

# **ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ**

Δρ. Δ. Λαμπάκης  
(7<sup>η</sup> σειρά διαφανειών)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

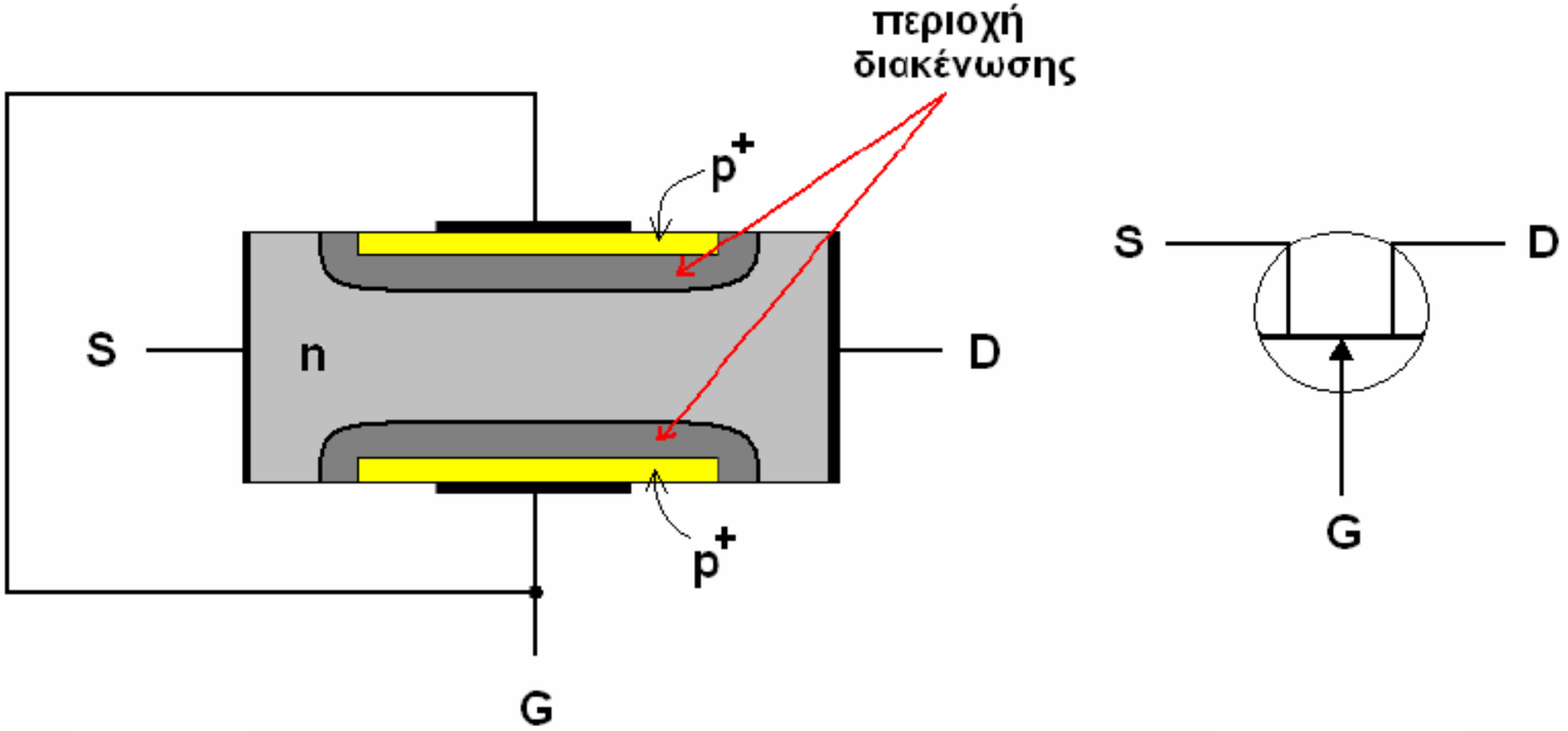
### ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου είναι ηλεκτρονικά στοιχεία στα οποία οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ενός είδους (οι φορείς πλειονότητας ενός αγώγιμου διαύλου που σχηματίζεται) σε αντίθεση με τα διπολικά τρανζίστορ όπου συνεισφέρουν στο ηλεκτρικό ρεύμα τόσο οι φορείς πλειονότητας όσο και οι φορείς μειονότητας.

Οι φορείς αυτοί είναι ελεύθεροι να κινούνται σε μια περιοχή (κανάλι, δίαυλος) που οριοθετείται από τις περιοχές φορτίων χώρου (διακένωσης) δύο ανάστροφα πολωμένων η επαφών.

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET) ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

JFET n-διαύλου: (αριστερά η δομή, δεξιά το σύμβολο)



# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Το τρανζίστορ επίδρασης πεδίου του παραπάνω σχήματος αποτελείται από έναν κρύσταλλο πυριτίου τύπου n στις δύο πλευρές του οποίου έχουν σχηματιστεί p-περιοχές μεγάλης συγκέντρωσης προσμίξεων ( $p^+$ ). Ένα τέτοιο FET ονομάζεται n-τύπου JFET. Οι δύο αυτές περιοχές βραχυκυκλώνονται μεταξύ τους και καταλήγουν σε έναν ακροδέκτη που ονομάζεται **πύλη**.

Τα δύο άκρα του κρυστάλλου υπάρχουν δύο ακροδέκτες. Τα δύο άκρα του κρυστάλλου είναι εν γένει ισοδύναμα μεταξύ τους (σε αντίθεση με το διπολικό τρανζίστορ όπου ο εκπομπός διαφέρει από το συλλέκτη στα επίπεδα προσμίξεων). Στους ακροδέκτες του FET αποδίδεται ονομασία ανάλογα με τη συνδεσμολογία. Έτσι, το άκρο στο οποίο κατευθύνονται οι φορείς πλειονότητας ονομάζεται **απαγωγός (Drain)** και καταδεικνύεται με το γράμμα D ενώ το άλλο άκρο ονομάζεται **πηγή (Source)** και καταδεικνύεται με το γράμμα S.

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

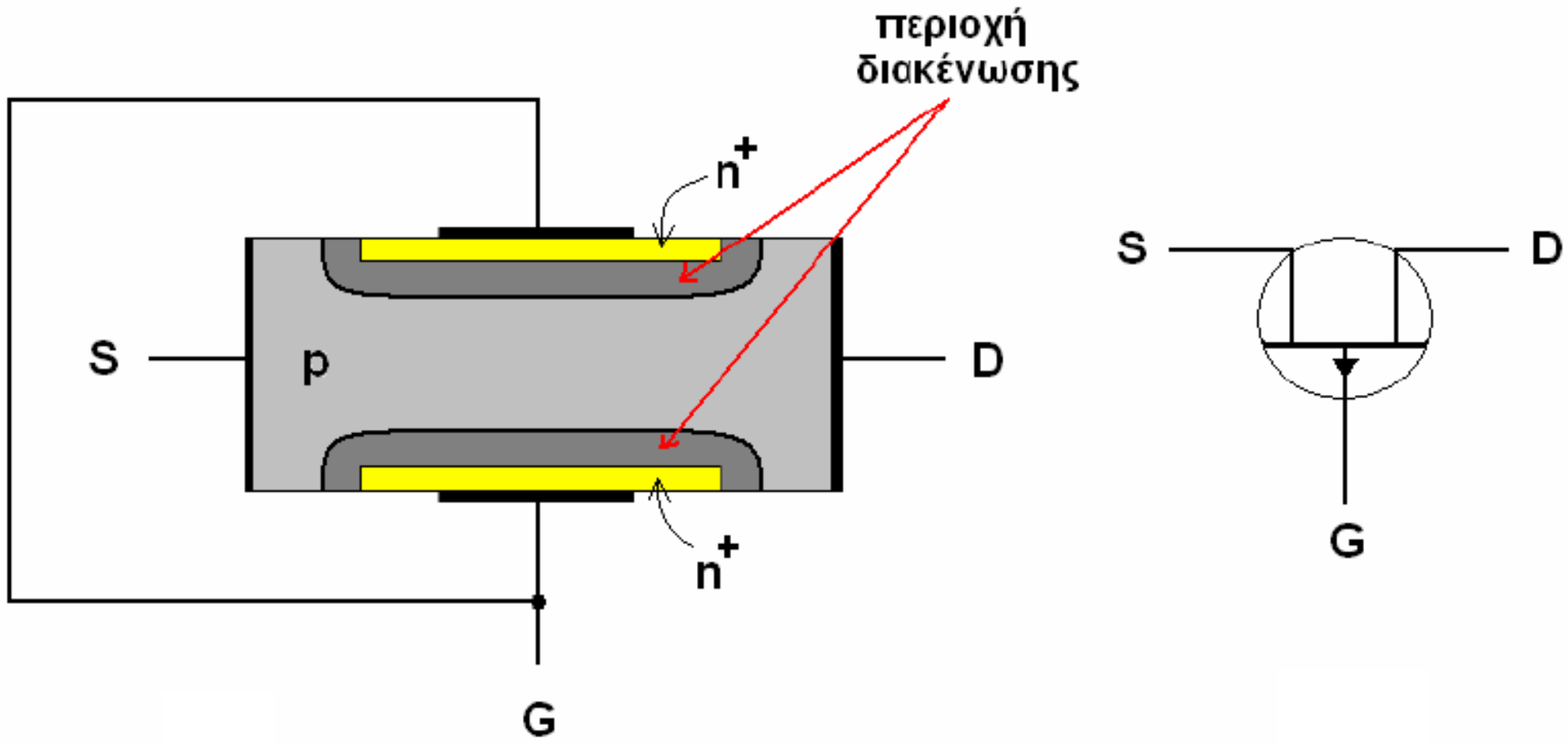
Για να θεωρείται ο δεξιός ακροδέκτης του n-τύπου JFET ως απαγωγός θα πρέπει να συνδέεται σε υψηλότερο δυναμικό από ότι ο αριστερός ακροδέκτης που χαρακτηρίζεται ως πηγή.

