



Στο τέλος

αυτού του κεφαλαίου

ο μαθητής θα πρέπει να

- Έχει κατανοήσει τη δομή και αρχή λειτουργίας του διπολικού τρανζίστορ
- Γνωρίζει τις βασικές συνδεσμολογίες των τρανζίστορ και να κατανοεί τις χαρακτηριστικές ρεύματος βάσης και συλλέκτη
- Γνωρίζει τη σημασία του ισοδύναμου κυκλώματος
- Διαβάζει και να κατανοεί τα τεχνικά φυλλάδια των κατασκευαστών
- Μπορεί να υπολογίζει την πώλωση ενός τρανζίστορ, σε ένα κύκλωμα, και να προσδιορίζει το σημείο λειτουργίας του πάνω στην ευθεία φόρτου
- Χρησιμοποιεί το ισοδύναμο κύκλωμα σε κυκλώματα ενισχυτών με συνδεσμολογία κοινού εκπομπού και να υπολογίζει την απολαβή
- Έχει κατανοήσει τη δομή και αρχή λειτουργίας του τρανζίστρο εγκαρσίου πεδίου επαφής (JFET)
- Γνωρίζει τις χαρακτηριστικές παραμέτρους και τις χαρακτηριστικές ρεύματος απαγωγού
- Γνωρίζει το ισοδύναμο κύκλωμα και να διαβάζει και κατανοεί τα τεχνικά φυλλάδια των κατασκευαστών
- Έχει κατανοήσει τη δομή και αρχή λειτουργίας του MOSFET και να ξεχωρίζει το MOSFET αραίωσης από το MOSFET πύκνωσης
- Γνωρίζει τις χαρακτηριστικές παραμέτρους και τις χαρακτηριστικές ρεύματος απαγωγού
- Γνωρίζει το ισοδύναμο κύκλωμα και να διαβάζει και κατανοεί τα τεχνικά φυλλάδια των κατασκευαστών
- Χρησιμοποιεί το ισοδύναμο κύκλωμα σε κυκλώματα ενισχυτών με συνδεσμολογία κοινής πηγής και να υπολογίζει την απολαβή

4

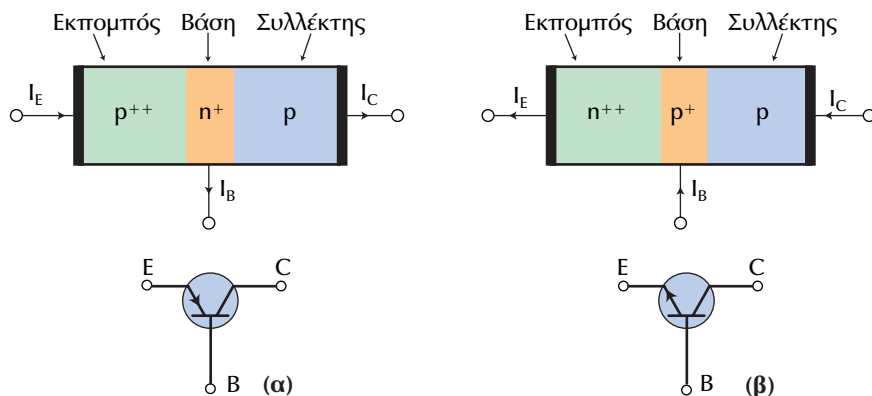
ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ

4.1 Δομή και αρχή λειτουργίας του τρανζίστορ

4.1.1 Δομή του τρανζίστορ

Το τρανζίστορ είναι ένας κρύσταλλος με τρεις περιοχές εμπλουτισμένες με προσμίξεις. Ανάλογα με τον τρόπο εμπλουτισμού, τα τρανζίστορ διακρίνονται σε δύο τύπους, το PNP και το NPN (σχ. 4.1.1α και β αντίστοιχα), όπου η σειρά των γραμμάτων εκφράζει τον τύπο του ημιαγωγού κάθε περιοχής.



Σχήμα 4.1.1 Δομή και κυκλωματικό σύμβολο ενός τρανζίστορ (α) PNP και (β) ενός NPN

Οι τρεις περιοχές ενός τρανζίστορ ονομάζονται, ανάλογα με τη λειτουργία τους, **εκπομπός** (emitter), **βάση** (base) και **συλλέκτης** (collector). Ο εκπομπός είναι μια έντονα εμπλουτισμένη περιοχή, στο σχ.4.1.1 αυτό τονίζεται με δύο [+ +]. Προορισμός του είναι να εκπέμπει φορτία προς τη βάση. Η βάση είναι μια περιοχή λιγότερο εμπλουτισμένη, στο σχ.4.1.1 αυτό τονίζεται με ένα [+], και είναι πολύ λεπτή. Το λεπτό πάχος της βάσης επιτρέπει στα περισσότερα φορτία, τα οποία εκπέμπονται από τον εκπομπό, να φθάνουν στο συλλέκτη όπου και συλλέγονται. Το επίπεδο εμπλουτισμού του συλλέκτη είναι χαμηλότερο από αυτό του εκπομπού και από αυτό της βάσης. Επιπλέον, επειδή στο συλλέκτη καταναλώνεται μεγαλύτερη ισχύς, από ότι στη βάση και τον εκπομπό, η περιοχή την οποία καταλαμβάνει ο συλλέκτης είναι μεγαλύτερη.

Σε κάθε τρανζίστορ σχηματοποιούνται **δύο δίοδοι**, μια μεταξύ βάσης και εκπομπού και μια μεταξύ βάσης και συλλέκτη. Γι' αυτό το λόγο ένα τρανζίστορ μοιάζει σαν να αποτελείται από δύο δίοδους συνδεδεμένες

σε αντίθετη φορά. Επειδή στη συνέχεια θα χρειασθεί να γίνει αρκετές φορές αναφορά σε αυτές τις διόδους, από εδώ και πέρα θα αποκαλούνται για λόγους συντομίας: **δίοδος ή επαφή εκπομπού** (η πρώτη) και **δίοδος ή επαφή συλλέκτη** (η δεύτερη).

Στο σχήμα 4.1.1 παρουσιάζονται, όπως προαναφέρθηκε, οι δύο δυνατές δομικές περιπτώσεις ενός τρανζίστορ. Το τρανζίστορ PNP είναι το συμπληρωματικό του τρανζίστορ NPN, επειδή οι φορείς πλειονότητας στον εκπομπό και συλλέκτη του πρώτου είναι οπές, ενώ του δευτέρου ηλεκτρόνια. Αυτό συνεπάγεται, ότι κατά τη λειτουργία του PNP τα ρεύματα και οι πολώσεις έχουν αντίθετη φορά με τα ρεύματα και τις πολώσεις του NPN (σχ.4.1.1). Η μελέτη που θα ακολουθήσει, για να αποφευχθεί οποιαδήποτε σύγχυση, θα εστιαστεί στο τρανζίστορ τύπου NPN.

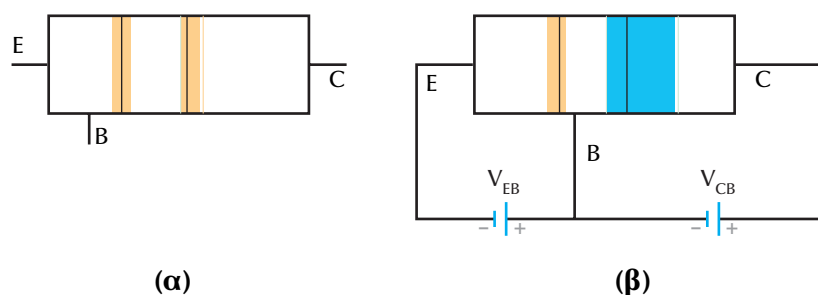
Το κυκλωματικό σύμβολο ενός τρανζίστορ PNP και ενός NPN δίδονται στο σχ.4.1.1α και β αντίστοιχα. Το βέλος βρίσκεται πάντα στον εκπομπό και δείχνει τη συμβατική φορά του ηλεκτρικού ρεύματος. Η φορά του βέλους δείχνει επίσης τον N-τύπου ημιαγωγό. Έτσι, στο σχ.4.1.1α (PNP) το βέλος δείχνει προς τη βάση, η οποία είναι N-τύπου, ενώ στο σχ.4.1.1β (NPN) το βέλος δείχνει προς τον εκπομπό, ο οποίος είναι πάλι N-τύπου.

Όταν δεν εφαρμόζεται πόλωση σε ένα τρανζίστορ NPN, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του εκπομπού διαχέονται προς τη βάση και μέρος των οπών της βάσης προς τον εκπομπό. Το ίδιο συμβαίνει και με τα ηλεκτρόνια του συλλέκτη και με μέρος των οπών της βάσης. Έτσι δημιουργείται μια περιοχή φορτίων χώρου (απογύμνωσης) σε κάθε επαφή, δηλαδή στην επαφή εκπομπού και την επαφή του συλλέκτη. Κατά μήκος κάθε επαφής αναπτύσσεται **ένα φράγμα δυναμικού**, το οποίο στους **23°C** έχει τιμή **0,3 V** αν ο ημιαγωγός είναι **γερμάνιο** και **0,7 V** αν είναι **πυρίτιο**. Τα τρανζίστορ γερμανίου έχουν πολύ περιορισμένες εφαρμογές, σε αντίθεση με τα τρανζίστορ πυριτίου, των οποίων η χρήση είναι ευρύτερη. Αυτό οφείλεται στο ότι τα τρανζίστορ πυριτίου έχουν ευρύτερα όρια τάσης και ρεύματος και τα χαρακτηριστικά τους εξαρτώνται λιγότερο από τη θερμοκρασία από ό,τι τα αντίστοιχα των τρανζίστορ γερμανίου. Γι' αυτό το λόγο, στη συνέχεια θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στα τρανζίστορ πυριτίου.

Επειδή οι τρεις περιοχές έχουν διαφορετικά επίπεδα εμπλουτισμού οι περιοχές φορτίου χώρου εκτείνονται σε διαφορετικό βάθος σε κάθε μια. Έτσι, στον εκπομπό απαντάται μικρότερο εύρος περιοχής φορτίου χώρου από ότι στη βάση (δίοδο εκπομπού) ενώ μικρότερο εύρος περιοχής

φορτίου χώρου συναντάται στη βάση από ότι στο συλλέκτη (δίοδος συλλέκτη) (σχ.4.1.2α).

Όπως προαναφέρθηκε ο προορισμός του εκπομπού είναι να εκπέμπει φορτία προς τη βάση. Για να είναι αυτό εφικτό, πρέπει η δίοδος εκπομπού να είναι ορθά πολωμένη. Επιπλέον, για να είναι δυνατή η συλλογή φορτίων από τον συλλέκτη, πρέπει η δίοδος συλλέκτη να είναι ανάστροφα πολωμένη, όπως συμβαίνει στις περισσότερες εφαρμογές.



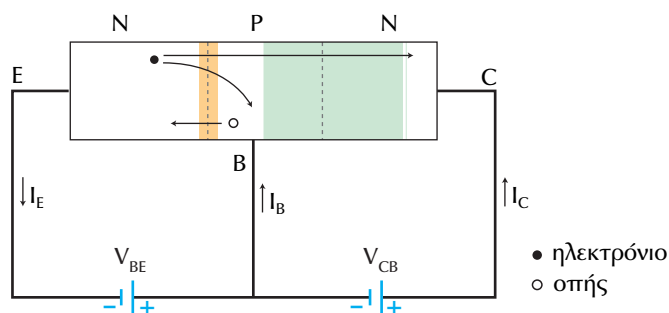
Σχήμα 4.1.2 Περιοχές φορτίου χώρου σε τρανζίστορ NPN (α) χωρίς πόλωση και (β) με πόλωση

Στο σχήμα 4.1.2β παρουσιάζεται ένα τρανζίστορ στο οποίο έχει εφαρμοστεί πόλωση. Όπως βλέπουμε, σε ένα πολωμένο τρανζίστορ το εύρος της περιοχής φορτίου χώρου του εκπομπού ελαττώνεται, συγκριτικά με αυτό χωρίς πόλωση, ενώ το εύρος της περιοχής φορτίου χώρου του συλλέκτη αυξάνεται.

4.1.2 Αρχή λειτουργίας του τρανζίστορ

Η λειτουργία ενός τρανζίστορ, στην απλουστευμένη προσέγγιση της, βασίζεται στην εκπομπή φορέων από τον εκπομπού και τη συλλογή τους από το συλλέκτη. Για να γίνει αυτό καλύτερα κατανοητό, θα εξετάσουμε ένα τρανζίστορ τύπου NPN (σχ.4.1.3), όπου θα χρησιμοποιήσουμε τη συμβατική φορά των ρευμάτων. Αρχικά θεωρούμε, ότι η δίοδος εκπομπού είναι ορθά πολωμένη. Όταν η τάση βάσης-εκπομπού (V_{BE}) είναι μικρότερη από 0,7 V (για τρανζίστορ πυριτίου) δεν διέρχεται πρακτικά ρεύμα από τη βάση προς τον εκπομπού. Αν η τάση βάσης-εκπομπού ξεπεράσει τα 0,7 V θα υπάρξει αισθητή ροή ελευθέρων ηλεκτρονίων από τον εκπομπού προς τη βάση και ελεύθερων οπών από τη βάση προς τον εκπομπού.

Η βάση, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα ημιαγωγού τύπου-P, το οποίο είναι λιγότερο εμπλουτισμένο από ότι ο εκπομπός. Εξ' άλλου η επαφή του συλλέκτη, όπως φαίνεται στο σχ.4.1.3, είναι ανάστροφα πολωμένη και περιορίζει σημαντικά το εύρος της βάσης. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού των ηλεκτρονίων τα οποία δε θα παραμείνουν στο χώρο της βάσης, αλλά θα εισέλθουν στο χώρο της επαφής του συλλέκτη. Το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή φορτίου χώρου του συλλέκτη έχει τέτοια φορά, ώστε να ωθεί τα ηλεκτρόνια τα οποία έχουν εισέλθει προς τον συλλέκτη. Στη συνέχεια αυτά τα ηλεκτρόνια συλλέγονται από την επαφή του συλλέκτη και δίδουν το ρεύμα συλλέκτη (I_C). Θα πρέπει να μη ξεχνάμε ότι υπάρχει και το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης της διόδου συλλέκτη, το οποίο είναι πολύ μικρό και σε αυτή τη φάση θα το θεωρήσουμε αμελητέο.



Σχήμα 4.1.3 Πόλωση του τρανζίστορ και ροή των ελευθέρων ηλεκτρονίων και οπών

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, τα οποία παραμένουν στο χώρο της βάσης, μαζί με τις ελεύθερες οπές, οι οποίες εισέρχονται στην περιοχή του εκπομπού, δίνουν το ρεύμα βάσης (I_B). Επειδή το ρεύμα αυτό προκύπτει από αλληλεξουδετέρωση ελευθέρων ηλεκτρονίων με ελεύθερες οπές, ονομάζεται και **ρεύμα επανασύνδεσης** (recombination current) στα τρανζίστορ **διπολικά** (bipolar ή BJT).

Στα περισσότερα τρανζίστορ, περισσότερο από το 95% των φορτίων, που εκπέμπονται από τον εκπομπό, φθάνουν στο συλλέκτη και λιγότερο από το 5% παραμένουν στη βάση και συμβάλλουν στο ρεύμα της βάσης.

Για τη λειτουργία των τρανζίστορ ο αναγνώστης πρέπει να θυμάται τα εξής:

1. Σε κανονική λειτουργία η επαφή εκπομπού είναι πάντα ορθά πολωμένη και η επαφή συλλέκτη είναι ανάστροφα πολωμένη. Υπάρχουν κάποιες ειδικές περιπτώσεις, όπου η επαφή συλλέκτη είναι ορθά πολωμένη.
2. Το ρεύμα συλλέκτη είναι περίπου ίσο με το ρεύμα του εκπομπού
3. Το ρεύμα βάσης είναι πολύ μικρό.

Θεωρώντας το τρανζίστορ ως κόμβο διαπιστώνουμε, από τον πρώτο νόμο του Kirchhoff, ότι το ρεύμα εκπομπού είναι ίσο με το άθροισμα των ρευμάτων βάσης και συλλέκτη

$$I_E = I_B + I_C \quad 4.1.1$$

Το ποσοστό των ελεύθερων φορέων του εκπομπού, το οποίο φτάνει στο συλλέκτη και δίνει το ρεύμα συλλέκτη εκφράζεται από το **συντελεστή α_{DC}** (DC άλφα), ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο του ρεύματος του συλλέκτη προς το ρεύμα του εκπομπού

$$\alpha_{DC} = \frac{I_C}{I_E} \quad 4.1.2$$

Το α_{DC} είναι αδιάστατο μέγεθος, δηλαδή «καθαρός» αριθμός. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής α_{DC} τόσο περισσότερα ηλεκτρόνια φθάνουν στο συλλέκτη και τόσο μικρότερο είναι το ρεύμα της βάσης. Το ρεύμα της βάσης μπορεί να ελαττωθεί αν η βάση γίνει λεπτότερη και μειωθεί ο εμπλουτισμός της. Βέβαια το α_{DC} δεν μπορεί να γίνει ίσο με τη μονάδα διότι στο ρεύμα της βάσης συνεισφέρουν και οι ελεύθερες οπές της βάσης, στα τρανζίστορ τύπου NPN, και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της βάσης, στα τρανζίστορ τύπου PNP. Αυτή η συνεισφορά έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος βάσης χωρίς όμως και αντίστοιχη αύξηση του ρεύματος συλλέκτη.

Εάν σε ένα τρανζίστορ αυξηθεί η τάση της διόδου εκπομπού του θα αυξηθεί το ρεύμα βάσης I_B και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος συλλέκτη I_C . Πειραματικά διαπιστώνεται, ότι υπάρχει σχέση (αναλογία) μεταξύ ρεύματος βάσης και ρεύματος συλλέκτη. Γι' αυτό το λόγο υπάρχει δυνατότητα ελέγχου του ρεύματος συλλέκτη μέσω του ρεύματος βάσης. Επειδή το ρεύμα βάσης είναι μικρό ενώ το ρεύμα του συλλέκτη μεγάλο, ορίζεται ένας συντελεστής ο οποίος ονομάζεται **DC**

απολαβή ρεύματος β_{DC} , ως το πηλίκο του ρεύματος συλλέκτη προς το ρεύμα βάσης.

$$\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B} \quad 4.1.3$$

Το β_{DC} είναι αδιάστατο μέγεθος, δηλαδή «καθαρός» αριθμός. Ο συντελεστής β_{DC} δηλώνει πόσες φορές μεγαλύτερο ρεύμα μπορούμε να ελέγξουμε στο κύκλωμα του συλλέκτη μέσω ενός μικρού ρεύματος στο κύκλωμα της βάσης. Για δεδομένο ρεύμα βάσης I_B , το ρεύμα συλλέκτη προκύπτει από τη σχέση

$$I_C = \beta_{DC} \cdot I_B \quad 4.1.4$$

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη χρησιμοποίηση της εξ.4.1.4. Η παραπάνω εξίσωση ισχύει μόνο όταν το κύκλωμα του συλλέκτη επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος ίσου ή μεγαλύτερου από εκείνο, το οποίο προκύπτει από την εξ.4.1.4. Αν το κύκλωμα του συλλέκτη επιτρέπει τη διέλευση μικρότερων ρευμάτων, τότε το αποτέλεσμα που εξάγουμε χρησιμοποιώντας την εξ. 4.1.4 δεν είναι εφαρμόσιμο για το κύκλωμα μας. Γενικά το β_{DC} δείχνει στην πράξη την αποτελεσματικότητα του ελέγχου του ρεύματος συλλέκτη.

Από τις εξ.4.1.1. – 4.1.3 προκύπτει, ότι η σχέση η οποία συνδέει τα δύο μεγέθη β_{DC} και α_{DC} είναι:

$$\alpha_{DC} = \frac{\beta_{DC}}{1 + \beta_{DC}} \quad 4.1.5$$

ή

$$\beta_{DC} = \frac{\alpha_{DC}}{1 - \alpha_{DC}} \quad 4.1.6$$

Ο συντελεστής β_{DC} , για τρανζίστορ χαμηλής ισχύος, έχει τιμές οι οποίες κυμαίνονται από 100 έως 300. Για τρανζίστορ ισχύος οι τιμές του κυμαίνονται από 30 έως 150. Από την εξ. 4.1.6 συμπεραίνεται ότι όσο περισσότερο το α_{DC} προσεγγίζει τη μονάδα τόσο αυξάνεται το β_{DC} . Συνεπώς οι μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αύξηση του α_{DC} επιτυγχάνουν και την ταυτόχρονη αύξηση του β_{DC} .

Ελεύθερο ανάγνωσμα:

Για την περαιτέρω ελάττωση της συνεισφοράς των ελεύθερων φορέων της περιοχής της βάσης στο ρεύμα της βάσης, και συνεπώς για την αύξηση του συντελεστή άλφα, η σημερινή τεχνολογία έχει καταφύγει στη χρήση διαφορετικών ημιαγωγών για τον εκπομπό και τη βάση. Τα τρανζίστορ αυτά ονομάζονται **διπολικά τρανζίστορ ετεροεπαφής** (heterojunction bipolar transistor). Έτσι χρησιμοποιούνται σύνθετοι ημιαγωγοί όπως τα στερεά διαλύματα πυριτίου-γερμανίου (SiGe) ή αρσενικούχου γαλλίου-αργιλίου (AlGaAs). Προς το παρόν, αυτά τα τρανζίστορ έχουν σχετικά περιορισμένες εφαρμογές.

Επειδή στη βάση εισχωρούν δύο περιοχές φορτίου χώρου, της διόδου του εκπομπού και της διόδου του συλλέκτη, τα ελεύθερα φορτία της, ηλεκτρόνια στο σχ.4.1.3, περιορίζονται σε ένα πολύ λεπτό κανάλι. Η αντίσταση αυτού του καναλιού λέγεται **κατανεμημένη αντίσταση r_b** , και παίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του τρανζίστορ σε υψηλές συχνότητες. Επίσης σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του τρανζίστορ σε υψηλές συχνότητες παίζουν το μήκος διαδρομής των φορτίων στο κανάλι της βάσης και οι παρασιτικές χωρητικότητες των διόδων συλλέκτη και εκπομπού.

Παράδειγμα 4.1.1

Σε ένα τρανζίστορ μετράμε ρεύμα συλλέκτη $I_C = 8,15 \text{ mA}$ και ρεύμα εκπομπού $I_E = 8,20 \text{ mA}$. Να υπολογιστεί το ρεύμα βάσης και οι συντελεστές α_{DC} και β_{DC} .

