

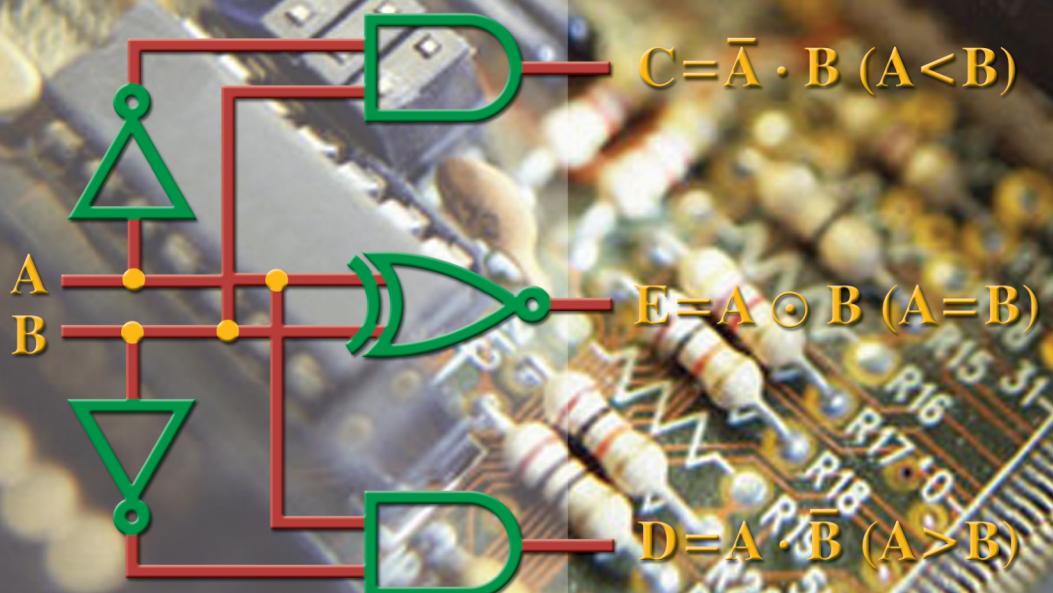


ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ  
ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΚΕΙΜΕΝΟ  
ΑΚΑΔΗΜΙΩΝ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΝΑΥΤΙΚΟΥ

# ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ

Θεοδώρου Λ. Δεληγιάννη



# 1

# ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΥΛΗΣ, ΗΜΙΑΓΩΓΟΙ



Η σύγχρονη τεχνολογία χρησιμοποιεί σχεδόν αποκλειστικά τα λεγόμενα ημιαγωγά στοιχεία, τα οποία περιλαμβάνουν διόδους διαφόρων τύπων, τρανζίστορ, θυρίντορ κλπ. Επειδή δε η σύγχρονη τεχνολογία έχει σήμερα ως αποκλειστικό σχεδόν στόχο την κατασκευή όσο το δυνατόν “καλυτέρων” και οικονομικότερων ηλεκτρονικών στοιχείων, μόνο τα ημιαγωγά υλικά προσφέρονται για τις εφαρμογές αυτές, προς το παρόν τουλάχιστον.

Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε τη φυσική των ημιαγωγών και θα θέσουμε τις βάσεις για την κατανόηση της φυσικής λειτουργίας των διαφόρων ημιαγωγών στοιχείων, τα οποία αναφέρονται χωριστά στα επόμενα κεφάλαια.

## 1.1 Ηλεκτρονικοί φλοιοί ατόμων – Σθένος και ομοιοπολικοί δεσμοί.

Κάθε άτομο, οποιουδήποτε στοιχείου, αποτελείται από τον πυρήνα, ο οποίος φέρει θετικό ηλεκτρικό φορτίο, και από τα ηλεκτρόνια, τα οποία περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα. Το συνολικό φορτίο των ηλεκτρονίων, τα οποία είναι αρνητικά φορτισμένα σωματίδια, είναι ίσο και αντίθετο με το φορτίο του πυρήνα, ώστε το άτομο σε κανονικές συνθήκες να παρουσιάζεται ηλεκτρικά ουδέτερο.

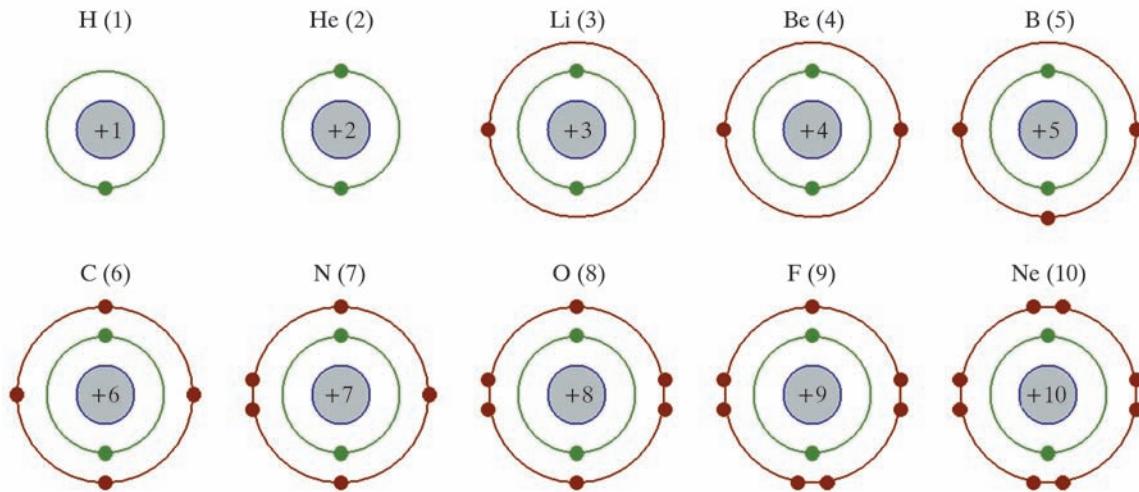
Κάθε ηλεκτρόνιο, κατά την κίνησή του γύρω από τον πυρήνα, έχει συνολική ενέργεια που είναι το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής του ενέργειας. Η ενέργεια αυτή δεν μπορεί να είναι οποιαδήποτε, είναι καθορισμένη κατά τον Bohr. Έτσι, μπορεί να λαμβάνει μόνο μία από τις επιτρεπόμενες τιμές ενέργειας, που επακόλουθα καθορίζει και την ακτίνα της αντίστοιχης τροχιάς του ηλεκτρονίου. Σε κανονικές συνθήκες τα ηλεκτρόνια κινούνται σε τροχιές που αντιστοιχούν στις κατώτερες τιμές ενέργειας, κατά την κίνησή τους δε αυτή δεν εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Τέτοια ακτινοβολία εκπέμπεται μόνον όταν ηλεκτρόνιο κινούμενο σε κάποια επιτρεπόμενη τροχιά “πέφτει” σε άλλη επιτρεπόμενη που αντιστοιχεί σε μικρότερη ενέργεια. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία έχει συχνότητα  $f$  που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{\text{αρχ.}} - E_{\text{τελ.}} = hf \quad (1.1)$$

όπου  $E_{\text{αρχ.}}$  και  $E_{\text{τελ.}}$  είναι η αρχική και η τελική ενέργεια του ηλεκτρονίου αντίστοιχα και  $h$  η σταθερά δράσεως του Planck ίση με  $6,6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ .

Ο αριθμός των ηλεκτρονίων του ατόμου, που αντιστοιχούν σε κάθε επιτρεπόμενη ενεργειακή κατάσταση, καθορίζεται από μια τετράδα αριθμών που ονομάζονται **κβαντικοί αριθμοί**. Σύμφωνα με την αρχή του Pauli δεν επιτρέπεται δύο ηλεκτρόνια να χαρακτηρίζονται από την ίδια τετράδα κβαντικών αριθμών. Μπορούμε έτσι να κατατάξουμε τα ηλεκτρόνια σε **φλοιούς** ή **στιβάδες** με τον εσωτερικό, το φλοιό K, να έχει το πολύ δύο ηλεκτρόνια, τον αμέσως επόμενο ή φλοιό L να έχει το πολύ μέχρι 8 ηλεκτρόνια κλπ. Στο σχήμα 1.1 δεικνύεται ο σχηματισμός των φλοιών στο άτομο των πρώτων στοιχείων του περιοδικού πίνακα.

Ο αριθμός των ηλεκτρονίων του εξωτερικού φλοιού καθορίζει τις χημικές ιδιότητες του ατόμου ή άλλως το **σθένος** του. Έτσι, τα αντίστοιχα στοιχεία χαρακτηρίζονται ως μονοσθενή (π.χ. υδρογόνο), δισθενή (οξυγόνο), τρισθενή (βόριο) κλπ. ανάλογα αν έχουν ένα, δύο, τρία κλπ. ηλεκτρόνια στην εξωτερική **στιβάδα** -



Σχ. 1.1.

Φλοιοί στα άτομα διαφόρων στοιχείων υδρογόνου ( $H$ ) έως και νέον ( $Ne$ ).

**δα.** Με βάση τον αριθμό των ηλεκτρονίων σθένους τα άτομα σχηματίζουν δεσμούς με άλλα άτομα και δημιουργούν μόρια. Οι θέσεις ηλεκτρονίων που διατίθενται στη στιβάδα σθένους είναι οκτώ.

Εάν τα μόρια αποτελούνται από διαφορετικά στοιχεία, όπως π.χ. το μόριο του νερού που αποτελείται από δύο άτομα υδρογόνου ( $H$ ) και ένα άτομο οξυγόνου ( $O$ ), ο σχηματισμός του μορίου οφείλεται στο λεγόμενο **χημικό δεσμό**. Για μας εδώ ενδιαφέρον έχει ο **ομοιοπολικός δεσμός** μέσω του οποίου άτομα του ίδιου στοιχείου, π.χ.  $H$ ,  $O$  κλπ. συγκροτούν τα αντίστοιχα μόρια  $H_2$ ,  $O_2$  κλπ.

