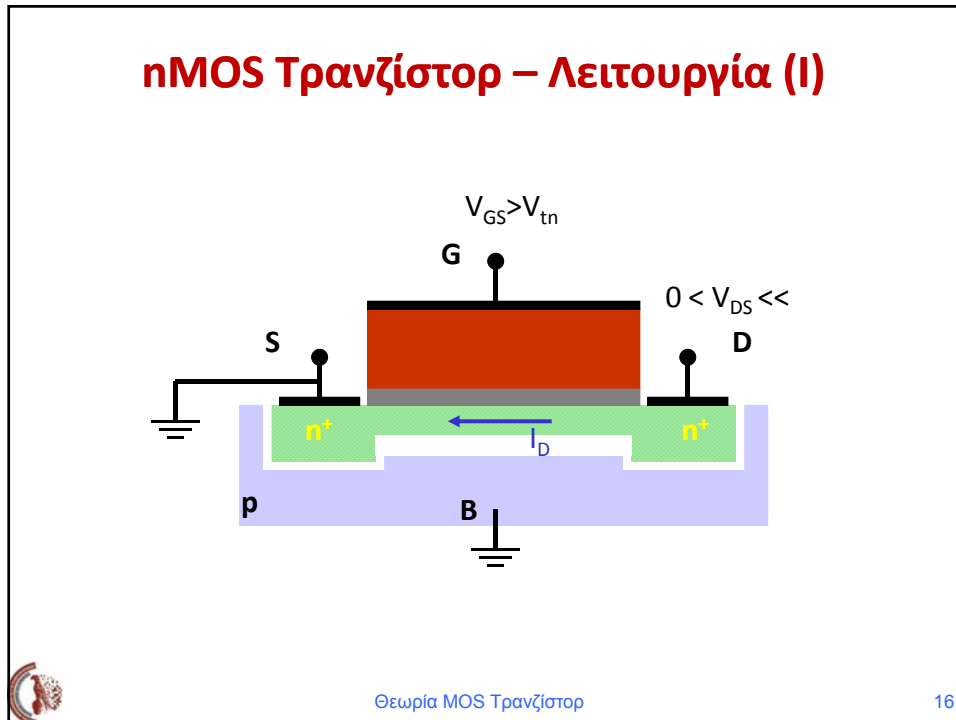
Carbon nanotube FET



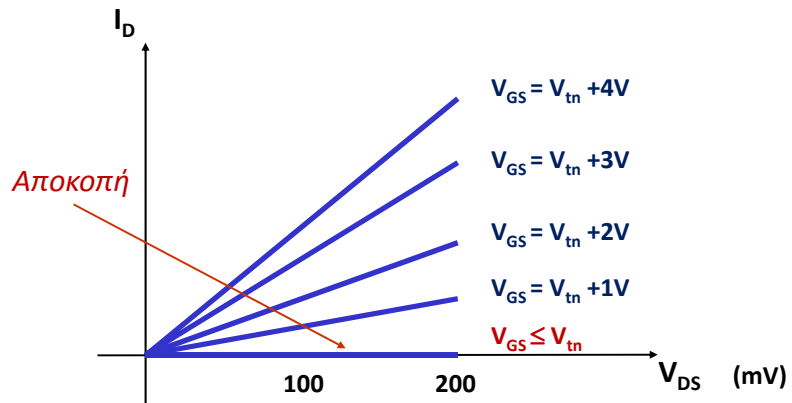
Τρανζίστορ MOS-FET (nMOS)



nMOS Τρανζίστορ – Λειτουργία (I)



nMOS Τρανζίστορ – Λειτουργία (II)

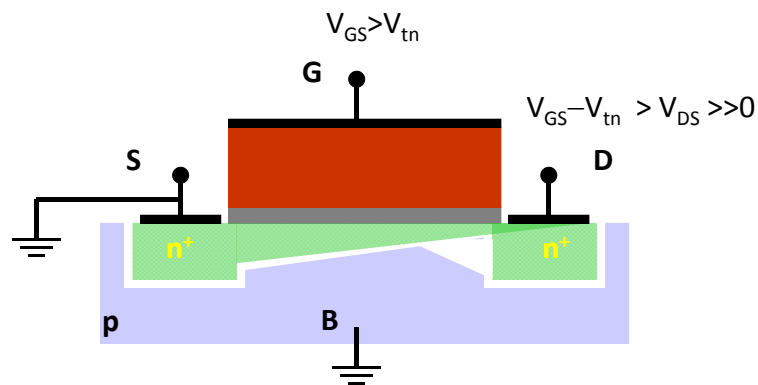


Γραμμική ή Τρίοδος ή Ωμική Περιοχή

Θεωρία MOS Τρανζίστορ

17

nMOS Τρανζίστορ – Λειτουργία (III)

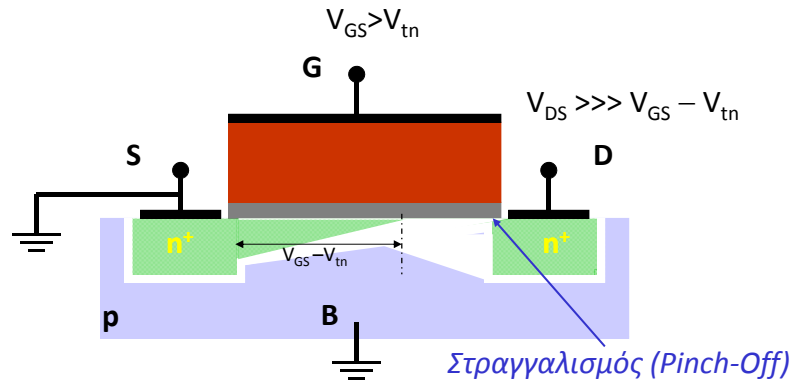


Γραμμική: $V_{DS} \leq V_{GS} - V_{tn}$

Θεωρία MOS Τρανζίστορ

18

ηMOS Τρανζίστορ – Λειτουργία (IV)

