



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΗΠΕΙΡΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ Τ.Ε.

ΜΕΛΕΤΗ TRANSISTOR MOSFET

Πτυχιακή εργασία της Μήτσιου Χριστίνας

Επιβλέπων Καθηγητής: Αγγέλης Κωνσταντίνος

ΑΡΤΑ 2015

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	4
1.1 Τι είναι τρανζίστορ	4
1.2 Είδη τρανζίστορ.....	5
1.2.1 Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής - BJT	5
1.2.2 Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου - FET	5
1.3 Σύγκριση FET και BJT	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	7
2.1 Το MOSFET Τρανζίστορ	7
2.2 Δομή του MOSFET	10
2.3 Φυσική λειτουργία του MOSFET	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	14
3.1 MOSFET προσαύξησης και εκκένωσης.....	14
3.1.1 Η ανάγκη ελέγχου του V_T και της χρήσης μονωτικών πύλης υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς	17
3.2 MOSFET διακένωσης (depletion MOSFET)	19
3.3 Συμπληρωματικά MOSFET	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	24
4.1 Λειτουργία του MOSFET στο συνεχές	24
4.2 Λειτουργία του MOSFET στο εναλλασσόμενο	25
4.3 Ενισχυτές με FET	26
4.3.1 Ενισχυτές διαφορικής εισόδου	26
4.3.2 Διαφορικός ενισχυτής τάσης με MOS τρανζίστορ.....	28
4.3.3 Ενισχυτές ρεύματος – Καθρέφτης ρεύματος.....	30
Περίληψη.....	32
Βιβλιογραφία	33

Εισαγωγή

Το τρανζίστορ θεωρείται μία από τις μεγαλύτερες εφευρέσεις του 20ου αιώνα. Είναι το κυριότερο συστατικό όλων σχεδόν των σύγχρονων ηλεκτρονικών κατασκευών. Η πλατιά χρήση του οφείλεται κυρίως στη δυνατότητα παραγωγής του σε τεράστιες ποσότητες που μειώνουν το κόστος ανά μονάδα.

Παρόλο που αρκετοί παραγωγοί παράγουν, ακόμα και σήμερα, μεμονωμένες συσκευασίες τρανζίστορ, η μεγαλύτερη ποσότητα παράγεται μέσα σε ολοκληρωμένα κυκλώματα (που συχνά αναφέρονται ως τσιπς) μαζί με τις διόδους, αντιστάσεις, πυκνωτές και άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα

Τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου FET (field-effect transistor) ή αλλιώς και μονοπολικά τρανζίστορ χρησιμοποιούνται σε ευρεία κλίμακα στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων τόσο ψηφιακών όσο και αναλογικών.

Λειτουργούν είτε ως ενισχυτές είτε ως απλοί διακόπτες ανάλογα με την τάση που επικρατεί ανάμεσα σε δύο ακροδέκτες, η οποία επηρεάζει με τη σειρά της το ρεύμα που διαρρέει τον τρίτο ακροδέκτη.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να μελετήσουμε τη δομή του τρανζίστορ Μετάλλου-Οξειδίου-Ημιαγωγού, (MOSFET, Metal-Oxide-Semiconductor FET), τα διάφορα είδη MOSFET τρανζίστορ, το πώς λειτουργεί στο συνεχές και στο εναλασσόμενο ρεύμα καθώς και τη λειτουργία του σαν ενισχυτής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Τι είναι τρανζίστορ

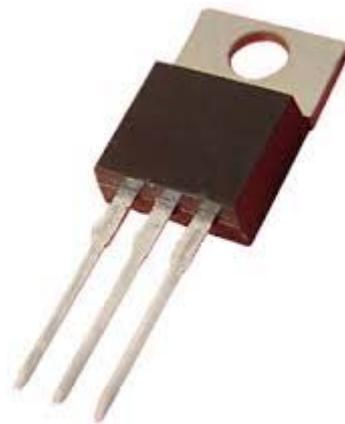
Το τρανζίστορ (αγγλικά: transistor = transforming resistor), στα ελληνικά κρυσταλλοτρίοδος και παλαιότερα κρυσταλλολυχνία, είναι διάταξη ημιαγωγών στερεάς κατάστασης, η οποία βρίσκει διάφορες εφαρμογές στην ηλεκτρονική, μερικές εκ των οποίων είναι η ενίσχυση, η σταθεροποίηση τάσης, η διαμόρφωση συχνότητας, η λειτουργία ως διακόπτης και ως μεταβλητή ωμική αντίσταση.

Ανακαλύφθηκε το 1948 στα εργαστήρια της Bell, από τους Bardeen, Britain και Schokley, οι οποίοι τιμήθηκαν με το βραβείο Nobel Φυσικής το 1956. Το τρανζίστορ αντικατέστησε την τρίοδο λυχνία του κενού, η οποία είχε ανακαλυφτεί το 1906 από τον Lee de Forest.

Το τρανζίστορ μπορεί, ανάλογα με την τάση με την οποία πολώνεται, να ρυθμίζει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος που απορροφά από συνδεδεμένη πηγή τάσης. Τα τρανζίστορ κατασκευάζονται είτε ως ξεχωριστά ηλεκτρονικά εξαρτήματα είτε ως τμήματα κάποιου ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Το τρανζίστορ θεωρείται μία από τις μεγαλύτερες εφευρέσεις του 20ου αιώνα. Είναι το κυριότερο συστατικό όλων σχεδόν των σύγχρονων ηλεκτρονικών κατασκευών. Η πλατιά χρήση του οφείλεται κυρίως στη δυνατότητα παραγωγής του σε τεράστιες ποσότητες που μειώνουν το κόστος ανά μονάδα.

Παρόλο που αρκετοί παραγωγοί παράγουν, ακόμα και σήμερα, μεμονωμένες συσκευασίες τρανζίστορ, η μεγαλύτερη ποσότητα παράγεται μέσα σε ολοκληρωμένα κυκλώματα (που συχνά αναφέρονται ως τσιπς) μαζί με τις διόδους, αντιστάσεις, πυκνωτές και άλλα ηλεκτρονικά εξαρτήματα



1.2 Είδη τρανζίστορ

Υπάρχουν πολλά είδη τρανζίστορ, ανάλογα με το υλικό του ημιαγωγού, τον τρόπο κατασκευής, τη χρήση για την οποία προορίζονται κλπ.

1.2.1 Διπολικό Τρανζίστορ Επαφής - BJT

Τα διπολικά τρανζίστορ επαφής (Bipolar Junction Transistor) ήταν τα πλέον διαδεδομένα τρανζίστορ στις δεκαετίες του 1960 και 1970. Ακόμα και μετά την αύξηση της χρήσης των MOSFET παρέμειναν στη κυκλοφορία κυρίως σε αναλογικά κυκλώματα όπως οι απλοί ενισχυτές λόγω της απλότητας κατασκευής τους και της γραμμικότητας που παρουσιάζει το σήμα τους.

1.2.2 Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου - FET

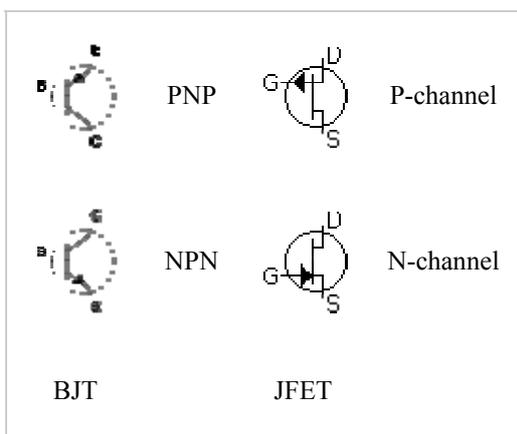
Τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (αγγλικά: Field Effect Transistor) ή FET από τα αρχικά των αγγλικών λέξεων είναι μια ηλεκτρονική διάταξη με τρεις ακροδέκτες η οποία περιλαμβάνει μια επαφή p-n. Η λειτουργία του βασίζεται στον έλεγχο ενός εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου με την εφαρμογή εξωτερικού δυναμικού στον έναν από τους τρεις ακροδέκτες που ονομάζεται πύλη (gate). Το πεδίο αυτό ελέγχει την αγωγιμότητα μεταξύ των άλλων δυο ακροδεκτών, που ονομάζονται απαγωγός ή εκροή ή υποδοχή (drain) και πηγή (source). Το ρεύμα που διέρχεται από αυτούς τους δύο ακροδέκτες ελέγχεται από το πεδίο αυτό και έτσι, ενώ στα διπολικά τρανζίστορ ο έλεγχος του ρεύματος στην έξοδο γίνεται με το ρεύμα βάσης, στα FETs ο έλεγχος γίνεται με το δυναμικό της πύλης. Επίσης, η αγωγιμότητα γίνεται με ένα τύπο φορέων (οπές ή ηλεκτρόνια) ανάλογα με την πολικότητά τους, οπότε τα τρανζίστορ αυτά χαρακτηρίζονται ως μονοπολικά (unipolar).

Υπάρχουν δυο τύποι FET που ονομάζονται FET επαφής, JFET (Junction FET) και FET μονωμένης πύλης ή Μετάλλου-Οξειδίου-Ημιαγωγού, (MOSFET, Metal-Oxide-Semiconductor FET). Κάθε τύπος μπορεί να κατασκευαστεί με κανάλι αγωγιμότητας ημιαγωγού τύπου n ή τύπου p, οπότε χαρακτηρίζεται αντίστοιχα ως n-καναλιού (n-channel) ή p-καναλιού (p-channel). Επιπλέον, υπάρχουν δύο κατηγορίες των παραπάνω, τα FET αραιώσης (depletion mode) και τα FET πύκνωσης (enhancement mode). Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του FET είναι ότι συχνά είναι απλούστερο να κατασκευαστεί και ότι καταλαμβάνει μικρότερο χώρο πάνω σε ένα μικροκύκλωμα (τσιπ) σε σύγκριση με ένα BJT. Έτσι, η πυκνότητα εξαρτημάτων πάνω σε ένα μόνο μικροκύκλωμα μπορεί να είναι εξαιρετικά μεγάλη και συχνά ξεπερνά τα 100.000 MOSFET ανά τσιπ.

Μια δεύτερη πολύ σημαντική ιδιότητα είναι ότι οι διατάξεις MOS μπορούν να συνδεθούν σαν αντιστάσεις και σαν πυκνωτές ανάλογα με την χρήση που απαιτείται. Αυτό επιτρέπει την σχεδίαση συστημάτων που αποτελούνται αποκλειστικά από MOSFET και όχι από άλλα εξαρτήματα. Η εκμετάλλευση των ιδιοτήτων αυτών κάνει το MOSFET την κυρίαρχη συσκευή σε συστήματα πολύ μεγάλης κλίμακας

ολοκλήρωσης (VLSI: Very Large Scale Integration). Αντίθετα με το BJT, το FET είναι μια συσκευή φορέων πλειονότητας. Η λειτουργία του εξαρτάται από την χρήση ενός ηλεκτρικού πεδίου που εφαρμόζεται για να ελέγχει ένα ρεύμα. Έτσι το FET είναι μια πηγή ρεύματος που ελέγχεται από τάση, που όπως είναι γνωστό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν διακόπτης και σαν ενισχυτής.

