

Ερωτήσεις θεωρίας –Σημειώσεις στο τρανζίστορ MOSFET

1. Να σχεδιάσετε τη δομή (διατομή) και το κυκλωματικό σύμβολο ενός τρανζίστορ MOSFET πύκνωσης (ή εμπλουτισμού) καναλιού τύπου n.
2. Να αναπτύξετε τις περιοχές λειτουργίας ενός τρανζίστορ MOSFET πύκνωσης καναλιού τύπου n
3. Να εξηγήσετε ποιοτικά το σχήμα της χαρακτηριστικής του ρεύματος απαγωγού I_D (αφού το σχεδιάσετε) για ένα ιδανικό τρανζίστορ MOSFET πύκνωσης καναλιού τύπου n σε συνάρτηση της τάσης απαγωγού-πηγής, V_{DS} για $V_{GS} > V_T$ (η V_{GS} είναι σταθερή).
4. Εξηγήστε τι σημαίνει διαμόρφωση του μήκους του καναλιού
- 5*. Ποια είναι η διαφορά μεταξύ των τρανζίστορ MOSFET πύκνωσης (enhancement) και MOSFET αραιώσης (depletion); Κάτω από ποιες συνθήκες υφίσταται αγωγή στο κανάλι;
6. Τι ονομάζεται ρεύμα υποκατωφλίου και σε ποιές περιπτώσεις συμβαίνει;
7. Ποιο είναι το κυριότερο χαρακτηριστικό ενός κυκλώματος που έχει κατασκευαστεί σε τεχνολογία CMOS;
8. Να γνωρίζετε να υπολογίσετε την τάση κατωφλίου όταν η τάση πηγής-υποστρώματος είναι $V_{SB} \neq 0$

Περιοχές λειτουργίας του τρανζίστορ NMOS πύκνωσης:

Υπάρχουν τρεις περιοχές λειτουργίας του τρανζίστορ: η περιοχή αποκοπής, η τριόδος ή γραμμική περιοχή και η περιοχή κορεσμού.

- Περιοχή αποκοπής (cut-off). Η τάση πύλης - πηγής V_{GS} είναι μικρότερη από την τάση κατωφλίου, $V_{GS} < V_T$, και η ροή του ρεύματος απαγωγού I_D είναι 0. Υπάρχει ένα μικρό ρεύμα διαρροής (sub-threshold leakage), λόγω του ότι κάποια ενεργητικά ηλεκτρόνια στην πηγή εισέρχονται στην p-περιοχή και φτάνουν στον απαγωγό.
- Γραμμική (linear) περιοχή ή τριόδος. Το τρανζίστορ λειτουργεί στην γραμμική περιοχή όταν $V_{GS} > V_T$ και $V_{DS} < V_{GS} - V_T$. Σχηματίζεται ένα ομοιογενές κανάλι τύπου n (στρώμα αναστροφής) στο p- υπόστρωμα ανάμεσα στην πηγή και στον απαγωγό, κάτω από την πύλη. Το MOSFET συμπεριφέρεται σαν μια αντίσταση που ελέγχεται τόσο από την τάση V_{DS} όσο και από την τάση V_{GS} .

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

- Περιοχή κορεσμού (saturated). Για να λειτουργεί το τρανζίστορ στην περιοχή κορεσμού πρέπει να ισχύει: $V_{GS} > V_T$ και $V_{DS} > V_{GS} - V_T$. Έχουμε στραγγαλισμό (μηδενίζεται το βάθος) του καναλιού στην περιοχή του απαγωγού. Το ρεύμα είναι ανεξάρτητο της V_{DS} .

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

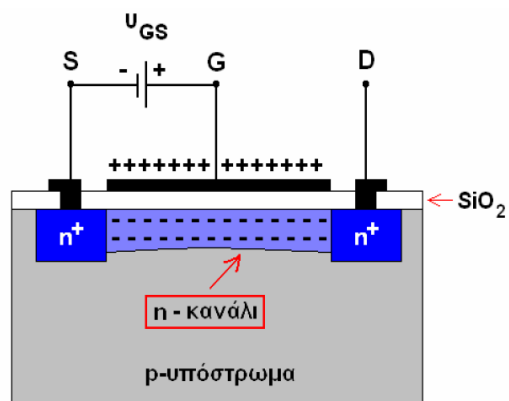
Η περιοχή κορεσμού χρησιμοποιείται κατά τη λειτουργία του τρανζίστορ σε ενισχυτικές διατάξεις.