Αν εναλλάσσεται η πολικότητα της τάσης μεταξύ των δύο ακροδεκτών εναλλάσσεται και η ονομασία τους.

Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει οι δύο p<sup>+</sup>-n επαφές να είναι **ανάστροφα πολωμένες.**

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET) ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

JFET p-διαύλου: (αριστερά η δομή, δεξιά το σύμβολο)



# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

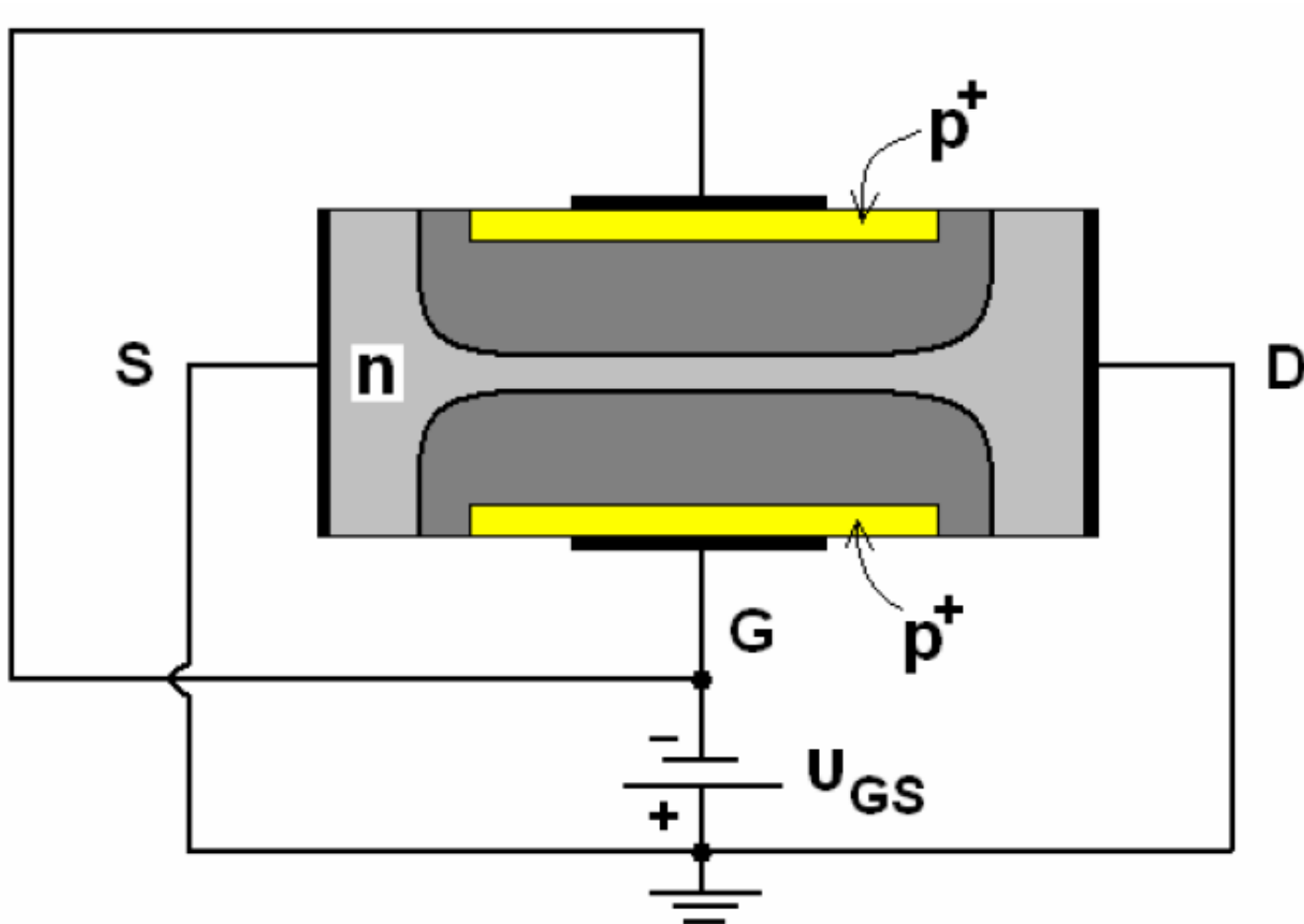
Η πύλη των FET διαδραματίζει έναν ρόλο παρόμοιο με αυτόν της βάσης στα διπολικά τρανζίστορ επαφής με τη διαφορά ότι η λειτουργία των διπολικών τρανζίστορ επαφής ελέγχεται από το ρεύμα βάσης ενώ η λειτουργία των FET ελέγχεται από την τάση της πύλης ενώ το ρεύμα της πύλης είναι σχεδόν μηδενικό.

Το πολύ μικρό ρεύμα πύλης οφείλεται στο ότι οι επαφές p-n σε ένα JFET n-διαύλου και οι επαφές n-p σε ένα JFET p-διαύλου είναι ανάστροφα πολωμένες, γεγονός που οδηγεί στο σημαντικό **συγκριτικό πλεονέκτημα** των FET έναντι των διπολικών τρανζίστορ επαφής, τη μεγάλη τους αντίσταση εισόδου.

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Ανάστροφη πόλωση των δύο p-n επαφών (το εύρος των περιοχών διακένωσης αυξάνει, το κανάλι στενεύει ομοιόμορφα).





## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

### ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Όταν οι επαφές p-n σε ένα JFET n-διαύλου πολωθούν ανάστροφα ( $U_{GS} < 0$ ), οι περιοχές φορτίων χώρου διευρύνονται και διεισδύουν ολοένα και περισσότερο εντός του n- τύπου υλικού όσο η  $U_{GS}$  αυξάνει κατ απόλυτη τιμή.

Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται ο διαθέσιμος χώρος για κίνηση των ηλεκτρονίων. Θα υπάρξει μάλιστα κατάλληλη τιμή της τάσης,  $U_{GS} = V_p$  (**pinch off voltage**), όπου οι δύο περιοχές φορτίων χώρου θα έρθουν σε επαφή και ο δίαυλος θα κλείσει εντελώς.

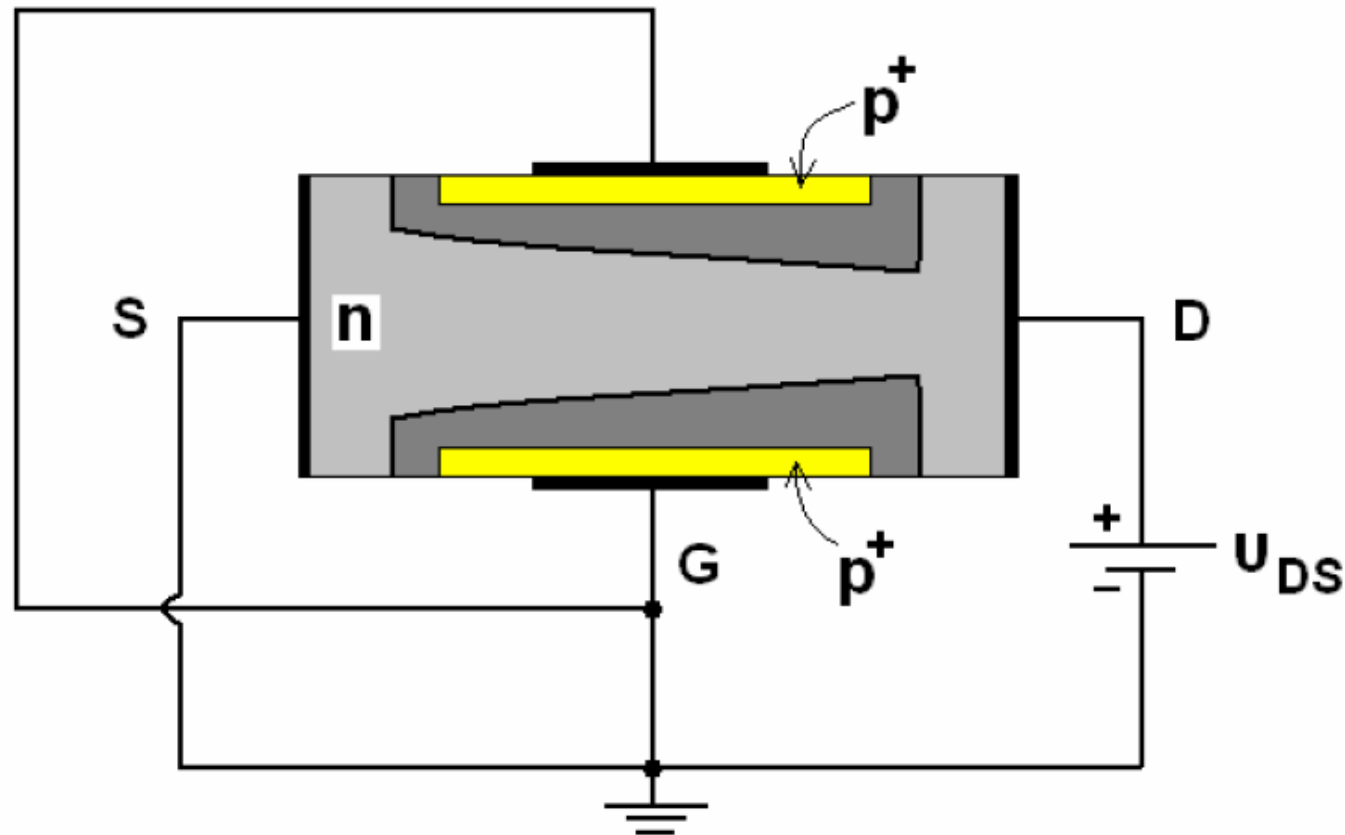
# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Εφαρμογή διαφοράς δυναμικού μεταξύ πηγής και απαγωγού.