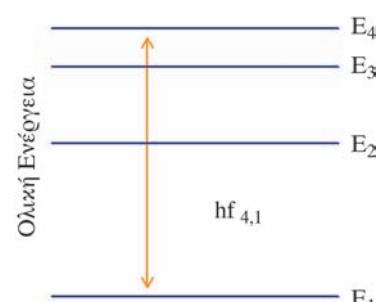
Στον ομοιοπολικό δεσμό του μορίου του  $H$  δύο άτομα  $H$  συνεισφέρουν το καθένα το ηλεκτρόνιό του με τέτοιο τρόπο, ώστε κάθε άτομο στο μόριο να είναι σαν να έχει δύο ηλεκτρόνια στη στιβάδα  $K$ , δηλαδή το μεγαλύτερο αριθμό ηλεκτρονίων που αυτή μπορεί να περιέχει. Δεχόμαστε έτοι ότι τα ηλεκτρόνια κατανέμουν τη δράση τους μεταξύ δύο ατόμων με τρόπο, που να ανήκουν πότε στο ένα άτομο και πότε στο άλλο. Όπως θα δούμε πιο κάτω, στον ομοιοπολικό δεσμό οφείλεται η συγκράτηση των ατόμων στοιχείων, όπως π.χ. του πυριτίου ( $Si$ ), του γερμανίου ( $Ge$ ) κλπ. στους αντίστοιχους κρυστάλλους που έχουν μεγάλη τεχνολογική αξία σήμερα.

## 1.2 Ενεργειακές στάθμες στα άτομα και διέγερση ατόμων.

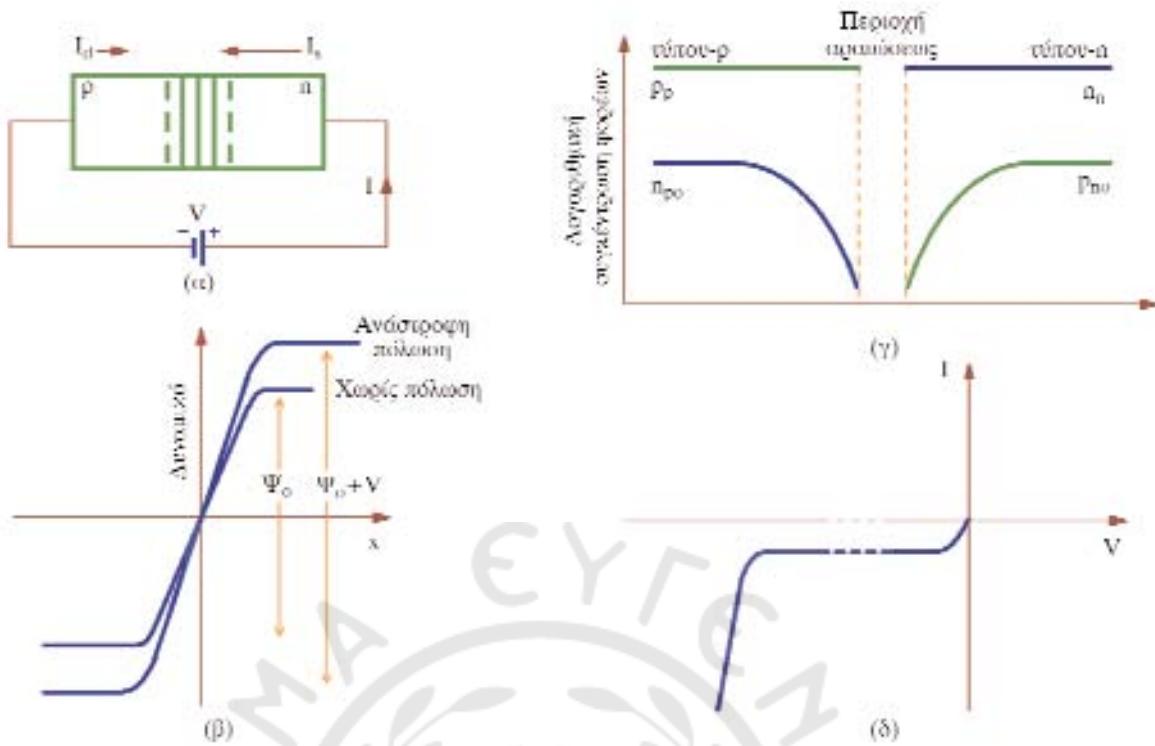
Όπως προανανεφέρθηκε η τιμή της ολικής ενέργειας, που μπορεί να έχει το ηλεκτρόνιο κατά την κίνησή του γύρω από τον πυρήνα πρέπει να είναι μία από τις επιτρεπόμενες τιμές. Κάθε μία από αυτές αντιστοιχεί σε μια τιμή του πρώτου ή κύριου αβαντικού αριθμού  $n$ . Στην τιμή  $n=1$  αντιστοιχεί η κατώτερη επιτρεπόμενη τιμή ολικής ενέργειας, την οποία παριστάνομε ως  $E_1$ , στην τιμή  $n=2$  η επόμενη ανώτερη τιμή  $E_2$  κλπ. Τις τιμές των επιτρεπομένων ενεργειών μπορούμε να τις παραστήσουμε με οριζόντιες γραμμές, τις οποίες ονομάζομε **ενεργειακές στάθμες**, σε ένα διάγραμμα όπως αυτό του σχήματος 1.2. Στο διάγραμμα αυτό οι αποστάσεις μεταξύ των σταθμών είναι ανάλογες προς τη διαφορά των αντιστοιχων τιμών ενέργειας. Αν ένα ηλεκτρόνιο “πέσει” από την τροχιά που αντιστοιχεί στην ενεργειακή στάθμη  $E_4$  στην τροχιά που αντιστοιχεί στην ενεργειακή στάθμη  $E_1$ , θα χάσει ενέργεια, η οποία θα οδηγήσει στην εκπομπή ενός φωτονίου ενέργειας.

$$\hbar f_{4,1} = E_4 - E_1 \quad (1.2)$$

Αντίθετα, για την άνοδο ενός ηλεκτρονίου από την ενεργειακή στάθμη  $E_1$  στην ενεργειακή στάθμη  $E_4$  θα πρέπει να του προσδοθεί ενέργεια ίση με τη διαφορά  $E_4-E_1$ . Η διαδικασία προσδόσεως της ανα-



Σχ. 1.2.  
Διάγραμμα σταθμών ενέργειας.



Σχ. 2.4α.

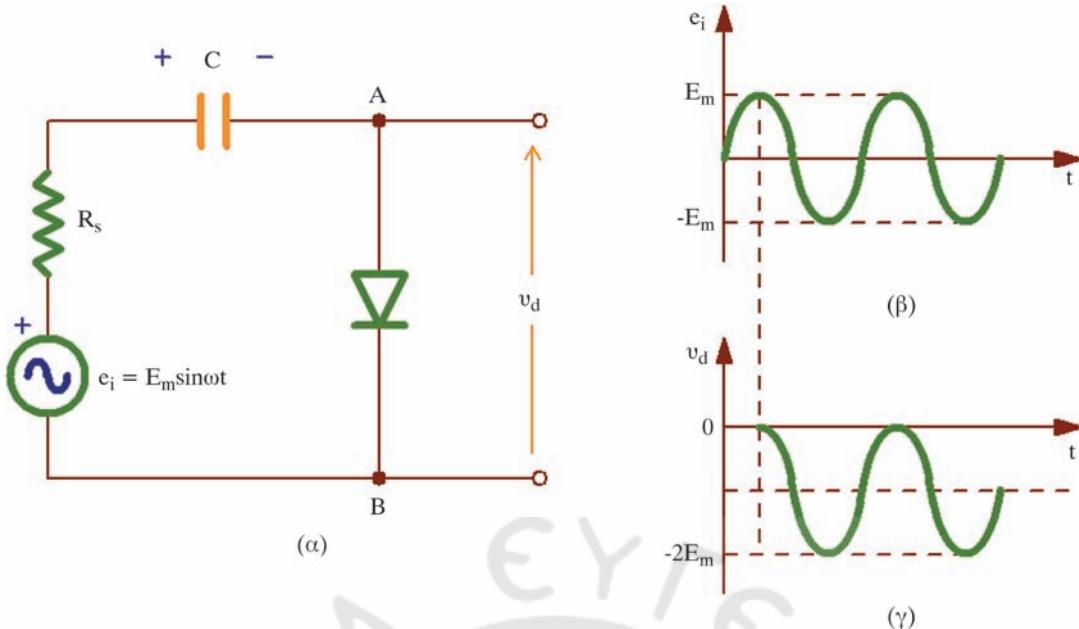
(α) Επαφή  $p-n$  με ανάστροφη πόλωση, (β) μεταβολή του φραγμού δυναμικού λόγω της ανάστροφης πόλωσεως, (γ) συγκεντρώσεις φορέων δεξιά και αριστερά της επαφής, (δ) χαρακτηριστική  $I-V$  της επαφής  $p-n$  με ανάστροφη πόλωση.

#### 2.4.2 Η επαφή $p-n$ με ορθή πόλωση.

Ας θεωρήσουμε την επαφή  $p-n$  πολωμένη όπως στο σχήμα 2.4β, όπου η περιοχή  $p$  πολώνεται θετικά ως προς την περιοχή  $n$ .

Αποτέλεσμα της πολώσεως αυτής είναι, ότι εξωτερικά παρέχονται φορείς πλειονότητας στις περιοχές  $p$  και  $n$ . Έτσι οπές οδεύουν μέσω της περιοχής  $p$  προς την επαφή. Μερικές από αυτές εξουδετερώνουν μέρος του φορτίου χώρου στην περιοχή αραιώσεως στην πλευρά της περιοχής  $p$ , ενώ το αυτό συμβαίνει και στο απέναντι μέρος της επαφής με τα ηλεκτρόνια. Συνέπεια της μερικής αυτής εξουδετερώσεως του φορτίου χώρου είναι η ελάττωση του εύρους της περιοχής αραιώσεως και η ελάττωση του ύψους του φραγμού δυναμικού στην επαφή  $p-n$ . Τότε περισσότερες οπές στην περιοχή έχουν κινητική ενέργεια επαρκή, για να υπερβούν το φραγμό δυναμικού και εγχέονται στην περιοχή  $n$ . Συγχρόνως και ηλεκτρόνια με τον αυτό τρόπο εγχέονται από την περιοχή  $n$  στην περιοχή  $p$ . Έτσι φορείς μειονότητας εγχέονται μέσω της επαφής προς τις περιοχές  $n$  και  $p$ , με αποτέλεσμα η συγκέντρωση τούτων να παρουσιάζεται αυξημένη κοντά στα όρια της περιοχής αραιώσεως. Μακριά από την επαφή οι συγκεντρώσεις φορέων μειονότητας είναι αυτές που καθορίζονται από τη θερμοκρασία. Στο σχήμα 2.4β(γ) παρουσιάζεται η κατανομή των φορέων μειονότητας δεξιά και αριστερά της επαφής.

