



ΗΜΙΑΓΩΓΑ ΥΛΙΚΑ: ΘΕΩΡΙΑ-ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Μέρος 2^ο: Αρχές λειτουργίας των ημιαγωγικών διατάξεων
Ενότητα 17^η: Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET)-
FET επαφής.

Γεώργιος Λιτσαρδάκης
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
& Μηχανικών Υπολογιστών



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.





17. Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET)-FET επαφής.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Περιεχόμενα ενότητας

1. Περιγραφή.
2. Κανάλι.
3. Φραγή του καναλιού.
4. Τάση φραγής.
5. Υπολογισμός ρεύματος.
6. Διαγωγιμότητα.
7. Συχνότητα αποκοπής.



FET

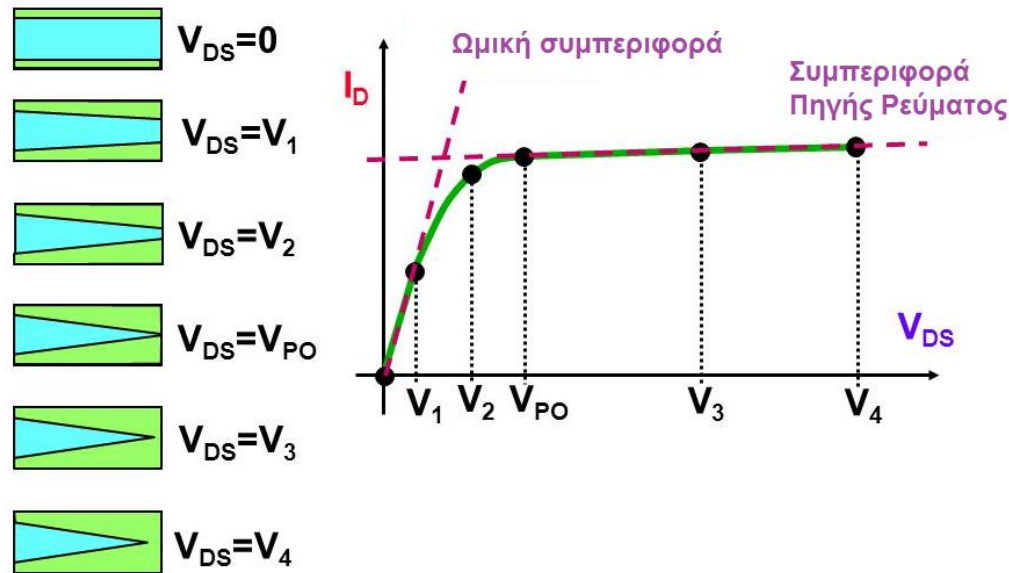
- Τρανζίστορ
 - 3 ακροδέκτες: πύλη(Gate), πηγή(Source) εκροή(Drain)
 - μονοπολικά (ένα είδος φορέων)
 - έλεγχος με την τάση στην πύλη
 - πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου (πύλης)
- Junction FET
 - επαφή p-n
 - MESFET (MEtal-Semiconductor FET) επαφή μετάλλου-ημιαγωγού (φράγμα Schottky)
- MOSFET – Insulated Gate FET



JFET

μεταβολή ΠΦΧ – διατομής του αγώγιμου καναλιού με την τάση V_{DS}

Η αρχή λειτουργίας του JFET όταν $V_{GS}=0$



Συμπεριφορά του JFET υπό την επιβολή τάσης στους ακροδέκτες D και S.

Πηγή: Διαφάνεια 90 - Descargar "Materiales semiconductores (Sem01.ppt) La unión PN y los diodos semiconductores (Pn01.ppt) Transistores (Trans01.ppt) Introducción a la Electrónica de."