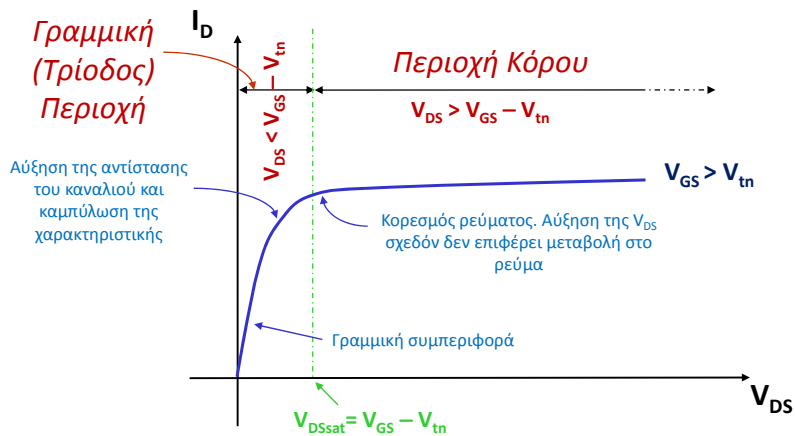


Κόρος (Saturation): $V_{DS} > V_{GS} - V_{tn}$

Θεωρία MOS Τρανζίστορ

19

I_D - V_{DS} Χαρακτηριστική ηMOS



Θεωρία MOS Τρανζίστορ

20

Υπολογισμός Ρεύματος Τρανζίστορ I

Το φορτίο στο κανάλι είναι:

$$Q_C = C_G (V_{GC} - V_{tn}) \quad (1)$$

Η μέση τιμή του δυναμικού στο κανάλι είναι:

$$V_c = \frac{(V_S + V_D)}{2} = V_S + \frac{V_{DS}}{2} \quad (2)$$

Η μέση διαφορά δυναμικού πύλης-καναλιού είναι:

$$V_{GC} = V_G - V_c = V_{GS} - \frac{V_{DS}}{2} \quad (3)$$

Για τη χωρητικότητα μεταξύ πύλης-καναλιού μπορούμε να γράψουμε:

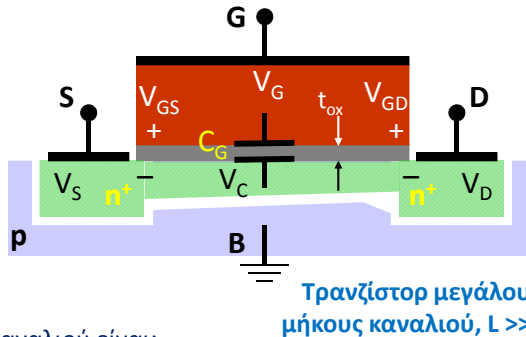
$$C_G = \epsilon_{ox} \epsilon_0 \frac{WL}{t_{ox}} = C_{ox} WL \quad (4)$$

ϵ_{ox} = σχετική ηλεκτρική διαπερατότητα οξειδίου
 ϵ_0 = ηλεκτρική διαπερατότητα κενού
 t_{ox} = πάχος οξειδίου πύλης

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox} \epsilon_0}{t_{ox}}$$

Θεωρία MOS Τρανζίστορ

21



Υπολογισμός Ρεύματος Τρανζίστορ II

Υπό την επίδραση του πλευρικού πεδίου, η μέση ταχύτητα των φορέων κίνησης στο κανάλι είναι:

$$u = \mu_n E \quad (5)$$

μ_n = ευκινησία ηλεκτρονίων
 E = ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Ισχύει:
$$E = \frac{V_{DS}}{L} \quad (6)$$

Το ρεύμα υποδοχής του τρανζίστορ θα είναι:

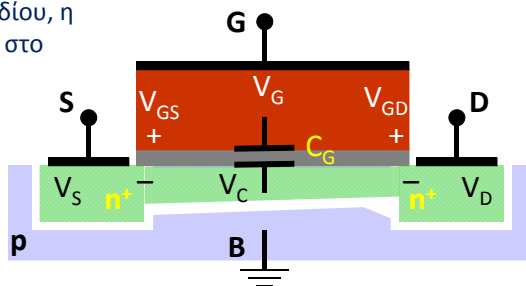
$$I_D = \frac{Q_C}{T} = \frac{Q_C}{L/u} = \frac{Q_C}{L} \mu_n E = \frac{Q_C}{L^2} \mu_n V_{DS} \stackrel{(1), (3), (4)}{=} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left(V_{GS} - V_{tn} - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} \Rightarrow$$

$$I_D = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_{tn}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} = k_n (V_{GS} - V_{tn}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2}$$

$$k_n = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L}$$

Θεωρία MOS Τρανζίστορ

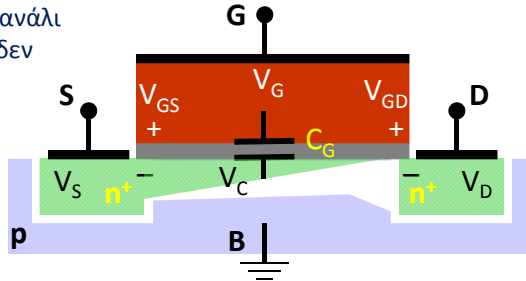
22



Υπολογισμός Ρεύματος Τρανζίστορ III

Για $V_{DS} > V_{DSsat} = V_{GS} - V_{tn}$ (κόρος) το κανάλι είναι στραγγαλισμένο και το ρεύμα δεν εξαρτάται από τη V_{DS} .

Συνεπώς, στην εξίσωση ρεύματος η V_{DS} αντικαθίσταται από την V_{DSsat} και ισχύει:



$$I_D = k_n (V_{GS} - V_{tn}) V_{DSat} - \frac{V_{DSat}^2}{2} \Rightarrow$$

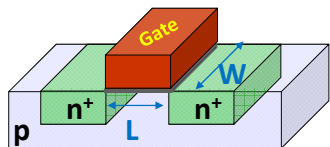
$$I_D = k_n (V_{GS} - V_{tn})(V_{GS} - V_{tn}) - \frac{(V_{GS} - V_{tn})^2}{2} = \frac{k_n}{2} (V_{GS} - V_{tn})^2$$

όπου: $V_{DSsat} \equiv V_{OV} = V_{GS} - V_{tn}$ (τάση υπεροδήγησης – overdrive voltage)