Το κανάλι στενεύει ανομοιόμορφα λόγω της πτώσης τάσης που παρατηρείται κατά μήκος του (βλ. σχήμα επομ. διαφ.).

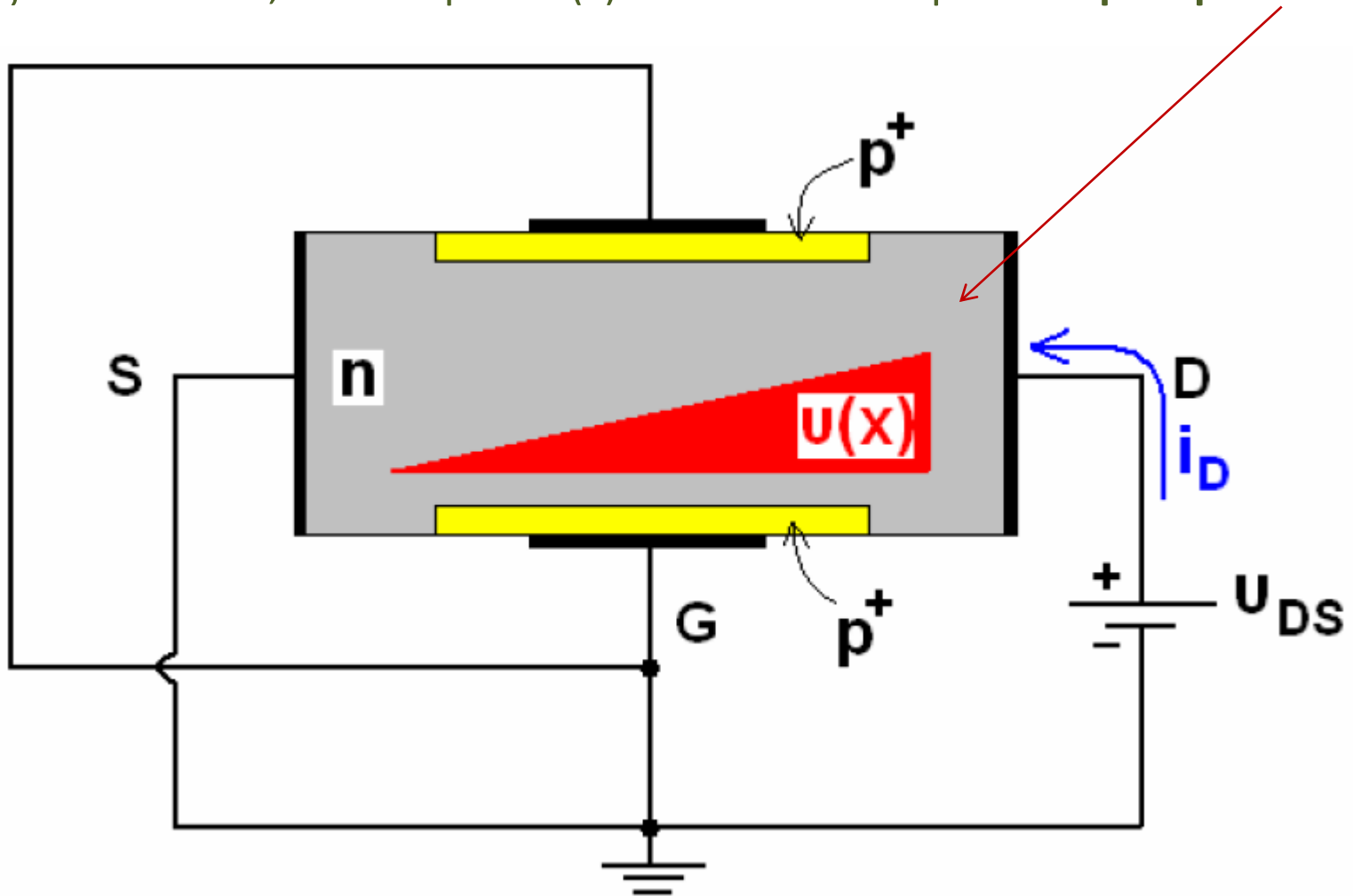
Αν αντί της εφαρμογής διαφοράς δυναμικού μεταξύ της πύλης και της πηγής, εφαρμοστεί διαφορά δυναμικού μεταξύ απαγωγού και πηγής ( $U_{DS} > 0$ ) παρατηρούμε μια **ανομοιόμορφη διαμόρφωση** του διαύλου.



# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Η μη ομοιόμορφη διείσδυση των περιοχών φορτίων χώρου μέσα στο n-τύπου υλικό οφείλεται στο ότι συναρτήσει της απόστασης  $x$  από την πηγή, κατά μήκος του διαύλου, το δυναμικό  $U(x)$  δεν είναι σταθερό αλλά μεταβάλλεται.



# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Η παραπάνω μεταβολή οφείλεται στην πτώση τάσης πάνω στην ωμική αντίσταση που παρουσιάζει το n-τύπου υλικό μεταξύ πηγής και απαγωγού.

Κατά συνέπεια, η τάση ανάστροφης πόλωσης των p-n επαφών δεν είναι σταθερή σε αυτήν την περίπτωση αλλά μεταβάλλεται με το  $x$ , σύμφωνα με τη σχέση:

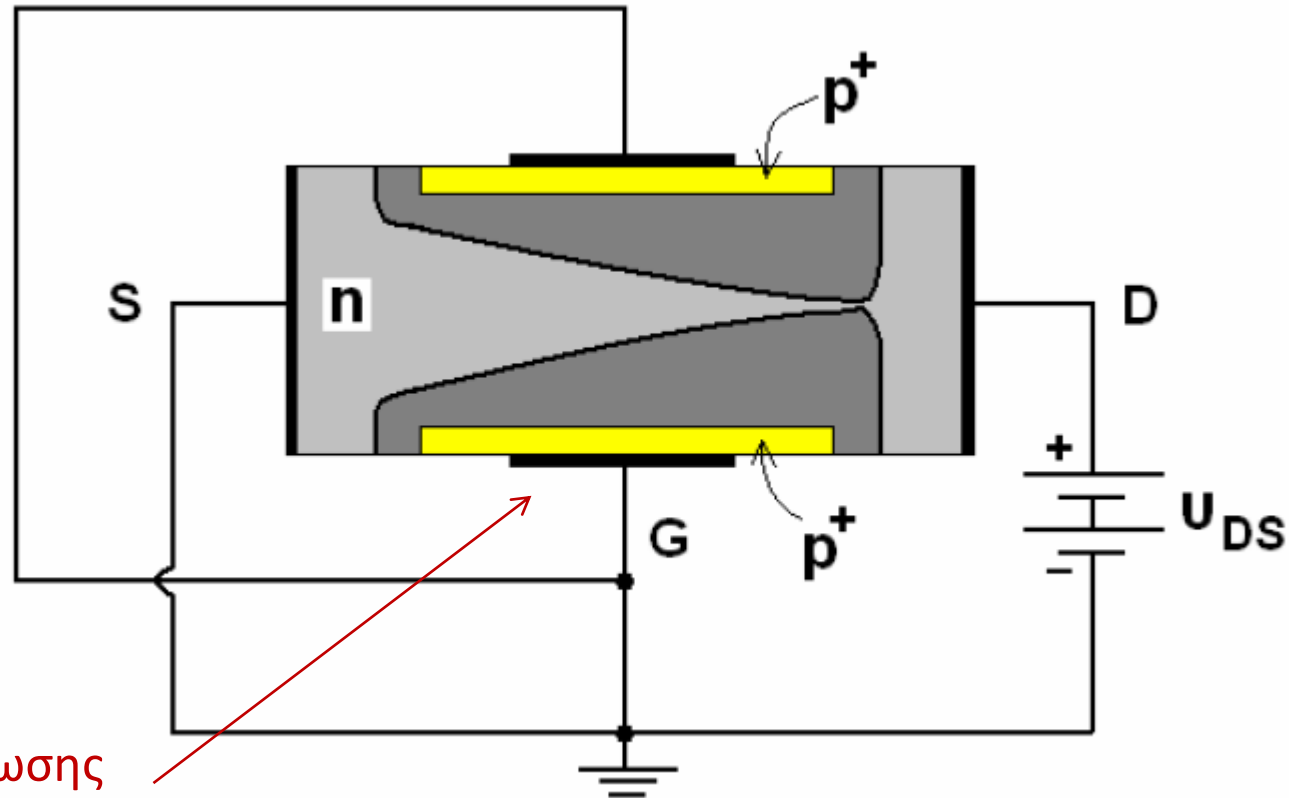
$$U_{Gx} = U_G - U(x)$$

Αυτή η μεταβολή της ανάστροφης τάσης πόλωσης οδηγεί και σε αντίστοιχη μεταβολή του εύρους των περιοχών φορτίων χώρου εξηγώντας τη διαμόρφωση του διαύλου.