Οι φορείς μειονότητας που είναι σε περίσυστα κοντά στην επαφή, για παράδειγμα οι οπές στην περιοχή  $n$  τείνουν να διαχυθούν προς την πλευρά της περιοχής αυτής μακριά από την επαφή, όπου η συγκέντρωσή τους είναι μικρότερη. Κατά την πορεία τους όμως και σε μικρή απόσταση από την επαφή, επανασυνδέονται με φορείς πλειονότητας που υπάρχουν σε αφθονία στην περιοχή, δηλαδή ηλεκτρόνια στην περιοχή  $n$ . Ανάλογη είναι και η τύχη των ηλεκτρονίων στην περιοχή  $p$ . Έτσι κοντά στην επαφή, ο ρυθμός επανασυνδέσεως είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο ρυθμό στη θερμική ισορροπία και για τη διατήρησή του απαιτείται παρουσία αυξημένων συγκεντρώσεων φορέων πλειονότητας. Οι τελευταίοι παρέχονται από την εξωτερική πηγή. Εξάλλου, οι φορείς που εγχέονται μέσω της επαφής και στις δύο περιοχές προκαλούν αύξηση του ζεύματος διαχύσεως.



Σχ. 2.18.

(a) Κύκλωμα διόδου για αποκατάσταση συνεχούς συνιστώσας, (β) κυματομορφή τάσεως εισόδου, (γ) κυματομορφή τάσεως εξόδου.

## 2.19 Άλλες εφαρμογές διόδων.

Οι εφαρμογές των διόδων που εξετάσαμε στα προηγούμενα αποτελούν αντιπροσωπευτικό μόνο δείγμα των πολλαπλών εφαρμογών των διόδων. Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν τη χρήση διόδων σε κυκλώματα λογικής, σε συνδυασμούς με ενισχυτικά στοιχεία και γενικά όπου η δράση της διόδου ως διακόπτη είναι χρήσιμη. Εξάλλου οι δίοδοι LED, φωτοδίοδοι, αλλά και άλλες που δεν αναφέρθηκαν στα προηγούμενα, όπως η δίοδος LASER, η δίοδος σήραγγος, τα **ηλιακά κύτταρα** (solar cells) κλπ. χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που εκμεταλλεύονται τα ειδικά χαρακτηριστικά τους. Σημειώνομε την περίπτωση των ηλιακών κυττάρων ιδιαίτερα, που είναι επαφές ρητού κατάλληλα διαμορφωμένες, στις οποίες με την πρόσπτωση του ηλιακού φωτός δημιουργείται ηλεκτρική τάση. Την τάση αυτή εκμεταλλεύμαστε για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών τόσο επιγείων όσο και διαστημικών.

## 2.20 Ασκήσεις.

- Οι συγκεντρώσεις προσμείξεων στο υλικό εκατέρωθεν μιας επαφής  $p-n$  Si είναι  $N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  και  $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Η συγκέντρωση θερμικής ισορροπίας φορέων στον ενδογενή κρύσταλλο Si σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι  $n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , ενώ η διηλεκτρική σταθερά είναι  $1,06 \times 10^{-12} \text{ F/cm}$ . Το φορτίο του ηλεκτρονίου είναι  $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ . Δίνεται  $e/kT = 40 \text{ V}^{-1}$ . Να προσδιορισθεί:

a) Το δυναμικό επαφής σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

b) Το εύρος της περιοχής αραιώσεως.

(Απ.:  $0,806 \text{ V}$ ,  $0,327 \mu\text{m}$ )

- Ανορθωτής μισού κύματος διόδου κενού αντιστάσεως ορθής πολώσεως  $200\Omega$  τροφοδοτεί φορτίο  $1k\Omega$ . Η τάση τροφοδοτήσεως είναι  $200V$ . Να υπολογισθούν:

a) Η μέση τιμή του φεύγοντος φορτίου.

b) Η ενεργός τιμή του φεύγοντος φορτίου.

c) Η ισχύς συνεχούς φεύγοντος φορτίου.

d) Η καταναλογόμενη ισχύς στον ανορθωτή.

e) Η συνολική ισχύς που παρέχεται από το δίτυο.

(Απ.:  $75mA$ ,  $118mA$ ,  $5,6W$ ,  $2,78W$ ,  $16,7W$ )

rad ή  $360^\circ$ , δηλαδή η περίοδος της είναι

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3.10)$$

όπου  $\omega$  η κυκλική συχνότητα σε rad/s. Επειδή  $\omega = 2\pi f$ , όπου  $f$  η συχνότητα σε Hz, έπειτα ότι  $f = 1/T$ . Στα επόμενα θα χρησιμοποιούμε τον όρο “συχνότητα” γενικά, για ποια όμως συχνότητα θα μιλούμε θα καθίσταται φανερό από το εάν θα αναφερόμαστε στην  $\omega$  ή την  $f$ .

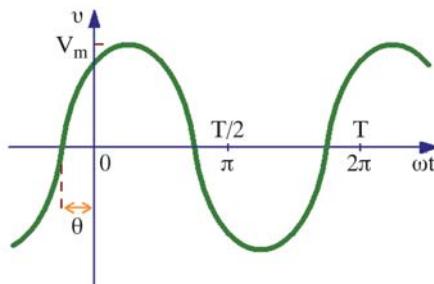
Αν η  $\theta$  είναι θετική γωνία, λέμε ότι η τάση  $v$  προγείται της  $V_m \sin \omega t$  κατά τη γωνία  $\theta$ , ενώ αν η  $\theta$  είναι αρνητική τότε η  $v$  έπειτα της  $V_m \sin \omega t$ . Η  $V_m \sin(\omega t + \theta)$  για θετική  $\theta$  είναι μεταποιημένη προς το αριστερό της  $V_m \sin \omega t$ , όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1η. Αρνητική  $\theta$  προκαλεί αντίθετη μεταποίηση. Η τάση  $V_m \cos \omega t$  θεωρείται ημιτονική τάση, γιατί μπορεί να γραφεί ως  $V_m \sin(\omega t + 90^\circ)$ .

Η απόκριση ενός κυκλώματος σε ημιτονική διέγερση βρίσκεται, όπως και στην περίπτωση των αποκρίσεων, στις διεγέρσεις με άλλους τύπους σημάτων. Έτσι, αρχικά προσδιορίζεται η διαφορική εξίσωση του κυκλώματος. Η λύση της αποτελείται από δύο συναρτήσεις, τη λύση της ομογενούς, η οποία περιγράφει τη φυσική απόκριση του κυκλώματος και τη μερική λύση, η οποία αντιστοιχεί στην τελική ή σταθερή κατάσταση του κυκλώματος. Η σταθερή κατάσταση, παρόλο ότι μεταβάλλεται χρονικά, αφού η διέγερση περιγράφεται από ημιτονική συνάρτηση του χρόνου, αναφέρεται στη συνθήκη στην οποία φτάνει το κύκλωμα, όταν εκλείφει η μεταβατική κατάσταση. Συγκεκριμένα η απόκριση στη σταθερή κατάσταση είναι ημιτονική συνάρτηση του χρόνου σταθερού πλάτους, όπως προβλέπει η μερική λύση της διαφορικής εξισώσεως. Επειδή όμως η μέθοδος αυτή καθίσταται επίπονη για διαφορικές εξισώσεις τάξεως ανώτερης της πρώτης, δεν χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της σταθερής καταστάσεως σε ημιτονική διέγερση. Αυτή επιτυγχάνεται μέσω του μετασχηματισμού φάσορα ή του μετασχηματισμού Laplace και αντικαταστάσεως στο τέλος της μεταβλητής  $s$  με  $j\omega$ , όπου  $j = \sqrt{-1}$ .

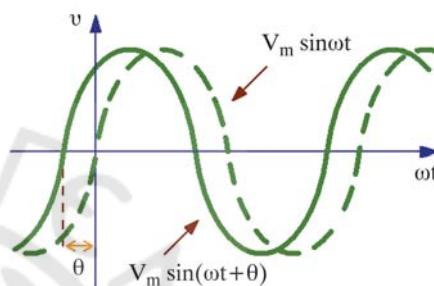
### 3.2 Ενίσχυση, ενισχυτής.

Ο όρος **ενίσχυση** αναφέρεται στην αύξηση της ισχύος ενός σήματος, επιτυγχάνεται δε με τους ενισχυτές. Οι ενισχυτές είναι γενικά **δίθυρα** κυκλώματα, δηλαδή κυκλώματα με δύο ζεύγη ακροδεκτών το ζεύγος 1, 1' για την είσοδο του σήματος από την πηγή του και το ζεύγος 2, 2' από όπου παραδίδεται το ενισχυμένο σήμα στο φορτίο (σχ. 3.2α). Περιλαμβάνουν σήμερα ως στοιχεία τους **τρανζίστορ**, **διπολικά** ή/και **μονοπολικά**, κατάλληλα πολωμένα ώστε να επιτυγχάνεται η ενίσχυση του σήματος. Πρέπει να τονισθεί ότι η αύξηση της ισχύος του σήματος επιτυγχάνεται σε βάρος της ισχύος που παρέχεται στο κύκλωμα από τις πηγές συνεχούς τάσεως πολώσεως των τρανζίστορ.