1.3 Σύγκριση FET και BJT



Τα *FET* έχουν σχεδιαστεί για να παρακάμπτουν κάποια από τα προβλήματα των διπολικών τρανζίστορ. Ο έλεγχος ενός ρεύματος εξόδου μέσω μιας τάσης εισόδου είναι προτιμότερος εκεί όπου δεν είναι δυνατό να προσφερθεί ποσότητα ρεύματος ικανή για να διεγείρει το τρανζίστορ. Επίσης, οι μεγάλες απώλειες που συμβαίνουν (με τη μορφή θερμότητας) επάνω στα διπολικά τρανζίστορ μειώνονται με τη χρήση των *FET*. Άρα το *FET* είναι καταλληλότερο για έλεγχο συσκευών μέσω του υπολογιστή, ο οποίος μπορεί, στέλνοντας ένα σήμα, να το θέσει σε λειτουργία (ή να διακόψει τη λειτουργία του). Ακόμα, το *FET* προτιμάται από το *BJT* εκεί όπου χρειάζεται μεγάλη αντίσταση εισόδου (π.χ. σε όργανα μέτρησης).

Επειδή το *FET* είναι λιγότερο ευαίσθητο στις μεταβολές του σήματος εισόδου έχει μικρότερη απολαβή (κέρδος) από το *BJT*. Αυτό σημαίνει πως οι δυνατότητές του για ενίσχυση είναι πιο περιορισμένες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2.1 Το MOSFET Τρανζίστορ

Το MOS τρανζίστορ ή MOSFET είναι ένα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, (Field Effect Transistor), όπως δηλώνει το δεύτερο συνθετικό του ονόματός του. Είναι τρανζίστορ απομονωμένης εισόδου, γι' αυτό και αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως IGFET (Insulated Gate Field Effect Transistor). Η ηλεκτρική συμπεριφορά του είναι παρόμοια με αυτήν του JFET (Junction Field Effect Transistor).

Η δομή, ωστόσο, των δύο τρανζίστορ είναι διαφορετική. Προτάθηκε το 1952 από τον Shokley. Ωστόσο, παρόλο που η δομή του MOSFET είναι απλούστερη τόσο του JFET όσο και του διπολικού τρανζίστορ BJT, η τεχνολογία ανάπτυξης ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με MOS καθυστέρησε μέχρι το 1969, διότι χρειάστηκε να ξεπεραστούν κάποιες τεχνικές δυσκολίες. Έκτοτε, ο σχεδιασμός ψηφιακών, αρχικά και κατόπιν αναλογικών MOS κυκλωμάτων, προχώρησε με πολύ γρήγορους ρυθμούς.

Τα κυκλώματα με MOS τρανζίστορ παρουσιάζουν πολύ χαμηλή κατανάλωση ισχύος συγκριτικά με αντίστοιχα κυκλώματα με διπολικά τρανζίστορ, όμως, υστερούν ως προς την ταχύτητα λειτουργίας τους. Επίσης, οι διαστάσεις κατασκευής MOS τρανζίστορ, σε ολοκληρωμένη μορφή, είναι κατά πολύ μικρότερες διπολικών τρανζίστορ, γεγονός που καθιστά την MOS τεχνολογία πολύ ελκυστική για κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Τα τρανζίστορ MOSFET είναι διατάξεις ελεγχόμενες από τάση οι οποίες δεν απαιτούν μεγάλα ρεύματα οδήγησης όπως οι αντίστοιχες διπολικές διατάξεις. Πρόκειται για τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET) που λειτουργούν με τρόπο παρόμοιο με τα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου επαφής (JFET).

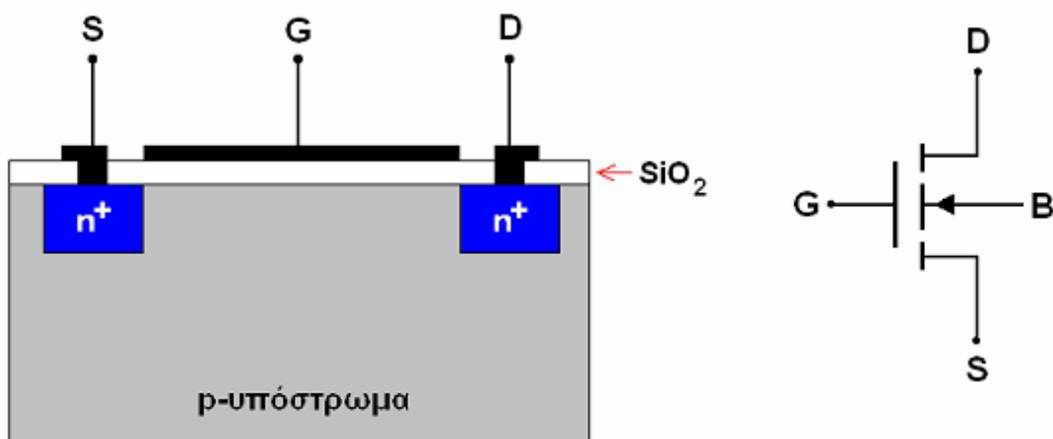
Η βασική τους διαφορά έναντι των JFET είναι ότι το δυναμικό που ελέγχει τη λειτουργία τους (δυναμικό πύλης) εφαρμόζεται στην ενεργό περιοχή (κανάλι) διαμέσου ενός μονωτικού στρώματος από κατάλληλο οξείδιο αντί να εφαρμόζεται μέσω μιας p-n επαφής.

Τα MOSFET μπορούν να κατασκευαστούν τόσο μεμονωμένα (διακριτά τρανζίστορ) όσο και ως μέρη ενός ευρύτερου ολοκληρωμένου κυκλώματος. Η ενεργή περιοχή τους μπορεί να είναι ένα κανάλι p-τύπου οπότε το τρανζίστορ χαρακτηρίζεται και ως PMOS ή ένα κανάλι n-τύπου οπότε το τρανζίστορ χαρακτηρίζεται και ως NMOS. Το μεγάλο πλεονέκτημα των δομών MOSFET είναι η πολύ μικρή ισχύς τους λόγω του μονωτικού στρώματος που παρεμβάλλεται μεταξύ πύλης και καναλιού.

Λόγω αυτής της μόνωσης τα τρανζίστορ αυτά χαρακτηρίζονται και ως "Insulated Gate Field Effect Transistors" (IGFET) μια ονομασία πιο γενική με δεδομένο ότι οι πύλες δεν είναι πάντα μεταλλικές. Αρχικά οι δομές MOSFET χρησιμοποιούσαν μεταλλική πύλη, κανάλι πυριτίου και διοξείδιο του πυριτίου ως μονωτικό στρώμα. Στη συνέχεια, οι μεταλλικές πύλες αντικαταστάθηκαν από πύλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου (γενιά κόμβων πύλης των 65nm) και οι πιο εξελιγμένες τεχνολογίες έκαναν χρήση οξυνιτριδίου του πυριτίου ως μονωτικού υλικού αντί του διοξειδίου του πυριτίου.

Οι μεταλλικές πύλες επανέρχονται στο προσκήνιο σε συνδυασμό με τη χρήση διηλεκτρικών υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς ως μονωτικών πύλης, στις τεχνολογίες πύλης των 45nm και κάτω. Αναφορικά τώρα με τον ημιαγωγό που χρησιμοποιείται, αυτός είναι κυρίως το πυρίτιο ενώ κατασκευαστές όπως η IBM χρησιμοποιούν και το SiGe. Ημιαγωγοί με υψηλές επιδόσεις, λόγω αυξημένης ευκινησίας φορέων σε σχέση με το πυρίτιο, όπως το GaAs δεν είναι κατάλληλοι για την κατασκευή MOS τρανζίστορ λόγω της αδυναμίας ανάπτυξης του αντίστοιχου οξειδίου του ημιαγωγού.

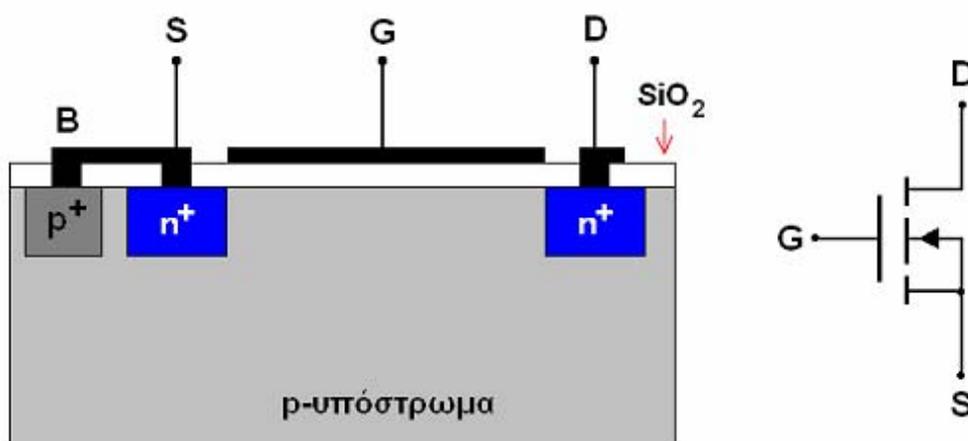
Η κεντρική ιδέα της λειτουργίας των MOSFET είναι η ακόλουθη: Η εφαρμογή μιας διαφοράς δυναμικού μεταξύ πύλης και πηγής δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο το οποίο διαπερνά το διηλεκτρικό της πύλης και δημιουργεί (MOSFET προσαύξησης) ή τροποποιεί (MOSFET διακένωσης) ένα στρώμα αναστροφής. Το στρώμα αναστροφής έχει αντίθετο τύπο αγωγιμότητας από αυτόν του υποβάθρου και ταυτόσημο με αυτόν των διαχύσεων σε πηγή και απαγωγό .



Σχήμα 1. MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS) με το σύμβολό του.

Για παράδειγμα σε μια δομή όπως αυτή του σχήματος 1 όπου η πηγή (S) και ο απαγωγός (D) είναι n-τύπου και το υπόστρωμα p-τύπου, το κανάλι αναστροφής που θα σχηματιστεί μεταξύ πηγής και απαγωγού με την εφαρμογή κατάλληλης διαφοράς δυναμικού μεταξύ πύλης και πηγής θα είναι n-τύπου. Δημιουργείται έτσι ένας δίαυλος που επιτρέπει τη ροή του ρεύματος μεταξύ πηγής και απαγωγού.