Εξισώσεις Ρεύματος nMOS Τρανζίστορ

Τρανζίστορ μεγάλου μήκους καναλιού, $L \gg \lambda$



$$k_n = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = \frac{\mu_n \epsilon}{t_{ox}} \frac{W}{L}$$

Συντελεστής Κέρδους (Απολαβής) Ρεύματος

$\epsilon = \epsilon_{ox} \cdot \epsilon_0 = \text{oxide permittivity}$

$$I_D = \begin{cases} 0 \\ k_n \left[(V_{GS} - V_{tn}) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \\ \frac{k_n}{2} (V_{GS} - V_{tn})^2 \end{cases}$$

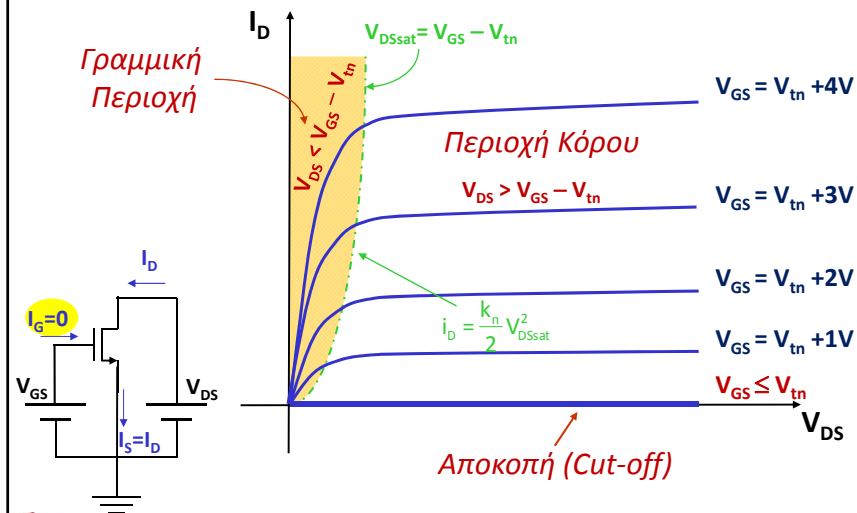
$V_{GS} - V_{tn} < 0$
Αποκοπή

$0 < V_{DS} < V_{GS} - V_{tn}$
Γραμμική (Τρίοδος)

$0 < V_{GS} - V_{tn} < V_{DS}$
Κόρος



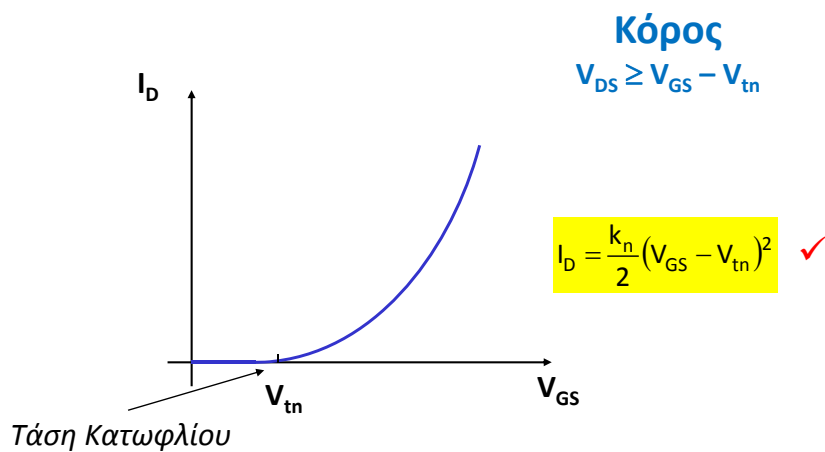
I_D - V_{DS} Χαρακτηριστικές nMOS



Θεωρία MOS Τρανζίστορ

25

I_D - V_{GS} Χαρακτηριστική Κόρου nMOS



Θεωρία MOS Τρανζίστορ

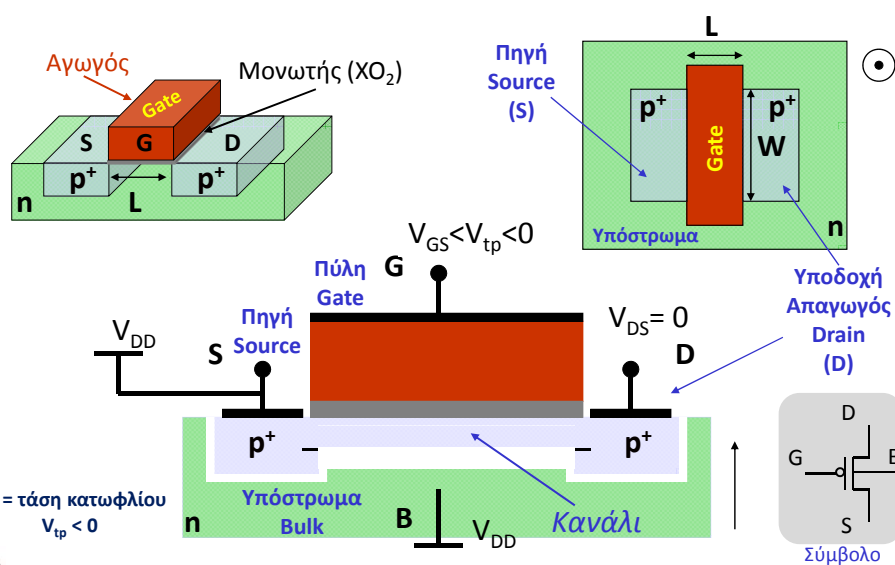
26

Παράγοντες που Επηρεάζουν το I_D

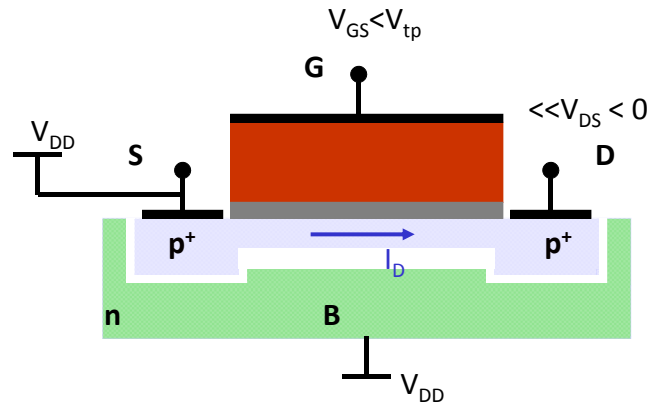
- Η απόσταση μεταξύ πηγής – απαγωγού /υποδοχής (L)
- Το πλάτος του καναλιού (W)
- Η τάση κατωφλίου (V_t)
- Το πάχος του μονωτή της πύλης (t_{ox})
- Η διηλεκτρική σταθερά του μονωτή της πύλης (ϵ)
- Η ευκινησία (κινητικότητα) των φορέων (μ)