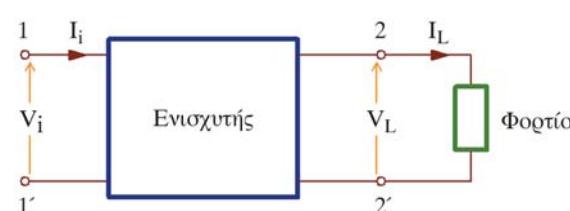
Ως δίθυρο κύκλωμα ο **ενισχυτής** μπορεί να παρασταθεί γενικά, όπως δεικνύεται στο σχήμα 3.2α. Συνήθως οι ακροδέκτες 1 και 2 είναι βραχυκυκλωμένοι ώστε οι τάσεις  $V_i$  στην είσοδο και  $V_L$  στην έξοδο του κυκλώματος να αναφέρονται ως προς την ίδια τάση, την οποία θεωρούμε μηδενική. Ο κοινός ακροδέκτης θα είναι τότε η γείωση του ενισχυτή. Ο ενισχυτής παρουσιάζει γενικά μεταξύ των ακροδεκτών εισόδου εμπέδηση, την εμπέδηση εισόδου  $Z_i$ , που δίνεται από το λόγο  $V_i/I_i$  και στην έξοδο του την εμπέδηση εξόδου  $Z_o$  που μπορεί να βρεθεί με τρόπο που εξηγούμε στο επόμενο κεφάλαιο. Για λόγους απλοποιήσεως θεωρούμε εδώ τις εμπέδησεις  $Z_i$  και  $Z_o$



**Σχ. 3.1ζ.**  
Ημιτονική τάση με πλάτος  $V_m$  και φάση  $\theta$ .



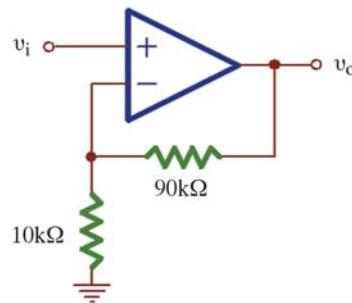
**Σχ. 3.1η.**  
Η τάση  $V_m \sin(\omega t + \theta)$  προγείται της  $V_m \sin \omega t$  κατά γωνία  $\theta$ .



**Σχ. 3.2α.**  
Ο ενισχυτής ως δίθυρο.

4. Να προσδιορισθεί η τάση  $v_o$  του κυκλώματος του σχήματος 3.8γ συναρτήσει της τάσεως  $v_i$ . Ο T.E. θεωρείται ιδανικός.

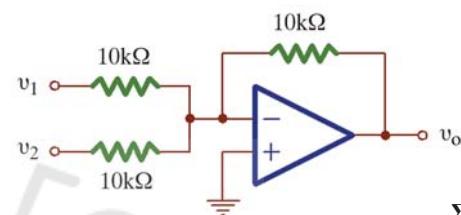
(Απ.:  $10v_i$ )



Σχ. 3.8γ.

5. Να προσδιορισθεί η τάση  $v_o$  του κυκλώματος του σχήματος 3.8δ συναρτήσει των τάσεων  $v_1$  και  $v_2$ . Ο T.E. θεωρείται ιδανικός.

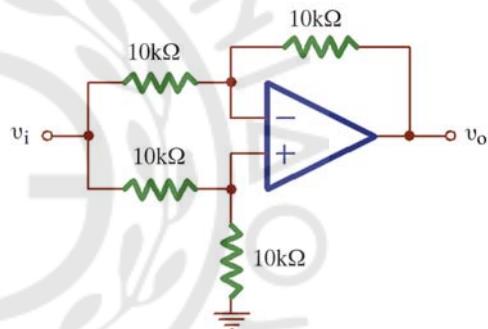
[Απ.:  $-(v_1+v_2)$ ]



Σχ. 3.8δ.

6. Να προσδιορισθεί η τάση  $v_o$  του κυκλώματος του σχήματος 3.8ε συναρτήσει της τάσεως  $v_i$ . Ο T.E. θεωρείται ιδανικός.

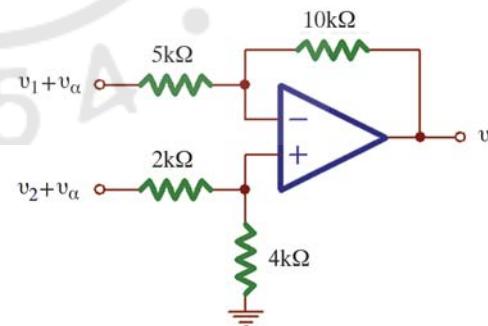
(Απ.: 0)



Σχ. 3.8ε.

7. Να προσδιορισθεί η τάση  $v_o$  του κυκλώματος του σχήματος 3.8στ συναρτήσει της τάσεως  $v_i$ . Ο T.E. θεωρείται ιδανικός.

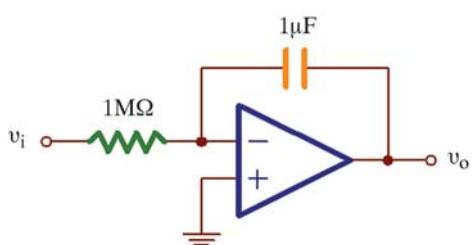
[Απ.:  $2(v_2-v_1)$ ]



Σχ. 3.8στ.

8. Να προσδιορισθεί η τάση  $v_o$  του κυκλώματος του σχήματος 3.8ζ συναρτήσει της τάσεως  $v_i$ . Η τάση  $v_i$  είναι η βαθμίδα τάσεως (ύψους 1 V). Ο T.E. θεωρείται ιδανικός.

(Απ.:  $-t$  V)



Σχ. 3.8ζ.

#### 4.7 Χαρακτηριστικές εισόδου-εξόδου του τρανζίστορ σε σύνδεση κοινού εκπομπού.

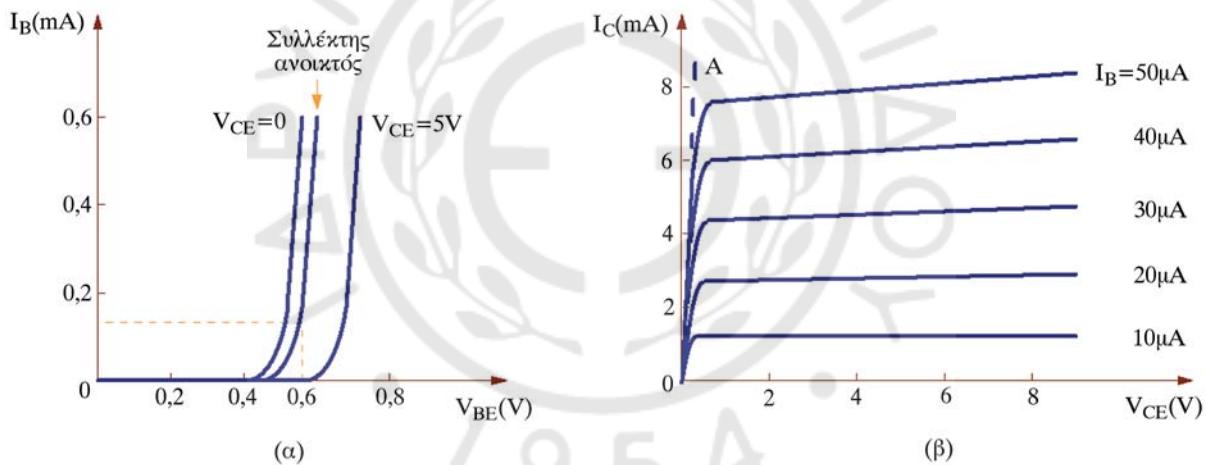
Στη σύνδεση αυτή του τρανζίστορ τα μεγέθη εισόδου είναι το ρεύμα βάσεως  $I_B$  και η τάση βάσεως-εκπομπού  $V_{BE}$ .

Επειδή η επαφή βάσεως-εκπομπού είναι ορθά πολωμένη, η σχέση  $I_B-V_{BE}$  θα παριστάνεται γραφικά από τη χαρακτηριστική ορθά πολωμένης ημιαγωγού διόδου. Στην πραγματικότητα υπάρχει μια χαρακτηριστική  $I_B-V_{BE}$  για κάθε τιμή της  $|V_{CE}|<0,5V$ , ώστε οι χαρακτηριστικές εισόδου τρανζίστορ πριν με κοινό εκπομπό να είναι όπως φαίνονται στο σχήμα 4.7(a).

Οι χαρακτηριστικές εξόδου αποτελούν τη γραφική παράσταση της σχέσεως  $I_C-V_{CE}$  με το ρεύμα βάσεως  $I_B$  ως παράμετρο, παρουσιάζονται δε στο σχήμα 4.7(b). Παρατηρούμε ότι οι χαρακτηριστικές δεν είναι ομοιόμορφα διαταγμένες για ομοιόμορφες αυξήσεις του  $I_B$ . Αυτό σημαίνει ότι η σχέση μεταξύ  $I_C$  και  $I_B$  δεν είναι εντελώς γραμμική, όπως δηλώνει η σχέση (4.17). Επίσης η ελαφρά κλίση των χαρακτηριστικών σημαίνει ότι οι τιμές των  $\alpha$  και  $\beta$  αυξάνονται με τη  $V_{CE}$ .

Η περιοχή αριστερά της 0A αποτελεί την **περιοχή κόρου**. Στην περιοχή αυτή αύξηση του ρεύματος βάσεως δεν συνοδεύεται από αύξηση του ρεύματος συλλέκτη.

Επίσης, η χαρακτηριστική για  $I_B=0$  δεν συμπίπτει με τον άξονα των  $V_{CE}$ , αλλά βρίσκεται λίγο πάνω απ' αυτόν. Η περιοχή κάτω απ' αυτήν (ορθότερα κάτω από τη χαρακτηριστική για  $I_B=-I_{CBO}$ ), αποτελεί την **περιοχή αποκοπής** του τρανζίστορ. Η περιοχή των χαρακτηριστικών μεταξύ κόρου και αποκοπής ονομάζεται **ενεργός περιοχή** του τρανζίστορ. Πιο κάτω θα θεωρήσουμε τη χαρακτηριστική με  $I_B=0$  ότι συμπίπτει με τον άξονα των  $V_{CE}$ .



Σχ. 4.7.

Χαρακτηριστικές (a) εισόδου και (b) εξόδου τρανζίστορ πριν με κοινό εκπομπό.