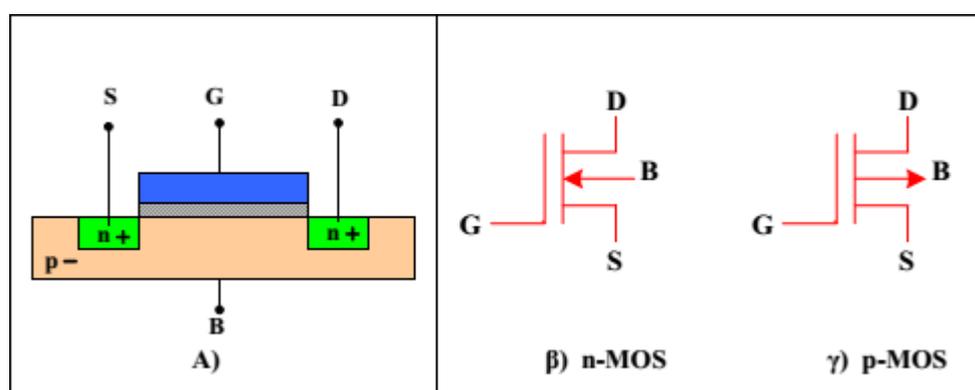
Η μεταβολή της διαφοράς δυναμικού μεταξύ της πύλης και του σώματος του υποστρώματος (που συνήθως το υπόστρωμα βραχυκυκλώνεται με την πηγή όπως φαίνεται στο σχήμα 2) διαμορφώνει την αγωγιμότητα του καναλιού ελέγχοντας έτσι τη ροή του ρεύματος μεταξύ πηγής και απαγωγού.



Σχήμα 2. MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS) με βραχυκύκλωμα μεταξύ της πηγής και του σώματος του υποστρώματος (Bulk) μαζί με το σύμβολό του.

2.2 Δομή του MOSFET

Το MOSFET είναι ένα ``σάντουιτς`` τριών υλικών, μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού. Η δομή αυτή δικαιολογεί την επικρατούσα ονομασία του στοιχείου ως MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) ή απλώς MOS τρανζίστορ. Η κατασκευή του MOSFET γίνεται με διαδοχική επίπεδη διαστρωμάτωση υλικών (planar process), με φωτολιθογραφικές διεργασίες. Στο σχήμα διακρίνουμε το ημιαγωγό υλικό, το οποίο είναι ελαφρώς νοθευμένο Si τύπου p-, (εάν πρόκειται για τρανζίστορ διαύλου n, δηλαδή, nMOS), που αποτελεί το υπόστρωμα (substrate), πάνω στο οποίο δομείται το τρανζίστορ.



Πάνω στο υπόστρωμα δημιουργούνται, με διάχυση ή άλλες τεχνικές, δυο περιοχές ισχυρής νόθευσης, τύπου n+, σε πολύ κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των περιοχών διάχυσης καθορίζεται από την τεχνολογία κατασκευής, (π.χ. 0,18μm process). Οι περιοχές αυτές αποτελούν τον απαγωγό D (drain) και την πηγή S (source) του τρανζίστορ. Από κατασκευαστική άποψη δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ απαγωγού και πηγής, αφού το MOS τρανζίστορ είναι συμμετρικό στη δομή του, σε αντίθεση με το BJT.

Πάνω στο υπόστρωμα και μεταξύ των δυο περιοχών διάχυσης, εναποτίθεται λεπτό στρώμα μονωτικού υλικού, συνήθως, μονοξειδίου του πυριτίου, SiO₂. Στη συνέχεια της διεργασίας, πάνω από το μονωτικό υλικό εναποτίθεται αγωγίμο μεταλλικό υλικό. Το μέταλλο αποτελεί την πύλη G (Gate) του τρανζίστορ.

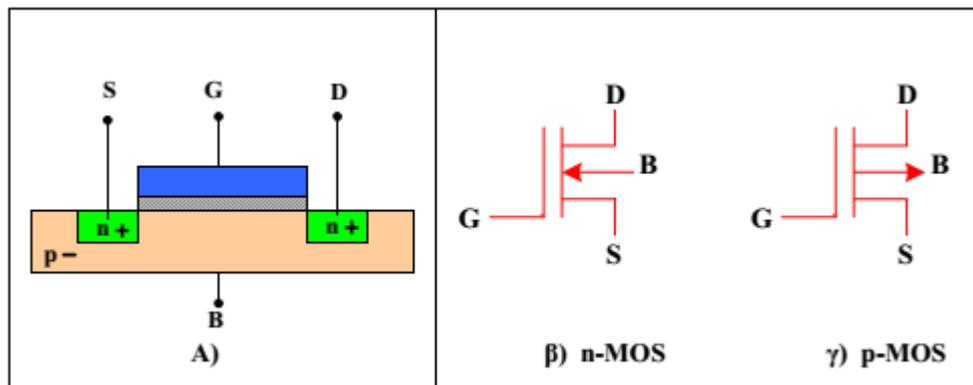
Συχνά, αντί μετάλλου, χρησιμοποιείται αγωγίμο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, (Poly, polycrystalline silicon), για καθαρά κατασκευαστικούς λόγους. Ο κοινός τόπος μεταξύ των περιοχών διάχυσης και πύλης καθορίζει τη γεωμετρία του τρανζίστορ,

όπου με L χαρακτηρίζεται το μήκος του διαύλου του τρανζίστορ και με W χαρακτηρίζεται το εύρος του διαύλου.

Για δεδομένη τεχνολογία κατασκευής, η γεωμετρία του τρανζίστορ είναι αυτή που καθορίζει την ηλεκτρική συμπεριφορά του στοιχείου, γι' αυτό και ο λόγος $\alpha=W/L$ (aspect ratio) αποτελεί τη μοναδική σχεδιαστική παράμετρο, (design parameter), κατά το σχεδιασμό ολοκληρωμένων MOS κυκλωμάτων.

Με την ανάπτυξη των τριών στρωμάτων μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού, είναι φανερό ότι, σχηματίζεται ένας πυκνωτής, ο οποίος έχει για παράλληλους οπλισμούς την πύλη και το υπόστρωμα και ως διηλεκτρικό το SiO_2 .

Το ηλεκτρικό πεδίο αυτού του πυκνωτή ελέγχει τη ροή του ρεύματος στο δίαυλο ηλεκτρικής αγωγής, που σχηματίζεται, υπό ορισμένες συνθήκες πόλωσης, μεταξύ του απαγωγού D και πηγής S . Στη λειτουργία αυτή θα αναφερθούμε αργότερα.



Στο σχήμα βλέπουμε τα σύμβολα για MOSFET διαύλου n και διαύλου p . Στα σύμβολα αυτά διακρίνεται ο ακροδέκτης B (bulk), που δηλώνει το σώμα του τρανζίστορ.

Ο ακροδέκτης αυτός, σε ολοκληρωμένα κυκλώματα, συνδέεται μονίμως στο χαμηλότερο δυναμικό, για τρανζίστορ διαύλου- n , ή στο ψηλότερο δυναμικό για τρανζίστορ διαύλου- p . Επίσης σε άλλες τεχνολογίες ο ακροδέκτης B συνδέεται μονίμως με την πηγή.

Χαρακτηριστικά γνωρίσματα του MOSFET είναι:

α) οι πολύ μικρές φυσικές διαστάσεις του. Χρειάζεται περίπου το 20-30% της επιφάνειας, που απαιτείται για ένα BJT.

β) η χαμηλή κατανάλωση ισχύος.

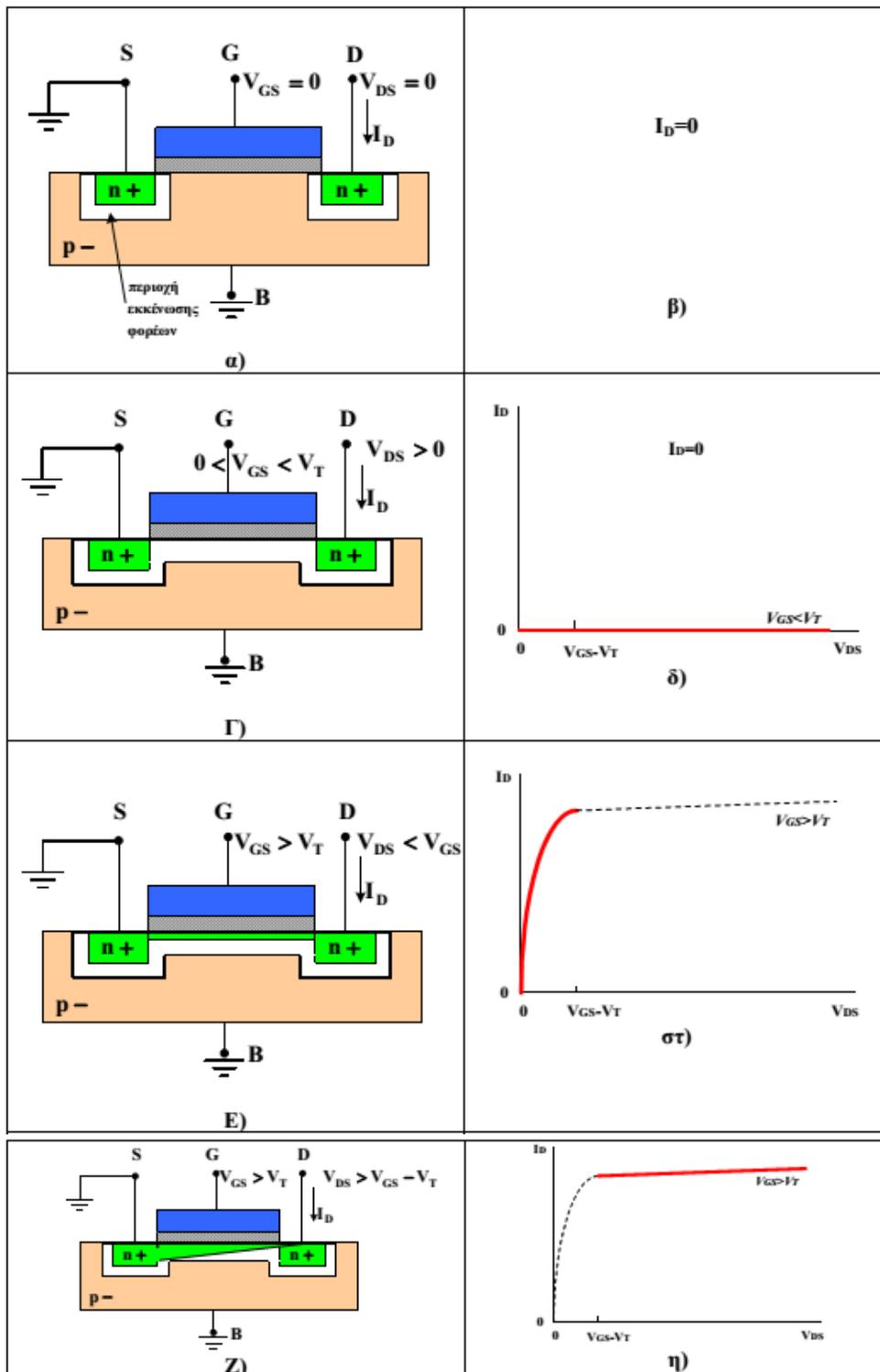
γ) η μεγάλη αντίσταση εισόδου της τάξης των $10^{14} \Omega$.

δ) η δυνατότητα κατασκευής με διεργασία επίπεδης διαστρωμάτωσης υλικών (planar process).

Ο συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών βοηθάει στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης, VLSI, (Very Large Scale Integration).