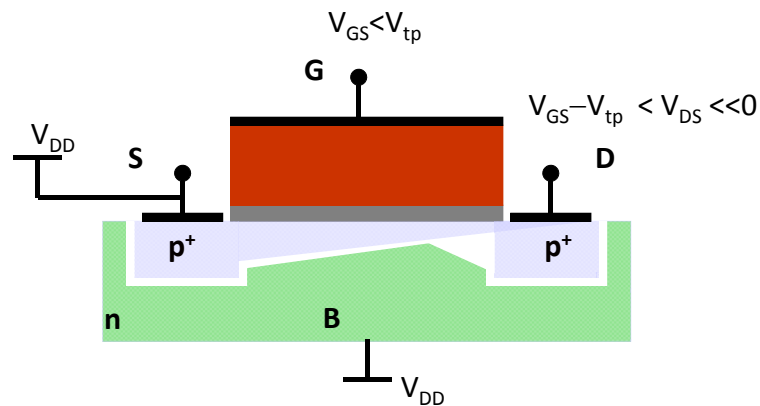
Το pMOS Τρανζίστορ



ρMOS Τρανζίστορ – Λειτουργία (I)



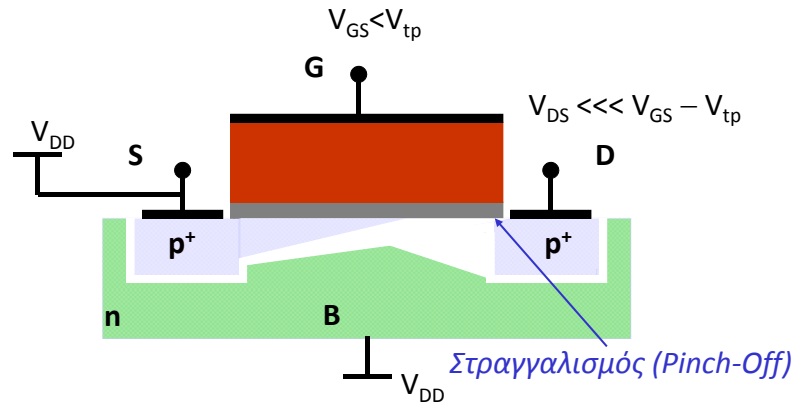
ρMOS Τρανζίστορ – Λειτουργία (II)



Γραμμική: $0 > V_{DS} > V_{GS} - V_{tp}$



ρMOS Τρανζίστορ – Λειτουργία (III)



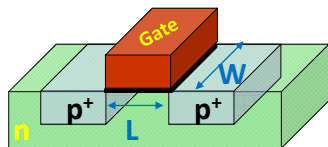
Κόρος: $V_{DS} < V_{GS} - V_{tp} < 0$

Θεωρία MOS Τρανζίστορ

31

Εξισώσεις Ρεύματος ρMOS Τρανζίστορ

Τρανζίστορ μεγάλου μήκους καναλιού, $L \gg \lambda$



$$k_p = \mu_p C_{ox} \frac{W}{L} = \frac{\mu_p \epsilon W}{t_{ox} L}$$

Συντελεστής
Απολαβής
Ρεύματος

$$\epsilon = \epsilon_{ox} \cdot \epsilon_0 = \text{oxide permittivity}$$

Ισχύει ότι: $\mu_p < \mu_n$!

$$I_D = \begin{cases} 0 & V_{GS} - V_{tp} > 0 \\ k_p \left[(V_{GS} - V_{tp})V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] & 0 > V_{DS} > V_{GS} - V_{tp} \\ \frac{k_p}{2} (V_{GS} - V_{tp})^2 & 0 > V_{GS} - V_{tp} > V_{DS} \end{cases}$$

$$V_{GS} - V_{tp} > 0$$

Αποκοπή

$$0 > V_{DS} > V_{GS} - V_{tp}$$

Γραμμική (Τρίοδος)