Λύση

Η εξ. 4.1.1 δίνει

$$I_B = I_E - I_C$$

Άρα

$$I_B = 8,2 \text{ mA} - 8,15 \text{ mA} = 0,05 \text{ mA}$$

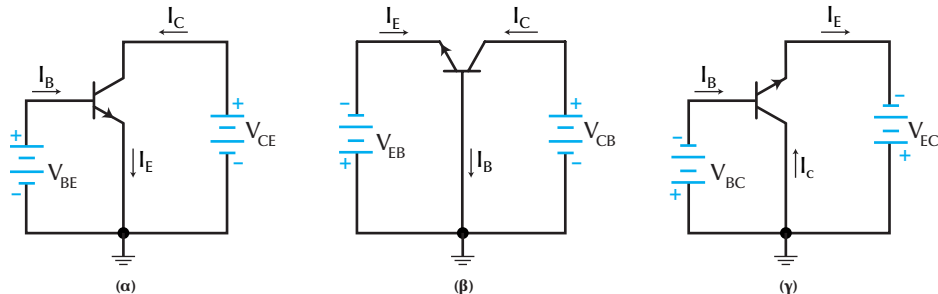
Βάσει των εξ. 4.1.2 και 4.1.3, Ο συντελεστής α_{DC} θα είναι

$$\alpha_{DC} = \frac{I_C}{I_E} = \frac{8,15 \text{ mA}}{8,20 \text{ mA}} = 0,994$$

και ο συντελεστής β_{DC} θα είναι

$$\beta_{DC} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{8,15 \text{ mA}}{0,05 \text{ mA}} = 163$$

4.2 Βασικές συνδεσμολογίες τρανζίστορ



Σχήμα 4.2.1 Βασικές συνδεσμολογίες τρανζίστορ (α) κοινού εκπομπού (CE), (β) κοινής βάσης (CB) και (γ) κοινού συλλέκτη (CC)

Στην απλούστερη περίπτωση, για την πόλωση ενός τρανζίστορ απαιτούνται δύο πηγές τάσης, μια για το βρόχο ορθής πόλωσης της διόδου του εκπομπού και μια για την ανάστροφη πόλωση του βρόχου της διόδου του συλλέκτη (σχήμα 4.1.3). Επειδή στη συνδεσμολογία αυτή η βάση είναι το κοινό σημείο σύνδεσης των δύο βρόχων η συνδεσμολογία ονομάζεται **συνδεσμολογία κοινής βάσης** (Common Base). Η συνδεσμολογία κοινής βάσης περιγράφεται συντομα ως CB ή KB και παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2.1β, όπου, για να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση, η βάση έχει γειωθεί. Οι πηγές χαρακτηρίζονται με δείκτες από το κοινό ηλεκτρόδιο και τον ακροδέκτη στον οποίο συνδέονται. Έτσι έχουμε τις V_{EB} και V_{CB} , οι οποίες συνδέονται μεταξύ βάσης και εκπομπού και συλλέκτη αντίστοιχα.

Μια άλλη περίπτωση σύνδεσης των πηγών είναι όταν οι βρόχοι έχουν ως κοινό τον εκπομπό. Αυτή η συνδεσμολογία ονομάζεται **συνδεσμολογία κοινού εκπομπού** (Common Emitter, CE ή KE) και παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2.1α. Οι αντίστοιχες πηγές συμβολίζονται ως V_{BE} και V_{CE} .

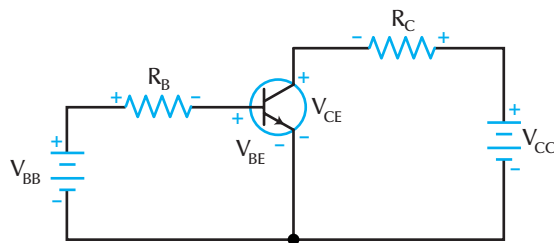
Στην τρίτη περίπτωση ανήκει η **συνδεσμολογία κοινού συλλέκτη** (Common Collector, CC ή ΚΣ), στην οποία οι δύο βρόχοι έχουν ως κοινό σημείο τους το συλλέκτη. Η συνδεσμολογία αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 4.2.1γ, οι δε πηγές συμβολίζονται ως V_{BC} και V_{EC} .

Σε όλες τις συνδεσμολογίες θα πρέπει να δοθεί **ιδιαίτερη προσοχή** στο ότι, τουλάχιστον στα αναλογικά ηλεκτρονικά, η **δίοδος εκπομπού** πρέπει να είναι πάντα **ορθά πολωμένη**. Επιπλέον, θα πρέπει η **δίοδος συλλέκτη** να είναι **ανάστροφα πολωμένη**.

4.2.1 Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

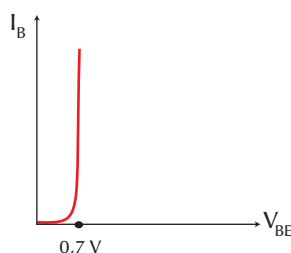
Η μεταβολή της συνδεσμολογίας ενός τρανζίστορ από κοινή βάση σε κοινό εκπομπό ή κοινό συλλέκτη, δεν μεταβάλλει την εσωτερική του λειτουργία. Τα ρεύματα και στις τρεις περιπτώσεις διατηρούν τις φορές και τα μέτρα τους, αρκεί να τηρηθούν τα όσα προαναφέρθηκαν.

Στο σχήμα 4.2.2 παρουσιάζεται συνδεσμολογία κοινού εκπομπού. Σε αυτό το κύκλωμα υπάρχει η πηγή V_{BB} για τροφοδοσία του βρόχου της διόδου βάσης και η πηγή V_{CC} για τροφοδοσία του βρόχου της διόδου συλλέκτη. Η πηγή V_{BB} πρέπει να πολώνει ορθά τη δίοδο εκπομπού και η V_{CC} τη δίοδο συλλέκτη. Οι αντιστάσεις R_B και R_C χρησιμεύουν για τον περιορισμό των ρευμάτων σε κάθε βρόχο. Μεταξύ των ακροδεκτών εμφανίζονται οι τάσεις βάσης-εκπομπού V_{BE} και συλλέκτη-εκπομπού V_{CE} .



Σχήμα 4.2.2 Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

Η **χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος βάσης** και τάσης βάσης-εκπομπού λαμβάνεται όταν μεταβάλλεται η V_{BB} και μετράται το I_B . Η χαρακτηριστική ρεύματος βάσης μοιάζει με την αντίστοιχη χαρακτηριστική οποιασδήποτε διόδου διότι μεταξύ βάσης και εκπομπού σχηματίζεται το ισοδύναμο μιας απλής διόδου. Η δίοδος αρχίζει να άγει όταν η τάση στα



Σχήμα 4.2.3 Χαρακτηριστική ρεύματος βάσης

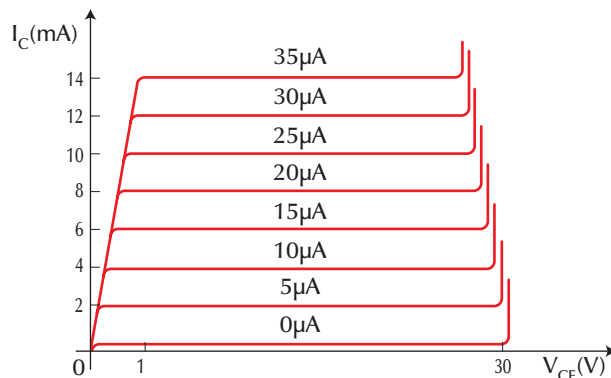
άκρα της (V_{BE}) υπερβεί τα 0,7 V, για τρανζίστορ πυριτίου (σχ.4.2.3), και ο έλεγχος αυτού του γεγονότος χρησιμοποιείται πολύ συχνά ως πρώτη διαπίστωση της ομαλής λειτουργίας ενός τρανζίστορ.

Επειδή το ρεύμα βάσης αυξάνεται απότομα για $V_{BE} > 0,7$ V, θεωρούμε, όπως και στην επαφή PN, ότι η τάση μεταξύ βάσης εκπομπού παραμένει σταθερή, σε τιμή $V_{BE} = 0,7$ V, όταν η δίοδος εκπομπού άγει.

Από το βρόχο βάσης, μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της εξίσωσης

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} \quad 4.2.1$$

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες συλλέκτη λαμβάνονται, όταν μεταβάλλεται η V_{CC} και μετράται το ρεύμα συλλέκτη I_C διατηρώντας σταθερό το ρεύμα βάσης I_B σε όλη τη διάρκεια της μέτρησης. Επειδή το ρεύμα βάσης αποτελεί μεταβλητή παράμετρο, το αποτέλεσμα είναι να έχουμε σμήνος καμπυλών (σχ 4.2.4) και κάθε χαρακτηριστική καμπύλη να αντιστοιχεί σε μια τιμή του I_B , η οποία και αναγράφεται πάνω από την αντίστοιχη καμπύλη.



Σχήμα 4.2.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες συλλέκτη

Κάθε χαρακτηριστική ρεύματος συλλέκτη, για μη μηδενικό ρεύμα βάσης, παρουσιάζει τα εξής γενικά χαρακτηριστικά:

- Όταν η τάση συλλέκτη-εκπομπού είναι μηδέν ($V_{CE}=0$ V), η δίοδος συλλέκτη δεν είναι ανάστροφα πολωμένη και το ρεύμα συλλέκτη είναι και αυτό μηδέν ($I_C=0$ mA).
- Για τιμές τάσης συλλέκτη-εκπομπού μεταξύ 0V και περίπου 1 V, το

ρεύμα συλλέκτη αυξάνεται απότομα και στη συνέχεια αποκτά σχεδόν σταθερή τιμή. Η συμπεριφορά αυτή σχετίζεται άμεσα με την ανάστροφη πόλωση της διόδου συλλέκτη.

- Για τιμές τάσης συλλέκτη-εκπομπού μεγαλύτερες του 1 V το ρεύμα συλλέκτη παραμένει πρακτικά σταθερό και δεν εξαρτάται από την τάση συλλέκτη εκπομπού. Σε αυτή την περιοχή το τρανζίστορ συμπεριφέρεται πλέον ως πηγή σταθερού ρεύματος.

- Όταν η τάση συλλέκτη εκπομπού υπερβεί κάποια τιμή, στη συγκεκριμένη περίπτωση του σχ. 4.2.4 τα 30 V, το ρεύμα του συλλέκτη αυξάνεται απότομα. Αυτό οφείλεται στην διάσπαση της διόδου συλλέκτη με αποτέλεσμα η διάταξη να παύει να λειτουργεί ως τρανζίστορ. Η τιμή της τάσης συλλέκτη-εκπομπού για την οποία καταρρέει η διάσπαση συλλέκτη αναφέρεται στα τεχνικά φυλλάδια ως **τάση διάσπασης συλλέκτη-εκπομπού**.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος συλλέκτη ενός τρανζίστορ καθορίζουν τέσσερις περιοχές στις οποίες η λειτουργία του τρανζίστορ παρουσιάζει σημαντικές διαφορές από τη μια στην άλλη..

Περιοχές λειτουργίας τρανζίστορ

- Η πρώτη περιοχή είναι η περιοχή μικρών τάσεων V_{CE} στην οποία το ρεύμα συλλέκτη αυξάνεται απότομα (τάση συλλέκτη-εκπομπού μεταξύ 0 V και περίπου 1 V, σχ. 4.2.4). Αυτή η απότομα κεκλιμένη περιοχή της καμπύλης καλείται **περιοχή κόρου** (saturation region). Σε αυτή την περιοχή η διάσπαση συλλέκτη δεν είναι ανάστροφα πολωμένη και η τάση συλλέκτη-εκπομπού συμβολίζεται ως V_{CESAT} .

- Η δεύτερη περιοχή είναι αυτή η οποία αντιστοιχεί σε τάση συλλέκτη μεταξύ 1 V και 30 V (σχ.4.2.4). Σε αυτή την περιοχή η διάσπαση εκπομπού είναι ορθά πολωμένη, ενώ η διάσπαση συλλέκτη είναι ανάστροφα πολωμένη. Σε αυτή την περιοχή, που είναι η πλέον σημαντική, το ρεύμα συλλέκτη καθορίζεται μόνο από το ρεύμα βάσης. Αυτή αντιπροσωπεύει την περιοχή κανονικής λειτουργίας της διάταξης και γι' αυτό ονομάζεται **ενεργός περιοχή** (active region). Στην περιοχή αυτή η διάταξη συμπεριφέρεται ως πηγή ρεύματος ($I_C = \beta_{DC} \cdot I_B$).

- Η τρίτη περιοχή είναι αυτή, στην οποία η τάση συλλέκτη έχει υπερβεί την τάση διάσπασης συλλέκτη-εκπομπού. Στην περιοχή αυτή, όπως προαναφέρθηκε, η διάταξη παύει να λειτουργεί ως τρανζίστορ και ονομάζεται **περιοχή διάσπασης** (breakdown region).

• Τέλος, υπάρχει και η χαρακτηριστική η οποία αντιστοιχεί σε ρεύμα βάσης μηδέν. Σε αυτή το ρεύμα συλλέκτη είναι πολύ μικρό αλλά όχι μηδενικό. Η απόκλιση αυτή από την εξ.4.1.4 οφείλεται στο ότι το τρανζίστορ δεν είναι ιδανική συσκευή, οι δίοδοι του είναι πραγματικές και συνεπώς υπάρχουν ρεύματα διαρροής. Αυτή η χαρακτηριστική ρεύματος συλλέκτη καθορίζει το **ρεύμα αποκοπής συλλέκτη** (collector cutoff current, I_{ce0} , που προκύπτει από θερμικά παραγόμενους φορείς και διαρροές). Η περιοχή η οποία καθορίζεται από αυτή τη χαρακτηριστική ονομάζεται **περιοχή αποκοπής** (cutoff region).

Το τρανζίστορ διαρρέεται από ένα όχι μηδαμινό ρεύμα συλλέκτη και στα άκρα του αναπτύσσεται μια τάση V_{CE} η οποία μπορεί να είναι σημαντική. Γι' αυτό το λόγο η ισχύς την οποία καταναλώνει μπορεί να είναι σημαντική και δεν πρέπει να υπερβαίνει τη μέγιστη τιμή την οποία δίνει ο κατασκευαστής στα τεχνικά φυλλάδια. Η ισχύς η οποία καταναλώνεται σε ένα τρανζίστορ δίδεται από τη σχέση

$$P_D = V_{CE} \cdot I_C$$

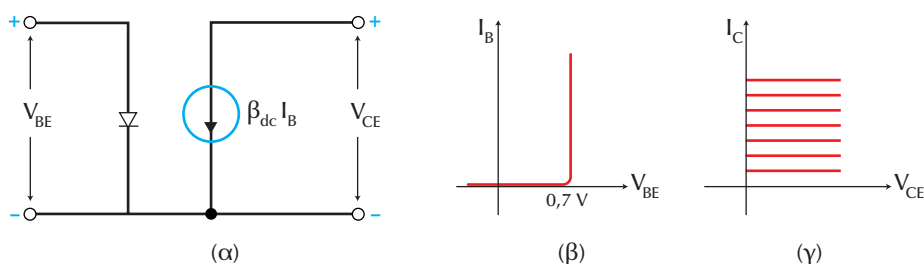
4.2.2

Ο ακριβής υπολογισμός θα έπρεπε να συμπεριλάβει και την ισχύ η οποία καταναλώνεται στο τρανζίστορ από το ρεύμα του βρόχου βάσης. Λόγω όμως της μικρής πτώσης τάσης στη δίοδο εκπομπού ($\sim 0,7$ V) και του πολύ μικρού ρεύματος βάσης, η ισχύς αυτή είναι πολύ μικρή και θεωρηθείται αμελητέα.

4.2.2 Ισοδύναμο κύκλωμα

Η ανάλυση και ο σχεδιασμός των κυκλωμάτων με τρανζίστορ απαιτούν τη γνώση των χαρακτηριστικών τους καθώς και την κατανόηση της συμπεριφοράς των τρανζίστορ σε ένα κύκλωμα. Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς και την ευκολότερη υπολογιστική αντιμετώπιση ενός τρανζίστορ σε ένα κύκλωμα, χρησιμοποιείται το ισοδύναμο κύκλωμα του. Το **ισοδύναμο κύκλωμα** ενός τρανζίστορ, όπως έγινε με τη δίοδο στο κεφ.3, προσεγγίζει τη συμπεριφορά της διάταξης στο κύκλωμα. Είναι προφανές, ότι ένα απλό ισοδύναμο κύκλωμα καλύπτει ικανοποιητικά τις απλές λειτουργίες της διάταξης κυκλώματος. Όσο αυξάνονται οι απαιτήσεις, δηλαδή όσο περισσότερο θέλουμε το ισοδύ-

ναμο κύκλωμα να προσεγγίζει την πραγματική λειτουργία της διάταξης (π.χ. την απόκριση σε χαμηλές και υψηλές συχνότητες, το θόρυβο καθώς και τη μεταβατική συμπεριφορά) τόσο ποιο πολύπλοκο είναι το ισοδύναμο κύκλωμα του τρανζίστορ.



Σχήμα 4.2.5 (α) Ισοδύναμο κύκλωμα ενός τρανζίστορ και οι ιδανικές χαρακτηριστικές ρεύματος, (β) βάσης και (γ) συλλέκτη

Η απλούστερη προσέγγιση ενός τρανζίστορ, η οποία καλύπτει τουλάχιστον ένα μέρος από τις χαρακτηριστικές της προηγούμενης παραγράφου, παρουσιάζεται στο σχ.4.2.5α. Το κύκλωμα αυτό περιλαμβάνει τη δίοδο εκπομπού και την πηγή ρεύματος συλλέκτη.

Η ισοδύναμη δίοδος βάσης παρουσιάζει συμπεριφορά όμοια με αυτή του ισοδύναμου κυκλώματος της διόδου που είδαμε στο Κεφ.3, δηλαδή αρχίζει να άγει όταν η τάση βάσης-εκπομπού υπερβεί τα 0,7 V και το ρεύμα αυξάνει εντελώς απότομα, όπως φαίνεται στο σχ 4.2.5β. Αυτή η συμπεριφορά εξυπηρετεί το σχεδιαστή όταν αναλύει ένα κύκλωμα στο συνεχές, μιας και κατά γενικό κανόνα δεχόμαστε ότι η τάση μεταξύ βάσης και εκπομπού είναι $V_{BE} = 0,7 \text{ V}$.

Η ισοδύναμη πηγή ρεύματος συλλέκτη προσεγγίζεται με τη βοήθεια των ιδανικών χαρακτηριστικών του σχ. 4.2.5γ. Αυτές απεικονίζουν ικανοποιητικά την περιοχή αποκοπής και την ενεργό περιοχή λειτουργίας του τρανζίστορ, δεν καλύπτουν όμως την περιοχή κόρου και την περιοχή διάσπασης. Είναι προφανές, πάντως, ότι αυτές οι τελευταίες περιοχές λειτουργίας δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον. Όντως στην περιοχή διάσπασης η διάταξη δε λειτουργεί ως τρανζίστορ. Επίσης, στην περιοχή κόρου το ρεύμα συλλέκτη δεν ελέγχεται από το ρεύμα βάσης. Άρα, αν ληφθεί υπόψη ότι η τάση συλλέκτη-εκπομπού είναι πολύ μικρή, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μια πηγή ρεύματος συλλέκτη με τις χαρακτηριστικές του σχ.4.2.5 περιγράφει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του τρανζίστορ.

Παράδειγμα 4.2.1

Αν στο σχ. 4.2.2 έχουμε $V_{BB}=15\text{ V}$, $V_{CC}=15\text{ V}$, $R_B=470\text{ K}\Omega$ και $R_C=3,3\text{ K}\Omega$ να υπολογίσετε το ρεύμα βάσης, το ρεύμα συλλέκτη και την τάση συλλέκτη-εκπομπού, με δεδομένο ότι το $\beta_{DC}=100$.

Λύση

Χρησιμοποιούμε το ισοδύναμο κύκλωμα του σχ. 4.2.5. Με τη βοήθεια της εξ.4.2.1. υπολογίζουμε το ρεύμα βάσης:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{15\text{ V} - 0,7\text{ V}}{470\text{K}\Omega} = \frac{14,3\text{V}}{4,7 \times 10^5\Omega} = 30,4\mu\text{A}$$

Το ρεύμα συλλέκτη δίνεται από την εξ.4.1.4

$$I_C = \beta_{DC} \cdot I_B = 100 \times 30,4\mu\text{A} = 3,04\text{mA}$$

Η τάση συλλέκτη-εκπομπού θα υπολογιστεί από το βρόχο συλλέκτη, που δίνει

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 15\text{V} - (3,04\text{mA}) \times (3,3\text{K}\Omega) = 15\text{V} - 10,3\text{V} = 4,97\text{V}$$

Η τελευταία τιμή επιβεβαιώνει, ότι το τρανζίστορ λειτουργεί στην ενεργό περιοχή.

4.2.3 Ανάγνωση τεχνικών χαρακτηριστικών

Στο τεχνικό φυλλάδιο των κατασκευαστών αναφέρεται ο κωδικός αριθμός και ο τύπος του τρανζίστορ. Στη συνέχεια αναφέρονται κάποιες βασικές εφαρμογές για τις οποίες έχει κατασκευαστεί η διάταξη, π.χ. οι ενισχυτές υψηλής συχνότητας, ταλαντωτές και μεταλλάκτες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι απόλυτες μέγιστες εκτιμήσεις, οι οποίες αναφέρονται συνήθως σε θερμοκρασία 25°C , εκτός αν επισημαίνεται αλλιώς. Αυτές αποτελούν φραγμό για τις εφαρμογές στις οποίες κάποιος σχεδιαστής ή συντηρητής έχει την πρόθεση να χρησιμοποιήσει το συγκεκριμένο τρανζίστορ. Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή σε αυτό το σημείο διότι ο κατασκευαστής δε φέρει ευθύνη για τη λειτουργία της διάταξης όταν γίνεται εκτός αυτών των ορίων. Επιπλέον, ο αναγνώστης πρέπει να έχει υπόψη, ότι από ένα σύνολο τρανζίστορ, π. χ. τύπου

2N3904 –μπορεί μερικά, ο αριθμός των οποίων είναι πολύ μικρός– να λειτουργούν πέραν αυτών των ορίων. Αυτό όμως, δεν αποτελεί γενίκευση του κανόνα για τυχαία επιλογή. Οι απόλυτες μέγιστες εκτιμήσεις σε ότι αφορά τις τάσεις διάσπασης δίνονται από τα μεγέθη:

V_{CB}	: τάση διάσπασης διόδου συλλέκτη-βάσης	(π.χ. 60 V)
V_{CEO}	: τάση διάσπασης συλλέκτη-εκπομπού με τη βάση ανοικτή	(π.χ. 40 V)
V_{EB}	: τάση διάσπασης διόδου βάσης-εκπομπού	(π.χ. 6 V)

Σε ότι αφορά το μέγιστο ρεύμα και καταναλισκόμενη ισχύ δίνονται από τα μεγέθη:

I_C	: μέγιστο ρεύμα συλλέκτη για θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_A)
P_{DA}	: μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς για θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_A)
P_{DC}	: μέγιστη καταναλισκόμενη ισχύς για θερμοκρασία κελύφους (T_C)

Ο συντελεστής στο DC απολαβή ρεύματος, β_{DC} , συναντάται και με άλλη μορφή μια και, αντί του β , οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν τις h (υβριδικές παραμέτρους) (h parameters). Έτσι στα τεχνικά φυλλάδια το β_{DC} συναντάται ως h_{FE} . Στην πράξη, η DC απολαβή ρεύματος δεν παραμένει σταθερή με το ρεύμα συλλέκτη. Γι' αυτό οι κατασκευαστές δίνουν τιμές του h_{FE} για διάφορες τιμές του ρεύματος συλλέκτη. Στη συνέχεια απεικονίζεται ο τύπος του κελύφους με τους ακροδέκτες και ακολουθούν τα λεγόμενα στατικά (static) και τα δυναμικά (dynamic) χαρακτηριστικά.

Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η 4.2

- Το τρανζίστορ αποτελείται από τρεις στρώσεις ημιαγωγού διαφορετικού τύπου (NPN ή PNP) και με διαφορετικό επίπεδο εμπλουτισμού.
- Στη λειτουργία των τρανζίστορ τα οποία εξετάζουμε συμμετέχουν και **ηλεκτρόνια** και **οπές** και γι' αυτό λέγονται διπολικά
- Για να λειτουργήσει κανονικά ένα τρανζίστορ η **δίοδος εκπομπού** πρέπει να πολωθεί **ορθά**, ενώ η **δίοδος συλλέκτη ανάστροφα**
- Ο συντελεστής α_{DC} εκφράζει το ποσοστό των φορτίων που εκπέμπο-

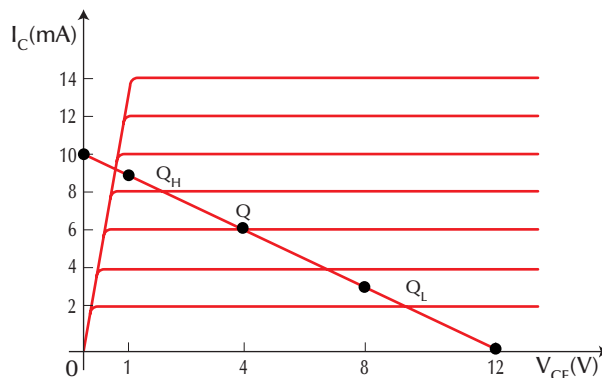
νται από τον εκπομπό και φθάνουν στο συλλέκτη. Ο α_{DC} είναι πάντα μικρότερος της μονάδας.

- Ο συντελεστής DC απολαβή ρεύματος β_{DC} δηλώνει πόσες φορές μεγαλύτερο ρεύμα είναι δυνατόν να ελέγξουμε στο κύκλωμα του συλλέκτη μέσω του ρεύματος βάσης.
- Οι βασικές συνδεσμολογίες ενός τρανζίστορ είναι τρεις και καθορίζονται από το όνομα του ακροδέκτη ο οποίος είναι κοινός. Αυτές είναι η συνδεσμολογία **κοινού εκπομπού (CE)**, η συνδεσμολογία **κοινής βάσης (CB)** και η συνδεσμολογία **κοινού συλλέκτη (CC)**.
- Στη λειτουργία ενός τρανζίστορ διακρίνονται **τέσσερις περιοχές**, η περιοχή κόρου, η ενεργός περιοχή, η περιοχή αποκοπής και η περιοχή διάσπασης.

4.3 Πλώσεις του τρανζίστορ

Βασική προϋπόθεση για τη λειτουργία ενός τρανζίστορ στην ενεργό περιοχή αποτελεί η εφαρμογή ορθής πόλωσης στη δίοδο εκπομπού και ανάστροφης πόλωσης στη δίοδο συλλέκτη. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού απαιτείται η εφαρμογή κατάλληλων τάσεων μεταξύ των ακροδεκτών βάσης-εκπομπού (V_{BE}) και συλλέκτη-εκπομπού (V_{CE}). Στο σχ. 4.2.2 χρησιμοποιήθηκαν δύο εξωτερικές πηγές οι V_{BB} και V_{CC} και τα ρεύματα σε κάθε βρόχο περιορίστηκαν με τη βοήθεια των αντιστάσεων R_B και R_C . Η χρησιμοποίηση δύο πηγών για την πόλωση ενός τρανζίστορ χαρακτηρίζεται με τον όρο άμεση πόλωση βάσης και είναι ο απλούστερος, όχι όμως και ο πλέον συμφέρων τρόπος πόλωσης της συνδεσμολογίας CE. Πριν εξεταστούν άλλοι αποδοτικότεροι τρόποι πόλωσης θα προσδιοριστεί και θα μελετηθεί το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ στη συνδεσμολογία CE.

Για να προσδιοριστεί το σημείο λειτουργίας του τρανζίστορ μεταβάλλουμε την τάση της πηγής V_{BB} και την αντίσταση R_B στο κύκλωμα του σχ.4.2.2. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του ρεύματος συλλέκτη I_C και συνεπώς τη μεταβολή της τάσης συλλέκτη-εκπομπού V_{CE} . Το σύνολο των ζευγών (I_C, V_{CE}) ορίζει, στο διάγραμμα των χαρακτηριστικών ρεύματος συλλέκτη, την **DC ευθεία φόρτου**.



Σχήμα 4.3.1 Ευθεία φόρτου και επιλογές σημείου λειτουργίας του τρανζίστορ

Το επιθυμητό σημείο λειτουργίας Q ενός τρανζίστορ στο συνεχές ορίζεται από το ζεύγος (I_C, V_{CE}) πάνω στην ευθεία φόρτου.

Όταν λειτουργεί ένα τρανζίστορ και μεταβάλλεται το ρεύμα βάσης το σημείο λειτουργίας Q αλλάζει συνεχώς θέση κινούμενο πάνω στην ευθεία φόρτου, ικανοποιώντας τις σχέσεις:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$

$$I_C = \beta_{DC} \cdot I_B$$

Όταν το ρεύμα βάσης αυξάνεται το σημείο Q μετακινείται προς τα αριστερά και πλησιάζει την περιοχή κόρου ενώ όταν το ρεύμα βάσης ελαττώνεται, το σημείο Q κινείται προς τα δεξιά και πλησιάζει την περιοχή αποκοπής. Επειδή απαιτείται το τρανζίστορ να λειτουργεί στην ενεργό περιοχή, το σημείο λειτουργίας Q δεν πρέπει να εισέρχεται στην περιοχή κόρου ή την περιοχή αποκοπής. Έτσι, πάνω στην ευθεία φόρτου ορίζεται κατ' εκτίμηση ένα ακραίο σημείο Q_H , το οποίο αντιστοιχεί σε υψηλό ρεύμα συλλέκτη και ένα άλλο ακραίο σημείο Q_L , το οποίο αντιστοιχεί σε χαμηλό ρεύμα συλλέκτη (βλέπε σχ.4.3.1).

Ο καθορισμός των **στοιχείων λειτουργίας** ενός τρανζίστορ μπορεί να γίνει εύκολα ακολουθώντας τις παρακάτω απλές επιλογές:

- Προσδιορισμός της ευθείας φόρτου από τις συντεταγμένες $\left(\frac{V_{CC}}{R_C}, 0\right)$ και $(0, V_{CC})$, θεωρώντας, ότι η τάση κόρου συλλέκτη-εκπομπού είναι πρακτικά μηδέν

- Εκτίμηση των θέσεων Q_H και Q_L
- Τοποθέτηση του σημείου λειτουργίας (ηρεμίας) Q στο μέσο της απόστασης Q_H και Q_L
- Προσδιορισμός των (I_C, V_{CE}) από τη χαρακτηριστική ρεύματος συλλέκτη
- Υπολογισμός του ρεύματος βάσης μέσω του β_{DC} και
- Επιλογή των V_{BB} και R_B έτσι ώστε η βάση να διαρέεται από το απαιτούμενο ρεύμα

Ένα σημαντικό πρόβλημα το οποίο συναντάται στα διπολικά τρανζίστορ είναι, ότι το β_{DC} ποικίλλει από τρανζίστορ σε τρανζίστορ. Έτσι συναντώνται διακυμάνσεις με λόγο έως και 3:1 στον ίδιο τύπο τρανζίστορ, με αποτέλεσμα η παραπάνω μέθοδος να είναι δύσκολο να εφαρμοστεί. Επιπλέον, η διάδος εκπομπού παρουσιάζει τα ίδια θερμικά προβλήματα με όλες τις κοινές διόδους, δηλαδή σε ορθή πόλωση η τάση στα άκρα της ελαττώνεται κατά περίπου $2,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Το τελευταίο έχει ως αποτέλεσμα μια συνεχή αύξηση του ρεύματος βάσης και κατά συνέπεια του ρεύματος συλλέκτη όταν αυξάνεται η θερμοκρασία. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η ολίσθηση του σημείου Q προς τα δεξιά (σχ. 4.3.1) με τελική κατάληξη στην περιοχή κόρου. Όταν ελαττώνεται η θερμοκρασία, η πορεία του Q είναι αντίθετη με τελική κατάληξη στην περιοχή αποκοπής.

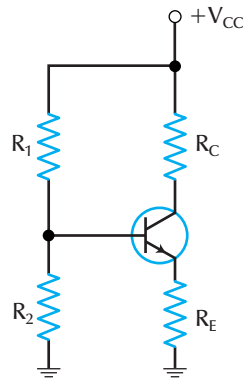
Τα προβλήματα αυτά, καθώς και η επιθυμία για μείωση του αριθμού των πηγών αντιμετωπίζονται με το κύκλωμα του σχ.4.3.2, το οποίο ονομάζεται **πόλωση με διαιρέτη τάσης**.

Η συνδεσμολογία πόλωσης του σχ.4.3.2 μειώνει το αριθμό των πηγών από δύο σε μια. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του διαιρέτη τάσης με τις αντιστάσεις R_1 και R_2 . Επιπλέον, η αντίσταση R_E η οποία παρεμβάλλεται στο κύκλωμα του εκπομπού κάνει το κύκλωμα ανεξάρτητο του β_{DC} του τρανζίστορ και μειώνει σημαντικά τη θερμική ολίσθηση.

Σε ότι αφορά τη χάραξη και εκμετάλλευση της ευθείας φόρτου, το κύκλωμα με διαιρέτη τάσης διαφοροποιείται και οι συντεταγμένες λειτουργίας του προσδιορίζονται ως εξής:

$$\left(\frac{V_{CC}}{R_C + R_E}, 0 \right) \text{ και } (0, V_{CC})$$

και το σημείο λειτουργία μέσω των εξής απλών βημάτων:



Σχήμα 4.3.2 Πόλωση με διαιρέτη τάσης και αντίσταση στον εκπομπό

α. Υπολογισμός της τάσης βάσης μέσω του διαιρέτη τάσης:

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} \quad 4.3.1$$

β. Υπολογισμός της τάσης εκπομπού ($V_{BE} = 0,7$ V για τρανζίστορ πυριτίου):

$$V_E = V_B - V_{BE} \quad 4.3.2$$

γ. Υπολογισμός ρεύματος εκπομπού:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} \quad 4.3.3$$

δ. Υπολογισμός ρεύματος συλλέκτη θεωρώντας, ότι το ρεύμα συλλέκτη είναι πρακτικά ίσο με το ρεύμα εκπομπού:

$$I_C \approx I_E \quad 4.3.4$$

ε. Υπολογισμός τάσης συλλέκτη:

$$V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C \quad 4.3.5$$

στ. Υπολογισμός της τάσης συλλέκτη εκπομπού V_{CE} :

$$V_{CE} = V_C - V_E \quad 4.3.6$$

Όπως παρατηρούμε το β_{DC} , δεν εμφανίζεται στους υπολογισμούς με αποτέλεσμα αυτή η συνδεσμολογία να είναι ανεξάρτητη του β_{DC} . Το χρειάζεται μόνο αν θέλουμε να υπολογίσουμε το ρεύμα βάσης I_B .

Παράδειγμα 4.3.1

Στο κύκλωμα του σχ.4.3.2 δίδονται $V_{CC}=20\text{ V}$, $R_1=82\text{ K}\Omega$, $R_2=18\text{ K}\Omega$, $R_E=1\text{ K}\Omega$ και $R_C=2,2\text{ K}\Omega$. Να υπολογίσετε τα ρεύματα και τις τάσεις στους κόμβους του κυκλώματος αν $\beta_{DC}=100$.

Λύση

Ακολουθώντας τα βήματα της προηγούμενης παραγράφου υπολογίζουμε την τάση βάσης,

$$\begin{aligned}V_B &= \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} = \frac{18\text{K}\Omega}{82\text{K}\Omega + 18\text{K}\Omega} \times 20\text{V} = \\ &= \frac{18}{100} \times 20\text{V} = 0,18 \times 20\text{V} = 3,6\text{V}\end{aligned}$$

την τάση εκπομπού,

$$V_E = V_B - V_{BE} = 3,6\text{V} - 0,7\text{V} = 2,9\text{V}$$

το ρεύμα εκπομπού,

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{2,9\text{V}}{1\text{K}\Omega} = 2,9\text{mA}$$

το ρεύμα συλλέκτη,

$$I_C \approx I_E = 2,9\text{mA}$$

την τάση συλλέκτη,

$$V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C = 20\text{V} - (2,9\text{mA}) \times (2,2\text{K}\Omega) = 20\text{V} - 6,38\text{V} = 13,62\text{V}$$

την τάση συλλέκτη-εκπομπού,

$$V_{CE} = V_C - V_E = 13,62\text{V} - 2,9\text{V} = 10,72\text{V}$$

και το ρεύμα βάσης,

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_{DC}} = \frac{2,9\text{mA}}{100} = 29\mu\text{A}$$

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 4.3

- Η **ευθεία φόρτου** χαράσσεται στις χαρακτηριστικές (I_C , V_{CE}) ενός τρανζίστορ
- Η **ευθεία φόρτου** καθορίζει το σύνολο των τιμών τις οποίες λαμβάνει το ρεύμα συλλέκτη και η τάση συλλέκτη-εκπομπού ενός τρανζίστορ.
- Το **σημείο λειτουργίας Q** ενός τρανζίστορ ορίζεται επάνω στην ευθεία φόρτου επί της οποίας και κινείται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του
- Προβλήματα, όπως η διασπορά του β_{DC} , η ολίσθηση του σημείου λειτουργίας με τη θερμοκρασία και η μείωση του αριθμού των πηγών επιλύονται με την **πόλωση με διαιρέτη τάσης**

4.4 Κύκλωμα ενισχυτή με τρανζίστορ

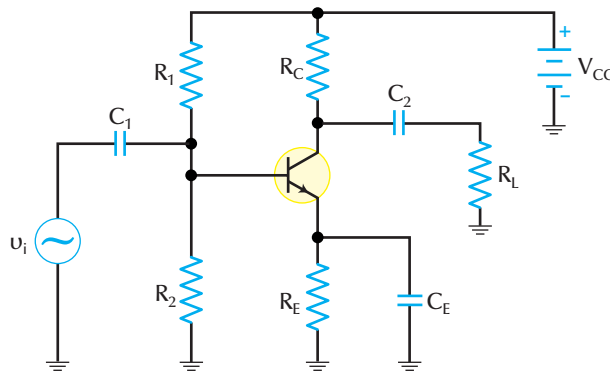
4.4.1 Κύκλωμα ενισχυτή τρανζίστορ με κοινό εκπομπό

Το κύκλωμα ενός ενισχυτή με κοινό εκπομπό παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4.1. Το κύκλωμα αποτελεί έναν ενισχυτή σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού διότι, σε ότι αφορά τη ροή σήματος και τους βρόχους εναλλασσομένου, το ηλεκτρόδιο του εκπομπού είναι κοινό, μέσω της άμεσης ή έμμεσης (με πυκνωτή) σύνδεσης του στη γη. Για να γίνει εύκολα κατανοητή η λειτουργία του ενισχυτή θεωρούμε, ότι η σύνθετη αντίσταση των πυκνωτών είναι πολύ μικρή, δηλαδή ότι συμπεριφέρονται ως βραχυκύκλωμα για το εναλλασσόμενο και ως ανοικτό κύκλωμα για το συνεχές. Θεωρούμε επίσης, ότι η πηγή εισαγωγής εναλλασσόμενης τάσης (γεννήτρια σήματος) έχει μηδενική εσωτερική αντίσταση.

Το σήμα V_i εφαρμόζεται μεταξύ βάσης του τρανζίστορ και γης. Η σύνδεση γίνεται μέσω του πυκνωτή C_1 . Η παρεμβολή του πυκνωτή είναι απαραίτητη για να μην αλλοιωθεί η συνεχής συνιστώσα της τάσης (V_B) της βάσης.

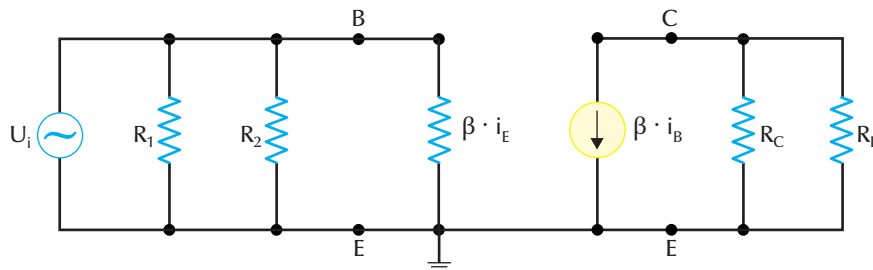
Ο εκπομπός «γειώνεται» για το εναλλασσόμενο σήμα μέσω του C_E και έτσι επιτυγχάνεται η συνδεσμολογία CE για το εναλλασσόμενο. Η εναλλασσόμενη συνιστώσα της τάσης συλλέκτη μεταφέρεται ακέραια στην αντίσταση φόρτου χωρίς να υπάρξει αλλοίωση του σημείου λειτουργίας Q του συλλέκτη από την παρουσία της R_L . Οι πυκνωτές C_1 και C_2 ονομάζονται πυκνωτές σύζευξης, διότι μέσω αυτών γίνεται η σύζευξη μεταξύ

γεννήτριας σήματος και ενισχυτή καθώς και ενισχυτή και φόρτου. Ο πυκνωτής C_E , επειδή γειώνει τον εκπομπό για το εναλλασσόμενο, ονομάζεται πυκνωτής απόζευξης ή διαρροής.



Σχήμα 4.4.1 Ενισχυτής με τρανζίστορ σε συνδεσμολογία CE

Η ανάλυση στο συνεχές έχει παρουσιαστεί στην προηγούμενη παράγραφο. Όσο αφορά την ανάλυση στο εναλλασσόμενο, το ισοδύναμο κύκλωμα παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4.2



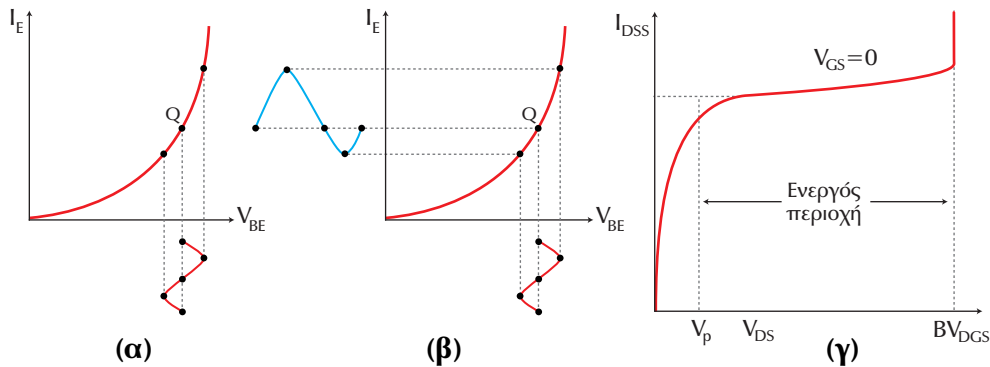
Σχήμα 4.4.2 Το AC ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή του σχ.4.4.1

Παρατηρούμε, ότι το ισοδύναμο κύκλωμα έχει προκύψει από εκείνο του σχ.4.2.5 όπου η δίοδος έχει αντικατασταθεί με την ισοδύναμη αντίσταση της $\beta \cdot r_e$, όπου η αντίσταση r_e δίδεται από την,

$$r_e = \frac{26\text{mV}}{I_C} \quad 4.4.1$$

Το ρεύμα I_C είναι σε mA και το αποτέλεσμα (r_e) σε Ω .

Η r_e προκύπτει από την προσέγγιση χαμηλού σήματος η οποία φαίνεται στη χαρακτηριστική εισόδου του σχ.4.4.3. Για το εναλλασσόμενο δεν χρησιμοποιείται πλέον το β_{DC} αλλά το β , το οποίο καλείται AC απολαβή ρεύματος του τρανζίστορ και ορίζεται ως το πηλίκο της μεταβολής ρεύματος συλλέκτη προς τη μεταβολή ρεύματος βάσης.



Σχήμα 4.4.3 Χαρακτηριστική εισόδου του ενισχυτή: (α) AC τάση που εφαρμόζεται μεταξύ βάσης και εκπομπού, (β) το ρεύμα που δημιουργείται στον εκπομπό και (γ) υπολογισμός της r_e

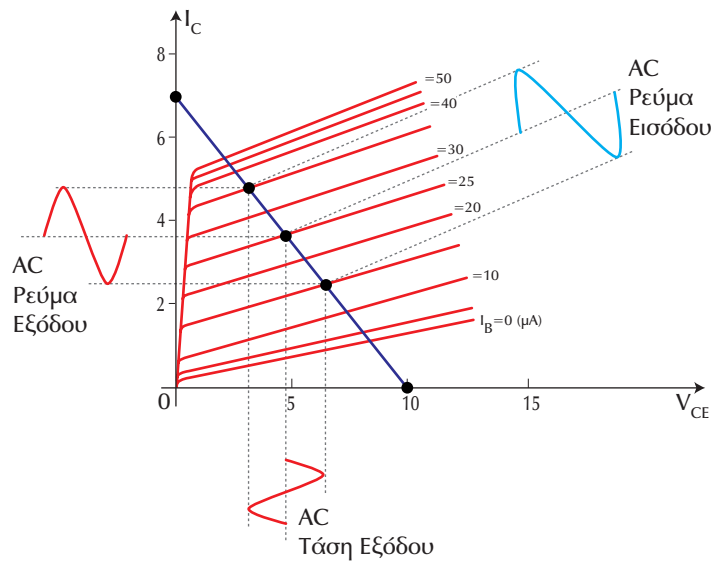
Στο ισοδύναμο κύκλωμα, σχήμα 4.4.2, η αντίσταση την οποία παρουσιάζει η βάση (r_b) είναι β -φορές μεγαλύτερη της r_e ($r_b = \beta \cdot r_e$). Στην αντίσταση αυτή συνδέονται παράλληλα οι R_1 και R_2 . Στην έξοδο, οι R_C και R_L συνδέονται παράλληλα και διαρρέονται από το ρεύμα της πηγής $\beta \cdot i_B$.