2.3 Φυσική λειτουργία του MOSFET

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του MOSFET, θα εξετάσουμε διαδοχικά τη συμπεριφορά του σε διαφορετικές συνθήκες πόλωσης. Σε όλες τις περιπτώσεις θεωρούμε το υπόστρωμα B του τρανζίστορ καθώς και την πηγή S συνδεδεμένα προς τη γη.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 MOSFET προσαύξησης και εκκένωσης

Σύμφωνα με τη φυσική λειτουργία του MOSFET, που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο, η τάση κατωφλίου V_T του τρανζίστορ καθορίζει σημαντικά την λειτουργία του στοιχείου. Η τιμή της τάσης κατωφλίου εξαρτάται από τη συγκέντρωση των προσμίξεων τύπου-p στο υπόστρωμα του nMOS τρανζίστορ. NMOS τρανζίστορ με θετική τιμή της V_T ονομάζονται **MOSFET προσαύξησης**.

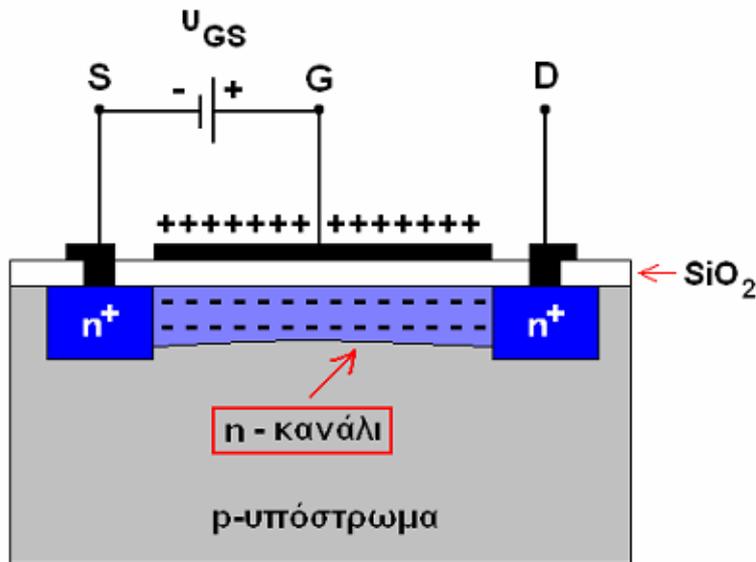
Στο σχήμα 5 παρουσιάζεται η διαδικασία δημιουργίας ενός καναλιού αναστροφής (κανάλι n-τύπου) μέσα σε ένα υπόστρωμα p-τύπου, δημιουργώντας έτσι έναν n διάυλο που ενώνει τις n+-τύπου περιοχές της πηγής και του απαγωγού. Όταν στην πύλη δεν εφαρμόζεται κάποιο δυναμικό δεν υπάρχει ο n- διάυλος και οι n+-τύπου περιοχές του απαγωγού και της πηγής χωρίζονται από το p-τύπου υλικό του υποστρώματος που είναι πολύ μικρής αγωγιμότητας.

Το p-τύπου υπόστρωμα το μονωτικό οξειδίο και η μεταλλική πύλη αποτελούν έναν πυκνωτή. Όταν η μεταλλική πύλη βρεθεί σε θετικό δυναμικό υψηλότερο από αυτό της πηγής ($v_{GS} > 0$ στο σχήμα 5) συσσωρεύονται σε αυτήν θετικά φορτία τα οποία έλκουν ηλεκτρόνια (φορείς μειονότητας) από το p-υπόστρωμα προς τη διεπιφάνεια με το οξειδίο απωθώντας παράλληλα τις οπές.

Όταν η συσσώρευση αυτών των αρνητικών φορτίων φτάσει σε συγκέντρωση τέτοια ώστε να ξεπερνά τη συγκέντρωση των φορέων πλειονότητας (οπών) του p-υποστρώματος επέρχεται η αναστροφή του τύπου αγωγιμότητας και σχηματίζεται ένας ομοιογενής διάυλος τύπου n στο p- υπόστρωμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.

Για να μπορέσει η συγκέντρωση ηλεκτρονίων να ξεπεράσει τοπικά - κοντά στο μονωτικό στρώμα και κατά μήκος ολόκληρης της έκτασης της πύλης- αυτήν των οπών χρειάζεται η τάση v_{GS} να ξεπεράσει κάποια τιμή κατωφλίου V_T (Threshold Voltage) που είναι της τάξης των 1-4V. Το κατώφλι αυτό είναι αντίστοιχο σε ρόλο με το δυναμικό pinch off, V_P , που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο των JFET.

Ο σχηματισμός του διαύλου ουσιαστικά ισοδυναμεί με τη δημιουργία ενός καναλιού υψηλής αγωγιμότητας μεταξύ πηγής και απαγωγού. Όσο το θετικό δυναμικό της πύλης αυξάνει τόσο αυξάνεται και η αγωγιμότητα του διαύλου.

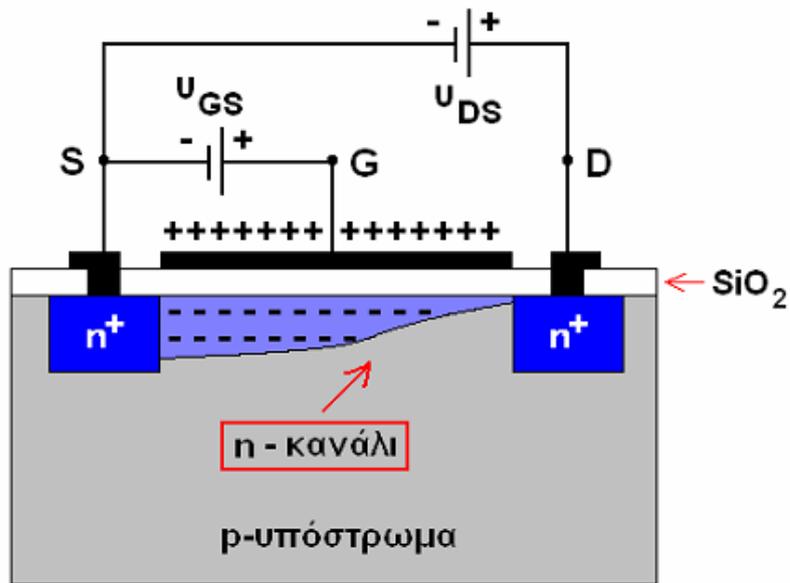


Σχήμα 5. MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Δημιουργία του n-καναλιού όταν η θετική τάση u_{GS} ξεπεράσει την τιμή κατωφλίου V_T .

Αν στη συνέχεια ο απαγωγός έρθει σε θετικό δυναμικό σε σχέση με την πηγή θα παρουσιαστεί ροή ρεύματος μεταξύ πηγής και απαγωγού ενώ παράλληλα λόγω της πτώσης τάσης που προκαλεί το ρεύμα κατά μήκος της αντίστασης του διαύλου το σχήμα του διαύλου θα τροποποιηθεί παρουσιάζοντας μια συρρίκνωση προς την περιοχή του απαγωγού (σχήμα 6).

Αν με τη μεταβλητή x συμβολίσουμε την απόσταση ενός σημείου του διαύλου από την πηγή τότε το δυναμικό του σημείου αυτού με αναφορά το δυναμικό της πηγής θα είναι u_{XS} . Το δυναμικό u_{XS} των σημείων του διαύλου αυξάνεται καθώς κινούμαστε από την πηγή προς τον απαγωγό.

Για να συντηρείται διάυλος σε κάποια θέση x μεταξύ πηγής και απαγωγού θα πρέπει η διαφορά δυναμικού u_{GX} να είναι τουλάχιστον ίση ή να ξεπερνά το δυναμικό κατωφλίου V_T .



Σχήμα 6. MOSFET προσαύξησης n-καναλιού (enhancement NMOS). Τροποποίηση της μορφής του καναλιού υπό την επίδραση διαφοράς δυναμικού v_{DS} μεταξύ απαγωγού και πηγής.

Ένα χρήσιμο μέγεθος που δείχνει το κατά πόσο σε κάποιο σημείο x μεταξύ πηγής και απαγωγού συντηρείται η αναστροφή τύπου αγωγιμότητας, υπάρχει δηλαδή ο διάυλος, είναι το δυναμικό διατήρησης διαύλου, $V_{\delta\delta}$:

$$V_{\delta\delta} = -v_{GS} - V_T \quad (1)$$

Στα σημεία όπου το δυναμικό αυτό είναι θετικό ο n-διάυλος συντηρείται στα σημεία όπου αλλάζει πρόσημο και γίνεται αρνητικό ο διάυλος παύει να υφίσταται. Όταν ο διάυλος διατηρείται σε όλο του το μήκος από την πηγή στον απαγωγό η αγωγιμότητα του MOSFET χαρακτηρίζεται ως μη κορεσμένη. Το ρεύμα i_D , που ρέει στην περίπτωση αυτή μεταξύ πηγής και απαγωγού εξαρτάται τόσο από το v_{DS} όσο και από το v_{GS} , και αυξάνει με την αύξησή τους.

Όταν ο διάυλος κλείνει από κάποιο σημείο του μέχρι τον απαγωγό η αγωγιμότητα χαρακτηρίζεται ως κορεσμένη και το ρεύμα που ρέει μεταξύ πηγής και απαγωγού είναι ανεξάρτητο της διαφοράς δυναμικού v_{DS} στους δύο αυτούς ακροδέκτες και εξαρτάται μόνο από το v_{GS} . Όταν ο διάυλος δεν σχηματίζεται καθόλου ($v_{GS} < V_T$) τότε το τρανζίστορ βρίσκεται σε αποκοπή και το ρεύμα μηδενίζεται.

Εάν στην περιοχή του υποστρώματος, κάτω από την πύλη, προστεθεί μικρή ποσότητα προσμίξεων τύπου-n, τότε η τάση κατωφλίου μειώνεται. Εάν προστεθεί ακόμα μεγαλύτερη ποσότητα προσμίξεων τύπου-n, τότε, δημιουργείται κάτω από την πύλη ένας μόνιμος διάυλος αγωγιμότητας τύπου-n, η δε τιμή της V_T καθίσταται αρνητική. NMOS τρανζίστορ με αρνητική τιμή της V_T ονομάζονται **MOSFET εκκένωσης** (Depletion MOSFET).

3.1.1 Η ανάγκη ελέγχου του V_T και της χρήσης μονωτικών πύλης υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς.

Ο έλεγχος του δυναμικού κατωφλίου, V_T , είναι ένα πολύ βασικό ζήτημα στη μικροηλεκτρονική. Όταν δεν είναι επιθυμητή η δημιουργία στρωμάτων αναστροφής (του τύπου αγωγιμότητας) το δυναμικό κατωφλίου ρυθμίζεται ώστε να έχει μεγάλη τιμή. Ιδιαίτερα σε περιοχές ανάμεσα σε τρανζίστορ, η αναστροφή αποφεύγεται με διαχύσεις ή εμφυτεύσεις προσμίξεων σε μεγάλη συγκέντρωση, ή με χρήση παχύτερου μονωτικού στρώματος. Αντίθετα στα MOS τρανζίστορ η δημιουργία στρώματος αναστροφής είναι επιθυμητή.