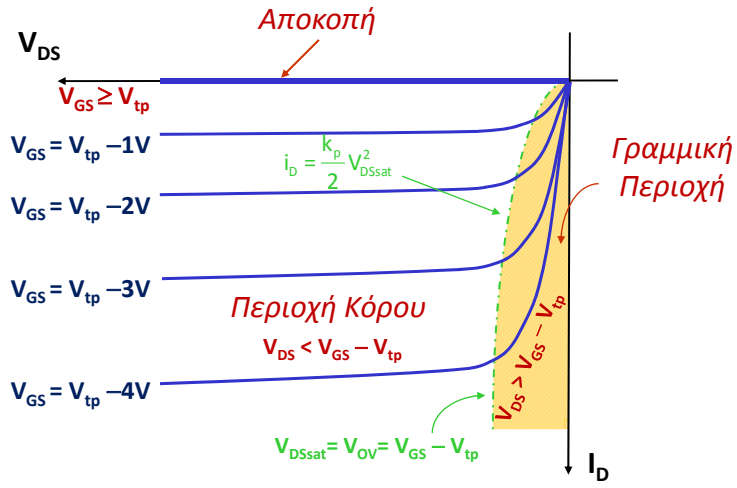
$$0 > V_{GS} - V_{tp} > V_{DS}$$

Κόρος

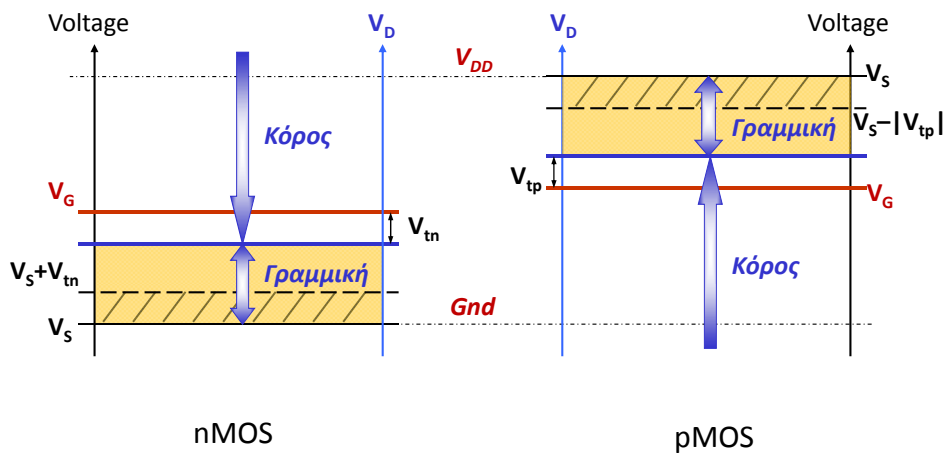
Θεωρία MOS Τρανζίστορ

32

I_D-V_{DS} Χαρακτηριστικές pMOS



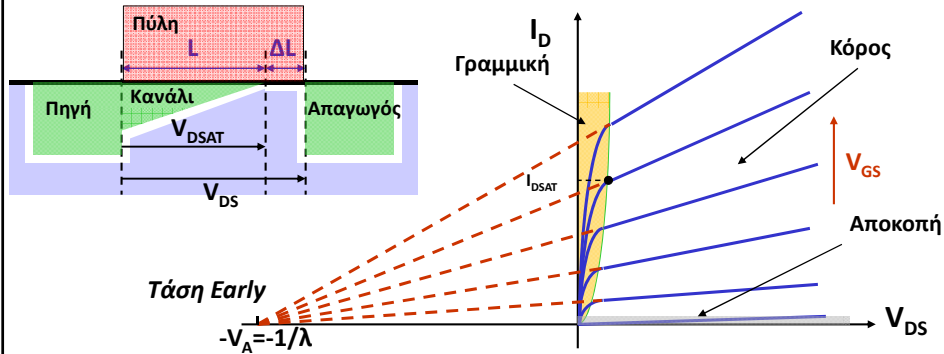
Γραμμική Περιοχή και Περιοχή Κόρου



Διαμόρφωση Μήκους Καναλιού

①

(Channel Length Modulation)



Αυξάνοντας την V_{DS} κατά ΔV_{DS} πάνω από τη $V_{DS(sat)}$ [$V_{DS} = V_{DS(sat)} + \Delta V_{DS}$] το μήκος του καναλιού L μειώνεται κατά ΔL . Καθώς το I_D είναι αντιστρόφως ανάλογο του μήκους του καναλιού, το I_D αυξάνει. Ακριβέστερα στον κόρο ισχύει:

$$I_D = \frac{k}{2} (V_{GS} - V_t)^2 (1 + \lambda V_{DS}) = I_{DSAT} \cdot (1 + \lambda V_{DS})$$

$$\lambda \approx \frac{1}{L}$$

$$\lambda = 0.005 - 0.03 \text{ V}^{-1}$$



Θεωρία MOS Τρανζίστορ

35

Τάση Κατωφλίου

②

Η τάση κατωφλίου προσδιορίζει την τιμή της τάσης V_{GS} κάτω από την οποία το ρεύμα I_D γίνεται πολύ μικρό, πρακτικά για κάποιες εφαρμογές αμελητέο.

Γενικά η τάση κατωφλίου εξαρτάται από:

- το υλικό της πύλης
- το υλικό του μονωτή της πύλης
- το πάχος του μονωτή
- την συγκέντρωση των προσμείξεων του καναλιού και
- την τάση μεταξύ πηγής και υποστρώματος (V_{SB})

Ειδικά για συγκεκριμένο υλικό πύλης η τάση κατωφλίου δίδεται από τη σχέση:

$$V_t = V_{t0} \pm \gamma \left(\sqrt{|-2\phi_F + V_{SB}|} - \sqrt{|-2\phi_F|} \right) \quad \text{με} \quad \gamma = \frac{t_{ox}}{\epsilon_{ox}} \sqrt{2q\epsilon_{si}N}$$

Συντελεστής
Φαινομένου Σώματος

όπου V_{t0} η τάση κατωφλίου για $V_{SB} = 0$, ϕ_F το δυναμικό Fermi ($\approx -0.3V$) ενώ t_{ox} , ϵ_{ox} το πάχος και η διηλεκτρική σταθερά του μονωτή, q το φορτίο του ηλεκτρονίου, ϵ_{si} η διηλεκτρική σταθερά του πυριτίου και N η πυκνότητα συγκέντρωσης των προσμείξεων στο υπόστρωμα.

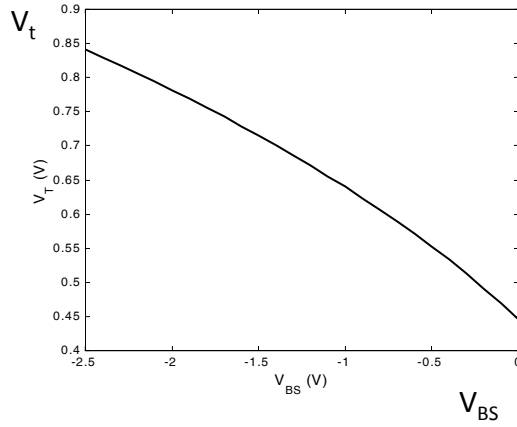
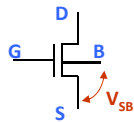
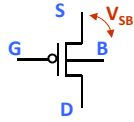
Το σημείο +/- αναφέρεται σε nMOS / pMOS τρανζίστορ αντίστοιχα.