Παρακολουθώντας την πορεία του σήματος διαπιστώνουμε ότι η AC τάση, η οποία εφαρμόζεται στην είσοδο του ενισχυτή προκαλεί ένα ρεύμα i_B το οποίο διαρρέει τη δίοδο εκπομπού. Το ρεύμα αυτό είναι ίσο προς

$$i_B = \frac{u_i}{\beta \cdot r_e} \quad 4.4.2$$

Το ρεύμα αυτό ενισχύεται, λόγω τη απολαβής ρεύματος του τρανζίστορ, και στο συλλέκτη εμφανίζεται ένα AC ρεύμα i_C , το οποίο δίδεται από την εξίσωση

$$i_C = \beta \cdot i_B \quad 4.4.3$$



Σχήμα 4.4.4 Χαρακτηριστική εισόδου-εξόδου. Παρουσιάζονται η AC ευθεία φόρτου και το σημείο λειτουργίας Q

Αν η ισοδύναμη αντίσταση εξόδου, η οποία προκύπτει από την παράλληλη σύνδεση των R_C και R_L , είναι r_L , τότε η τάση στα άκρα της και συνεπώς στα άκρα της αντίστασης φόρτου θα είναι,

$$v_L = i_c \cdot r_L = \beta \cdot i_B \cdot r_L = \frac{r_L}{r_e} \cdot v_i \quad 4.4.4$$

Παρατηρούμε ότι, όταν εφαρμόζεται μία τάση v_i στην είσοδο τότε εμφανίζεται μια τάση v_L στην έξοδο του ενισχυτή. Οι τάσεις αυτές έχουν μεταξύ τους διαφορά φάσης 180° , δηλαδή η κυματομορφή σήματος στη έξοδο είναι ανεστραμμένη σε σχέση με αυτή της εισόδου.

Σε έναν ενισχυτή ενδιαφέρει άμεσα η σχέση μεταξύ τάσης εξόδου και τάσης εισόδου. Γι' αυτό το λόγο ορίζεται μια **απολαβή (κέρδος) τάσης** του ενισχυτή A_v , ως πηλίκο της AC τάσης εξόδου (v_L) προς την AC τάση εισόδου (v_i), ήτοι:

$$A_v = \frac{v_L}{v_i} = \frac{r_L}{r_e} \quad 4.4.5$$

Στην περίπτωση κατά την οποία ο πυκνωτής C_E δε γειώνει τον εκπομπό, η σχέση η οποία δίνει την απολαβή γίνεται:

$$A_V = \frac{U_L}{U_i} = \frac{r_L}{r_e + R_E} \quad 4.4.6$$

και η AC αντίσταση της βάσης γίνεται,

$$r_B \approx \beta \cdot (r_e + R_E) \quad 4.4.7$$

Από τη μελέτη των εξ. 4.4.6 και εξ. 4.4.7, όπου ο όρος R_E είναι πολύ μεγαλύτερος της r_e , διαπιστώνεται ότι, όταν αφαιρείται ο πυκνωτής C_E η αντίσταση βάσης αυξάνεται, ενώ η απολαβή τάσης μειώνεται. Η μεταβολή στα δύο αυτά μεγέθη είναι σημαντική.

Στο σχήμα 4.4.4 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική εξόδου του ενισχυτή. Για το εναλλασσόμενο η AC ευθεία φόρτου προκύπτει από την r_L και έχει διαφορετική κλίση από την DC ευθεία φόρτου, αλλά διέρχεται πάλι από το σημείο Q. Επιπλέον διακρίνεται η αναστροφή φάσης μεταξύ σήματος εισόδου και σήματος εξόδου, δηλαδή το **ελάχιστο του ρεύματος εισόδου αντιστοιχεί σε μέγιστο της τάσης εξόδου και αντίστροφα**.

Παράδειγμα 4.4.1

Στον ενισχυτή του σχήματος 4.4.1 δίδεται $V_{CC}=20\text{ V}$, $u_i=10\text{ mV}$, $R_1=82\text{ K}\Omega$, $R_2=18\text{ K}\Omega$, $R_E=1\text{ K}\Omega$, $R_C=2,2\text{ K}\Omega$ και $R_L=4,7\text{ K}\Omega$. Να υπολογιστεί η αντίσταση βάσης, η απολαβή και η τάση εξόδου, όταν ο πυκνωτής C_E είναι συνδεδεμένος στο κύκλωμα και όταν έχει αποσυνδεθεί.

Λύση

Το παρόν παράδειγμα χρησιμοποιεί για το συνεχές το ίδιο κύκλωμα με το παράδειγμα 4.3.1. Έτσι χρησιμοποιούμε στοιχεία του παραδείγματος 4.3.1, όπου έχουμε ήδη υπολογίσει το ρεύμα συλλέκτη $I_C=2,9\text{ mA}$.

Άρα,

$$r_e = \frac{25\text{mV}}{I_C} = \frac{25\text{mV}}{2,9\text{mA}} = 8,6\Omega$$

και η

$$r_L = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} = \frac{2,2\text{K}\Omega \times 4,7\text{K}\Omega}{2,2\text{K}\Omega + 4,7\text{K}\Omega} \approx 1,5\text{K}\Omega$$

Με τον C_E συνδεδεμένο στο κύκλωμα η αντίσταση της βάσης είναι,

$$r_\beta = \beta \cdot r_e = 100 \times 8,6\Omega = 860\Omega$$

η απολαβή τάσης είναι

$$A_V = \frac{v_L}{v_i} = \frac{r_L}{r_e} = \frac{1500\Omega}{8,6\Omega} = 174,4$$

και η τάση εξόδου

$$v_L = A_V \cdot v_i = 174,4 \times 10\text{mV} = 1,744\text{V}$$

Χωρίς τον C_E η αντίσταση της βάσης είναι

$$r_\beta \approx \beta \cdot (r_e + R_E) = 100 \times (8,6\Omega + 1000\Omega) = 100,86\text{K}\Omega$$

η απολαβή τάσης είναι

$$A_V = \frac{v_L}{v_i} = \frac{r_L}{r_e + R_E} = \frac{1500\Omega}{8,6\Omega + 1000\Omega} \approx 1,5$$

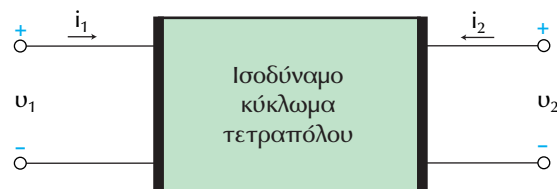
και η τάση εξόδου

$$v_L = A_V \cdot v_i = 1,5 \times 10\text{mV} = 15\text{mV}$$

4.4.2 Ισοδύναμο κύκλωμα με υβριδικές παραμέτρους h

Η περιγραφή του ισοδύναμου κυκλώματος ενός τρανζίστορ για το συνεχές έγινε στην παράγραφο 4.2.2. Στην περίπτωση του εναλλασσομένου, η ανάλυση πολύπλοκων κυκλωμάτων παρουσιάζει πολλές φορές δυσκολίες. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται τα ισοδύναμα κυκλώματα, τα οποία είναι περισσότερο απλουστευμένα.

Για να χαραχθεί το ισοδύναμο κύκλωμα κάποιου κυκλώματος (π.χ. ενισχυτή με τρανζίστορ), πρέπει πρώτα να χαραχθεί το ισοδύναμο κύκλωμα του ίδιου του τρανζίστορ, εφόσον αυτό **λειτουργεί στη γραμμική περιοχή**. Ο προσδιορισμός του ισοδύναμου κυκλώματος γίνεται με τον παρακάτω τρόπο.



Σχήμα 4.4.5 Κύκλωμα ενός τρανζίστορ κάποιας συνδεσμολογίας ως τετράπολο

Θεωρούμε κατ' αρχήν ότι υπάρχει ένα κύκλωμα, το οποίο για το εναλλασσόμενο έχει την ίδια συμπεριφορά με αυτήν που έχει το τρανζίστορ και ότι το κύκλωμα αυτό βρίσκεται τοποθετημένο σε ένα κουτί. Επιπλέον θεωρούμε ότι αυτό το κουτί έχει τέσσερις ακροδέκτες (βλέπε σχ.4.4.5), δηλαδή είναι ένα **τετράπολο**. Επειδή το κύκλωμα αυτό, σε όλη την εφαρμογή τάσεων ή διοχέτευση ρευμάτων, έχει δύο εισόδους, τις 1 και 2, ονομάζεται **δίθυρο**. Ο προσδιορισμός του ισοδύναμου κυκλώματος μπορεί να γίνει με τη βοήθεια των εναλλασσομένων τάσεων u_1 και u_2 και των ρευμάτων i_1 και i_2 των εισόδων του. Με την κατάλληλη επιλογή των μεγεθών που εφαρμόζονται και εκείνων που μετρώνται προσδιορίζεται π.χ. το Z ισοδύναμο κύκλωμα (διοχέτευση των ρευμάτων και μέτρηση των τάσεων), το Y ισοδύναμο κύκλωμα (εφαρμογή των τάσεων και μέτρηση των ρευμάτων) κ.λ.π.

Αν για τη χάραξη τη ισοδύναμου κυκλώματος του τρανζίστορ εφαρμοσθούν η τάση u_2 και το ρεύμα i_1 και μετρηθούν η τάση u_1 και το ρεύμα i_2 τότε υπολογίζονται οι τέσσερις **υβριδικές παράμετροι** και το ισοδύναμο αυτό λέγεται **υβριδικό ισοδύναμο**.

Στην περίπτωση του υβριδικού ισοδύναμου τα μετρούμενα μεγέθη, δηλαδή η τάση u_1 και το ρεύμα i_2 , θα εξαρτώνται από την τάση u_2 που εφαρμόζεται στην είσοδο 2 και το ρεύμα i_1 που διοχετεύεται στην είσοδο 1, μέσω των παρακάτω εξισώσεων:

$$\begin{aligned} u_1 &= h_{11}i_1 + h_{12}u_2 \\ i_2 &= h_{21}i_1 + h_{22}u_2 \end{aligned} \quad 4.4.8$$

Οι υβριδικές παράμετροι έχουν σε συντομία τις εξής έννοιες και συμβολισμούς:

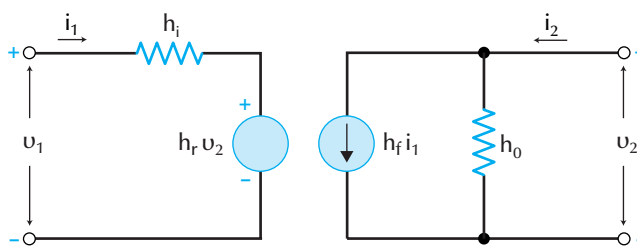
- h_{11} h_i **Αντίσταση εισόδου με βραχυκυκλωμένη την έξοδο**
- h_{12} h_r **Λόγος μεταφοράς ανάστροφης-τάσης με ανοικτό κύκλωμα στην είσοδο**
- h_{21} h_f **Λόγος μεταφοράς ορθού-ρεύματος με βραχυκυκλωμένη την έξοδο**
- h_{22} h_o **Αγωγιμότητα εξόδου με ανοικτό κύκλωμα στην είσοδο**

Χρησιμοποιώντας τους νέους συμβολισμούς οι εξισώσεις (4.4.8) γράφονται:

$$\begin{aligned} u_1 &= h_i i_1 + h_r u_2 \\ i_2 &= h_f i_1 + h_o u_2 \end{aligned} \quad 4.4.9$$

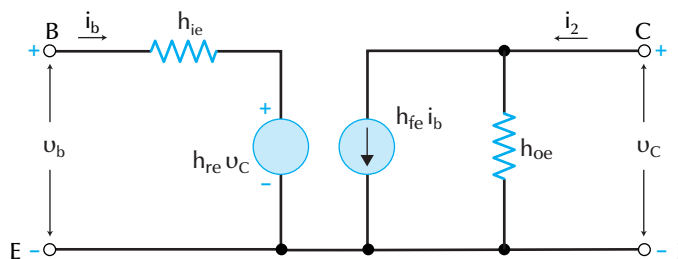
Ανάλογα με το είδος συνδεσμολογίας του τρανζίστορ προστίθεται ένας δεύτερος δείκτης: το e για ΚΕ, το b για ΚΒ και το c για συνδεσμολογία ΚΣ.

Σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.4.9) και τις έννοιες των υβριδικών παραμέτρων το ισοδύναμο κύκλωμα εισόδου θα περιλαμβάνει μια πηγή τάσης, την $h_r u_2$ συνδεδεμένη σε σειρά με μία αντίσταση, την h_i , την οποία διαρρέει το ρεύμα i_1 . Το ισοδύναμο κύκλωμα εξόδου θα περιλαμβάνει μια πηγή ρεύματος, την $h_f i_1$, παράλληλα στην οποία είναι συνδεδεμένη η αγωγιμότητα εξόδου, h_o . Το πλήρες ισοδύναμο κύκλωμα εισόδου-εξόδου παρουσιάζεται στο σχ. 4.4.6. Εξετάζοντας τα παραπάνω διαπιστώνουμε ότι: **Το υβριδικό κύκλωμα εισόδου είναι το ισοδύναμο κατά Thevenin (σταθερής τάσεως), ενώ το υβριδικό κύκλωμα εξόδου είναι το ισοδύναμο κατά Norton (σταθερής εντάσεως). Επομένως το πλήρες υβριδικό ισοδύναμο κύκλωμα είναι μικτό (υβριδικό) και περιλαμβάνει ένα κατά Thevenin και ένα κατά Norton ισοδύναμο κυκλώματα.**



Σχήμα 4.4.6 Πλήρες υβριδικό ισοδύναμο κύκλωμα

Για ένα τρανζίστορ το οποίο είναι σε συνδεσμολογία κοινού εκπομπού (ΚΕ) το ισοδύναμο υβριδικό κύκλωμα, με τις παραμέτρους h και τους δείκτες που αντιστοιχούν, παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4.7. Οι δείκτες των τάσεων και ρευμάτων έχουν αντικατασταθεί, το 1 με b το οποίο αντιστοιχεί στη βάση και το 2 με c το οποίο αντιστοιχεί στο συλλέκτη.



Σχήμα 4.4.7 Πλήρες υβριδικό ισοδύναμο κύκλωμα ενός τρανζίστορ σε συνδεσμολογία ΚΕ

Η χρησιμοποίηση των h-παραμέτρων για τον υπολογισμό της απολαβής τάσης ενός ενισχυτή συνδεσμολογίας κοινού εκπομπού (σχ. 4.4.1) είναι απλή. Ο υπολογισμός ξεκινά από τον ορισμό της απολαβής, δηλαδή το πρώτο μέρος της εξίσωσης (4.4.5)

$$A_v = \frac{u_c}{u_b} \quad 4.4.10$$

στην οποία εκφράζουμε την τάση εισόδου u_b συναρτήσει της τάσης εξόδου u_c και του ρεύματος εισόδου i_b . Τελικά η απολαβή τάσης του ενισχυτή δίδεται από την εξίσωση,

$$A_v = \frac{-h_{fe} r_L}{h_{ie} + (h_{ie} h_{oe} - h_{fe} h_{re}) r_L} \quad 4.4.11$$

Το αρνητικό πρόσημο στην (εξ. 4.4.11) δηλώνει διαφορά φάσης 180° μεταξύ σήματος εξόδου και σήματος εισόδου.

Τέλος οι υβριδικές παράμετροι των τρανζίστορ παρέχονται στα τεχνικά φυλλάδια των κατασκευαστών.

Παράδειγμα 4.4.2

Στον ενισχυτή του σχήματος 4.4.1 δίδεται $h_{ie}=1 \text{ K}\Omega$, $h_{re}=2 \times 10^{-4}$, $h_{fe}=120$ και $h_{oe}=25 \text{ }\mu\text{A/V}$. Αν $u_i=10 \text{ mV}$, $R_C=2,2 \text{ K}\Omega$ και $R_L=4,7 \text{ K}\Omega$, να υπολογιστεί η απολαβή τάσης και η τάση εξόδου.

Λύση

Στο παρόν παράδειγμα θα έχουμε

$$r_L = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} = \frac{2,2 \text{ K}\Omega \times 4,7 \text{ K}\Omega}{2,2 \text{ K}\Omega + 4,7 \text{ K}\Omega} \approx 1,5 \text{ K}\Omega$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.4.11), χωρίς το αρνητικό πρόσημο, θα έχουμε

$$\begin{aligned} A_v &= \frac{120 \times 1500}{1000 + (1000 \times 25 \times 10^{-6} - 120 \times 2 \times 10^{-4}) \times 1500} = \\ &= \frac{120 \times 1500}{1000 + 0,001 \times 1500} \approx \frac{120 \times 1500}{1000} = 180 \end{aligned}$$

και η τάση εξόδου

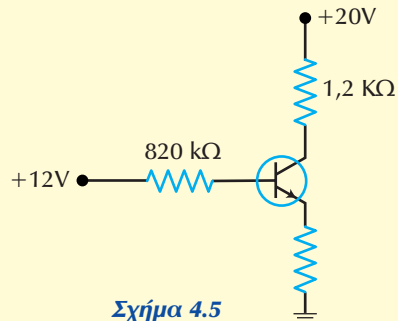
$$u_L = A_v \cdot u_i = 180 \times 10 \text{ mV} = 1,8 \text{ V}$$

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 4.4

- Σε έναν **ενισχυτή CE** το σήμα εφαρμόζεται στη βάση και λαμβάνεται από το συλλέκτη μέσω **πυκνωτών σύζευξης**.
- Ο εκπομπός του τρανζίστορ μπορεί να «γυιωθεί» για το εναλλασσόμενο σήμα μέσω ενός **πυκνωτή απόζευξης**.
- Σε έναν **ενισχυτή CE** έχουμε **απολαβή ρεύματος** και **απολαβή τάσης** μεγαλύτερη της μονάδας
- Σε έναν **ενισχυτή CE** έχουμε και **απολαβή ισχύος** η οποία ορίζεται ως το πηλίκο της ισχύος του σήματος εξόδου προς την ισχύ του σήματος εισόδου. Η απολαβή ισχύος είναι, επίσης, ίση με το γινόμενο των απολαβών τάσης και ρεύματος.
- Η **μη χρησιμοποίηση πυκνωτή απόζευξης** στον εκπομπό έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της απολαβής τάσης και την αύξηση της αντίστασης της βάσης.
- Η **AC ευθεία φόρτου** καθορίζεται από την αντίσταση συλλέκτη και την αντίσταση φόρτου, δηλαδή έχει διαφορετική κλίση από την **DC ευθεία φόρτου**.
- Η AC ευθεία φόρτου τέμνεται με τη DC ευθεία φόρτου στο **σημείο λειτουργίας Q**.
- Το **υβριδικό ισοδύναμο** κύκλωμα ενός **τρανζίστορ** αποτελείται από ένα κύκλωμα εισόδου κατά Thevenin και ένα κύκλωμα εξόδου κατά Norton.
- Το **υβριδικό ισοδύναμο** κύκλωμα χρησιμοποιείται για απλούστερη και ευκολότερη επίλυση ενός κυκλώματος με τρανζίστορ, σύμφωνα με τα στοιχεία του τεχνικού φυλλαδίου των κατασκευαστών.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ 4.1-4.4

- 4.1. Η δίοδος εκπομπού είναι συνήθως
 α. Ορθά πολωμένη
 β. Ανάστροφα πολωμένη
 γ. Δεν άγει
 δ. Λειτουργεί στην περιοχή διάσπασης
- 4.2. Για ένα τρανζίστορ το οποίο λειτουργεί στην ενεργό περιοχή, η δίοδος συλλέκτη είναι
 α. Ορθά πολωμένη
 β. Ανάστροφα πολωμένη
 γ. Δεν άγει
 δ. Λειτουργεί στην περιοχή διάσπασης
- 4.3. Η απολαβή ρεύματος ενός τρανζίστορ, σε συνδεσμολογία CE, είναι ίση προς το λόγο
 α. του ρεύματος συλλέκτη προς το ρεύμα εκπομπού
 β. του ρεύματος συλλέκτη προς το ρεύμα βάσης
 γ. του ρεύματος βάσης προς το ρεύμα συλλέκτη
 δ. του ρεύματος εκπομπού προς το ρεύμα συλλέκτη
- 4.4. Να σχεδιάσετε κύκλωμα CE στο οποίο να ισχύει: $V_{BB}=20\text{ V}$, $V_{CC}=30\text{ V}$, $I_C=8\text{ mA}$, $V_{CE}=8\text{ V}$ και $\beta_{DC}=100$.
- 4.5. Να χαράξετε την ευθεία φόρτου στο παρακάτω κύκλωμα.
- 4.6. Αν η τάση συλλέκτη ελαττωθεί στα $+10\text{V}$ τι θα συμβεί στην ευθεία φόρτου του κυκλώματος της άσκ. 4.5.
- 4.7. Αν η αντίσταση συλλέκτη διπλασιαστεί τι θα συμβεί στην ευθεία



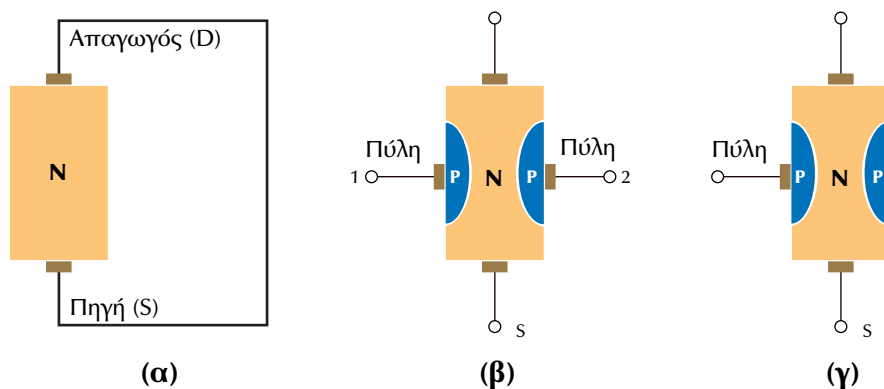
Σχήμα 4.5

- φόρτου (ασκ.4.5)
- 4.8. Ένας ενισχυτής CE λειτουργεί
 α. στην ενεργό περιοχή
 β. στην περιοχή κόρου
 γ. στην περιοχή αποκοπής
 δ. Στην περιοχή διάσπασης
- 4.9. Στον ενισχυτή CE ο πυκνωτής C_E συμπεριφέρεται ως
 α. ανοικτό κύκλωμα για το εναλλασσόμενο
 β. βραχυκύκλωμα για το συνεχές
 γ. ανοικτό κύκλωμα για την τροφοδοσία του κυκλώματος
 δ. Βραχυκύκλωμα για το εναλλασσόμενο
- 4.10. Στον ενισχυτή CE η παρουσία του πυκνωτή C_E
 α. αυξάνει την απολαβή τάσης
 β. ελαττώνει την απολαβή τάσης
 γ. αυξάνει την απολαβή ρεύματος
 δ. δεν επηρεάζει τη λειτουργία του ενισχυτή

4.5 Τρανζίστορ εγκάρσιου πεδίου επαφής (JFET)

4.5.1 Δομή

Το **τρανζίστορ εγκάρσιου πεδίου επαφής** (Junction Field Effect Transistor, FET), γνωστό και ως JFET, είναι ένα **μονοπολικό τρανζίστορ**. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι βασίζει τη λειτουργία του σε ένα μόνο είδος φορέων, δηλαδή σε ηλεκτρόνια ή σε οπές, σε αντίθεση με το **κοινό τρανζίστορ** που ονομάζεται και **διπολικό** και η λειτουργία του βασίζεται και στα δύο αυτά είδη φορέων.