#### 4.8 Γραφική ανάλυση ενισχυτή με κοινό εκπομπό.

Θεωρούμε τώρα το κύκλωμα του σχήματος 4.8a, στο οποίο η πηγή σήματος  $u_s$  είναι πηγή εναλλασσόμενης τάσεως. Στο ίδιο σχήμα τα ρεύματα του τρανζίστορ παριστάνονται με σύμβολα διάφορα απ' αυτά του σχήματος 4.6a, όπου τα ρεύματα ήταν συνεχή. Εδώ το ρεύμα βάσεως  $i_B$  έχει δύο συνιστώσες: τη συνεχή  $I_B$ , η οποία οφείλεται στην πηγή πολωσεως της βάσεως  $V_{BB}$ , και τη μεταβαλλόμενη  $i_B$ , η οποία οφείλεται στην παρουσία της πηγής σήματος και έχει μικρό πλάτος σε σχέση με την τιμή του  $I_B$ . Θεωρούμε ότι και η μεταβαλλόμενη συνιστώσα είναι εναλλασσόμενη, γιατί είναι δυνατόν να μην είναι εναλλασσόμενη λόγω της μη γραμμικότητας των χαρακτηριστικών εισόδου του τρανζίστορ [σχ. 4.7(a)].

Στην πράξη για την αποφυγή της μεταβολής της μορφής του σήματος, δηλαδή της παραμορφώσεώς του από το αύτιο αυτό, η αντίσταση  $R_B$  επιλέγεται να είναι πολύ μεγαλύτερη από την αντίσταση της διόδου βάσεως-εκπομπού, ώστε το ρεύμα βάσεως να ορίζεται απ' αυτήν και από τις πηγές τάσεως μόνο. Μετά από αυτά, το ρεύμα  $i_B$  θα είναι η στιγμιαία τιμή του ρεύματος βάσεως, θα δίνεται δε από τη σχέση

οπότε η (4.53) γίνεται:

$$g_m = g_{mo} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_p} \right) \quad (4.55)$$

Η  $g_{mo}$  είναι θετική ποσότητα. Π.χ. για FET διαύλου- $n$ ,  $V_p < 0$  και από τη σχέση (4.54)  $g_{mo} > 0$ .

Οι κατασκευαστές παρέχουν την τιμή της  $g_{mo}$  πολλές φορές με το σύμβολο  $y_{fs}$ , στο οποίο γίνεται αγωγιμότητα,  $f$  (forward) ορθή φορά και  $s$  σύνδεση με κοινή πηγή.

Η σχέση (4.54) μπορεί να χρησιμεύσει για τον προσδιορισμό της τάσεως φραγής  $V_p$ . Πράγματι, αν μετρηθούν τα  $g_{mo}$  και  $I_{DSS}$  με  $V_{GS}=0$ , αυτή δίνει την  $V_p$ .

Τέλος, βάσει της σχέσεως (4.50), η (4.55) γράφεται και με την ακόλουθη μορφή:

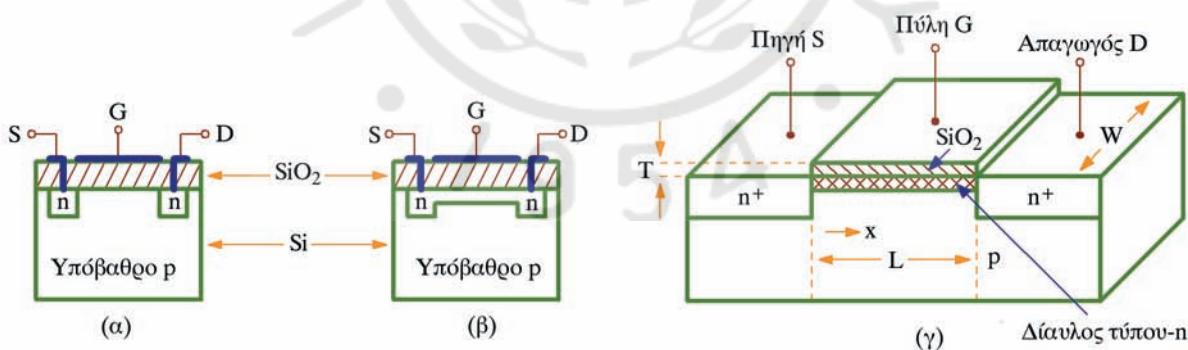
$$g_m = g_{mo} \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \quad (4.56)$$

Απ' αυτή προκύπτει ότι η  $g_m$  εξαρτάται από το ρεύμα ηρεμίας απαγωγού  $I_D$ , δεδομένου δε ότι  $I_D \leq I_{DSS}$ , θα έχουμε και  $g_m \leq g_{mo}$ .

#### 4.19 Το FET μονωμένης πύλης (IGFET ή MOST).

Στον τύπο αυτό του FET η πύλη είναι μονωμένη ηλεκτρικά από το δίαυλο, με συνέπεια η αντίσταση εισόδου (πύλης-πηγής) να είναι εξαιρετικά υψηλή. Ως μόνωση χρησιμεύει συνήθως στρώμα από διοξείδιο του πυριτίου. Γι' αυτό το FET τούτο λέγεται **FET μονωμένης πύλης** (insulated gate FET) ή MOSFET (metal-oxide semiconductor FET) ή απλούστερα MOST.

Υπάρχουν δύο τύποι MOST, **προσανξήσεως** ή **πυκνώσεως** (enhancement) και **διακενώσεως** ή **αραιώσεως** (depletion). Και οι δύο δεικνύονται σε τομή στο σχήμα 4.19α για MOST με δίαυλο- $n$ . Παρατηρούμε ότι ο τύπος προσανξήσεως δεν έχει εκ κατασκευής δίαυλο τύπου- $n$  ενώ ο αραιώσεως έχει. Εξάλλου στο σχήμα 4.19α(γ) παρουσιάζεται σχηματικά σε τρεις διαστάσεις το MOSFET προσανξήσεως διαύλου- $n$ . Όπως φαίνεται, το μονωτικό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου κάτω από την πύλη έχει πάχος  $T$ , πλάτος  $W$  και μήκος  $L$ , το οποίο ισούται με την απόσταση του απαγωγού από την πηγή. Αμέσως πιο κάτω εξηγούμε τη φυσική λειτουργία κάθε τύπου MOSFET.



Σχ. 4.19α.

Σχηματική παράσταση (a) ενός MOST προσανξήσεως, (b) ενός MOST αραιώσεως διαύλου- $n$  και (γ) ενός MOST προσανξήσεως σε τρεις διαστάσεις.

##### 4.19.1 Λειτουργία του MOSFET προσανξήσεως διαύλου- $n$ .

Ας θεωρήσουμε την περιοχή του υπόβαθρου βραχυκυλωμένη με την πηγή, όπως συνήθως συμβαίνει κατά τη χρήση του στοιχείου. Με την πύλη επίμητης βραχυκυλωμένη με την πηγή, το ρεύμα πηγής-απαγωγού είναι μηδέν, λόγω της υπάρξεως ανάστροφα πολωμένης επαφής ρητής στον απαγωγό είτε στην πηγή, είτε στην πύλη. Ανεξάρτητα από την πολικότητα της τάσεως πηγής-απαγωγού.

Εάν τώρα η  $V_{GS}$  γίνει λίγο θετική, το θετικό φορτίο στην πύλη απωθεί οπές από το υπόβαθρο κάτω από

Στη συνέχεια, και με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστό το ισοδύναμο του τρανζίστορ, το κύκλωμα του σχήματος 5.1β αναλύεται και προσδιορίζονται οι ενισχυτής ρεύματος  $i_L/i_1$ , τάσεως  $v_o/v_1$  ή  $v_o/v_s$ , καθώς και τα λοιπά χαρακτηριστικά στοιχεία του ενισχυτή.

## 5.2 Υψηλοδικό ισοδύναμο του τρανζίστορ.

Ας θεωρήσουμε το τρανζίστορ σε σύνδεση κοινού εκπομπού, όπου έχει πολωθεί σε κατάλληλο σημείο ηρεμίας. Αν το πλάτος του σήματος είναι πολύ μικρό, ώστε οι προκαλούμενες μετατοπίσεις του σημείου ηρεμίας να είναι κι αυτές πολύ μικρές, μπορούμε να δεχθούμε ότι οι μεταβολές στις τιμές των σταθερών μεγεθών  $I_B$ ,  $V_{BE}$ ,  $I_C$ ,  $V_{CE}$  συνδέονται μεταξύ τους γραμμικά. Έτσι, για τις αντίστοιχες μεταβολές  $i_b$ ,  $v_{be}$ ,  $i_c$ ,  $v_{ce}$  μπορούμε να γράψουμε τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\begin{aligned} v_{be} &= h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \\ i_c &= h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Οι εξισώσεις (5.1) είναι προσεγγιστικές και μπορούν να δικαιολογηθούν ως εξής:

Από τις χαρακτηριστικές εισόδου και εξόδου των σχημάτων 4.4β και 4.4γ, παρατηρούμε ότι μπορούμε να δεχθούμε π.χ. την τάση  $v_{BE}$  και το ρεύμα  $i_C$  ως συναρτήσεις του ρεύματος  $i_B$  και της τάσεως  $v_{CE}$ . Τούτο γράφεται μαθηματικά ως:

$$\begin{aligned} v_{BE} &= f_B(i_B, v_{CE}) \\ i_C &= f_C(i_B, v_{CE}) \end{aligned} \quad (5.2)$$

Αν θεωρήσουμε μικρές μεταβολές στα μεγέθη  $i_B$  και  $v_{CE}$ , λαμβάνομε τις ακόλουθες μεταβολές των  $v_{BE}$  και  $i_C$ :

$$\begin{aligned} \Delta v_{BE} &\equiv dv_{BE} = \frac{\partial f_B}{\partial i_B} di_B + \frac{\partial f_B}{\partial v_{CE}} dv_{CE} \\ \Delta i_C &\equiv di_C = \frac{\partial f_C}{\partial i_B} di_B + \frac{\partial f_C}{\partial v_{CE}} dv_{CE} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Οι σχέσεις αυτές εκφράζουν γραμμική εξάρτηση των μεγεθών  $v_{BE}$  και  $i_C$  από τα  $i_B$  και  $v_{CE}$ , με την προϋπόθεση ότι οι μεταβολές τους είναι μικρές, δηλαδή το στοιχείο λειτουργεί σε συνθήκες μικρών σημάτων. Θεωρώντας ότι τα διαφορικά αποτελούν τις εναλλασσόμενες συνιστώσες των αντιστοίχων μεγεθών, π.χ. ότι  $dv_{BE}=v_{be}$ , όπου  $v_{BE}=V_{BE}+v_{be}$  και δίνοντας κατάλληλους συμβολισμούς στις μερικές παραγόντες, λαμβάνομε τις εξισώσεις (5.1).