http://images.slideplayer.es/7/1662893/slides/slide_90.jpg

<http://slideplayer.es/slide/1662893/>



το κανάλι του JFET

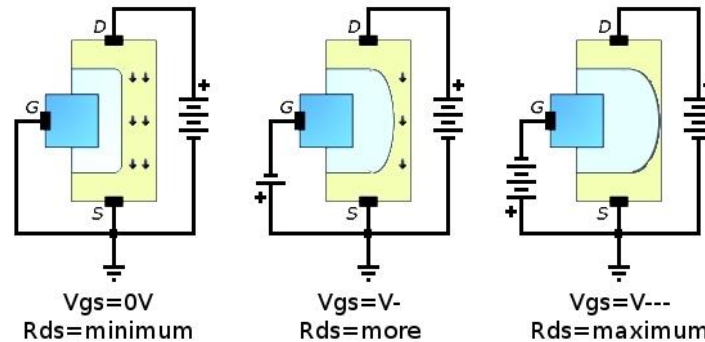
- το αγώγιμο κανάλι μεταξύ πηγής και εκροής υπάρχει και χωρίς τάση στην πύλη
- Όσο το κανάλι είναι ανοιχτό, το ρεύμα I_{DS} αυξάνεται με την τάση V_{DS} (ωμική περιοχή)



Φραγή του Καναλιού

- επέκταση της περιοχής αραίωσης με αύξηση της V_{GS}
- επέκταση της περιοχής αραίωσης με αύξηση της V_{DS}

N-channel JFET



Ρύθμιση ροής ρεύματος υπό την επιβολή τάσης στους ακροδέκτες G και S.

Πηγή: http://acomelectronics.com/hlektronika/components/JFET_N.jpg
http://acomelectronics.com/el_GeorgeVitaNotes/?cat=3

Simple Operation and Break down of n-Channel JFET

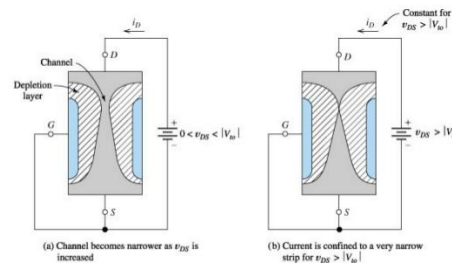


Figure: n-Channel FET for $v_{GS} = 0$.

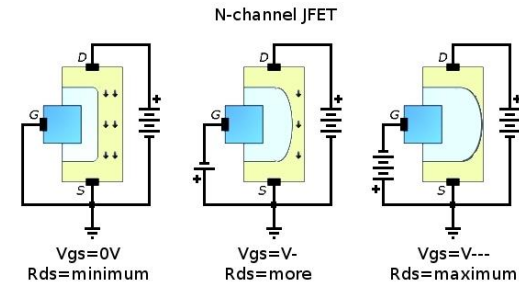
Απλή λειτουργία και διακοπή καναλιού αγωγής σε JFET.

Πηγή: Διαφάνεια 9 - Armando Bautista, AEROTECNICO at Fuerza Aérea de Colombia

<http://image.slidesharecdn.com/fet-basics-1-130904093607-95/fet-basics1-9-638.jpg?cb=1378287714>
<http://www.slideshare.net/yordibautista/fet-basics1>

τάση φραγής V_p

- είναι η τάση πύλης V_{GS} που φράζει το κανάλι, όταν τάση εκροής $V_{DS}=0$ ($I_{DS}=0$)
- Ισούται με την τάση V_{DS} που φράζει το κανάλι, όταν $V_{GS}=0$ ($I_{DS}=I_{DSS}$)
- γενικά $V_{DSS} = V_{GS} - V_p$
- Μετά τη φραγή, το ρεύμα I_{DS} ελέγχεται μόνο από την τάση πύλης V_{GS}



Simple Operation and Break down of n-Channel JFET

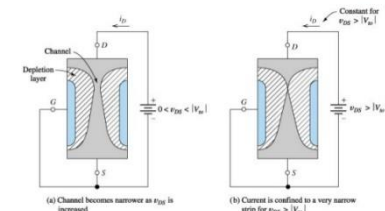
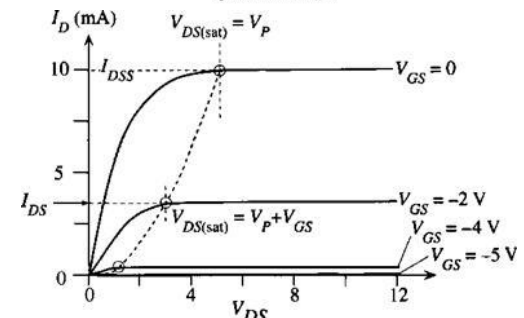


Figure: n-Channel JFET for $v_{gs}=0$.