Υπάρχουν δύο κύριοι τρόποι για να ρυθμιστεί σε επιθυμητά επίπεδα το δυναμικό κατωφλίου. Ο ένας είναι η μεταβολή, με εμφύτευση ιόντων, της συγκέντρωσης προσμίξεων στη διεπιφάνεια πυριτίου μονωτή και ο άλλος είναι η χρήση μονωτικού υλικού διαφορετικού από το διοξείδιο του πυριτίου.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα στην τελευταία περίπτωση είναι η χρήση του νιτριδίου του πυριτίου (Si_3N_4) ως μονωτικού υλικού. Το Si_3N_4 έχει διηλεκτρική σταθερά 7.5 ενώ το SiO_2 3.9, γεγονός που σημαίνει ότι αν για το ίδιο πάχος μονωτικού υλικού χρησιμοποιηθεί το νιτρίδιο αντί του διοξειδίου του πυριτίου, το στρώμα που θα προκύψει θα αντιστοιχεί σε λεπτότερο στρώμα διοξειδίου του πυριτίου.

Η τάση για περιορισμό των διαστάσεων στη μικροηλεκτρονική έχει οδηγήσει στην αναζήτηση διηλεκτρικών πύλης με υψηλή διηλεκτρική σταθερά. Το διοξείδιο του πυριτίου έχει χρησιμοποιηθεί ως διηλεκτρικό πύλης εδώ και πολλές δεκαετίες. Καθώς όμως τα τρανζίστορ ολοένα συρρικνώνονται σε μέγεθος, το πάχος του διοξειδίου του πυριτίου που χρησιμοποιείται ως διηλεκτρικό πύλης ολοένα μικραίνει με στόχο την αύξηση της χωρητικότητας πύλης (gate capacitance) και τη βελτιστοποίηση των επιδόσεων.

Καθώς όμως το πάχος του οξειδίου πέφτει κάτω από τα 2nm τα ρεύματα διαρροής λόγω φαινομένου tunneling αυξάνονται δραστικά υποβαθμίζοντας την αξιοπιστία της συσκευής και οδηγώντας σε ανεπιθύμητη κατανάλωση ενέργειας. Η αντικατάσταση του διοξειδίου του πυριτίου από μονωτικό υλικό με υψηλότερη διηλεκτρική σταθερά καθιστά εφικτή την επίτευξη υψηλής χωρητικότητας πύλης χωρίς τα ανεπιθύμητα φαινόμενα ρευμάτων διαρροής.

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση που δίνει τη χωρητικότητα της πύλης (αγνοώντας κβαντομηχανικά φαινόμενα και φαινόμενα δημιουργίας περιοχών διακένωσης από το υπόβαθρο πυριτίου και την πύλη):

$$C = \frac{\epsilon_{ox}\epsilon_0 A}{t_{ox}}$$

όπου:

$A \rightarrow$ η επιφάνεια του πυκνωτή που σχηματίζεται και

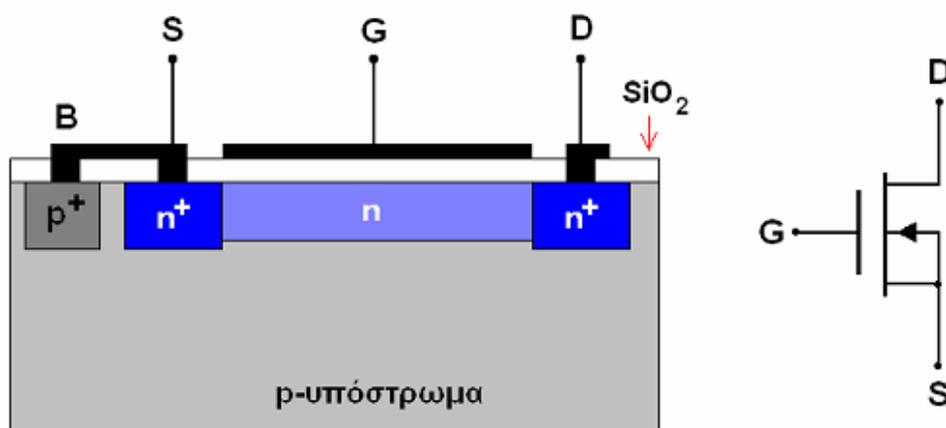
$\epsilon_0 \rightarrow$ η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού

γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι αν αντί του στρώματος του διοξειδίου του πυριτίου πάχους κάτω του 1.5 nm, που παρουσιάζει προβλήματα λόγω ρευμάτων διαρροής, χρησιμοποιηθεί ένα διηλεκτρικό υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς ϵ_{OX} συγκριτικά με αυτήν του SiO_2 πάχους 3nm τότε μπορεί να επιτευχθεί η ίδια χωρητικότητα χρησιμοποιώντας παχύτερο διηλεκτρικό πύλης και κατ' επέκταση μειώνοντας σημαντικά τα ρεύματα διαρροής.

Ήδη εταιρείες όπως οι Intel, IBM, NEC κ.ά έχουν στα πλάνα τους τη μετάβαση σε διηλεκτρικά πύλης υψηλότερης διηλεκτρικής σταθεράς από αυτήν του SiO_2 βασισμένα στο στοιχείο Χάφνιο (Hf), με πιθανότερα διηλεκτρικά τα : $HfSiON$, HfO_2 και $HfSiO$ ενώ επίσης έχει παρουσιαστεί ενδιαφέρον και για οξείδια ή πυριτίδια του ζirkονίου.

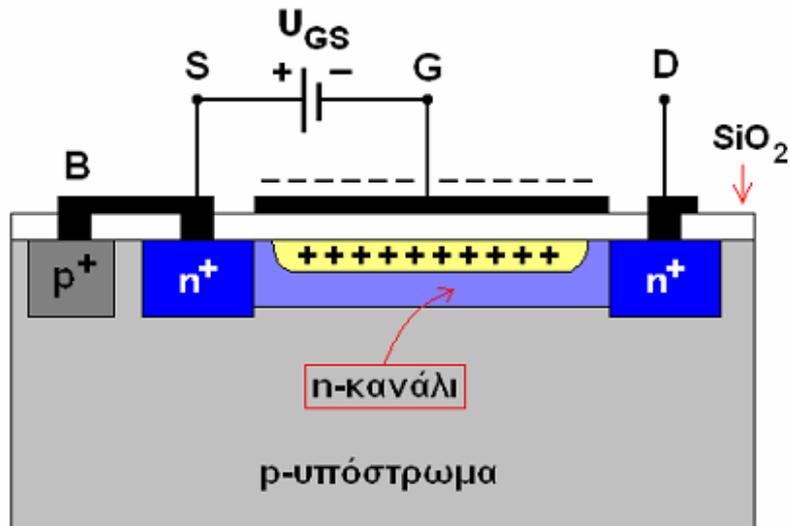
3.2 MOSFET διακένωσης (depletion MOSFET)

Το MOSFET διακένωσης ή αραίωσης έχει μια δομή που μοιάζει με αυτήν του MOSFET προσαύξησης με τη διαφορά ότι στην περιοχή μεταξύ πηγής και απαγωγού προϋπάρχει κανάλι με τον ίδιο τύπο αγωγιμότητας (σχήμα 15).

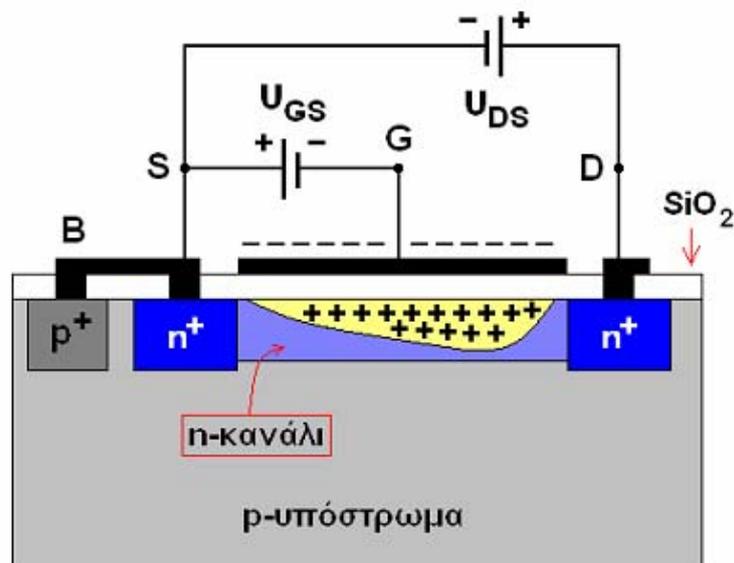


Σχήμα 15. MOSFET διακένωσης n-καναλιού (depletion NMOS) με το σύμβολό του.

Αν στην πύλη εφαρμοστεί ένα αρνητικό δυναμικό, όπως εικονίζεται στο σχήμα 16, τότε αυτό επάγει θετικά φορτία στο κανάλι. Τα θετικά αυτά επαγόμενα φορτία επανασυντίθενται με τους φορείς πλειονότητας του n- καναλιού (ηλεκτρόνια) δημιουργώντας έτσι μια περιοχή εκκένωσης φορέων πλειονότητας. Αν η τάση πύλης γίνει περισσότερο αρνητική, η περιοχή διακένωσης (σχήμα 16) θα διευρυνθεί και το διαθέσιμο n-τύπου κανάλι θα στενέψει ακόμη περισσότερο μέχρι να φτάσει τελικά σε μια τιμή κατωφλίου $V_T < 0$ όπου το κανάλι εκκενώνεται ολοκληρωτικά από φορείς πλειονότητας.



Σχήμα 16. MOSFET διακένωσης n-καναλιού (depletion NMOS). Ομοιόμορφος περιορισμός του εύρους του n-τύπου καναλιού υπό την επίδραση αρνητικής τάσης u_{GS} .

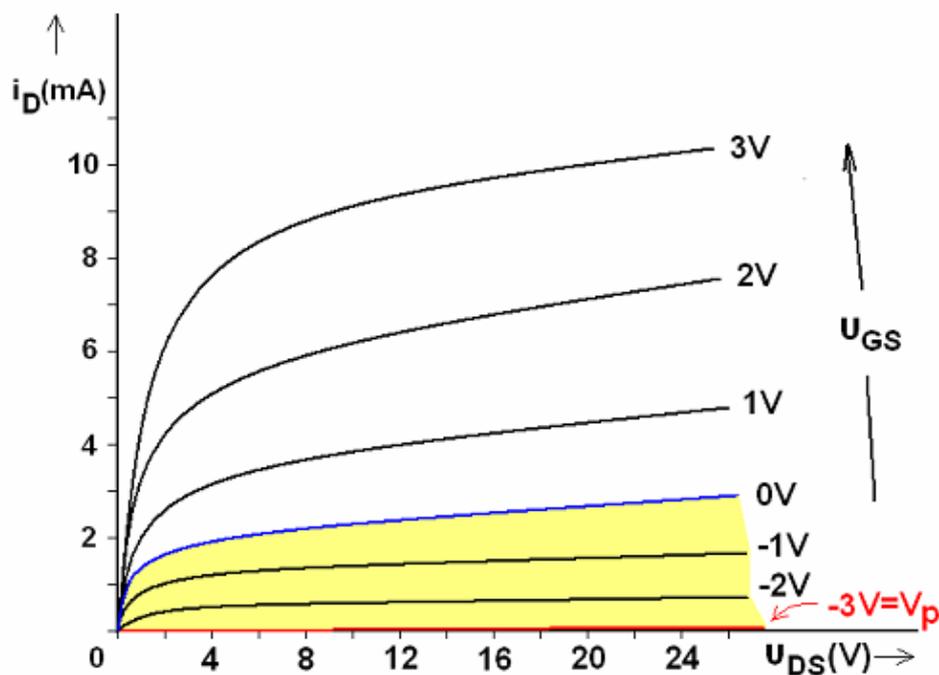


Σχήμα 17. MOSFET διακένωσης n-καναλιού (depletion NMOS). Ανομοιόμορφη διαμόρφωση του εύρους του n-τύπου καναλιού υπό την επίδραση διαφοράς δυναμικού u_{DS} μεταξύ απαγωγού και πηγής.