Θεωρία MOS Τρανζίστορ

36

Επίδραση V_{SB} στην Τάση Κατωφλίου



$$|-2\phi_F| = 0.6V$$

και

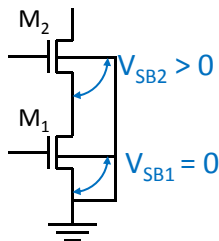
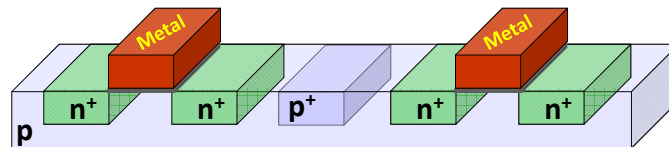
$$\gamma = 0.4V^{0.5}$$

$$V_t = V_{t0} \pm \gamma \left(\sqrt{|2\phi_F + V_{SB}|} - \sqrt{|2\phi_F|} \right)$$

Θεωρία MOS Τρανζίστορ

37

Επίδραση Σώματος – Body Effect



Αύξηση της τάσης $V_{SB} \Rightarrow$ αύξηση της περιοχής απογύμνωσης στο κανάλι γεγονός που μεταβάλλει τη γεωμετρία του τρανζίστορ έτσι ώστε το υπόστρωμα να έχει το ρόλο μιας δεύτερης πύλης ελέγχου με αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης κατωφλίου:

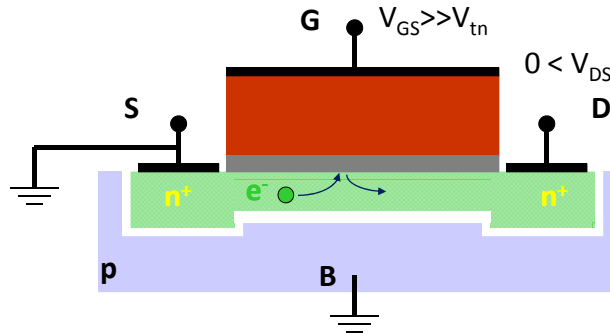
$$\Rightarrow V_{t2} > V_{t1} = V_{t0}$$

Θεωρία MOS Τρανζίστορ

38

Υποβάθμιση της Ευκινησίας (μ)

(Mobility Degradation)

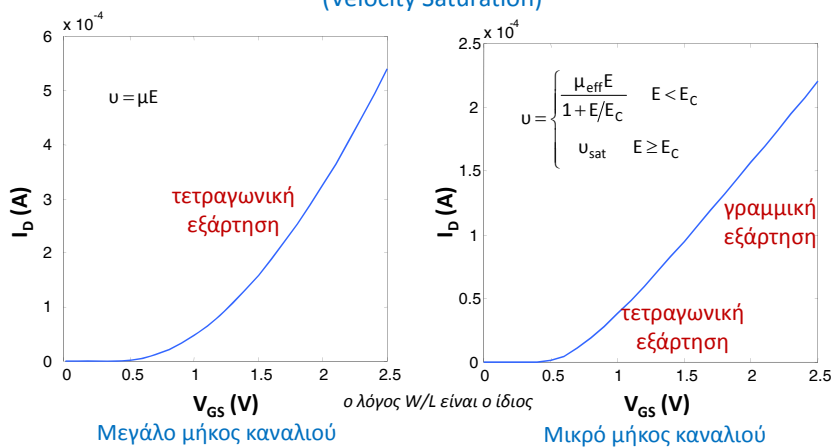


Υπό την παρουσία ισχυρών κάθετων πεδίων (V_{GS}/t_{ox}) οι φορείς κίνησης σκεδάζονται συχνότερα στην διεπαφή του οξειδίου της πύλης με αποτέλεσμα η ευκινησία (κινητικότητα) - μ να υποβαθμίζεται ($\mu_{eff} < \mu$) !



Κορεσμός Ταχύτητας (I)

(Velocity Saturation)

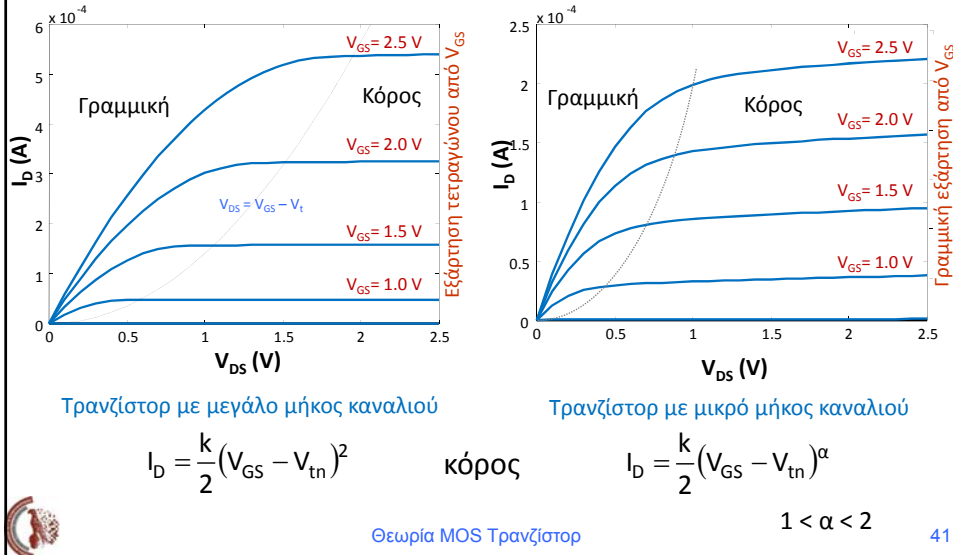


Στα μικρού μήκους καναλιού τρανζίστορ η ταχύτητα των κινούμενων φορέων τείνει να κορεστεί χωρίς με την αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου (V_{DS}/L). Ως αποτέλεσμα αυξάνοντας το V_{DS} το I_D φτάνει στον κόρο νωρίτερα από την τιμή ($V_{GS}-V_t$) και το I_D έχει γραμμική εξάρτηση από το V_{GS} .