Περιοχές πόλωσης του τρανζίστορ.
Typical I_d versus V_{ds} characteristics of a JFET for various fixed gate voltages V_{gs}

Πηγή: http://elektroarsenal.net/img/720/image841_0.jpg
<http://elektroarsenal.net/page/374>



Υπολογισμός τάσης φραγής

- Η ΠΦΧ είναι (με $V_{DS}=0$)

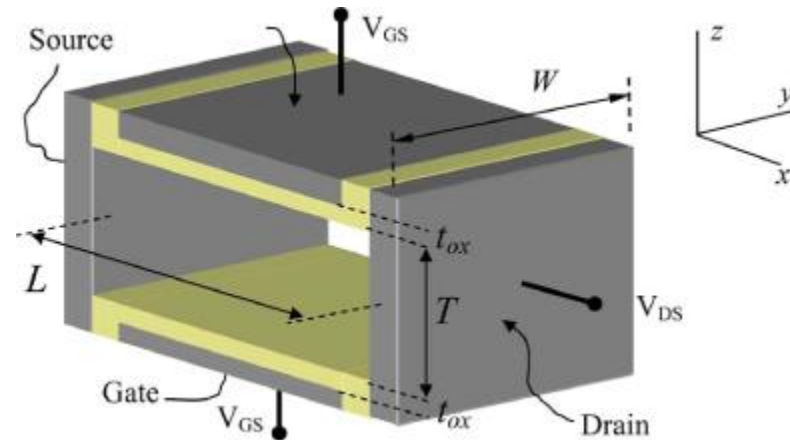
$$W = b - a = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_o - V_{GS})}{eN_D}}$$

- Στη φραγή $a=0$ και $V_{GS}=V_p$:

$$W = b = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_o - V_p)}{eN_D}}$$

- Η τάση φραγής $V_p = V_o - \frac{b^2 e N_D}{2\varepsilon}$

- Η διατομή του καναλιού είναι $a = b \left(1 - \sqrt{\frac{V_o - V_{GS}}{V_o - V_p}} \right)$



Τρισδιάστατη απεικόνιση JFET

Πηγή: J. Stat. Mech. (2009) P01044
 doi:10.1088/1742-5468/2009/01/P01044
 Intrinsic noise in aggressively scaled field-effect transistors
 G Albareda, D Jimenez and X Oriols
 Departament d'Enginyeria Electrònica, Escola Tècnica Superior d'Enginyeria,
 Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Spain
<http://cdn.ipsocience.com/images/1742-5468/2009/01/P01044/Full/8990603.jpg>
<http://ipsocience.ipsoc.org/article/10.1088/1742-5468/2009/01/P01044/fulltext/;sessid=0110D2E34A60C06A8530C7DA2A04E15D3.c1.ipsocience.cid.ipsoc.org>



Υπολογισμός ρεύματος I_D – γραμμική περιοχή

- Η διατομή του καναλιού είναι $a = b \left(1 - \sqrt{\frac{V_o - V_{GS}}{V_o - V_p}} \right)$
- για χαμηλή V_D και αμελητέο V_o , $a = b[1 - (V_{GS}/V_p)]$
- η αγωγιμότητα του καναλιού είναι $G = e\mu_e N_D (2ha/L)$
και $G_o = e\mu_e N_D (2hb/L)$
- το ρεύμα είναι
 $I_D = G \cdot V_{DS} = (e\mu N 2ha/L) V_{DS} \approx (e\mu N 2hb/L) V_{DS} [1 - (V_{GS}/V_p)]$

$$I_D = G_o \left(1 - \sqrt{\frac{V_{GS}}{V_p}} \right) \cdot V_{DS}$$



Υπολογισμός ρεύματος I_D – ωμική περιοχή

- για $V_{DS} \neq 0$ η διατομή του καναλιού είναι

$$a(x) = b \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{V_o - V_G + V(x)}{V_o - V_p}} \right)$$