Αν παράλληλα με την αρνητική τάση u_{GS} , η οποία ας υποθεθεί πως δεν έχει γίνει αρνητικότερη από το κατώφλι (σχήμα 17) εφαρμοστεί και μια θετική τάση u_{DS} τότε παρατηρείται μια διεύρυνση της περιοχής εκκένωσης στην περιοχή του απαγωγού.

Αυτή η ανομοιομορφία οφείλεται στην πτώση τάσης κατά μήκος του διαύλου λόγω του ρεύματος που τον διαρρέει. Αυτή η πτώση τάσης μεγαλώνει όσο κινούμαστε από την πηγή προς τον απαγωγό με αποτέλεσμα η διεύρυνση της περιοχής εκκένωσης να είναι πιο έντονη στην περιοχή του απαγωγού.

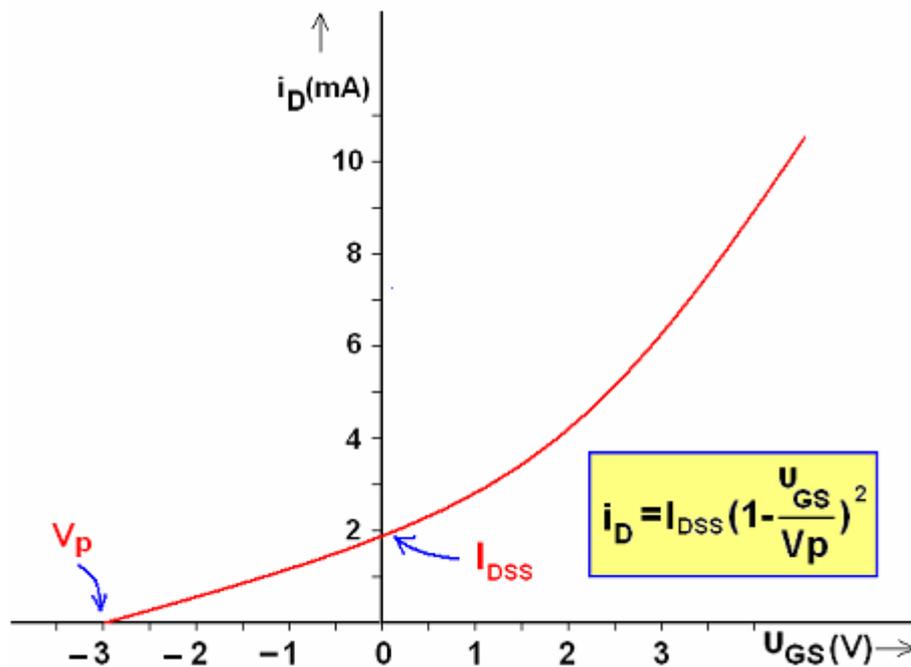
Το φαινόμενο αυτό της συρρίκνωσης του διαύλου είναι παρόμοιο με αυτό που περιγράφηκε στο κεφάλαιο των FET επαφής (JFET). Κατά συνέπεια η λειτουργία του MOSFET διακένωσης για $u_{GS} \leq 0$ είναι ταυτόσημη με αυτήν του JFET. (Περιοχή κίτρινου χρώματος στο σχήμα 18).



Σχήμα 18. Χαρακτηριστικές i_D-u_{DS} MOSFET διακένωσης. Σκιασμένη περιοχή: λειτουργία παρόμοια με JFET, μη σκιασμένη περιοχή: λειτουργία παρόμοια με MOSFET προσαύξησης.

Αν τώρα το δυναμικό u_{GS} γίνει θετικό, λόγω του γεγονότος ότι n-τύπου κανάλι υπάρχει εξαρχής η περαιτέρω αύξηση του θετικού δυναμικού της πύλης θα επάγει (λόγω της χωρητικότητας πύλης-διαύλου) ολοένα και περισσότερα αρνητικά φορτία μέσα στο κανάλι αυξάνοντας την αγωγιμότητά του.

Κατά συνέπεια, για θετικές τιμές της u_{GS} το τρανζίστορ συμπεριφέρεται όπως ένα τρανζίστορ προσαύξησης. Η χαρακτηριστική μεταφοράς του MOSFET διακένωσης (σχήμα 19) είναι παρόμοια με αυτήν του JFET.

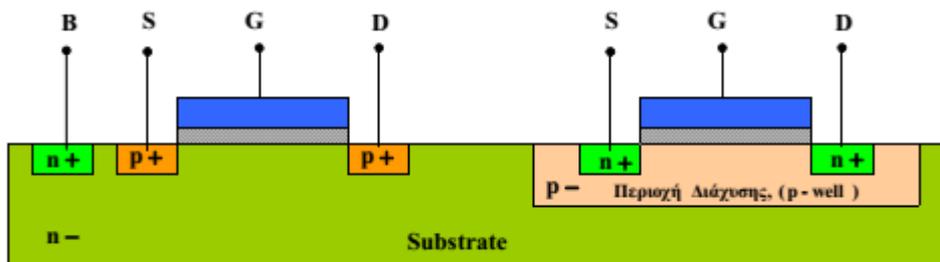


Σχήμα 19. Χαρακτηριστική μεταφοράς MOSFET διακένωσης.

Επίσης, από το σχήμα 18 φαίνεται πως η αγωγιμότητα του MOSFET διακένωσης μπορεί να είναι είτε ωμική είτε κορεσμένη. Οι εξισώσεις που δίνουν τη μορφή του ρεύματος στις δύο αυτές περιοχές (μη κορεσμένης και κορεσμένης αντίστοιχα) αγωγιμότητας για την περίπτωση του MOSFET προσαύξησης ισχύουν και για το MOSFET διακένωσης με τη διαφορά ότι $V_T < 0$.

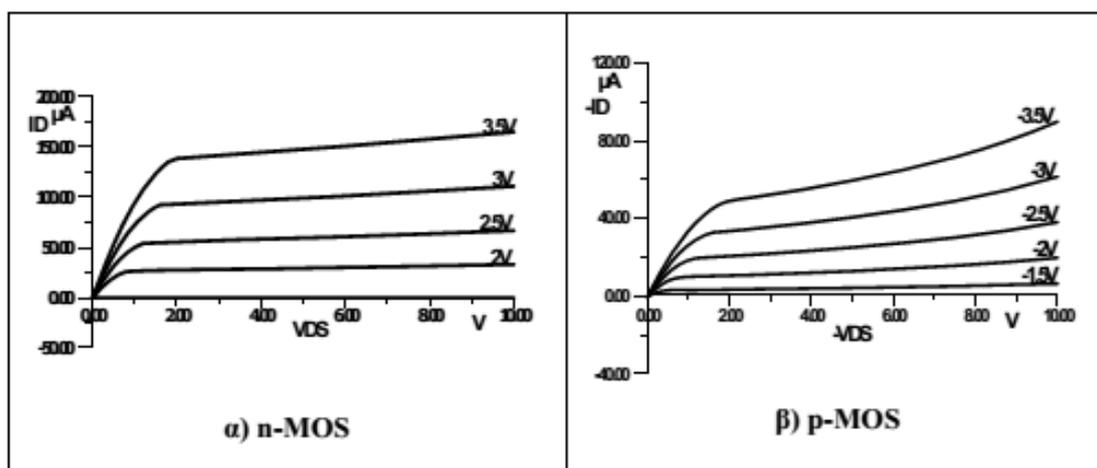
3.3 Συμπληρωματικά MOSFET

Η τεχνολογία σήμερα προσφέρει τη δυνατότητα υλοποίησης nMOS και pMOS τρανζίστορ πάνω στο ίδιο υπόστρωμα. Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται CMOS (Complementary MOS). Εάν χρησιμοποιηθεί υπόστρωμα τύπου-n, αυτό προσφέρεται για την άμεση υλοποίηση pMOS τρανζίστορ. Για την υλοποίηση των nMOS τρανζίστορ δημιουργείται αρχικά μια τάφρος (well or tub), στην οποία προστίθενται προσμίξεις τύπου-p, όπως δεικνύεται στο σχήμα.



Μέσα στην τάφρο κατασκευάζονται τα nMOS τρανζίστορ, όπως προαναφέραμε. Κατά την υλοποίηση, μεταξύ των δυο τύπων τρανζίστορ δημιουργούνται περιοχές απομόνωσης για αποφυγή ανεπιθύμητων επιδράσεων.

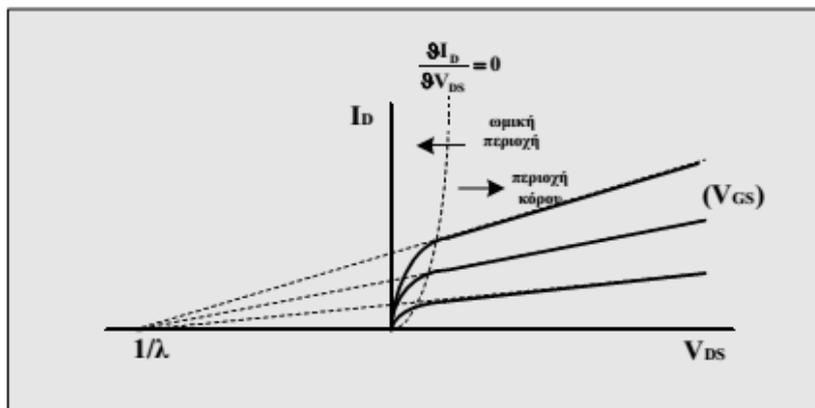
Οι χαρακτηριστικές εξόδου συμπληρωματικών nMOS και pMOS τρανζίστορ, των ίδιων διαστάσεων και της ίδιας τεχνολογίας, δεικνύονται στο σχήμα. Είναι προφανές ότι, τα nMOS τρανζίστορ υπερτερούν των pMOS ως προς την ενίσχυση και την αντίσταση εξόδου.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 Λειτουργία του MOSFET στο συνεχές

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες εξόδου ενός MOS τρανζίστορ για διάφορες τιμές της V_{GS} . Διακρίνονται δύο περιοχές: α) Η **ωμική περιοχή** (ohmic region) και β) Η **περιοχή κόρου** (saturation region), που αντιστοιχεί στην ενεργό περιοχή του BJT.