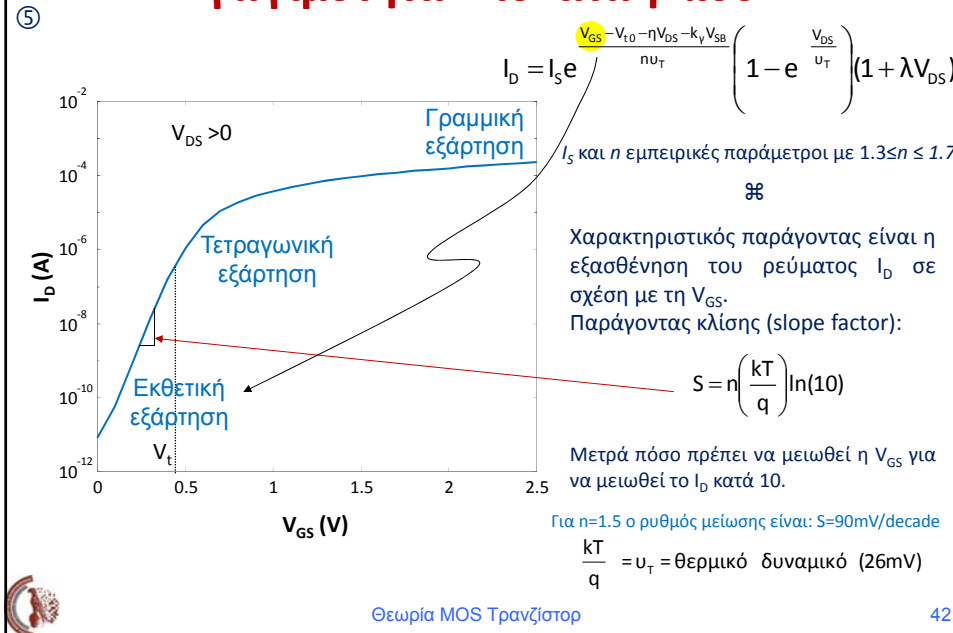


Κορεσμός Ταχύτητας (II)

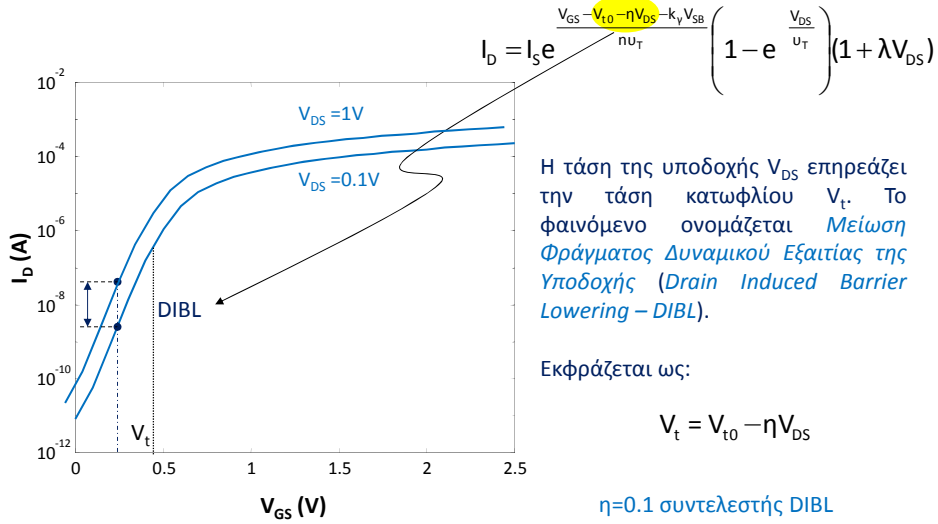
Τα δύο τρανζίστορ είναι κατασκευασμένα στην ίδια τεχνολογία και ο λόγος W/L και των δύο είναι ο ίδιος.



Αγωγιμότητα Υποκατωφλίου I



Αγωγιμότητα Υποκατωφλίου II



Ρεύμα Διαρροής Πύλης

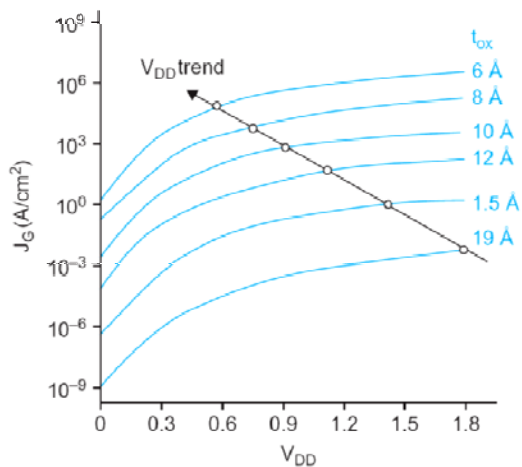
Ⓒ Για λεπτά οξειδία πύλης (<1.5-2.0 nm), υπάρχει ροή ρεύματος μέσα από το οξειδίο (“μονωτής”). Το ρεύμα αυτό οφείλεται σε κβαντομηχανικά φαινόμενα διόδευσης / καναλισμού / σήραγγας (tunneling) των φορέων και είναι ανάλογο της επιφάνειας της πύλης.

Διόδευση Fowler-Nordheim:
συνθήκες υψηλής τάσης με μέτριο πάχος οξειδίου.

Απευθείας Διόδευση (Direct Tunneling):
συνθήκες χαμηλής τάσης με λεπτό πάχος οξειδίου.

$$I_{gate} = WA \left(\frac{V_{DD}}{t_{ox}} \right)^2 e^{-B \frac{t_{ox}}{V_{DD}}}$$

Όπου A και B σταθερές.



Εξάρτηση από τη Θερμοκρασία

⑦

- Η ευκινησία (μ) των φορέων κίνησης (ηλεκτρόνια/οπές) μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

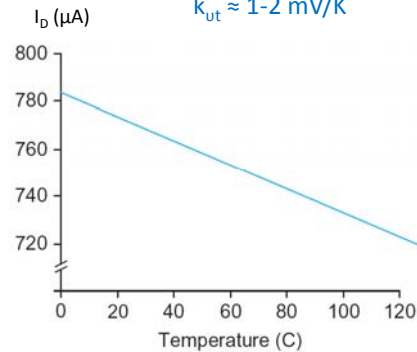
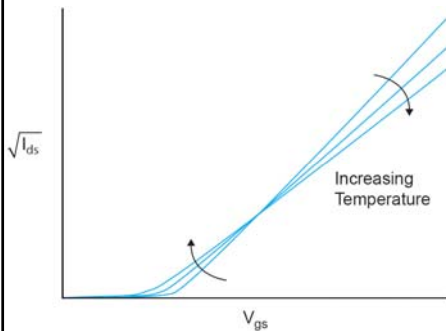
$$\mu(T) = \mu(T_r) \left(\frac{T}{T_r} \right)^{-k_\mu}$$