- $I_D(x) = J_D(x) \cdot 2a(x)h =$

$$= e\mu N_D E(x) \cdot 2a(x)h = -e\mu N_D \cdot 2a(x)h \cdot dV(x)/dx$$

- Με αντικατάσταση του $a(x)$ και ολοκλήρωση έως L και έως V_{DS}

$$I_D = G_o \cdot \left[V_{DS} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\sqrt{(V_o - V_{GS} + V_{DS})^3} - \sqrt{(V_o - V_{GS})^3}}{\sqrt{V_o - V_p}} \right]$$



Υπολογισμός ρεύματος κόρου I_{DSs}

$$I_D = G_o \cdot \left[V_{DS} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\sqrt{(V_o - V_{GS} + V_{DS})^3} - \sqrt{(V_o - V_{GS})^3}}{\sqrt{V_o - V_p}} \right]$$

- Στη φραγή $V_{DSs} = V_{GS} - V_p$

$$I_S = G_o \cdot \left[V_{GS} - V_p - \frac{2}{3} \cdot \frac{\sqrt{(V_o - V_p)^3} - \sqrt{(V_o - V_{GS})^3}}{\sqrt{V_o - V_p}} \right]$$

- Για $V_{GS}=0$ και αγνοώντας το V_o , το μέγιστο ρεύμα κόρου είναι $I_{S0} = G_o V_p / 3$, και

$$I_S \approx I_{S0} \cdot \left[1 - 3(V_G / V_p) + 2\sqrt{(V_G / V_p)^3} \right]$$



διαγωγιμότητα

- Η μεταβολή του ρεύματος κόρου I_S με την τάση πύλης V_{GS} , για σταθερή τάση V_{DS} είναι η διαγωγιμότητα g_m

$$g_m = \left. \frac{\Delta I_S}{\Delta V_{GS}} \right|_{V_{DS}} \quad g_m = -I_{S0} \cdot \left(\frac{3V_{DS}}{V_p^2} \right) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{V_{GS}}{V_p}} \right)$$

- Η μέγιστη διαγωγιμότητα, για $V_G=0$ και $V_D=V_p$, είναι

$$g_m(\max) = -3I_{S0}/V_p = -G_0$$

οπότε η διαγωγιμότητα (που ορίζεται στην περιοχή κόρου) ισούται με την αγωγιμότητα στην ωμική περιοχή

$$g_m \approx g_m(\max) \cdot [1 - v(V_{GS}/V_p)] = -G_0 [1 - v(V_{GS}/V_p)] = -G$$



Συχνότητα αποκοπής

- χρόνος διέλευσης του καναλιού $\tau_t = L/u$
- $u = \mu E$ και $E \approx V_{DS}/L$ οπότε

$$\tau_t = L^2/\mu V_{DS}$$

- Η συχνότητα αποκοπής είναι

$$\omega_c \approx 1/\tau_t = \mu V_{DS}/L^2$$

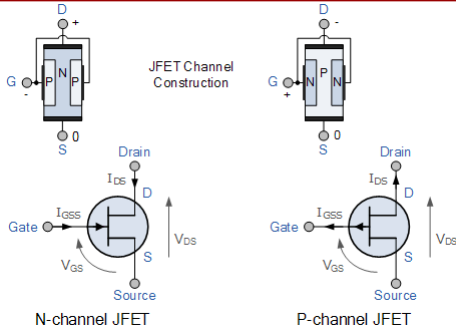
- Όταν $V_{GS} = 0$ τότε $V_{DSs} = V_p$ και

$$\omega_{c(max)} = [(b^2 e N^D / 2\epsilon) - V_o](\mu/L^2)$$

- Η συχνότητα αποκοπής είναι ανάλογη της ευκινησίας των φορέων, γιαυτό είναι υψηλότερη στα JFET καναλιού n.