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

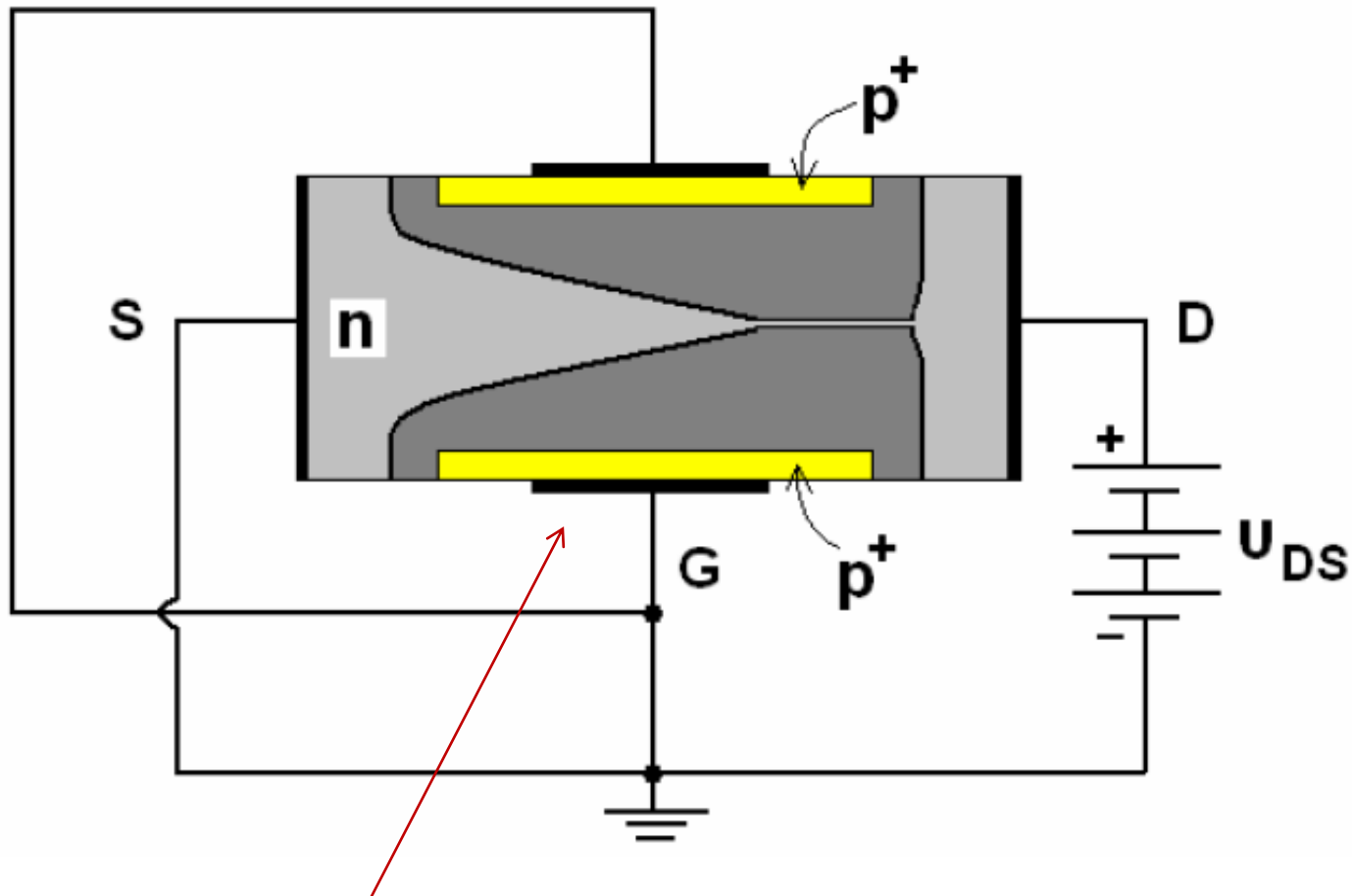
Όσο η τάση  $U_{DS}$  αυξάνει, τόσο οι περιοχές φορτίων χώρου με τα τμήματά τους που βρίσκονται κοντά στον απαγωγό πλησιάζουν μεταξύ τους.



Οι δύο περιοχές διακένωσης εφάπτονται κοντά στον απαγωγό όταν η  $U_{DS}$  αυξηθεί

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)



Η στένωση επεκτείνεται προς την πηγή όταν η  $U_{DS}$  συνεχίζει να αυξάνει.

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Οι δύο περιοχές θα “αγγίξουν” για πρώτη φορά η μια την άλλη όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ πύλης και απαγωγού γίνει ίση με το  $V_p$  :

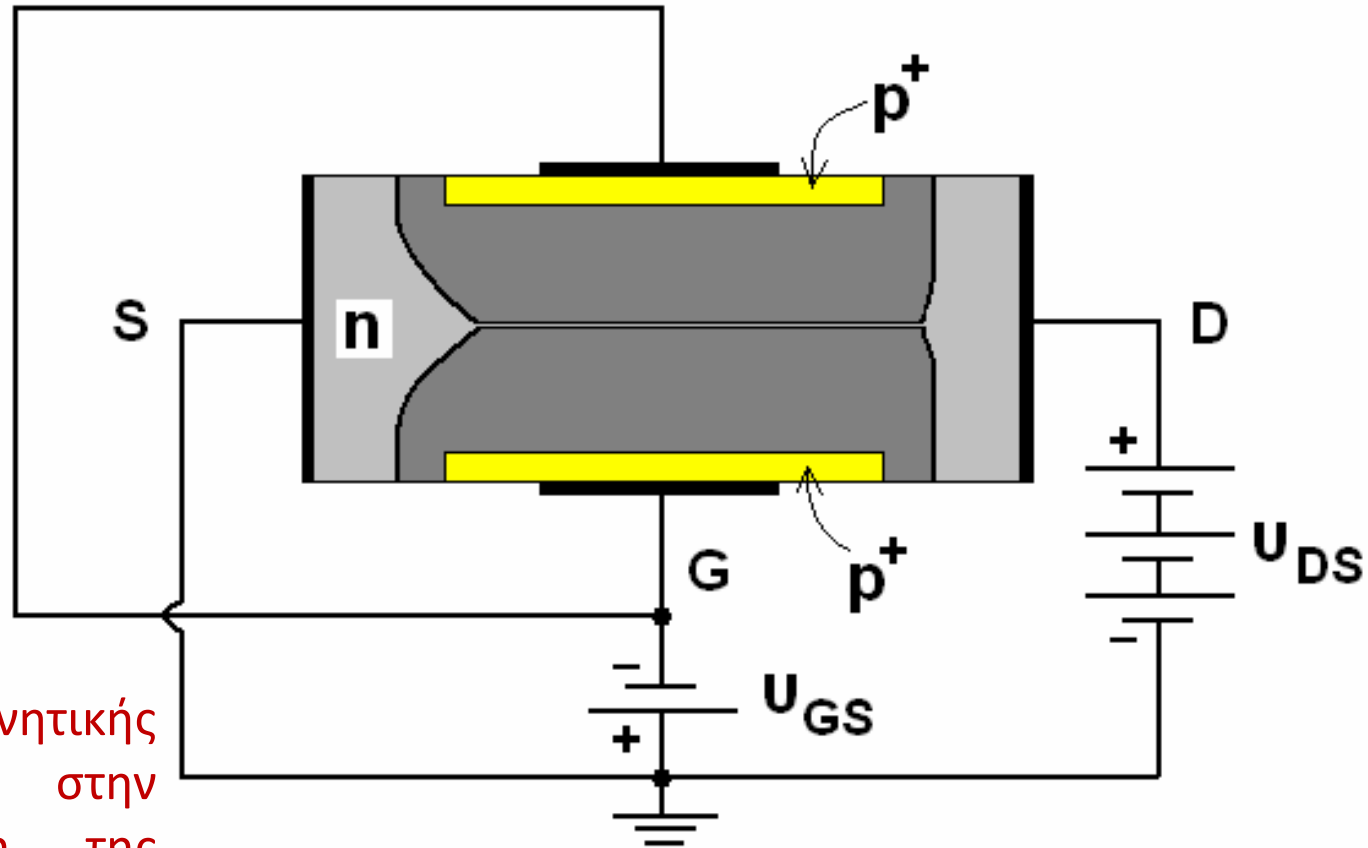
$$U_{GD} = V_p$$

Περαιτέρω αύξηση της  $u_{DS}$  οδηγεί στην επέκταση της στένωσης προς την πηγή (βλ. προηγ. σχήμα).