Λειτουργία στην περιοχή υποκατωφλίου (OFF-State): Στην περιοχή αυτή λειτουργίας του τρανζίστορ θεωρήθηκε ότι όταν το τρανζίστορ είναι αποκομμένο ($V_{GS} < V_T$) δεν διαρρέεται από ρεύμα, γεγονός που δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα. Ωστόσο, έχει βρεθεί πειραματικά ότι για τιμές της V_{GS} μικρότερες αλλά κοντά στην V_T ρέει ένα πολύ μικρό ρεύμα I_D . Η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή υποκατωφλίου (subthreshold region). Το ρεύμα απαγωγού κυριαρχούμενο από διαδικασίες διάχυσης αυξάνει εκθετικά με την τάση V_{GS} και για τιμές τάσης απαγωγού $V_{DS} > 3kT/q$ γίνεται ανεξάρτητο της V_{DS}

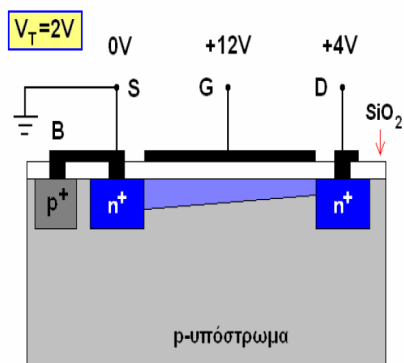
$$I_D \propto \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} e^{V_{GS}}$$

Παρόλου που στις περισσότερες εφαρμογές το MOSFET λειτουργεί για $V_{GS} > V_T$, υπάρχουν κάποιες ειδικές σημαντικές εφαρμογές χαμηλής τάσης και χαμηλής ισχύος που βασίζουν τη λειτουργία τους στην περιοχή υποκατωφλίου.

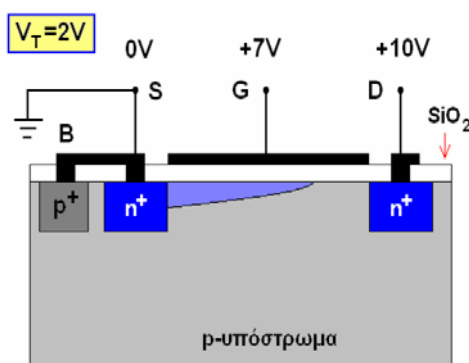
Τρανζίστορ πύκνωσης NMOS



Σχηματισμός του στρώματος αναστροφής τύπου n και δημιουργία του καναλιού -n ανάμεσα στην πηγή και τον απαγωγό εφαρμόζοντας θετική τάση V_{GS} μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου V_T