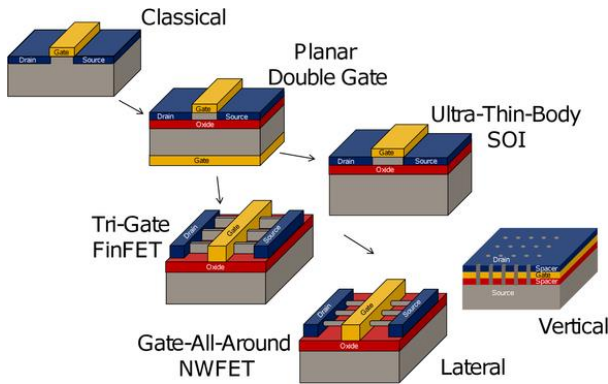


τρανζίστορ JFET– χαρακτηριστική I-V



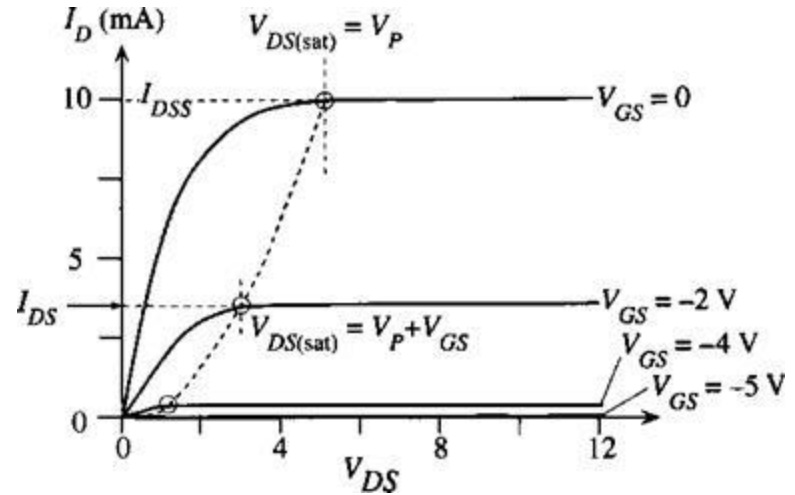
Τύποι καναλιών

Πηγή: SJB Institute of Technology - <http://www.sjbit.edu.in/app/course-material/CSE/III/ELECTRONIC%20CIRCUITS%20%5B10CS32%5D/CSE-III-ELECTRONIC%20CIRCUITS%20%5B10CS32%5D-NOTES.pdf>
<http://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran17.gif?81223b>
http://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_5.html



Διάφορες αρχιτεκτονικές κατασκευής JFET.
 Evolution of the Field Effect Transistor (FET) Architecture.

Πηγή: Are Nanotube Architectures More Advantageous Than Nanowire Architectures For Field Effect Transistors? Hossain M. Fahad & Muhammad M. Hussain Scientific Reports 2, Article number: 475 (2012) doi:10.1038/srep00475
http://www.nature.com/article-assets/ngp/srep/2012/120627/srep00475/images_hires/w582/srep00475-f1.jpg
<http://www.nature.com/articles/srep00475>



Περιοχές πόλωσης του τρανζίστορ.
 Typical I_D versus V_{DS} characteristics of a JFET for various fixed gate voltages V_{GS}

Πηγή: http://elektroarsenal.net/img/720/image841_0.jpg
<http://elektroarsenal.net/page/374>

- Αραίωση (αρνητική πόλωση αυξάνει την ΠΦΧ)
- Ενίσχυση (θετική πόλωση μειώνει την ΠΦΧ)



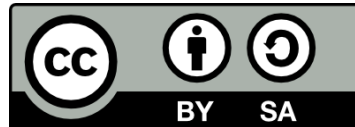
Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Λιτσαρδάκης Γεώργιος.
«Ημιαγωγά Υλικά: Θεωρία – Διατάξεις» Έκδοση: 1.0. Θεσσαλονίκη 2015.
Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<http://eclass.auth.gr/courses/OCRS463>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά - Παρόμοια Διανομή [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>





Τέλος ενότητας

Επεξεργασία: Καρανάσιος Νικόλαος
Θεσσαλονίκη, 2015



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