Το μοντέλο συνεχούς του MOSFET, αναπτύχθηκε το 1964 από τον Sah. Τα ρεύματα του τρανζίστορ περιγράφονται από τις σχέσεις,

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{K_p W}{L} \left[(V_{GS} - V_T) - \frac{V_{DS}}{2} \right] V_{DS} && \text{όταν } V_{GS} > V_T \\ I_D &= 0 && \text{όταν } V_{GS} < V_T \\ I_G &= 0 && \text{για κάθε τιμή των } V_{GS} \text{ και } V_{DS} \end{aligned}$$

όπου,

K_p , παράμετρος διαγωγιμότητας, (transconductance parameter, **(KP)**)

$$K_p = \mu C_{ox} = \frac{\mu \epsilon_{ox}}{t_{ox}}$$

μ ευκινησία φορέων στο διάλυο (surface mobility of the channel $m^2/V \cdot sec$)

C_{ox} χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας του οξειδίου πύλης SiO_2 (F/m^2)

$\epsilon_{ox}=3,9\epsilon_0$ ηλεκτρική επιδεκτικότητα SiO_2 (permittivity F/m)

t_{ox} πάχος SiO_2 , (m)

W εύρος διαύλου (a), (channel Width)

L μήκος διαύλου l , (channel Legth)

V_T τάση κατωφλίου αγωγιμότητας, (threshold Voltage)

4.2 Λειτουργία του MOSFET στο εναλλασσόμενο

Η βασική συμπεριφορά του τρανζίστορ στο εναλλασσόμενο είναι συμπεριφορά πηγής ρεύματος, ελεγχόμενης από την τάση εισόδου. Η λειτουργία αυτή εκφράζεται από τη σχέση,

$$i_o = g_m v_{gs}$$

όπου, i_o είναι το ρεύμα της πηγής και g_m η διαγωγιμότητα του τρανζίστορ. Η διαγωγιμότητα, για συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας Q , του τρανζίστορ ορίζεται ως,

$$g_m = \left. \frac{dI_D}{dV_{GS}} \right|_Q = \frac{K_p W}{L} (V_{GS} - V_T)(1 + \lambda V_{DS})$$
$$g_m = \frac{2I_D}{V_{GS} - V_T} = \sqrt{\frac{2K_p W}{L} (1 + \lambda V_{DS}) |I_D|}$$
$$g_m \approx \sqrt{\frac{2K_p W}{L}} \cdot \sqrt{|I_D|}$$

Είναι φανερό, σύμφωνα προς τη σχέση , ότι, η διαγωγιμότητα του τρανζίστορ είναι συνάρτηση της πόλωσης του τρανζίστορ, όπως ακριβώς ίσχυε και για το BJT.

Η συμπεριφορά εισόδου του τρανζίστορ καθορίζεται από την ισοδύναμη αντίσταση εισόδου r_{gs} , η οποία επειδή έχει πολύ υψηλή τιμή, συνήθως, δεν λαμβάνεται υπόψη στο ισοδύναμο μοντέλο.

Η συμπεριφορά εξόδου καθορίζεται από την ισοδύναμη αγωγιμότητα εξόδου, που ορίζεται ως,

$$(r_o)^{-1} = g_{ds} = \frac{I_D}{V_{DS}} = \frac{\lambda |I_D|}{1 + \lambda V_{DS}} \approx \lambda |I_D|$$

Η ισοδύναμη αντίσταση εξόδου r_o παίζει καθοριστικό ρόλο στον προσδιορισμό της ενίσχυσης τάσης ολοκληρωμένων MOS ενισχυτών.

4.3 Ενισχυτές με FET

Τα JFET και τα MOSFET, σε αντίθεση με τα διπολικά τρανζίστορ, είναι διατάξεις στις οποίες το ρεύμα του απαγωγού ελέγχεται με τη βοήθεια τάσης η οποία εφαρμόζεται στην πύλη. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό και με την πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου επιτρέπει τη χρησιμοποίησή τους για την κατασκευή ειδικών ενισχυτών. Πέρα, όμως, από αυτές τις διαφορές η ανάλυση του ενισχυτή με JFET ή με MOSFET είναι παρόμοια με αυτή για το διπολικό τρανζίστορ. Έτσι υπάρχουν τρεις βασικές συνδεσμολογίες οι: α) κοινής πηγής (common source,CS), β)κοινής πύλης (common gate,CG) και γ) κοινού απαγωγού (common drain, CD).

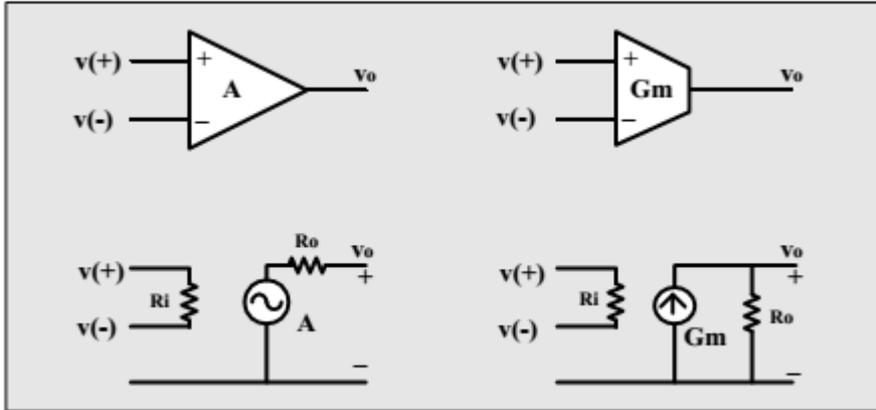
4.3.1 Ενισχυτές διαφορικής εισόδου

Μια ιδιαίτερη κατηγορία ολοκληρωμένων ενισχυτών είναι αυτοί με διαφορική είσοδο. Χαρακτηριστικοί εκπρόσωποι τέτοιων ενισχυτών είναι κυρίως ο τελεστικός ενισχυτής (operational amplifier ή op-amp), ο τελεστικός ενισχυτής διαγωγιμότητας (operational transconductance amplifier ή OTA) και ο ενισχυτής οργανολογίας (Instrumentation amplifier).

Οι ενισχυτές αυτοί είναι ενισχυτές συνεχούς σύζευξης και επομένως, δύνανται να ενισχύσουν και το συνεχές. Έτσι, η περιοχή των μεσαίων συχνοτήτων, γι' αυτούς, περιλαμβάνει και την περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων. Τα σύμβολα και τα ισοδύναμα κυκλώματα των ενισχυτών αυτών απεικονίζονται στα σχήματα. Από το ισοδύναμο κύκλωμα του σχήματος προκύπτει ότι, το σήμα στην έξοδο του ενισχυτή δίνεται από τη σχέση,

$$v_o = A[v(+)-v(-)]$$

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, θα μπορούσε να πει κανείς ότι, αν η ίδια τάση [$v(+)=v(-)$] εφαρμοζόταν στους δύο ακροδέκτες εισόδου, τότε, η έξοδος θα ήταν μηδενική. Σήματα, που είναι κοινά στις δύο εισόδους διαφορικού ενισχυτή, ονομάζονται σήματα κοινού τρόπου (common mode signals), ενώ, σήματα, που εμφανίζονται με διαφορά φάσης 180°, ονομάζονται διαφορικά σήματα, (differential signals)



Η ικανότητα του διαφορικού ενισχυτή να απορρίπτει σήματα κοινού τρόπου ονομάζεται απόρριψη κοινού τρόπου, (common mode rejection). Σε πραγματικούς ενισχυτές, ωστόσο, η έξοδος δεν ανταποκρίνεται μόνο σε διαφορικά σήματα αλλά και στη μέση στάθμη των σημάτων κοινού τρόπου. Επομένως, το σήμα εξόδου διαφορικού ενισχυτή θα δίνεται από τη σχέση,

$$v_o = A_d v_d + v_c = A_{cm} v_c$$

όπου,

$$v_d = v(+)-v(-) \quad \text{και} \quad v_c = \frac{v(+)+v(-)}{2}$$

Μέτρο της ποιότητας των διαφορικών ενισχυτών αποτελεί ο λόγος της διαφορικής ενίσχυσης προς την ενίσχυση κοινού τρόπου, δηλαδή,

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}}$$

που αναφέρεται ως λόγος απόρριψης σημάτων κοινού τρόπου, (Common Mode Rejection Ratio).

Η σημασία της απόρριψης σημάτων κοινού τρόπου, από διαφορικούς ενισχυτές, είναι τεράστια σε εφαρμογές, όπου υπάρχει ανάγκη ενίσχυσης μικρών σημάτων, που είναι κυριολεκτικά "θαμμένα" σε θόρυβο.

Τέτοιες περιπτώσεις συναντά κανείς, όταν υπάρχει ανάγκη ενίσχυσης σημάτων αισθητήρων, όπως π.χ. σε βιοϊατρικές εφαρμογές για ενίσχυση βιοσημάτων, καθώς και σε σεισμολογικές και άλλες εφαρμογές, όπου σήματα μεταδίδονται μέσω καλωδίων σε μεγάλες αποστάσεις.

Σ' αυτές τις περιπτώσεις ο θόρυβος και οι πάσης φύσεως ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, επί των σημάτων, εμφανίζονται ως σήματα κοινού τρόπου. Η απόρριψη

αυτών από τον διαφορικό ενισχυτή έχει ως συνέπεια τη βελτίωση του λόγου σήματος προς θόρυβο στην έξοδο του ενισχυτή.

4.3.2 Διαφορικός ενισχυτής τάσης με MOS τρανζίστορ

Ένα από τα πλέον χρήσιμα κυκλώματα διαφορικών ενισχυτών είναι ο διαφορικός ενισχυτής τάσης, (voltage differential amplifier). Στο δεικνύεται η βασική δομή ενός διαφορικού ενισχυτή με MOS τρανζίστορ. Πρόκειται για έναν σύνθετο συμμετρικό ενισχυτή, που αποτελείται από δύο όμοιες βαθμίδες κοινής πηγής, (source coupled pair), με συμμετρική τροφοδοσία συνεχούς.

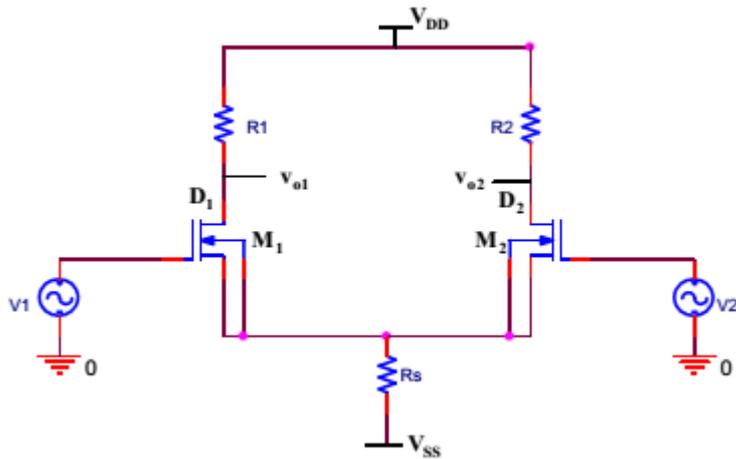
Ο ενισχυτής αυτός μπορεί να λειτουργήσει είτε με απλή είτε με διπλή πηγή σήματος εισόδου και να παράσχει απλή ή διαφορική έξοδο.