Το τρανζίστορ στην γραμμική περιοχή

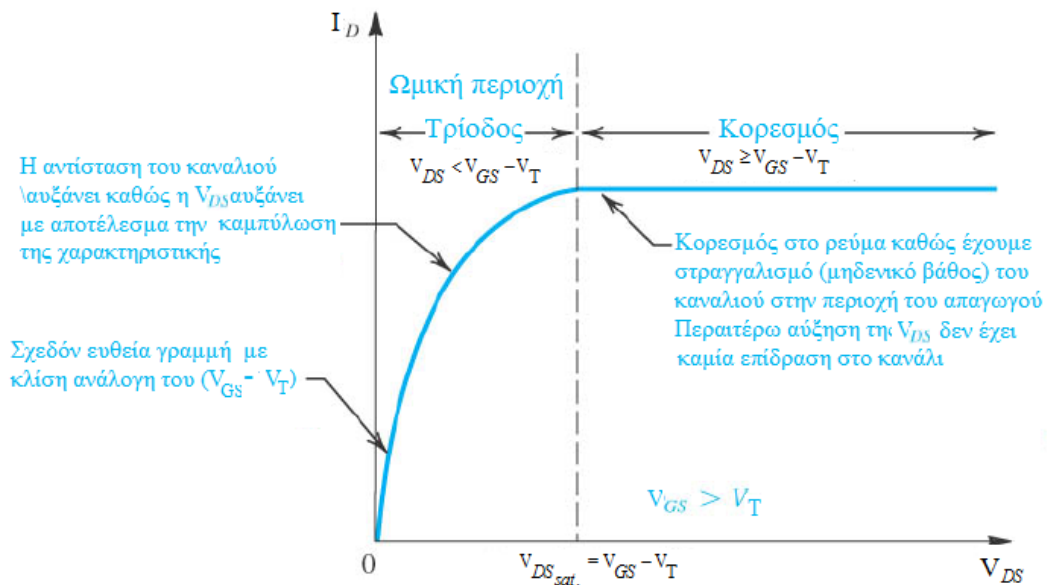


Το τρανζίστορ στον κορεσμό

Ποιοτική ερμηνεία της χαρακτηριστικής του ρεύματος απαγωγού I_D για ένα ιδανικό τρανζίστορ MOSFET τύπου n σε συνάρτηση της τάσης απαγωγού-πηγής, V_{DS} για $V_{GS} > V_T$ (η V_{GS} είναι σταθερή).

Τρανζίστορ NMOS

Τάση κατωφλίου $V_T \approx V_{FB} + 2\phi_{fn} + \frac{\sqrt{2 \epsilon_s q N_A (2\phi_{fn} + V_{BS})}}{C_o}$; $\phi_{fn} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$



Το ρεύμα απαγωγού I_D σε συνάρτηση με την τάση απαγωγού-πηγής V_{DS} για ιδανικό τρανζίστορ NMOS τύπου n όταν $V_{GS} > V_T$

Περιοχή κορεσμού: Στην πράξη καθώς η V_{DS} αυξάνει, το σημείο στραγγαλισμού του καναλιού μετακινείται λίγο από τον απαγωγό προς την πηγή και έτσι το ενεργό μήκος L του καναλιού μειώνεται, φαινόμενο που ονομάζεται **διαμόρφωση του μήκους του καναλιού**. Το αποτέλεσμα είναι ότι το ρεύμα I_D αυξάνει καθώς αυξάνει η τάση V_{DS}

$$I_D = \frac{K}{2} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS}) \quad \text{όπου } \lambda \text{ θετική σταθερά (ισούται με } 0,005\text{-}0,03\text{V}^{-1}\text{)}$$

$$K = \mu_n C_{ox} \left(\frac{W}{L}\right)$$

Φαινόμενο σώματος (body effect): Το φαινόμενο σώματος αναφέρεται στην εξάρτηση του δυναμικού κατωφλίου, V_T , από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ της πηγής και του σώματος (bulk) του υποστρώματος, V_{SB} . Όταν η πηγή με τον ακροδέκτη του υποστρώματος είναι βραχυκυκλωμένες, το δυναμικό κατωφλίου χαρακτηρίζεται ως V_{T0} . Αν μεταξύ της πηγής και του υποστρώματος η διαφορά δυναμικού πάρει μη μηδενική τιμή, $V_{SB} \neq 0$, τότε το δυναμικό κατωφλίου γράφεται σε συνάρτηση της V_{SB}

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

όπου γ είναι η παράμετρος του φαινομένου σώματος και ϕ_F η παράμετρος επιφανειακού δυναμικού. Η παράμετρος γ είναι:

$$\gamma = \left(\frac{t_{OX}}{\epsilon_{OX}} \right) \sqrt{2q\epsilon_{Si}N_{SUB}}$$

Όπου q το φορτίο του ηλεκτρονίου, t_{ox} το πάχος του μονωτικού οξειδίου πύλης, ϵ_{ox} η διηλεκτρική σταθερά του οξειδίου, ϵ_{si} η διηλεκτρική σταθερά του πυριτίου.