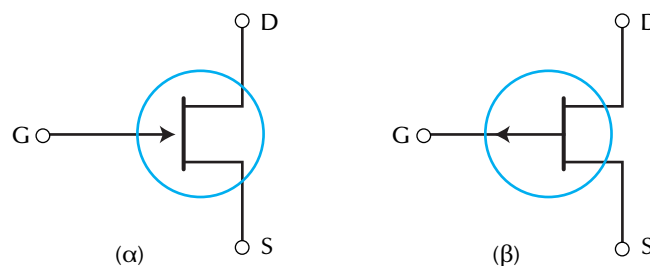
Σχήμα 4.5.1 Αρχή (α) κατασκευής ενός JFET, με (β) δύο πύλες ή (γ) με μια πύλη

Η αρχή κατασκευής ενός JFET βασίζεται στην επιλογή ενός τμήματος ημιαγωγού, π.χ. τύπου-N, στο οποίο προστίθενται στις δύο πλευρές του περιοχές τύπου-P (βλέπε σχ.4.5.1). Η συγκέντρωση των προσμίξεων στις περιοχές τύπου-P είναι πολύ ψηλότερες από αυτή του καναλιού. Κάθε μία από τις περιοχές τύπου-P καλείται **πύλη** (gate). Τα δύο άκρα του τμήματος τύπου-N ονομάζονται αντίστοιχα **πηγή** (source) και **απαγωγός** (drain), ενώ το τμήμα του ημιαγωγού τύπου-N, το οποίο βρίσκεται ανάμεσα στις περιοχές τύπου-P, ονομάζεται **κανάλι** ή **δίαυλος** (channel). Ανάλογα με τον τύπο του ημιαγωγού του καναλιού ορίζεται και ο τύπος του JFET. Έτσι υπάρχουν JFET n-καναλιού ή p-καναλιού (n-channel ή p-channel). Ένα JFET μπορεί να έχει μια μόνο πύλη, αν ενώνονται οι δύο περιοχές τύπου-P. Σε αντίθετη περίπτωση το JFET θα έχει δύο πύλες (τέτοιες ηλεκτρονικές διατάξεις χρησιμοποιούνται σε ειδικά κυκλώματα μεταλλαγής συχνότητας στους δέκτες). Επειδή είναι περισσότερο διαδεδομένες οι διατάξεις με μια πύλη, σε αυτές θα επικεντρωθεί και η ανάλυση που θα ακολουθήσει.

Υπάρχει αναλογία μεταξύ των JFET και των διπολικών τρανζίστορ. Λόγω αυτής της αναλογίας, πολλοί τύποι που περιγράφουν κυκλώματα JFET προέρχονται από τους αντίστοιχους των διπολικών τρανζίστορ, που έχουν απλώς προσαρμοστεί για την περίπτωση των JFET. Η αντιστοιχία των ονομάτων και των συμβόλων των ακροδεκτών παρουσιάζεται στον πιν.4.5.1. Απλό παράδειγμα αυτής της αντιστοιχίας αποτελεί ο συμβολισμός των συνεχών ρευμάτων του εκπομπού I_E , της βάσης I_B και του συλλέκτη I_C των διπολικών τρανζίστορ με εκείνο των συνεχών ρευμάτων της πηγής I_S , της πύλης I_G και του απαγωγού I_D των JFET.

Διπολικό Τρανζίστορ	JFET	Διπολικό Τρανζίστορ	JFET
Εκπομπός	Πηγή	E	S
Βάση	Πύλη	B	G
Συλλέκτης	Απαγωγός	C	D

Πίνακας 4.5.1 Αντιστοιχία ονομάτων και συμβολισμών ακροδεκτών διπολικού τρανζίστορ και JFET

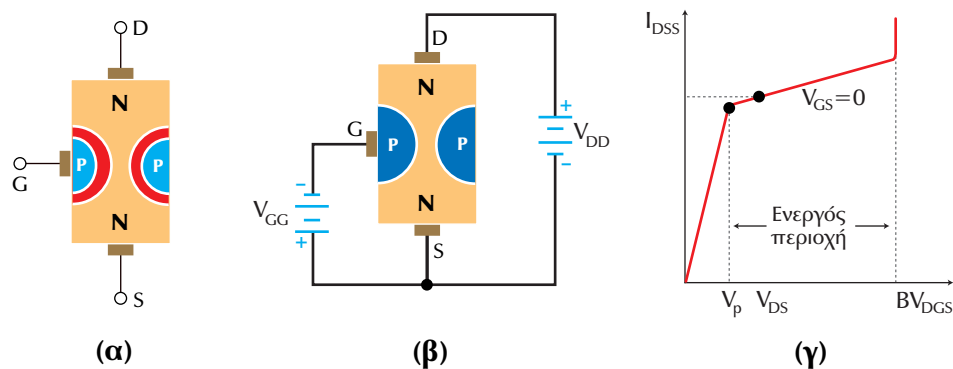


Σχήμα 4.5.2 Κυκλωματικά σύμβολα JFET (α) n-καναλιού και (β) p-καναλιού

Το κυκλωματικό σύμβολο ενός JFET παρουσιάζεται στο σχ. 4.5.2. Για μνημονικό βοήθημα πρέπει να θεωρηθεί, ότι η λεπτή κατακόρυφη γραμμή αντιστοιχεί στο κανάλι. Η πηγή και ο απαγωγός συνδέονται με αυτή τη γραμμή. Επιπλέον, το βέλος της πύλης δείχνει προς τον ημιαγωγό τύπου-N, όπως στην κοινή δίοδο. Έτσι, αν το βέλος δείχνει προς το κανάλι το JFET είναι n-καναλιού (σχ.4.5.2α) ενώ, αν έχει αντίθετη κατεύθυνση, είναι p-καναλιού (σχ.4.5.2β).

4.5.2 Αρχή λειτουργίας

Η λειτουργία ενός JFET βασίζεται στην επαφή πύλης-καναλιού, η οποία στο εξής θα ονομάζεται επαφή ή δίοδος πύλης για λόγους απλότητας. Η περιοχή φορτίου χώρου της επαφής έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διατομής του καναλιού και συνεπώς τη μεταβολή της αντίστασης του, βλέπε σχήμα 4.5.3α. Έτσι μεταβάλλοντας την πόλωση της δίοδου πύλης, μεταβάλλεται το εύρος της περιοχής φορτίου χώρου της επαφής και συνεπώς η αντίσταση του καναλιού άρα ελέγχεται το ρεύμα το οποίο διαρρέει το JFET. Ο όρος **επίδραση πεδίου** σχετίζεται με την περιοχή φορτίου χώρου που δημιουργείται στην επαφή πύλης.

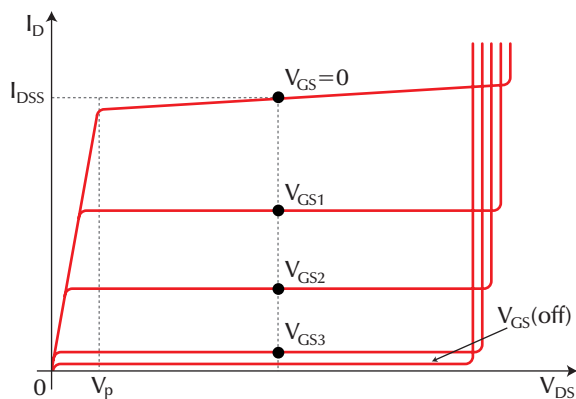


Σχήμα 4.5.3 (α) Περιοχές φορτίων χώρου, (β) κανονική πόλωση JFET και (γ) χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης

Τυπικό κύκλωμα πόλωσης ενός JFET καναλιού τύπου-N παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5.3β. Στο κύκλωμα χρησιμοποιούνται δύο πηγές τάσης. Η πρώτη συνδέεται μεταξύ απαγωγού και πηγής η V_{DD} και παρέχει την **τάση απαγωγού** V_{DS} . Η δεύτερη συνδέεται μεταξύ πύλης και πηγής η V_{GG} και παρέχει την **τάση πύλης** V_{GS} . Η V_{GG} πολώνει ανάστροφα τη δίοδο πύλης με αποτέλεσμα το ρεύμα πύλης I_G να είναι πάρα πολύ μικρό και συνεπώς η αντίσταση εισόδου πάρα πολύ μεγάλη. Επιπλέον, η τάση της πύλης διαμορφώνει, όπως προαναφέρθηκε, την αντίσταση του καναλιού. Στο σχήμα (4.5.4) παρουσιάζεται μια γραφική παράσταση των χαρακτηριστικών ρευμάτων απαγωγού I_D συναρτήσεως της τάσης απαγωγού V_{DS} για διάφορες τιμές της τάσης πύλης. Η ομοιότητα της με τη χαρακτηριστική καμπύλη συλλέκτη των διπολικών τρανζίστορ είναι

αξιοσημείωτη. Για μικρές τιμές της τάσης απαγωγού το ρεύμα απαγωγού αυξάνει απότομα και γίνεται σχεδόν οριζόντιο στην ενεργό περιοχή. Ανάμεσα στη V_p και $V_{DS(max)}$, το ρεύμα απαγωγού είναι σχεδόν σταθερό.

Όταν η τάση απαγωγού γίνει πολύ μεγάλη και υπερβεί την τιμή BV_{DGS} , που είναι η τάση κατάρρευσης με γειωμένη την πηγή, το JFET, όπως φαίνεται στο σχήμα (4.5.3) και (4.5.4), καταρρέει. Όπως και στα διπολικά τρανζίστορ, η ενεργός περιοχή εκτείνεται κατά μήκος του (σχεδόν) οριζόντιου τμήματος της χαρακτηριστικής καμπύλης. Σε αυτή την περιοχή το JFET λειτουργεί ως πηγή ρεύματος. Σε κάθε καμπύλη ρεύματος απαγωγού συναρτήσει της τάσης απαγωγού διακρίνουμε τα εξής:



Σχήμα 4.5.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες απαγωγού

Κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης: Όταν η τάση της πύλης μηδενιστεί, τότε η πύλη και η πηγή βραχυκυκλώνουν. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται κατάσταση **βραχυκυκλωμένης πύλης** και σε αυτή αντιστοιχεί το «ρεύμα απαγωγού στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης».

Ρεύμα απαγωγού στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης: Στο σχήμα 4.5.3γ οι δείκτες του I_{DSS} λαμβάνονται από την έκφραση "από τον απαγωγό (Drain) προς την πηγή (Source) με βραχυκυκλωμένη πύλη (Shorted-gate)". Τα φυλλάδια των κατασκευαστών δίνουν το I_{DSS} μέσα στην ενεργό περιοχή. Είναι πολύ βασικό να θυμάται ο αναγνώστης τα εξής: Επειδή στην ενεργό περιοχή η καμπύλη είναι σχεδόν επίπεδη, το I_{DSS} προσεγγίζει πολύ ικανοποιητικά το ρεύμα του απαγωγού σε οποια-

δήποτε σημείο της ενεργού περιοχής στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης. Επιπλέον, επειδή το I_{DSS} αναφέρεται στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης, είναι το μέγιστο ρεύμα απαγωγού που μπορεί να έχει το JFET σε κανονική λειτουργία. Όλες οι άλλες τιμές της τάσης πύλης είναι αρνητικές και προκαλούν μικρότερα ρεύματα απαγωγού.

Τάση συμπίεσης: Η **τάση συμπίεσης** (pinch-off voltage) V_p είναι η τάση απαγωγού πάνω από την οποία το ρεύμα απαγωγού γίνεται περίπου σταθερό, στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης. Όταν η τάση απαγωγού γίνει ίση με V_p , το αγώγιμο κανάλι γίνεται εξαιρετικά στενό (συμπιέζεται) και οι περιοχές φορτίου χώρου σχεδόν εφάπτονται. Αν η τάση απαγωγού αυξηθεί κι άλλο, το ρεύμα του απαγωγού θα αυξηθεί ελάχιστα γιατί το εύρος του αγώγιμου καναλιού είναι πολύ μικρό και δεν μεταβάλλεται παρά ελάχιστα. Η τάση συμπίεσης χωρίζει τη χαρακτηριστική ενός JFET σε δύο περιοχές: την **ενεργό περιοχή**, η οποία ισχύει όταν η τάση απαγωγού είναι μεγαλύτερη της τάσης συμπίεσης, και την **ωμική περιοχή**, η οποία ισχύει όταν η τάση απαγωγού είναι μικρότερη της τάσης συμπίεσης. Η τελευταία λέγεται και ωμική διότι σ' αυτήν το ρεύμα του απαγωγού είναι, σχεδόν, ανάλογο της τάσης απαγωγού, δηλαδή ισχύει ο νόμος του Ωμ, και πρακτικά δεν εξαρτάται από την τάση της πύλης. Επιπλέον η ωμική περιοχή αντιστοιχεί στην περιοχή κόρου των διπολικών τρανζίστορ. Στην ωμική περιοχή η αντίσταση μεταξύ των ακροδεκτών απαγωγού και πηγής υπολογίζεται πολύ εύκολα από την εξίσωση

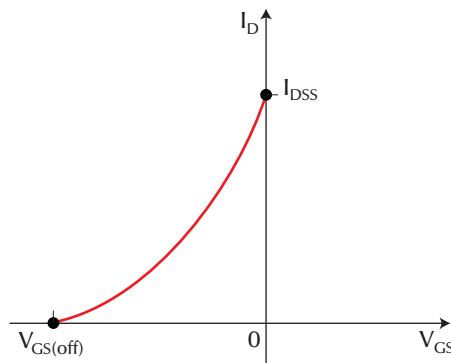
$$R_{DS} = \frac{V_p}{I_{DSS}} \quad 4.5.1$$

Τάση αποκοπής πύλης - πηγής: Οι χαρακτηριστικές απαγωγού μοιάζουν με τις χαρακτηριστικές συλλέκτη των διπολικών τρανζίστορ. Για παράδειγμα στο σχ.4.5.4 δίνονται οι χαρακτηριστικές ενός τυπικού JFET. Η υψηλότερη χαρακτηριστική δίνεται για $V_{GS}=0$ V, για κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης. Η τάση συμπίεσης είναι περίπου 4 V και η τάση κατάρρευσης περίπου 30 V. Όπως φαίνεται στο σχήμα το I_{DSS} είναι 10 mA. Όταν $V_{GS}=V_{GS(off)}$, όπου $V_{GS(off)}$ είναι η **τάση αποκοπής πύλης-πηγής** (gate cutoff voltage), οι περιοχές φορτίου χώρου εφάπτονται και αποκόπτουν το ρεύμα απαγωγού. Εφόσον η V_p είναι η τάση απαγωγού, η οποία περιορίζει το ρεύμα στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης, πρέπει να ισχύει

$$V_p = -V_{GS(off)}$$

4.5.2

Μερικά φυλλάδια κατασκευαστών δεν αναφέρουν την V_p , αλλά την $V_{GS(off)}$. Οι δύο αυτές τάσεις είναι αριθμητικά ίσες κατ' απόλυτη τιμή.



Σχήμα 4.5.5 Χαρακτηριστική διαγωγιμότητας

Χαρακτηριστική διαγωγιμότητας: Η **χαρακτηριστική διαγωγιμότητα** (transconductance curve) ενός JFET είναι η γραφική παράσταση του ρεύματος απαγωγού συναρτήσει της τάσης πύλης (βλ. σχ.4.5.5). Γενικά η χαρακτηριστική διαγωγιμότητας οποιουδήποτε JFET έχει την ίδια μορφή, δηλαδή είναι τμήμα παραβολής. Αυτό οφείλεται στην αρχή λειτουργίας των JFET. Η χαρακτηριστική διαγωγιμότητας περιγράφεται από την εξίσωση:

$$I_D = I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}}\right)^2 \quad 4.5.3$$

η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί προσεγγιστικά για κάθε JFET. Με τη βοήθεια της εξ. 4.5.2 είναι δυνατόν να υπολογιστεί το ρεύμα απαγωγού για κάθε τιμή της τάσης πύλης όταν είναι γνωστό το ρεύμα απαγωγού σε κατάσταση γειωμένης πύλης, δηλ. το μέγιστο ρεύμα του απαγωγού, και η τάση αποκοπής της πύλης-πηγής. Λόγω της παραβολικής μορφής της καμπύλης αυτής τα JFET ονομάζονται και διατάξεις τετραγωνικού νόμου.

4.5.3 Ανάγνωση τεχνικών χαρακτηριστικών

Τα φυλλάδια των τεχνικών χαρακτηριστικών των JFET μοιάζουν με εκείνα των διπολικών τρανζίστορ. Έτσι σε κάθε πίνακα διακρίνονται κατ' αρχήν οι μέγιστες εκτιμήσεις (maximum ratings), τα στατικά και δυναμικά χαρακτηριστικά, δηλ. συνεχούς και εναλλασσομένου, οι χαρακτηριστικές καμπύλες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά, όπως το είδος κελύφους του JFET που εξετάζουμε. Στο παράρτημα παρουσιάζεται αντίγραφο μέρους του τεχνικού φυλλαδίου του JFET MPF102, το οποίο κατασκευάζεται από πολλές εταιρίες.

Στο τεχνικό φυλλάδιο αναφέρεται ο κωδικός αριθμός και ο τύπος του JFET. Στη συνέχεια αναφέρονται κάποιες βασικές εφαρμογές για τις οποίες έχει κατασκευαστεί η διάταξη, όπως οι ενισχυτές υψηλής συχνότητας, ταλαντωτές και μεταλλάκτες. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι απόλυτες μέγιστες εκτιμήσεις, οι οποίες αναφέρονται σε συνήθως σε θερμοκρασία 25AC εκτός αν επισημαίνεται. Αυτές αποτελούν φραγμό για τις εφαρμογές στις οποίες κάποιος σχεδιαστής ή συντηρητής έχει την πρόθεση να χρησιμοποιήσει το συγκεκριμένο JFET. Στη συνέχεια απεικονίζεται ο τύπος του κελύφους με τους ακροδέκτες και ακολουθούν τα χαρακτηριστικά συνεχούς (static) και εναλλασσόμενου (-dynamic), όπου διακρίνονται η τάση αποκοπής $V_{GS(off)}$, το ρεύμα βραχυκυκλωμένης πύλης I_{DSS} , η τάση κατάρρευσης της διόδου πύλης-πηγής BV_{GSS} κλπ. Στα χαρακτηριστικά εναλλασσόμενου διακρίνεται η διαγωγιμότητα g_{fs} , οι παρασιτικές χωρητικότητες κλπ. Τέλος, κάθε τεχνικό φυλλάδιο, όπως έχει προαναφερθεί, περιέχει και τις χαρακτηριστικές καμπύλες συνεχούς και εναλλασσόμενου.

Παράδειγμα 4.5.1

Στα τεχνικά χαρακτηριστικά του JFET MPF102, το οποίο είναι n-καναλιού βρίσκουμε ότι το ανάστροφο ρεύμα της πύλης του είναι:

$$I_{GSS} = -2 \text{ nA για } V_{GS} = -15 \text{ V και } V_{DS} = 0 \text{ V}$$

Ποιά είναι η αντίσταση πύλης-πηγής, δηλαδή εισόδου της διάταξης για το συνεχές;

Λύση

Η αντίσταση εισόδου για το συνεχές είναι:

$$R_{GS} = \frac{15V}{2nA} = 7,5 \times 10^9 \Omega = 7500M\Omega$$

Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να συγκριθεί με την αντίστοιχη αντίσταση εισόδου, για το συνεχές, ενός διπολικού τρανζίστορ από τη βάση του οποίου διέρχεται ρεύμα 1μΑ:

$$R_{BE} = \frac{0,7V}{1\mu A} = 700K\Omega$$

Η σύγκριση δείχνει την υπεροχή, σε ότι αφορά την αντίσταση εισόδου, των JFET ως προς τα διπολικά τρανζίστορ.

Παράδειγμα 4.5.2

Ο πίνακας χαρακτηριστικών ενός JFET δίνει: $I_{DSS} = 25 \text{ mA}$ και $V_p = 4 \text{ V}$. Ποιο είναι το μέγιστο ρεύμα απαγωγού; Ποία είναι η τάση αποκοπής της πύλης-πηγής;

Λύση

Για κάθε τιμή της τάσης πύλης, το ρεύμα απαγωγού πρέπει να βρίσκεται μεταξύ των ορίων:

$$0 < I_D < 25 \text{ mA}$$

Όταν η τάση της πύλης είναι μηδέν, το ρεύμα απαγωγού αποκτά τη μέγιστη τιμή

$$I_D = 25 \text{ mA}$$

Η τάση αποκοπής πύλης-πηγής είναι ίση με την τάση συμπίεσης, αλλά με αντίθετο πρόσημο. Αφού η τάση συμπίεσης είναι ίση προς 4V θα έχουμε

$$V_{GS(off)} = -4 \text{ V}$$

Παράδειγμα 4.5.3

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του παραδείγματος 4.5.2 να υπολογίσετε την αντίσταση του JFET στην ωμική περιοχή.