Τα πλεονεκτήματα ενός διαφορικού MOS ενισχυτή τάσης είναι:

- Υψηλή διαφορική ενίσχυση τάσης
- Λειτουργία ως ενισχυτή διαγωγιμότητας
- Απόρριψη σημάτων κοινού τρόπου
- Ενίσχυση συνεχούς
- Μεγάλη αντίσταση εισόδου
- Δυνατότητα διαφορικής εξόδου
- Καταλληλότητα δομής για ολοκληρωμένο κύκλωμα

Μέσα από μια απλή διαδικασία ανάλυσης, θα γνωρίσουμε τους διάφορους τρόπους λειτουργίας του διαφορικού ενισχυτή τάσης, ώστε να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε τις δυνατότητές του.

Το ισοδύναμο κύκλωμα στο εναλλασσόμενο του διαφορικού ενισχυτή του παραπάνω σχήματος δεικνύεται στο σχήμα, όπου, χάριν απλούστευσης της ανάλυσης, δεν έχει ληφθεί υπόψη η αντίσταση εξόδου r_o των τρανζίστορ.



Οι βασικές σχέσεις που περιγράφουν το ισοδύναμο κύκλωμα είναι:

$$\begin{aligned}
 v_s &= g_m v_{gs1} R_s + g_m v_{gs2} R_s \\
 v_s &= g_m R_s (v_{gs1} + v_{gs2}) \\
 v_s &= g_m R_s (v_1 - v_s + v_2 - v_s) \\
 v_s &= \frac{g_m R_s}{1 + 2g_m R_s} (v_1 + v_2)
 \end{aligned}$$

Διακρίνουμε δύο τρόπους λειτουργίας:

- α) όταν τα δυο σήματα εισόδου είναι ίσα και αντίθετα ως προς τη φάση, οπότε αναφερόμαστε σε διαφορικό τρόπο λειτουργίας και
- β) όταν τα δυο σήματα εισόδου είναι ίσα κατά μέγεθος και φάση, οπότε αναφερόμαστε σε λειτουργία κοινού τρόπου.

Διαφορικός τρόπος λειτουργίας

$$v_1 = -v_2$$

Επομένως σύμφωνα με την παραπάνω

$$v_s = 0$$

Αυτό σημαίνει ότι, κατά τον διαφορικό τρόπο λειτουργίας του ενισχυτή ο κοινός κόμβος των δύο πηγών S των τρανζίστορ συμπεριφέρεται, για το εναλλασσόμενο μόνον, ως εικονική γη, (virtual earth).

Η τάση εξόδου στον κόμβο D1 προκύπτει ως

$$v_{o1} = -g_m v_{gs1} R_1$$

$$v_{o1} = -g_m (v_1 - v_2) R_1$$

$$v_{o1} = -(g_m R_1) v_1$$

Ομοίως προκύπτει,

$$v_{o2} = -(g_m R_2) v_2$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι,

$$v_1 = -v_2 \text{ και } R_1 = R_2 = R_D,$$

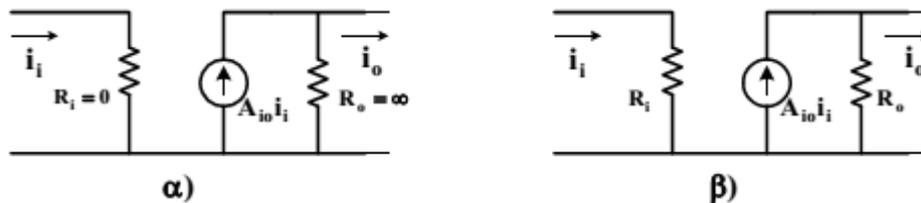
προκύπτει,

$$v_{o2} = -v_{o1} = (g_m R_D) v_1$$

που σημαίνει ότι, στις δύο εξόδους του ενισχυτή εμφανίζονται δύο ίσα και αντίθετα ενισχυμένα σήματα. Επομένως, από τον ενισχυτή είναι δυνατόν να υπάρξει απλή ή διαφορική έξοδος.

4.3.3 Ενισχυτές ρεύματος – Καθρέφτης ρεύματος

Με τον όρο ενισχυτές ρεύματος εννοούμε ενισχυτικές βαθμίδες, οι οποίες στην είσοδό τους διεγείρονται από ρεύμα και στην έξοδό τους παράγουν ρεύμα. Λειτουργούν, δηλαδή, ως πηγές ρεύματος στην έξοδο, που ελέγχονται από το ρεύμα εισόδου, (Current Controlled Current Sources, CCCS). Αυτό σημαίνει ότι, η αντίσταση εισόδου των ενισχυτών είναι μικρή, (σχετικά με την εσωτερική αντίσταση της πηγής σήματος, που τους τροφοδοτεί), και η αντίσταση εξόδου τους είναι πολύ μεγάλη, (σχετικά με την αντίσταση φορτίου), όπως δεικνύεται στο σχήμα.



Οι ενισχυτές ρεύματος χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην επεξεργασία σημάτων. Για το σκοπό αυτό, η απαιτούμενη ενίσχυση ρεύματος είναι, συνήθως, μικρότερη του δέκα και υπάρχουν πολλές εφαρμογές, όπου η ενίσχυση ρεύματος δεν ξεπερνά το δύο.

Η χαμηλή ενίσχυση ρεύματος επιτρέπει στους ενισχυτές ρεύματος να λειτουργούν σε πολύ υψηλότερες συχνότητες, συγκρινόμενοι με τους ενισχυτές τάσης. Άλλο χαρακτηριστικό των ενισχυτών ρεύματος είναι ότι, συνήθως, δεν χρησιμοποιούν ολική ανατροφοδότηση σήματος.

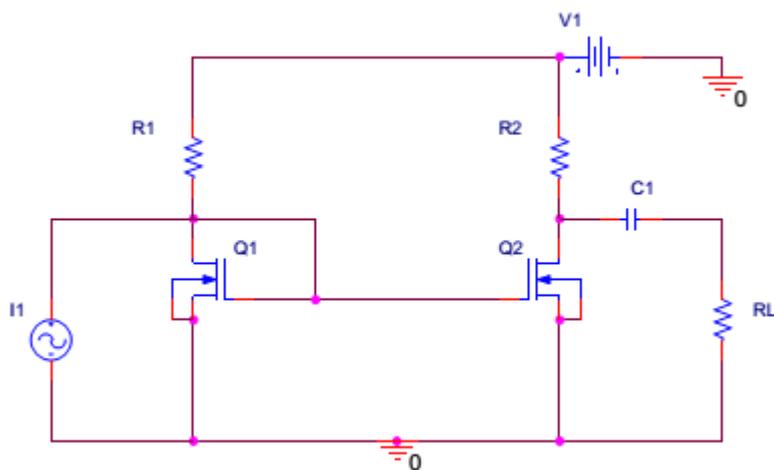
Η δομή των ενισχυτών ρεύματος είναι, γενικώς, απλή γι' αυτό και προσφέρονται για κατασκευή σε ολοκληρωμένη μορφή. Στο σχήμα δεικνύεται η τοπολογία ενός απλού ενισχυτή ρεύματος.

Στον ενισχυτή αυτόν, το τρανζίστορ Q1, που λειτουργεί ως δίοδος, λόγω του ότι ο απαγωγός συνδέεται με την πύλη, χρησιμοποιείται για την πόλωση του ενισχυτικού τρανζίστορ Q2. Εάν δεχθούμε ότι, τα δύο τρανζίστορ είναι απολύτως ίδια, τότε, επειδή η τάση VGS στα δύο τρανζίστορ είναι ίδια, τα ρεύματα ID1 και ID2 στα δύο τρανζίστορ είναι, περίπου, ίδια.

Γι' αυτόν τον λόγο, λέμε ότι το ρεύμα απαγωγού του ενός τρανζίστορ καθρεπτίζεται στο άλλο τρανζίστορ και η τοπολογία του σχήματος αναφέρεται ως καθρέφτης ρεύματος. Υπάρχουν στη βιβλιογραφία αρκετές τοπολογίες διαφορετικών καθρεφτών ρεύματος.

Αν ο λόγος των διαστάσεων W/L του Q2 είναι πολλαπλάσιος αυτού του Q1, τότε και το ID2 είναι πολλαπλάσιο του ID1. Οι σχέσεις αυτές των συνεχών ρευμάτων ισχύουν, περίπου και για τα εναλλασσόμενα ρεύματα.

Για το λόγο αυτό, το κύκλωμα του σχήματος μπορεί να λειτουργήσει ως ενισχυτής ρεύματος, στον οποίο η ενίσχυση ρεύματος θα καθορίζεται από τις γεωμετρικές διαστάσεις των δυο τρανζίστορ.



Περίληψη

- Το MOS τρανζίστορ είναι ένα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου.
- Όταν είναι πολωμένο στην περιοχή κόρου, λειτουργεί ως πηγή ρεύματος ελεγχόμενη από την τάση εισόδου.
- Λειτουργεί ικανοποιητικά και ως διακόπτης, όταν πολώνεται εκτός της περιοχής κόρου.
- Είναι βαθμίδα χαμηλής ισχύος και γι' αυτό τα ρεύματα πόλωσης είναι κατά πολύ μικρότερα απ' ό τι σε BJTs.
- Κατασκευαστικά καταλαμβάνει χώρο περίπου το 20% ενός BJT αντίστοιχων δυνατοτήτων. Η τεχνολογία κατασκευής του σε ολοκληρωμένη μορφή προσφέρεται και για την κατασκευή συμπληρωματικών τρανζίστορ CMOS (Complementary MOS), και είναι συμβατή με την BJT τεχνολογία, BiCMOS, (Bipolar CMOS).
- Σχεδιαστική παράμετρος ολοκληρωμένων MOS κυκλωμάτων είναι ο λόγος W/L των διαστάσεων των τρανζίστορ.
- Η ανάλυση MOS κυκλωμάτων ακολουθεί τον κλασσικό τρόπο ανάλυσης BJT κυκλωμάτων.
- Λόγω του ότι, το MOS είναι τρανζίστορ μονωμένης εισόδου, καθίσταται απλούστερη τη διασύνδεση διαδοχικών MOS βαθμίδων, απλοποιείται η ανάλυση και, τελικά, γίνεται απλούστερος ο σχεδιασμός MOS κυκλωμάτων, συγκριτικά με BJT κυκλώματα.
- Η CMOS τεχνολογία υστερεί έναντι της BJT τεχνολογίας ως προς την ανώτερη συχνότητα λειτουργίας των κυκλωμάτων.

Βιβλιογραφία

<http://vavel.noc.teithe.gr/~dpapakos/analog/BDHD/FET.htm>

http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/D3_Hmiagogoi3.pdf

http://www.ee.teihal.gr/labs/electronics/web/downloads/theory/12_FET.pdf

<http://cgi.di.uoa.gr/~arapogia/ile9.pdf>

http://www.electronics.teipir.gr/personalpages/papageorgas/download/Electronics/FET_slides.pdf

http://www.lib.ntua.gr/gr/el_sources/ebooks/kagiafas/chapter6.pdf

http://www.ee.teihal.gr/labs/electronics/web/downloads/Genika_hlektronika_kef04.pdf

<http://www.csd.uoc.gr/~hy422/2008s/mos-transistor.pdf>

<https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TME243/LESSON-03.pdf>

<http://alexander.ee.auth.gr:8083/eTHMMY/archive/83/downloadFile/1541/02-FET-eisagogi.pdf>