$k_\mu \approx 1.5$

- Η απόλυτη τιμή της τάσης κατωφλίου (V_t) μειώνεται σχεδόν γραμμικά με τη θερμοκρασία.

$$V_t(T) = V_t(T_r) - k_{ut}(T - T_r)$$

$k_{ut} \approx 1-2 \text{ mV/K}$

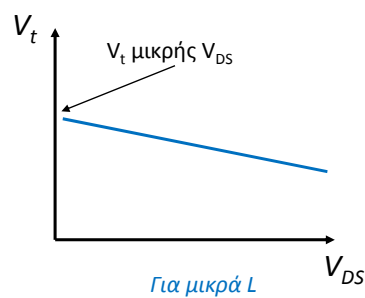
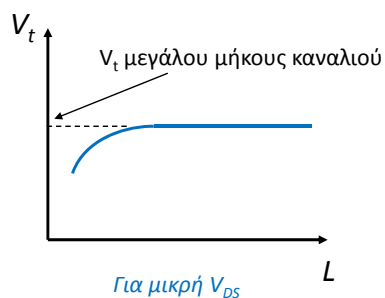


Θεωρία MOS Τρανζίστορ

45

Φαινόμενα Δεύτερης Τάξης (I)

Επιδράσεις στην Τάση Κατωφλίου



$$V_t = V_{t0} - \eta V_{DS}$$

Φαινόμενο DIBL



Θεωρία MOS Τρανζίστορ

46

Φαινόμενα Δεύτερης Τάξης (II)

- **Μεταβολή της Ευκινησίας**

Η ευκινησία (μ) των φορέων (ηλεκτρόνια/οπές) μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης των προσμείξεων.

- **Αστάθεια Πόλωσης–Θερμοκρασίας (Bias–Temperature Instability)**

Υψηλές τάσεις και θερμοκρασίες οδηγούν στην αύξηση κατ' απόλυτη τιμή της τάσης κατωφλίου των τρανζίστορ (negative-BTI – NBTI για pMOS positive-BTI – PBTI για nMOS).

- **Έγχυση Θερμών Ηλεκτρονίων (Hot Carriers Injection)**

Το ηλεκτρικό πεδίο της υποδοχής αυξάνει μειώνοντας το μήκος του καναλιού (L) και τα ηλεκτρόνια κινούμενα από την πηγή προς την υποδοχή μπορεί να αποκτήσουν αρκετή ενέργεια (θερμά ηλεκτρόνια) ώστε να εισέλθουν στο μονωτή της πύλης και να παγιδευτούν. Ως επακόλουθο η τάση κατωφλίου αυξάνει κατά απόλυτη τιμή, μειώνοντας σταδιακά τις επιδόσεις.



Φαινόμενα Δεύτερης Τάξης (III)

- **Διάτρηση Υποστρώματος**

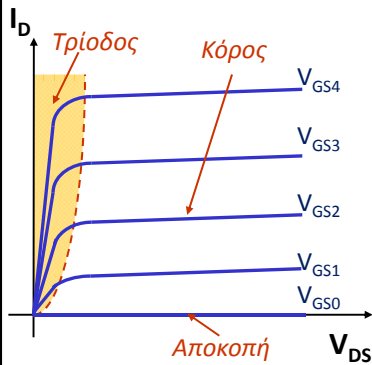
Για μικρά μήκη καναλιού (L) και όταν η τάση της υποδοχής είναι υψηλή η περιοχή της αραίωσης γύρω από την υποδοχή μπορεί να επεκταθεί προς την πηγή με αποτέλεσμα την ροή ρεύματος μεταξύ υποδοχής – πηγής ανεξαρτήτως της τάσης στην πύλη. Υπό κανονικές συνθήκες το φαινόμενο δεν επιφέρει μόνιμη καταστροφή του τρανζίστορ.

- **Διάτρηση Μονωτή Πύλης**

Για μεγάλες τιμές τάσης μεταξύ πύλης – πηγής και θερμοκρασίας, ο μονωτής της πύλης μπορεί να διατρηθεί (time dependant dielectric brakedown – TDDb) οδηγώντας το τρανζίστορ σε μόνιμη δυσλειτουργία.



Διαγωγιμότητα



Τρίδος

Η αντίσταση του καναλιού (αντίσταση εξόδου) υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\left. \frac{dI_D}{dV_{DS}} \right|_{V_{GS} \rightarrow 0} \approx k(V_{GS} - V_t) \Rightarrow R_C = \frac{1}{k(V_{GS} - V_t)}$$



Η διαγωγιμότητα που εκφράζει τη σχέση μεταξύ I_D και V_{GS} ορίζεται ως:

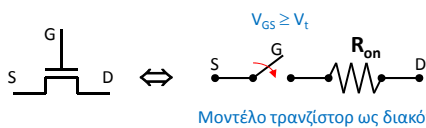
$$g_m = \left. \frac{dI_D}{dV_{GS}} \right|_{V_{DS} = \text{σταθ.}} = k \cdot V_{DS}$$

Κόρος

Το MOS συμπεριφέρεται ως μία πηγή ρεύματος με το ρεύμα ανεξάρτητο της V_{DS} . Η διαγωγιμότητα δίδεται από τη σχέση:

$$g_m = k(V_{GS} - V_t)$$

Το Τρανζίστορ ως Διακόπτης



R_{on} : { μεταβλητή στο χρόνο
μη γραμμική αντίσταση

Προσέγγιση: αναζητάμε ισοδύναμη σταθερή και γραμμική αντίσταση R_{eq} η οποία θα επιφέρει το ίδιο αποτέλεσμα με το πραγματικό τρανζίστορ. Μια αρχική εκτίμηση της R_{eq} είναι η μέση τιμή της R_{on} στην περιοχή λειτουργίας που μας ενδιαφέρει.

$$R_{eq} = \text{average}_{t=t_1..t_2}(R_{on}(t)) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} R_{on}(t) dt = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{V_{DS}(t)}{I_D(t)} dt \cong \frac{1}{2}(R_{on}(t_1) + R_{on}(t_2))$$