Σύγκριση των τρανζίστορ MOSFET του τύπου πύκνωσης (enhancement) και τύπου αραίωσης (depletion)

Type	Cross Section	Output Characteristics
n-Channel Enhancement (Normally Off)		
n-Channel Depletion (Normally On)		
p-Channel Enhancement (Normally Off)		
p-Channel Depletion (Normally On)		

Τύποι τρανζίστορ : Υπάρχουν δύο τύποι τρανζίστορ

1. Τρανζίστορ πύκνωσης (Enhancement mode device)

Χαρακτηριστικό των NMOS και PMOS τρανζίστορ πύκνωσης είναι ότι εάν δεν υπάρχει πόλωση στην πύλη το τρανζίστορ βρίσκεται σε κατάσταση OFF. Τα τρανζίστορ αυτά κατηγοριοποιούνται σαν «normally-off» MOSFETs. Για τρανζίστορ NMOS με αρκετή θετική πόλωση πύλης ($V_{GS} > V_T$) υπάρχει αγωγίμο κανάλι που «πληρώνεται» από ηλεκτρόνια. Για PMOS με αρνητική πόλωση πύλης $V_{GS} < V_T$ υπάρχει αγωγίμο κανάλι από οπές. Η V_{GS} ενισχύει την αγωγή του καναλιού και για αυτό ονομάζονται τρανζίστορ πύκνωσης.

2. Τρανζίστορ αραίωσης (Depletion mode device)

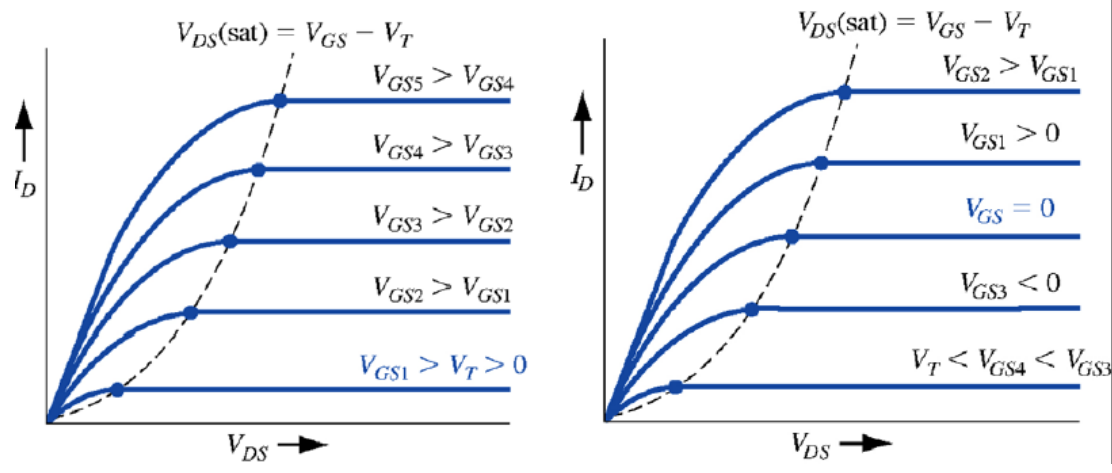
Στα MOSFETs αυτά ενσωματώνεται το κανάλι στη διάρκεια της κατασκευής του τρανζίστορ. Τα τρανζίστορ αυτά είναι σε κατάσταση ON χωρίς εξωτερική πόλωση στην πύλη ($V_{GS}=0$), γι' αυτό λέγονται «normally-on» MOSFETs. Με την εφαρμογή

τάσης (αρνητικής ή θετικής) στην πύλη, το κανάλι «αραιώνει» από ηλεκτρόνια ή οπές αντίστοιχα. Για αυτό ονομάζεται τρανζίστορ αραιώσης.

Για N-MOS τρανζίστορ, με αρνητική τάση το ρεύμα απαγωγού σταματάει, και με θετική πόλωση για τα P-MOS τρανζίστορ.

Συμπερασματικά, με κατάλληλη πόλωση πύλης το τρανζίστορ αραιώσης πηγαίνει σε κατάσταση OFF.

Χαρακτηριστικές εξόδου τρανζίστορ NMOS



Τρανζίστορ NMOS πύκνωσης

Τρανζίστορ NMOS αραιώσης