Λύση

Η αντίσταση για το συνεχές στην ωμική περιοχή είναι ίση είναι με το πηλίκο της τάσης συμπίεσης προς το μέγιστο ρεύμα απαγωγού. Άρα,

$$R_{DC} = \frac{4V}{25mA} = 160\Omega$$

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 4.5

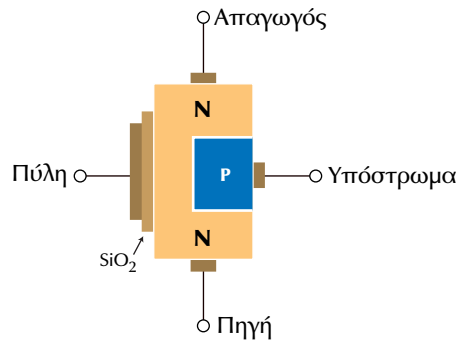
- Ένα **JFET** αποτελείται από ένα τμήμα ημιαγωγού τύπου-N ή τύπου-P, το οποίο ονομάζεται **κανάλι**. Τα δύο άκρα του καναλιού ονομάζονται **πηγή** και **απαγωγός**. Στις δυο πλευρές του καναλιού υπάρχουν επαφές τύπου-P αν το κανάλι είναι N-τύπου ή τύπου-N αν το κανάλι είναι P-τύπου, οι οποίες ονομάζονται **πύλη ή πύλες**, αν λειτουργούν ανεξάρτητα ή μία από την άλλη.
- Υπάρχει αντιστοιχία μεταξύ των ηλεκτροδίων **πηγή, πύλη και απαγωγός** των **JFET** με τα ηλεκτρόδια **εκπομπός, βάση και συλλέκτης** των διπολικών **τρανζίστορ**.
- Η **πύλη**, με την περιοχή φορτίου χώρου, περιορίζει την ενεργό διατομή του καναλιού. Η αντίσταση του καναλιού ή το ρεύμα που το διαρρέει, μπορεί να ελέγχεται αν πολωθεί ανάστροφα η επαφή πύλης-πηγής.
- Στο **σμήνος των χαρακτηριστικών ρεύματος-τάσης** απαγωγού συναρτήσει της τάσης πύλης ενός JFET, διακρίνονται τα εξής:
 - A.** Το **ρεύμα απαγωγού** στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης, το οποίο είναι το μέγιστο ρεύμα της ενεργού περιοχής.
 - B.** Η **τάση συμπίεσης (V_p)**, η οποία είναι η τάση απαγωγού πάνω από την οποία το ρεύμα απαγωγού γίνεται πρακτικά σταθερό, στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης.
 - Γ.** Η **τάση αποκοπής πύλης - πηγής ($V_{GS(off)}$)**, για την οποία αποκόπτεται το ρεύμα απαγωγού και είναι αριθμητικά ίση με την τάση συμπίεσης, αλλά με αντίθετο πρόσημο.
 - Δ.** Η **ωμική περιοχή**, στην οποία το ρεύμα απαγωγού πρακτικά δεν εξαρτάται από την τάση της πύλης.
- Η **χαρακτηριστική διαγωγιμότητας** παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού του ρεύματος απαγωγού για κάθε τιμή της τάσης πύλης όταν είναι γνωστό το ρεύμα απαγωγού σε κατάσταση γειωμένης πύλης και η τάση αποκοπής πύλης-πηγής.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ – ΑΣΚΗΣΕΙΣ 4.5

- 4.5.1 Να απαντήσετε αν ένα JFET:
- α. Είναι διάταξη που ελέγχεται από τάση
 - β. Είναι διάταξη που ελέγχεται από ρεύμα
 - γ. Έχει πολύ μικρή αντίσταση εισόδου
 - δ. Έχει πολύ μεγάλη αντίσταση εισόδου
- 4.5.2 Η πύλη ενός JFET ελέγχει :
- α. Τη διατομή του καναλιού
 - β. Το ρεύμα του απαγωγού
 - γ. Όλα τα προηγούμενα
- 4.5.3 Η διόδος πύλης-πηγής ενός JFET πρέπει να είναι:
- α. Ορθά πολωμένη
 - β. Ανάστροφα πολωμένη
 - γ. Είτε ανάστροφα ή ορθά πολωμένη
 - δ. Καμία από τις παραπάνω περιπτώσεις
- 4.5.4 Η χαρακτηριστική διαγωγιμότητας είναι:
- α. Γραμμική
 - β. Όμοια με τη γραφική παράσταση ρεύματος – τάσης μιας αντίστασης
 - γ. Μη γραμμική
 - δ. Όπως μία χαρακτηριστική ρεύματος απαγωγού
- 4.5.5 Στον πίνακα χαρακτηριστικών του JFET 2N3819 δίδονται τα εξής: $I_{GS} = 2 \text{ nA}$ σε $V_{GS} = 15 \text{ V}$. Να υπολογίσετε την αντίσταση εισόδου για το συνεχές.
- 4.5.6 Για το ίδιο JFET δίνεται επίσης ότι στους 100AC έχουμε $I_{GS} = 2 \text{ }\mu\text{A}$ σε $V_{GS} = 15 \text{ V}$. Να υπολογίσετε την αντίσταση εισόδου για το συνεχές.
- 4.5.7 Σε ένα JFET έχουμε $I_{DSS} = 20 \text{ mA}$ και $V_p = 5 \text{ V}$. Να υπολογίσετε το ελάχιστο ρεύμα απαγωγού, το μέγιστο ρεύμα απαγωγού και την τάση αποκοπής πύλης – πηγής.

4.6 MOSFET

Το **MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor FET)** είναι και αυτή μια διάταξη η οποία έχει πηγή, πύλη και απαγωγό. Σε αντίθεση όμως με το JFET, η πύλη είναι ηλεκτρικά μονωμένη ως προς το κανάλι με αποτέλεσμα το ρεύμα πύλης να είναι πάρα πολύ μικρό, ανεξάρτητα από τη φορά της τάσης που εφαρμόζεται μεταξύ πύλης και πηγής. Ως μονωτικό, χρησιμοποιείται ένα πολύ λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου, το οποίο παρεμβάλλεται μεταξύ της μεταλλικής πύλης και του ημιαγωγού. Η σειρά διαδοχής των στρωμάτων καθορίζει και το όνομα της διάταξης.

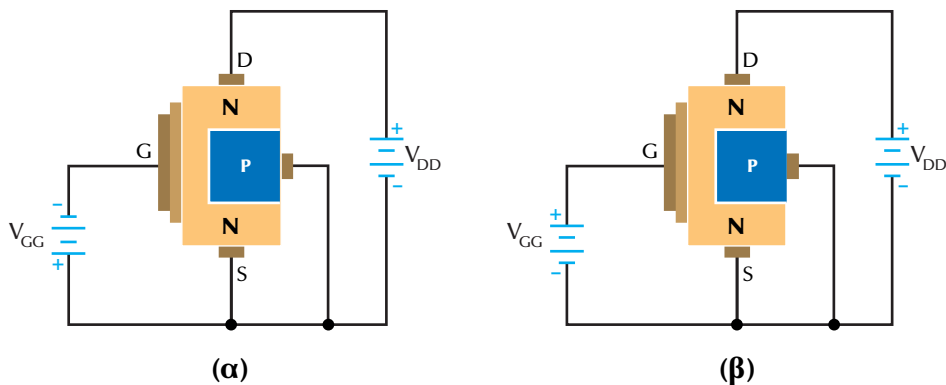


Σχήμα 4.6.1 Δομή MOSFET τύπου αραίωσης

Το MOSFET καλείται και IGFET (Insulated Gate FET), επειδή η πύλη είναι μονωμένη. Σ' ένα MOSFET ο τύπος του καναλιού καθορίζεται από το είδος των φορτίων, ηλεκτρόνια ή οπές, τα οποία μεταφέρουν το ρεύμα από την πηγή στον απαγωγό. Επιπλέον τα MOSFET χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα MOSFET **τύπου αραίωσης** (Depletion mode) και τα MOSFET **τύπου πύκνωσης** (Enhancement mode). ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους. Ο τρόπος κατασκευής των MOSFET αναφέρεται αλλού (Τεχνολογία Ηλεκτρονικών Διατάξεων) και απαιτεί ειδικά εργαστήρια, Εργαστήρια Μικροηλεκτρονικής.

4.6.1 MOSFET τύπου αραίωσης

Το **MOSFET αραίωσης** αποτελείται από ένα τμήμα ημιαγωγού τύπου N. Στα άκρα αυτού του τμήματος συνδέονται οι ακροδέκτες πηγής και απαγωγού (σχ. 4.6.1). Η εφαρμογή μιας τάσης μεταξύ πηγής και απαγωγού, όπου ο απαγωγός συνδέεται στο θετικό πόλο της πηγής, εξαναγκάζει τα ηλεκτρόνια σε ροή από την πηγή προς τον απαγωγό. Το MOSFET, αντίθετα με τα JFET, έχει μία μόνο περιοχή P, η οποία ονομάζεται **υπόστρωμα** (substrate). Η περιοχή αυτή περιορίζει τη διατομή του καναλιού με αποτέλεσμα να παραμείνει ένα πολύ λεπτό στρώμα το οποίο επιτρέπει στα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινούνται από την πηγή στον απαγωγό. Ένα πολύ λεπτό υμένιο διοξειδίου του πυριτίου αποτίθεται στην αντίθετη πλευρά του καναλιού (σχ.4.6.1) και πάνω σε αυτό τοποθετείται η μεταλλική πύλη.

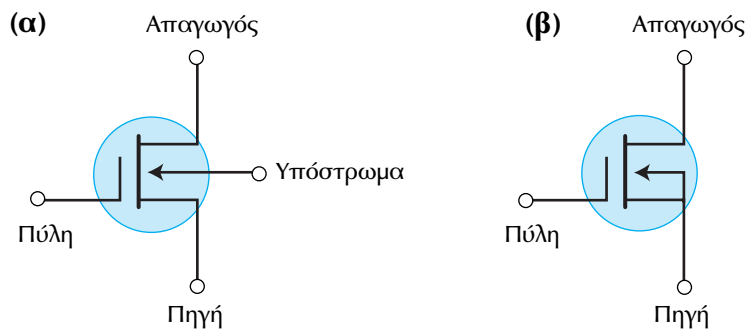


Σχήμα 4.6.2 MOSFET τύπου αραιώσης με (α) αρνητική τάση στην πύλη και (β) με θετική τάση στην πύλη

Στο σχήμα (4.6.2α) παρουσιάζεται ένα MOSFET τύπου αραιώσης στο οποίο έχει εφαρμοστεί μια αρνητική τάση στην πύλη. Η πηγή τάσης V_{DD} υποχρεώνει τα ηλεκτρόνια να μετακινούνται από την πηγή στον απαγωγό μέσα από το λεπτό κανάλι, το οποίο βρίσκεται μεταξύ της περιοχής P και της πύλης. Η αρνητική τάση που εφαρμόζεται στην πύλη απωθεί τα ηλεκτρόνια του καναλιού, με αποτέλεσμα την ελάττωση της πυκνότητας τους και συνεπώς την ελάττωση του ρεύματος απαγωγού. Αυτή η λειτουργία ονομάζεται **λειτουργία αραιώσης** (depletion mode). Όταν η τάση της πύλης γίνεται περισσότερο αρνητική ελαττώνεται το ρεύμα του απαγωγού και όταν γίνει αρκετά αρνητική το ρεύμα αυτό αποκόπτεται. Επειδή η πύλη είναι ηλεκτρικά μονωμένη ως προς το κανάλι, είναι δυνατή η εφαρμογή θετικής τάσης (σχ.4.6.2β).

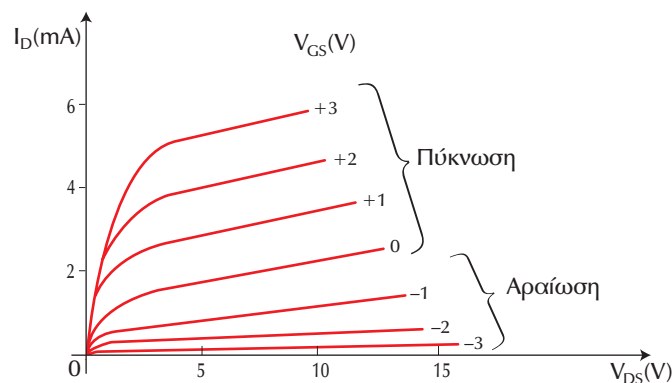
Μια θετική τάση στην πύλη έχει ως αποτέλεσμα να προσελκύνονται ηλεκτρόνια προς την πλευρά της πύλης και συνεπώς να αυξάνεται η πυκνότητα τους μέσα στο κανάλι. Αυτή η λειτουργία ονομάζεται **λειτουργία πύκνωσης** (enhancement mode). Έτσι, το κανάλι, αν και πρακτικά δεν αλλάζει διαστάσεις, γίνεται περισσότερο αγωγίμο με αποτέλεσμα να αυξηθεί το ρεύμα απαγωγού. Η δυνατότητα περαιτέρω αύξησης του ρεύματος απαγωγού με εφαρμογή θετικών τάσεων στην πύλη διαφοροποιεί τα MOSFET αραιώσης από τα JFET.

Το ρεύμα της πύλης είναι αμελητέο και στους δύο τρόπους λειτουργίας. Έτσι, και στις δύο περιπτώσεις, η **αντίσταση εισόδου της πύλης** είναι πολύ μεγάλη, από 10^{10} μέχρι 10^{14} Ωμ. Συμπληρωματικό στοιχείο ενός MOSFET N-καναλιού είναι το MOSFET P-καναλιού.



Σχήμα 4.6.3 Κυκλωματικά σύμβολα MOSFET τύπου αραίωσης N-καναλιού (α) με ακροδέκτη υποστρώματος, και (β) χωρίς ακροδέκτη υποστρώματος

Στο σχήμα (4.6.3α) δίδεται το κυκλωματικό σύμβολο ενός MOSFET τύπου αραίωσης. Η πύλη έχει τη μορφή σπλισμού ενός πυκνωτή. Δεξιά από την πύλη υπάρχει μια λεπτή γραμμή, η οποία παριστάνει το κανάλι. Το βέλος του υποστρώματος δείχνει προς το N-τύπου ημιαγωγό, οπότε η διάταξη αυτή είναι ένα MOSFET N-καναλιού. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο κατασκευαστής συνδέει εσωτερικά το υπόστρωμα με την πηγή, οπότε έχουμε μια διάταξη τριών ακροδεκτών όπως στο σχήμα 4.6.3β.



Σχήμα 4.6.4 Χαρακτηριστική ρεύματος απαγωγού τάσης απαγωγού-πηγής

Οι χαρακτηριστικές απαγωγού ενός MOSFET N-καναλιού παρουσιάζονται στο σχήμα (4.6.4). Θα πρέπει να παρατηρήσει κανείς ότι οι καμπύλες που βρίσκονται στο άνω τμήμα των χαρακτηριστικών αντιστοιχούν σε θετικές τιμές της τάσης πύλης, όπου έχουμε λειτουργία

πύκνωσης ($V_{GS} > 0V$). Η χαμηλότερη καμπύλη για την οποία το ρεύμα απαγωγού είναι σχεδόν μηδέν αντιστοιχεί σε τάση πύλης ίση με την τάση αποκοπής ($V_{GS} = V_{GS(off)}$). Οι καμπύλες για τις οποίες η τάση πύλης βρίσκεται μεταξύ της $V_{GS(off)}$ και του μηδέν αντιστοιχούν σε λειτουργία αραίωσης ($V_{GS} < 0V$).

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι στα MOSFET τύπου αραίωσης το I_{DSS} δεν είναι πλέον το μέγιστο δυνατό ρεύμα. Όπως φαίνεται στο σχ.4.6.4, υπάρχουν χαρακτηριστικές οι οποίες αντιστοιχούν σε θετικές τιμές της V_{GS} . Στη λειτουργία πύκνωσης το ρεύμα του απαγωγού είναι μεγαλύτερο του I_{DSS} . Τα MOSFET τύπου αραίωσης χρησιμοποιούνται εύκολα, γιατί δεν απαιτούν οπωσδήποτε τάση πόλωσης. Από τη χαρακτηριστική διαγωγιμότητας ενός MOSFET τύπου αραίωσης, η οποία δίνεται στα τεχνικά φυλλάδια των κατασκευαστών, μπορούμε εύκολα να επιλέξουμε το σημείο λειτουργίας Q της διάταξης. Μια τέτοια περίπτωση μπορεί να αντιστοιχεί στις τιμές $V_{GS} = 0V$ και $I_D = I_{DSS}$, με αποτέλεσμα την απλούστευση του κυκλώματος πόλωσης.

Έχοντας όλα αυτά υπόψη, μπορούμε να πούμε ότι κάθε MOSFET το οποίο μπορεί να λειτουργήσει είτε με αραίωση είτε με πύκνωση ονομάζεται MOSFET τύπου αραίωσης.

Εφαρμογές MOSFET αραίωσης

Τα MOSFET τύπου αραίωσης χρησιμοποιούνται κυρίως στα αναλογικά ηλεκτρονικά. Οι ενισχυτές με MOSFET τύπου αραίωσης είναι παρόμοιοι με τους ενισχυτές με JFET και γι' αυτό το λόγο μπορεί να ακολουθηθεί η AC ανάλυση, η οποία χρησιμοποιείται στα JFET. Επιπλέον, επειδή έχουν στην είσοδο τους μονωμένη την πύλη, επιτυγχάνουν πολύ υψηλές αντιστάσεις εισόδου. Τέλος επειδή η αντίσταση του καναλιού μεταβάλλεται με την τάση της πύλης, βρίσκουν εφαρμογή σε κυκλώματα αυτομάτου ελέγχου απολαβής (AGC). Επειδή εμφανίζουν μη μηδενικό ρεύμα απαγωγού για μηδενική τάση πύλης ονομάζονται και **MOSFET κανονικά σε κατάσταση ON** (normally on MOSFET).

Παράδειγμα 4.6.1

Στο διπλανό κύκλωμα δίδεται ότι $I_{DSS} = 10mA$ και $V_{GS(off)} = -4V$. Ποια είναι η τάση μεταξύ απαγωγού και πηγής όταν η τάση πύλης είναι μηδέν;

Λύση

Το MOSFET λειτουργεί ως πηγή ρεύματος με αποτέλεσμα αυτό να καθορίζει το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα. Επιπλέον επειδή η τάση της πύλης είναι μηδέν, το ρεύμα απαγωγού θα είναι ίσο με I_{DSS} , δηλαδή 10 mA. Έτσι η τάση μεταξύ απαγωγού και πηγής θα είναι ίση με

$$V_{DS} = 16 \text{ V} - (10 \text{ mA}) \cdot (1 \text{ K}\Omega) = 16 \text{ V} - 10 \text{ V} = 6 \text{ V}$$

Εδώ θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή. Για να ισχύει ο παραπάνω υπολογισμός πρέπει το MOSFET να λειτουργεί στην ενεργό περιοχή, δηλαδή η τάση μεταξύ απαγωγού και πηγής (V_{DS}) πρέπει να είναι μεγαλύτερη της τάσης συμπίεσης (V_p).

Επειδή

$$V_p = -V_{GS(off)} = 4 \text{ V} < V_{DS} = 6 \text{ V}$$

ισχύει όντως ο παραπάνω υπολογισμός.

Παράδειγμα 4.6.2

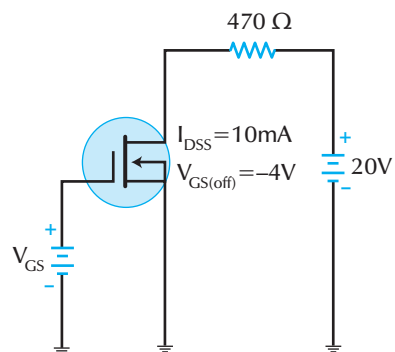
Στο κύκλωμα του προηγούμενου παραδείγματος μεταβάλλουμε την αντίσταση από 1 KΩ σε 4,7 KΩ. Αν η τάση πύλης είναι μηδέν ποία θα είναι η τάση μεταξύ απαγωγού και πηγής;

Λύση

Ας υποθέσουμε ότι το MOSFET λειτουργεί ως πηγή ρεύματος. Επειδή για $V_{GS} = 0 \text{ V}$ το ρεύμα απαγωγού είναι 10 mA, συνεπάγεται ότι η τάση μεταξύ απαγωγού και πηγής θα είναι:

$$V_{DS} = 16 \text{ V} - (10 \text{ mA}) \cdot (4,7 \text{ K}\Omega) = 16 \text{ V} - 47 \text{ V} = -31 \text{ V}$$

Αυτό όμως είναι αδύνατο, επειδή η τάση απαγωγού δεν μπορεί να είναι αρνητική. Γι' αυτό το λόγο πρέπει να ακολουθηθεί διαφορετική πορεία. Ο παραπάνω υπολογισμός δείχνει ξεκάθαρα ότι το MOSFET



δεν λειτουργεί στην ενεργό περιοχή αλλά στην ωμική περιοχή. Έτσι υπολογίζουμε την αντίσταση του MOSFET για το συνεχές :

$$R_{DS} = \frac{V_p}{I_{DSS}} = \frac{4V}{10mA} = 400\Omega$$

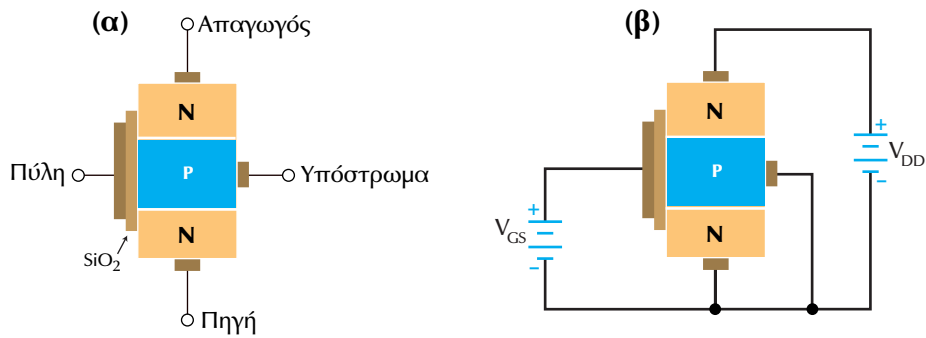
Στην ωμική περιοχή το MOSFET λειτουργεί ως αντίσταση, η οποία συνδέεται σε σειρά με την αντίσταση των 4.7 KΩ και δημιουργεί ένα διαιρέτη τάσης. Χρησιμοποιώντας το γνωστό τύπο του διαιρέτη τάσης υπολογίζουμε την τάση μεταξύ απαγωγού και πηγής.

$$V_{DS} = \frac{400\Omega}{4700\Omega + 400\Omega} \times 16V = \frac{400}{5100} \times 16V = 0,0784 \times 16V = 1,255V$$

4.6.2 MOSFET τύπου πύκνωσης

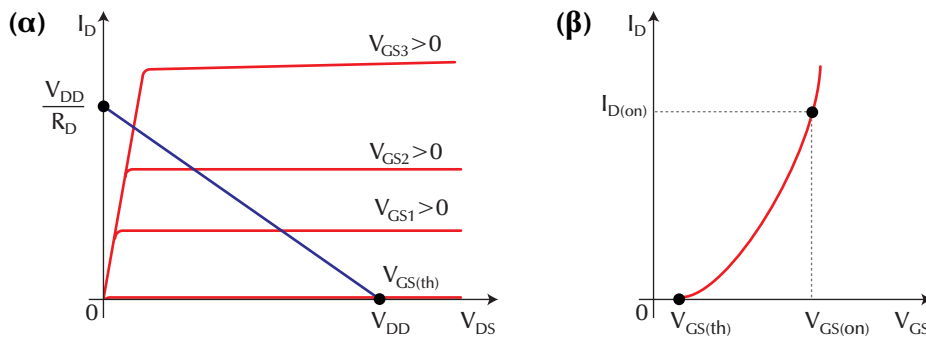
Ένας άλλος τύπος MOSFET, ο οποίος εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο στα ψηφιακά κυκλώματα, είναι το **MOSFET τύπου πύκνωσης** (enhancement mode MOSFET). Αυτό το MOSFET λειτουργεί αποκλειστικά με πύκνωση και επιτρέπει την ταυτόχρονη ολοκλήρωση στο ίδιο τσιπ, διατάξεων N-καναλιού και P-καναλιού με αποτέλεσμα τη δημιουργία συστημάτων συμπληρωματικών στοιχείων και συνεπώς των κυκλωμάτων CMOS (Complementary MOS). Πρέπει να επισημανθεί ότι η ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής στον τομέα των ψηφιακών κυκλωμάτων, και ειδικότερα των μικροεπεξεργαστών, οι οποίοι περιέχουν περισσότερο από ένα εκατομμύριο MOSFET σε κάθε ψηφίδα, οφείλεται στα MOSFET τύπου πύκνωσης. Επιπλέον, MOSFET τύπου πύκνωσης χρησιμοποιούνται και σε εφαρμογές ισχύος με διάφορες ονομασίες όπως **V-MOSFET** (Siliconix, Temic), **T-MOSFET** (Motorola), **HEXFET** (IRF), κλπ., ανάλογα με τη βελτιστοποιημένη δομή, την οποία έχουν επιτύχει διάφοροι κατασκευαστές τους.