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Αν παράλληλα με τη  $U_{DS}$  εφαρμοστεί και η αρνητική τάση  $U_{GS}$ , αυτή συνεπικουρεί στο γρηγορότερο ολοκληρωτικό κλείσιμο του διαύλου.



Η εφαρμογή μιας αρνητικής τάσης  $U_{GS}$  βοηθά στην περαιτέρω επέκταση της στένωσης του καναλιού μέχρι και την περιοχή της πηγής.



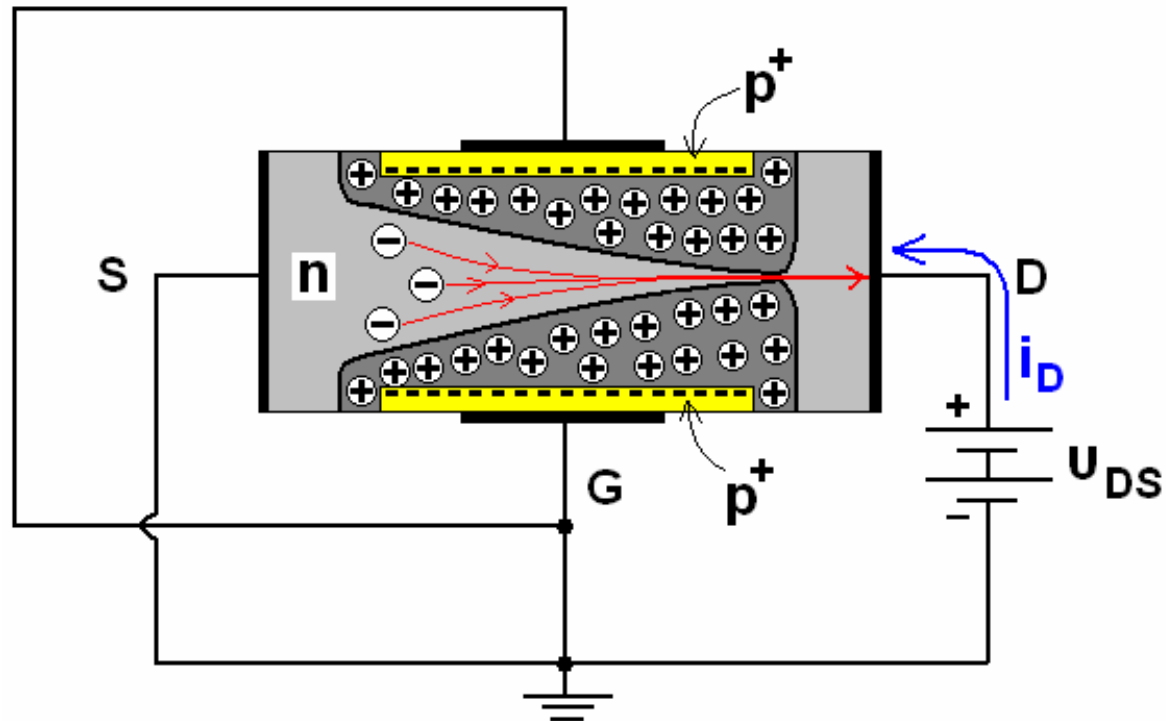
# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Λεπτομέρειες της λειτουργίας του JFET, όπου εικονίζονται τα σταθερά φορτία των περιοχών φορτίων χώρου καθώς και η κίνηση των ηλεκτρονίων υπό την επίδραση της τάσης  $U_{DS}$ .

Λεπτομέρειες της λειτουργίας του JFET, όπου φαίνονται τα σταθερά φορτία των περιοχών φορτίων χώρου καθώς και η κίνηση των ηλεκτρονίων υπό την επίδραση της τάσης  $U_{DS}$ .

Το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται εντός των περιοχών φορτίων χώρου δικαιολογεί την **απόθηση** και την **παρεμπόδιση** της εισόδου των ηλεκτρονίων μέσα σε αυτές, αναγκάζοντάς τα να κινηθούν μέσα στο κανάλι που στενεύει υπό την επίδραση της  $U_{DS}$ .



# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

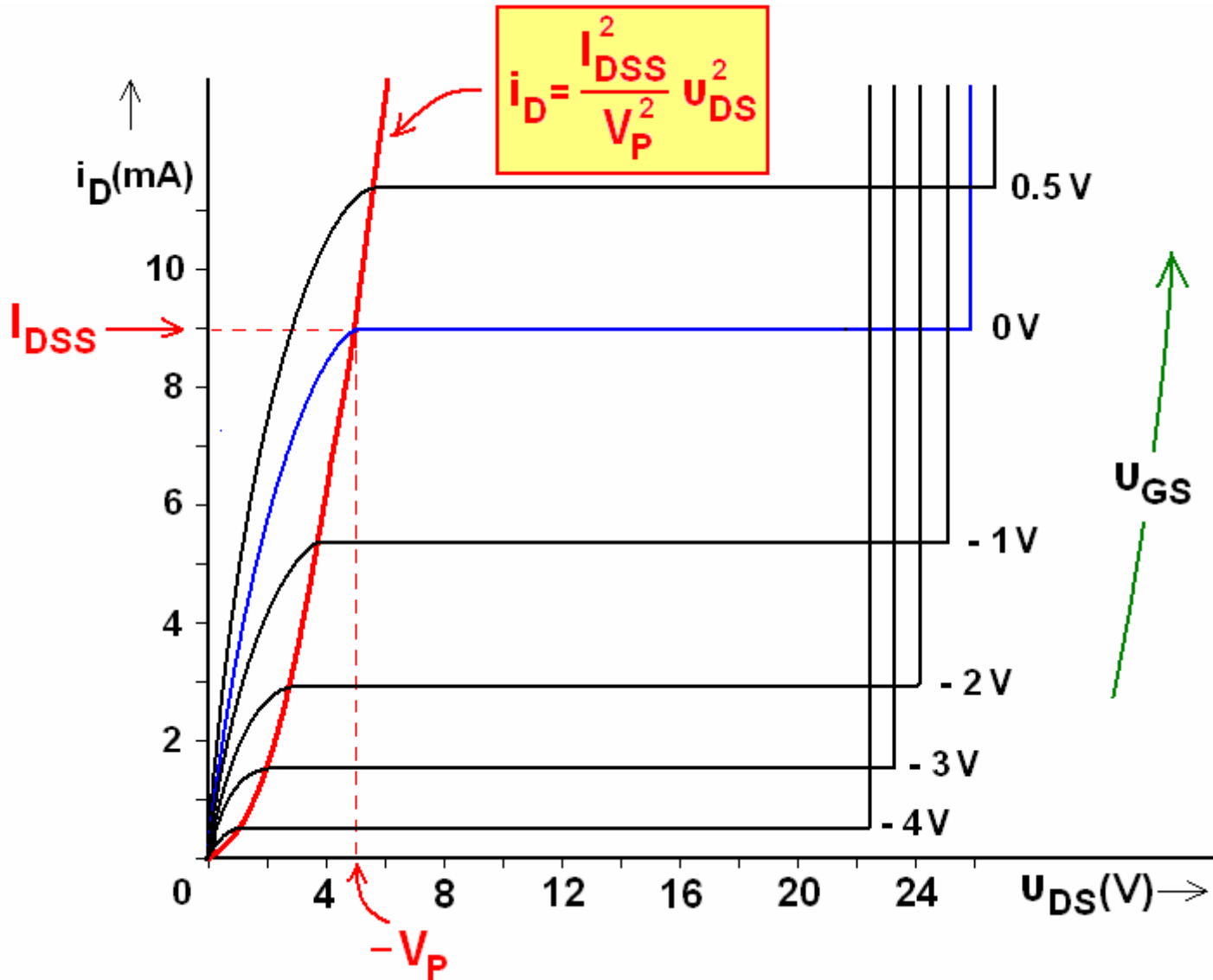
Μόλις ο δίαυλος κλείσει για πρώτη φορά στην περιοχή του απαγωγού το ρεύμα που διέρχεται από αυτόν παίρνει μια τιμή που μένει σταθερή ανεξάρτητα από την περαιτέρω αύξηση της  $U_{DS}$ , και την επέκταση της στένωσης προς τον απαγωγό (βλ. σχήμα επομ. διαφ.).

Βέβαια, σε κάποια μεγάλη τιμή της  $U_{DS}$  αναμένεται μια απότομη αύξηση του ρεύματος  $I_D$ .