Οι σχέσεις (5.1) αποτελούν το μαθηματικό ισοδύναμο του τρανζίστορ στο εναλλασσόμενο, οι δε ποσότητες  $h_{je}$  ( $j=i,r,f$ , ή  $o$ ) τις υψηλοδικές παραμέτρους του τρανζίστορ σε σύνδεση κοινού εκπομπού. Η φυσική σημασία τουών προκύπτει από τα ακόλουθα:

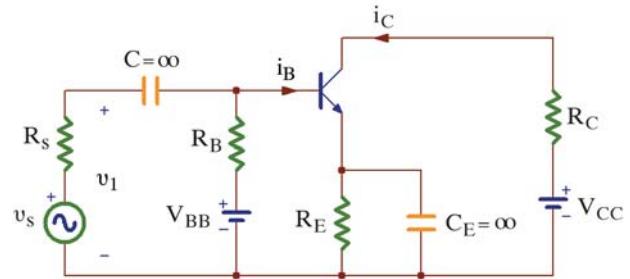
Θέτοντας στην πρώτη από τις (5.1)  $v_{ce}=0$ , οπότε η  $v_{ce}=V_{CE}$  θα είναι σταθερή, βρίσκομε:

$$h_{ie} = \left. \frac{v_{be}}{i_{ib}} \right|_{v_{ce}=\text{σταθερή}}$$

Δηλαδή, η παράμετρος  $h_{ie}$  αποτελεί την αντίσταση εισόδου του στοιχείου με κοινό εκπομπό, όταν η έξοδός του είναι βραχυκυλωμένη στο εναλλασσόμενο.

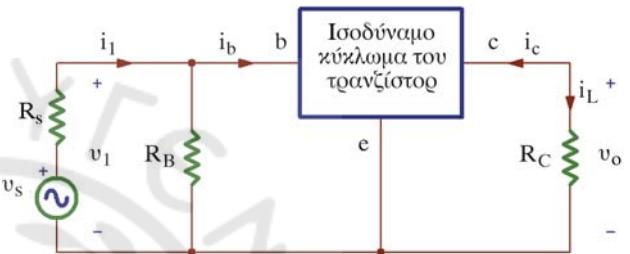
Ομοίως βρίσκομε ότι:

$$h_{re} = \left. \frac{v_{be}}{v_{ce}} \right|_{i_B=\text{σταθερό}}$$



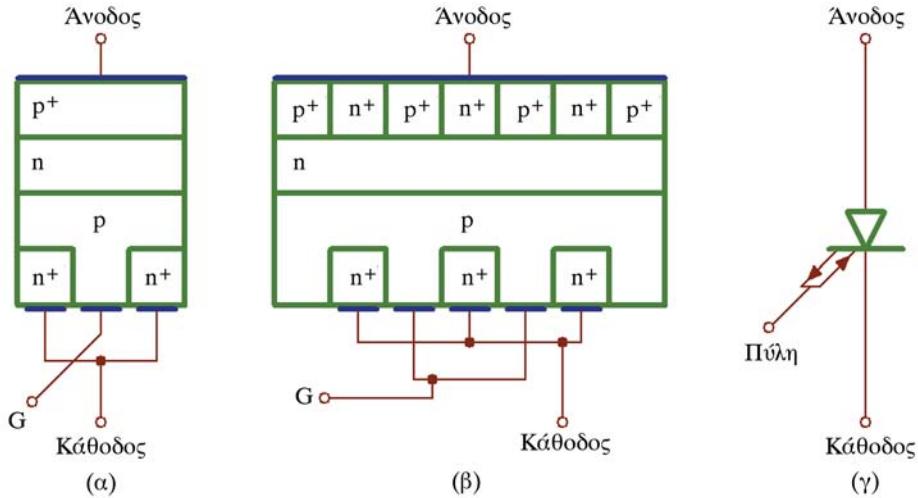
Σχ. 5.1α.

Ενισχυτής με κοινό εκπομπό.



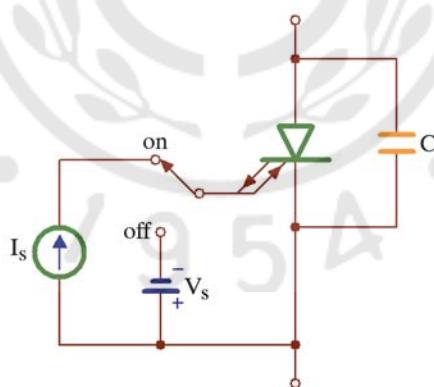
Σχ. 5.1β.

Ισοδύναμο κύκλωμα ενισχυτή κοινού εκπομπού στο εναλλασσόμενο.



Σχ. 6.2γ.  
Σύγκριση δομής του κοινού θυρίστορ (α) με εκείνη του GTO (β) και σύμβολο του GTO (γ).

τάβασή του από τη μια κατάσταση στην άλλη. Η πηγή ρεύματος  $I_s$  συνδέεται στην πύλη για να έλθει το GTO στην κατάσταση της αγωγής, ενώ η πηγή τάσεως  $V_s$  πολλώνει ανάστροφα την επαφή ρη πύλης-καθόδου, πρέπει η τιμή της να είναι μικρότερη από την τάση καταρρεύσεως αυτής της επαφής. Ο πυκνωτής  $C$  συνδέεται μεταξύ των ακροδεκτών ανόδου και καθόδου του GTO, για να εμποδίσει την απότομη αύξηση της τάσεως ανόδου-καθόδου κατά τη μετάβαση του στοιχείου από την αγωγή στην αποκοτή. Στην πράξη, τόσο η πηγή ρεύματος  $I_s$  όσο και η πηγή τάσεως  $V_s$  δημιουργούνται μέσω ενός κυκλώματος με τρανζίστορ και μιας πηγής πολώσεως. Η λειτουργία του κυκλώματος αυτού ελέγχεται από εξωτερικά επιβαλλόμενους ορθογώνιους παλμούς.



Σχ. 6.2δ.  
Βασικές ανάγκες του κυκλώματος πύλης του GTO.

### 6.3 Το τρανζίστορ ισχύος.

Στα ηλεκτρονικά ισχύος, που αναφερόμαστε στο παρόν και το επόμενο κεφάλαιο, τρία είδη τρανζίστορ έχουν αποδειχθεί χρήσιμα. Αυτά είναι τα ακόλουθα:

α) Το διπολικό τρανζίστορ ισχύος.

β) Το MOSFET ισχύος.

γ) Το μονωμένης πύλης διπολικό τρανζίστορ IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

Παρακάτω θα μελετήσουμε το διπολικό τρανζίστορ ισχύος από άποψη δομής και λειτουργίας με κάποια λεπτομέρεια, τα δε άλλα δύο σε συντομία.

### Παράδειγμα 2.

Στο κύκλωμα του σχήματος 7.3δ η εναλλασσόμενη τάση τροφοδοσίας είναι  $20V(rms)$ . Θεωρώντας ότι το φεύγοντα είναι συνεχόμενο, να υπολογισθεί η μέση τιμή της τάσεως στο φορτίο, όταν η γωνία εναύσεως είναι  $45^\circ$  και υπάρχει σταθερή πτώση τάσεως ορθής πολώσεως  $1,5V$  στο θυρίστορ και  $0,7V$  στη δίοδο.

**Λύση:**

Αν δεν υπήρχαν οι πτώσεις τάσεως ορθής πολώσεως στο θυρίστορ και στη δίοδο θα είχαμε:

$$V_{dc} = \frac{20\sqrt{2}}{2\pi} (1 + \cos 45^\circ) = 7,685V$$

Το θυρίστορ άγει για  $180^\circ - 45^\circ = 135^\circ$ , οπότε προκύπτει μια μέση πτώση τάσεως στη διάρκεια της περιόδου ίση με:

$$\frac{135}{360} \times 1,5 = 0,563V$$

Όταν η δίοδος άγει, προκαλείται μια πτώση τάσεως σε αυτήν, που στη διάρκεια της περιόδου έχει μια μέση τιμή ίση με:

$$\frac{180+45}{360} \times 0,7 = 0,438V$$

Επομένως η μέση τιμή της τάσεως στο φορτίο θα είναι:

$$7,685 - 0,563 - 0,438 = 6,684V$$

Παρατηρούμε ότι, όταν η προς ανόρθωση τάση είναι μικρή, οι πτώσεις τάσεως στο θυρίστορ και στη δίοδο δεν είναι αμελητέες.

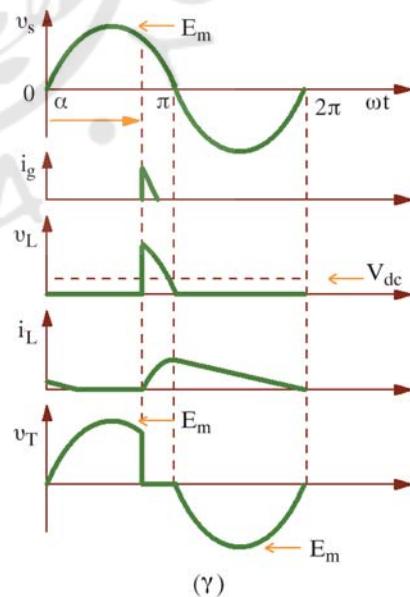
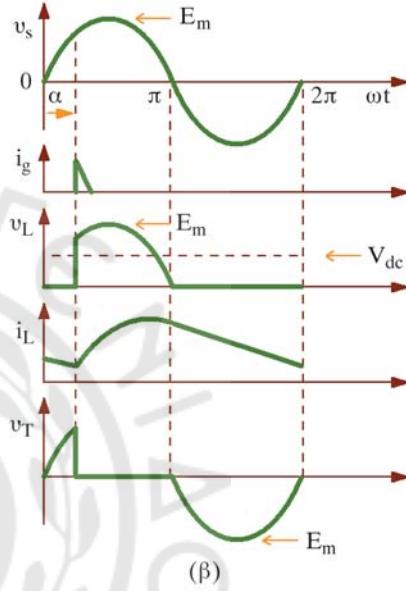
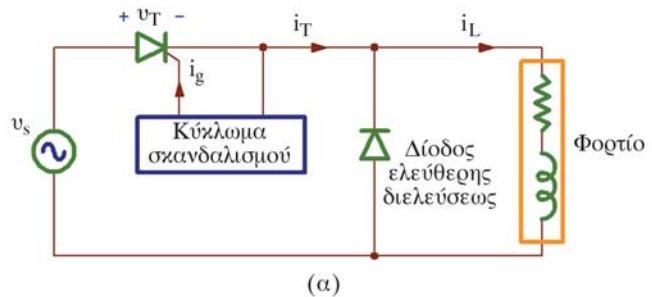
#### 7.3.2 Ανόρθωση πλήρους κύματος.