Η δομή των MOSFET τύπου πύκνωσης διαφέρει από αυτή των MOSFET τύπου αραιώσης. Σε αυτά το υπόστρωμα εκτείνεται μέχρι την επίστρωση του οξειδίου (βλέπε σχήμα 4.6.5α) με αποτέλεσμα να μην υπάρχει κανάλι μεταξύ πηγής και απαγωγού αλλά μόνο μια δομή η οποία μοιάζει με δύο διόδους συνδεδεμένες αντίθετα μεταξύ τους.



Σχήμα 4.6.5 Δομή MOSFET τύπου πύκνωσης (α) δομή και (β) κανονική πόλωση

Για να γίνει κατανοητή η λειτουργία ενός MOSFET τύπου πύκνωσης θα πρέπει κατ' αρχήν να εφαρμοστούν οι κανονικές πολικότητες πολώσεις της πύλης και του απαγωγού (βλέπε σχήμα 4.6.5.β). Αρχικά θεωρούμε ότι η τάση της πύλης είναι μηδέν, δηλαδή ότι έχουμε κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης. Σ' αυτή την περίπτωση το ρεύμα δε μπορεί να διέλθει από την πηγή στον απαγωγό διότι αφενός το P-τύπου υποστρώμα έχει πάρα πολύ λίγα ελεύθερα ηλεκτρόνια και αφετέρου η δίοδος υποστρώματος – απαγωγού είναι ανάστροφα πολωμένη. Έτσι στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης το ρεύμα του απαγωγού είναι αμελητέο.

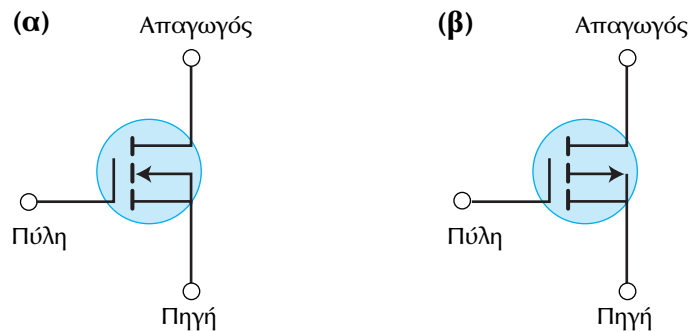


Σχήμα 4.6.6 (α) Χαρακτηριστικές καμπύλες απαγωγού και (β) διαγωγιμότητας ενός MOSFET τύπου πύκνωσης

Για να υπάρξει ρεύμα απαγωγού πρέπει να υπάρξουν ηλεκτρόνια στο υποστρώμα, δηλαδή το υποστρώμα να μετατραπεί – έστω τοπικά – σε N-τύπου ώστε να μην υπάρχουν οι δίοδοι υποστρώματος – πηγής και υποστρώματος – απαγωγού. Αυτό επιτυγχάνεται χάρις στο γεγονός ότι

η πύλη σχηματίζει ένα πυκνωτή με το υπόστρωμα. Έτσι, αν εφαρμοστεί μια αρκετά "υψηλή" θετική τάση στην πύλη τότε ο σπλισμός της πύλης, του πυκνωτή πύλης – υποστρώματος, φορτίζεται θετικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να συσσωρευτεί αρνητικό φορτίο, δηλαδή ηλεκτρόνια στο υπόστρωμα. Το φορτίο αυτό συσσωρεύεται στην περιοχή του υποστρώματος, η οποία βρίσκεται ακριβώς κάτω από το λεπτό στρώμα του οξειδίου της πύλης καλύπτοντας όλη τη διαδρομή από την πηγή μέχρι τον απαγωγό. Έτσι δημιουργείται, τοπικά, ένα πολύ λεπτό στρώμα στο οποίο η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερη από εκείνη των οπών. Το στρώμα αυτό συμπεριφέρεται ως τύπου-N και η παρουσία του αποκαθιστά την αγωγιμότητα και συνεπώς το ηλεκτρικό ρεύμα, μεταξύ πηγής και απαγωγού. Αν, στη συνέχεια, αυξηθεί η θετική τάση της πύλης, θα αυξηθεί και η πυκνότητα των ηλεκτρονίων στο υπόστρωμα. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ρεύματος απαγωγού (βλέπε σχήμα 4.6.6). Επειδή το κανάλι είναι N-τύπου, η διάταξη θα είναι **MOSFET πύκνωσης N-καναλιού** (n-channel enhancement mode MOSFET).

Το υπόστρωμα είναι P-τύπου και με την παρουσία του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου ένα λεπτό στρώμα αυτού, το οποίο εφάπτεται του στρώματος διοξειδίου του πυριτίου, μετατρέπεται σε N-τύπου. Αυτό το λεπτό στρώμα, το οποίο αλλάζει τύπο αγωγιμότητας, ονομάζεται **στρώμα αναστροφής N-τύπου** (inversion layer).



Σχήμα 4.6.7 Σύμβολα MOSFET τύπου πύκνωσης (α) N-καναλιού και (β) P-καναλιού

Η ελάχιστη τάση πύλης-πηγής, η οποία προκαλεί την εμφάνιση του στρώματος αναστροφής N-τύπου ονομάζεται **τάση κατωφλίου**

(threshold voltage) και σημειώνεται με $V_{GS(th)}$. Έτσι, όταν η τάση της πύλης είναι μικρότερη από την τάση κατωφλίου το MOSFET είναι ανοικτό. Αντίθετα, όταν η τάση της πύλης είναι μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου, το MOSFET άγει.

Στο σχήμα 4.6.6α παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ρεύματος απαγωγού συναρτήσει της τάσης απαγωγού-πηγής για διάφορες τιμές της τάσης πύλης. Η χαμηλότερα ευρισκόμενη καμπύλη αντιστοιχεί σε τάση πύλης ίση με την τάση κατωφλίου ($V_{GS(th)}$). Έτσι όταν η τάση πύλης είναι μικρότερη της τάσης κατωφλίου το ρεύμα απαγωγού είναι σχεδόν μηδέν. Αντίθετα, όταν η τάση πύλης είναι μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου το MOSFET άγει και το ρεύμα απαγωγού καθορίζεται από την τάση πύλης. Στις χαρακτηριστικές του σχήματος (4.6.6.α) παρατηρούμε μια συμπεριφορά αντίστοιχη με αυτή των MOSFET αραίωσης, δηλαδή μια περιοχή όπου το ρεύμα αυξάνει απότομα (ωμική περιοχή) και μια περιοχή όπου το ρεύμα παραμένει σχεδόν σταθερό (ενεργός περιοχή ή περιοχή πηγής ρεύματος). Σε αυτό το σημείο πρέπει να προσέξουμε το ότι στα **MOSFET πύκνωσης δεν υπάρχει τάση συμπίεσης**, αφού σ' αυτά δεν υπάρχουν περιοχές φορτίου χώρου, οι οποίες να ενώνονται, αλλά περιοχή αναστροφής. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται διαφορετικό σύμβολο, το V_K^I , για την τάση απαγωγού που χωρίζει την ωμική από την ενεργό περιοχή. Η τάση αυτή υπολογίζεται από τη σχέση

$$V_K^I = I_D \cdot R_{DS} \quad 4.6.1$$

Στο σχήμα (4.6.6β) παρουσιάζεται η χαρακτηριστική διαγωγιμότητας, η οποία και στην περίπτωση των MOSFET πύκνωσης αποτελεί μέρος μιας παραβολής. Η παραβολή αρχίζει, όπως αναμένεται από τα παραπάνω, από το σημείο $V_{GS(th)}$. Εδώ πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο ότι στα MOSFET πύκνωσης δεν υπάρχει I_{DSS} . Αντί αυτού οι κατασκευαστές δίνουν στους πίνακες κάθε διάταξης το ρεύμα απαγωγού $I_{D(on)}$ για δεδομένη $V_{GS(on)}$ για κάποιο σημείο, το οποίο βρίσκεται αρκετά υψηλότερα από την τάση κατωφλίου. Έτσι, στα MOSFET πύκνωσης οι παράμετροι I_{DSS} και $V_{GS(th)}$ των MOSFET αραίωσης αντικαθιστώνται με τις παραμέτρους $I_{D(on)}$, $V_{GS(on)}$ και $V_{GS(th)}$.

Στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης το MOSFET τύπου πύκνωσης βρίσκεται σε κατάσταση off, επειδή δεν υπάρχει κανάλι μεταξύ πηγής και απαγωγού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στο κυκλωματικό σύμβολο

το κανάλι να δηλώνεται με μια διακεκομμένη γραμμή και, κατὰ αυτό τον τρόπο, να διαφέρει από εκείνο του MOSFET αραιώσης (σχήμα 4.6.7). Στο σχήμα 4.6.7 δίδεται και το κυκλωματικό σύμβολο ενός MOSFET πύκνωσης P-καναλιού. Σ' αυτή την περίπτωση το υπόστρωμα είναι N-τύπου, η τάση κατωφλίου αρνητική και το ρεύμα απαγωγού ρέει σε αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του MOSFET N-καναλιού.

Σε κάθε τύπο MOSFET, αραιώσης ή πύκνωσης, παρεμβάλλεται μεταξύ της πύλης και του καναλιού ένα λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου. Από το πάχος του στρώματος του διοξειδίου του πυριτίου και τη διηλεκτρική αντοχή του υλικού (10^7 V/cm) συνεπάγεται ότι η τάση που εφαρμόζεται στην πύλη μπορεί να κυμαίνεται σε κάποια όρια, τα οποία αν ξεπεραστούν το MOSFET καταστρέφεται. Τα όρια τάσης πύλης καθορίζονται με το $V_{GS(max)}$ και στην περίπτωση του VN10 είναι $V_{GS(max)} = \pm 40$ V.

Το μονωτικό στρώμα του διοξειδίου του πυριτίου της πύλης μπορεί να καταστραφεί και από άλλους λιγότερο προφανείς λόγους, εκτός από την επιβολή υψηλής τάσης. Η τοποθέτηση ή η απομάκρυνση του MOSFET από ένα κύκλωμα, το οποίο ήδη τροφοδοτείται, μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη μεταβατικών τάσεων υψηλότερων από τη $V_{GS(max)}$. Επίσης τα ηλεκτροστατικά φορτία που εναποτίθενται στην πύλη ενός MOSFET όταν το πιάσουμε, μπορούν να αναπτύξουν τάσεις που υπερβαίνουν τη $V_{GS(max)}$. Γι' αυτό τον λόγο τα MOSFET προστατεύονται με αγώγιμο δακτυλίδι, το οποίο απομακρύνεται μετά την τοποθέτησή τους ή μεταφέρονται σε αγώγιμο σάκο και τοποθετούνται από τεχνικούς, οι οποίοι πατούν σε γειωμένο αγώγιμο δάπεδο ή φέρουν αγώγιμο βραχιόλι το οποίο είναι επίσης γειωμένο.

4.6.3 Ανάγνωση τεχνικών χαρακτηριστικών

Τα φυλλάδια των τεχνικών χαρακτηριστικών των MOSFET μοιάζουν με εκείνα των JFET. Έτσι διακρίνονται οι μέγιστες εκτιμήσεις (maximum ratings), τα χαρακτηριστικά συνεχούς και εναλλασσομένου, οι χαρακτηριστικές καμπύλες και τα μηχανικά χαρακτηριστικά, δηλαδή το είδος κελύφους του JFET που εξετάζουμε.

Στο τεχνικό φυλλάδιο αναφέρονται οι κωδικοί αριθμοί και ο τύπος των MOSFET. Στη συνέχεια αναφέρονται κάποιες βασικές εφαρμογές για τις οποίες έχουν κατασκευαστεί οι συγκεκριμένες διατάξεις. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι απόλυτες μέγιστες εκτιμήσεις και ο τύπος του

κελύφους, αν είναι κοινός, με τους ακροδέκτες και ακολουθούν τα χαρακτηριστικά συνεχούς (static) και εναλλασσόμενου (dynamic). Στην περίπτωση των MOSFET υπάρχει μια επιπλέον παράμετρος, η μέγιστη τάση της πύλης.

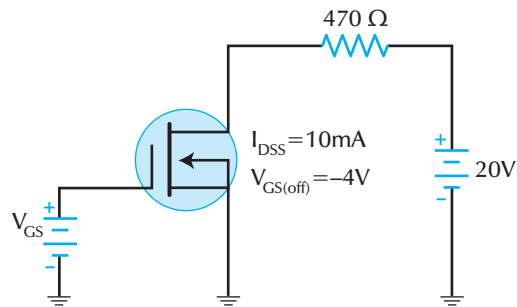
Εφαρμογές των MOSFET πύκνωσης

Τα MOSFET τύπου πύκνωσης χρησιμοποιούνται σε αναλογικά και κυρίως σε ψηφιακά ηλεκτρονικά. Ο τρόπος κατασκευής τους επιτρέπει τη εύκολη ολοκλήρωση MOSFET P και N-καναλιού, με αποτέλεσμα την κατασκευή συμπληρωματικών διατάξεων CMOS. Σε αναλογικά κυκλώματα χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τελεστικών ενισχυτών, όπως π.χ. ο TLC251 (Texas Instruments) και ο CA3130 (HARRIS). Στα ψηφιακά ηλεκτρονικά τα συναντάμε σε μνήμες RAM και ROM σε μικροεπεξεργαστές 8-64-bit κλπ. Επειδή οι διαστάσεις των MOSFET πύκνωσης είναι πολύ μικρές επιτρέπουν τη συνεχή αύξηση της κλίμακας ολοκλήρωσης επιτυγχάνοντας υπερυψηλή κλίμακα ολοκλήρωσης (ULSI, Ultra Large Scale Integration). Ως παράδειγμα μπορούμε να έχουμε το ότι σήμερα στα εμπορικά ολοκληρωμένα κυκλώματα (Pentium II, 350MHz) το μήκος καναλιού, δηλαδή η απόσταση μεταξύ πηγής και απαγωγού, είναι της τάξης των 0,25μm και εκτιμάται ότι πριν από το 2010 η τεχνολογία θα επιτύχει την κατασκευή εμπορικών κυκλωμάτων με μήκος καναλιού μικρότερο των 0,15μm. Ένα άλλο πλεονέκτημα των MOSFET πύκνωσης είναι η μικρή κατανάλωση ισχύος τους, η οποία στα ψηφιακά κυκλώματα –μνήμες και μικροεπεξεργαστές – μετράται ως Joule/bit. Αυτή η μικρή κατανάλωση ισχύος επέτρεψε την κατασκευή φορητών υπολογιστών ισχυρής υπολογιστικής ικανότητας, όπως οι Pentium II, εφαρμογές σε τηλεπικοινωνιακούς δορυφόρους, την κατασκευή κινητών τηλεφώνων κλπ.

Τα MOSFET πύκνωσης δεν χρησιμοποιούνται μόνο σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος. Μια άλλη περιοχή εφαρμογών είναι οι εφαρμογές ισχύος. Έτσι τα MOSFET πύκνωσης εφαρμόζονται σε μετατροπείς τάσης, από συνεχή σε εναλλασσόμενη (inverter) και χρησιμοποιούνται σε παλμοτροφοδοτικά, μονάδες εξόδου ενισχυτών τάξης B ή AB υψηλής ισχύος, κλπ.

Παράδειγμα 4.6.4

Να υπολογίσετε την τάση μεταξύ απαγωγού και πηγής στο MOSFET του διπλανού κυκλώματος, όταν η τάση πύλης είναι μηδέν.



Λύση

Επειδή η τάση πύλης είναι μικρότερη της τάσης κατωφλίου και το MOSFET είναι τύπου πύκνωσης, συμπεραίνουμε ότι η διάταξη δεν άγει και συνεπώς το ρεύμα του απαγωγού είναι μηδέν. Άρα

$$V_{DS} = 20 \text{ V}$$

Παράδειγμα 4.6.5

Στο κύκλωμα του προηγούμενου παραδείγματος, να υπολογίσετε την τάση απαγωγού – πηγής όταν η τάση πύλης είναι 5 V.

Λύση

Υποθέτουμε ότι το MOSFET λειτουργεί στην ενεργό περιοχή, δηλαδή ως πηγή ρεύματος. Επειδή η τάση της πύλης είναι ίση με τη $V_{GS(on)}$, το ρεύμα απαγωγού θα είναι 1 mA. Έτσι η τάση απαγωγού – πηγής υπολογίζεται ως εξής:

$$V_{DS} = 20 \text{ V} - (1 \text{ mA}) \times (3,6 \text{ K}\Omega) = 16,4 \text{ V}$$

Η τάση V_K^I υπολογίζεται από την εξ. 4.6.1:

$$V_K^I = (1 \text{ mA}) \times (1 \text{ K}\Omega) = 1 \text{ V}$$

Για να κρίνουμε αν είναι σωστή η υπόθεση ότι το MOSFET λειτουργεί στην ενεργό περιοχή συγκρίνουμε τις δύο τάσεις και διαπιστώνουμε ότι

$$V_{DS} > V_K^I$$

Άρα η αρχική υπόθεση είναι σωστή.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 4.6

- Στα **MOSFET** μεταξύ πύλης και καναλιού παρεμβάλλεται λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου, στο οποίο οφείλεται η πολύ υψηλή αντίσταση εισόδου της διάταξης.
- Τα **MOSFET**, ανάλογα με το αν το υπόστρωμα εκτείνεται ή όχι μέχρι το στρώμα του διοξειδίου του πυριτίου της πύλης, χωρίζονται σε **MOSFET πύκνωσης** και σε **MOSFET αραίωσης** αντίστοιχα.
- Τα **MOSFET αραίωσης** μπορούν να λειτουργούν σε αραίωση και σε πύκνωση επειδή είναι δυνατή η εφαρμογή θετικών και αρνητικών τάσεων στην πύλη τους.
- Η λειτουργία των MOSFET αραίωσης μοιάζει με αυτή των JFET. Έτσι υπάρχει :
 - A. το ρεύμα απαγωγού** στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης, μόνο που στα MOSFET αραίωσης δεν είναι το μέγιστο ρεύμα
 - B. η τάση συμπίεσης** και
 - Γ. η τάση αποκοπής πύλης - πηγής**
- Η λειτουργία των **MOSFET πύκνωσης διαφέρει** από αυτή των **MOSFET αραίωσης**. Σε αυτά δεν υπάρχει περιοχή φορτίου χώρου αλλά περιοχή αναστροφής. Γι' αυτό το λόγο δεν έχει νόημα το ρεύμα απαγωγού στην κατάσταση βραχυκυκλωμένης πύλης και η τάση συμπίεσης, παρά μόνο η τάση κατωφλίου, η οποία αντιστοιχεί στην τάση αποκοπής πύλης - πηγής
- Η **χαρακτηριστική διαγωγιμότητας** παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού του ρεύματος απαγωγού για κάθε τιμή της τάσης πύλης.
- Η τάση που εφαρμόζεται στην πύλη μπορεί να κυμαίνεται μέσα σε ορισμένα όρια. Πέραν αυτών των ορίων καταστρέφεται το μονωτικό στρώμα της πύλης και συνεπώς το MOSFET.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ – ΑΣΚΗΣΕΙΣ 4.6

4.6.1. Ένα MOSFET τύπου αραίωσης

λειτουργεί κυρίως ως:

α. Ένα JFET

β. Μια πηγή ρεύματος

γ. Μία αντίσταση

δ. Ένα MOSFET τύπου πύκνωσης

4.6.2. Ποια από τις παρακάτω διατά-

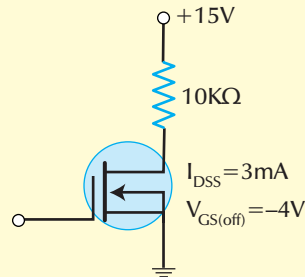
Ξεις έφερε επανάσταση στην τεχνολογία των υπολογιστών (μικροεπεξεργαστών, μνημών κλπ)

- Το JFET
- Το MOSFET τύπου αραιώσης
- Το MOSFET τύπου πύκνωσης
- Το διπολικό τρανζίστορ
- Η δίοδος

4.6.3. Η τάση $V_{GS(on)}$ ενός MOSFET N-καναλιού και τύπου πύκνωσης είναι:

- Μικρότερη από την τάση κατωφλίου
- Ίση με την τάση κατωφλίου
- Μεγαλύτερη από την $V_{DS(on)}$
- Μεγαλύτερη από την $V_{GS(th)}$

4.6.4. Να υπολογίσετε την τάση απαγωγού - πηγής του διπλανού κυκλώματος



4.6.5. Αν, στο ίδιο κύκλωμα, η τάση πύλης γίνει $-1V$, πόση θα είναι η τάση απαγωγού - πηγής;

4.7 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 που δόθηκε για τον ενισχυτή με 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).

4.7.1 AC μοντέλο του JFET

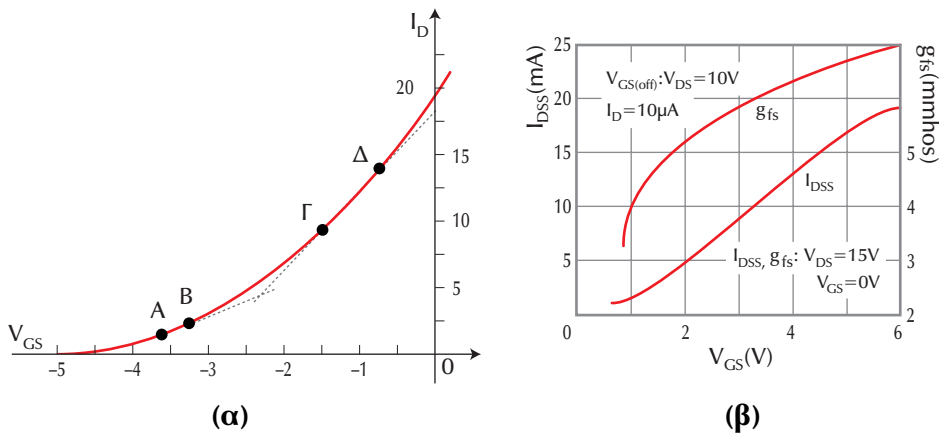
Για να κατασκευαστεί ένας ενισχυτής με JFET ή MOSFET θα πρέπει κατ' αρχήν να κατανοηθεί ο τρόπος λειτουργίας της διάταξης για το εναλλασσόμενο και στη συνέχεια ο τρόπος επιλογής του σημείου λειτουργίας Q, όπως έγινε για τα διπολικά τρανζίστορ

Κάθε FET έχει μια AC παράμετρο που ονομάζεται **διαγωγιμότητα** και συμβολίζεται με g_m . Μαθηματικά ορίζεται ως:

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}$$

4.7.1

όπου ΔI_D είναι η μεταβολή του ρεύματος απαγωγού η οποία έχει προκληθεί από μια μεταβολή ΔV_{GS} της τάσης πύλης, όταν η τάση απαγωγού-πηγής είναι σταθερή. Η μονάδα μέτρησης της διαγωγιμότητας είναι το αντίστροφο του Ωm που ονομάζεται ζήμενς (siemens, S) με υποπολλαπλάσιο το μικροζήμενς (μS). Παλαιότερα χρησιμοποιούταν η μονάδα $\text{M}\omega$ (mho), η οποία προέκυπτε από την αντίστροφη γραφή του Ωm (ohm). Έτσι ο αναγνώστης μπορεί ακόμα να συναντήσει σε τεχνικά φυλλάδια κατασκευαστών τη μία ή την άλλη μονάδα μέτρησης της διαγωγιμότητας. Επιπλέον, ο αναγνώστης μπορεί να συναντήσει και το σύμβολο g_{fs} αντί του g_m .