Στην απότομη αυτή αύξηση συνεισφέρει το ρεύμα της πύλης. Το ρεύμα αυτό είναι ουσιαστικά το (ανάστροφο) ρεύμα μιας ανάστροφα πολωμένης διόδου (η p-n επαφή του JFET) όταν αυτή φτάσει στην περιοχή κατάρρευσης.

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET) ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης του JFET

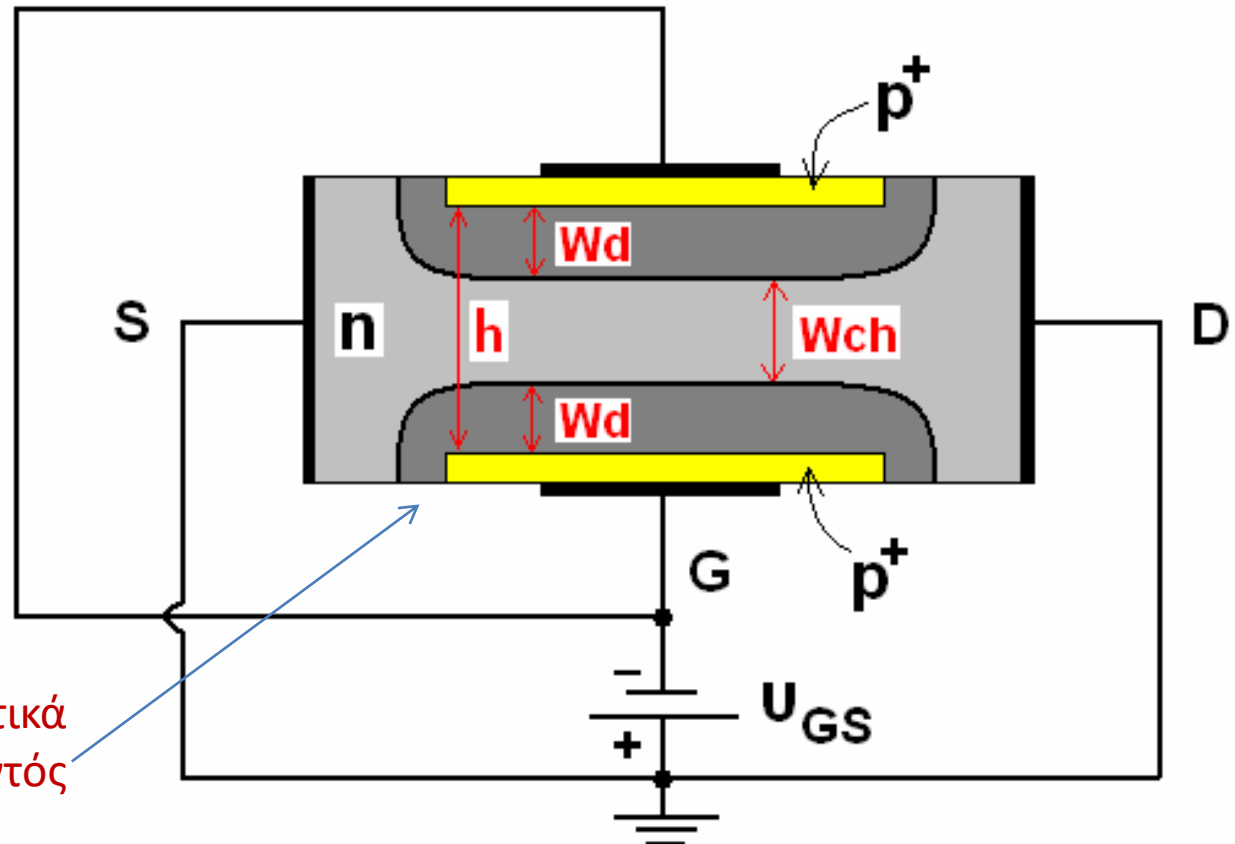


# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

### Προσδιορισμός της τάσης στένωσης $V_p$ (Pinch off voltage)

Με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά για το JFET n-διαύλου, θα προσδιοριστεί η τιμή της ανάστροφης τάσης  $U_{GS}$  ( $=V_p$ ) ώστε να κλείνει ο διάυλος.



Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των διαφόρων περιοχών εντός του JFET.

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

(Δουλεύοντας ανάλογα όπως αν είχαμε διόδους) το εύρος της περιοχής διακένωσης δίδεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$W_d = W_p + W_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} (V_j + V_{\varepsilon\xi}) \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$$

Όπου  $N_A$  και  $N_D$ , η συγκέντρωση των αποδεκτών και δοτών, αντίστοιχα

**Σημείωση:** για το πυρίτιο είναι  $\varepsilon=11.7$  οπότε:

Με δεδομένο τώρα ότι αναφερόμαστε σε p-n επαφή ενός JFET n-διαύλου θα ισχύει:

$$W_d \approx W_n \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_D} (V_j + V_{\varepsilon\xi})} = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_D} (V_j - v_{GS})}$$

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σχήματος προκύπτει για το εύρος του διαύλου (εύρος καναλιού):

$$W_{ch} = h - 2W_d = h - 2\sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_D}(V_j - v_{GS})}$$

Το δυναμικό  $V_P$  μπορεί να προκύψει από την εξίσωση αν σε αυτήν τεθεί εύρος καναλιού ίσο με μηδέν και εξ ορισμού  $v_{GS} = V_P$ :

$$W_{ch} = 0 \Rightarrow h = 2\sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_D}(V_j - V_P)}$$

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Οπότε, προκύπτει:

$$V_P = -\frac{h^2 q N_D}{8\epsilon} + V_j \approx -\frac{h^2 q N_D}{8\epsilon}$$

όπου απαλείφθηκε το δυναμικό  $V_j$  της επαφής με ανοικτούς ακροδέκτες επειδή είναι σημαντικά μικρότερο από τον πρώτο όρο του αθροίσματος.

Αντικαθιστώντας την έκφραση για το  $V_P$  προκύπτει για το εύρος του διαύλου η ακόλουθη έκφραση:

$$W_{ch} = h - \sqrt{\frac{8\epsilon}{qN_D}(V_j - v_{GS})} = h - \sqrt{\frac{-h^2}{V_P}(V_j - v_{GS})}$$

$$W_{ch} = h \left[ 1 - \sqrt{\frac{v_{GS} - V_j}{V_P}} \right]$$

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

### *Ωμική συμπεριφορά του JFET για μικρές τιμές της $U_{DS}$ .*

Για μικρές τιμές της  $U_{DS}$ , της τάξης μερικών δεκάδων μέχρι περίπου και δύο εκατοντάδες mV, μπορεί να θεωρηθεί ότι η διαμόρφωση που υφίσταται ο διάυλος (το κανάλι) λόγω της πτώσης τάσης στο σώμα του είναι αμελητέα και η εικόνα του είναι παρόμοια με αυτήν του προηγούμενου σχήματος, όπου  $U_{DS} = 0$ .

Τότε, αν  $l$  είναι το μήκος του διαύλου (καναλιού),  $w$  το εύρος του (κάθετα στη σελίδα) και  $\rho$  η ειδική αντίσταση του n-τύπου πυριτίου, η διατομή του καναλιού θα είναι  $S = w \cdot W_{ch}$  και η ωμική του αντίσταση  $r$  ( $=\rho l/S$ ) θα γράφεται ως:

$$r = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{l}{w W_{ch}} = \rho \frac{l}{wh \left[ 1 - \sqrt{\frac{U_{GS} - V_j}{V_P}} \right]}$$



# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Παρατηρούμε δηλαδή ότι για μικρές τιμές της  $U_{DS}$ , το JFET συμπεριφέρεται σαν ωμική αντίσταση ελεγχόμενη από τάση,  $r = r(U_{GS})$ . Με δεδομένο τώρα ότι σύμφωνα με το νόμο του Ohm ισχύει:

$$r = \frac{U_{DS}}{i_D}$$

μπορεί από το συνδυασμό των παραπάνω εξισώσεων να εξαχθεί η ακόλουθη έκφραση που δίνει το ρεύμα  $i_D$  συναρτήσει της τάσης  $U_{DS}$ , για μικρές τιμές της  $U_{DS}$ :

$$i_D = U_{DS} / r = \frac{1}{\rho} \frac{wh \left[ 1 - \sqrt{\frac{U_{GS} - V_j}{V_P}} \right]}{l} U_{DS}$$

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

η οποία λαμβάνοντας υπόψη ότι

$$|v_{GS}| \gg V_j \quad \text{και} \quad \rho = \frac{1}{qN_D\mu_n} \quad (\mu_n \text{ η ευκινησία των}$$

ηλεκτρονίων) γράφεται:

$$i_D = \frac{qN_D\mu_n wh}{l} \left[ 1 - \sqrt{\frac{v_{GS}}{V_P}} \right] v_{DS}$$

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

### *Χαρακτηριστική μεταφοράς του JFET*

Πρόκειται για τη σχέση μεταξύ του ρεύματος  $i_D$  του JFET και της τάσης  $U_{GS}$  που ελέγχει τη λειτουργία του, όταν το τρανζίστορ λειτουργεί πέρα από το pinch off, όταν δηλαδή το ρεύμα μέσα στο δίαυλο έχει αποκτήσει σταθερή τιμή ανεξάρτητη της  $U_{DS}$ . Η περιοχή αυτή ονομάζεται και περιοχή **ρεύματος κόρου (current-saturation region)**.