Για αύξηση της αποδόσεως της ανορθώσεως εκμεταλλευόμαστε και την τάση κατά την άλλη ημιπερίοδο της κυματομορφής, χρησιμοποιώντας επιπλέον ανορθωτικά στοιχεία, διόδους ή θυρίστορ. Τότε η ανόρθωση ονομάζεται **πλήρους κύματος** (Full-Wave Rectification, F.W.R.). Θα εξετάσουμε εδώ δύο περιπτώσεις. Την ανόρθωση πλήρους κύματος με διόδους και ωμικό φορτίο και την ανόρθωση πλήρους κύματος με διόδους και θυρίστορ με επαγωγικό φορτίο.

##### a) Ανόρθωση πλήρους κύματος με διόδους και ωμικό φορτίο.

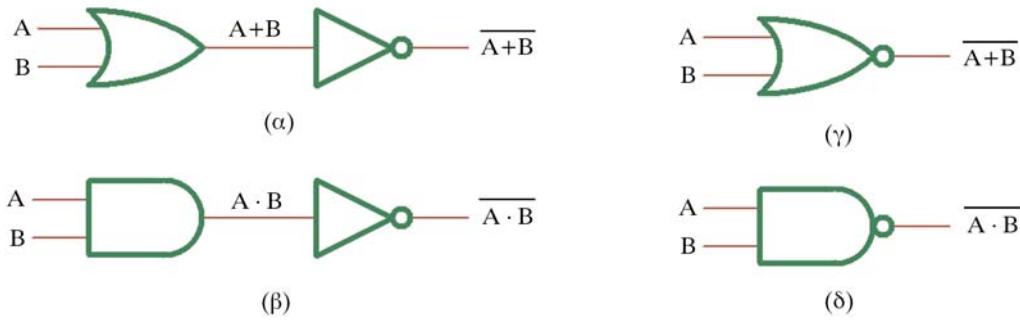
Στην ανόρθωση πλήρους κύματος χρησιμοποιούνται δύο δίοδοι, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 7.3ε.

Τα φεύγοντα στις διόδους είναι τα ακόλουθα:



Σχ. 7.3δ.

(a) Κύκλωμα ανορθώσεως μισού κύματος με θυρίστορ και δίοδο μεταβάσεως, (β) και (γ) οι κυματομορφές των διαφόρων φεύγοντων και τάσεων στο κύκλωμα για δύο διαφορετικές στιγμές εναύσεως του θυρίστορ.

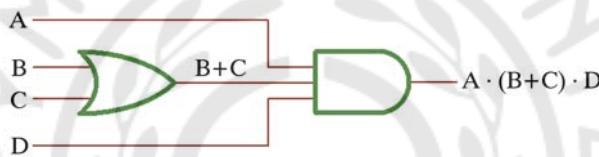


Σχ. 8.4β.

Πραγματοποίηση πύλης NOR (α) και πύλης NAND (β) από τις βασικές πύλες και (γ) και (δ) σύμβολα πυλών NOR και NAND αντίστοιχα.

έχουν περισσότερες των δύο εισόδους. Οι πίνακες αληθείας τους επεκτείνονται ανάλογα για να συμπεριλάβουν και τις επιπλέον μεταβλητές στις εισόδους τους.

Οι πιο πάνω βασικές πύλες μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους, για την πραγματοποίηση πολυπλόκων λογικών συναρτήσεων. Έτσι στο σχήμα 8.4γ η έξοδος μίας πύλης OR, που εκτελεί την πράξη  $B+C$ , τροφοδοτεί τη μία από τις εισόδους πύλης AND, η έξοδος της οποίας θα είναι στην κατάσταση που ορίζει η συνάρτηση  $A \cdot (B + C) \cdot D$ .



Σχ. 8.4γ.

Πραγματοποίηση της συναρτήσεως  $A \cdot (B + C) \cdot D$ .

## 8.5 Θεωρήματα της άλγεβρας Boole.

Για τις δυαδικές μεταβλητές ισχύουν τα πιο κάτω θεωρήματα:

$$\begin{array}{ll} A+1=1 & A \cdot 1=A \\ A+0=A & A \cdot 0=0 \\ A+A=A & A \cdot A=A \\ A+\bar{A}=1 & A \cdot \bar{A}=0 \end{array}$$

Η απόδειξη αυτών ακολουθεί τα όσα είπαμε στην παράγραφο 8.3.

### a) Θεωρήματα αντιμεταθέσεως.

$$\begin{aligned} A \cdot B &= B \cdot A \\ A + B &= B + A \end{aligned} \tag{8.1}$$

### β) Θεωρήματα προσεταιρισμού.

$$\begin{aligned} A \cdot (B \cdot C) &= (A \cdot B) \cdot C \\ A + (B + C) &= (A + B) + C \end{aligned} \tag{8.2}$$

### γ) Θεωρήματα επιμερισμού.

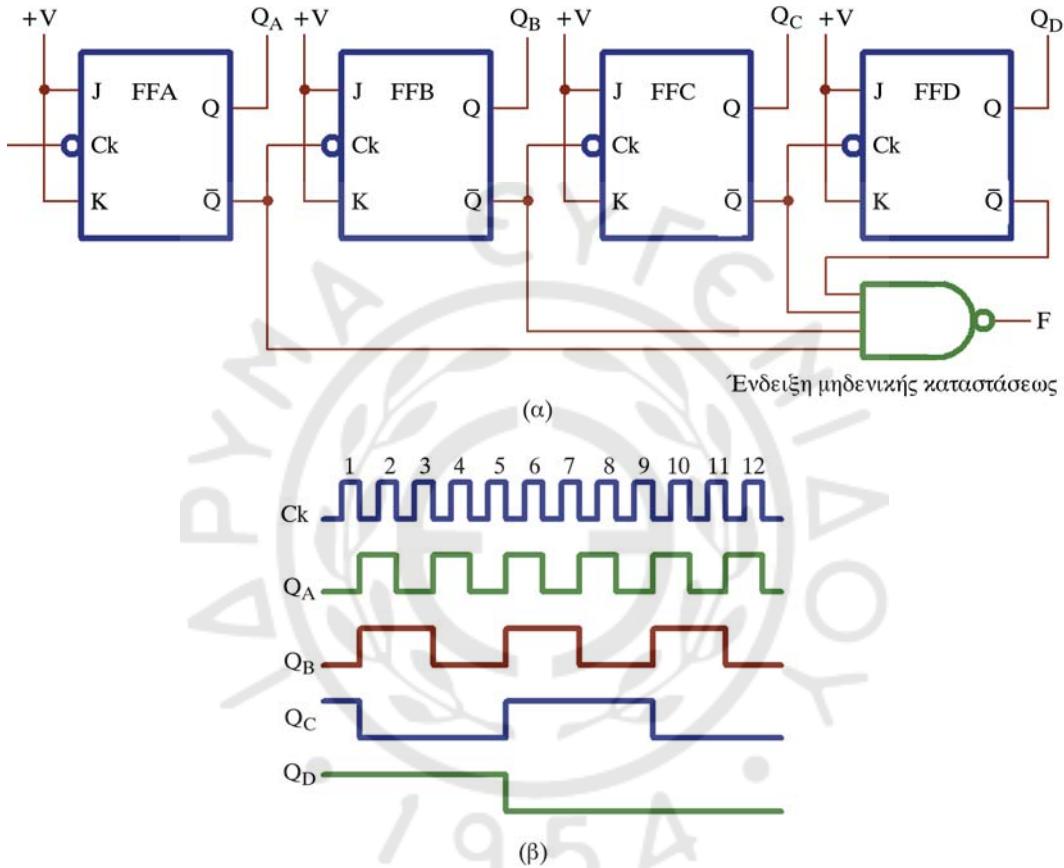
$$\begin{aligned} A \cdot B + A \cdot C &= A \cdot (B + C) \\ (A + B) \cdot (A + C) &= A + B \cdot C \end{aligned} \tag{8.3}$$

Η απόδειξη αυτών μπορεί να δοθεί βάσει των πινάκων αληθείας. Συντομότερα για το τελευταίο έχομε:

ρετικός (countdown). Η ανάγκη για έναν τέτοιο απαριθμητή παρουσιάζεται για παράδειγμα όταν θέλουμε να γνωρίζουμε κάθε στιγμή πόσος χρόνος απομένει για να λήξει ένας αγώνας μπάσκετ.

Για την πραγματοποίηση ενός τέτοιου απαριθμητή κάνομε χρήση της εξόδου  $\bar{Q}$  των φλιπ-φλοπ, που τη συνδέουμε στην είσοδο φιλογού του επόμενου φλιπ-φλοπ. Η κατάσταση όμως του απαριθμητή δίνεται πάλι από την εξόδο  $Q$  των φλιπ-φλοπ. Ένας τέτοιος ασύγχρονος δυαδικός απαριθμητής παρουσιάζεται στο σχήμα 8.10θ(α) με τις σχετικές κυματομορφές στο σχήμα 8.10θ(β). Όπως φαίνεται από τις κυματομορφές, ο αρχικά ενταμευμένος αριθμός είναι ο 12 (1100), μετά δε το δωδέκατο παλμό εισόδου ο αριθμός μηδενίζεται ( $Q_A = Q_B = Q_C = Q_D = 0$ ).