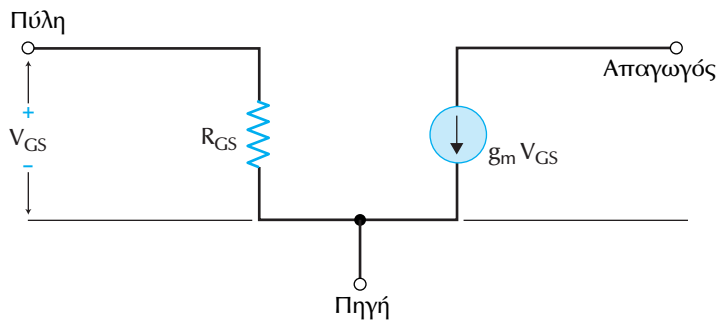


Σχήμα 4.7.1 (α) Γραφικός προσδιορισμός της διαγωγιμότητας και (β) χαρακτηριστική διαγωγιμότητας και ρεύματος απαγωγού από το τεχνικό φυλλάδιο ενός JFET (MPF102)

Η διαγωγιμότητα γίνεται πιο εύκολα κατανοητή μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης της διαγωγιμότητας, που εικονίζεται στο σχήμα (4.7.1α.) Αυτό φαίνεται καθαρά ότι η διαγωγιμότητα g_m δίδεται από την κλίση της χαρακτηριστικής της διαγωγιμότητας. Για να υπολογιστεί, λοιπόν, η διαγωγιμότητα πρέπει να ληφθούν δύο γειτονικά σημεία, π.χ. τα A και B ή τα Γ και Δ, τα οποία να περιλαμβάνουν ενδιάμεσα το σημείο Q. Η διαίρεση της μεταβολής του I_D προς τη μεταβολή της V_{GS} δίνει το g_m . Στο ίδιο σχήμα παρατηρούμε ότι η κλίση της καμπύλης και συνεπώς η διαγωγιμότητα αυξάνεται όταν αυξάνεται το ρεύμα απαγωγού. Αυτό

οφείλεται στο γεγονός ότι όσο αυξάνεται το ρεύμα του απαγωγού αυξάνεται και η μεταβολή του για ίδια μεταβολή της τάσης πύλης. Η εξάρτηση της διαγωγιμότητας από το ρεύμα του απαγωγού, και συνεπώς την τάση της πύλης, δίνεται από όλους τους κατασκευαστές στα τεχνικά φυλλάδια των JFET και MOSFET. Στο σχήμα (4.7.1β) παρουσιάζεται η χαρακτηριστική ρεύματος απαγωγού του JFET MPF102, στην οποία έχει ενσωματωθεί και η εξάρτηση της διαγωγιμότητας από την τάση πύλης. Έτσι, αν γνωρίζουμε το ρεύμα απαγωγού, βρίσκουμε από το ίδιο σχήμα και το μέτρο της διαγωγιμότητας.

Έχοντας δεδομένη τη διαγωγιμότητα, δηλαδή το βαθμό ελέγχου του ρεύματος απαγωγού από την τάση της πύλης, είναι δυνατή η αντικατάσταση του JFET με το μοντέλο ενός απλού ισοδύναμου κυκλώματος, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα (4.7.2).



Σχήμα 4.7.2 Ισοδύναμο κύκλωμα ενός JFET, το οποίο λειτουργεί στην ενεργό περιοχή

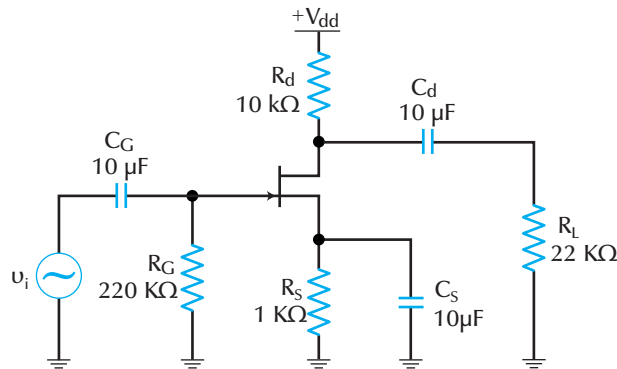
Η αντίσταση της πύλης (R_{GS}), όπως προαναφέρθηκε είναι πολύ μεγάλη. Έτσι, πολλές φορές παραλείπεται από το ισοδύναμο κύκλωμα με αποτέλεσμα το κύκλωμα εισόδου του MOSFET να είναι ανοικτό.

Το κύκλωμα του σχήματος (4.7.2) αντιστοιχεί σε ένα JFET το οποίο λειτουργεί στην ενεργό περιοχή. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην ενεργό περιοχή ένα JFET συμπεριφέρεται ως πηγή ρεύματος. Έτσι, η AC συνιστώσα του ρεύματος απαγωγού, i_D , θα δίδεται από την εξίσωση:

$$i_D = g_m \cdot u_{GS} \quad 4.7.2$$

όπου u_{GS} είναι η AC τάση μεταξύ πύλης και πηγής. Ανάμεσα στην πύλη και την πηγή υπάρχει η **πολύ μεγάλη αντίσταση** της ανάστροφα πολωμένης διόδου πύλης πηγής R_{GS} (βλέπε παράδειγμα 4.5.1). Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί μια προσέγγιση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μό-

νο για χαμηλές συχνότητες, στις οποίες οι παρασιτικές χωρητικότητες των διόδων πύλης-πηγής και πύλης-απαγωγού δεν παίζουν ρόλο.



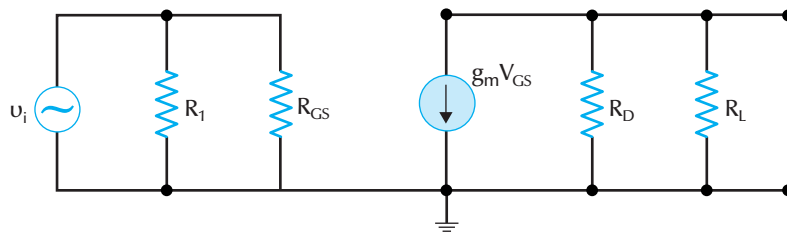
Σχήμα 4.7.3 Ηλεκτρονικό διάγραμμα ενός ενισχυτή με JFET, σε συνδεσμολογία κοινής πηγής (CS)

4.7.2 Ανάλυση ενισχυτή με JFET

Στο σχήμα 4.7.3 δίδεται ένας ενισχυτής με JFET συνδεσμολογίας κοινής πηγής (CS) και θεωρούμε ότι το JFET λειτουργεί στην ενεργό περιοχή.

Η λειτουργία του JFET ως στοιχείου ενισχυτή συνδεσμολογίας κοινής πηγής κατανοείται εύκολα. Όταν εφαρμόζεται μία AC τάση (u_i) στην πύλη του JFET, τότε αναπτύσσεται μια AC τάση μεταξύ πύλης-πηγής ($-u_{GS}$). Η τελευταία προκαλεί στο ρεύμα του απαγωγού μια διακύμανση, δηλαδή εισάγει μια AC συνιστώσα. Το AC ρεύμα του απαγωγού διαρρέει την αντίσταση του απαγωγού R_D με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται στα άκρα της μια AC τάση, που είναι η τάση εξόδου u_L .

Αν αυξηθεί η τάση πύλης-πηγής αυξάνεται και το ρεύμα απαγωγού με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η τάση απαγωγού. Αντίθετα, αν ελαττωθεί η τάση πύλης-πηγής ελαττώνεται και το ρεύμα απαγωγού με αποτέλεσμα να αυξάνεται η τάση απαγωγού. Αν η τάση εισόδου είναι ημιτονική τότε η θετική ημιπερίοδος της τάσης εισόδου δίνει την αρνητική ημιπερίοδο της τάσης εξόδου. Συνεπώς ο ενισχυτής συνδεσμολογίας κοινής πηγής (CS) προκαλεί αναστροφή φάσης. Με αντίστοιχο τρόπο αποδεικνύεται η μη αλλαγή φάσης στους ενισχυτές κοινού απαγωγού και κοινής πύλης.



Σχήμα 4.7.4 Ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή με JFET σε συνδεσμολογία κοινής πηγής (CS)

Η λειτουργία του JFET σε ενισχυτή συνδεσμολογίας κοινής πηγής μελετάται εύκολα με τη βοήθεια του ισοδύναμου κυκλώματος. Για τη χρήση αυτού του ισοδύναμου κυκλώματος θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι για το εναλλασσόμενο :

- η πηγή είναι γειωμένη μέσω του C_S
- η πύλη συνδέεται στην πηγή σήματος (u_i) μέσω του C_G
- η αντίσταση φόρτου συνδέεται στον απαγωγό μέσω του C_D
- η αντίσταση του απαγωγού είναι συνδεδεμένη στη γη, μέσω της πηγής τροφοδοσίας V_{DD} η οποία θεωρείται ιδανική.

Με τη βοήθεια αυτών καταλήγουμε στο ισοδύναμο κύκλωμα του ενισχυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα (4.7.4).

Από το ισοδύναμο κύκλωμα υπολογίζεται η αντίσταση εισόδου R_i του ενισχυτή ίση με την ισοδύναμη αντίσταση των παράλληλα συνδεδεμένων R_1 και R_{GS} . Επειδή όμως στις περισσότερες περιπτώσεις η αντίσταση εισόδου του JFET είναι πολύ μεγαλύτερη από την R_1 ($R_{GS} \gg R_1$), η αντίσταση εισόδου τελικά καθορίζεται από την R_1 .

$$R_{in} = \frac{R_1 \cdot R_{GS}}{R_1 + R_{GS}} \approx R_1 \quad 4.7.3$$

Στην έξοδο οι R_D και R_L είναι συνδεδεμένες παράλληλα οπότε η τάση εξόδου (u_L) θα είναι ίση με το γινόμενο της τιμής του ρεύματος της πηγής ρεύματος $g_m \cdot v_{GS}$ επί την ισοδύναμη αντίσταση των R_D και R_L ήτοι.

$$v_L = (g_m \cdot v_{GS}) \frac{R_D \cdot R_L}{R_D + R_L} \quad 4.7.4$$

Συνεπώς η απολαβή ή κέρδος τάσης A_v , η οποία ορίζεται από το πηλίκο της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου, θα δίδεται από την εξίσωση:

$$A_v = \frac{u_L}{u_i} = -g_m \cdot \frac{R_D \cdot R_L}{R_D + R_L} \quad 4.4.7.5$$

όπου το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στην αναστροφή φάσης που προκύπτει μεταξύ AC τάσης απαγωγού και AC τάσης πύλης-πηγής.

Στην περίπτωση κατά την οποία δεν υπάρχει ο πυκνωτής C_s , η πηγή του JFET δεν νοείται συνδεδεμένη στη γη. Τότε η AC τάση μεταξύ της πύλης-πηγής είναι μικρότερη από την τάση εισόδου. Συγκεκριμένα είναι ίση με τη διαφορά της τάσης εισόδου μείον την AC τάση, που αναπτύσσεται κατά μήκος της R_s , δηλαδή

$$u_{GS} = u_i - (g_m \cdot u_{GS}) \cdot R_s \quad 4.7.6$$

Σε αυτή την περίπτωση, για λόγους απλότητας, η διαγωγιμότητα g_m μπορεί να αντικατασταθεί από την

$$g'_m = \frac{g_m}{1 + g_m \cdot R_s} \quad 4.7.7$$

και να ακολουθηθεί η προηγούμενη διαδικασία υπολογισμού.

Παράδειγμα 4.7.1

Στο κύκλωμα του σχ. 4.7.3 δίνεται ότι το JFET λειτουργεί στην ενεργό περιοχή, η τάση εισόδου είναι $u_i = 20 \text{ mV}$ και η διαγωγιμότητα $g_m = 4000 \text{ } \mu\text{S}$. Να υπολογιστεί η απολαβή και η τάση εξόδου u_L .

Λύση

Επειδή $R_D = 10 \text{ K}\Omega$ και $R_L = 22 \text{ K}\Omega$, η ισοδύναμη αντίσταση θα είναι

$$\frac{R_d \cdot R_L}{R_d + R_L} = \frac{10\text{K}\Omega \times 22\text{K}\Omega}{10\text{K}\Omega + 22\text{K}\Omega} = 6,88\text{K}\Omega$$

Συνεπώς η απολαβή και η τάση εξόδου θα είναι αντίστοιχα

$$A_v = -g_m \cdot \frac{R_d \cdot R_L}{R_d + R_L} = -4000\mu\text{S} \times 6,88\text{K}\Omega = -27,5$$

$$\text{και } u_0 = A_v \cdot u_i = -27,5 \times 20 \text{ mV} = -550 \text{ mV}$$

όπου το πλην δηλώνει αναστροφή φάσης.

Παράδειγμα 4.7.2

Να υπολογιστεί η απολαβή και η τάση εξόδου στο παράδειγμα 4.7.1 όταν δεν υπάρχει ο πυκνωτής C_S .

Λύση

Αφού δεν υπάρχει ο πυκνωτής C_S η πηγή του JFET δεν είναι γειωμένη. Έτσι χρησιμοποιούμε την ίδια μέθοδο επίλυσης του προβλήματος μόνο που αντικαθιστούμε τη διαγωγιμότητα g_m με αυτή που μας δίνει η εξ.4.7.7

$$g'_m = \frac{g_m}{1 + g_m \cdot R_S} = \frac{4000 \times 10^{-6} \text{ S}}{1 + (4000 \times 10^{-6} \text{ S}) \times 1000 \Omega} =$$

$$= \frac{4000 \times 10^{-6}}{5} = 800 \times 10^{-6} \text{ S} = 800 \mu\text{S}$$

Συνεπώς η απολαβή και η τάση εξόδου θα είναι αντίστοιχα

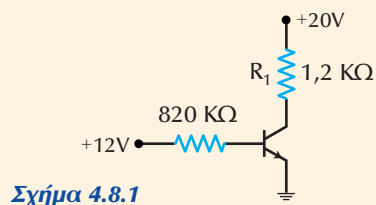
$$A_v = -g'_m \cdot \frac{R_d \cdot R_L}{R_d + R_L} = -800 \mu\text{S} \times 6,88 \text{ K}\Omega = -5,5$$

$$\text{και } u_0 = A_v \cdot u_i = -5,5 \cdot 20 \text{ mV} = -110 \text{ mV}$$

Το πλην δηλώνει αναστροφή φάσης.

ΓΕΝΙΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΕΠΑΝΑΛΗΨΗΣ

4.8.1 Να υπολογιστεί η τάσης συλλέκτη-γης στο κύκλωμα του σχ.4.8.1 αν $\beta_{DC}=100$.

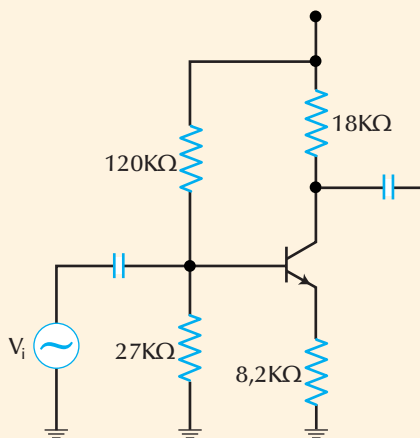


Σχήμα 4.8.1

4.8.2 Αν το β_{DC} μεταβληθεί από 25 έως 300, ποία θα είναι η μέγιστη και ποία η ελάχιστη τάση συλλέκτη-γης.

4.8.3 Αν $V_{CE(SAT)}=0,25\text{V}$, να υπολογίσετε την τάση βάσης ώστε $V_{CE}=V_{CE(SAT)}$

4.8.4 Στο κύκλωμα, του ενισχυτή (Σχ.4.8.2), να υπολογίσετε την τάση στον εκπομπό.

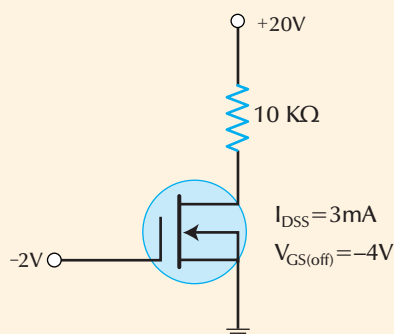


Σχήμα 4.8.2

- 4.8.5 Στο κύκλωμα του ενισχυτή (Σχ.4.8.1), να υπολογίσετε την τάση στο συλλέκτη.
- 4.8.6 Στο κύκλωμα (Σχ. 4.8.2) να υπολογίσετε το σημείο λειτουργίας Q του τρανζίστορ.
- 4.8.7 Αν το β_{DC} του τρανζίστορ μεταβληθεί από 30 έως το 300, θα μετακινηθεί το σημείο λειτουργίας Q;
- 4.8.8 Αν διπλασιαστεί η αντίσταση εκπομπού, να βρείτε προς ποια κατεύθυνση θα μετακινηθεί το σημείο Q.
- 4.8.9 Να υπολογίσετε την απολαβή τάσης και την τάση εξόδου του διπλανού ενισχυτή ($V_i=10mV$).
- 4.8.10 Αν στον προηγούμενο ενισχυτή (σχ.4.8.2) συνδέσουμε παράλληλα στην $8,2K\Omega$ έναν πυκνωτή μεγάλης χωρητικότητας, να υπολογίσετε τη νέα τιμή της απολαβής τάσης και της τάσης εξόδου.
- 4.8.11 Για το JFET 2N3823 δίδεται οι τιμές: $I_{DSS} = 20\text{ mA}$ και $V_{GS(off)} = -8\text{ V}$. Να υπολογίσετε την τιμή της R_{DC} στην ωμική περιοχή.

4.8.12 Για το JFET J300 δίδεται ότι $I_{DSS} = 45\text{ mA}$ και $V_{GS(off)} = -7\text{ V}$. Να υπολογίσετε την τιμή του ρεύματος απαγωγού για τις εξής τάσεις πύλης: -6 V , -5 V , -4 V , -3 V , -2 V και -1 V .

4.8.13 Να υπολογίσετε την τάση απαγωγού-πηγής του σχ.4.8.3 κυκλώματος.

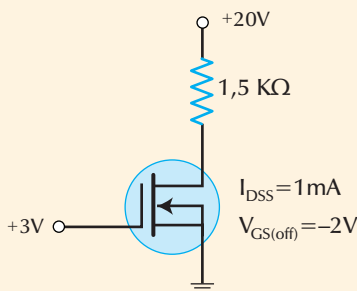


Σχήμα 4.8.3

- 4.8.14 Αν, στο σχ.4.8.3, η τάση της πύλης γίνει -1 V να υπολογίσετε την τάση απαγωγού - πηγής.
- 4.8.15 Αν, στο σχ.4.8.3, η τάση της πύλης γίνει $0V$ και η τάση τροφοδοσίας απαγωγού αυξηθεί στα 25 V , να υπολογίσετε την τάση απαγωγού - πηγής.
- 4.8.16 Αν, στο σχ. 4.8.3, η αντίσταση απαγωγού γίνει $8,2\text{ K}\Omega$, να υπολογίσετε την τάση απαγωγού - πηγής.
- 4.8.17 Αν στο κύκλωμα, σχ. 4.8.3, η αντίσταση γίνει $15\text{ K}\Omega$, να υπολογίσετε την τάση απαγωγού-πύλης.
- 4.8.18 Ποία είναι η τάση απαγωγού - πηγής του κυκλώματος του σχ. 4.8.4;

4.8.19. Αν, στο σχ.4.8.4, η τάση πύλης αυξηθεί στα +3V και η τάση τροφοδοσίας απαγωγού αυξηθεί στα +30 V, να υπολογίσετε την τάση απαγωγού – πηγής.

4.8.20. Αν, στο σχ.4.8.4, η αντίσταση του απαγωγού αυξηθεί και γίνει 33 KΩ, ποία θα είναι η τάση απαγωγού – πηγής;

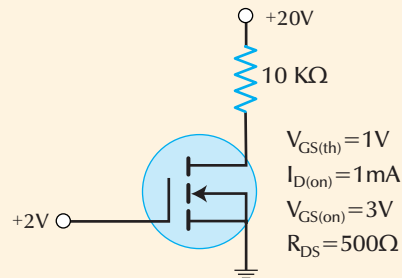


Σχήμα 4.8.4

4.8.21 Να υπολογίσετε την τάση

απαγωγού – πηγής του κυκλώματος του σχ.4.8.5.

4.8.22. Αν, στο σχ 4.8.5, η αντίσταση του απαγωγού γίνει 15 KΩ, να υπολογίσετε τη νέα τιμή της τάση απαγωγού – πηγής.



Σχήμα 4.8.5

4.8.23. Αν, στο σχ 4.8.5, η τάση της πύλης γίνει +15 V, ποία θα είναι η τάση απαγωγού – πηγής;

Ιστορική αναδρομή

Η πειραματική ανακάλυψη της ικανότητας ενίσχυσης ισχύος σε μια διάταξη τριών ηλεκτροδίων, η οποία σήμερα είναι γνωστή ως τρανζίστορ ακίδας, από τους W. Brattain και J. Bardeen στις 16 Δεκεμβρίου 1947, στα εργαστήρια της Bell Telephone (BTL), αποτέλεσε την αφετηρία της επανάστασης της τεχνολογίας ημιαγωγών. Στις 23 Ιανουαρίου 1948, ο W.B. Shockley έκανε μια επαναστατική ανακάλυψη, η οποία οδήγησε στη δημιουργία του τρανζίστορ επαφής. Η ανακάλυψη αυτή ήταν η θεωρητική ερμηνεία της λειτουργίας του τρανζίστορ επαφής καθώς και του τρανζίστορ ακίδων. Η θεωρία του αποτέλεσε τη βάση της τεχνολογίας κατασκευής των τρανζίστορ καθώς επίσης και της ανάπτυξης της ηλεκτρονικής.

Το πρώτο τρανζίστορ επαφής δημιουργήθηκε τον Απρίλιο του 1950 και το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν γερμάνιο.

Το 1951 ο W. Shockley ανακάλυψε το FET επαφής (JFET) το οποίο κατασκευάστηκε το 1952. Η πρώτη ανακοίνωση της δημιουργίας του MOSFET έγινε τον Ιούνιο του 1960.

Τέλος δεν θα πρέπει να παραληφθεί η ανακάλυψη του ολοκληρωμένου κυκλώματος από τον J.S. Kilby το 1958 στην Texas Instruments, η οποία απετέλεσε την αφορμή για την περαιτέρω εξέλιξη της μικροηλεκτρονικής και το σημερινό στάδιο σμίκρυνσης των τρανζίστορ, JFET και κυρίως των MOSFET.