Πειραματικά έχει επιβεβαιωθεί η ακόλουθη **εμπειρική** παραβολική έκφραση:

$$i_D = i_{DS} = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{V_P} \right)^2$$

Ο **διπλός** δείκτης στο ρεύμα τέθηκε για να χαρακτηρίσει την κατάσταση κόρου (saturation). Η χαρακτηριστική αυτή είναι συνάρτηση του  $U_{DS}$ , αλλά η μεταβολή που παρουσιάζει συναρτήσει του  $U_{DS}$  είναι μικρή.

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

### *Χαρακτηριστική μεταφοράς του JFET*

#### ΣΗΜΕΙΩΣΗ:

Η χαρακτηριστική μεταφοράς του JFET επιτελεί ρόλο αντίστοιχο προς τη χαρακτηριστική ρεύματος βάσης – τάσης  $U_{BE}$  του διπολικού τρανζίστορ επαφής. Η τιμή ρεύματος  $I_{DSS}$  εκφράζει το ρεύμα κόρου του JFET όταν η πύλη βραχυκυκλώνεται με την πηγή ( $U_{GS}=0$ ).

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

### *Η οριογραμμή έναρξης της στένωσης του διαύλου*

Η οριογραμμή αυτή είναι η παραβολική καμπύλη (που παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα στις χαρακτηριστικές). Ουσιαστικά, καταδεικνύει τις θέσεις επί των χαρακτηριστικών όπου ξεκινά ο δίαυλος να κλείνει. Εκεί δηλαδή όπου ισχύει:

$$U_{GD} = V_P \Rightarrow U_{GS} = V_P + U_{DS}$$

Θέτοντας αυτήν την τιμή του  $U_{GS}$  στην προηγούμενη εξίσωση ουσιαστικά είναι σαν να εντοπίζουμε σε κάθε χαρακτηριστική  $i_D - U_{DS}$  το ξεκίνημα της περιοχής κόρου και να ενώνουμε μεταξύ τους όλα αυτά τα σημεία για να προκύψει η ακόλουθη παραβολή:

$$i_D = \frac{I_{DSS}}{V_P^2} U_{DS}^2$$

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

### *Το JFET σε κατάσταση αποκοπής cut-off*

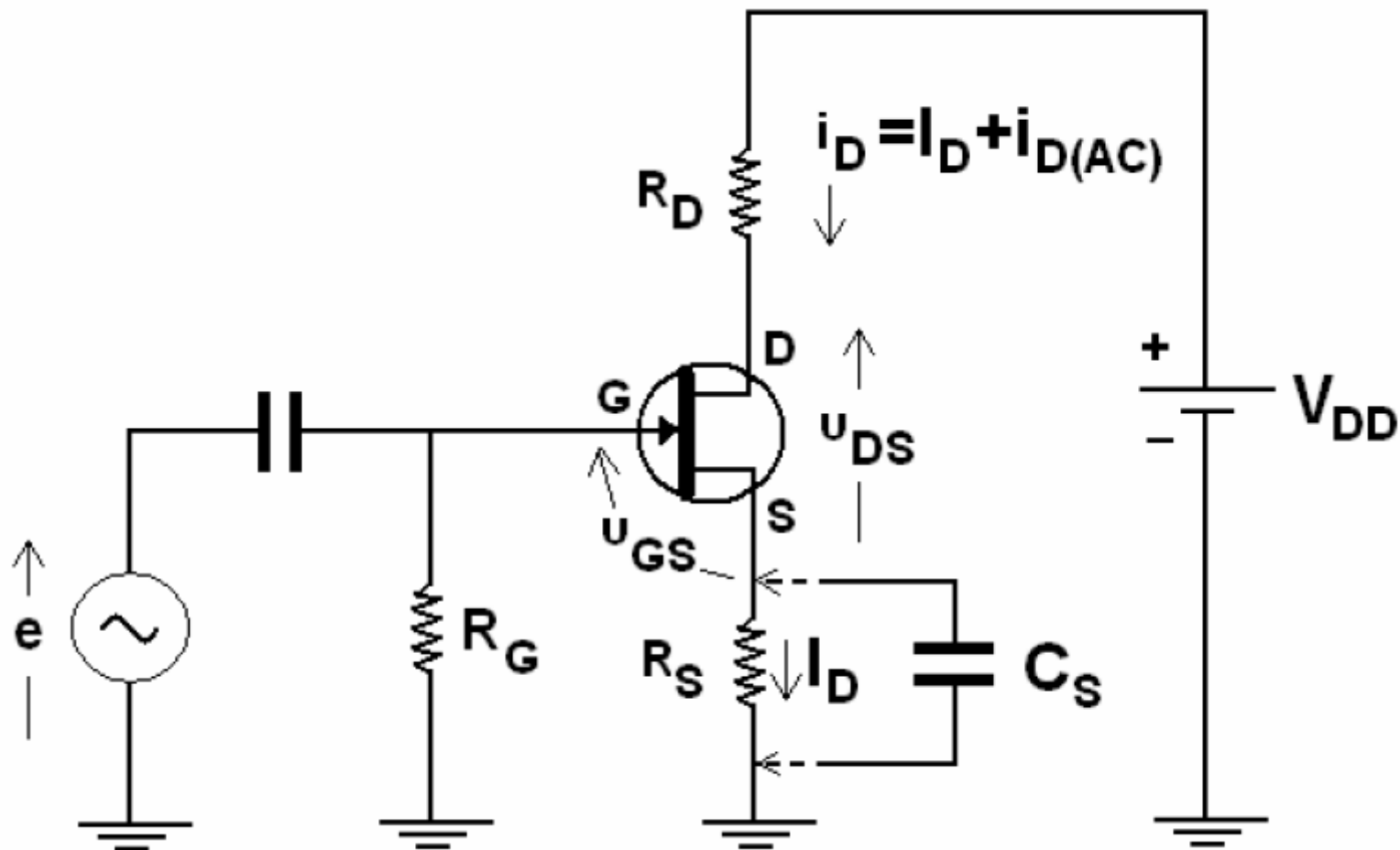
Αυτό θα συμβεί όταν ο διάυλος κλείσει εντελώς, δηλαδή όταν το  $U_{GS}$  γίνει αρνητικότερο του  $V_p$ .

Θεωρούμε τότε ότι το ρεύμα στο JFET μηδενίζεται παρόλο που και σε αυτές τις συνθήκες ρέει ένα πολύ μικρό ρεύμα,  $i_{D,off}$ , της τάξης των μερικών nA.

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET) ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

## *Το JFET ως ενισχυτής*

Μια τυπική συνδεσμολογία για λειτουργία του FET ως ενισχυτή.



# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Όταν ο πυκνωτής  $C_S$  χρησιμοποιείται η τιμή της χωρητικότητάς του είναι τέτοια ώστε η AC συνιστώσα του ρεύματος ( $I_{D(AC)}$ ) να διέρχεται από αυτόν και η DC συνιστώσα ( $I_D$ ) να διέρχεται μέσω της  $R_S$ .

Για τον προσδιορισμό της DC- ευθείας φόρτου λαμβάνεται υπόψη ο 2<sup>ος</sup> κανόνας του Kirchhoff στο κύκλωμα εξόδου.

$$V_{DD} = I_D R_D + V_{DS} + I_D R_S \Rightarrow$$

$$I_D = -\frac{1}{R_D + R_S} V_{DS} + \frac{V_{DD}}{R_D + R_S}$$

Η παραπάνω εξίσωση εκφράζει την **DC-ευθεία φόρτου**.



# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Τα σημεία τομής της ευθείας φόρτου με τους άξονες των χαρακτηριστικών  $i_D - U_{DS}$  (βλ. επομ. σχήμα) είναι τα ακόλουθα:

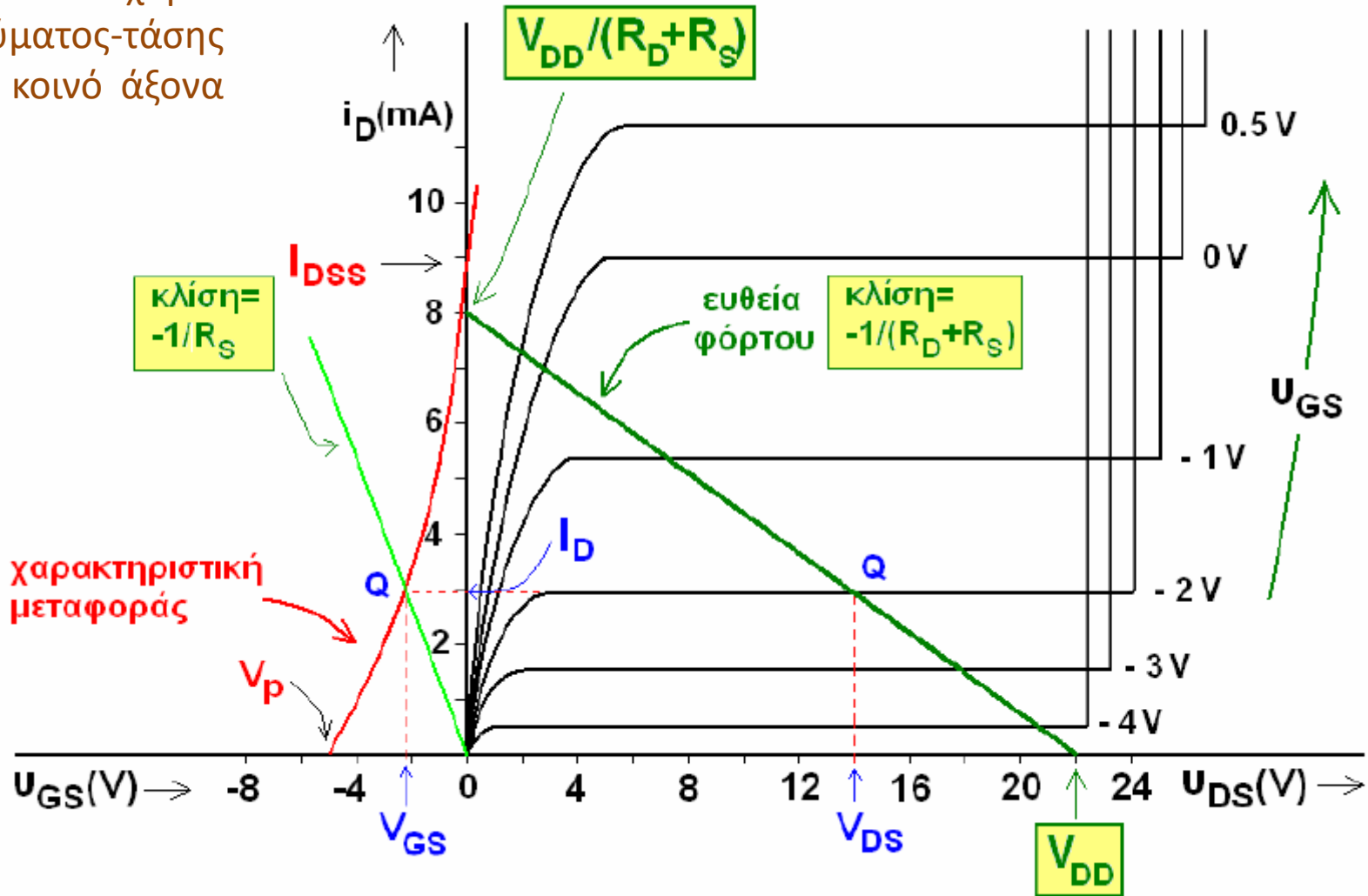
$$I_D(V_{DS} = 0) = \frac{V_{DD}}{R_D + R_S}$$

$$V_{DS}(I_D = 0) = V_{DD}$$

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

**Σημείωση:** Η χαρακτηριστική μεταφοράς και οι χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης του JFET έχουν κοινό άξονα τεταγμένων.



# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Η κλίση της ευθείας φόρτου είναι

$$-\frac{1}{R_D + R_S}$$

Για το κύκλωμα εισόδου ισχύει:

$$V_{GS} + I_D R_S = V_G \approx 0 \Rightarrow$$

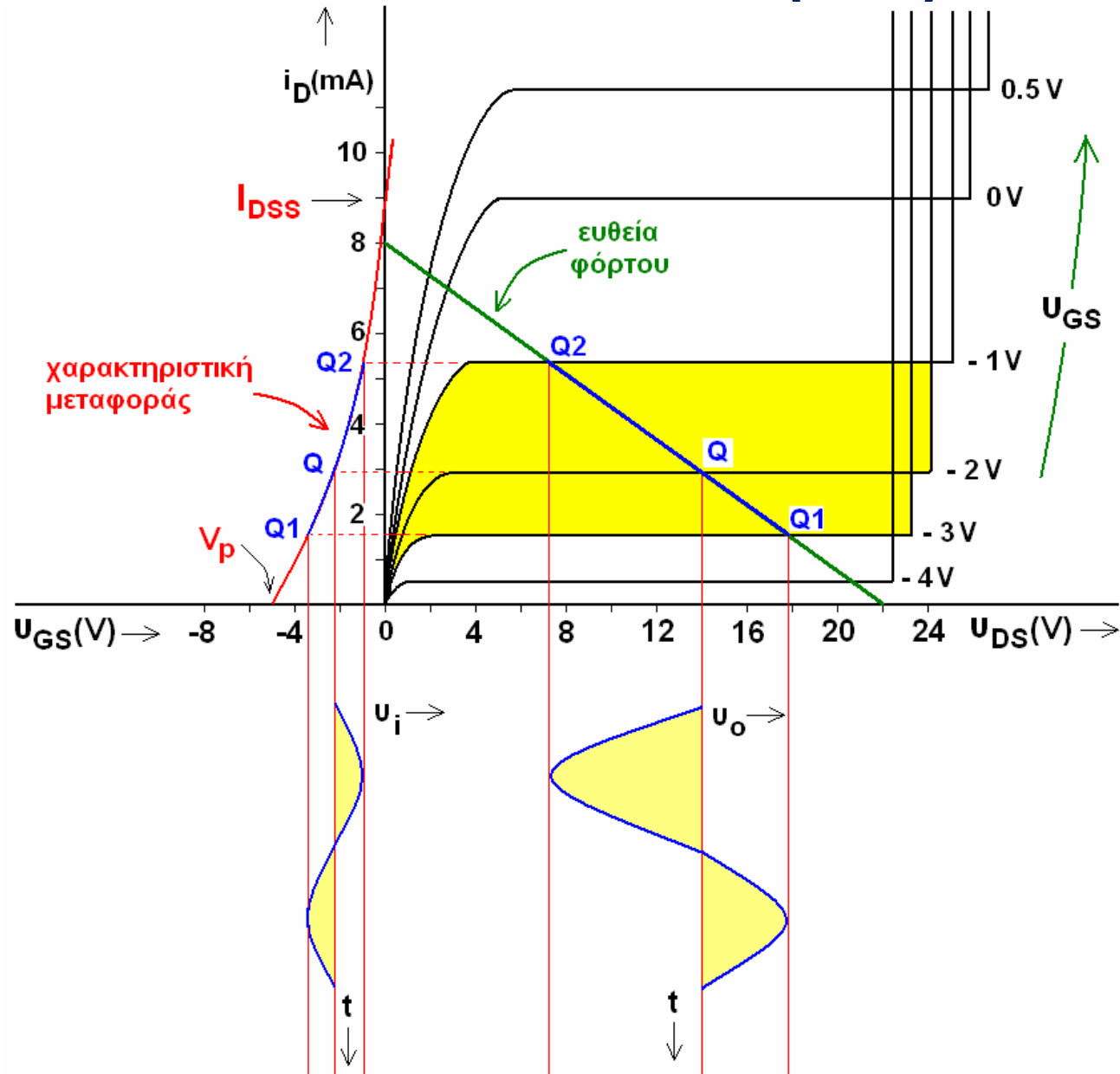
$$I_D = -\frac{1}{R_S} V_{GS}$$

Η τελευταία σχέση παριστάνει μια ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων στο διάγραμμα της χαρακτηριστικής μεταφοράς (βλ. αριστερό τμήμα του προηγ. σχήματος) και έχει κλίση  $-1/R_S$ .

**Το σημείο τομής αυτής της ευθείας με τη χαρακτηριστική μεταφοράς θα καθορίσει και το σημείο λειτουργίας (σημείο ηρεμίας) Q του κυκλώματος.**

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)



Ο τρόπος δράσης του JFET ως ενισχυτή.

Το JFET λειτουργεί σε κατάσταση κόρου και μια μικρή τάση εισόδου,  $U_i$ , στην πύλη του τρανζίστορ οδηγεί σε μια μεγαλύτερη τάση εξόδου,  $U_o$ .

# ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ (FET)

## ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΠΕΔΙΟΥ ΕΠΑΦΗΣ (JFET)

Η εξήγηση της λειτουργίας του JFET ως ενισχυτή στο παραπάνω σχήμα είναι η εξής: Μια μικρή μεταβαλλόμενη τάση  $U_{GS}$  στην είσοδο οδηγεί στη δημιουργία μιας μεγαλύτερης τάσης  $U_{DS}$  στην έξοδο.

**Σημείωση:** Το γεγονός ότι οι χαρακτηριστικές  $i_D - U_{DS}$  μετακινούνται ανομοιόμορφα, μη γραμμικά, συναρτήσει της  $U_{GS}$ , μπορεί να οδηγήσει σε παραμόρφωση του σήματος όταν η  $U_{GS}$  μεταβάλλεται σε μεγάλο εύρος τιμών.

# Βιβλιογραφία

**“CAD & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ”** Α. ΚΑΡΑΓΚΟΥΝΗΣ, Γ. ΒΕΛΝΤΕΣ, ΤΕΙ ΛΑΜΙΑΣ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ **“Βασικές Έννοιες Ψηφιακών Κυκλωμάτων”** Δ.Λιούπης – Μ.Στεφανιδάκης, Πανεπιστήμιο Πατρών

**C. C. Katsidis**, “Εισαγωγή στη Μικροηλεκτρονική”, UOC