Τέλος υπάρχει η δυνατότητα να προγραμματισθεί απαριθμητής να μετρά προς τα άνω μέχρις ενός προκαθορισμένου αριθμού ή για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια ο καταχωρηθείς αριθμός να ελαπτούται, όπως πιο πάνω, μέχρι να γίνει μηδέν (up-down counter, αμφίδρομος απαριθμητής).



Σχ. 8.10θ.

(α) Ασύγχρονος δυαδικός αφαιρετικός (countdown) απαριθμητής και (β) χαρακτηριστικές κυματομορφές.

### 8.11 Καταχωρητές ολισθήσεως.

Σε πολλές περιπτώσεις, όπως π.χ. όταν εκτελούμε δυαδική αριθμητική στον υπολογιστή, είναι αναγκαίο να αποθηκεύομε δυαδικούς αριθμούς ως λέξεις, σε κυκλώματα που ονομάζονται καταχωρητές. Ο καταχωρητής είναι ένας συνδυασμός από φλιπ-φλοπ, κατάλληλος γι' αυτήν την αποθήκευση των ψηφιακών σημάτων. Ένας τέτοιος καταχωρητής σχηματίζεται από τα τέσσερα φλιπ-φλοπ στο σχήμα 8.10η. Κάθε δυαδικό ψηφίο στη λέξη απαιτεί και ένα φλιπ-φλοπ για αποθήκευσή του και έτοι για καταχώρηση μιας λέξεως με N-δυαδικά στοιχεία χρειάζονται N φλιπ-φλοπ.

Συχνά όμως είναι χρήσιμο να μετακινείται η αποθήκευμένη πληροφορία στον καταχωρητή κατά μήκος της αλυσίδας των φλιπ-φλοπ, χωρίς βέβαια να αλλάζει η σχετική κυματομορφή του σήματος. Ο καταχωρητής ονομάζεται τότε καταχωρητής ολισθήσεως (K.O.).

Στο σχήμα 8.11(α) φαίνεται ένας καταχωρητής ολισθήσεως των τεσσάρων δυαδικών ψηφίων. Τα φλιπ-φλοπ είναι τύπου RS, αλλά το πρώτο, το FFD, έχει μετατραπεί σε D φλιπ-φλοπ. Να σημειωθεί ότι με τον τρόπο συνδέσεως τους αποκλείεται να συμβεί η περίπτωση  $S=R$ , οπότε αποκλείεται και η περίπτωση απροσδιοριστίας στη λειτουργία των φλιπ-φλοπ.

Για την κατανόηση της λειτουργίας του κυκλώματος, ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να καταχωρίσουμε τα δεδομένα 0101, τα οποία έχουνται στην είσοδο του καταχωρητή σειριακά με πρώτο το LSB. Στην αρχή γίνεται εκκαθάριση όλων των φλιπ-φλοπ στέλνοντας

# ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ



## Εισαγωγή.

Για την κατανόηση των ηλεκτρονικών είναι εντελώς απαραίτητη η άσκηση των φοιτητών στο εργαστήριο. Η διδασκαλία του μαθήματος αυτού συμπληρώνεται με την πρακτική εφαρμογή, έτσι ώστε ο εκπαιδευόμενος να έχει πλήρη αντίληψη της εμφανίσεως, του μεγέθους, του όγκου και του βάρους των ηλεκτρονικών στοιχείων που σπουδάζει, καθώς και των ιδιοτήτων τους, όταν τα χρησιμοποιεί στην πράξη. Εξάλλου, στο εργαστήριο θα κατανοήσει και τη λειτουργία των οργάνων, που θα του δώσουν τη δυνατότητα να κάνει τις διάφορες μετρήσεις για τον έλεγχο της καλής λειτουργίας των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.

Στο μέρος αυτό του βιβλίου διατυπώνονται οκτώ πειραματικές ασκήσεις, που θα πρέπει να εκτελέσει ο εκπαιδευόμενος στο εργαστήριο. Είναι διατυπωμένες με τρόπο ώστε αυτός να διευκολύνεται στην εκτέλεση της ασκήσεως χωρίς όμως να αποκλείεται η ανάγκη για αυτενέργειά του. Το τελευταίο αναφέρεται κυρίως στην απόκτηση ευχέρειας για υπολογισμούς και στην ανάπτυξη κριτικής υπέψεως. Είναι ανάγκη ο εκπαιδευόμενος, πριν εισέλθει στο εργαστήριο για την εκτέλεση μιας ασκήσεως, να έχει μελετήσει τη σχετική θεωρία από το πρώτο μέρος του βιβλίου και να είναι ενήμερος της λειτουργίας των οργάνων που θα χρησιμοποιήσει. Για τους λόγους αυτούς, στο τέλος του φύλλου που περιγράφει την πειραματική διαδικασία κάθε ασκήσεως παρατίθενται οι αριθμοί σελίδων του βιβλίου που περιγράφουν τη σχετική θεωρία. Εξάλλου, στην αρχή του φύλλου της ασκήσεως αναφέρονται τα ηλεκτρονικά όργανα που είναι απαραίτητα για τις σχετικές μετρήσεις. Για τη διευκόλυνση του εκπαιδευόμενου στο έργο αυτό, καθώς και για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου και της ακρίβειας των λαμβανομένων μετρήσεων, παραθέτομε αμέσως πιο κάτω σύντομη περιγραφή των απαιτουμένων οργάνων για την εκτέλεση των ασκήσεων.

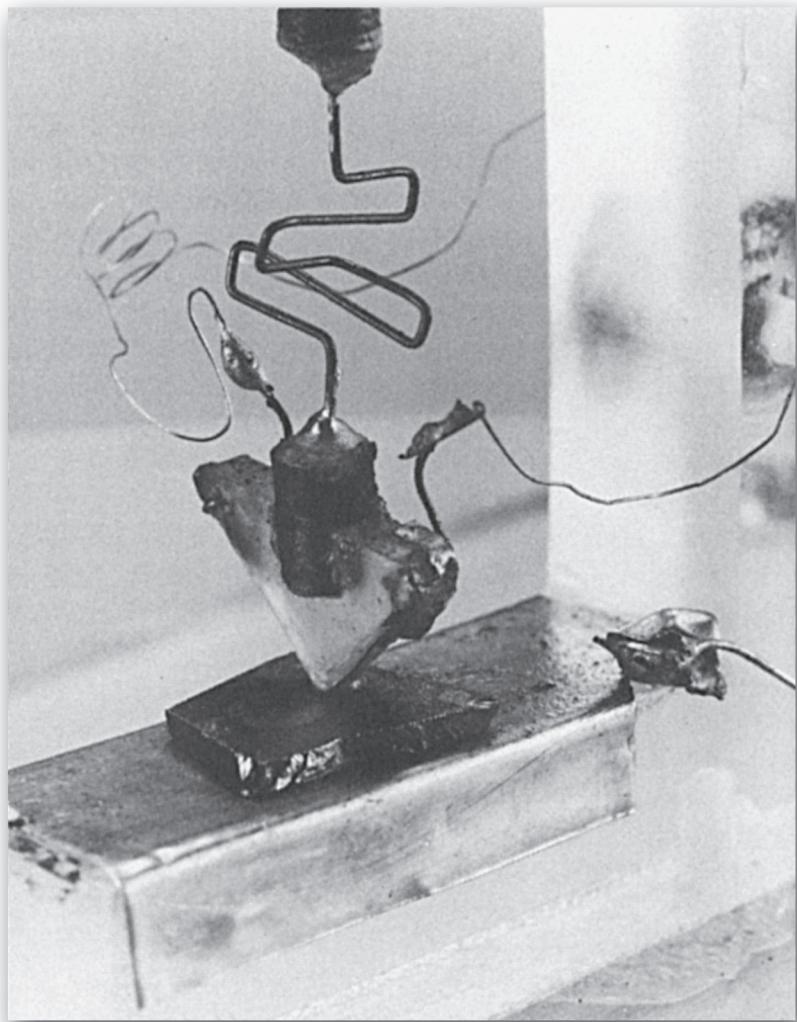
Κατά τη διάρκεια της εκτελέσεως της ασκήσεως ο εκπαιδευόμενος καταγράφει τις ενδείξεις των οργάνων μετρήσεων, τις τυχόν παρατηρήσεις του επ' αυτών, καθώς και πιθανές διευκρινίσεις σχετικά με τη μέθοδο διεξαγωγής κάθε μέρους της ασκήσεως. Αργότερα, κατά την ώρα της μελέτης του κάνει τους διάφορους υπολογισμούς που απαιτεί η άσκηση και καταγράφει τα συμπεράσματά του. Για όλα αυτά διατηρεί σε καλή κατάσταση ένα κατάλληλο τετράδιο εργαστηρίου, που αποσκοπεί βασικά σε ό,τι και το Log book που διατηρεί ο πλοίαρχος κάθε υπάλληλη.

## Όργανα μετρήσεων.

Τα απαραίτητα όργανα μετρήσεων για κάθε άσκηση επιλέγονται από τον ακόλουθο κατάλογο:

- Παλμογράφος.
- Ηλεκτρονικό αναλογικό βολτόμετρο (dc και ac).
- Ψηφιακό βολτόμετρο ή πολύμετρο.
- Πηγή συνεχούς τάσεως.
- Γεννήτρια ημιτονικών και τετραγωνικών παλμών μεταβλητής συχνότητας.

Τα κυκλώματα κατασκευάζονται (συνδεσμολογούνται) πάνω σε ειδικές πλακέτες (boards), που φέρουν σειρές από 5 βραχυκυκλωμένες εισωτερικά λεπτές τρύπες (superstrips). Η διάμετρος κάθε τρύπας είναι κατάλληλη, ώστε να εφαρμόζει καλά ο κάθε ακροδέκτης του χρησιμοποιούμενου ηλεκτρονικού στοιχείου. Οι



Φωτογραφία του πρώτου τρανζίστορ που κατασκευάστηκε στα Bell Laboratories των Η.Π.Α. το 1947 και για το οποίο οι Shockley, Bardeen και Brattain έλαβαν το βραβείο Νόμπελ το 1956.